

UNIVERSITÉ DE LIMOGES

ÉCOLE DOCTORALE ED521 Sciences et Ingénierie pour l'information

Laboratoire XLIM - UMR CNRS Université de Limoges 7252

Thèse N°[32-2012]

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Spécialité : Image Signal et Automatique

Présentée et soutenue par

Sébastien PEYRAUD

le 02/10/2012

**Localisation 3D de mobile en milieu urbain par
fusion d'informations satellitaires, proprioceptives
et cartographiques**

Thèse dirigée par Dominique MEIZEL, Professeur

Stéphane RENAULT, Maître de conférences

JURY :

Rapporteurs :

M. François PEYRET, Directeur de recherche, IFSTTAR

M. Philippe BONNIFAIT, Professeur, Université de Technologie de Compiègne

Examineurs :

M. Eric ROYER, Maître de conférences, Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand)

Mme Ouiddad LABBANI-IGBIDA, Maître de conférences (HDR), Université de Picardie Jules Vernes

Invités :

M. David BÉTAILLE, Chargé de recherche, IFSTTAR

Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Dominique Meizel et Stéphane Renault. Ils m'ont permis, au travers du sujet qu'ils m'ont proposé et de la confiance qu'ils m'ont témoigné, de m'épanouir pleinement dans cette expérience toute particulière qu'est une thèse.

Je tiens ensuite à remercier tout les membres de l'équipe Mécatronique de l'ENSIL qui m'ont, dès le départ, plus considérés comme un collègue que comme un étudiant.

De la même manière, je souhaite exprimer mes remerciements aux membres du projet CityVIP, plus particulièrement aux équipes de Nantes et de Compiègne qui ont rendu mon travail à la fois plus facile et plus passionnant.

Enfin, étant une personne qui trouve son équilibre au sein de ses proches, les dernières lignes de ces remerciements sont tous naturellement destinées à remercier toute ma famille et mes amis qui me soutiennent depuis tant d'années.

à Éléa ma princesse, Carine ma merveilleuse femme et mes chers parents,

la seule chose que nous avons à décider est quoi faire du temps qui nous est imparti.

Table des matières

Publications	i
Introduction générale	iii
1 Introduction à la localisation de mobiles	1
1.1 Introduction	3
1.2 Informations satellitaires	4
1.2.1 Principe de fonctionnement de la localisation par satellites	5
1.2.2 Le système de positionnement NAVSTAR GPS	7
1.2.3 Les autres systèmes satellitaires	12
1.2.4 Exploitation de signaux satellitaires : cas du système NAVSTAR GPS	15
1.3 Informations cartographiques	20
1.3.1 Présentation des SIG	20
1.3.2 Localisation à partir d'informations cartographiques	25
1.4 Informations proprioceptives	27
1.4.1 Principe de la localisation à l'estime	27
1.4.2 Sources d'informations	27
1.4.3 Modèle de progression	29
1.4.4 Exemple	29
1.5 Conclusion	31
1.5.1 Bilan	31
1.5.2 L'approche proposée	32
2 Localisation 3D à l'estime	35
2.1 Introduction	37
2.2 Modèle cinématique	37
2.2.1 Représentation d'état	37
2.2.2 Configuration du véhicule	37
2.2.3 Repères de travail	39
2.2.4 Données capteurs disponibles	39
2.2.5 Définition du modèle cinématique	40
2.2.6 Linéarisation	42
2.2.7 Observabilité	43
2.2.8 Discrétisation	44
2.3 Prédiction proprioceptive	44
2.3.1 Modèle de progression	44
2.3.2 Comportement	45
2.3.3 Algorithme	45
2.4 Expérimentations	46
2.4.1 Limoges	46

2.4.2	Paris - XIIème arrondissement	50
2.5	Conclusion	54
3	Localisation 3D par fusion - odométrie et GPS	57
3.1	Introduction	59
3.2	Couplage lâche	59
3.2.1	Principe	59
3.2.2	Filtrage de Kalman	59
3.2.3	Mise en œuvre	60
3.2.4	Résultats	63
3.3	Couplage serré	72
3.3.1	Positionnement du problème	72
3.3.2	Redéfinition de l'état et du modèle	74
3.3.3	Utilisation des mesures de pseudodistances	75
3.3.4	Utilisation des mesures de Doppler	80
3.3.5	Variance de b_k^m - Matrice de bruit de mesure R_k	83
3.3.6	Mise en oeuvre - Algorithme global	86
3.3.7	Résultats	86
3.4	Conclusion	92
4	Localisation 3D par fusion - odométrie, GPS et cartographie	95
4.1	Introduction	97
4.2	Définition du contexte	98
4.3	Map Aiding par algorithme ellipsoïdal	101
4.3.1	Définition de l'espace roulant	102
4.3.2	Adaptation géométrique	103
4.3.3	Calcul des grandeurs nécessaires à l'OVE	104
4.3.4	Les deux étapes du Map Aiding	106
4.3.5	Algorithme de Map Aiding	108
4.4	Rappel de l'approche globale	108
4.5	Résultats	109
4.5.1	Couplage lâche, odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding	109
4.5.2	Couplage serré, odométrie et mesures GPS de pseudodistances et de Doppler, et Map Aiding	115
4.6	Conclusion	122
	Conclusion générale	123
	Bibliographie	127
	Notations	131

A	Modèles d'imprécision - Rappels théoriques	133
A.1	Modèle à erreur bornée	133
A.1.1	Définition	133
A.1.2	Cas des mesures vectorielles	133
A.2	Modèle à bruit additif aléatoire gaussien	133
A.2.1	Cas scalaire	133
A.2.2	Cas vectoriel	136
B	Calcul de bruit d'état	141
B.1	Rappel du modèle de progression	141
B.2	Définition du problème	141
B.2.1	Expression de la matrice d'erreur de q_k	144
B.3	Calcul de la matrice Q_k	145
C	Jeux de données et Véhicules d'essais	147
C.1	Jeux de données	147
C.1.1	Limoges	147
C.1.2	Paris	148
C.2	Véhicules d'essais	149
C.2.1	Le véhicule PRISM	149
C.2.2	Le véhicule VERT de l'IFSTTAR	150
D	Théorie sur le Filtrage de Kalman	153
D.1	Filtrage de Kalman	153
D.1.1	Cas linéaire	153
D.1.2	Cas non linéaire - Filtre de Kalman Étendu	155
E	Calcul de la position d'un satellite	157
F	Caractérisation des mesures de pseudodistance et de Doppler - Étude statistique	161
F.1	Caractérisation des mesures de pseudodistance	161
F.2	Caractérisation des mesures de Doppler	162

Publications

Conférences internationales à comité de lecture et publications des actes

[1] D. Meizel, S. Peyraud et S. Renault, *Un observateur non linéaire découplé pour estimer l'attitude 3D d'un véhicule*, Proceedings Conférence internationale francophone d'automatique (CIFA 2012), Grenoble, France, Juillet 2012

[2] D. Bétaille, S. Peyraud, F. Mougel, S. Renault, M. Ortiz, D. Meizel et F. Peyret, *Using road constraints to progress in real time NLOS detection*, Proceedings (Workshop) IEEE Symposium on intelligent vehicles (IV2012), Alcalá de Henares, Spain, Juin 2012

[3] S. Peyraud, S. Renault et D. Meizel, *3D Localization and Map Matching of Urban Vehicles*, Proceedings Conférence internationale MECATRONICS2010, Yokohama, Japon, Novembre 2010

Conférences nationales à comité de lecture et publications des actes

[4] S. Peyraud, S. Renault et D. Meizel, *Localisation 3D d'un véhicule en milieu urbain par « Map Matching »*, Actes Journées doctorales d'automatique (JDMACS 2011) Marseille, France, Juin 2011

Introduction générale

Contexte

L'Homme a toujours éprouvé le besoin de se localiser et de représenter son univers.

Dans l'histoire de l'humanité, les traces de représentations plus ou moins précises de la Terre sont nombreuses. Néanmoins, des travaux de Ptolémée (II^{ème} siècle) décrits comme les premières mises en forme scientifiques de cartographie, aux Portulans (XII^{ème} siècle), célèbres manuels de navigation (apparus en occident en même temps que la boussole), les techniques utilisées en cartographie ne permettaient pas une grande précision en termes d'angles et de distances. Les cartes obtenues pouvaient donc s'avérer difficilement exploitable pour une navigation à l'estime sur de longues distances.

Il faut attendre le XV^{ème} et le XVI^{ème} siècle avec les grandes découvertes de la Renaissance pour voir un développement de la précision des cartes, grandement lié à l'amélioration des outils de mesure mis au point par la géodésie et les géomètres. Les progrès réalisés en optique, notamment, permettent la réalisation d'instruments de mesure d'angles de grande précision.

En France, au XVIII^{ème} siècle, cet essor entraîne la réalisation, sous la direction de la famille Cassini, d'une cartographie de la France basée sur des repères géodésiques se reposant intégralement sur la triangulation. C'est le point de départ de la cartographie moderne.

Au XX^{ème} siècle, l'essor de l'aviation et des aérostats constitue une révolution dans le domaine de la navigation permettant notamment une amélioration importante de la précision des cartes. Il devient alors possible de parcourir en avion des trajets de plus en plus longs uniquement à l'estime. Cependant, lors de conditions météorologiques difficiles ou de longs trajets de nuit, cette navigation reste trop dangereuse et donc insuffisante.

A la fin du XX^{ème} siècle, c'est le développement des satellites qui va permettre une avancée extraordinaire dans le domaine de la localisation avec la création d'un système de positionnement global, le GPS. Il permet un positionnement absolu n'importe où dans les airs ou à la surface de la Terre et ouvre donc la possibilité d'une navigation sur de longues distances dans des conditions de visibilité limitées (navigation de nuit, mauvaises conditions météorologiques).

Aujourd'hui, les nouveaux axes thématique de recherche dans le domaine de la localisation concernent de plus en plus des problématiques liées aux automobiles, telle que les problèmes de fiabilité et de sécurité. En effet, la localisation est devenue une fonction essentielle dans le développement des prochaines générations de véhicules qui devront naviguer "intelligemment" dans des environnements urbains de plus en plus denses.

Ces nouvelles problématiques de robotique mobile s'inscrivent pleinement dans les préconisations du Livre blanc sur les transports intitulé : *Feuille de route pour un espace européen unique des transports - Vers un système de transport compétitif et économe en ressources*, publié par la Commission européenne le 28 mars 2011. Il appuie la stratégie globale de Commission européenne, adoptée le même jour : *Transports 2050*. On peut notamment citer :

- dans *Les domaines où des efforts européens communs sont les plus susceptibles d'apporter une valeur ajoutée : les technologies qui améliorent la sûreté et la sécurité des transports*,
- dans *l'Identification des stratégies d'innovation : le déploiement de systèmes de mobilité intelligente*.

Cette intelligence peut notamment s'exprimer dans un processus de navigation autonome, au sein duquel la localisation est une fonction essentielle. En effet, ce processus comprend, entre autres, planification de trajectoire et évitement d'obstacles, et a donc besoin que le mobile soit capable d'estimer sa position dans un environnement.

Le projet ANR CityVIP¹, dans le cadre duquel s'est effectuée cette thèse, aborde les "déplacements sûrs de véhicules publics individuels autonomes adaptés à l'environnement urbain". Le lot 1 du projet traite particulièrement de la fonction localisation du véhicule. En effet, dans ce type d'applications, tant la précision que la fiabilité de la localisation s'avèrent être des paramètres déterminants pour les performances du dispositif. Les différentes innovations technologiques récentes dans les domaines automobile et spatial sont à l'origine de l'augmentation des informations disponibles à la localisation et de leur qualité, permettant d'envisager aujourd'hui une qualité de localisation inimaginables il y a quelques années :

- les cartes numériques décrivant le réseau routier sont de plus en plus précises et se développent même en trois dimensions,
- le positionnement par satellites va devenir encore plus précis et fiable avec la futur activation du système Galiléo,
- de plus en plus de capteurs équipent les véhicules.

Ainsi, l'utilisation intelligente de ces innovations semble un moyen judicieux de parvenir à des progrès de localisation.

Problématique

Dans le but de réaliser une fonction de localisation d'un mobile type véhicule routier, de nombreux aspects et/ou verrous technologiques doivent être pris en compte.

1. Déplacement sûr de véhicules individuels adaptés a l'environnement urbain.

Les informations permettant la localisation de mobiles peuvent se ranger dans trois grandes familles.

La première regroupe les données fournies par les capteurs équipant les mobiles, on parle alors d'informations proprioceptives. Dans l'automobile, le capteur le plus développé est l'ABS qui de part son fonctionnement est capable de mesurer la vitesse de rotation d'une roue. Dans l'aviation, ceux sont les centrales inertielles. Ces capteurs permettent tous deux une navigation à l'estime.

Deuxième grandes familles, celle des informations obtenues par des systèmes à balises, comme le GPS, qui permettent une localisation absolue.

La dernière famille concerne les informations permettant de représenter l'environnement du mobile, comme la connaissance d'amers géoréférencés, ou la modélisation du réseau routier accessible via des cartes routières numériques.

On obtient alors un aperçu de la quantité considérable de sources d'informations pouvant intervenir dans un processus de localisation de mobile. Il est alors capital d'être capable de sélectionner les informations qui semblent les plus pertinentes étant donné l'application recherchée.

En complément de l'aspect précédent, compte tenu du contexte "en milieu urbain", il est important de noter que la solution considérée de base dans les fonctions de localisation, la localisation par satellites, perd fortement en qualité dans ce type d'environnement. En effet, le phénomène de canyon urbain (configuration d'une rue relativement "fermée" du fait de la présence de bâtiments hauts et proches) altère de manière significative la qualité des signaux allant jusqu'à la perte totale.

Autre point à ne pas négliger dans le contexte économique actuel (et comme il l'est également souligné dans Livre blanc sur les transports), le coût de la localisation doit être raisonnable. Pour être clair, la stratégie consiste plus à utiliser les technologies et les informations des dernières générations de voitures ainsi que des données ou structures déjà existantes, que de construire et d'équiper à outrance un prototype ou d'élaborer une méthode basée sur la mise en place de nouvelles structures.

Ce dernier point peut être rejoint par un verrou technologique souvent négligé en terme d'applications de localisation : l'implémentation temps réel. En plus de l'aspect économique (coût du matériel embarqué pour traiter les informations), et bien que les puissances de calcul ne cessent d'augmenter, la méthode choisie impacte directement et peut être actuellement incompatible avec une application temps réel. On peut notamment parler des méthodes utilisant la vision qui sont sources de lourds coûts de calculs.

La problématique de cette thèse peut ainsi être résumé en une question :

Comment utiliser aux mieux toutes ces informations pour une meilleure localisation (fiable et la plus précise possible) en milieu urbain ?

Organisation du document

Le premier chapitre de cette thèse sera consacré à la présentation de diverses sources d'informations permettant la localisation de mobiles ainsi qu'à la description de méthodes de localisation s'y rapportant.

Le deuxième chapitre abordera la manière d'utiliser des données proprioceptives afin de se localiser. Après une partie théorique qui permettra de définir la configuration et le modèle d'évolution du véhicule, l'algorithme de traitement des données et les résultats associés seront présentés.

Ce troisième chapitre introduira deux manières d'utiliser les informations satellitaires pour améliorer la localisation. Dans un premier temps nous examinerons le couplage lâche avant de débattre du couplage serré. Dans chaque cas, des résultats seront présentés.

Enfin, le dernier chapitre traitera de la méthode de traitement des informations cartographiques. Suite à une explication du choix concernant cette méthode, sa mise en œuvre et ses résultats seront détaillés.

Introduction à la localisation de mobiles

Chapitre 1 - Introduction à la localisation de mobiles

Ce premier chapitre est consacré à la présentation de diverses sources d'informations permettant la localisation de mobiles, ainsi qu'à la description de méthodes de localisation s'y rapportant.

Sommaire

1.1	Introduction	3
1.2	Informations satellitaires	4
1.2.1	Principe de fonctionnement de la localisation par satellites	5
1.2.1.1	Exemple de la trilatération maritime	5
1.2.1.2	Illustration du cas d'un système satellitaire	6
1.2.2	Le système de positionnement NAVSTAR GPS	7
1.2.2.1	Origine	7
1.2.2.2	Fonctions et besoins	8
1.2.2.3	Les segments GPS	9
1.2.3	Les autres systèmes satellitaires	12
1.2.3.1	GLONASS	12
1.2.3.2	Galileo	13
1.2.4	Exploitation de signaux satellitaires : cas du système NAVSTAR GPS	15
1.2.4.1	Notions fondamentales	15
1.2.4.2	Structure des signaux	15
1.2.4.3	Détermination de la pseudodistance	16
1.2.4.4	Message de navigation	16
1.2.4.5	Exemple de données pré-traitées	18
1.3	Informations cartographiques	20
1.3.1	Présentation des SIG	20
1.3.1.1	Origine et définition	20
1.3.1.2	Géoréférencement	21
1.3.1.3	Représentation des données	21
1.3.1.4	Fonctionnement	22
1.3.1.5	Options des SIG	23
1.3.1.6	Exemple d'utilisation	24
1.3.2	Localisation à partir d'informations cartographiques	25
1.4	Informations proprioceptives	27

1.4.1	Principe de la localisation à l'estime	27
1.4.2	Sources d'informations	27
1.4.2.1	Mesure de la distance parcourue	28
1.4.2.2	Mesure de la variation des angles d'attitude	28
1.4.2.3	Centrale inertielle	28
1.4.3	Modèle de progression	29
1.4.4	Exemple	29
1.4.4.1	Capteurs	30
1.4.4.2	Équations	30
1.5	Conclusion	31
1.5.1	Bilan	31
1.5.2	L'approche proposée	32

1.1 Introduction

Avant de s'interroger sur comment se localiser, il est nécessaire de bien définir cette fonction. La localisation en 3D (trois dimensions) équivaut à connaître la pose du véhicule, c'est à dire ses coordonnées et ses angles d'attitude dans un repère de référence défini. Cela revient à connaître :

- le repère de référence « Monde » ayant pour origine W (repère noté \mathcal{W} par la suite),
- le repère « Véhicule » ayant pour origine M (repère noté \mathcal{M} par la suite) (Fig. 1.2),
- les coordonnées (x, y, z) de M dans \mathcal{W} ,
- les angles de lacet (ou cap) ψ , tangage (ou pente) θ et roulis (ou dévers) ϕ (Fig. 1.1).

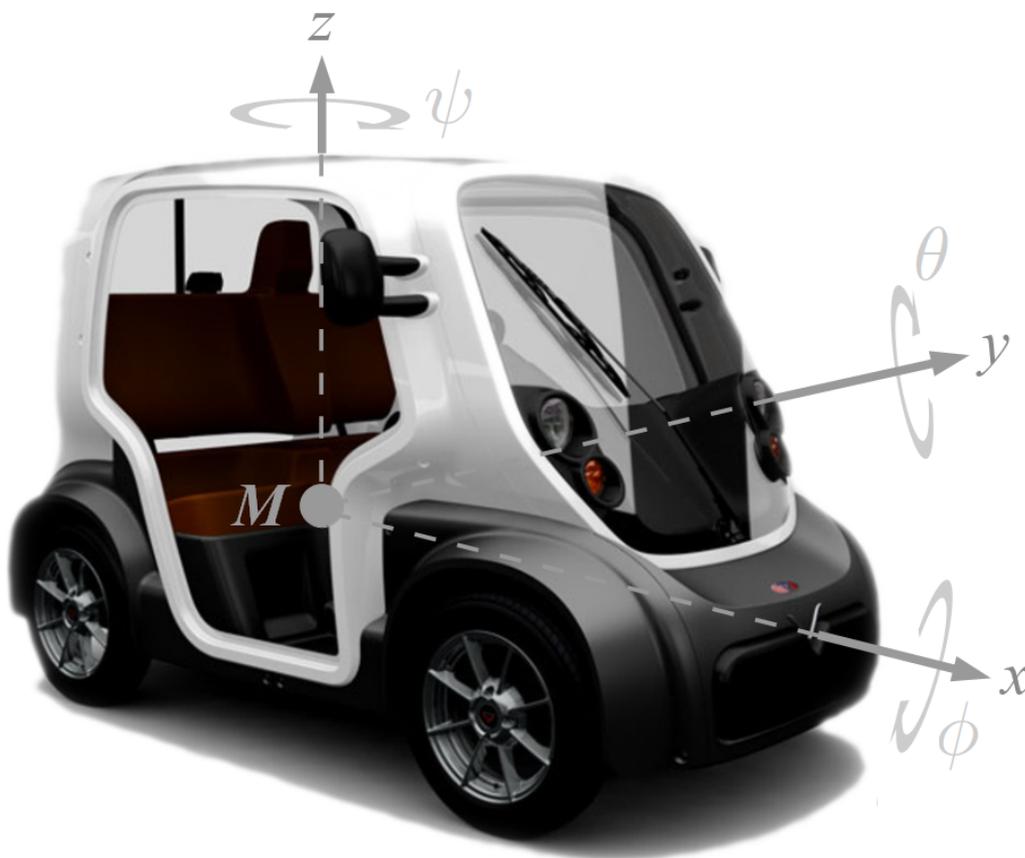


FIGURE 1.1 – Définition des angles d'attitude. Véhicule Venturi Eclectic.

Beaucoup d'applications utilisent une configuration 2D (deux dimensions) simplifiée (x, y, ψ) en prenant l'hypothèse d'un déplacement sans tangage ni roulis dans un monde localement plat.

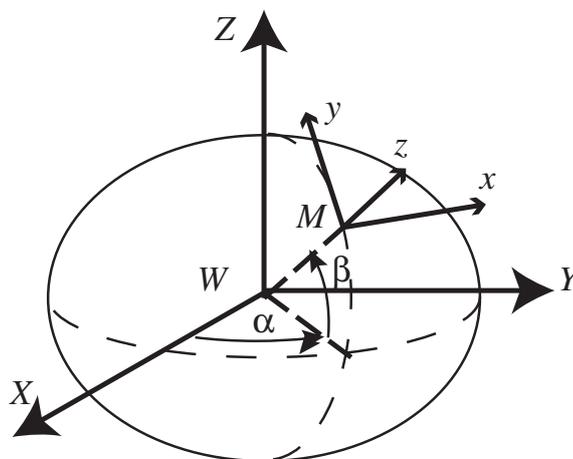


FIGURE 1.2 – Repère Monde (W, X, Y, Z) et Véhicule (M, x, y, z).

La plupart des véhicules automobiles actuels disposent déjà de nombreux équipements fournissant des informations pouvant être utiles à la localisation. D'autres équipements sont aujourd'hui proposés en option ou seront disponibles dans les véhicules dans un futur proche. Toutes ces informations peuvent être regroupées en trois grandes familles :

- des informations satellitaires (cf. section 1.2) fournies par des récepteurs GPS (Global Positioning System),
- des informations cartographiques (cf. section 1.3) majoritairement en 2D mais en cours d'évolution vers la 3D,
- des informations proprioceptives (cf section 1.4) fournies par des capteurs embarqués : ABS (Antiblockiersystem ou antiblocage de sécurité), ESP (Electronic Stability Program) ou ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) par exemple.

1.2 Informations satellitaires

Les informations satellitaires constituent les données fournies par les systèmes de positionnement par satellites. Ces systèmes sont appelés sous le nom plus complet de systèmes de positionnement et de datation par satellites ou sous l'acronyme anglais GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Ils fournissent une couverture globale de géopositionnement à usage civil.

Les GNSS utilisent les constellations existantes de satellites de navigation (GPS, GLONASS), et des systèmes satellitaires complémentaires d'amélioration de performance, comme EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service, soit Service Européen de Navigation par Recouvrement Géostationnaire), ou des compléments au sol, comme le DGPS (Differential Global Positioning System, soit GPS Différentiel).

Depuis 2010, le système de satellites NAVSTAR (NAVigation System by Timing And

Ranging), développé aux États-Unis, constituant le GPS, n'est plus la seule constellation totalement opérationnelle. Le système russe GLONASS, opérationnel en 1996, était devenu obsolète dans les années 2000, à cause de la chute de l'URSS, provoquant un non-entretien et un délabrement du matériel le faisant fonctionner. Cependant, il est à nouveau opérationnel depuis 2010.

Le système de l'Union européenne, Galileo, est la seconde génération de GNSS en phase de développement. Deux satellites de validation ayant été lancés, il est planifié opérationnel pour début 2014 et achevé d'ici 2019-2020. La Chine et l'Inde développent également un système régional, via des satellites géostationnaires : Beidou et IRNSS.

Un GNSS permet à des récepteurs portables de déterminer leur position sur la terre en longitude, latitude et hauteur ellipsoïdale, avec une précision variant de quelques dizaines de mètres à quelques mètres selon les corrections et le temps d'intégration utilisé. Des récepteurs fixes peuvent déterminer leur position avec une précision centimétrique.

Les services utilisant ces systèmes sont principalement la navigation maritime, aérienne et routière, la topographie et la synchronisation du temps.

1.2.1 Principe de fonctionnement de la localisation par satellites

La localisation par satellites appartient à la famille des localisations par balises. Un exemple maritime va servir d'introduction à l'explication du principe de fonctionnement de ce type de localisation.

1.2.1.1 Exemple de la trilatération maritime

Lorsque la lumière des phares ne peut se propager à une distance suffisante en raison de mauvaises conditions atmosphériques, il est nécessaire de pouvoir disposer d'un système de substitution pour continuer à assurer la sécurité des navires en mer.

L'émission d'un signal sonore de forte intensité est un moyen d'avertir un bateau de la proximité de la côte ou de la présence d'un danger (épave, récif, ...). Du reste, un tel système, contrairement au phare, peut être efficace de jour comme de nuit par temps de brume ou de mauvaises conditions météorologiques.

Avec la mise au point du moteur à explosion et du compresseur à air, puis l'arrivée de l'électricité, de nombreux phares furent équipés au 19ème siècle d'une invention britannique pouvant s'identifier dans son principe à une énorme trompette capable de générer un son d'une très grande intensité. À la façon du phare qui émet une série de signaux lumineux répétitifs, ces cornes de brume peuvent émettre une série de sons caractéristiques qui permettent de les identifier depuis la mer.

Ainsi, prenons le cas d'un bateau à proximité d'un phare muni d'une corne de brume.

On admet certaines hypothèses : les horloges du bateau et du phare sont synchronisées, et la vitesse de propagation d'une onde acoustique est connue. Le temps que met le signal émis par le phare à arriver au bateau est l'image de la distance entre le bateau et le phare. La localisation du bateau est un cercle dont le centre est le phare.

Dans le cas d'un bateau à proximité de trois phares, on parle alors de trilatération, la situation se résume à la figure 1.3. Si seulement deux phares s'étaient trouvés à proximité, il aurait subsisté une ambiguïté sur la position : les deux points d'intersection de deux cercles.

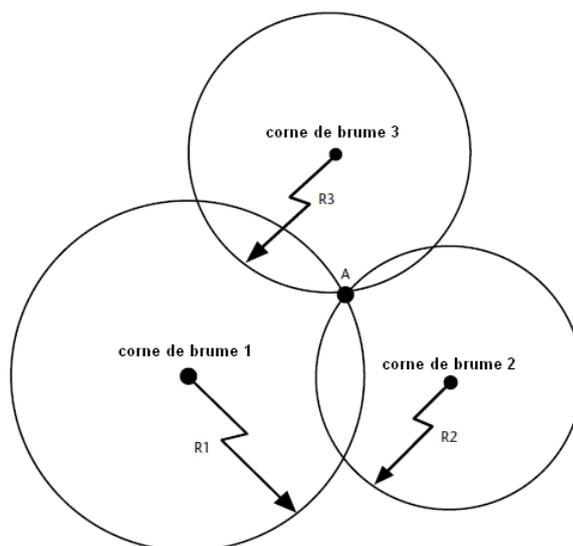


FIGURE 1.3 – Localisation d'un bateau à proximité de trois phares. © Understanding GPS [5]

Cependant, les hypothèses posées ne sont pas réalistes. En effet :

- il existe forcément un décalage entre les horloges du bateau et des phares,
- la mesure du temps de propagation est une estimation et possède donc une incertitude,
- la vitesse de propagation d'une onde n'est pas fixe, elle dépend des conditions et du milieu qu'elle traverse.

La localisation résultante n'est donc plus un point, mais une zone (Fig. 1.4).

1.2.1.2 Illustration du cas d'un système satellitaire

Pour un système satellitaire, les mêmes principes sont applicables (Fig. 1.5).

Comme les horloges des récepteurs ne sont pas aussi précises que celles des satellites (question de coût et de taille du récepteur), tout comme l'exemple de la figure 1.4, une localisation par trois satellites ne suffit pas à déterminer la position 3D d'un récepteur.

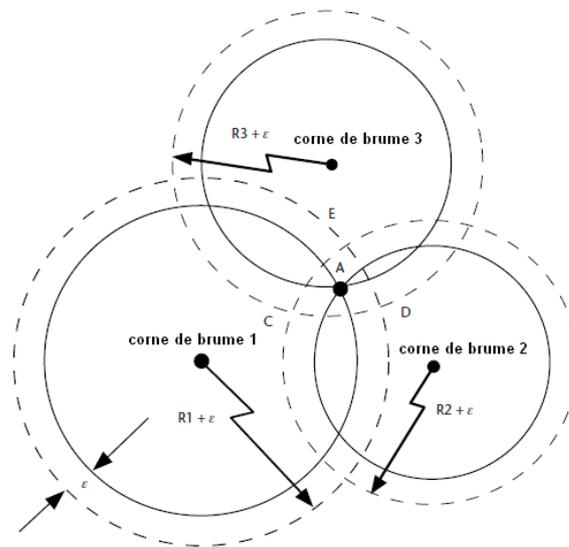


FIGURE 1.4 – Localisation d'un bateau à proximité de trois phares (erreurs de mesure et de synchronisation prises en compte). © Understanding GPS [5]

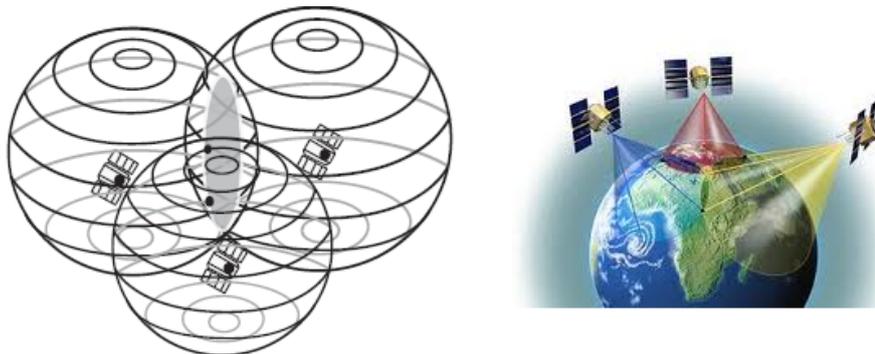


FIGURE 1.5 – Localisation d'un récepteur par trois satellites.

C'est pourquoi, afin d'estimer le décalage de temps entre les horloges et d'obtenir un positionnement correct, un minimum de quatre satellites est nécessaire. On parle alors de multilatération.

1.2.2 Le système de positionnement NAVSTAR GPS

1.2.2.1 Origine

Au début des années 60, la volonté de créer un système de positionnement à 3 dimensions était très forte. Compte tenu des limitations du *Transit* (premier système de navigation par satellites), ses créateurs (Université Johns Hopkins - Laboratoire de Physiques appliqués) proposèrent d'autres systèmes. Dans le même temps, le laboratoire de recherche

naval (NRL) proposa le *Timation* basé sur le développement d'horloges très stables et très précises.

Lorsque les avancées sur «Transit» furent validées et que *Timation* commença à être reconnu, l'AirForce développa le système *621B* avec des orbites elliptiques inclinées et de la modulation de signal.

En 1969, le bureau du secrétaire à la Défense établit le programme DNSS (Defense Navigation Satellite System) qui consistait à unir les efforts séparés en créant le *GPS Joint Program Office*.

Il en a abouti la création du NAVSTAR GPS, pleinement opérationnel à partir du 27 avril 1995, et aujourd'hui appelé plus communément GPS. De vocation exclusivement militaire, le GPS est progressivement devenu totalement exploitable pour des applications civiles, tout d'abord avec une précision volontairement limitée à quelques centaines de mètres par la *Selective Availability* (SA, dégradation de la précision de l'horloge), puis à une dizaine de mètres en 2000 avec la désactivation de cette dégradation.

1.2.2.2 Fonctions et besoins

De nos jours, le système GPS a une double utilisation :

- le *Standard Positioning Service* (SPS), utilisable sans restriction qui permet d'obtenir une précision en position de l'ordre d'une dizaine de mètres et une précision sur le temps de quelques nanosecondes, le tout considéré à 95% de fiabilité. Il était dégradé par le SA jusqu'en 2000.
- le *Precise Positioning System* (PPS), signal crypté réservé aux applications militaires américaines ainsi qu'à certains utilisateurs habilités par le département de la défense.

Ainsi, ce système fournit à n'importe quel utilisateur muni du récepteur adéquat des informations sur sa position et sa vitesse en 3 dimensions de manière continue et plus ou moins précise. Il nécessite donc des références temporelles et spatiales communes sur toute la surface du globe.

Le temps GPS, référentiel temporel pour les calculs GPS, est donné par le centre de contrôle de Colorado Springs aux États-Unis. Il dérive de façon connue par rapport à l'UTC (Universal Time Coordinated). En fait, le temps GPS est même synchronisé sur ce système de temps universel, l'UTC, établi à partir d'un ensemble d'horloges atomiques gérées par l'US Naval Observatory. Il a été calé sur l'UTC en 1980. En 2012 son écart est de 15 s par rapport à l'UTC.

Afin de représenter à la fois l'état du satellite et du récepteur, il est nécessaire de posséder un système de coordonnées de référence. En pratique, cela revient à décrire ces états en terme de vecteurs position et vitesse, mesurés dans un référentiel cartésien. Deux options s'offrent à l'utilisateur. L'ECI (Earth Centered Inertial), dont l'origine est le centre de masse de la Terre et dont les axes pointent dans des directions fixes par rapport aux étoiles. Ou l'ECEF (Earh Centered Earth Fixed), ayant la même origine, mais dont les

axes sont fixes par rapport à la Terre. Dans les deux cas, le plan xy coïncide avec le plan équatorial terrestre. Dans le cas de l'ECEF, l'axe x pointe dans la direction 0° de longitude et l'axe y pointe dans la direction 90° E. Même si pour effectuer des calculs d'orbites satellitaires l'utilisation de l'ECI est préférable, l'application finale étant la localisation dans un référentiel lié à la Terre, on exprime les coordonnées cartésiennes dans le système ECEF.

Pour exprimer les coordonnées géographiques : latitude, longitude et hauteur ellipsoïdale (données classiques affichées par un récepteur GPS), un modèle physique modélisant la Terre est nécessaire.

Le modèle associé au système GPS est le système géodésique mondial : WGS 84 (World Geodetic System 1984). Il modélise les irrégularités gravitationnelles de la Terre, fournit un modèle ellipsoïdal de sa forme, et permet de calculer son excentricité à partir du demi-grand axe ($a=6378,137$ km) et du demi petit-axe ($b=6356,7523142$ km).

La mesure d'hauteur ellipsoïdale dans le référentiel WGS 84 est faite par rapport au modèle d'ellipsoïde de la Terre. Il faut savoir que ce modèle est en fait une simplification du véritable modèle terrestre, le géoïde qui correspond à une équipotentielle (dans le champ de gravité terrestre) et est défini de manière à coller au plus près à la «surface réelle». Lorsqu'une altitude est définie par rapport au géoïde, on l'appelle altitude orthométrique. Elle est souvent utilisée dans les cartes topographiques et peut avoir plusieurs dizaines de mètres d'écart avec l'hauteur géodésique.

Enfin, le système GPS est fonctionnel du fait de la connaissance des paramètres orbitaux de ses satellites, c'est-à-dire les paramètres qui permettent de décrire de manière précise l'orbite et le temps du satellite. L'ensemble de ces paramètres est appelé éphéméride.

1.2.2.3 Les segments GPS

Trois segments existent, la constellation de satellite (Fig. 1.6), le réseau terrestre de contrôle/surveillance et l'équipement de réception de l'utilisateur, respectivement appelés spatial, de contrôle et utilisateur.

La constellation représente l'ensemble des satellites en orbite qui fournissent les signaux télémétriques et les messages de données à l'utilisateur.

Le segment de contrôle traque et maintient les satellites dans l'espace. Il surveille l'état de santé des satellites, l'intégrité du signal et met à jour l'estimation de la configuration de la constellation. De plus, il met à jour les corrections d'horloge satellite et les éphémérides ainsi que de nombreux autres paramètres essentiels à l'obtention du PVT (Position, Velocity, and Time) de l'utilisateur.

Enfin, le segment utilisateur réalise la navigation, la datation et d'autres fonctions connexes.

Le segment spatial

Il est constitué actuellement d'une constellation de 31 satellites . Ces satellites évoluent sur 6 plans orbitaux ayant une inclinaison d'environ 55° sur l'équateur. Ils suivent une orbite quasi circulaire à une altitude de 20 000 à 20 500 km qu'ils parcourent en 11 heures 58



FIGURE 1.6 – Constellation Navstar - Bloc GPS : IIA, IIR-M, IIF.

minutes 02 secondes, soit un demi jour sidéral. Ainsi les satellites, vus du sol, reprennent la même position dans le ciel au bout d'un jour sidéral. Les générations successives de satellites sont désignées sous les noms de Blocs (Fig. 1.7).



FIGURE 1.7 – Exemple de satellite Navstar : Bloc IIR-M. © Understanding GPS [5]

Le segment de contrôle

Il est composé d'une double station de contrôle principale, de six stations de surveillance et de 4 antennes terrestres.

La station principale (MCS) fournit les commandes centrales et les contrôles de la constellation par différentes fonctions :

- Surveiller et maintenir l'état de santé des satellites,
- Surveiller l'orbite des satellites,

- Estimer et prédire l’horloge satellite et les paramètres d’éphémérides,
- Générer les messages de navigation GPS,
- Maintenir la référence de temps GPS et sa synchronisation à l’UTC,
- Surveiller l’intégrité du système de navigation,
- Vérifier les données transmises aux utilisateurs,
- Commander les manœuvres des satellites pour maintenir leurs orbites et les repositionner en cas de défaillance de l’engin.

La première mission de la MCS est de générer et distribuer les messages de données de navigation. Pour cela, elle passe par différentes étapes :

- Récupération et traitement des données des mesures des stations de surveillance. Les stations secondaires fournissent la pseudodistance brute, la phase des porteuses et des mesures météorologiques lissées par la MCS.
- Création de l’éphéméride et des estimations et prédictions d’horloge. Cette opération est réalisée par un filtrage de Kalman où l’estimation est linéarisée autour d’une trajectoire de référence (un modèle de mouvement de chaque satellite). L’estimation et la trajectoire permettent de créer la prédiction, qui est la base des messages de navigation.
- Construction et distribution du message de données de navigation. Une routine «moindres carrés» convertit les prédictions en éléments orbitaux qui sont émis aux mémoires des satellites et transmis aux utilisateurs.

Une autre mission importante est de maintenir le référentiel de temps du système GPS opérationnel et stable car c’est une garantie de précision sur la position calculée. Pour cela, la station de contrôle doit surveiller, estimer les erreurs de biais d’horloge, de dérive, de taux de dérive et calculer les facteurs de correction pour chaque référent atomique de fréquence (AFS). Chaque satellite dispose de plusieurs AFS mais un seul fonctionne à la fois.

Le fait que le système GPS se base sur une multitude d’AFS augmente la stabilité de la référence temporelle GPS et diminue la dépendance face à une défaillance d’un unique AFS.

Enfin dernière mission, surveiller l’intégrité du système. Pour cela, chaque message reçu par les utilisateurs est comparé au message généré par la MCS (les stations de surveillance reçoivent ce message d’où la comparaison possible). Toutes les différences significatives sont transmises à un organisme qui diffuse alors un message d’alerte aux utilisateurs et agit en conséquence pour réparer le dysfonctionnement.

Le segment utilisateur

Ce segment englobe l’ensemble des utilisateurs civils ou militaires qui ne font que recevoir et exploiter les informations reçues des satellites via leur récepteur GPS. De ce fait le système ne peut être saturé et le nombre maximum d’utilisateurs GPS est illimité.

De nombreux types de récepteurs sont disponibles, allant de l’application commune

d'aide à la navigation (la plupart du temps mono-fréquence et bas coût) jusqu'à des applications beaucoup plus spécifiques telles que la géodésie, nécessitant des récepteurs bien plus performants.

1.2.3 Les autres systèmes satellitaires

1.2.3.1 GLONASS

GLONASS est un système de positionnement par satellites d'origine soviétique et géré par les forces spatiales de la Fédération de Russie.

Présentation

Le programme GLONASS est né dans les années 1980, durant la Guerre froide. Les satellites qui le composent sont nommés Ouragan et leur réalisation est confiée au bureau d'études en mécanique appliquée de Jeleznogorsk. D'une masse de 1 413 kg, ils sont mis en orbite par groupes de trois sur des orbites à 19 130 km, contenues dans trois plans orbitaux inclinés de 65 degrés environ.

Le 8 décembre 2011, pour la première fois de l'Histoire, GLONASS assure la couverture de 100% de la surface terrestre. En cette année 2011, le développement de cette constellation a été accéléré et de nombreuses applications civiles lui sont trouvées, sous l'impulsion du gouvernement russe qui déclare vouloir, dès fin 2012, taxer d'un malus tous les produits électroniques disposant d'une compatibilité GPS mais pas d'une compatibilité GLONASS, sur le marché russe.

Composition

Comme tous les systèmes de positionnement par satellites, GLONASS est composé de trois parties :

- La partie spatiale est constituée de 24 satellites (Fig. 1.8), répartis sur trois plans orbitaux à une altitude de 19 100 km parcourue en 11 heures 15 minutes 44 secondes. À la différence du système GPS, les satellites de la constellation, vus du sol, se retrouvent à la même place dans le ciel après huit jours sidéraux. Huit satellites sont prévus pour chaque plan orbital.
- La partie au sol est composée de cinq stations de contrôle, la principale se trouve à Krasnoznamensk dans la région de Moscou.
- La partie utilisateur, qui réunit l'ensemble des récepteurs utilisant les signaux des satellites.

L'Agence spatiale fédérale russe (Roskosmos) prévoyait la fin du déploiement des 24 satellites couvrant le monde entier vers la fin 2009. Elle a ensuite décidé de passer à un système comprenant 30 satellites en 2016. Il faut 18 satellites opérationnels pour avoir une couverture mondiale.



FIGURE 1.8 – Exemple de satellite Glonass : GLONASS-K. © Understanding GPS [5]

Performance

Le système GLONASS est un concurrent du système GPS. Il offre une précision de 5 à 8 m avec 7 à 8 satellites en vue. Le GPS offre une précision de 2 à 9 m avec 6 à 11 satellites en vue. La précision de fonctionnement du GLONASS devrait être portée à 5,5 m en 2010, et à 2,8 m en 2011.

1.2.3.2 Galileo

Galileo, projet européen de système de positionnement par satellites, est un ensemble autonome basé sur une constellation de 30 satellites (27 satellites actifs + 3 satellites en réserve) en orbite à moyenne altitude (23 222 Km), qui émettent des signaux compatibles et interopérables avec les autres systèmes mondiaux de navigation par satellites existants (GPS et le système russe Glonass). Il comprend également une vaste infrastructure terrestre déployée à travers le monde. Galileo offrira 5 services de couverture mondiale destinés à des usages distincts :

- Open service (OS) : service équivalent au service SPS fournis par le système GPS. Il sera ouvert et gratuit pour le positionnement en mode naturel. Principalement destiné à des applications grand public, il ne disposera pas de dispositif de contrôle d'intégrité.
- Commercial Service (CS) : service payant qui offrira des performances accrues par l'utilisation d'une bande de fréquence supplémentaire. Les plus seront notamment : garantie du service, intégrité et continuité du signal. Ce sont principalement les abonnements à ce service qui assureront le financement de Galileo.
- Public Regulated Service (PRS) : service gouvernemental chiffré qui répondra aux besoins des institutions publiques de la Communauté Européenne en matière de protection civile et de sécurité nationale. Comme ce service devra être disponible en tout temps, il utilisera deux signaux à part et disposera de plusieurs systèmes prévenant

un brouillage ou un leurrage du signal.

- Safety of Life (SoL) : service sécurisé, intègre et certifiable pour des applications spécifiques mettant en jeu la sécurité des personnes, tel que le transport aérien ou maritime.
- Search And Rescue (SAR) : service contribuant au système de transmission de message de détresse COSPAR-SARSAT. Il proposera ainsi un canal de transmission permettant la réception et l'émission de messages émis par une balise de détresse en quasi temps-réel, ainsi que l'amélioration de la précision de la localisation de la balise.

Les trois premiers services proposés sont semblables à ceux proposés par le système GPS et le système GLONASS. Cependant le service SoL et le service SAR présentent une avancée considérable dans le domaine des systèmes de positionnement par satellites.

La première phase opérationnelle du projet, une phase de test, avait débuté fin 2005 à la suite des lancements des deux satellites Giove-A et Giove-B en décembre 2005 et avril 2008. La phase IOV (In-Orbit Validation) de développement du programme Galileo, sous la responsabilité de l'agence spatiale européenne (ESA), est en cours d'achèvement : les 2 premiers satellites ont été lancés avec Soyouz depuis le centre spatial guyanais, le 21 octobre 2011 (Fig. 1.9). Les 2 derniers seront mis en orbite de la même façon durant l'été 2012.



FIGURE 1.9 – Satellites Galileo lancés en 2011 : IOV (In-Orbit Validation). © Astrium

La phase FOC (Full Operational Capability) de déploiement de la constellation a démarré en juillet 2008 sous la responsabilité de la Commission européenne. 14 satellites devraient être disponibles courant 2014. Avec les 4 satellites de la phase IOV de développement, il devrait donc y avoir, en 2015, 18 satellites Galileo en orbite, ce qui permettra la fourniture de services préliminaires et d'un service de positionnement nettement amélioré en combinant GPS et Galileo.

Le déploiement du système complet va se poursuivre ensuite et devrait être achevé d'ici 2019-2020. Le CNES (Centre National d'Études Spatiales) a fortement participé aux phases de tests et d'expérimentations en préparation pour Galileo ainsi qu'à la définition des signaux utilisés. Le centre de contrôle principal pour la mise à poste des satellites se situe au centre spatial de Toulouse.

1.2.4 Exploitation de signaux satellitaires : cas du système NAVSTAR GPS

1.2.4.1 Notions fondamentales

Le "Time Of Arrival"

C'est la mesure du temps qu'il faut à un signal pour partir d'un émetteur (dont la position est connue) et arriver à un récepteur. En connaissant le milieu de propagation et donc la vitesse de propagation, la distance entre émetteur et récepteur peut être calculée. En appliquant ce principe avec plusieurs émetteurs, la position du récepteur est déterminée.

La multilatération spatiale

C'est une méthode mathématique qui repose sur l'utilisation de mesures de distances entre un récepteur et plusieurs émetteurs dont les positions sont connues.

C'est l'association de ces deux notions qui est à la base du principe de fonctionnement d'une localisation par satellite.

Donc, afin de localiser un mobile par multilatération spatiale, deux points sont fondamentaux : être capable de mesurer la distance (ou le temps de propagation) entre le récepteur et chaque satellite et connaître la position des satellites.

Dans le but d'assurer une localisation relativement précise, la mesure de temps de propagation repose sur la structure des signaux. Les paramètres nécessaires au calcul de la position des satellites ainsi qu'aux erreurs d'horloges sont diffusés dans le message de navigation (cf. mission du segment de contrôle, section 1.2.2.3).

Ainsi, après une description de la génération des signaux GPS, la mesure de pseudodistance (distance récepteur-satellite) et le message de navigation seront explicités.

1.2.4.2 Structure des signaux

Chaque satellite GPS émet en permanence un message de navigation à un débit de 50 bits par seconde sur deux fréquences porteuse : L1 (1575,43 MHz) et L2 (1227,60 MHz) (Fig. 1.10). Chaque transmission d'un satellite vers un récepteur dure 30 secondes et transporte 1 500 bits de données cryptées.

Ces deux porteuses sont donc modulées par le message de navigation ainsi que par des séquences binaires pseudo-aléatoires (PRN) permettant d'évaluer la distance émetteur-

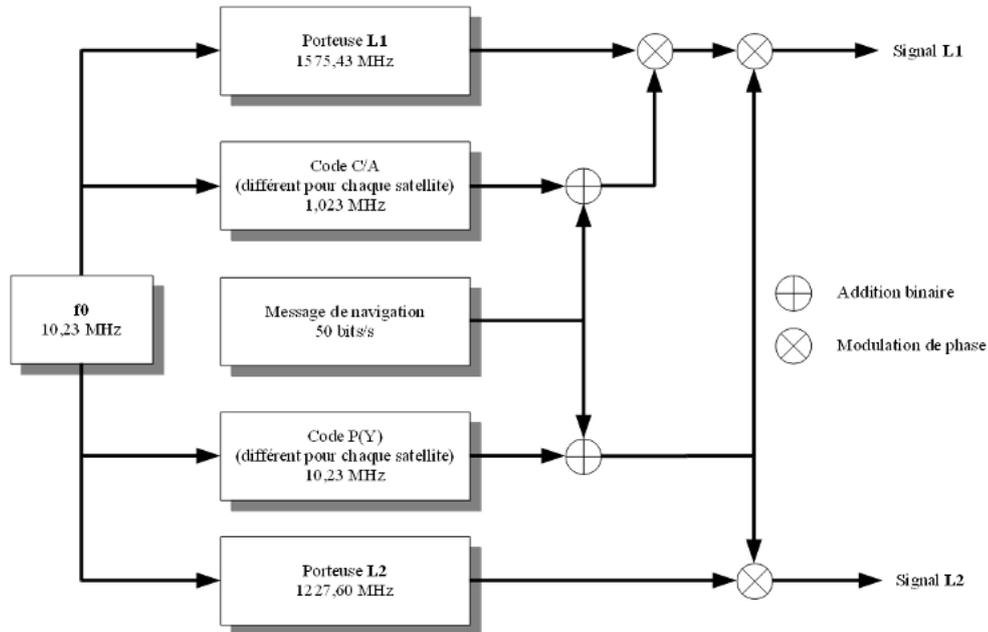


FIGURE 1.10 – Structure des signaux GPS.

récepteur. Ces séquences, qui identifient chaque satellite, sont spécialement choisies pour avoir une très faible corrélation entre elles : un code court C/A (pour coarse/acquisition) et un code long P(Y) (pour precise). Les récepteurs GPS connaissent les codes PRN pour chaque satellite et peuvent ainsi non seulement décoder le signal mais aussi identifier les différents satellites.

1.2.4.3 Détermination de la pseudodistance

La mesure de la pseudodistance est la base de la localisation par satellites. Le processus consiste à déterminer le temps mis par le signal pour parcourir la distance récepteur-satellite et de le multiplier par la vitesse de la lumière pour obtenir la distance. De manière simplifiée, le processus (Fig. 1.11) est le suivant :

- le satellite génère et émet son signal codé (C/A ou P(Y)),
- le récepteur le reçoit quelques millisecondes plus tard et le compare à celui qu'il a lui-même généré,
- l'écart de temps entre les deux signaux mesuré par corrélation, multiplié par la vitesse de la lumière, est la mesure de pseudodistance.

1.2.4.4 Message de navigation

Il est formé par 25 trames de données. Chaque trame (Fig. 1.12) comporte 1500 bits et est divisée en 5 sous-trames de 300 bits. Il faut 30 secondes pour recevoir une trame et

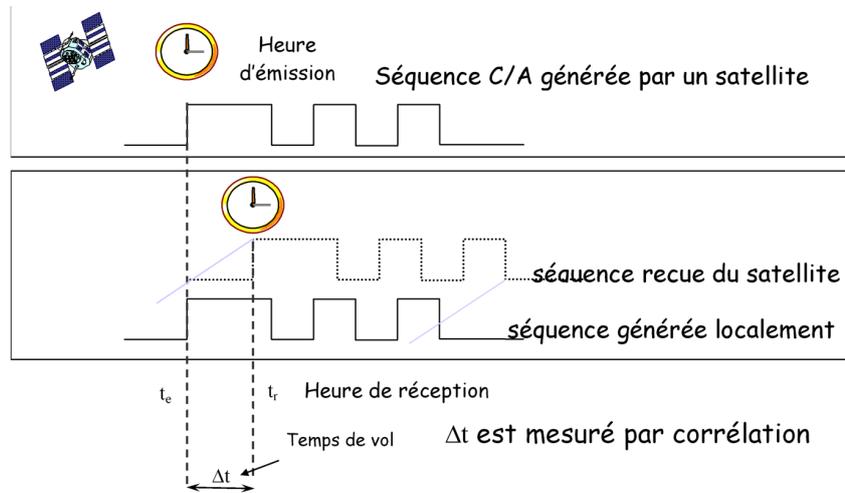


FIGURE 1.11 – Principe de la mesure de pseudodistance. © Thèse Vincent Drevelle [6]

12,5 minutes pour acquérir l'ensemble des 25 trames.

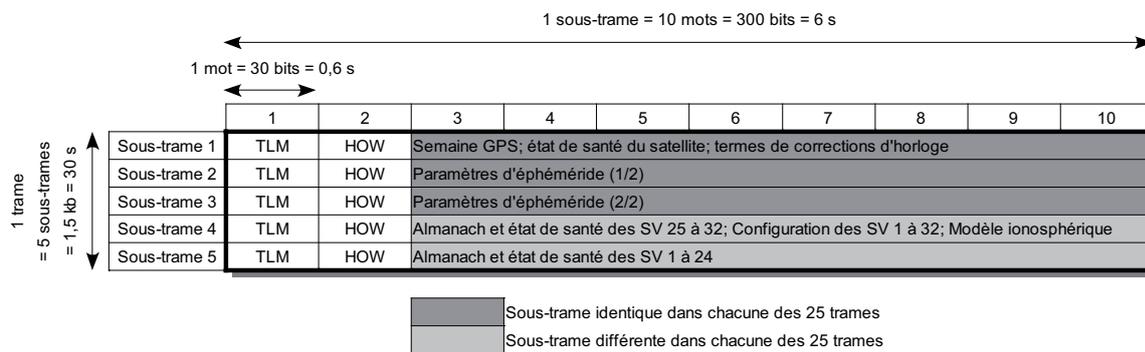


FIGURE 1.12 – Aperçu de la structure d'une trame du message de navigation.

Chaque sous-trame est constituée de 10 mots dont les deux premiers sont toujours :

- TLM (telemetry world) : permet au récepteur de détecter le début d'une sous-trame et de déterminer à quel temps (à l'horloge du récepteur) elle commence,
- HOW (handover word) : donne le temps GPS et identifie la sous-trame dans la trame complète.

Les sous-trames 1, 2 et 3 répètent les mêmes 900 bits sur les 25 trames ce qui permet au récepteur GPS de faire l'acquisition des données les plus importantes dans les 30 premières secondes. Les sous-trames 4 et 5, quant à elles, sont différentes à chaque trame.

Sous-trame 1

Elle contient notamment le numéro de la semaine GPS, l'état de santé du satellite (utile pour se prémunir contre certaines erreurs de calcul de position : si un satellite est déclaré en panne, le récepteur le rejette), des corrections d'horloge, et des termes de correction d'effets atmosphériques perturbateurs (effets de la ionosphère notamment).

Sous-trames 2 et 3

Elles contiennent tous les paramètres qui permettent de décrire de manière précise l'orbite et le temps du satellite. L'ensemble de ces paramètres est appelé éphéméride.

Sous-trames 4 et 5

Elles contiennent les données orbitales et temporelles approximatives des autres satellites de la constellation, appelées almanach. Le récepteur peut ainsi prédire les signaux qu'il devrait capter et accélérer le processus d'accrochage. On trouve également dans la sous-trame 4 des données de configuration des satellites et des données permettant de modéliser les effets ionosphériques.

La description complète de la constitution du message de navigation est disponible dans le document Interface Specification IS-GPS-200 version F [7].

1.2.4.5 Exemple de données pré-traitées

Considérant la relative complexité du message de navigation et le fait que toutes les informations transmises ne sont pas indispensables afin de localiser un récepteur, selon l'application et également le fabricant du récepteur, on comprend aisément que différents formats de données existent.

L'utilisateur peut, par exemple, simplement vouloir obtenir des données de positionnement directement intégrées à une interface de visualisation (récepteur GPS grand public d'aide à la navigation, Fig. 1.13). L'utilisateur peut vouloir un positionnement approximatif donné directement par le récepteur sous forme de longitude et latitude (trame GGA). Enfin, l'utilisateur peut vouloir gérer l'ensemble du processus de calcul de positionnement.

Intéressons-nous à quelques exemples de format de données.

Format Rinex

Le format RINEX (Receiver Independant EXchange Format), format d'échange indépendant du récepteur (reconnu par de nombreux constructeurs de matériel GPS), a été développé par l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne dans le but de fournir dans un même format les données collectées en format propriétaire par des récepteurs de marques différentes. À l'heure actuelle, la plupart des stations permanentes du Réseau GPS Permanent (RGP) de l'Institut Géographique National (IGN) fournissent des données dans le format Rinex 2.10. Une documentation complète, en anglais, décrivant le format RINEX 2.10 est disponible [8].



FIGURE 1.13 – Exemple de récepteur GPS grand public d'aide à la navigation.

Format ublox UBX

Format propriétaire du fabricant ublox. Un tri sous forme de classe permet de regrouper les informations de même nature. On trouve notamment la classe NAV qui contient les résultats de navigation (calcul interne au récepteur, utile pour des applications ne nécessitant pas la maîtrise de tous les facteurs) et la classe RXM se rapprochant le plus des données brutes du message de navigation (utile pour des applications nécessitant la maîtrise de tous les facteurs). Ce format est entièrement décrit dans un document accessible sur le site internet du fabricant [9].

Format NMEA

La norme NMEA 0183 est une spécification pour la communication entre équipements marins dont les équipements GPS. Elle est définie et contrôlée par la National Marine Electronics Association (NMEA), association américaine de fabricants d'appareils électroniques maritimes. Il existe plus d'une trentaine de trames GPS différentes. Le type d'équipement est défini par les deux caractères qui suivent le \$. Le type de trame est défini par les caractères suivants jusqu'à la virgule.

Exemple d'une trame GPS de type GGA :

```
$GPGGA,064036.289,4836.5375,N,00740.9373,E,1,04,3.2,200.2,M,,,0000*0E
```

Chaque trame possède sa propre syntaxe, mais peut, ou doit, selon le cas se terminer après le * par une somme de contrôle qui permet de vérifier que la trame n'a pas été endommagée avant sa réception.

La trame GGA est très courante car elle fait partie de celles qui sont utilisées pour connaître la position courante du récepteur GPS. Elle est également couramment utilisée dans des applications de fusion de données comme le couplage lâche.

1.3 Informations cartographiques

Une information cartographique est une donnée provenant d'une carte, support réduit représentant un sous-ensemble de données géographiques et géologiques. Une carte est donc créée en fonction d'un besoin et ne représente qu'une partie des informations sur une zone déterminée. C'est donc un moyen efficace et simple de faciliter l'accès à certains types de données en limitant la quantité.

Historiquement, les cartes numériques étaient considérées comme outil de visualisation. Mais, depuis l'évolution technologique informatique et par l'intermédiaire de Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), ces cartes sont devenues une véritable base de données dans laquelle les objets sont définis dans un référentiel géoréférencé et accessibles à tout instant.

Après une partie décrivant le fonctionnement et l'utilisation des SIG, nous nous intéresserons à la manière d'utiliser ces types d'informations dans le cadre d'une localisation de mobile.

1.3.1 Présentation des SIG

1.3.1.1 Origine et définition

Origine

Apparus à la fin des années 60 au Canada, puis quelques années plus tard dans les pays européens, ce n'est que dans les années 80 que la France accède à ce type de système. Non considérés comme une innovation technologique, ces systèmes d'information géographique se définissent plus comme une mise en collaboration de plusieurs technologies existantes :

- Conception assistée par ordinateur (CAO). "Ancêtres" des SIG, les différents outils de CAO (DAO¹, Cartographers², PAO³) présentaient trop de lacunes et ont donc permis la naissance des SIG,
- Système de gestion de base de données (SGBD),
- Télédétection et traitement d'images,
- Méthodes d'analyse spatiale,
- Localisation sur cartes (en utilisant des données GPS).

Définition

La définition proposée en 1989 par la Société française de Photogrammétrie et de télédétection est la suivante : *système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et*

1. Dessin assisté par ordinateur. Logiciels spécialisés dans les dessins techniques notamment pour les constructions géométriques (Autocad).

2. Logiciels de cartographie permettant une spatialisation des données à partir de données statistiques.

3. Publication assistée par ordinateur. Logiciels de dessin et/ou de mise en page (Illustrator, Publisher).

de présenter des informations localisées géographiquement (géoréférencées). L'ensemble des informations géographiques intégrées dans le SIG forment une base de données géographiques.

Le SIG permet donc de gérer une multitude d'informations de tous types (images satellitaires, photos aériennes, cartes, données chiffrées, bases de données...), de les mettre à jour très rapidement, de faire des requêtes (classiques et spatiales), d'appliquer des règles de topologie et de générer de nouvelles couches d'informations par le biais de ces croisements.

1.3.1.2 Géoréférencement

Un des intérêts majeurs des SIG est de permettre la superposition de plans de diverses natures dans un espace géoréférencé, c'est-à-dire délimité précisément par des coordonnées cartographiques ou géographiques. Ce géoréférencement peut se faire de plusieurs manières :

- dans un repère global associé à un ellipsoïde de référence,
- dans un repère local associé à une projection (comme les projections Lambert en France).

Afin de réaliser une superposition d'informations, les différentes couches d'informations géographiques doivent avoir le même système de projection.

1.3.1.3 Représentation des données

Il existe deux façons de représenter une image sous forme numérique : soit en décomposant l'image en carrés élémentaires (Pixels), c'est le mode raster, soit en décomposant l'image en contours principaux et traits caractéristiques, c'est le mode vectoriel. Bien que les SIG fonctionnent de manière privilégiée en mode vecteur, les informations de type raster apportent bien souvent une superposition tout à fait complémentaire des éléments vectoriels, permettant notamment d'enrichir l'information visuelle et de faciliter l'interprétation du résultat.

Mode raster

La simplification de la localisation des objets est totale car on applique une division régulière de l'espace sous forme de cellules ou mailles carrées appelées pixels (Fig. 1.14). À chaque pixel, on attache des attributs descriptifs.

Les données raster remplissent tout l'espace. La précision est fixée une fois pour toutes, et dégrade en général la précision du modèle cartographique dont l'information est issue.

Il faut distinguer "représentation raster" et information de "type raster", comme les images satellites ou les photographies scannées : la précision dépend du capteur et ne dégrade pas la donnée d'origine.

Mode vecteur

C'est une représentation en éléments géométriques de base, des objets mathématiques

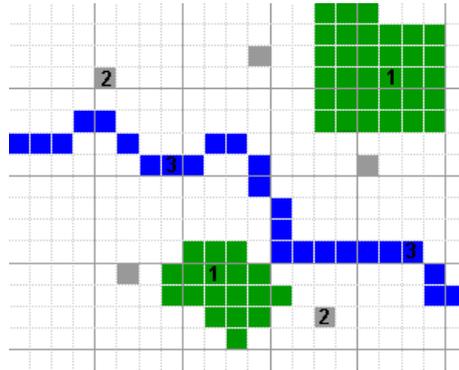


FIGURE 1.14 – Données géographiques représentées en mode raster.

élémentaires, dits primitives géométriques. Ce sont : les points, les polygones, et les polygones (Fig. 1.15).

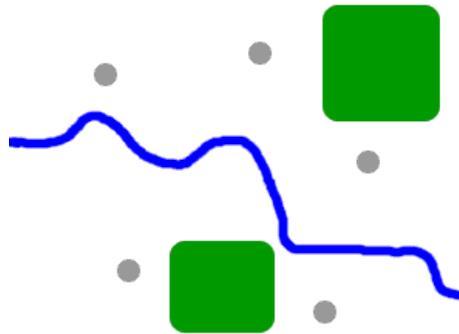


FIGURE 1.15 – Données géographiques représentées en mode vecteur.

On conserve la définition géométrique des objets du modèle cartographique, mais on passe d'une description mathématique à une description informatique simple dans un ensemble discret. Selon l'échelle d'analyse, un fleuve pourra être une ligne ou bien un polygone comme une ville pourrait être un point ou un polygone.

Dans ce mode, les objets peuvent être totalement indépendants, c'est la structure filaire ou "spaghetti", ou bien avoir des liaisons spatiales, c'est la structure dite topologique (cf. section 1.3.1.5)

1.3.1.4 Fonctionnement

Structuration des objets

Un SIG est un ensemble de couches (de différents types : habitat, hydrographie, réseau

routier, ...) contenant des données spatiales et attributaires (structurées en base de données) que l'on peut superposer.

Les données attributaires sont celles qui vont décrire les objets graphiques de la carte. Il existe donc un lien dynamique dans le logiciel SIG entre les données graphiques et les données alphanumériques (c'est-à-dire qualitatives, la largeur ou le nombre de voies d'une route par exemple). Toutes ces données sont stockées dans des tables dites attributaires. Chaque table est intimement liée à sa représentation cartographique : sa couche géographique.

Une table attributaire est identique à une table de base de données :

- chaque ligne (ou enregistrement) représente un objet graphique,
- chaque colonne (ou champ) représente une information (attribut).

Requête

On peut interroger le SIG de 2 façons :

- Sélections attributaires : les questions adressées reposent sur la construction d'une phrase logique ou requêtes SQL (Structural Query Language) qui sélectionne tous les objets graphiques répondant aux critères définis dans cette expression. Le résultat est visualisable graphiquement et dans la table associée. Par exemple, recenser les communes dont la population dépassait 2000 habitants en Corrèze en 2010. Il est possible de faire des requêtes plus complexes (multi-critères) avec les opérateurs logiques comme ET/OU.
- Sélections spatiales : on construit des requêtes topologiques répondant à des critères spatiaux. Ces questions se font par un opérateur spatial qui s'appuie sur des notions de proximité ("distant de", "inclus dans", "contient"). Il est possible de faire des requêtes sur une ou plusieurs couches. Par exemple, recenser les communes boisées qui sont traversées par la rivière " La Vienne" en Limousin.

1.3.1.5 Options des SIG

Topologie

La topologie désigne l'expression des relations entre les objets. Les objets sont identifiés les uns par rapport aux autres (le sens de la saisie est enregistré).

Les vecteurs se nomment des arcs, les points d'intersection des noeuds et les points intermédiaires des sommets. De même, une habitation est strictement comprise dans une parcelle cadastrale et n'intersecte pas de route ou de forêt.

SIG 3D

Lorsqu'une application nécessite la gestion de base de données d'objets 3D comme un modèle virtuel 3D, un système d'informations géographiques trois dimensions est requis.

Afin de pouvoir représenter un objet 3D dans un espace tridimensionnel vectoriel et de l'afficher sur un écran d'ordinateur par exemple, les SIG 3D utilisent un moteur 3D. C'est

une bibliothèque de fonctions permettant de gérer des objets dans un monde 3D virtuel (appelé scène) et de visualiser la scène à partir d'un point de vue que l'utilisateur spécifie.

L'affichage de la scène (par projection) s'appelle le rendu et peut être réalisé par différentes méthodes comme :

- le lancer de rayon : pour chaque pixel de l'image, le moteur 3D simule le trajet inverse de la lumière en tirant un trait qui part de la caméra et en déterminant les interactions avec les autres éléments (dont les paramètres intrinsèques sont connus). La couleur du pixel est alors déterminée.
- le rendu de polygone : le principe est de représenter les objets sous forme de polygones qui subissent des transformations géométriques puis sont synthétisés en fonction de l'éclairage, la couleur, ou la texture.

1.3.1.6 Exemple d'utilisation

Afin d'illustrer le fonctionnement et l'intérêt de l'utilisation d'un SIG, un exemple en deux étapes est développé dans cette section. Le site de la technopole d'ESTER de LIMOGES où se situe l'ENSIL (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges) sert d'exemple.

Tout d'abord, intéressons-nous aux deux types de représentations, vecteur et raster, et à leur affichage dans l'environnement du SIG Quantum GIS (Fig. 1.16).

Dans cet exemple, les couches ont été regroupées en deux catégories, VECTEUR et RASTER. Pour la couche raster, c'est une image provenant de la base de données orthophotographique du département de la Haute-Vienne fourni par l'IGN qui est utilisée. De même, pour les couches vecteurs, les données proviennent de la base de données topographique. On retrouve bien les formes de base, des polygones pour les routes et les cours d'eau et des polygones pour les bâtiments.

La deuxième partie de cet exemple concerne l'extraction des données concernant le réseau routier (par exemple en vue de l'utilisation d'un algorithme de Map-Matching).

Les routes étant des polygones, la création d'une nouvelle couche vecteur contenant les noeuds des couches RESEAU_ROUTIER est nécessaire. L'utilisation d'une fonction de calcul géométrique de Quantum GIS aboutit à l'élaboration de la couche COORDONNES_SEGMENTS (Fig. 1.17). En sélectionnant un des points de cette nouvelle couche et en interrogeant la base de données, la table des attributs de notre sélection apparaît.

À partir de ce type de données, il est relativement simple de construire une base de données adaptée à un besoin particulier. On peut notamment définir un réseau routier comme un espace roulant, modélisé sous une forme spécifique, par exemple, non pas par

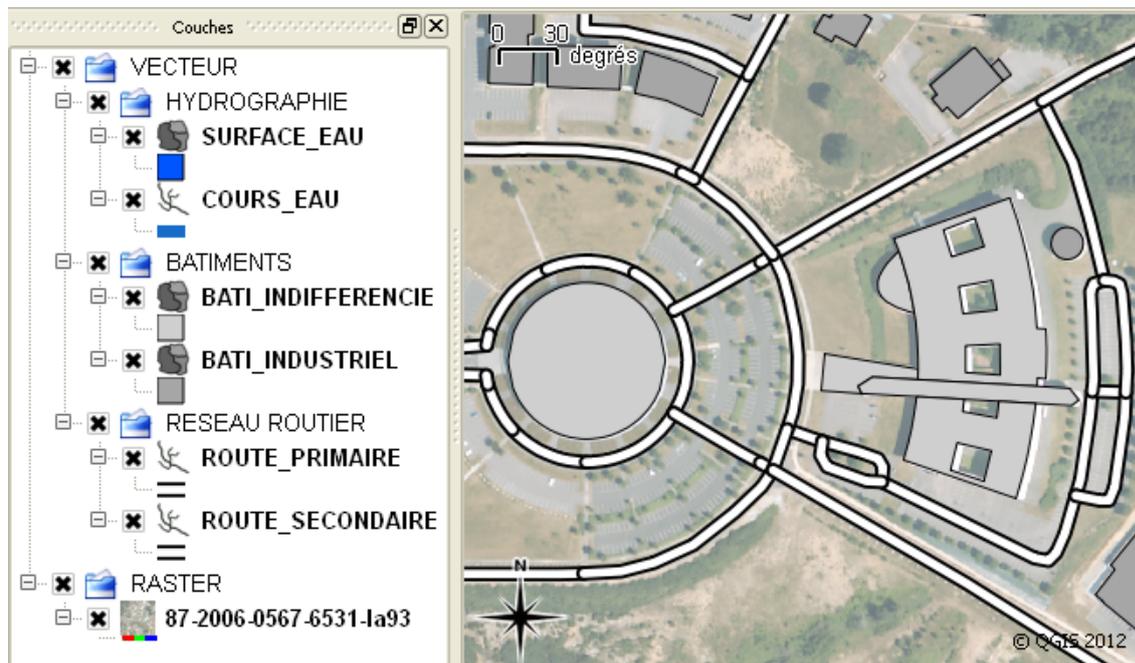


FIGURE 1.16 – Exemple d’affichage de couches vecteurs et rasters sur le site d’ESTER - Logiciel Quantum GIS.

des polygones ou des lignes, mais par des rectangles (2D) ou des parallépipèdes rectangles (3D).

1.3.2 Localisation à partir d’informations cartographiques

Pour comprendre comment utiliser des données cartographiques pour se localiser, prenons l’exemple d’un touriste se déplaçant dans un environnement a priori non connu et ne disposant que d’un plan. Il va utiliser des informations visuelles comme les noms des rues, leurs dispositions, la présence de bâtiments reconnaissables (monument, mairie, ...), afin de se relier à des attributs du plan qu’il possède.

Dans le cas de l’utilisation d’une carte sous forme de base de données et d’un SIG, le principe reste le même. Considérons que l’on dispose d’une information, même imprécise, sur la position du mobile, et que la base de données contient la description du réseau routier ou, dans le cas d’applications utilisant la vision, des amers (éléments caractéristiques de l’environnement de position fixe et connue dans un repère de référence). Le SIG va être interrogé afin de trouver les éléments représentant le réseau routier (ou les amers) qui sont contenus dans une zone spatiale (définie par rapport à la position courante du mobile).

Le résultat de la requête va fournir une information cartographique très utile : une liste des polygones (et de leurs attributs) présentes à proximité de la position courante du véhicule.

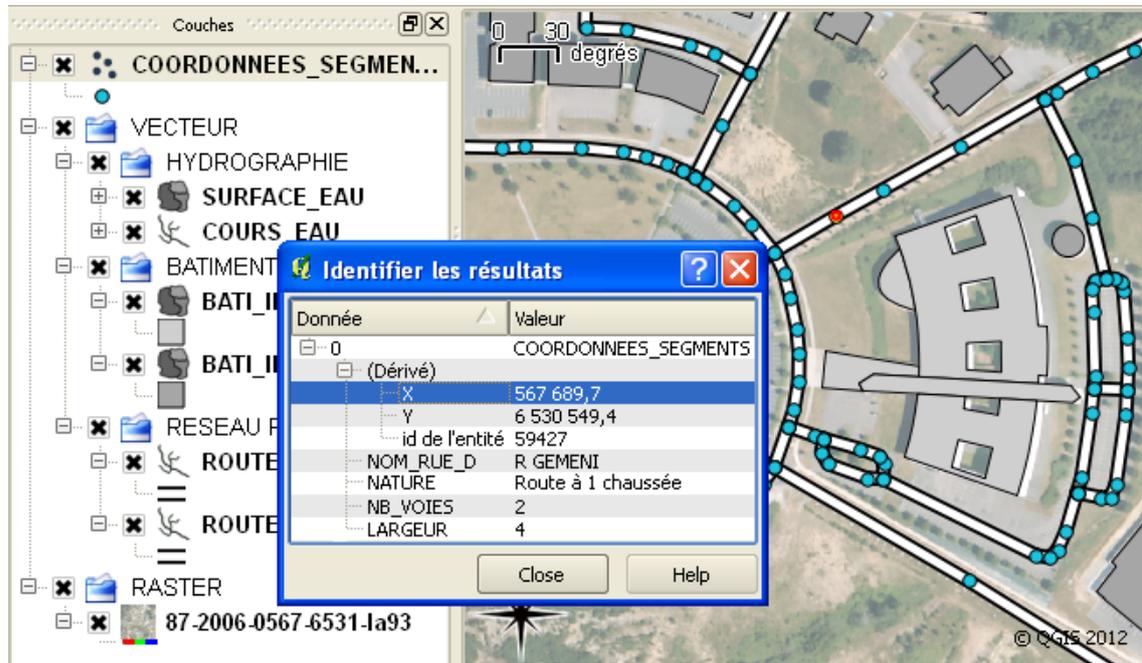


FIGURE 1.17 – Récupération des attributs d'un point de la couche vecteur COORDONNEES_SEGMENTS - Logiciel Quantum GIS.

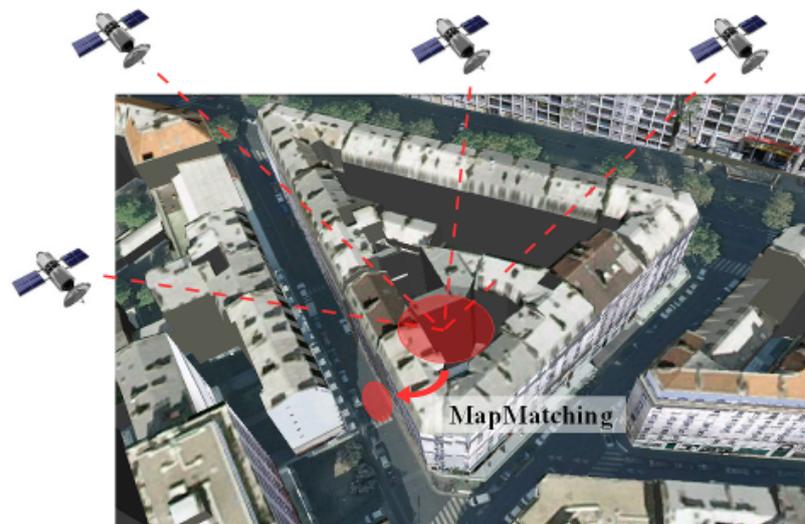


FIGURE 1.18 – Illustration de l'utilisation du Map Matching sur une localisation initiale par satellites.

Afin de pouvoir utiliser cette donnée, ou l'espace roulant en découlant, pour se localiser (Fig. 1.18), il est nécessaire d'utiliser des techniques de "Road Matching" ou "Map Matching" qui peuvent permettre de réaliser (par difficulté et robustesse croissante) :

- une simple projection sur la polyligne la plus proche, c'est le fonctionnement actuel des systèmes GPS du commerce,
- une projection sur la polyligne la plus proche avec prise en compte du cap et du sens de parcours de la polyligne,
- une mise en correspondance arc à arc (SIG utilisant la topologie),
- une mise en correspondance par fusion multi-critère et calcul d'un indicateur de confiance.

Un fois la correspondance par rapport à la carte réalisée (Map Matching), la localisation du mobile peut être mise à jour, en utilisant par exemple une procédure dite de Map Aiding.

1.4 Informations proprioceptives

En terme de localisation, les informations proprioceptives sont considérées comme les entrées des méthodes dites de localisation à l'estime.

1.4.1 Principe de la localisation à l'estime

La localisation à l'estime est une méthode qui consiste à déduire la position, l'attitude et éventuellement la vitesse d'un mobile (terrestre, maritime, aérien ou spatial, piloté ou automatique). Il est alors possible d'estimer son parcours au cours du temps. Cette méthode repose sur l'intégration d'informations provenant de capteurs dits proprioceptifs (permettant de récupérer des informations sur l'état "interne" du mobile). Cette intégration n'est possible que via des modèles de progression (ou déplacement) reposant sur la cinématique du mobile.

Il est à noter que ce type de localisation n'est pas une localisation absolue et qu'elle nécessite la définition du point d'origine du mobile.

1.4.2 Sources d'informations

Comme présenté dans l'exemple précédent, il est nécessaire d'alimenter les modèles de progression de manière à calculer le déplacement du mobile entre deux instants. Pour ce faire, il faut pouvoir remonter au minimum à 2 informations : la distance parcourue (en 2D) et la variation de cap. Il est évident que pour alimenter des modèles plus complexes, d'autres informations sont nécessaires (altitude et variation des autres angles d'attitude).

1.4.2.1 Mesure de la distance parcourue

Les capteurs proprioceptifs permettant de mesurer la distance parcourue entre deux instants s'appellent des odomètres. L'odométrie est par définition la mesure du déplacement. Ainsi, selon le type d'odomètre utilisé (codeur incrémental ou capteur optique par exemple, Fig. 1.19), les mesures de rotation des moteurs, de déplacement des roues libres ou même de déplacement du sol sont possibles. La vitesse du mobile et par intégration entre deux instants, la distance parcourue peut être ainsi déduite. Dans le cas d'un véhicule équipé d'odomètres de type codeur, une seule roue équipée suffit à mesurer la distance parcourue.

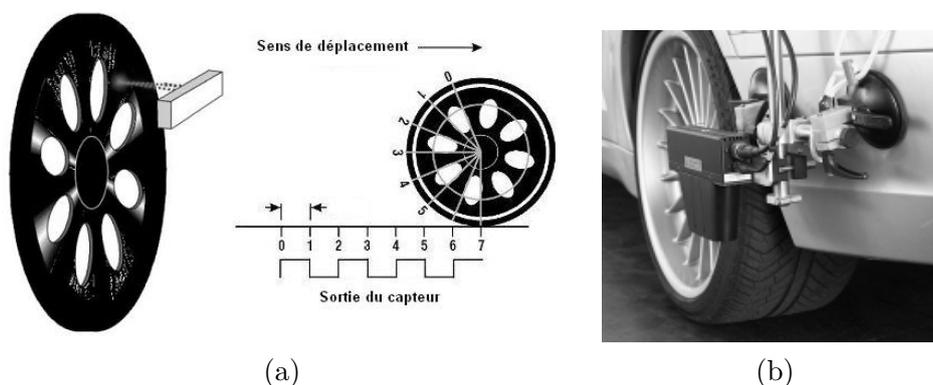


FIGURE 1.19 – (a) : Exemple d'odomètre type codeur, et (b) : Exemple d'odomètre optique : Correvit.

1.4.2.2 Mesure de la variation des angles d'attitude

Angle de cap

Sa variation peut être soit mesurée, soit reconstruite. Dans le cas d'une mesure, on fait le plus souvent appel à un gyromètre (capteur de mouvement qui mesure une vitesse angulaire) mono axe. Pour ce qui est de la reconstruction, à part dans le cas mono-codeur, l'odométrie permet également de calculer cette variation.

Les autres angles

Les variations des 3 angles d'attitude d'un mobile se mesurent via un gyromètre trois axes.

1.4.2.3 Centrale inertielle

Une centrale inertielle ou centrale à inertie est un appareil de navigation de précision comportant des capteurs d'accélération (accéléromètres) et de vitesse angulaire (gyroscopes ou gyromètres) (Fig. 1.20). Elle permet de calculer en temps réel les angles d'attitude (cap, tangage, roulis), le vecteur vitesse, ainsi que la position 3D instantanée à partir des mesures de ses capteurs.

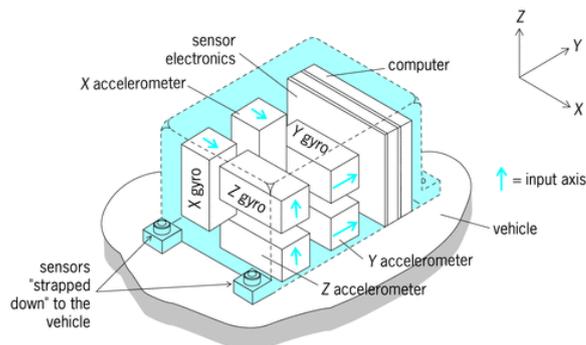


FIGURE 1.20 – Schéma de principe d'une centrale inertielle.

Les désignations habituelles des centrales à inertie sont des acronymes issus de l'anglais : Inertial Reference System (IRS), Inertial Navigation System (INS), ou Inertial Measurement Unit (IMU). Cette dernière appellation désigne le sous-système limité aux seuls capteurs inertiels (gyromètres et accéléromètres), sans calculateur.

1.4.3 Modèle de progression

La majorité des applications utilisant des modèles de progression se basent sur le même schéma de comportement du mobile que l'exemple du paragraphe 1.4.4, c'est-à-dire sur un plan, en 2 dimensions et en ne s'intéressant qu'au cap. Néanmoins, pour certains besoins, ces modèles 2D ne sont pas suffisants.

L'intérêt pour l'estimation de la configuration dans un environnement tridimensionnel est d'abord apparu pour des missions tous-terrains rencontrées dans des applications agricoles, spatiales ou militaires. On citera des études de supervision dynamique menées par Peters et Iagnemma [10] en utilisant un modèle dynamique nécessitant un grand nombre de paramètres. À l'opposé, Lenain et al. [11] prennent en compte la possible inclinaison du terrain en ajoutant une dérive aux variables d'un modèle cinématique sur un plan 2D horizontal. Entre ces extrêmes, Kelly [12] a proposé un compromis qui a été utilisé dans des applications hors-route (Howard et Kelly [13]). Bonnifait quant à lui, dans sa thèse [14], propose un modèle d'évolution 3D d'un robot mobile permettant d'estimer les coordonnées 3D ainsi que trois informations d'attitude du robot, la direction, la déclivité et le dévers orthogonal.

1.4.4 Exemple

Afin d'illustrer cette notion de localisation à l'estime, prenons un exemple de robotique mobile développé dans [15]. Les auteurs y considèrent un mobile type véhicule défini dans un repère mobile (Fig. 1.21) et se déplaçant de manière plane sur un plan, avec un roulement sans glissement.

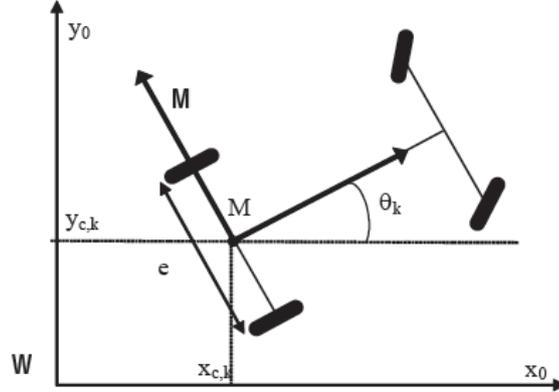


FIGURE 1.21 – Définition du repère mobile. © [15]

1.4.4.1 Capteurs

En partant de l'hypothèse que le véhicule est équipé d'un système ABS, des informations de vitesse de rotation des roues sont disponibles. En effet, le système ABS utilise des capteurs sur chaque roue pour en mesurer la vitesse de rotation par tachymétrie impulsionnelle⁴. Ces informations peuvent également être utilisées pour déterminer l'angle de rotation de chaque roue entre deux instants.

1.4.4.2 Équations

Entre deux instants d'échantillonnage, t_k et t_{k+1} , les roues droite et gauche tournent respectivement de $\Delta\varphi_{R,k}$ et $\Delta\varphi_{L,k}$, ce qui implique un déplacement Δs_k et une variation de cap $\Delta\psi_k$ du véhicule :

$$\begin{cases} \Delta s_k &= \frac{r_R \cdot \Delta\varphi_{R,k} + r_L \cdot \Delta\varphi_{L,k}}{2} \\ \Delta\psi_k &= \frac{r_R \cdot \Delta\varphi_{R,k} - r_L \cdot \Delta\varphi_{L,k}}{e} \end{cases}$$

Ce qui entraîne une modification de l'état du véhicule suivant le modèle de progression :

$$\begin{cases} x_{c,k} &= x_{c,k-1} + \Delta s_k \cdot \cos(\theta_{k-1} + \Delta\psi_k/2) \\ y_{c,k} &= y_{c,k-1} + \Delta s_k \cdot \sin(\theta_{k-1} + \Delta\psi_k/2) \\ \psi_k &= \psi_{k-1} + \Delta\psi_k \end{cases}$$

4. Technique qui utilise un compteur associé à une horloge à haute fréquence pour mesurer la durée entre deux fronts du signal carré délivré par un capteur.

1.5 Conclusion

1.5.1 Bilan

Le tableau 1.1 se base sur différents critères permettant de juger de l'intérêt d'exemples de méthodes de localisation. Il convient de détailler ces critères :

- Justesse : qualité de la localisation obtenue, confiance que l'on peut lui accorder,
- Autonomie : capacité à localiser sans autres sources d'informations,
- Continuité : disponibilité de l'information au cours du temps,
- Coût : investissement en terme d'équipements, de capteurs,
- Mise en oeuvre : facilité à mettre en place, analyser et traiter.

Type d'info et exemples de méthode associée	Justesse	Autonomie	Continuité	Coût	Mise en oeuvre
Cartographiques :					
• Map Aiding simple (simple projection)	-	--	++	++	+
• Map Aiding évolué (correspondance multi-critère)	+	--	++	++	-
Proprioceptives :					
• Localisation à l'estime 2D (odométrie roues arrières)	-	+	+	+	+
• Localisation à l'estime 3D (centrale inertielle)	+	++	++	--	-
Satellitaires :					
• Utilisation trame GGA (récepteur milieu de gamme)	-	++	--	+	++
• Utilisation données brutes (récepteur milieu de gamme)	+	++	-	+	-

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif.

La lecture du tableau 1.1 permet donc de constater les lacunes évidentes de chacune des méthodes "mono-entrées" proposées. Il apparaît alors nécessaire, dans le but de réaliser une localisation efficace (efficacité relative aux critères présents dans le tableau), d'introduire un type de méthode de localisation capable de combiner au mieux les sources d'informations à disposition, c'est-à-dire de les fusionner. Cette méthode reposera donc sur une fusion de données⁵.

5. *La fusion de données est une technique récente pour le traitement d'informations multisources. Elle permet de fusionner des données multiples concernant un phénomène afin d'obtenir un jugement plus fondé que celui obtenu à partir de l'ensemble des sources considérées chacune isolément.* Définition issue de la référence [16]

Une revue détaillée des avancées récentes dans ce domaine a d'ailleurs été réalisée par Nabil Drawil et Otman Basir [17].

1.5.2 L'approche proposée

Il s'agit de fusionner les trois sources d'informations abordées dans ce chapitre (Fig. 1.22) :

- des informations proprioceptives, provenant d'odomètres et/ou de gyromètres et disponibles selon la fréquence d'échantillonnage des capteurs,
- des informations satellitaires, provenant d'un récepteur GPS standard et disponibles selon sa fréquence d'échantillonnage,
- des informations cartographiques, provenant d'une base de données référencées et disponibles à tout instant.

Les sorties sont :

- q , l'état (ou la pose) du véhicule, défini au minimum par les coordonnées 3D de l'origine du repère véhicule, M , ainsi que par les angles d'attitude,
- P , la matrice de confiance associée, permettant notamment de représenter le domaine de confiance de la localisation (de centre M).

Chaque étape de ce processus de fusion est détaillée par la suite, le traitement des données proprioceptives ou prédiction proprioceptive dans le chapitre 2, le traitement des données satellitaires ou fusion GPS dans le chapitre 3 et le traitement des données cartographiques ou fusion Map Aided dans le chapitre 4.

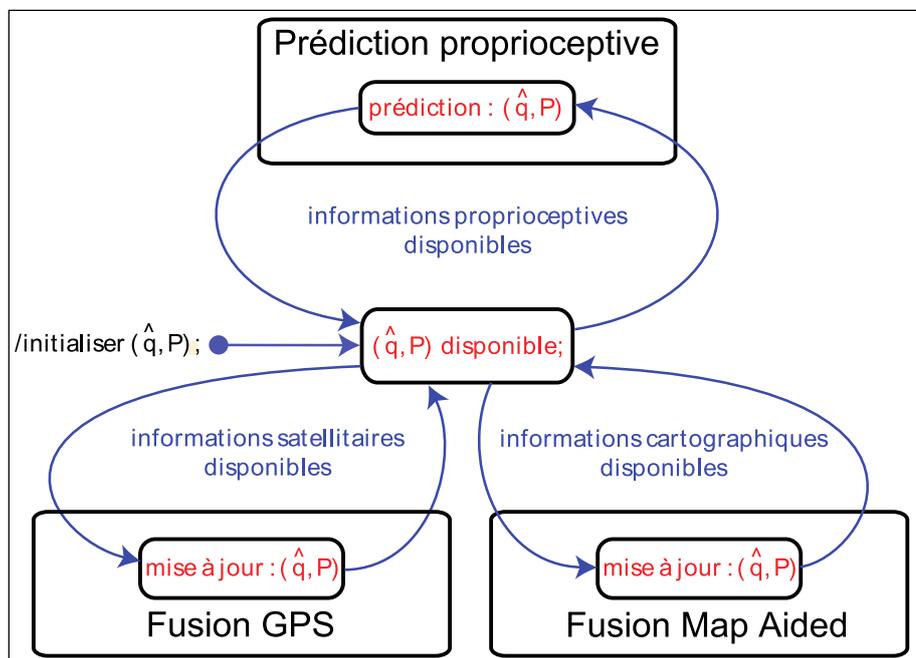


FIGURE 1.22 – Diagramme d'état de la fusion de données (stateflow machine).

Localisation 3D à l'estime

Chapitre 2 - Localisation 3D à l'estime

Ce deuxième chapitre aborde la prédiction proprioceptive du processus de fusion de données. Il est constitué d'une partie théorique permettant de définir la configuration et le modèle d'évolution du véhicule et d'une partie plus orientée pratique aboutissant à l'algorithme de traitement des données et à la présentation de résultats.

Sommaire

2.1	Introduction	37
2.2	Modèle cinématique	37
2.2.1	Représentation d'état	37
2.2.2	Configuration du véhicule	37
2.2.3	Repères de travail	39
2.2.4	Données capteurs disponibles	39
2.2.5	Définition du modèle cinématique	40
2.2.6	Linéarisation	42
2.2.7	Observabilité	43
2.2.8	Discrétisation	44
2.3	Prédiction proprioceptive	44
2.3.1	Modèle de progression	44
2.3.2	Comportement	45
2.3.3	Algorithme	45
2.3.3.1	Variance de b_k^q - Matrice de bruit d'état Q_k	46
2.3.3.2	Matrice de régime libre du linéarisé - F_k	46
2.4	Expérimentations	46
2.4.1	Limoges	46
2.4.2	Paris - XIIème arrondissement	50
2.5	Conclusion	54

2.1 Introduction

Comme évoqué dans la section 1.4.1, la localisation à l'estime s'appuie sur deux éléments :

- un modèle d'évolution du véhicule, basé sur la configuration du véhicule,
- la connaissance des grandeurs à l'origine du déplacement du véhicule.

Dans le cas d'un véhicule type automobile, les roues motrices introduisent un déplacement longitudinal, vers l'avant ou vers l'arrière, et les roues directrices induisent un changement de cap.

Le modèle va donc se baser en entrée sur ces deux informations, interprétables comme la vitesse longitudinale et la vitesse angulaire de changement de cap du véhicule, afin d'estimer la trajectoire du véhicule.

La mesure de ces deux vitesses est possible par l'intermédiaire d'équipements présents sur le véhicule (par exemple le système ABS) permettant de connaître la vitesse de rotation des roues.

2.2 Modèle cinématique

2.2.1 Représentation d'état

Depuis la coupure épistémologique introduite par Kalman [18], la représentation d'état s'est imposée comme outil central de modélisation de l'évolution.

L'état est un vecteur d'informations dont la connaissance permet d'expliquer les mesures au travers de l'équation d'observation et l'évolution instantanée au travers de l'équation de progression.

Le système étudié peut être linéaire ou non, continu ou discret :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{cases} \quad \begin{cases} x_{k+1} &= \phi(x_k, u_k) \\ y_k &= h(x_k, u_k) \end{cases}$$

2.2.2 Configuration du véhicule

La configuration du véhicule (Fig. 2.1) est définie à partir d'un modèle de véhicule « deux roues à essieu arrière fixe ». Le repère de référence « Monde » est celui sur lequel le trajet sera défini (i.e. le plan de référence du SIG).

- Repère de référence « Monde » $\mathcal{W} : (O, \vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0)$,

- Repère « Véhicule » $\mathcal{M} : (M, \vec{i}_3, \vec{j}_3, \vec{k}_3)$.

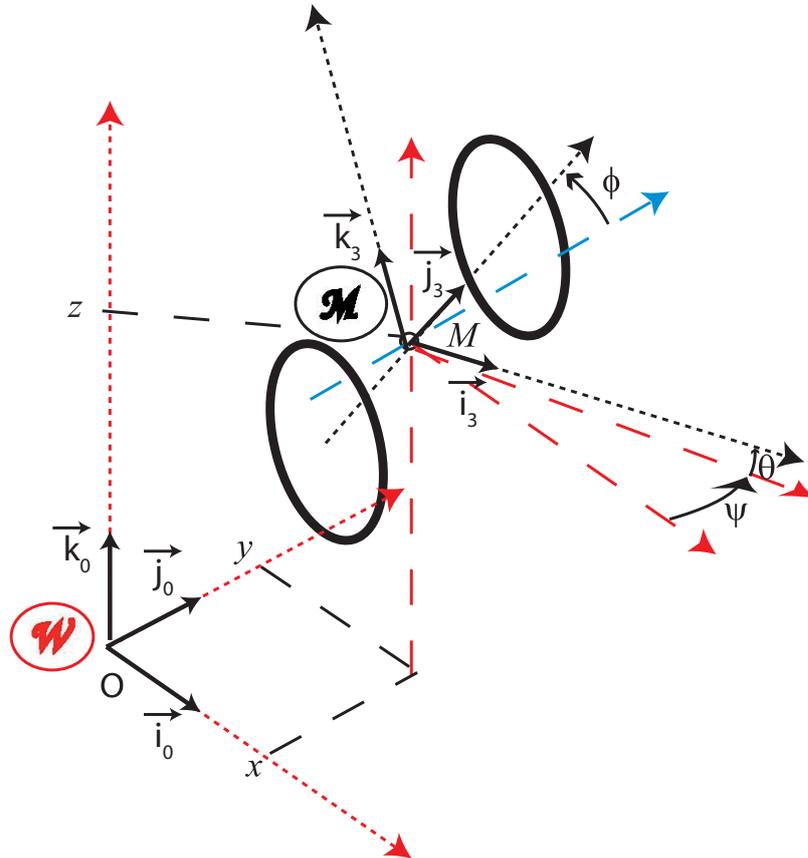


FIGURE 2.1 – Configuration 3D d'un véhicule modèle « essieu arrière fixe », avec le repère de référence \mathcal{W} et le repère mobile \mathcal{M} .

Par définition, la configuration du véhicule indique la pose dans le repère « Véhicule » par rapport au repère de référence « Monde ». Dans l'espace Euclidien 3D, on la définit comme :

$$q = [x, y, z, \psi, \theta, \phi]^T \quad (2.1)$$

avec : $\begin{cases} \psi & : \text{cap} \\ \theta & : \text{pente} \\ \phi & : \text{dévers}^1 \end{cases}$

En d'autres termes, la configuration peut être définie comme la transformation de \mathcal{W} à \mathcal{M} par les quatre opérations élémentaires suivantes :

1. Précision : puisque nous considérons la configuration cinématique d'un véhicule lent induite par la route et non pas son état dynamique, les termes cap, pente et dévers seront utilisés en lieu et place de lacet, tangage et roulis.

- la translation $O\vec{M}$:
 $\mathcal{W} \rightarrow \mathcal{W}_0 = (M, \vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0)$,
- la rotation (ψ, \vec{k}_0) , angle de cap :
 $\mathcal{W}_0 \rightarrow \mathcal{W}_1 = (M, \vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1) = (M, \vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_0)$,
- la rotation (θ, \vec{j}_1) , angle de pente :
 $\mathcal{W}_1 \rightarrow \mathcal{W}_2 = (M, \vec{i}_2, \vec{j}_2, \vec{k}_2) = (M, \vec{i}_2, \vec{j}_1, \vec{k}_2)$,
- la rotation (ϕ, \vec{i}_2) , angle de dévers :
 $\mathcal{W}_2 \rightarrow \mathcal{W}_3 = (M, \vec{i}_3, \vec{j}_3, \vec{k}_3) = (M, \vec{i}_2, \vec{j}_3, \vec{k}_3)$,
 $= \mathcal{M}$.

Les matrices de changement de coordonnées associées s'écrivent :

$$R(\psi, \vec{k}_0) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R(\theta, \vec{j}_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R(\phi, \vec{i}_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Par la suite, $R(\psi, \vec{k}_0)$, $R(\theta, \vec{j}_1)$ et $R(\phi, \vec{i}_2)$ désigneront les matrices de changement de coordonnées associées. De même ${}^{\mathcal{W}}[v]$ désignera les coordonnées d'un vecteur v dans le repère de référence « Monde » \mathcal{W} tandis que ${}^{\mathcal{M}}[v]$ représentera les coordonnées dans le repère mobile lié au véhicule.

2.2.3 Repères de travail

Le mouvement du mobile est défini dans un référentiel orthonormé local tangent (Fig. 2.2) où la rotondité de la Terre est négligée. L'état du véhicule à l'instant t est toujours défini dans le repère lié à la terre (référentiel ECEF ou système de référence géodésique spatial WGS 84) au même instant t car ils sont liés mécaniquement entre eux. C'est dans ces coordonnées que l'on souhaite localiser le mobile.

2.2.4 Données capteurs disponibles

Dans la suite de ce document, les données proprioceptives seront définies par la vitesse de rotation des roues arrières du véhicule. Les deux véhicules qui ont servi pour les campagnes

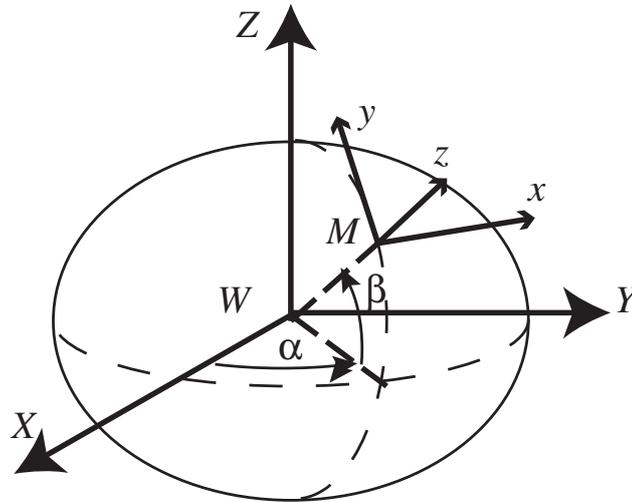


FIGURE 2.2 – Référentiels ECEF (W, X, Y, Z) et local tangent (M, x, y, z).

d'essais (cf. Annexe C) disposent tous deux d'équipements permettant de mesurer ces informations.

2.2.5 Définition du modèle cinématique

Les vitesses linéaire (v) et angulaire (ω , liée au cap) sont supposées connues (mesurées) dans le repère mobile.

Pour un véhicule à deux roues motorisées, ces vitesses sont liées aux vitesses de rotation ($\dot{\varphi}_r, \dot{\varphi}_l$) des roues (Eq. 2.5), où R_r (resp. R_l) est le rayon de la roue droite (resp. gauche), et E la voie de l'essieu :

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_r}{2} & \frac{R_l}{2} \\ \frac{R_r}{E} & -\frac{R_l}{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_r \\ \dot{\varphi}_l \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Comme $\dot{\varphi}_r$ et $\dot{\varphi}_l$ sont mesurées, la vitesse de M est connue dans le repère mobile : elle est égale à $v \cdot \vec{i}_3$.

x, y et z étant les coordonnées de M dans le repère « Monde », la première partie du

modèle s'exprime dans le repère mobile :

$$\begin{aligned}
 {}^{\mathcal{W}} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \mathcal{W} [v \cdot \vec{i}_3] \\
 &= R(\psi, \vec{k}_0) \cdot R(\theta, \vec{j}_1) \cdot R(\phi, \vec{i}_2) \cdot {}^{\mathcal{M}} [v \cdot \vec{i}_3] \\
 &= v \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi \cdot \cos \theta \\ \sin \psi \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Pour ce qui concerne les rotations élémentaires, le vecteur de rotation s'écrit :

$$\omega \cdot \vec{k}_0 = \dot{\psi} \cdot \vec{k}_0 + \dot{\theta} \cdot \vec{j}_1 + \dot{\phi} \cdot \vec{i}_2.$$

En exprimant cette relation dans le repère $(M, \vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1) = (M, \vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_0)$, et sachant que, d'après les matrices de changement de coordonnées (Eqs. 2.2, 2.3 et 2.4) :

$$\begin{aligned}
 {}^{\mathcal{W}_1} [\vec{i}_2] &= R(-\theta, \vec{j}_1) \cdot {}^{\mathcal{W}_2} [\vec{i}_2] \\
 {}^{\mathcal{W}_1} [\vec{k}_3] &= R(-\theta, \vec{j}_1) \cdot R(-\phi, \vec{i}_2) \cdot {}^{\mathcal{W}_3} [\vec{k}_3]
 \end{aligned}$$

il vient alors :

$$\omega \cdot R(-\theta, \vec{j}_1) \cdot R(-\phi, \vec{i}_2) \cdot \vec{k}_3 = +\dot{\psi} \cdot \vec{k}_0 + \dot{\theta} \cdot \vec{j}_1 + \dot{\phi} \cdot R(-\theta, \vec{j}_1) \cdot \vec{i}_2$$

soit, en explicitant les matrices de changement de coordonnées :

$$\omega \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \dot{\phi} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\theta} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\psi} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

soit encore :

$$\omega \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix} = \dot{\phi} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\theta} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\psi} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

et finalement :

$$\omega \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta \cdot \cos \phi \\ -\sin \phi \\ \cos \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \cdot \cos \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} - \dot{\phi} \cdot \sin \theta \end{bmatrix}.$$

En inversant, l'autre partie du modèle cinématique est donc :

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \omega \cdot \begin{bmatrix} \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \\ -\sin \phi \\ \tan \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

En regroupant les équations (2.6) et (2.7), l'équation d'état cinématique globale est obtenue (Eq. 2.8) et peut être considérée comme une alternative aux modèles de Kelly [12] et de Bonnifait [14] (cf. p29) :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = v \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi \cdot \cos \theta \\ \sin \psi \cdot \cos \theta \\ -\sin \theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \\ -\sin \phi \\ \tan \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Un aperçu du comportement du modèle de véhicule peut être obtenu en envisageant une trajectoire circulaire sur un plan incliné générée par des entrées constantes $v = v_0$ et $\omega = \omega_0$. L'évolution des variables est montrée sur la Fig. 2.3 : le cap (ψ) évolue linéairement alors que la pente (θ) et le dévers (ϕ) oscillent.

2.2.6 Linéarisation

Considérant l'évolution d'un véhicule sur une route dont les variations de pente et de dévers sont faibles, une linéarisation autour de $\theta = 0$ et $\phi = 0$ nous permet de simplifier le modèle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = v \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ -\theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\phi \\ \theta \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

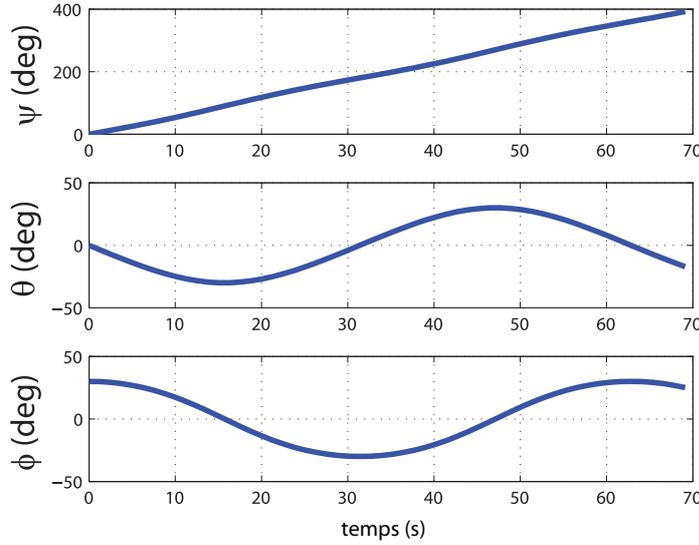


FIGURE 2.3 – Évolution du cap, de la pente et du dévers pour un véhicule à vitesse et à angle de rotation constants sur un plan incliné, basée sur le modèle cinématique 3D

On notera, dans ce dernier modèle 2.9, que les ensembles de variables $[x, y, \psi]$ et $[z, \theta, \phi]$ sont découplés. Ce découplage qui n’apparaît pas formellement dans le modèle non-linéaire provient de l’approximation $\{\cos(\theta) \approx 1\}$ justifiée par l’environnement à pente faible.

Ce dernier point est d’ailleurs l’objet de travaux sur le développement d’un observateur non linéaire découplé pour l’estimation de l’attitude 3D d’un véhicule dans [1].

2.2.7 Observabilité

Focalisons l’étude sur l’observation de l’état partiel $[z, \theta, \phi]^T$ à partir de la mesure de z . En effet, l’estimation du groupe “horizontal” de variables $[x, y, \psi]$ a déjà été l’objet d’une grande quantité de publications et de résultats opérationnels. On considère donc dans la suite l’équation de progression réduite (2.10) associée à l’équation d’observation correspondante à la mesure de la première composante z .

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = v \cdot \begin{bmatrix} -\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\phi \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

En lisant cette équation, on voit que $-\theta$ est la dérivée de z . La pente θ est donc observable à partir des mesures de z . De plus, la dérivée de $-\theta$ est le produit $\phi \cdot \omega$. Sous réserve que ω ne soit pas identiquement nul, ϕ est observable à partir de la connaissance de la commande ω et de celle de θ , donc de celle de z .

En conclusion, la pente est observable à partir de z et le dévers est observable à partir de (z, ω) partout où le véhicule est en déplacement non rectiligne.

Comme l'observabilité de θ et de ϕ repose sur la bonne connaissance de z , le tracé temporel des angles d'attitude ne sera présenté qu'au cours du chapitre utilisant les données cartographiques (chapitre 4, correspondant au cas dans lequel la variable d'état z est la mieux estimée).

2.2.8 Discrétisation

L'objectif étant une mise en œuvre temps réel embarquée, une version discrétisée nécessaire. Elle est obtenue par la formule d'Euler :

$$q_{k+1} = A_k \cdot q_k + B_k \cdot u_k \quad (2.11)$$

avec :

$$A_k = I_6 \quad \text{et} \quad B_k = \begin{bmatrix} \cos \psi_k & 0 \\ \sin \psi_k & 0 \\ -\theta_k & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -\phi_k \\ 0 & \theta_k \end{bmatrix}$$

et :

$$u_k = \begin{bmatrix} \frac{R_r}{2} & \frac{R_l}{2} \\ \frac{R_r}{E} & -\frac{R_l}{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta\varphi_{r,k} \\ \delta\varphi_{l,k} \end{bmatrix}$$

Dans l'expression ci-dessus, $\delta\varphi_{r,k}$ (resp. $\delta\varphi_{l,k}$) est la variation de l'angle de la roue droite (resp. gauche) mesurée entre deux instants d'échantillonnage t_k et t_{k+1} .

2.3 Prédiction proprioceptive

2.3.1 Modèle de progression

$$\begin{aligned} q_{k|k-1} &= \underbrace{I_6}_{A_k} \cdot q_{k-1|k-1} + \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \psi_k & 0 \\ \sin \psi_k & 0 \\ -\theta_k & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -\phi_k \\ 0 & \theta_k \end{bmatrix}}_{B_k} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \delta s_k \\ \delta \psi_k \end{bmatrix}}_{u_k} + b_k^q \quad (2.12) \\ &= f(q_{k-1|k-1}, u_k) + b_k^q \end{aligned}$$

b_k^q représente le bruit d'état. Grâce à un modèle de bruit de type gaussien (annexe A, plus particulièrement la section concernant le cas vectoriel), b_k^q permet de représenter sous la forme d'une matrice de variance covariance l'effet des imprécisions des paramètres fixes

tels que le rayon des roues R_r et R_l et la voie E , ainsi que des mesures $\delta\varphi_{r,k}$ et $\delta\varphi_{l,k}$ sur le modèle de progression.

Ainsi, à partir de cette matrice de bruit d'état, noté Q_k par la suite, on va pouvoir également déterminer, à chaque nouvelle mesure, l'évolution de la matrice de covariance de l'erreur d'estimation, P_k .

2.3.2 Comportement

Chaque fois que des mesures proprioceptives sont disponibles (Fig. 1.22), une nouvelle prédiction de l'état, \tilde{q}_k , est réalisée en utilisant l'équation de progression (Eq. 3.3). Sa matrice de covariance associée, P_k , est également prédite (cf. algorithme 1).

La matrice de covariance P_k associée à l'état est une matrice symétrique définie positive qui définit un domaine de confiance ellipsoïdal (annexe A) de centre (x, y, z) , trois premiers termes de l'état :

$$(q - \hat{q}_k)^T \cdot P_k^{-1} \cdot (q - \hat{q}_k) < 1. \quad (2.13)$$

Une représentation en 2D et 3D d'un exemple de domaine de confiance est illustrée sur la figure 2.4.

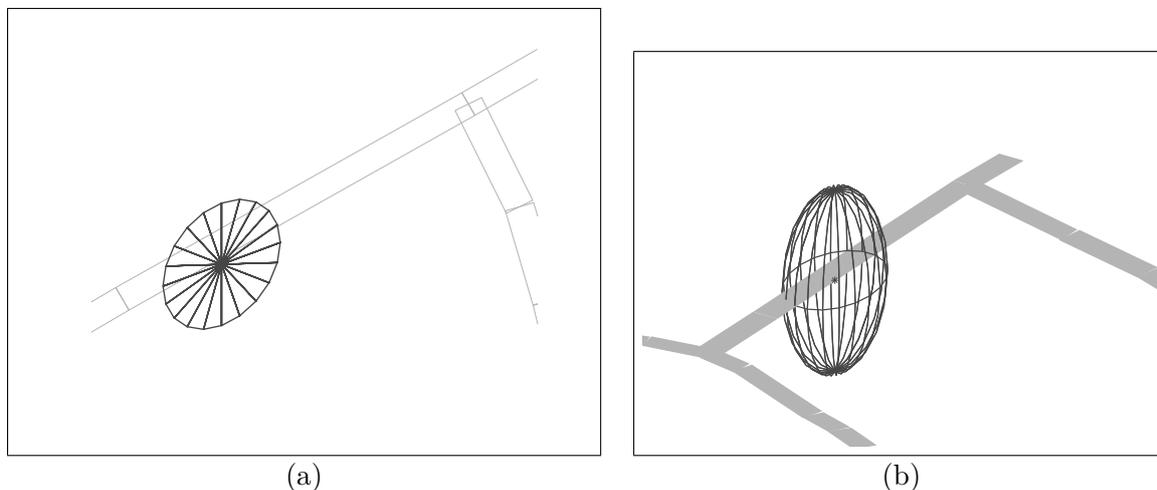


FIGURE 2.4 – Représentation d'une localisation et de son domaine de confiance associé - (a) : en 2D, et (b) : en 3D. Le domaine de confiance est représenté par l'ellipsoïde et la localisation est au centre de cette ellipsoïde. Les segments en gris clair représentent la modélisation de la route.

2.3.3 Algorithme

Algorithm 1 : Prédiction proprioceptive**Initialisation**

- Estimation initiale de l'état et de son imprécision : $\hat{x}_{0|0}$ et $P_{0|0}$;

Prédiction

- Prédiction de l'état : $\hat{q}_{k|k-1} = f(\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k)$;
- Calcul de la matrice de bruit d'état : Q_k ;
(Annexe B)
- Calcul de la matrice de régime libre du linéarisé : F_k ;
- Prédiction de la covariance de l'erreur d'estimation : $P_{k|k-1} = F_k^T \cdot P_{k-1|k-1} \cdot F_k + Q_k$;

2.3.3.1 Variance de b_k^q - Matrice de bruit d'état Q_k

Le détail de la démarche d'obtention de cette matrice est explicité dans l'annexe B.

2.3.3.2 Matrice de régime libre du linéarisé - F_k

Comme $\hat{q}_{k|k-1} = f(\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k)$, le modèle linéarisé est :

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial q} \Big|_{\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k}$$

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\sin \hat{\psi}_k \cdot \delta s_k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cos \hat{\psi}_k \cdot \delta s_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\hat{\theta}_k \cdot \delta s_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\delta \psi_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta \psi_k & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.4 Expérimentations**2.4.1 Limoges**

Les acquisitions de données ont été réalisées à l'aide du véhicule PRISM, Plate-forme de Recherche et d'Innovation de la Section Mécatronique, de l'ENSIL sur le site de la

technopole de Limoges. Des détails sur ce véhicule sont disponibles en annexe C.

Ce véhicule, équipé d'un système de mesure de vitesse des roues arrières et d'un PC embarqué, fournit des données réelles (Fig. 2.5) permettant un traitement sur table (logiciel Matlab) dans des conditions temps-réel.

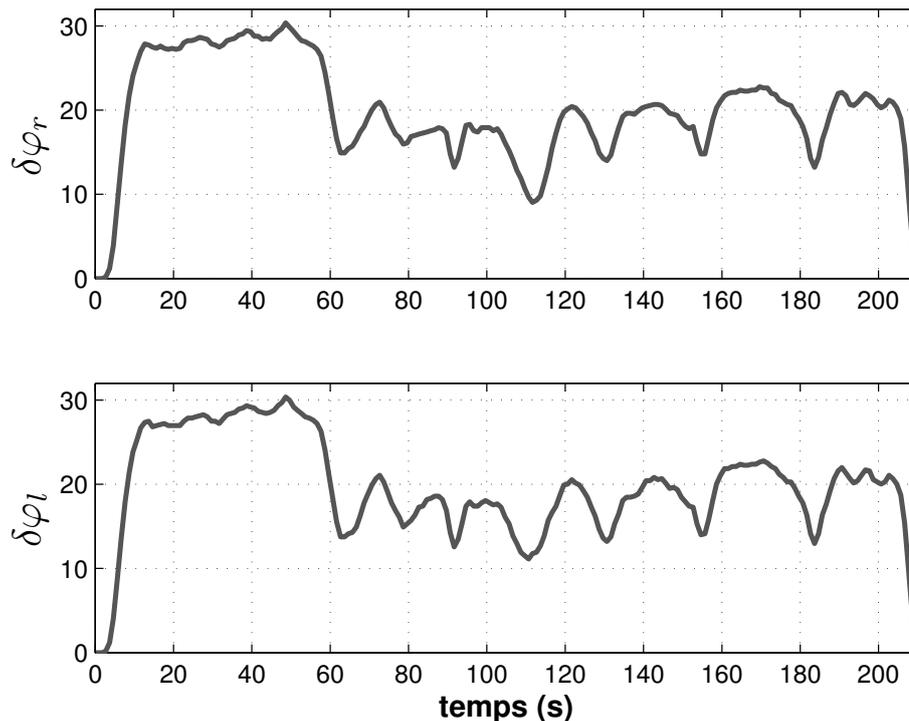


FIGURE 2.5 – Signaux odométriques lors de l'acquisition sur le site de Limoges.

Ce véhicule étant également muni d'un récepteur GPS, et compte tenu de la bonne qualité de réception satellitaire sur le site, la trame GGA est considérée comme une référence pour la comparaison avec les résultats à l'estime de l'approche proposée.

Il est à noter que l'initialisation de la position et du domaine de confiance se fait à partir de la première mesure GPS disponible.

La figure 2.6 permet de visualiser le résultat de l'algorithme de prédiction proprioceptive et de le comparer à la localisation fournie par la trame GGA du récepteur u-blox.

Le défaut de dérive au cours du temps des solutions de localisation à l'estime évoqué dans le premier chapitre se retrouve bien sur ces résultats. Or, il est à noter que les valeurs des paramètres essentiels que sont le rayon des roues et la voie ont été mesurés le plus précisément possible et que le cap initial est donné par la centrale inertielle du véhicule

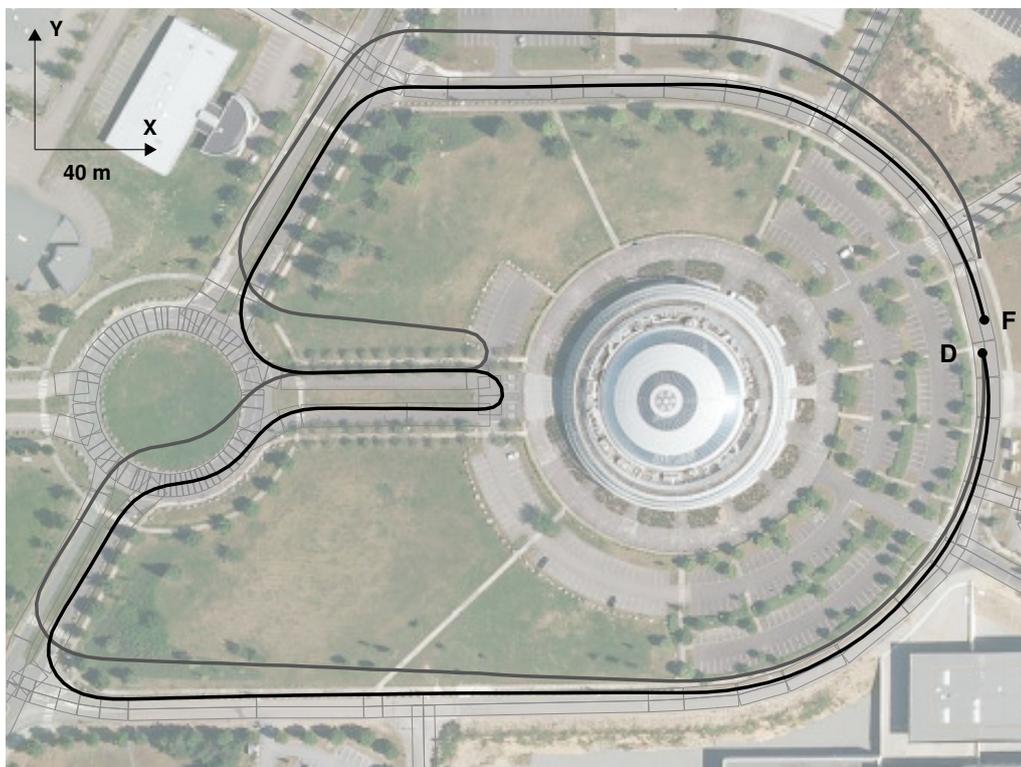


FIGURE 2.6 – Localisation obtenue par prédiction proprioceptive (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

PRISM. Ce point souligne la nécessité de ne pas se contenter d'une localisation à l'estime même lorsqu'elle est optimisée.

Néanmoins, compte tenu du peu d'informations en entrée (odométrie des roues arrières), de la facilité de mise en œuvre, et du caractère dynamique de cette prédiction, ce modèle d'évolution est une base de travail pertinente.

De plus, comme l'illustre la figure 2.7, cette prédiction repose sur un modèle 3D. Dans ce cas, étant donné les hypothèses et le manque d'informations concernant l'altitude, la localisation obtenue reste sur un plan parallèle au plan XY . L'apport de ce modèle 3D sera plus évident par la suite.

Le domaine de confiance, initialisé par rapport aux mesures GPS, est dès l'origine relativement important et ne cesse d'augmenter à chaque nouvelle mesure odométrique. Il est donc difficile de le représenter graphiquement sur les figures précédentes. C'est pour cela qu'une représentation temporelle du volume de l'ellipsoïde 3D correspondante au domaine de validité à 98% de l'estimation de la position 3D est présentée en figure 2.8.

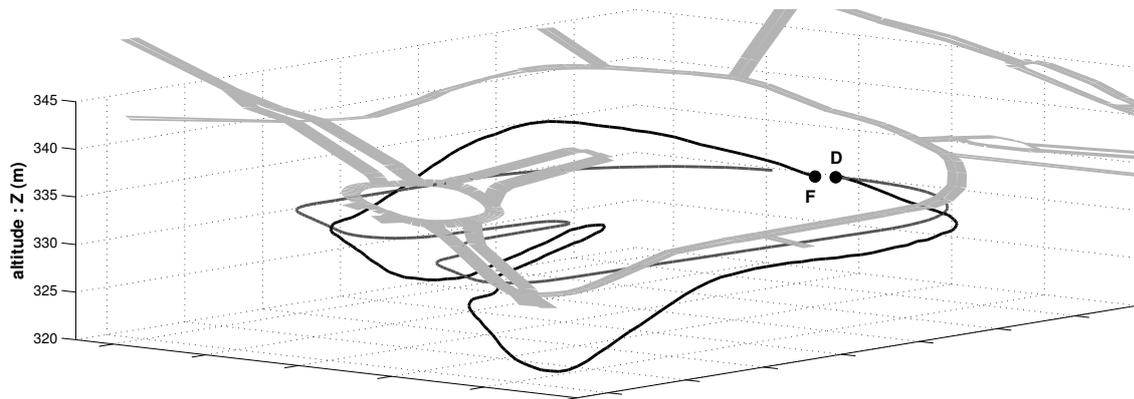


FIGURE 2.7 – Localisation obtenue par prédiction proprioceptive (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

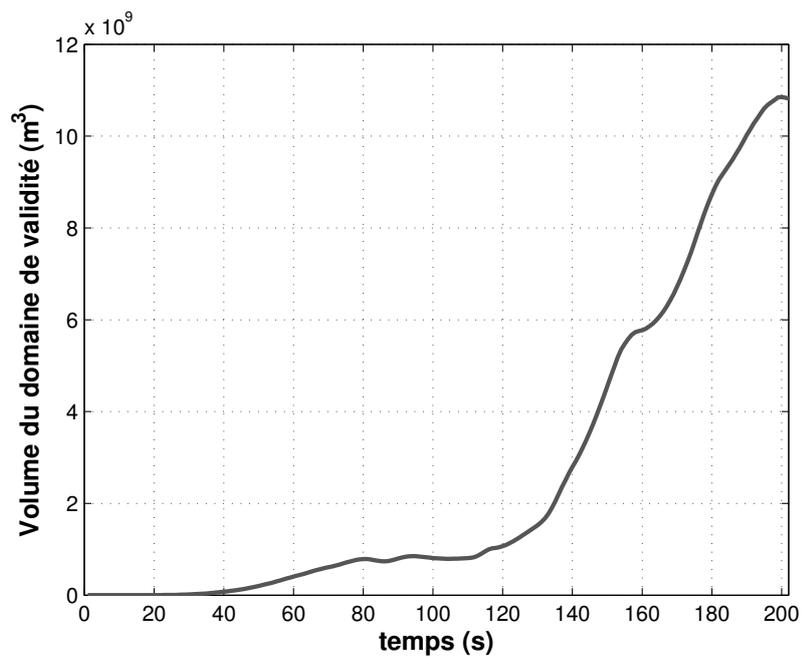


FIGURE 2.8 – Volume du domaine de validité.

Le volume du domaine de validité est calculée uniquement à partir des informations concernant l'estimation de la position :

$$vol = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \sqrt{\det(P(1:3, 1:3))} \quad (2.15)$$

2.4.2 Paris - XIIème arrondissement

Les acquisitions de données ont été réalisées à l'aide du véhicule VERT, Véhicule d'Essais et de Référence en Trajectographie développé par l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux), sur le site de la mairie du XIIème arrondissement de Paris.

Ce véhicule dispose de codeurs ABS/ESP sur chaque roue (données accessibles via le bus CAN, Controller Area Network) permettant l'obtention des vitesses des roues arrières (Fig. 2.9).

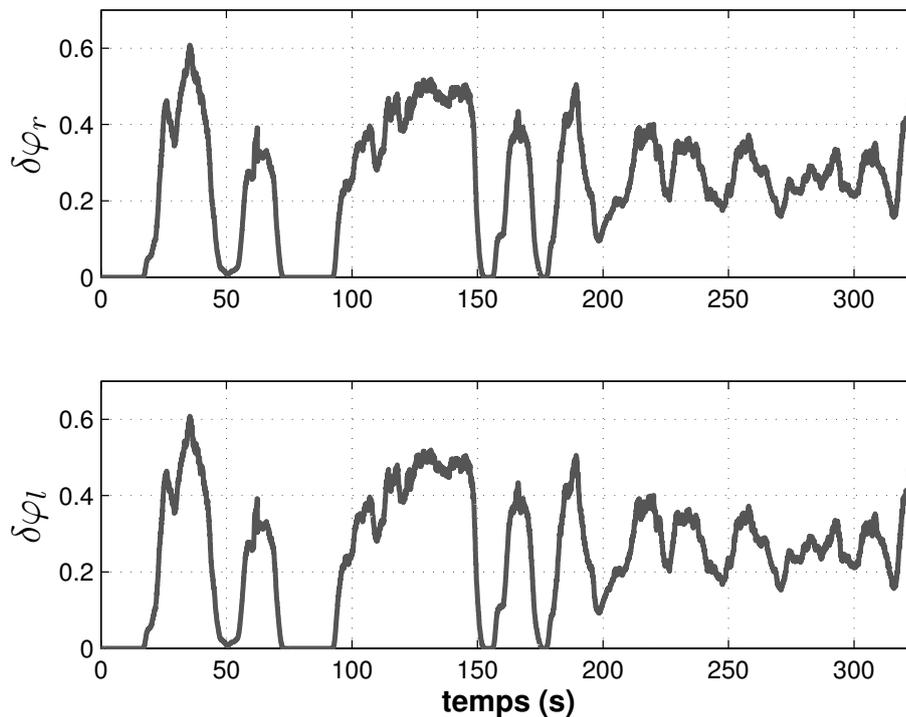


FIGURE 2.9 – Signaux odométriques lors de l'acquisition sur le site de Paris.

Un ensemble composé d'une centrale inertielle et d'un système GPS équipe également ce véhicule, fournissant une référence de bonne qualité.

L'application de l'algorithme de prédiction sur ces données permet de confirmer les premières analyses faites sur les données de Limoges.

La figure 2.10 permet de comparer en 2D la trajectoire obtenue par la localisation à l'estime à la référence. On peut noter que la localisation à l'estime dans ce cas subit plus fortement le problème de dérive que pour les données de Limoges. Compte tenu de la plus grande complexité du parcours (plus long, plus d'arrêts, virages plus serrés), et d'une optimisation moins poussée des paramètres de rayons de roues et de voie, ce résultat est

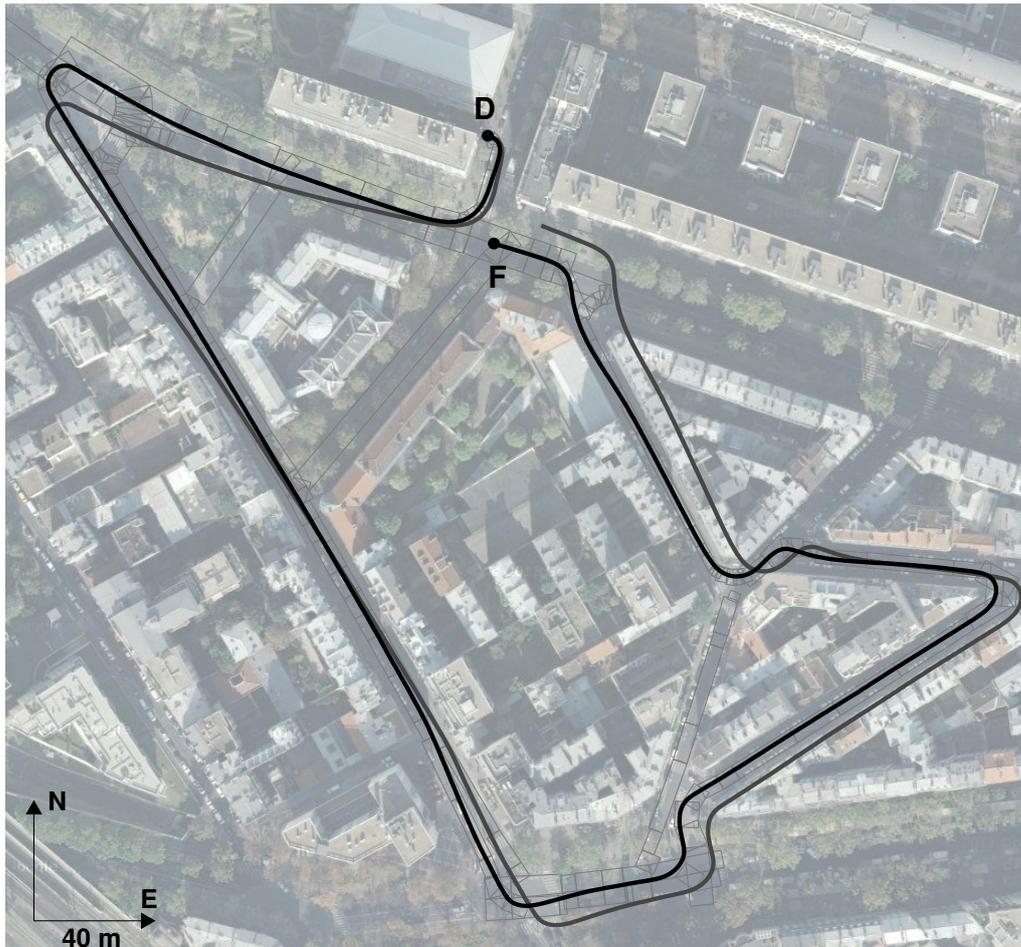


FIGURE 2.10 – Localisation obtenue par prédiction proprioceptive (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

cohérent avec les attentes.

Cependant, une nouvelle fois, la faible différence obtenue par rapport à la référence reste très intéressante, et il ne serait pas incompréhensible d'obtenir un résultat moins bon. Ceci s'explique par une bonne qualité de signaux odométriques, avec un nombre élevé de tops par tour et une fréquence d'échantillonnage assez élevée.

Concernant la visualisation 3D des résultats (Fig. 2.11), étant donné les faibles différences d'altitude le long du parcours, il est difficile de se rendre compte que la trajectoire obtenue est sur le plan parallèle au plan XY. Cependant, cela suffit pour démontrer l'intérêt d'un modèle 3D.

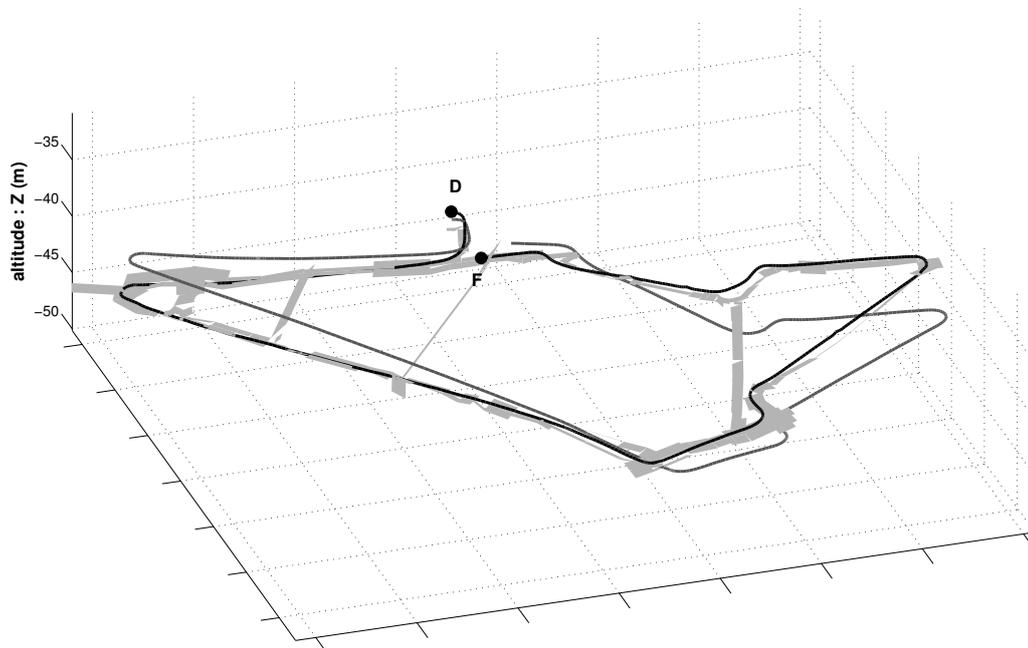


FIGURE 2.11 – Localisation obtenue par prédiction proprioceptive (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

Comme une référence est disponible, l'analyse de ces données peut être approfondie. En effet, la comparaison des résultats obtenus par rapport à la référence va permettre le tracé des fonctions de distribution cumulées de l'erreur d'estimation de la position.

La figure 2.12 qui décrit la fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xy souligne de nouveau que, malgré des résultats qui semblent intéressants sur les graphiques représentant les trajectoires, la prédiction seule ne permet d'obtenir une précision satisfaisante.

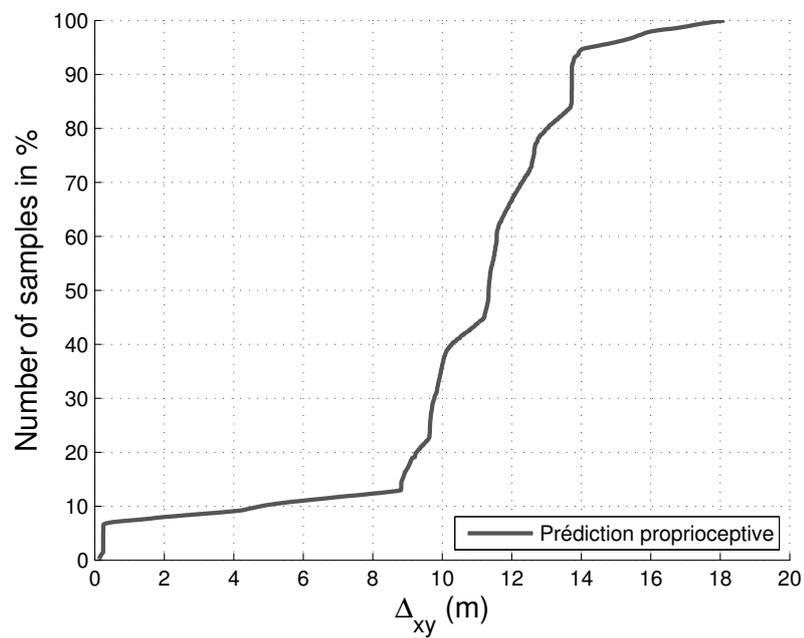


FIGURE 2.12 – Prédiction proprioceptive - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xy ou horizontal (HPE : horizontal position error).

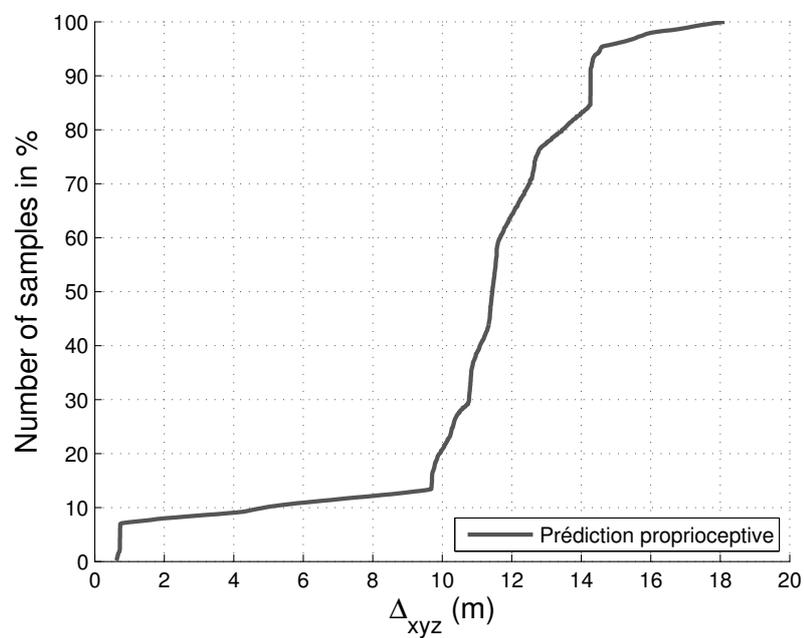


FIGURE 2.13 – Prédiction proprioceptive - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xyz .

La figure 2.13, où la fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xyz est tracée, n'apporte, dans ce cas (faibles différences d'altitude le long du parcours et trajectoire plane de la prédiction), que peu d'informations.

Les domaines de confiance associés aux estimations de position obtenues sont, comme pour les données de Limoges, difficiles à représenter. Néanmoins, le tracé temporelle de l'évolution du domaine de validité (Fig. 2.14) permet de retrouver une allure identique à celle des résultats obtenus sur les données de Limoges, c'est à dire l'augmentation au cours du temps du volume.

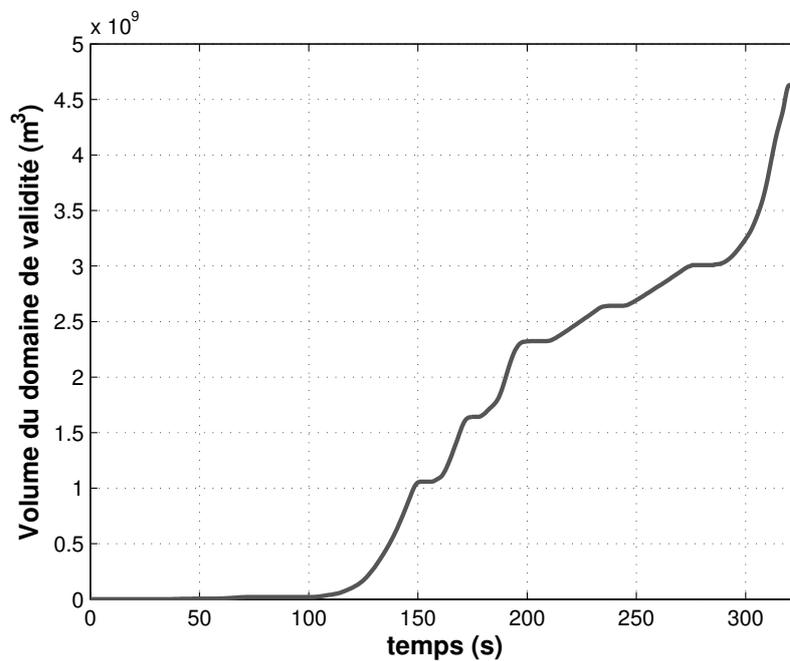


FIGURE 2.14 – Volume du domaine de validité.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la prédiction proprioceptive, basée sur un modèle cinématique 3D et des données odométriques, a été présentée et ses résultats ont été analysés. Cette prédiction permet à la fois de calculer la localisation du véhicule mais également de calculer un domaine de confiance associé attestant de la précision et de la fiabilité de la solution.

Cette localisation a été calculée et comparée expérimentalement sur deux jeux de données et avec deux véhicules différents afin de se rendre compte de la robustesse de la technique face à des entrées différentes (mais de même type).

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été réalisés grâce au logiciel Matlab, mais l'algorithme de prédiction proprioceptive a également été implémenté et validé en temps réel sur le véhicule VERT lors des expérimentations finales du projet CityVIP.

Comme on pouvait s'y attendre, la localisation uniquement à l'estime produit des résultats acceptables sur des essais de quelques minutes, mais avec les défauts inhérents à une approche en boucle ouverte :

- une dérive progressive des résultats, associée à une augmentation du domaine de confiance,
- une mauvaise robustesse aux mesures erronées.

La fusion de ces informations avec les données satellitaires, abordée dans le chapitre suivant, devrait corriger en partie ces défauts.

Localisation 3D par fusion - odométrie et GPS

Chapitre 3 - Localisation 3D par fusion - odométrie et GPS

Ce troisième chapitre est consacré aux différentes manières d'utiliser les informations satellitaires pour améliorer la localisation. Dans un premier temps le couplage lâche est abordé, puis l'aspect théorique et la mise en œuvre du couplage serré sont détaillés avant de présenter les résultats.

Sommaire

3.1	Introduction	59
3.2	Couplage lâche	59
3.2.1	Principe	59
3.2.2	Filtrage de Kalman	59
3.2.2.1	Cas linéaire - Filtre de Kalman	59
3.2.2.2	Cas non linéaire - Filtre de Kalman Étendu	60
3.2.3	Mise en œuvre	60
3.2.3.1	Modèle d'état	60
3.2.3.2	Variance de b_k^m - Matrice de bruit de mesure R_k	61
3.2.3.3	Algorithme	61
3.2.4	Résultats	63
3.2.4.1	Limoges	63
3.2.4.2	Paris - XIIème arrondissement	66
3.3	Couplage serré	72
3.3.1	Positionnement du problème	72
3.3.1.1	Observables GPS	72
3.3.1.2	Mouvement des satellites	72
3.3.1.3	Définition des horloges	73
3.3.2	Redéfinition de l'état et du modèle	74
3.3.2.1	État	74
3.3.2.2	Modèle de progression	74
3.3.3	Utilisation des mesures de pseudodistances	75
3.3.3.1	Définition d'une mesure de pseudodistance	75
3.3.3.2	Équation d'observation	78
3.3.3.3	Exploitation dans un filtre de Kalman	79
3.3.4	Utilisation des mesures de Doppler	80
3.3.4.1	Définition d'une mesure de Doppler	80

3.3.4.2	Équation d'observation	81
3.3.4.3	Exploitation dans un filtre de Kalman	82
3.3.5	Variance de b_k^m - Matrice de bruit de mesure R_k	83
3.3.6	Mise en oeuvre - Algorithme global	86
3.3.7	Résultats	86
3.3.7.1	Limoges	86
3.3.7.2	Paris - XIIème arrondissement	88
3.4	Conclusion	92

3.1 Introduction

Les informations satellitaires, depuis la mise en service du système GPS NAVSTAR, ont énormément facilité la géolocalisation. En effet, en plus de permettre une localisation absolue, les signaux transmis contiennent une multitude d'informations concernant la précision et la qualité des observations (cf. message de navigation). Ainsi, un utilisateur non novice peut caractériser les différentes mesures reçues et juger de leur pertinence dans le calcul de la position du récepteur. Cet utilisateur pourra donc avoir une meilleure idée de la qualité et de la fiabilité de la solution obtenue.

Néanmoins, cette expertise nécessite de maîtriser entièrement le processus de calcul de position de localisation par satellites, ce qui complexifie grandement la mise en œuvre.

C'est pour cette raison que l'approche proposée dans ce rapport est compatible avec deux types d'utilisation des données satellitaires :

- une fusion dite lâche, qui utilise le calcul de position fourni par le récepteur (que l'on peut facilement récupérer dans la trame GGA) ; cette solution, simple à mettre en œuvre, ne laisse aucun contrôle à l'utilisateur,
- une fusion dite serrée, qui calcule la position du récepteur à partir de la mesure des pseudodistances et des informations contenues dans le message de navigation ; cette solution permet de contrôler entièrement le processus de calcul.

Ce chapitre commencera par la présentation de la mise en œuvre et des résultats que permet d'obtenir la fusion lâche. Puis une seconde partie se focalisera sur les étapes nécessaires à la réalisation d'un couplage serré.

3.2 Couplage lâche

3.2.1 Principe

Le but est de fusionner la position fournie par le récepteur GPS avec la localisation à l'estime du chapitre précédent. Le Filtre de Kalman Étendu a été choisi dans ce but car il permet de traiter des cas de modèles non linéaires.

3.2.2 Filtrage de Kalman

Le filtrage de Kalman [19] utilise une modélisation statistique et des modèles gaussiens. Les bruits sont donc caractérisés par leurs 2 premiers moments : moyenne et variance.

L'amplitude du bruit est donc quantifiée par la matrice de variance-covariance.

3.2.2.1 Cas linéaire - Filtre de Kalman

Le modèle complet auquel le filtrage de Kalman s'applique est :

$$\begin{cases} x_{k+1} &= A_k x_k + B_k u_k + b_k^q \\ z_k &= C_k x_k + b_k^m \end{cases} \quad (3.1)$$

avec $x_k, b_k^q \in \mathbb{R}^n, u_k \in \mathbb{R}^p, z_k, b_k^m \in \mathbb{R}^m$.

Le bruit d'état $b_k^q \in \mathbb{R}^n$ et le bruit de mesure $b_k^m \in \mathbb{R}^m$, sont supposés :

- blancs (si $k \neq j, E(b_k^m \cdot b_j^{mT}) = 0, E(b_k^q \cdot b_j^{qT}) = 0$),
- indépendants ($E(b_k^m \cdot b_k^{qT}) = 0$),
- gaussiens ($b_k^m \sim N(0, Q_k), b_k^q \sim N(0, R_k)$).
 - à valeur moyenne nulle : $\overline{b_k^m} = E(b_k^m) = 0, \overline{b_k^q} = E(b_k^q) = 0$,
 - de matrices de variance-covariance $Q_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ (resp. $R_k \in \mathbb{R}^{m \times m}$) connues.

La caractérisation des moyennes et des matrices de variance de ces bruits est un nouvel aspect de la modélisation du processus.

L'état initial x_0 est inconnu et on propose de le décrire aussi par une variable aléatoire gaussienne de moyenne $\hat{x}_{0|0}$ et de variance $P_{0|0}$.

Cette variable aléatoire est supposée décorrélée des bruits d'état et de mesure ultérieurs.

Ces informations, ainsi que la description détaillée des phases de prédiction, innovation et correction, et le détail de la mise en œuvre de ce filtre sont disponibles en annexe D.

3.2.2.2 Cas non linéaire - Filtre de Kalman Étendu

Dans ce cas, le modèle complet devient :

$$\begin{cases} x_{k+1} &= f(x_k, u_k) + b_k^q \\ z_k &= h(x_k) + b_k^m \end{cases} \quad (3.2)$$

Si les fonctions sont suffisamment régulières (au moins de classe C_1) on peut utiliser le modèle linéarisé autour des estimées successives en espérant que les propriétés de convergence de l'estimation construite sur le modèle linéarisé se conservent dans le modèle initial.

Les modifications à apporter quant à la mise en œuvre de ce filtre sont également disponibles dans l'annexe D.

3.2.3 Mise en œuvre

3.2.3.1 Modèle d'état

Pour construire le modèle d'état pour la fusion lâche, on reprend le modèle de progression du chapitre précédent et on y ajoute une équation d'observation :

$$\left\{ \begin{array}{l}
\hat{q}_{k|k-1} = \underbrace{I_6}_A \cdot \hat{q}_{k-1|k-1} + \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \psi_k & 0 \\ \sin \psi_k & 0 \\ -\theta_k & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -\phi_k \\ 0 & \theta_k \end{bmatrix}}_{B_k} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \delta s_k \\ \delta \psi_k \end{bmatrix}}_{u_k} \\
= f(\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k) \\
\hat{z}_{k|k-1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C \cdot \hat{q}_{k|k-1} \\
= h(\hat{q}_{k|k-1})
\end{array} \right. \quad (3.3)$$

Dans ce cas, la mesure z_k correspond à la localisation directement fournie par la trame GGA du récepteur GPS, c'est à dire la latitude, la longitude et l'altitude. Il suffit alors d'exprimer ces coordonnées géographiques dans le repère local tangent.

b_k^q , bruit d'état modélisé par la matrice Q_k , et b_k^m , bruit de mesure modélisé par la matrice R_k , ne sont pas exprimés puisque les équations ci-dessus formulent des estimations.

3.2.3.2 Variance de b_k^m - Matrice de bruit de mesure R_k

La matrice R_k représente la matrice de covariance de mesure, c'est-à-dire la confiance que l'on donne au calcul de position calculé par le récepteur.

La définition des termes de R_k s'appuie sur l'hypothèse que les corrélations sont nulles. Ainsi, seules les termes de la diagonale sont non nuls.

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_{GPS}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{GPS}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{GPS}^2 \end{bmatrix}$$

3.2.3.3 Algorithme

L'algorithme comprend également la partie concernant la prédiction proprioceptive.

Algorithm 2 : Fusion Odométrie GPS - Couplage lâche**Initialisation**

- Estimation initiale de l'état et de son imprécision : $\hat{x}_{0|0}$ et $P_{0|0}$;

Prédiction

- Prédiction de l'état : $\hat{q}_{k|k-1} = f(\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k)$;
- Calcul de la matrice de bruit d'état : Q_k ;
(Annexe B)
- Calcul de la matrice de régime libre du linéarisé (cf. section 2.3.3.2) : $F_k = \frac{\partial f}{\partial q} |_{\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k}$;
- Prédiction de la covariance de l'erreur d'estimation : $P_{k|k-1} = F_k^T \cdot P_{k-1|k-1} \cdot F_k + Q_k$;
- Prédiction de la sortie : $\hat{z}_k = h(\hat{q}_{k|k-1})$;

Innovation

- Mesure : z_k ;
- Calcul de l'erreur de sortie (innovation) : $\tilde{z}_k = z_k - \hat{z}_k$;
- Calcul du linéarisé du modèle d'observation : $H_k = \frac{\partial h}{\partial q} |_{\hat{q}_{k-1|k-1}} = I$;
- Covariance de l'erreur de sortie : $S_k = H_k \cdot P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k$;
- Test d'acceptation de la sortie : $\varepsilon^T S_k^{-1} \varepsilon \leq \chi^2(p_0)$;
(Annexe D)

Mise à jour

- Calcul du gain de Kalman : $K_k = P_{k|k-1} \cdot H_k^T \cdot S_k^{-1}$;
- Mise à jour de l'estimation d'état : $q_{k|k} = q_{k|k-1} + K_k \cdot \tilde{z}_k$;
- Mise à jour de la covariance de l'erreur d'estimation : $P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k \cdot H_k \cdot P_{k|k-1}$;

3.2.4 Résultats

3.2.4.1 Limoges

Le jeu de données présenté dans cette section est le même que celui du chapitre précédent. Les données ont été acquises avec le véhicule PRISM. Cependant, dans ce cas, la trame GGA n'est plus considérée comme une référence, mais comme une mesure intervenant dans le processus de fusion.

Comme seuls quelques bâtiments sont à proximité du trajet effectué par le véhicule, au minimum cinq ou six satellites sont toujours visibles. Les risques de multi-trajets sont donc très faibles, ce qui est un cas particulier favorable. Dans de telles conditions, les mesures GPS sont assez précises (notamment les coordonnées x et y).

La figure 3.1 présente les résultats obtenus par fusion de l'odométrie et des mesures GPS projetés sur le plan XY . On remarque que les deux courbes sont quasiment superposées, preuve que la fusion a permis de modifier la position estimée. Il apparaît que cette fusion n'apporte pas d'amélioration évidente en terme de position XY lorsque la localisation à l'estime dérive peu (cas du début du parcours). Néanmoins, elle permet de nettement l'améliorer par la suite.

La visualisation 3D des résultats (Fig. 3.2) permet de montrer l'apport non négligeable du modèle 3D. En effet, dès la première information disponible sur une mesure d'altitude, la trajectoire commence à varier également verticalement.

Cependant, il faut également constater que les données GPS n'étant pas précises concernant l'altitude, la fusion ne permet pas de se rapprocher de la position réelle, plus vraisemblablement située au niveau de la route.

Ainsi, cette solution, qui repose fortement sur la confiance que l'on donne aux mesures fournies par le récepteur GPS, ne suffit pas à atteindre les objectifs fixés en terme de précision.

En s'intéressant à l'évolution du volume du domaine de validité (Fig. 3.3), il apparaît qu'en plus de l'amélioration en terme de position, le volume du domaine de validité varie autour de valeurs bien plus faibles que pour les résultats du chapitre précédent. La fusion a donc permis d'augmenter la confiance en notre estimation.

Afin d'avoir un ordre de grandeur, un domaine correspondant à une sphère de rayon 10 m correspond à un volume d'environ 4000 m^3 .

Il est alors évident que les résultats obtenus par cette méthode concernant la confiance en l'estimation ne répondent pas aux attentes.

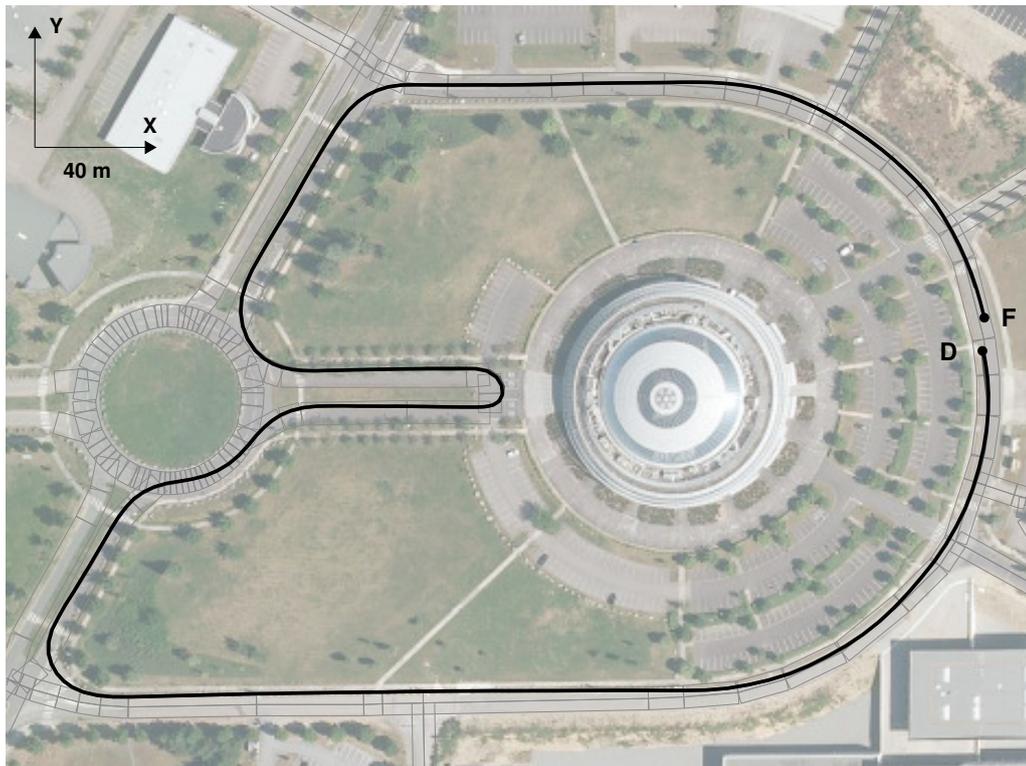


FIGURE 3.1 – Localisation obtenue par couplage lâche odométrie GPS (en gris foncé) - Points GPS utilisés pour la fusion (en noir - trame GGA) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

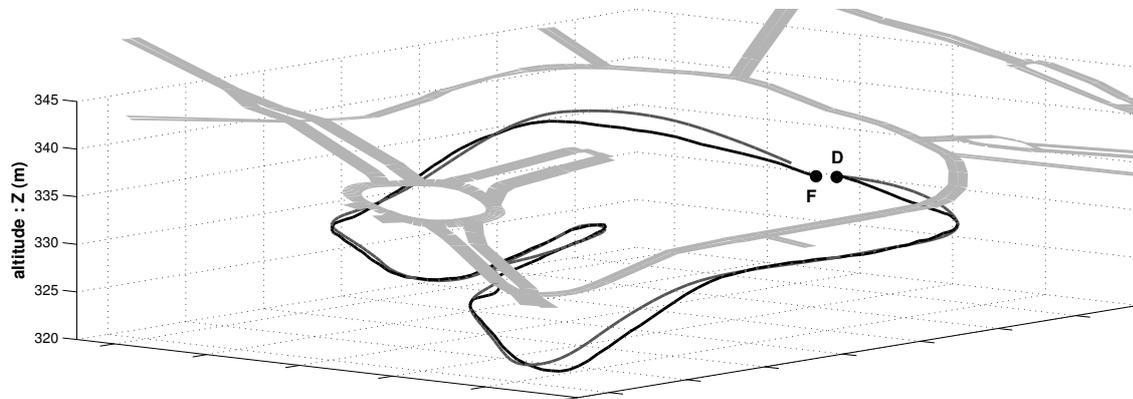


FIGURE 3.2 – Localisation obtenue par couplage lâche odométrie GPS (en gris foncé) - Points GPS utilisés pour la fusion (en noir - trame GGA) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

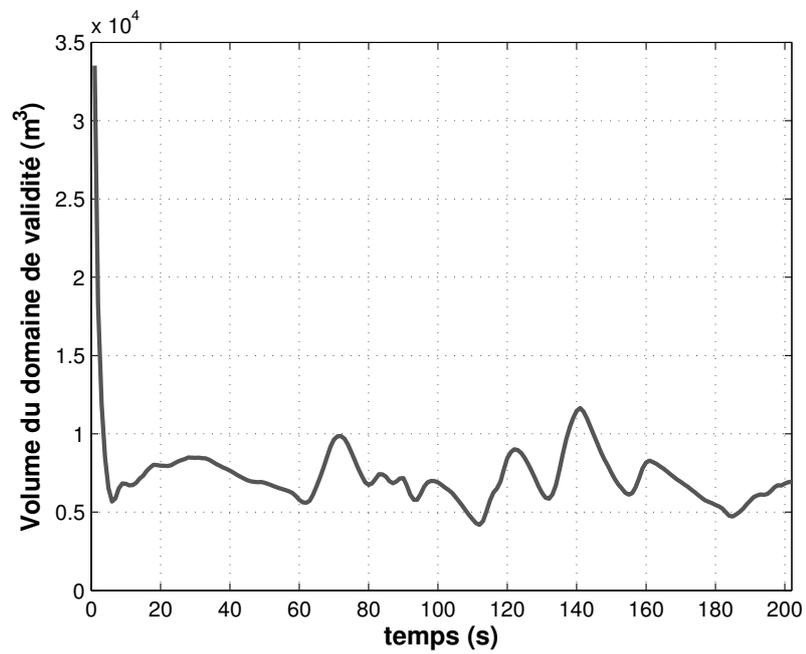


FIGURE 3.3 – Volume du domaine de validité.

3.2.4.2 Paris - XIIème arrondissement

Cette section présente les résultats de la fusion odométrie et GPS en couplage lâche pour le jeu de données évoqué au chapitre précédent.

Afin de réaliser le processus de fusion, les données de la trame GGA du récepteur GPS μ blox LEAT-6T équipant le véhicule VERT sont utilisées. Néanmoins, contrairement aux données de Limoges et en adéquation avec le site choisi (XIIème arrondissement), les données GPS n'ont pas été dégradées.

Dans un souci de lisibilité et de compréhension, les résultats en 2D et 3D sont proposés en deux parties. La première illustre les points GPS utilisés, et la deuxième illustre la trajectoire obtenue et la référence.

La trajectoire 2D obtenue par couplage lâche (Fig. 3.4) démontre l'apport de la fusion pour compenser les problèmes de dérive de la localisation à l'estime. En effet, avant même d'introduire les courbes d'erreurs, ces résultats suffisent à voir que la solution obtenue est plus proche de la référence.

L'amélioration en 2D semble encore plus évidente dans ce cas que pour celui de Limoges, cela étant, la fréquence d'échantillonnage du récepteur étant plus élevée, il y a plus d'informations pour alimenter la fusion. De plus, les masquages et les multi-trajets affectent plus l'altitude que les coordonnées xy .

On remarque cependant que par endroit la position fournie par le récepteur a tendance à éloigner la solution de la référence.

Ce fait est encore mieux illustré par les résultats 3D (Figs. 3.6 et 3.7), notamment sur la figure 3.6 où l'influence néfaste des canyons urbains sur les données satellitaires, plus particulièrement sur l'altitude, est nettement visible.

Ces fortes variations de l'altitude GPS ont pour conséquence un refus de la mesure par l'algorithme de fusion qui la considère trop éloignée pour être considérée comme juste. Or, sur la partie la plus basse des résultats, où un de ces phénomènes se produit, les données rejetées auraient sans doute amélioré la localisation.

Malgré ce dernier point, les tracés des fonctions de distribution cumulées de l'erreur de position par rapport à la référence (Figs. 3.8 et 3.9) et de l'évolution du volume du domaine de validité (Fig. 3.10), soulignent à la fois la diminution nette de l'erreur de position, mais surtout, une très forte diminution des bornes du domaine de confiance.

Cette fusion permet donc de gagner à la fois en précision et confiance, même si, à ce stade, ces améliorations sont encore insuffisantes.

La dégradation des signaux GPS induite par la configuration du site (provoquant

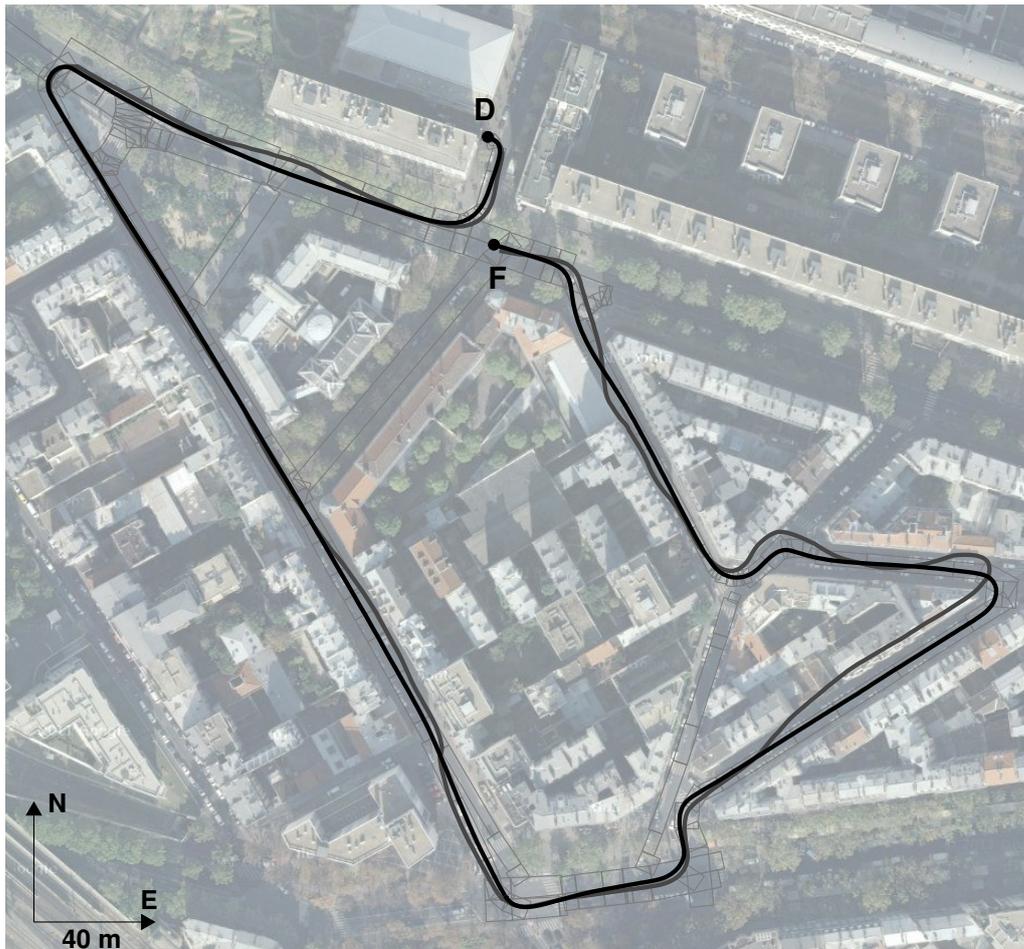


FIGURE 3.4 – Localisation obtenue par couplage lâche odométrie GPS (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

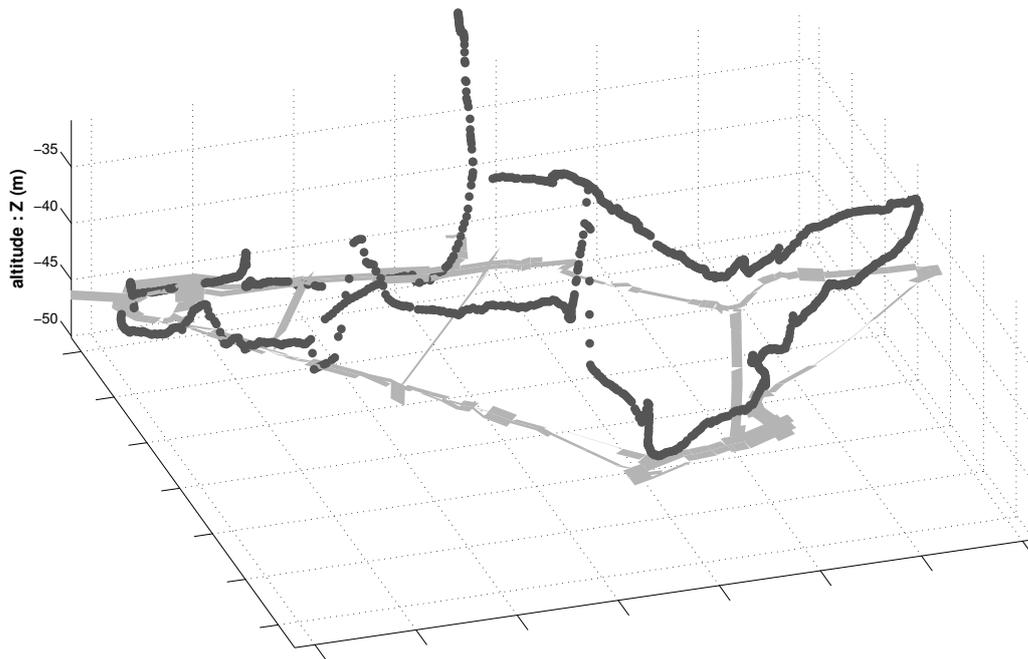


FIGURE 3.6 – Points GPS utilisés pour la fusion (en gris foncé - trame GGA) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

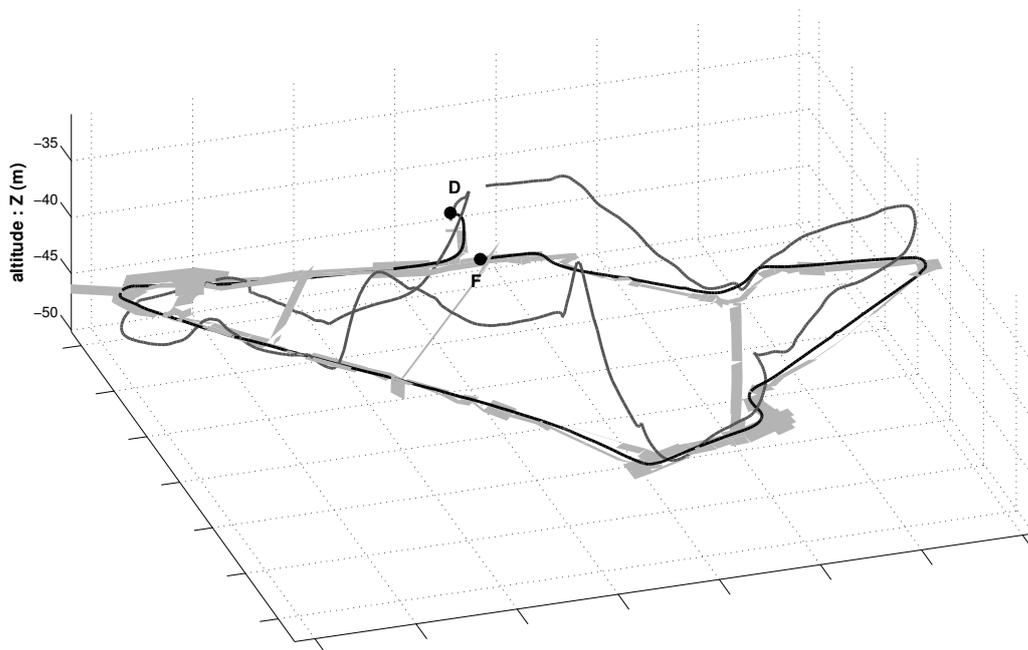


FIGURE 3.7 – Localisation obtenue par couplage lâche odométrie GPS (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

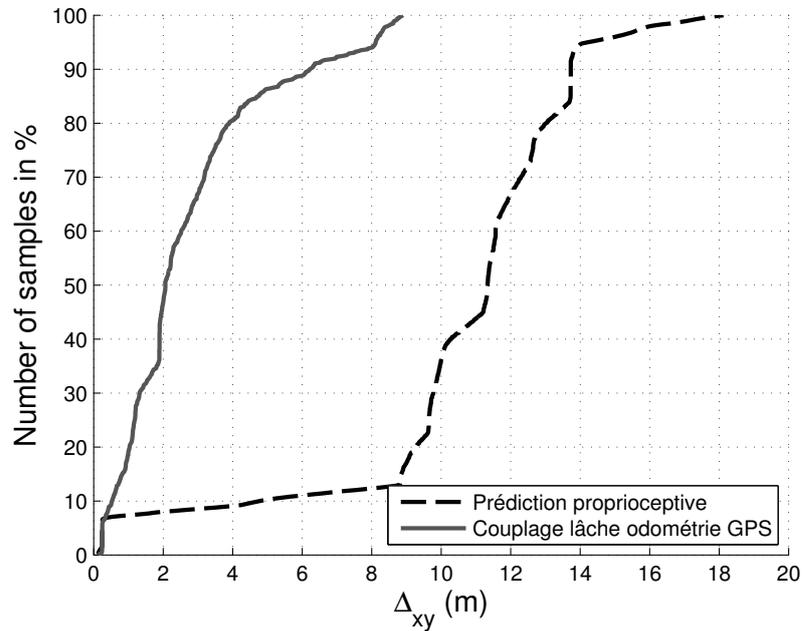


FIGURE 3.8 – Couplage lâche odométrie GPS - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xy .

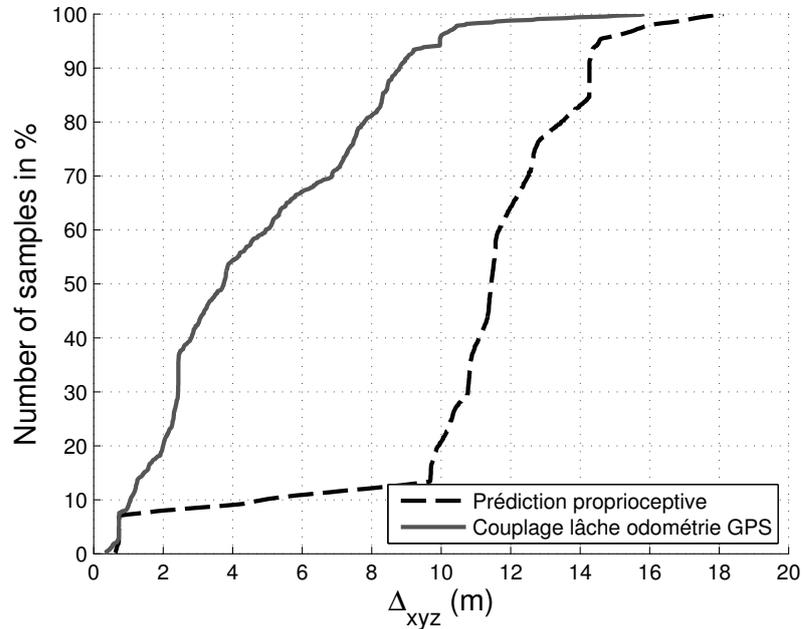


FIGURE 3.9 – Couplage lâche odométrie GPS - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xyz .

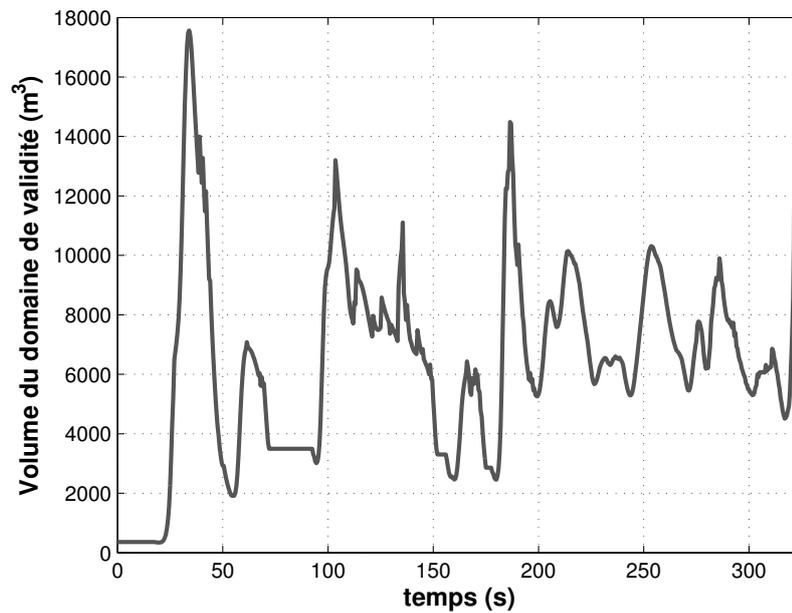


FIGURE 3.10 – Volume du domaine de validité.

notamment des erreurs d'altitude) est également illustrée sur le tracé des fonctions de distribution cumulées de l'erreur de position.

Compte tenu de ces résultats, deux voies sont envisageables. La première, développée dans la section suivante, consiste à tenter de diminuer la dégradation des informations GPS en maîtrisant l'ensemble du processus de calcul de la position du récepteur, on parle alors de couplage serré. La deuxième, étudiée dans le chapitre suivant, sera de prendre en compte les données cartographiques.

3.3 Couplage serré

3.3.1 Positionnement du problème

3.3.1.1 Observables GPS

Plutôt que d'utiliser la localisation calculée par le récepteur GPS (trame GGA), il est possible d'accéder directement aux mesures de plus bas niveau (pseudodistances et Doppler) afin d'optimiser la fusion.

Sur les récepteurs μ blox, ces données de bas niveau (RAW DATA) sont disponibles via la classe RXM du format de données UBX (cf. paragraphe 1.2.4.5, page 19) :

- la trame RAW DATA
 - *ITOW* : Measurement integer millisecond GPS time of week (Receiver Time)
 - *Week* : Measurement GPS week number (Receiver Time)
 - *NSV* : Number of satellites following
 - puis, pour chaque satellite d'indice i :
 - *CPMes_i* : Carrier phase measurement (cycles)
 - *PRMes_i* : Pseudorange measurement (m)
 - *DOMes_i* : Doppler measurement (Hz)
 - ⇒ **noté Dop_i par la suite**
 - *SV_i* : Space Vehicle Number
 - *MesQI_i* : Nav Measurements Quality Indicator
 - *CNO_i* : Signal strength C/No (dbHz)

D'autres informations sont également disponibles :

- les éphémérides IGN ou NAVSTAR radiodiffusées et disponibles sous 1h,
- la trame UBX/RXM/SUBFRAME qui contient l'ensemble du message de navigation,
- la trame UBX/NAV/SBAS Status Data qui contient les corrections ionosphériques EGNOS, notées *IONO_i*.

3.3.1.2 Mouvement des satellites

La position et la vitesse des satellites à l'instant t sont calculées dans le référentiel cartésien géocentré WGS 84 noté $\mathcal{G}(t)$. Notons que ce référentiel tourne avec la terre. Dans la suite, on notera ${}^{G(t)}S_i(t_k)$ le vecteur des coordonnées (X, Y, Z) du satellite d'indice i (notons le S_i) à l'instant t_k , ces coordonnées étant définies dans le référentiel $\mathcal{G}(t)$.

Lorsqu'on ne précise pas l'horloge utilisée pour le compter, le temps est, par défaut, le temps GPS (officiel et lié à la terre).

La transformation des coordonnées WGS 84 aux coordonnées tangentielles se caractérise par une transformation affine qui dépend du point de tangence T . Ce point est l'origine du repère et s'exprime par ses coordonnées dans le repère géocentré ($[^G T] = [X_T, Y_T, Z_T]^T$ ou bien par sa longitude α et sa latitude β). La transformation ECEF2LT se définit alors par

$$\begin{aligned} [^T M] &= \text{ECEF2LT}([^G M]) \\ &= [^T \text{Rot}_G] \cdot [^G M] + [^T \text{Trsl}_G] \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\text{avec } [^T \text{Rot}_G] = \begin{bmatrix} -\sin \alpha, & \cos \alpha, & 0 \\ -\sin \beta \cos \alpha, & -\sin \beta \sin \alpha, & \cos \beta \\ \cos \beta \cos \alpha, & \cos \beta \sin \alpha, & \sin \beta \end{bmatrix}$$

$$\text{et } [^T \text{Trsl}_G] = \begin{bmatrix} X_T \sin \alpha - Y_T \cos \alpha \\ X_T \sin \beta \cos \alpha + Y_T \sin \beta \sin \alpha - Z_T \cos \beta \\ -X_T \cos \beta \cos \alpha - Y_T \cos \beta \sin \alpha - Z_T \sin \beta \end{bmatrix}$$

Concernant les vitesses, on définit la transformation dECEF2LT en supprimant la translation $[^T \text{Trsl}_G]$ dans ECEF2LT

$$\begin{aligned} [^T \dot{M}] &= \text{dECEF2LT}([^G \dot{M}]) \\ &= [^T \text{Rot}_G] \cdot [^G \dot{M}] \end{aligned} \quad (3.5)$$

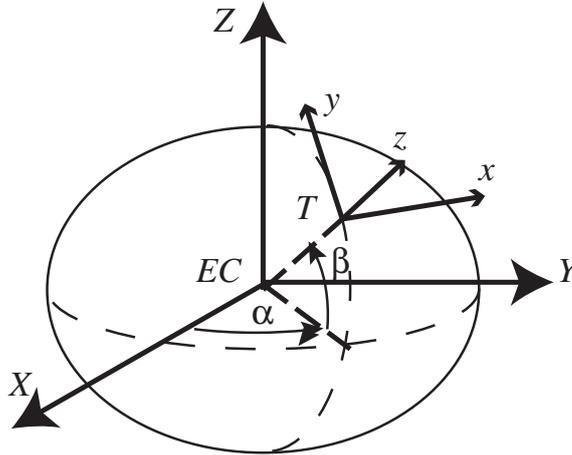


FIGURE 3.11 – Référentiels ECEF (EC, X, Y, Z) et local tangent (T, x, y, z).

3.3.1.3 Définition des horloges

On notera par la suite

- ${}^R t$ le temps compté avec l'horloge du récepteur,
- ${}^{S_i} t$ le temps compté avec l'horloge du satellite d'indice i ,
- t (sans préfixe) le temps officiel du système GPS.

3.3.2 Redéfinition de l'état et du modèle

Afin de pouvoir prendre en compte dans un processus de couplage serré les observables GPS de mesure de pseudodistances et de mesure de Doppler, l'état doit être modifié pour tenir compte du biais de l'horloge du récepteur ainsi que de la dérivée de ce biais (supposée constante).

3.3.2.1 État

$$q_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \psi_k \ \theta_k \ \phi_k \ \eta \ \dot{\eta}]^t \quad (3.6)$$

avec :

- (x_k, y_k, z_k) : les coordonnées cartésiennes du récepteur (repère ECEF-WGS 84) au temps t ,
- $\eta = c \cdot {}^R Clk_{BIAS}$, avec c , vitesse de la lumière, et ${}^R Clk_{BIAS}$ biais de l'horloge du récepteur,
- $\dot{\eta}$: dérivée de η supposée constante.

3.3.2.2 Modèle de progression

$$\begin{cases} \hat{q}_{k|k-1} = A \cdot \hat{q}_{k-1|k-1} + B_k \cdot u_k \\ \hat{z}_{k|k-1} = h(\hat{q}_{k|k-1}) \end{cases} \quad (3.7)$$

avec :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & t_e \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} \cos \psi_k & 0 \\ \sin \psi_k & 0 \\ -\theta_k & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -\phi_k \\ 0 & \theta_k \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

b_k^q , bruit d'état modélisé par la matrice Q_k , et b_k^m , bruit de mesure modélisé par la matrice R_k , ne sont pas exprimés puisque les équations ci-dessus forment des estimations.

L'équation d'observation est détaillé par la suite.

3.3.3 Utilisation des mesures de pseudodistances

3.3.3.1 Définition d'une mesure de pseudodistance

Cette mesure est la conversion en distance (de l'ordre du Mm = 10^6 m) du décalage temporel entre l'instant d'émission d'une trame d'information par un satellite et l'instant de sa réception par le récepteur.

Toutes les mesures (pseudodistances, phase et Doppler) de tous les satellites reçus sont disponibles au même instant défini dans l'horloge du récepteur. On note R_{t_k} le $k^{\text{ème}}$ échantillon compté avec l'horloge du récepteur. Il est défini à partir de l'observable ITOW :

$$R_{t_k} = ITOW/1000 [s].$$

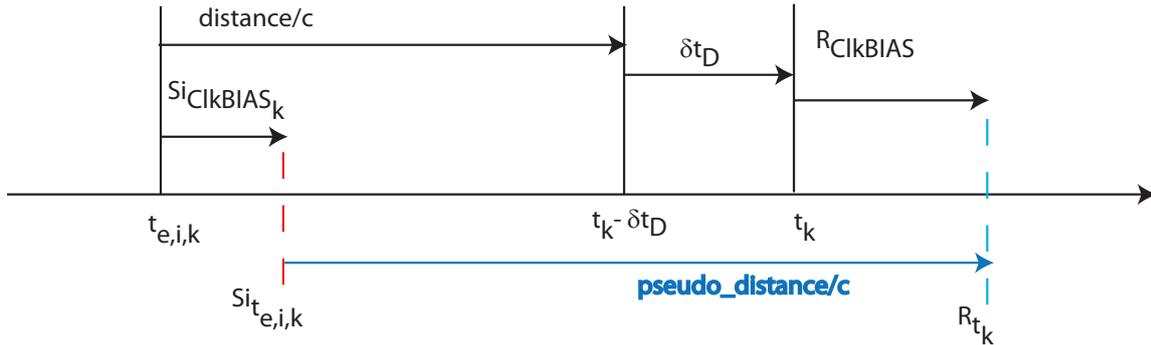


FIGURE 3.12 – Instants et intervalles de temps qui définissent les mesures

Considérons (Fig. 3.12) un signal reçu à l'instant R_{t_k} à partir du satellite S_i , ce message a été émis à l'instant $t_{e,i,k}$, c'est-à-dire à l'instant $S_i t_{e,i,k}$ compté dans l'horloge du satellite. La mesure de pseudodistance est définie par :

$$PR_i(R_{t_k}) = c(R_{t_k} - S_i t_{e,i,k}).$$

Lorsque le signal traverse la ionosphère, le temps de transmission n'est pas strictement égal à la distance récepteur-satellite divisé par la célérité de la lumière. Afin de prendre en compte cet effet, si des corrections ionosphériques sont disponibles, on calcule pour un satellite i :

$$PR_i = PRMes_i - IONO_i$$

Sinon :

$$PR_i = PRMes_i$$

Le principe de la mesure utilise la relation entre le temps de propagation de l'information et la distance géométrique entre émetteur et récepteur. Notons $d_i \left({}^R t_k \right)$ cette distance :

$$d_i \left({}^R t_k \right) = \left\| \overrightarrow{S_i(t_{e,i,k}) R(t_k)} \right\|$$

Si la propagation du signal était en ligne droite dans le vide euclidien, la relation entre la distance $d_i \left({}^R t_k \right)$ et la durée de propagation $(t_k - t_{e,i,k})$ serait $d_i \left({}^R t_k \right) = c \cdot (t_k - t_{e,i,k})$. Mais comme la propagation s'effectue dans un milieu réel (en particulier la ionosphère), un terme de compensation δt_D ¹ est ajouté de sorte que, le temps de réception du signal étant t_k , la relation entre la distance (récepteur-satellite) et le temps de propagation de l'information soit :

$$d_i \left({}^R t_k \right) = \left\| \overrightarrow{S_i(t_{e,i,k}) R(t_k)} \right\| = c \cdot (t_k - \delta t_D - t_{e,i,k}). \quad (3.8)$$

La mesure de pseudodistance fait apparaître les décalages d'horloge et le décalage δt_D dû à la propagation dans un milieu non idéal. Les termes correctifs sont liés aux décalages des horloges du récepteur et du satellite.

En effet :

$$\begin{aligned} PR_i \left({}^R t_k \right) &= c \left(\left({}^R t_k - t_k \right) + \delta t_D + \left((t_k - \delta t_D - t_{e,i,k}) + \left(t_{e,i,k} - {}^{S_i} t_{e,i,k} \right) \right) \right) \\ &= d_i \left({}^R t_k \right) + c \left({}^R Clk_{BIAS} - {}^{S_i} Clk_{BIAS} + \delta t_D \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\text{avec } \begin{cases} {}^R Clk_{BIAS} &= \left({}^R t_k - t_k \right) \\ {}^{S_i} Clk_{BIAS} &= \left({}^{S_i} t_{e,i,k} - t_{e,i,k} \right) \end{cases}$$

Détails concernant $c \left({}^R Clk_{BIAS} \right)$

Le terme $c \left({}^R Clk_{BIAS} \right)$ est un décalage η_k , composante de l'état (Eq. 3.6).

1. $\delta t_D > 0$ est un retard de propagation.

Détails concernant $c(S_i Clk_{BIAS})$

Le terme $c(S_i Clk_{BIAS})$ se calcule à partir de données contenues dans les éphémérides selon la formule :

$$\begin{aligned} S_i Clk_{BIAS} = & SV_{clk_BIAS} + SV_{clk_DRIFT}(t - t_{oc}) \\ & + SV_{clk_DRIFT_rate}(t - t_{oc})^2 \\ & + dtr. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Le terme dtr correspond aux effets relativistes. Un de ces effets, lié à la position du satellite entraînant des variations de son horloge, se calcule de la manière suivante :

$$dtr = F \cdot e \cdot \sqrt{a} \cdot \sin(E_k) \quad (3.11)$$

avec :

- F , grandeur calculée à partir de c , vitesse de la lumière, et de μ , valeur du paramètre gravitationnel standard de la Terre :

$$F = \frac{-2\sqrt{\mu}}{c^2} = -4.442807633(10)^{-10} \frac{sec}{\sqrt{meter}}$$

- e : paramètre orbital d'excentricité,
- A : paramètre orbital d'axe semi-majeur,
- E_k : paramètre orbital d'anomalie excentrique.

Cet effet peut atteindre une valeur maximale de 70 ns (soit 21 m). En pratique son calcul se fait lors du calcul des coordonnées d'un satellite (Annexe E).

Le terme $t - t_{oc}$ (Time of Clock), équivalent à $t - t_{oe}$ (Time of Ephemeris), est l'écart entre le temps actuel et le temps de référence de l'horloge, c'est-à-dire le dernier instant où le segment terrestre a mis à jour les paramètres de compensation de dérive de l'horloge (SV_{clk_BIAS} , $SV_{clk_DRIFT}(t - t_{oc})$, $SV_{clk_DRIFT_rate}$) du satellite S_i .

$t - t_{oc}$ varie dans un intervalle $[0, 24]$ h. Juste après la mise à jour des corrections, l'erreur résiduelle due à l'horloge du satellite est de l'ordre de 0.8m et, après 24h, de 1 à 4 m. L'écart type de cette erreur résiduelle, supposée gaussienne, était de 1.1m en 2004.

Détails concernant δt_D

Le terme δt_D représente les éventuelles corrections apportées pour compenser les erreurs introduites par la transmission du signal à travers l'atmosphère, notamment la ionosphère et la troposphère.

3.3.3.2 Équation d'observation

L'équation d'observation provient de la définition de l'équation 3.8 conjointement à la définition de la mesure (Eq. 3.9 et Eq. 3.10).

L'objectif étant de calculer les coordonnées du récepteur dans le repère local tangent, $T^{(t_k)}R(t_k)$, la construction cette équation d'observation nécessite d'exprimer les coordonnées des satellites dans le même repère. Le calcul de ces coordonnées se fait en plusieurs étapes.

Calcul de $G^{(t_{e,i,k})}S_i(t_{e,i,k})$

Le calcul des coordonnées $G^{(t_{e,i,k})}S_i(t_{e,i,k})$ du satellite S_i dans les coordonnées du repère $\mathcal{G}(t_{e,i,k})$ (cf. [7]) nécessite les données orbitales présentes dans les éphémérides. Ce calcul est détaillé en annexe E.

Calcul de $G^{(t_k)}S_i(t_{e,i,k})$

Le calcul des coordonnées $G^{(t_k)}S_i(t_{e,i,k})$ du satellite S_i dans les coordonnées du repère $\mathcal{G}(t_k)$ se fait en appliquant la rotation $G^{(t_k)}T_{G^{(t_{e,i,k})}}$:

$$\left[G^{(t_k)}S_i(t_{e,i,k}) \right] = G^{(t_k)}T_{G^{(t_{e,i,k})}} \left[G^{(t_{e,i,k})}S_i(t_{e,i,k}) \right] \quad (3.12)$$

$$G^{(t_k)}T_{G^{(t_{e,i,k})}} = \begin{bmatrix} \cos(\delta L_g) & \sin(\delta L_g) & 0 \\ -\sin(\delta L_g) & \cos(\delta L_g) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec

$$\delta L_g = \dot{\Omega}_{earth}(t_k - t_{e,i,k}).$$

Ce calcul nécessite la connaissance du décalage temporelle $(t_k - t_{e,i,k})$ lié à la propagation de l'information ; on l'exprime à partir de l'équation 3.9 :

$$(t_k - t_{e,i,k}) = \frac{PR_i \left({}^R t_k \right)}{c} + {}^{S_i} Clk_{BIAS} - {}^R Clk_{BIAS} + \delta t_D. \quad (3.13)$$

Calcul de $T^{(t_k)}S_i(t_{e,i,k})$

Les coordonnées $T^{(t_k)}S_i(t_{e,i,k})$ du satellite S_i dans les coordonnées du repère $\mathcal{T}(t_k)$ sont obtenues en appliquant la transformation *ECEF2LT*.

L'équation d'observation attachée à une mesure de pseudodistance est donc déduite de :

$$\begin{aligned} \left\| \overrightarrow{S_i(t_{e,i,k}) R(t_k)} \right\| &= c. (t_k - \delta t_D - t_{e,i,k}) \\ &= PR_i \left({}^R t_k \right) + c \left({}^{S_i} Clk_{BIAS} - \delta t_D - {}^R Clk_{BIAS} \right) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Pour exprimer cette équation de façon analytique, posons

$${}^{T(t_k)} S_i(t_{e,i,k}) = \begin{bmatrix} x_{S_i,k} \\ y_{S_i,k} \\ z_{S_i,k} \end{bmatrix} : \text{la position du satellite} \quad (3.15)$$

$${}^{T(t_k)} R(t_k) = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} : \text{la position du récepteur,} \quad (3.16)$$

$$\eta_k = c. {}^R Clk_{BIAS} \quad (3.17)$$

avec ${}^R Clk_{BIAS}$ le biais de l'horloge du récepteur,

$$\rho_{i,k} = PR_{i,k} \left({}^R t_k \right) + c \left({}^{S_i} Clk_{BIAS} - \delta t_D \right) : \text{la mesure.} \quad (3.18)$$

On peut présenter l'équation d'observation sous la forme :

$$\left((x_k - x_{S_i,k})^2 + (y_k - y_{S_i,k})^2 + (z_k - z_{S_i,k})^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \eta_k = \rho_{i,k} \quad (3.19)$$

équivalente à :

$$\left\| \overrightarrow{S_i(t_{e,i,k}) R(t_k)} \right\| + \eta_k = \rho_{i,k}$$

3.3.3.3 Exploitation dans un filtre de Kalman

Construction de l'équation d'observation

- Définition de l'instant d'échantillonnage : ${}^R t_k = ITOW/1000$ [s],
- Pour chacun des satellites disponibles (indice i),
 - Calcul de la dérive de l'horloge satellitaire : ${}^{S_i} Clk_{BIAS}$ (Eq. 3.10),
 - Calcul approximatif de l'instant d'émission $\hat{t}_{e,i,k}$ (Eq. 3.13),
 - Calcul de la position ${}^{G(\hat{t}_{e,i,k})} S_i(\hat{t}_{e,i,k})$ du satellite (Annexe E),

- Calcul de la correction relativiste dtr (Eq. 3.11) et actualisation de ${}^{S_i}Clk_{BIAS}$,
- Calcul de la position ${}^{G(t_k)}S_i(\hat{t}_{e,i,k})$ du satellite (Eq. 3.12),
- Calcul de la position ${}^{T(t_k)}S_i(\hat{t}_{e,i,k})$ du satellite (transformation ECEF2LT).

Innovation

- Toujours pour chacun des satellites,
- Calcul de la mesure $\rho_{i,k}$ (Eq. 3.18),
- Mesure prédite (Eq. 3.19) :

$$\hat{\rho}_{i,k} = \left((\hat{x}_k - x_{S_{i,k}})^2 + (\hat{y}_k - y_{S_{i,k}})^2 + (\hat{z}_k - z_{S_{i,k}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \hat{\eta}_k$$

- Calcul de l'erreur de sortie :

$$\tilde{\rho}_{i,k} = \rho_{i,k} - \hat{\rho}_{i,k}.$$

- Calcul de l'Hessien : en posant

$$\hat{r}_{i,k} = \left((\hat{x}_k - x_{S_{i,k}})^2 + (\hat{y}_k - y_{S_{i,k}})^2 + (\hat{z}_k - z_{S_{i,k}})^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

un développement de Taylor de la fonction d'observation (Eq. 3.19) au voisinage de la dernière estimation donne :

$$H_{i,k}^{\rho} = \left[\frac{(\hat{x}_k - x_{S_{i,k}})}{\hat{r}_{i,k}}, \frac{(\hat{y}_k - y_{S_{i,k}})}{\hat{r}_{i,k}}, \frac{(\hat{z}_k - z_{S_{i,k}})}{\hat{r}_{i,k}}, 0, 0, 0, 1, 0 \right] \quad (3.20)$$

- Le vecteur d'erreurs de sortie et la matrice d'Hessien sont créés à partir de chaque satellite conservé,
- Calcul de la covariance de l'erreur de sortie : S_k ,

Mise à jour

- Calcul du gain de Kalman : K_k ,
- Mise à jour de l'estimation d'état : \hat{q}_k ,
- Mise à jour de la covariance de l'erreur d'estimation : P_k .

3.3.4 Utilisation des mesures de Doppler

3.3.4.1 Définition d'une mesure de Doppler

Cette mesure donne une information sur la vitesse relative du récepteur par rapport au satellite. Il s'agit de la dérivée $\dot{d}_i({}^R t_k)$ de la distance $d_i({}^R t_k)$ (Eq. 3.8) qu'on peut

exprimer par le produit scalaire :

$$\dot{d}_i \left({}^R t_k \right) = \left\langle \frac{d}{dt} \left(\overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})} \right), \vec{a} \right\rangle$$

avec $\vec{a} = \frac{\overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})}}{\left\| \overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})} \right\|}$: vecteur unitaire pointant vers le satellite i .

La formule de Doppler donne le décalage fréquentiel :

$$f_{rec} - f_{L1} = -\frac{f_{L1}}{c} \cdot \left\langle \frac{d}{dt} \left(\overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})} \right), \vec{a} \right\rangle$$

avec $f_{L1} = 1575.42 [MHz]$: fréquence porteuse du signal GPS.

Admettons que l'observable $Dop_{i,k}$ soit l'écart de mesure $\Delta f = f_{rec} - f_{L1}$, si les horloges étaient exactes, on aurait donc :

$$Dop_{i,k} = -\frac{f_{L1}}{c} \left\langle \frac{d}{dt} \left(\overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})} \right), \frac{\overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})}}{\left\| \overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})} \right\|} \right\rangle.$$

Pour tenir compte de la dérive $\frac{d}{dt} \left({}^R Clk_{BIAS} \right) = \dot{\eta}$ de l'horloge du récepteur ($\dot{\eta}$ est une composante de l'état, la relation précédente s'écrit :

$$Dop_{i,k} = -\frac{f_{L1}}{c} \left(\left\langle \frac{d}{dt} \left(\overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})} \right), \frac{\overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})}}{\left\| \overrightarrow{R(t_k) S_i(t_{e,i,k})} \right\|} \right\rangle - \dot{\eta} \right). \quad (3.21)$$

3.3.4.2 Équation d'observation

Pour exprimer l'équation (3.21) de façon analytique, rappelons que :

$${}^{T(t_k)} S_i(t_{e,i,k}) = \begin{bmatrix} x_{S_i,k} \\ y_{S_i,k} \\ z_{S_i,k} \end{bmatrix} : \text{position du satellite } i,$$

$${}^{T(t_k)} R(t_k) = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} : \text{position du récepteur,}$$

La dérivée de la position du récepteur est définie dans le référentiel tangent par l'équation 2.9,

$${}^{T(t_k)} \dot{R}(t_k) = u(t_k) \begin{bmatrix} \cos \psi(t_k) \\ \sin \psi(t_k) \\ -\theta(t_k) \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Les coordonnées ${}^{G(t_{e,i,k})} S_i(t_{e,i,k})$ du satellite i à l'instant $t_{e,i,k}$ sont définies dans le référentiel $\mathcal{G}(t_{e,i,k})$ par le programme de l'annexe E. En dérivant par rapport au temps et ligne par ligne les expressions de ce programme, on obtient donc la dérivée

$$\frac{d}{dt} \left({}^{G(t_{e,i,k})} S_i \right) (t_{e,i,k}). \quad (3.23)$$

La dérivée $\frac{d}{dt} \left(G^{(t_k)} S_i \right) (t_{e,i,k})$ s'obtient en utilisant la matrice de rotation $G^{(t_k)} T_{G^{(t_{e,i,k})}}$ (3.12) puis la transformation dECEF2LT (Eq. 3.5).

$$\frac{d}{dt} \left(T^{(t_k)} S_i \right) (t_{e,i,k}) = \text{dECEF2LT} \left(\left[G^{(t_k)} T_{G^{(t_{e,i,k})}} \right] \frac{d}{dt} \left(G^{(t_{e,i,k})} S_i \right) (t_{e,i,k}) \right).$$

Dans la suite, on note :

$$\frac{d}{dt} \left(T^{(t_k)} S_i \right) (t_{e,i,k}) = \begin{bmatrix} \dot{x}_{S_i,k} \\ \dot{y}_{S_i,k} \\ \dot{z}_{S_i,k} \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Avec ces notations, l'équation (3.21) s'écrit

$$\begin{cases} Dop_{i,k} = -\frac{f_{L1}}{c} \left(\left\langle \begin{bmatrix} \cos \psi(t_k) u(t_k) - \dot{x}_{S_i,k} \\ \sin \psi(t_k) u(t_k) - \dot{y}_{S_i,k} \\ -\theta(t_k) u(t_k) - \dot{z}_{S_i,k} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x(t_k) - x_{S_i,k} \\ y(t_k) - y_{S_i,k} \\ z(t_k) - z_{S_i,k} \end{bmatrix} \right\rangle / r_{i,k} - \dot{\eta} \right) \\ \text{avec :} \\ r_{i,k} = \left((x(t_k) - x_{S_i,k})^2 + (y(t_k) - y_{S_i,k})^2 + (z(t_k) - z_{S_i,k})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3.25)$$

3.3.4.3 Exploitation dans un filtre de Kalman

Construction de l'équation d'observation

- Définition de l'instant d'échantillonnage : $R_{t_k} = ITOW/1000$ [s],
- Pour chacun des satellites disponibles (indice i),
 - Calcul de la dérive de l'horloge satellitaire : $S_i Clk_{BIAS}$ (Eq. 3.10),
 - Calcul approximatif de l'instant d'émission $\hat{t}_{e,i,k}$ (Eq. 3.13),
 - Calcul de la position $G^{(\hat{t}_{e,i,k})} S_i (\hat{t}_{e,i,k})$ du satellite (Annexe E),
 - Calcul de la dérivée $\frac{d}{dt} \left(G^{(t_{e,i,k})} S_i \right) (\hat{t}_{e,i,k})$,
 - Calcul de la dérivée $\frac{d}{dt} \left(G^{(t_k)} S_i \right) (\hat{t}_{e,i,k})$,
 - Calcul de la dérivée $\frac{d}{dt} \left(T^{(t_k)} S_i \right) (\hat{t}_{e,i,k})$.

Innovation

- Toujours pour chacun des satellites,
 - Mesure : $Dop_{i,k}$,

– Mesure prédite (Eq. 3.25) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \widehat{Dop}_{i,k} = -\frac{f_{L1}}{c} \left(\left\langle \left[\begin{array}{c} \cos \widehat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{x}_{S_{i,k}} \\ \sin \widehat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{y}_{S_{i,k}} \\ -\widehat{\theta}(t_k)u(t_k) - \dot{z}_{S_{i,k}} \end{array} \right], \left[\begin{array}{c} \hat{x}(t_k) - x_{S_{i,k}} \\ \hat{y}(t_k) - y_{S_{i,k}} \\ \hat{z}(t_k) - z_{S_{i,k}} \end{array} \right] \right\rangle / \widehat{r}_{i,k} - \widehat{\eta} \right) \\ \text{avec :} \\ \widehat{r}_{i,k} = \left((\hat{x}(t_k) - x_{S_{i,k}})^2 + (\hat{y}(t_k) - y_{S_{i,k}})^2 + (\hat{z}(t_k) - z_{S_{i,k}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{array} \right.$$

– Calcul de l'erreur de sortie :

$$\widetilde{Dop}_{i,k} = Dop_{i,k} - \widehat{Dop}_{i,k}.$$

– Calcul de l'Hessien : en calculant un développement de Taylor de la fonction d'observation (Eq. 3.25) au voisinage de la dernière estimation selon les formules facilement programmables de la table (3.1) on a :

$$H_{i,k}^{Dop} = \left[\frac{\partial Dop_{i,k}}{\partial x}, \frac{\partial Dop_{i,k}}{\partial y}, \frac{\partial Dop_{i,k}}{\partial z}, \frac{\partial Dop_{i,k}}{\partial \psi}, \frac{\partial Dop_{i,k}}{\partial \theta}, 0, 0, -\frac{f_{L1}}{c} \right] \quad (3.26)$$

– Le vecteur d'erreurs de sortie et la matrice d'Hessien sont créés à partir de chaque satellite conservé,

– Calcul de la covariance de l'erreur de sortie : S_k ,

Mise à jour

– Calcul du gain de Kalman : K_k ,

– Mise à jour de l'estimation d'état : \hat{q}_k ,

– Mise à jour de la covariance de l'erreur d'estimation : P_k .

3.3.5 Variance de b_k^m - Matrice de bruit de mesure R_k

La matrice R_k représente la matrice de covariance de mesure, c'est-à-dire la confiance que l'on donne aux mesures de pseudodistance et de Doppler.

La définition des termes de R_k s'appuie ici sur une étude statistique, dont une partie des résultats est présentée en annexe F. Les mesures provenant des différents satellites sont supposées indépendantes, d'où une matrice R_k diagonale. La taille de R_k dépend du nombre de satellite retenu pour le calcul.

Cette étude statistique a été réalisée sur le site de l'ENSIL, dans de bonnes conditions de visibilité satellitaire. Elle permet donc d'obtenir un ordre de grandeur des variances des différentes mesures aussi bien pour des satellites très élevés par rapport à l'horizon que pour des cas plus défavorables de satellites très proches de l'horizon. Toutefois, le cas des erreurs de mesure, dites de "multi-trajets", causées par des réflexions dans des canyons urbains n'est pas pris en compte dans l'étude. Pour ces conditions, il conviendra donc de majorer légèrement les valeurs obtenues dans l'étude.

TABLE 3.1 – Hessien de la fonction d'observation (Eq. 3.25)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial x} &= -\frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} \cos \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{x}_{S_{i,k}} \\ \sin \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{y}_{S_{i,k}} \\ -\hat{\theta}(t_k)u(t_k) - \dot{z}_{S_{i,k}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\rangle / \hat{r}_{i,k} \\
&+ \frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} \cos \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{x}_{S_{i,k}} \\ \sin \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{y}_{S_{i,k}} \\ -\hat{\theta}(t_k)u(t_k) - \dot{z}_{S_{i,k}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \hat{x}(t_k) - x_{S_{i,k}} \\ \hat{y}(t_k) - y_{S_{i,k}} \\ \hat{z}(t_k) - z_{S_{i,k}} \end{bmatrix} \right\rangle \cdot \frac{\hat{x}(t_k)}{(\hat{r}_{i,k})^3} \\
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial y} &= -\frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} \cos \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{x}_{S_{i,k}} \\ \sin \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{y}_{S_{i,k}} \\ -\hat{\theta}(t_k)u(t_k) - \dot{z}_{S_{i,k}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\rangle / \hat{r}_{i,k} \\
&+ \frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} \cos \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{x}_{S_{i,k}} \\ \sin \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{y}_{S_{i,k}} \\ -\hat{\theta}(t_k)u(t_k) - \dot{z}_{S_{i,k}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \hat{x}(t_k) - x_{S_{i,k}} \\ \hat{y}(t_k) - y_{S_{i,k}} \\ \hat{z}(t_k) - z_{S_{i,k}} \end{bmatrix} \right\rangle \cdot \frac{\hat{y}(t_k)}{(\hat{r}_{i,k})^3} \\
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial z} &= -\frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} \cos \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{x}_{S_{i,k}} \\ \sin \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{y}_{S_{i,k}} \\ -\hat{\theta}(t_k)u(t_k) - \dot{z}_{S_{i,k}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\rangle / \hat{r}_{i,k} \\
&+ \frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} \cos \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{x}_{S_{i,k}} \\ \sin \hat{\psi}(t_k)u(t_k) - \dot{y}_{S_{i,k}} \\ -\hat{\theta}(t_k)u(t_k) - \dot{z}_{S_{i,k}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \hat{x}(t_k) - x_{S_{i,k}} \\ \hat{y}(t_k) - y_{S_{i,k}} \\ \hat{z}(t_k) - z_{S_{i,k}} \end{bmatrix} \right\rangle \cdot \frac{\hat{z}(t_k)}{(\hat{r}_{i,k})^3} \\
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial \psi} &= -\frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} -\sin \hat{\psi}(t_k)u(t_k) \\ \cos \hat{\psi}(t_k)u(t_k) \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \hat{x}(t_k) - x_{S_{i,k}} \\ \hat{y}(t_k) - y_{S_{i,k}} \\ \hat{z}(t_k) - z_{S_{i,k}} \end{bmatrix} \right\rangle / \hat{r}_{i,k} \\
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial \theta} &= -\frac{f_{L1}}{c} \left\langle \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -u(t_k) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \hat{x}(t_k) - x_{S_{i,k}} \\ \hat{y}(t_k) - y_{S_{i,k}} \\ \hat{z}(t_k) - z_{S_{i,k}} \end{bmatrix} \right\rangle / \hat{r}_{i,k} \\
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial \phi} &= 0 \\
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial \eta} &= 0 \\
\frac{\partial D_{op_{i,k}}}{\partial \dot{\eta}} &= -f_{L1}
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Algorithm 3 : Fusion Odométrie GPS - Couplage serré**Initialisation**

- Estimation initiale : $\hat{x}_{0|0}$ et $P_{0|0}$;

Prédiction

- Prédiction de l'état : $\hat{q}_{k|k-1} = f(\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k)$;
- Calcul de la matrice de bruit d'état : Q_k ;
- Calcul de la matrice de régime libre du linéarisé : $F_k = \frac{\partial f}{\partial q} |_{\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k}$;
- Prédiction de la covariance de l'erreur d'estimation : $P_{k|k-1} = F_k^T \cdot P_{k-1|k-1} \cdot F_k + Q_k$;

Innovation

for all trames RAW reçues **do**

- Tri des satellites retenus
SNR > 30 par exemple
- Détection des paramètres d'éphémérides les plus proches (temporellement)

for all satellites retenus **do**

- Construction de la mesure de pseudodistance et mesure Doppler : $\rho_{i,k}$ et $Dop_{i,k}$;
- Calcul des mesures prédites : $\hat{\rho}_{i,k}$ et $\hat{Dop}_{i,k}$;
- Calcul des erreurs de sortie (innovation) : $\tilde{\rho}_{i,k} = \rho_{i,k} - \hat{\rho}_{i,k}$;
 $\tilde{Dop}_{i,k} = Dop_{i,k} - \hat{Dop}_{i,k}$;
 $H_{i,k}^\rho$ et $H_{i,k}^{Dop}$;
- Calcul des Hessiens :

end for

end for

- Construction du vecteur d'innovation : $\tilde{z}_k = [\tilde{\rho}_{1:end,k}, \tilde{Dop}_{1:end,k}]$;
- Construction de la matrice d'Hessiens : $H_k = [(H_{1:end,k}^\rho)^t; (H_{1:end,k}^{Dop})^t]$;
- Covariance de l'erreur de sortie : $S_k = H_k \cdot P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k$;
- Test d'acceptation de la sortie : $\varepsilon^T S_k^{-1} \varepsilon \leq \chi^2(p_0)$;
(Annexe D)

Mise à jour

- Calcul du gain de Kalman : $K_k = P_{k|k-1} \cdot H_k^T \cdot S_k^{-1}$;
- Mise à jour de l'estimation d'état : $\hat{q}_{k|k} = \hat{q}_{k-1|k-1} + K_k \cdot \tilde{z}_k$;
- Mise à jour de la covariance de l'erreur d'estimation : $P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k \cdot H_k \cdot P_{k|k-1}$;

3.3.6 Mise en oeuvre - Algorithme global

L'algorithme 3 ne reprend pas toutes les étapes de la construction de toutes les variables nécessaires à cette fusion, mais, associé avec les détails fournis tout au long de cette section, il permet de correctement visualiser l'architecture d'un processus de couplage serré.

3.3.7 Résultats

3.3.7.1 Limoges

De la même manière que pour le couplage lâche, les résultats obtenus par couplage serré de l'odométrie et des mesures GPS, projetés sur le plan XY (Fig. 3.13), et en 3D (Fig. 3.14), sont analysés.

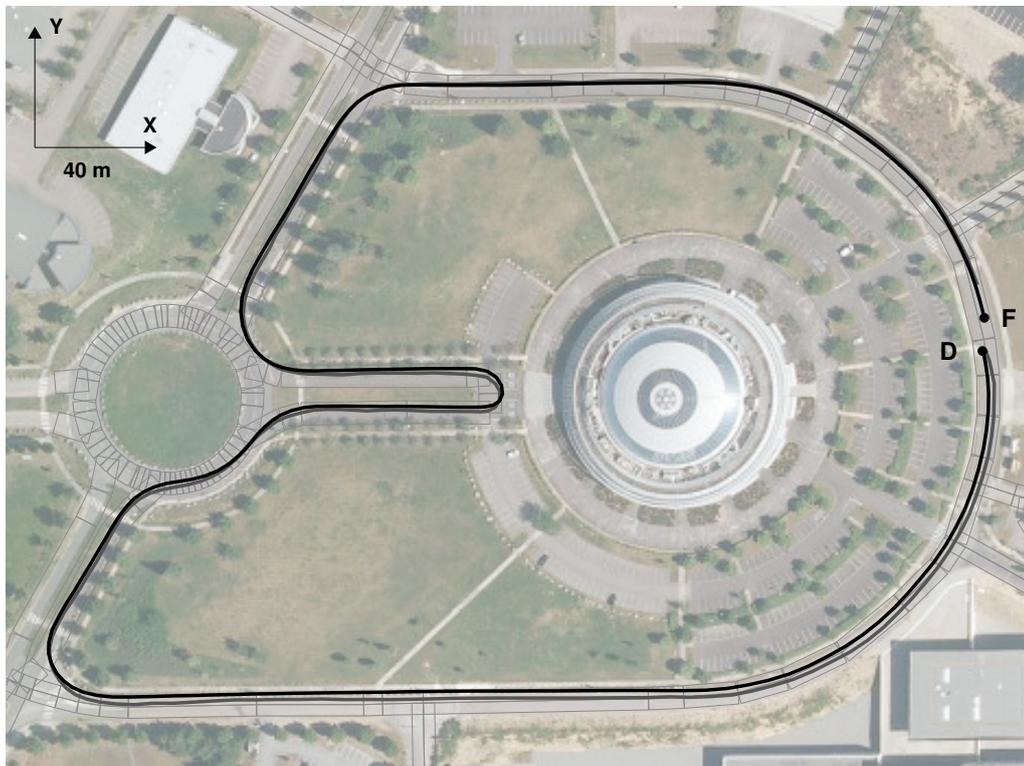


FIGURE 3.13 – Localisation obtenue par couplage serré odométrie GPS (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

Alors que la projection sur la plan XY ne nous apporte que peu d'informations (là encore, la trajectoire obtenue est quasiment superposée à la "référence" GGA), la visualisation 3D montre que le couplage serré permet une meilleure estimation de l'altitude que le couplage lâche.

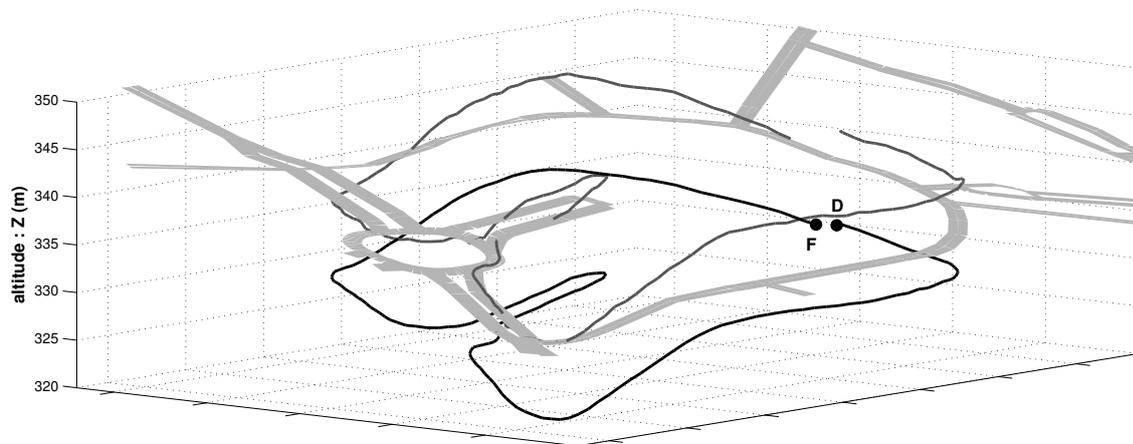


FIGURE 3.14 – Localisation obtenue par couplage serré odométrie GPS (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

Concernant l'évolution du volume du domaine de validité (Fig. 3.15), le temps que l'algorithme converge, la valeur du volume de validité, très élevée au départ, ne permet pas de se rendre compte de l'évolution.

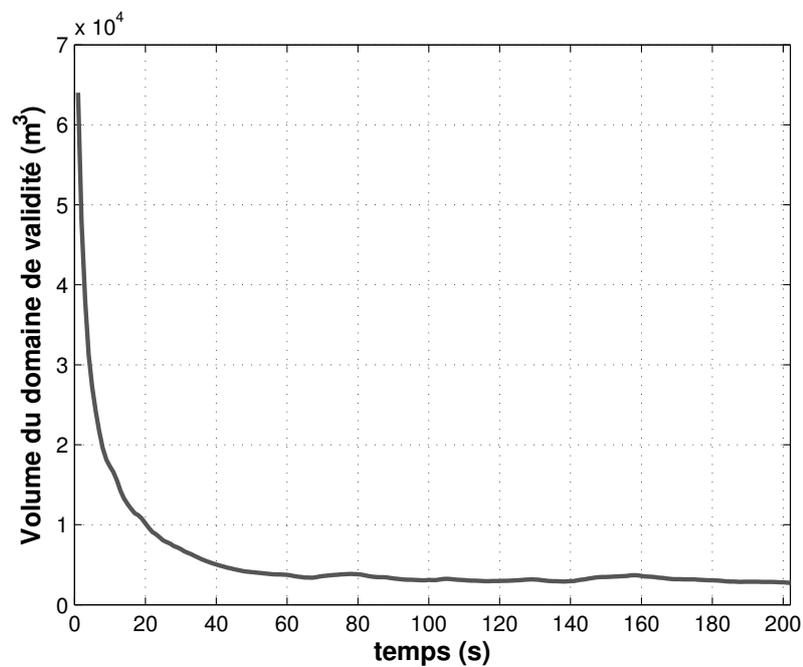


FIGURE 3.15 – Volume du domaine de validité.

Ainsi, un zoom sur la partie intéressante est proposée en figure 3.16. Ce zoom permet d'observer que la confiance en l'estimation résultant du processus de couplage serré semble sensiblement meilleure qu'avec le couplage lâche (volume en moyenne plus faible).

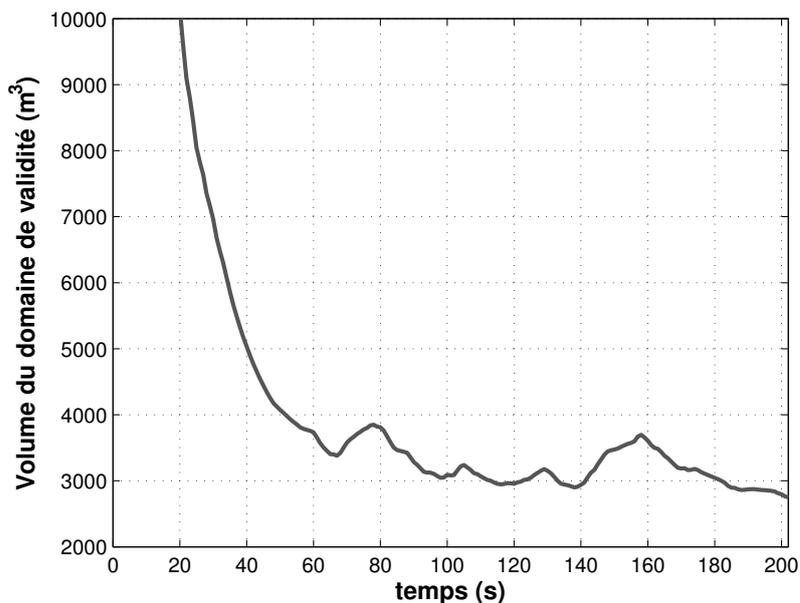


FIGURE 3.16 – Volume du domaine de validité.

Comme ce jeu de données ne possède pas de véritable référence, voyons avec les données de Paris si les tendances amenées par ces résultats se confirment.

3.3.7.2 Paris - XIIème arrondissement

La trajectoire 2D obtenue par couplage serré (Fig. 3.17) semble globalement équivalente à celle par couplage lâche. Néanmoins, les passages où le couplage lâche éloignait l'estimation de la référence ne sont pas retrouvés dans ces résultats, ce qui laisse entrevoir une précision meilleure.

En se penchant sur les résultats 3D (Fig. 3.18), la première analyse faite à partir des résultats en 2D est moins évidente. En effet, dans le cas du couplage lâche, l'évolution de l'altitude variait fortement mais se trouvait proche de la référence par endroit. Or, dans le cas présent, les résultats montrent que l'estimation de l'altitude reste tout le long du parcours éloignée de la référence.

L'analyse des fonctions de distribution cumulées de l'erreur de position par rapport à la référence (Figs. 3.19 et 3.20) révèlent que les deux tendances évoquées à partir des représentations des trajectoires sont fondées. Tout d'abord, la figure 3.19 confirme que les résultats en couplage lâche et en couplage serré sont très proches en terme de précision,

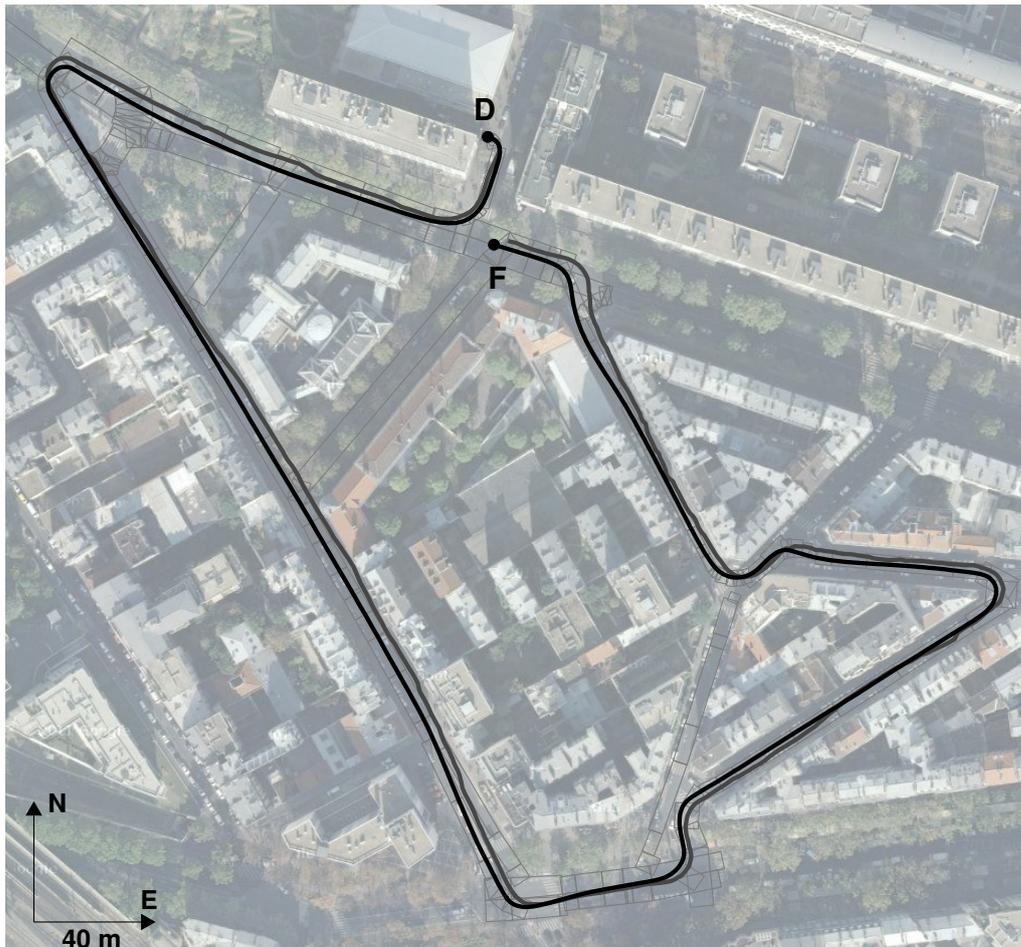


FIGURE 3.17 – Localisation obtenue par couplage serré odométrie GPS (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

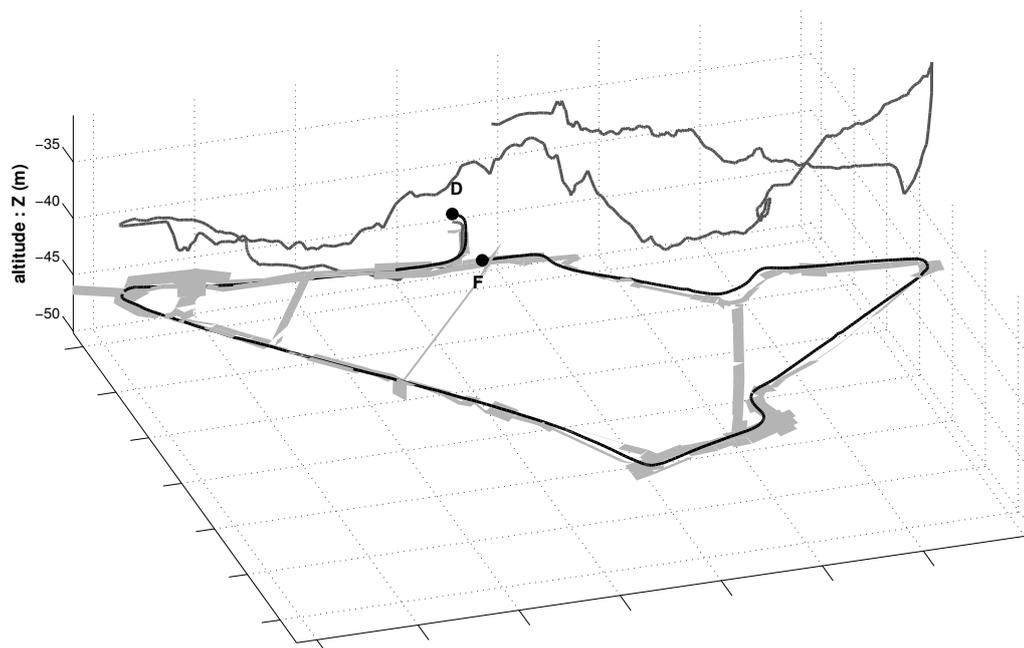


FIGURE 3.18 – Localisation obtenue par couplage serré odométrie GPS (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

mais que le couplage serré permet de réduire les erreurs d'estimation les plus importantes. La figure 3.20 quand à elle, valide que l'estimation de l'altitude dans le cas du couplage serré est moins satisfaisante.

Deux effets peuvent expliquer ces résultats.

Premièrement, les résultats obtenues par couplage lâche sont basés sur la trame GGA du récepteur qui est la résultante du propre processus de fusion du récepteur, améliorant l'estimation de l'altitude.

Ensuite, le couplage lâche est un processus relativement simple à optimiser puisque c'est principalement la valeur du paramètre de confiance en la mesure qui va impacter le résultat. Alors que pour le couplage serré, de nombreux paramètres entrent en compte : la confiance donnée aux mesures de pseudorange et de doppler, la valeur du seuil pour sélectionner ou non les satellites ainsi que plusieurs termes de corrections à estimer.

Ainsi, afin d'optimiser et donc d'améliorer les résultats du couplage serré, une caractérisation des mesures, comme celle menée sur les données de Limoges (Annexe F), serait nécessaire.

La courbe d'évolution du volume du domaine de validité (Fig. 4.17) ne fait que valider les observations précédentes. Alors que sur les données de Limoges, le couplage serré

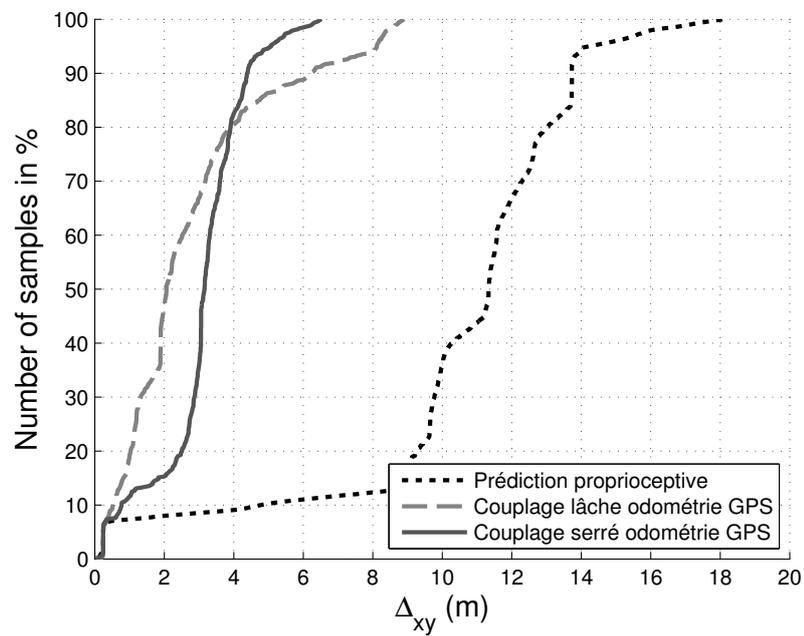


FIGURE 3.19 – Couplage serré odométrie GPS - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xy .

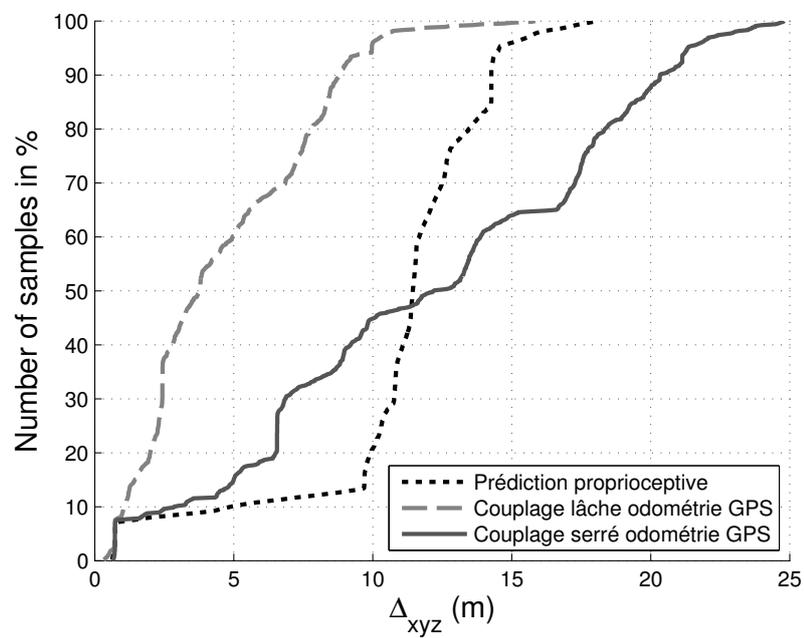


FIGURE 3.20 – Couplage serré odométrie GPS - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xyz .

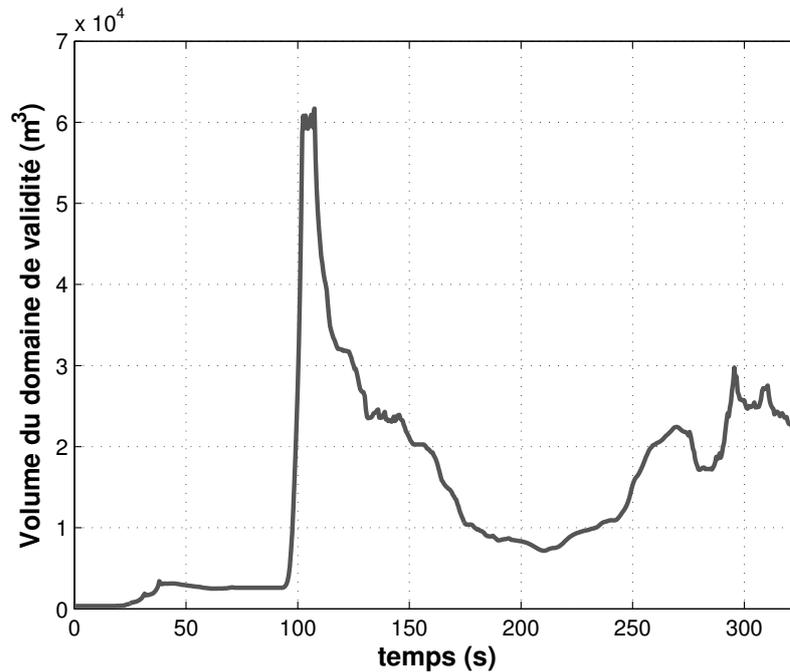


FIGURE 3.21 – Volume du domaine de validité.

permettait d'augmenter la confiance en l'estimation, dans ce cas, cette tendance est moins évidente.

Dans tous les cas, c'est principalement dans l'estimation de l'altitude que réside l'aspect difficile. L'utilisation des données cartographiques dans le but de contraindre l'estimation, notamment l'altitude, semble donc être une voie prometteuse.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la mise en œuvre et les résultats obtenus selon deux approches distinctes de la fusion de données odométriques et satellitaires.

La fusion des données proprioceptives et satellitaires permet de bénéficier des avantages de chacune des deux sources d'informations. Les données GPS, lorsqu'elles sont disponibles, aident à éliminer la dérive et à enrayer le phénomène d'inflation de la matrice de covariance P , et donc du domaine de confiance. Les données proprioceptives, quant à elles, alimentent le modèle de progression ce qui permet de palier aux passages pour lesquels moins de 4 satellites avec un rapport SNR suffisant sont disponibles.

Le calcul de localisation uniquement à partir des RAW DATA (pseudodistances et Doppler) est une solution, appelée solveur GPS, qui n'exploite pas la cinématique du

véhicule. Par conséquent, la seule façon de bénéficier au mieux de notre connaissance de cette cinématique est le couplage serré.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été réalisés grâce au logiciel Matlab, mais l'algorithme de fusion odométrie et GPS par couplage lâche a également été implémenté et validé en temps réel sur le véhicule VERT lors des expérimentations finales du projet CityVIP. L'algorithme de couplage serré a également été validé sur des jeux temps réel.

Les solutions présentées dans ce chapitre aboutissent donc à une localisation fiable, basée sur la complémentarité des informations proprioceptives et satellitaires. Cependant, le postulat consistant à admettre qu'une voiture roule sur une route (dans la majorité des cas) n'est pas pris en compte. L'exploitation de cette donnée (détaillée dans le chapitre suivant), liée aux informations contenues dans les cartes numériques, devrait conduire à améliorer la précision de la localisation et à réduire le domaine de confiance.

Localisation 3D par fusion - odométrie, GPS et cartographie

Chapitre 4 - Localisation 3D par fusion - odométrie, GPS et cartographie

Ce dernier chapitre a pour but d'expliquer le choix de la méthode de traitement des informations cartographiques, de la détailler, et de voir son influence quant à l'amélioration du processus de fusion.

Sommaire

4.1	Introduction	97
4.2	Définition du contexte	98
4.3	Map Aiding par algorithme ellipsoïdal	101
4.3.1	Définition de l'espace roulant	102
4.3.2	Adaptation géométrique	103
4.3.3	Calcul des grandeurs nécessaires à l'OVE	104
4.3.4	Les deux étapes du Map Aiding	106
4.3.4.1	Map Matching - Sélection du segment	106
4.3.4.2	Mise à jour de la pose du véhicule et de son domaine de confiance	107
4.3.5	Algorithme de Map Aiding	108
4.4	Rappel de l'approche globale	108
4.5	Résultats	109
4.5.1	Couplage lâche, odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding	109
4.5.1.1	Jeu de données de Limoges	109
4.5.1.2	Jeu de données de Paris	113
4.5.2	Couplage serré, odométrie et mesures GPS de pseudodistances et de Doppler, et Map Aiding	115
4.5.2.1	Jeu de données de Limoges	115
4.5.2.2	Jeu de données de Paris	118
4.6	Conclusion	122

4.1 Introduction

Les informations cartographiques ont été l'objet d'une évolution quasi permanente depuis l'apparition des premières cartes. Tout d'abord en 2D, faiblement détaillées et fortement erronées, ces cartes sont progressivement devenues de véritables références dans le but de se localiser. En effet, les améliorations, encore actuelles, sont nombreuses comme :

- l'ajout de nouveaux éléments ou de nouveaux attributs aux éléments existants,
- le développement de cartes 3D,
- des campagnes de mesures de plus en plus fiables permettant la création de carte très précises tout d'abord en relatif puis en absolue,
- la numérisation de ces informations et la création de base de données.

Mais ces informations, devenues, par leur qualité et la simplicité de leur obtention, des données essentielles à une méthode de localisation de mobiles, ne peuvent être traités comme des mesures.

Afin de prendre en compte ces informations, il convient tout d'abord d'utiliser des techniques dites de Map Matching, procédé pouvant se résumer comme la faculté à se localiser par rapport à une carte numérique (Fig. 4.1). Puis, la localisation pourra être améliorée. On parlera alors de Map Aiding.

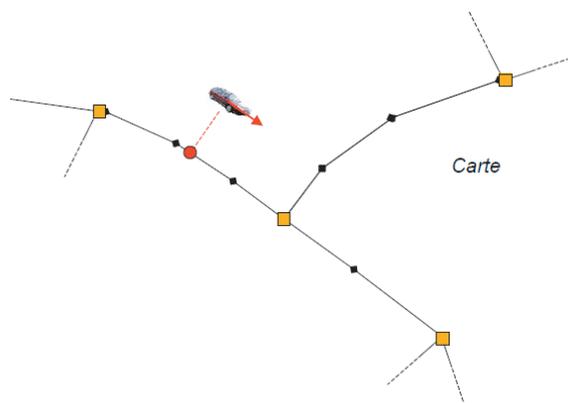


FIGURE 4.1 – Exemple d'un véhicule dont la position est repérée par rapport à une carte numérique

Ainsi, après avoir explicité notre besoin et présenté les solutions envisageables, ce chapitre introduira l'algorithme choisi pour prendre en compte des informations cartographiques. Puis, les résultats de la fusion de cet algorithme avec les autres informations (odométriques et satellitaires) seront analysés.

4.2 Définition du contexte

En partant du postulat qu'une voiture évolue exclusivement sur le réseau routier, une méthode de Map Aiding a pour but d'identifier la partie du réseau routier sur laquelle le véhicule est censé évoluer (Map Matching) puis de mettre à jour sa position sur cette partie.

La majorité des algorithmes de Map Aiding développés dernièrement suivent cette logique. Dans la littérature, ces techniques sont classiquement divisées en quatre catégories : géométrique, topologique, probabiliste et avancées. Ces catégories sont détaillées dans un article de 2007 de Quddus et al. [20], qui présente un état de l'art des méthodes de Map Aiding existantes. Depuis, on peut notamment citer de nouvelles avancées en terme de développement temps réel [21] [6] [22], et d'intégrité [23] [24].

Néanmoins, les approches temps réel et en 3D, objectif de l'approche proposée dans ce document, sont très rares.

Rappelons que notre approche aboutit à une localisation 3D associée à un domaine de confiance ellipsoïdal 3D, et que le problème étudié dans ce chapitre revient à mettre à jour l'état et la matrice de covariance grâce aux informations cartographiques qui, dans ce cas correspondent à un espace roulant modélisé par des parallélépipèdes rectangles (Fig. 4.2). Ce travail est dans la continuité des travaux de Renault et Meizel [25].

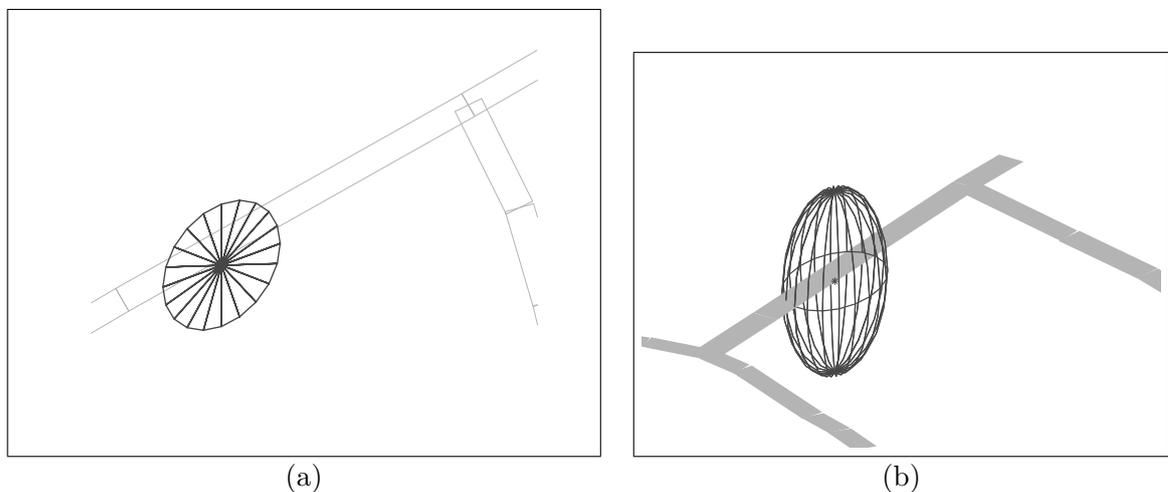


FIGURE 4.2 – Représentation d'une localisation et de son domaine de confiance associé - (a) : en 2D, et (b) : en 3D. Le domaine de confiance est représenté par l'ellipsoïde. Le centre de l'ellipsoïde correspond à la localisation estimée. Les rectangles en gris clair (plan médiant de parallélépipèdes rectangles) représentent la modélisation de la route.

En clair, cela consiste à réussir à calculer l'intersection entre un ensemble défini par un vecteur d'état et une matrice de covariance, ayant pour forme une ellipsoïde, et des

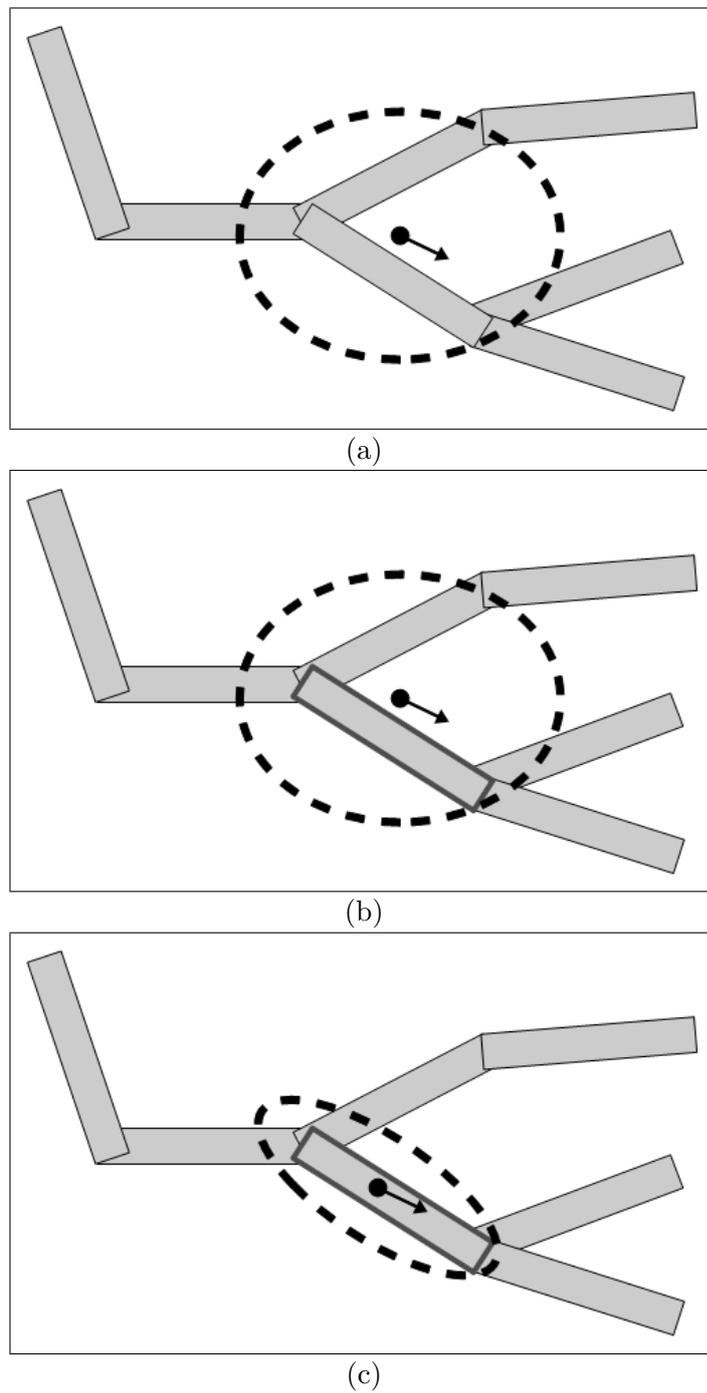


FIGURE 4.3 – Exemple 2D de Map Aiding - (a) : situation avant Map Matching, la flèche représente le cap - (b) : Map Matching, sélection du rectangle de route le plus probable - (c) : mise à jour de la position et du domaine de confiance.

contraintes caractérisées par rapport à l'espace roulant. Le but étant, une fois la bonne partie de route sélectionnée, de déterminer une meilleure estimation de la localisation et une diminution du volume du domaine de confiance.

C'est ce qu'illustre la figure 4.3 qui présente un exemple de Map Aiding 2D. La situation initiale (a) est définie par un domaine de confiance dont le centre est la localisation courante. La flèche correspond au cap du véhicule et les rectangles gris constituent la modélisation du réseau routier. La première étape (b) consiste à déterminer sur quel rectangle de route le véhicule est le plus susceptible de se trouver (Map Matching). Une fois le rectangle choisi, le Map Aiding (c) permet d'améliorer la localisation et de réduire le domaine de confiance.

Formulée de cette façon, cette problématique est extrêmement proche de celle de l'identification ensembliste (ou identification à erreur bornée). Plutôt que d'identifier un vecteur de N paramètres caractérisant un système et son domaine de confiance associé, on estime l'état du véhicule, un vecteur de dimension N , et le domaine de confiance associé. Les contraintes concernant les erreurs de mesures sont remplacées par des contraintes d'appartenance à l'espace roulant. Dans les deux cas, ces contraintes se matérialisent par un espace compris entre deux hyperplans parallèles.

Il existe deux grandes familles de méthodes ensemblistes, les méthodes exactes, qui prennent en compte de manière brute toutes les contraintes, il en résulte des ensembles de type polyèdre (Fig. 4.4). Ces méthodes garantissent une description optimale du domaine de confiance, mais sont quasi inapplicables concrètement puisqu'elles demandent à travailler avec des polyèdres dont le nombre de faces peut croître à l'infini. La solution pour pouvoir mettre en application ces méthodes consiste à discrétiser l'espace. Cela permet de diviser l'espace de travail en un nombre de briques élémentaires, certes très grand, mais fini.

L'autre famille, les méthodes dites ellipsoïdales, consiste à approximer l'ensemble obtenu par une ellipsoïde. La représentation du domaine de confiance, dans un espace à N dimensions, ne nécessite alors qu'un vecteur de dimension N et une matrice $N * N$, soit un nombre très réduit de paramètres par rapport au problème initial.

Cette deuxième option, qui correspond au domaine de confiance utilisé dans l'approche proposée, peut également être différenciée en deux catégories : inner-bounding (ensemble englobant intérieur), et outer-bounding (ensemble englobant extérieur). Pour une meilleure compréhension, la figure 4.5 permet de visualiser une illustration.

Même si le inner-bounding permet de converger plus rapidement, c'est uniquement car l'ensemble résultant ne contient pas toutes les valeurs vérifiant les contraintes. Or, si on se place dans l'optique d'une localisation associée à un domaine de confiance, le domaine résultant serait donc une sous-estimation, et de ce fait rendrait cette solution non fiable et non intègre. C'est pourquoi le outer-bounding qui lui, est une sur-estimation, semble mieux adapté à la situation.

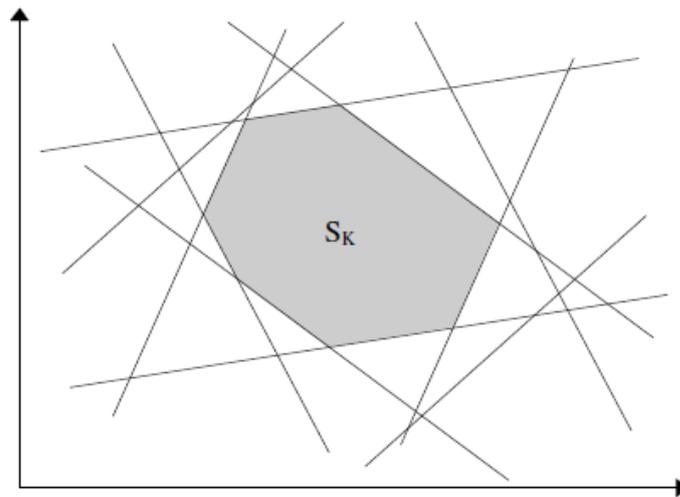


FIGURE 4.4 – Exemple d'ensemble S_k , obtenu par représentation exacte, qui contient toutes les valeurs possibles vérifiant les contraintes.

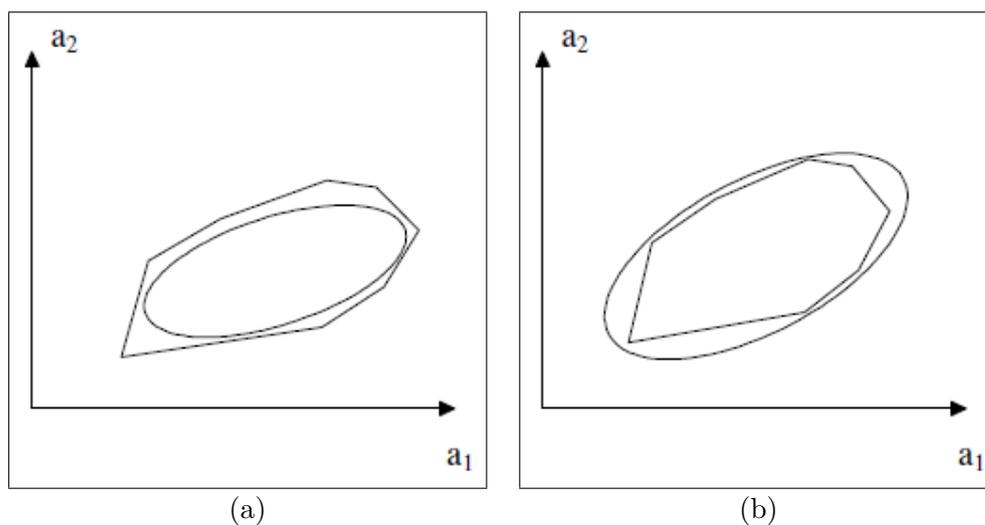


FIGURE 4.5 – Approximation par : (a) : ellipsoïde englobante intérieure, (b) : ellipsoïde englobante extérieure.

Le lecteur souhaitant plus d'informations et de détails sur les méthodes qui viennent d'être évoquées peut, entre autres, se référer à l'article de Walter [26] et à la thèse de Renault [27].

4.3 Map Aiding par algorithme ellipsoïdal

Le choix de l'algorithme pour réaliser le Map Aiding s'est ainsi porté sur les travaux de Cheung, plus particulièrement l'algorithme OVE, Optimal Volume Ellipsoid [28] [29].

Cette approche permet non seulement d'approximer le domaine possible des paramètres estimés par une ellipsoïde englobante extérieure, mais surtout de le faire de manière à en minimiser le volume.

Comme le montre la Fig. 4.6, l'OVE calcule une ellipsoïde E de volume minimal résultant de l'intersection d'une ellipsoïde S avec deux hyperplans parallèles H_1 et H_2 .

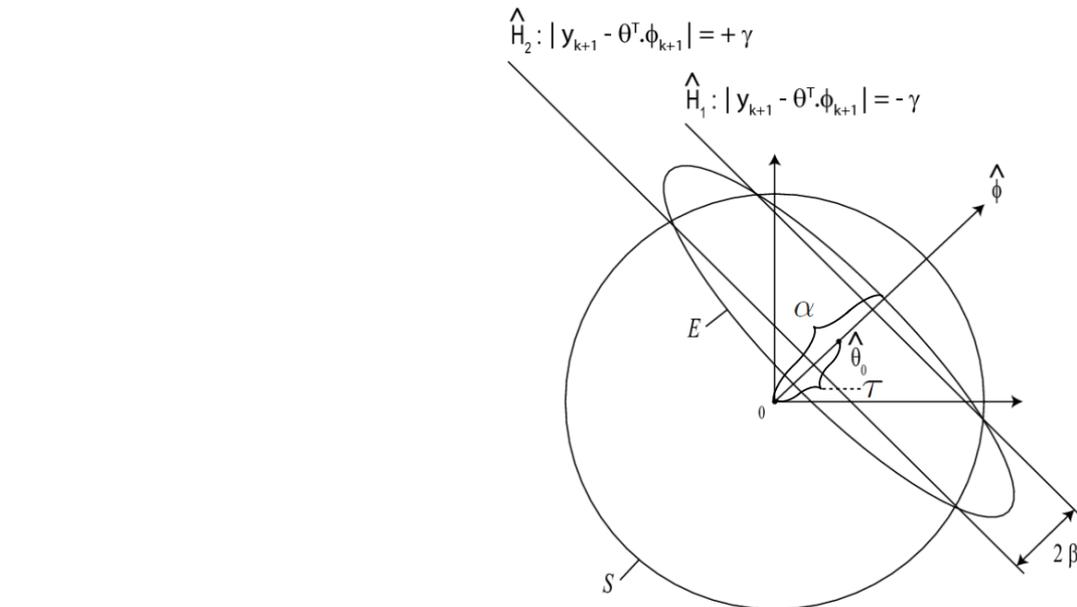


FIGURE 4.6 – Optimisation du volume d'une ellipsoïde par 2 hyperplans.

L'analogie géométrique entre cette illustration et l'exemple 2D présenté plus haut (Fig. 4.3) apparaît clairement. En effet, on retrouve :

- une position initiale, O , et son domaine de confiance associé, S ,
- les contraintes représentant l'espace roulant, \hat{H}_1 et \hat{H}_2 ,
- une position, $\hat{\theta}_O$, et son domaine de confiance associé, E , mis à jour par rapport aux contraintes.

L'objectif consiste donc à déterminer, à partir des grandeurs issues des contraintes de route, les variables d'entrées de l'algorithme OVE : y_k , ϕ_k et γ .

4.3.1 Définition de l'espace roulant

La modélisation élémentaire d'un sous-élément d'un réseau routier est la polyligne. La construction d'un espace roulant adapté à une localisation 3D par identification à erreur bornée et tenant compte de l'imprécision de la connaissance des attributs du réseau routier (coordonnées des sommets, taille de la route, ...) se déroule donc de la manière suivante :

- un sous-élément du réseau routier, appelé segment de route et noté S_i , est défini par les coordonnées 3D de ces sommets (E_i , B_i) et sa longueur L_i (Fig. 4.7) ; la pente moyenne est donc connue,
- le rectangle R_i (Fig. 4.7), est obtenu par la connaissance de l'attribut de largeur de route l_i (grandeur majorant la largeur réelle) et de dévers moyen,
- le parallélépipède rectangle P_i (Fig. 4.7), a pour plan médiant le rectangle R_i et est déduit de l'imprécision sur l'altitude des coordonnées de S_i , s'apparentant à une hauteur h_i .

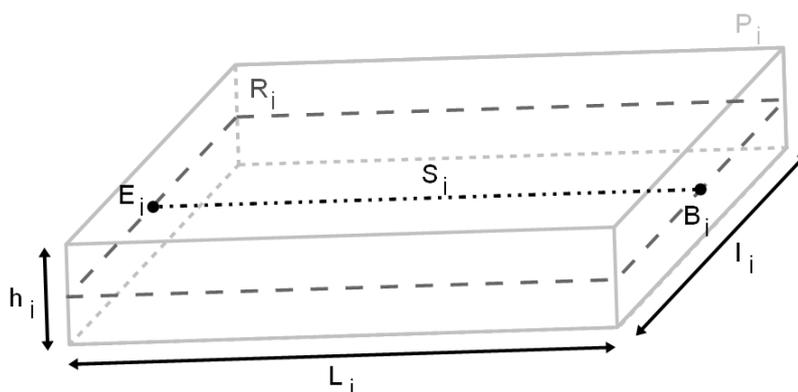


FIGURE 4.7 – Définition de la modélisation de l'espace roulant à partir d'un segment de route.

A partir de ce parallélépipède, on peut différencier trois paires de contraintes à partir des six faces du parallélépipède :

- une paire de contraintes, de longueur, définie par les faces ayant pour centre E_i et B_i ,
- une paire de contraintes, de largeur, définie par les faces avant et arrière,
- une paire de contraintes, de hauteur, définie par les faces supérieure et inférieure.

Ces trois paires de plans 3D vont pouvoir être utilisées par l'algorithme OVE pour contraindre la localisation.

4.3.2 Adaptation géométrique

Afin d'adapter l'OVE à un cas géométrique d'identification à erreur bornée, les hyperplans \hat{H}_1 et \hat{H}_2 vont donc être assimilés à deux équations de plan 3D. Ces deux plans sont définis à partir de leur plan parallèle passant par $\hat{\theta}_O$.

$$\begin{cases} a.X + b.Y + c.Z + d = +\gamma \\ a.X + b.Y + c.Z + d = -\gamma \end{cases} \quad (4.1)$$

avec :

- X, Y, Z : les coordonnées 3D de $\hat{\theta}_O$,
- les termes a, b, c forment $\hat{\phi}$, vecteur normal aux hyperplans,
- γ est le paramètre de borne,
- d est donc assimilable à $-y_k$.

4.3.3 Calcul des grandeurs nécessaires à l'OVE

Détermination du vecteur normal

On considère l'équation du plan médiant, soit :

$$a.X + b.Y + c.Z + d = 0 \tag{4.2}$$

Or, la connaissance de l'espace roulant permet d'avoir accès à trois points appartenant à ce plan. En effet, si on traite le cas des contraintes sur la hauteur, ce plan médiant est représenté par le rectangle R_i (Fig. 4.7) dont les points E_i et B_i sont connus. Le troisième point peut être, par exemple, un des sommets du rectangle (obtenu grâce à l'attribut de largeur de route l_i et au dévers moyen).

On peut alors poser :

$$\begin{cases} a.X_i + b.Y_i + c.Z_i + d = 0 \\ a.X_j + b.Y_j + c.Z_j + d = 0 \\ a.X_k + b.Y_k + c.Z_k + d = 0 \end{cases}$$

Afin de ne pas avoir un problème sous-déterminé, une équation de normalisation du vecteur normal est ajoutée. Cette normalisation fait que le point d'arrivée du vecteur appartient au plan.

Le système à résoudre devient :

$$\begin{cases} a.X_i + b.Y_i + c.Z_i + d = 0 \\ a.X_j + b.Y_j + c.Z_j + d = 0 \\ a.X_k + b.Y_k + c.Z_k + d = 0 \\ a^2 + b^2 + c^2 = -d \end{cases}$$

La résolution de ce système permet donc la détermination du vecteur normal $\hat{\phi}$ de composantes a, b, c , et également de d . Les grandeurs ϕ_k et y_k sont ainsi spécifiées.

Détermination des bornes de contraintes

La méthode permettant de déterminer la valeur de γ consiste à exprimer les équations des deux plans 3D (Eq. 4.1), dans un plan 2D (projection sur le plan XY ou XZ ou YZ) et ainsi calculer pour chacun l'ordonnée à l'origine. Il est alors possible de déterminer géométriquement la valeur de γ .

Afin d'illustrer cette opération, prenons l'exemple de la contrainte en largeur projetée sur le plan XY (Fig. 4.8).

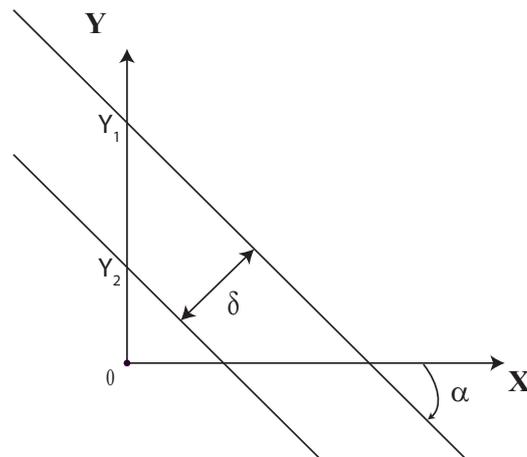


FIGURE 4.8 – Exemple de détermination de γ dans le plan XY

α y représente le cap du segment de route et δ la largeur de la route. En déterminant les ordonnées à l'origine des 2 plans, Y_1 et Y_2 , on va pouvoir exprimer leur différence, et en déduire l'expression γ :

$$Y_1 - Y_2 = \frac{2 \cdot \gamma}{b}$$

D'où :

$$\gamma = \frac{\delta \cdot b}{2 \cdot \cos \alpha} \quad (4.3)$$

Il est à noter que ce résultat ne s'applique qu'aux cas où le vecteur ϕ_k va être quasiment normal à l'axe Z , c'est à dire les plans qui expriment les contraintes de longueur et de largeur. En effet, les routes ayant des pentes et des dévers volontairement limités, dans les cas de contraintes de longueur et de largeur, l'hypothèse que le vecteur ϕ_k est normal à l'axe Z peut être posée.

Concernant la contrainte s'exprimant par rapport à la hauteur, dont les deux plans parallèles sont quasiment normaux à l'axe Z , la détermination doit se faire dans le plan XZ ou YZ .

4.3.4 Les deux étapes du Map Aiding

L'utilisation des données géographiques de la carte numérique est fondée sur l'hypothèse que le véhicule se déplace sur une route dont les spécifications géométriques sont connues et stockées dans le SIG. Dans notre cas, le réseau routier est défini par un graphe dont les arcs sont des segments de route. Chacun des segments de route possède un certain nombre d'attributs (vitesse, nom, ...) et des sommets définis dans un espace 3D. L'utilisation de la base de données géographique se divise en deux étapes :

- i) Map Matching : sélection d'un segment de route,
- ii) mise à jour de la pose du véhicule et de son domaine de confiance.

4.3.4.1 Map Matching - Sélection du segment

Une première requête au SIG permet de ne considérer que les segments de route appartenant à la zone concernée.

La première étape consiste à ne conserver que les segments de route qui intersectent le domaine de confiance courant. Le test d'admissibilité consiste à vérifier l'intersection du domaine de confiance ellipsoïdal avec le parallélépipède. Pour ce faire, nous utilisons un test d'intersection qui est un sous-produit de l'algorithme OVE. Ce test a pour sortie un booléen qui devient faux lorsque l'intersection est vide et vrai dans le cas contraire.

Pour un segment de route \mathcal{S}_i , le test d'admissibilité revient à vérifier que le booléen résultant du test d'intersection est non nul.

Comme le parallélépipède permet de définir trois paires d'hyperplans parallèles et donc de contraintes (Fig. 4.7), l'algorithme OVE peut être utilisé trois fois.

Une liste \mathcal{L} de segments éligibles est ainsi obtenue. Dans cette liste, le segment qui minimise le critère T est sélectionné :

$$T = \lambda_1 \cdot \text{dist}(C_k, \mathcal{S}_i) + \lambda_2 \cdot |\text{Arg}(v) - \text{Arg}(B_i, E_i)|, \quad (4.4)$$

où :

- C_k est défini par le point $\hat{q}_k(1 : 3)$, centre de l'ellipsoïde,
- $\text{dist}(C_k, \mathcal{S}_i)$ est la distance 3D d'un point à un segment,
- le terme $|\psi_k - \text{Arg}(B_i, E_i)|$ est l'erreur d'angle 3D entre le vecteur vitesse de l'état, v , et le segment \mathcal{S}_i ,
- λ_1 et λ_2 sont des termes de pondération.

Les termes λ_1 et λ_2 sont pour l'instant déterminés de manière empirique à partir d'un jeu de données significatif, puis validés à l'aide des autres jeux de données. Une campagne d'acquisitions de données est planifiée dans un futur proche, permettant une détermination optimale des termes de pondération, telle que décrite dans les travaux de Quddus et Velaga [21].

4.3.4.2 Mise à jour de la pose du véhicule et de son domaine de confiance

Une fois le segment sélectionné (et donc le parallélépipède rectangle), et les grandeurs ϕ_k , y_k et γ déterminées pour les plans associés aux contraintes, l'algorithme OVE passe par une série de calcul et de conditions pour mettre à jour l'état et sa matrice de confiance associée.

En effet, cet algorithme permet de calculer non seulement la mise à jour du centre de l'ellipsoïde résultante, c'est à dire le point ayant pour coordonnées les trois premiers termes de l'état, mais également les autres termes. Ainsi, l'état q_k remplace la variable θ_k dans les équations qui vont suivre.

On peut résumer la procédure de mise à jour en trois étapes :

Calcul de α et β

$$\alpha = \frac{y_k + \gamma - \phi_k^T \cdot q_k}{\sqrt{\phi_k^T \cdot \phi_k}} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\gamma}{\sqrt{\phi_k^T \cdot \phi_k}}.$$

Il est à noter que les cas particuliers où, un des deux hyperplans n'intersectent pas S , et où, aucun des deux hyperplans intersectent S , sont traités afin de se ramener au cas nominal : les deux hyperplans intersectent S .

Calcul de δ , σ et τ

Le calcul de ces valeurs dépend d'une condition sur α et β :

- si $\alpha \neq \beta$, cas classique,
- τ est la solution réelle de :

$$(N+1) \cdot \tau^2 + \left(\frac{(1+\alpha) \cdot (\alpha - 2\beta + 1)}{\beta - \alpha} + 2[N \cdot (\beta - \alpha) + 1] \right) \cdot \tau + N \cdot \alpha(\alpha - 2\beta) + 1 = 0,$$

$$- \sigma = \frac{(\tau + 1)^2 \cdot (\beta - \alpha) - \tau(1 + \alpha) \cdot (2\beta - \alpha - 1)}{\tau + \beta - \alpha},$$

$$- \delta = \frac{-\tau}{\beta - \alpha}.$$

- si $\alpha = \beta$, cas particulier où $\tau = 0$, (voir conséquence en figure 4.6)

$$- \sigma = \frac{N}{N-1} \cdot (1 - \beta^2),$$

$$- \delta = \frac{1 - N \cdot \beta^2}{1 - \beta^2}.$$

- avec N qui correspond à la dimension de l'état.

Mise à jour

Le résultat de l'algorithme donne alors :

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \frac{\tau \cdot \mathbf{P}_k \cdot \phi_k}{\sqrt{\phi_k^T \cdot \mathbf{P}_k \cdot \phi_k}}. \quad (4.5)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \delta \left(\mathbf{P}_k - \sigma \cdot \frac{\mathbf{P}_k \cdot \phi_k \cdot \phi_k^T \cdot \mathbf{P}_k}{\phi_k^T \cdot \mathbf{P}_k \cdot \phi_k} \right). \quad (4.6)$$

4.3.5 Algorithme de Map Aiding

Cet algorithme peut être couplé de différentes manières avec l'algorithme 2 ou l'algorithme 3 (également possible avec l'algorithme 1) :

- de manière séquentielle, après la prédiction ou après la fusion avec les informations satellitaires,
- de manière événementielle, que ce soit au bout d'une certaine distance parcourue ou au bout d'un certain laps de temps écoulé par exemple.

Dans tous les cas, lorsqu'il est appelé, il a pour entrées l'état courant et sa matrice de covariance.

Algorithm 4 : Map Aiding par OVE

Choix du segment de route

o Recherche des segments intersectant le domaine de confiance : \mathcal{L} ;

for all segments de \mathcal{L} **do**

o Calcul du critère de sélection, Eq. 4.5 : T ;

end for

o Sélection du segment minimisant le critère T : S_{choisi}

Mise à jour

o Mise à jour de l'estimation d'état, Eq. 4.5 : $\hat{\mathbf{q}}_{k|k}$;

o Mise à jour de la covariance de l'erreur d'estimation, Eq. 4.6 : $\mathbf{P}_{k|k}$;

4.4 Rappel de l'approche globale

Le processus proposé s'appuie donc sur trois sources (Fig. 4.9) :

- des informations proprioceptives, qui alimentent le processus de prédiction proprioceptive (ou localisation à l'estime),

- des informations satellitaires, fusionnées par couplage lâche ou couplage serré,
- des informations cartographiques, qui permettent, via l'algorithme OVE, de réaliser le Map Aiding.

Et ses sorties sont :

- \mathbf{q} , l'état (ou la pose) du véhicule, défini au minimum par les coordonnées 3D de l'origine du repère véhicule, \mathbf{M} , ainsi que par les angles d'attitude,
- \mathbf{P} , la matrice de confiance associée, qui permet de déterminer le domaine de confiance de la localisation.

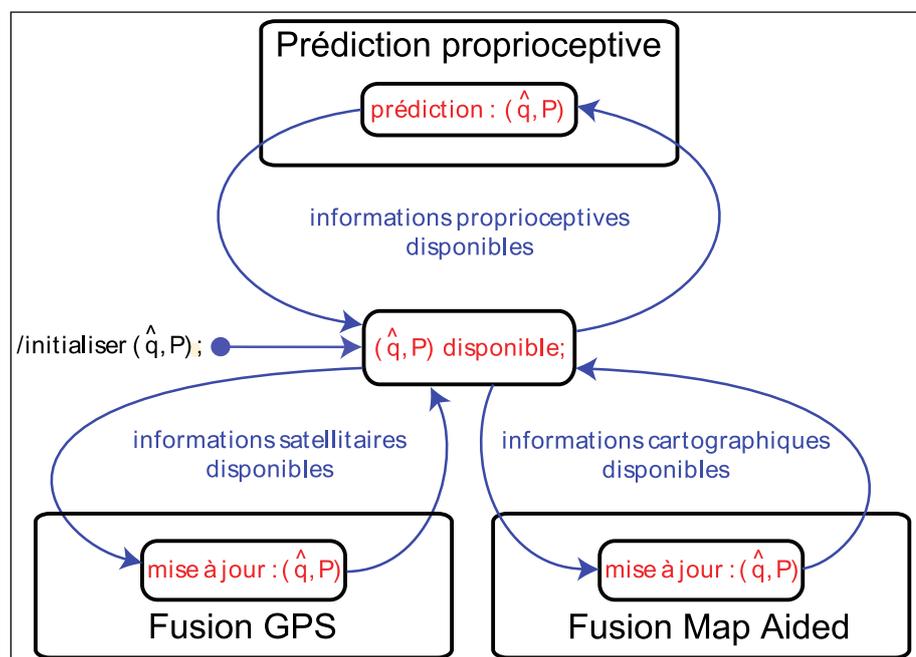


FIGURE 4.9 – Diagramme d'état de la fusion de données (stateflow machine).

4.5 Résultats

4.5.1 Couplage lâche, odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding

4.5.1.1 Jeu de données de Limoges

Les résultats obtenus sur le site de Limoges (Figs. 4.10 et 4.11) donnent un bon aperçu de l'amélioration apportée par le Map Aiding.

L'apport le plus flagrant concerne l'estimation de l'altitude qui, contrairement aux

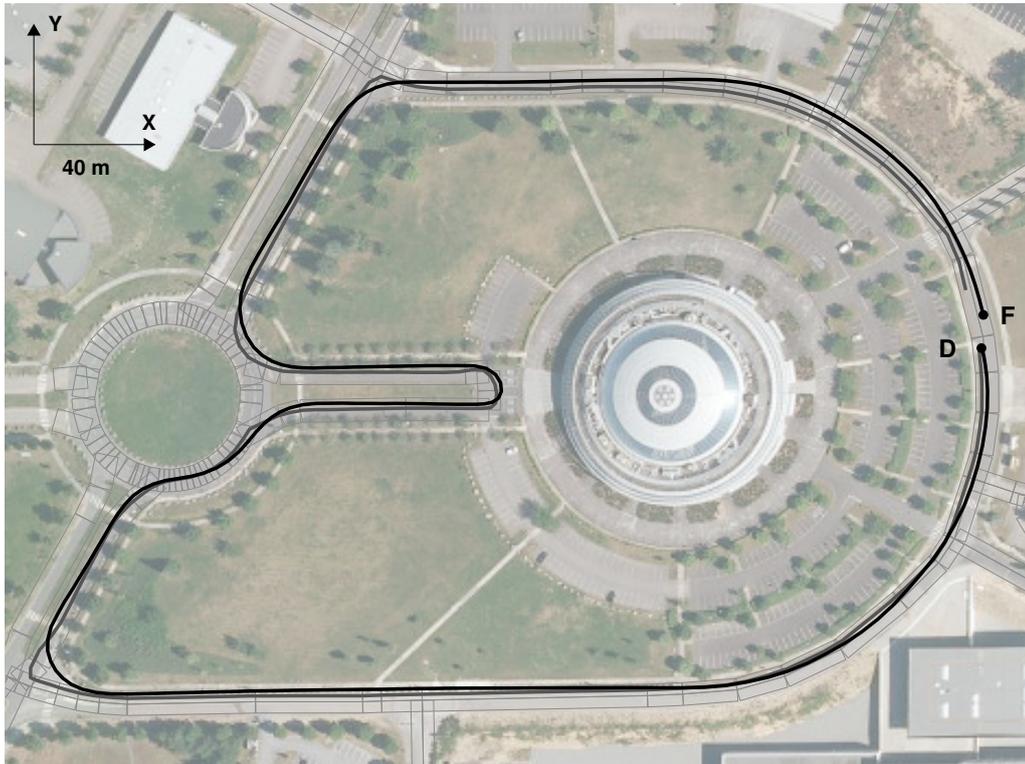


FIGURE 4.10 – Localisation obtenue par couplage lâche, soit odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

résultats précédents, suit de manière très proche le profil de la route.

Quelques défauts de trajectoire apparaissent sur la vue 2D. Ces écarts sont dûs en grande partie à la modélisation approximative de la route. En effet, la modélisation de l'espace roulant sur ce site n'était pas disponible (contrairement au jeu de données de Paris) ce qui peut engendrer des imperfections néfastes au Map Aiding notamment au niveau des transitions.

Le tracé de l'évolution du volume du domaine de validité (Fig. 4.12) confirme que l'utilisation des contraintes cartographiques permet également d'augmenter la confiance en l'estimation.

Les domaines de confiance résultants sont fortement liés aux dimensions des parallélépipèdes rectangles qui modélisent l'espace roulant. Ainsi, plus la confiance en la connaissance de l'espace roulant est forte, plus les domaines de confiance diminuent.

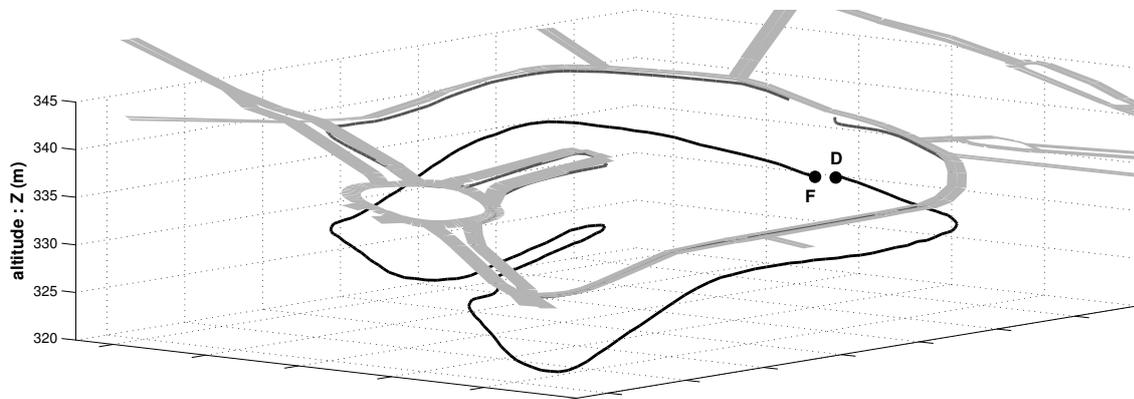


FIGURE 4.11 – Localisation obtenue par couplage lâche, soit odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

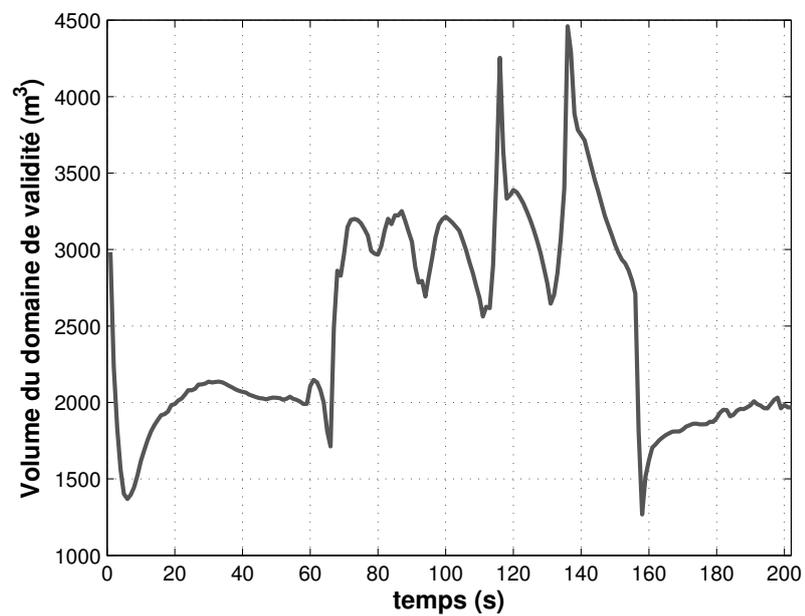


FIGURE 4.12 – Volume du domaine de validité.

4.5.1.2 Jeu de données de Paris

Les résultats 2D et 3D introduits dans cette section (Figs. 4.13 et 4.14) confirment parfaitement l'apport du Map Aiding concernant la localisation. Il reste à valider cette impression grâce aux courbes de fonctions de distribution cumulées de l'erreur de position.

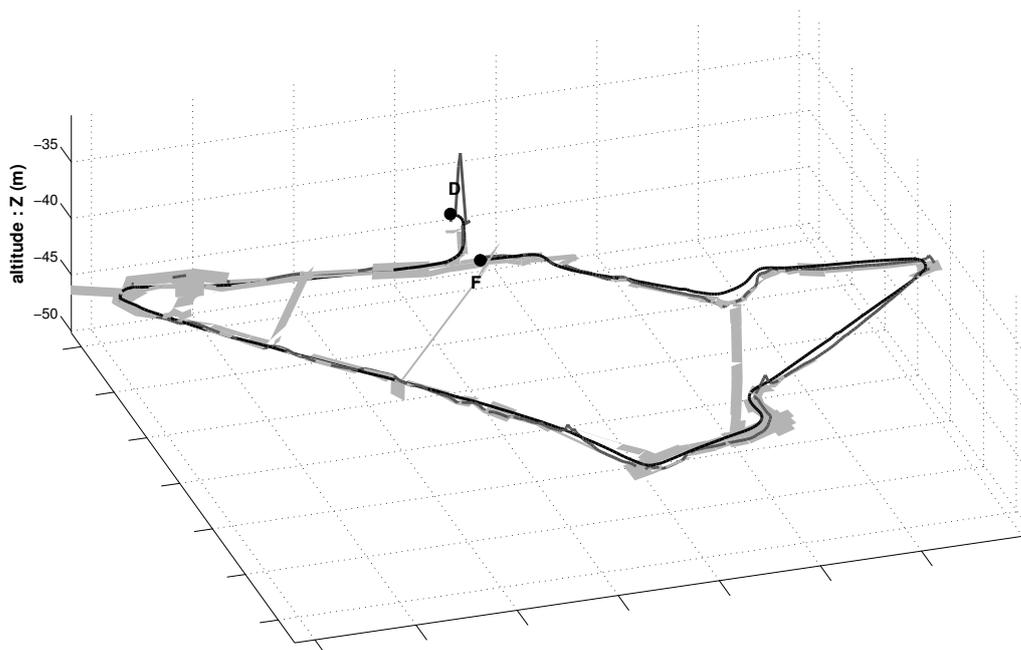


FIGURE 4.14 – Localisation obtenue par couplage lâche, soit odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

Les figures 4.15 et 4.16 permettent de valider les premières impressions. Les erreurs de position en 2D ont sensiblement diminué, mais c'est surtout les erreurs en 3D qui ont fortement chuté. En effet, en étudiant de près ces résultats, il apparaît que les fonctions de distribution cumulées de l'erreur de position en xy et en xyz sont quasiment identiques, attestant que l'ajout de contraintes cartographiques a fortement amélioré l'estimation de l'altitude.

De la même manière que pour les résultats obtenus sur Limoges, la diminution du volume du domaine de validité, et par conséquent l'augmentation de la confiance en l'estimation de la position, sont illustrées par la figure 4.17.

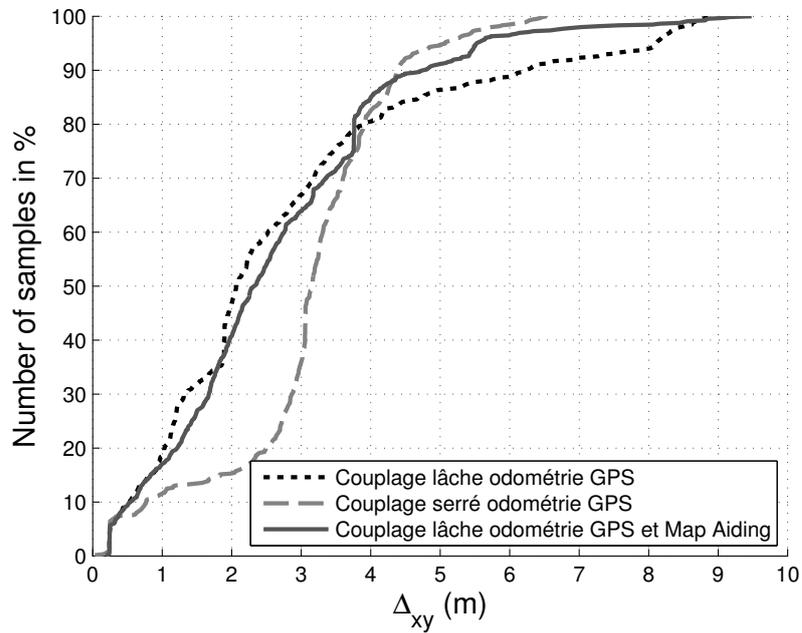


FIGURE 4.15 – Couplage lâche, odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xy .

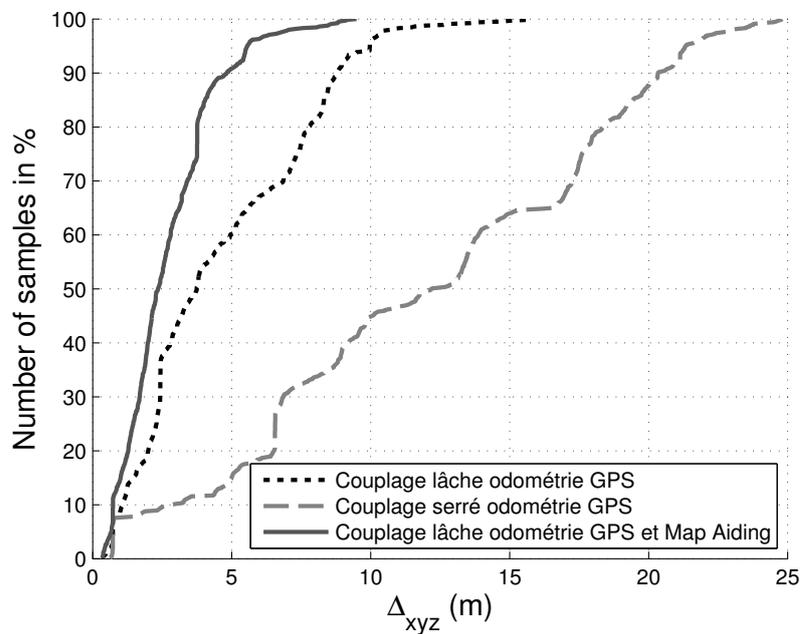


FIGURE 4.16 – Couplage lâche, odométrie et mesures GPS trame GGA, et Map Aiding - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xyz .

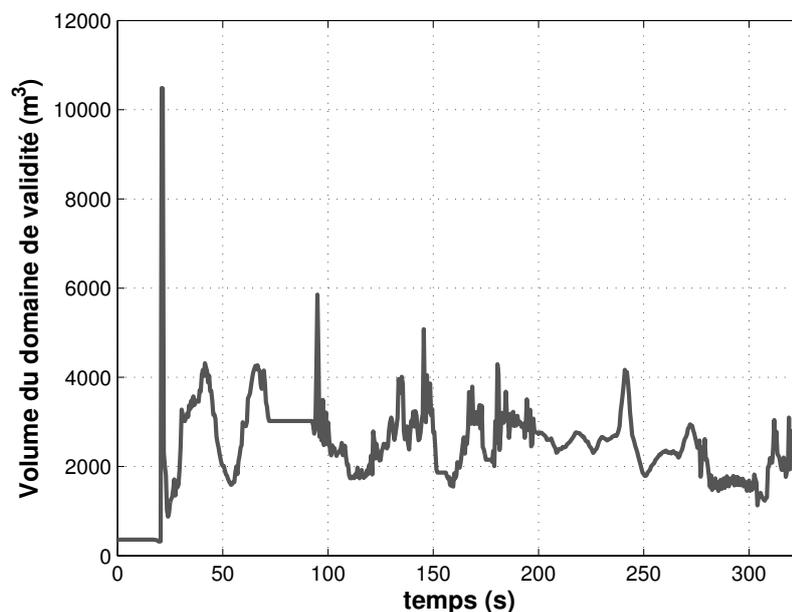


FIGURE 4.17 – Volume du domaine de validité.

4.5.2 Couplage serré, odométrie et mesures GPS de pseudodistances et de Doppler, et Map Aiding

4.5.2.1 Jeu de données de Limoges

Les résultats obtenus sur Limoges, illustrés par la trajectoire obtenue (Figs. 4.18 et 4.19), sont quasiment identiques que ceux du paragraphe précédent. Il confirme l'apport important du Map Aiding, notamment concernant l'estimation de l'altitude.

La figure 4.20 quand à elle, présente l'évolution du volume du domaine de validité et permet de démontrer de nouveau que le processus de Map Aiding augmente la confiance en l'estimation.

Toutefois, il est difficile, sans référence à disposition, de comparer plus précisément les résultats obtenus par les approches "couplage lâche et Map Aiding" et "couplage serré et Map Aiding".

Avant de passer aux résultats sur le site de Paris, étant donné que cette méthode fournit une bonne estimation de l'altitude, condition nécessaire à l'observabilité de l'état, intéressons nous au tracé de l'estimation des angles d'attitude (Fig. 4.27).

Tout d'abord, la simple comparaison entre l'estimation de ψ et la trajectoire en 2D vérifie la bonne estimation de cette angle. Pour ce qui est des deux autres angles, l'analyse est moins évidente. Cependant, le fait que les valeurs soient faibles est un point positif.

Là encore l'absence d'une référence afin d'affiner les analyses est pénalisante.



FIGURE 4.18 – Localisation obtenue par couplage serré odométrie GPS et Map Aiding (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Projection sur le plan XY - Rectangles gris : modélisation du réseau routier.

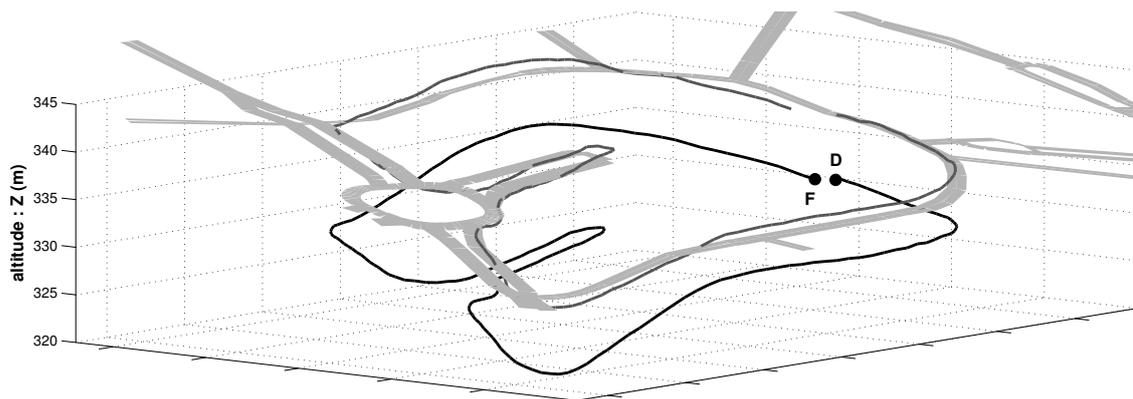


FIGURE 4.19 – Localisation obtenue par couplage serré odométrie GPS et Map Aiding (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par le récepteur GPS (en noir - trame GGA) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

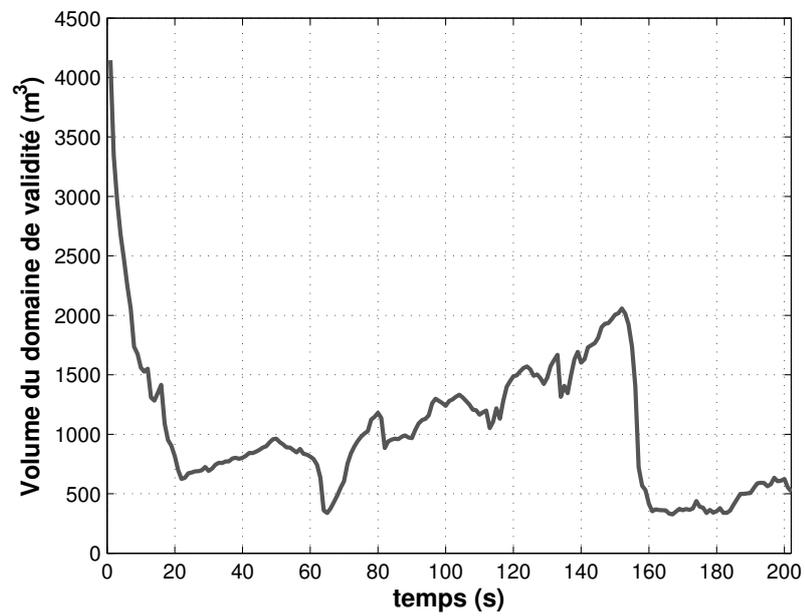


FIGURE 4.20 – Volume du domaine de validité.

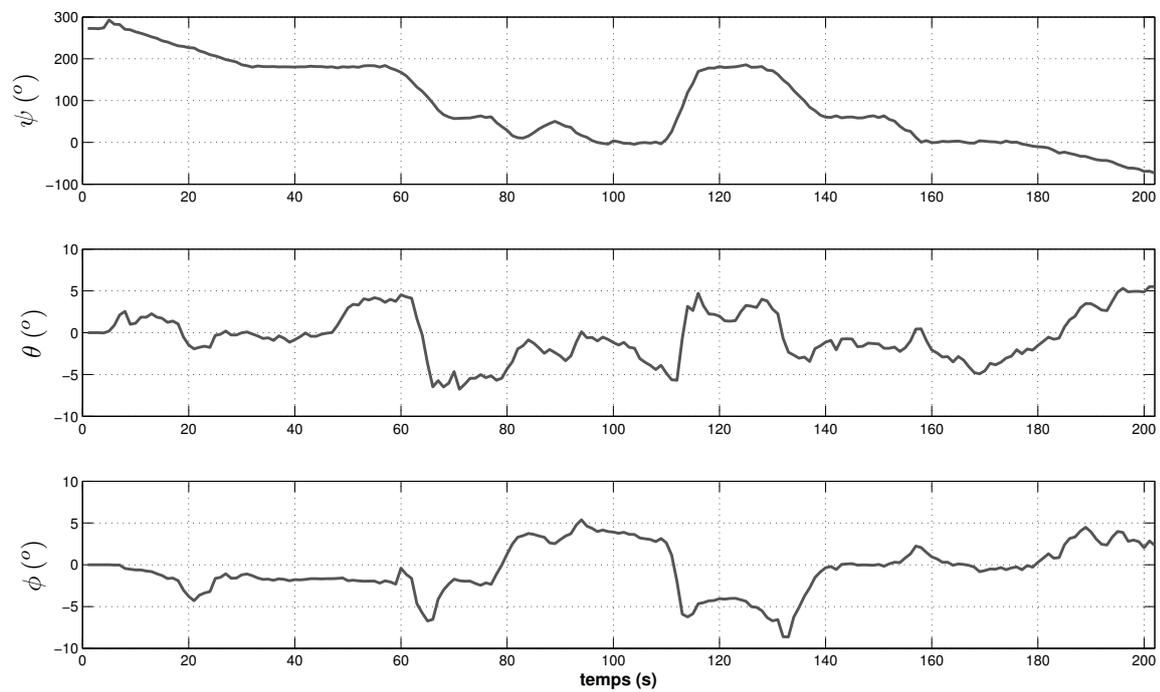


FIGURE 4.21 – Couplage serré odométrie GPS et Map Aiding - Tracé temporelle de l'estimation des angles d'attitude.

4.5.2.2 Jeu de données de Paris

L'ensemble des résultats présentés dans ce paragraphe corroborent parfaitement toutes les observations et analyses précédentes.

La trajectoire obtenue (Figs. 4.23 et 4.22) donne en effet une impression de bonne précision de l'estimation de la position que ce soit en 2D ou en 3D.

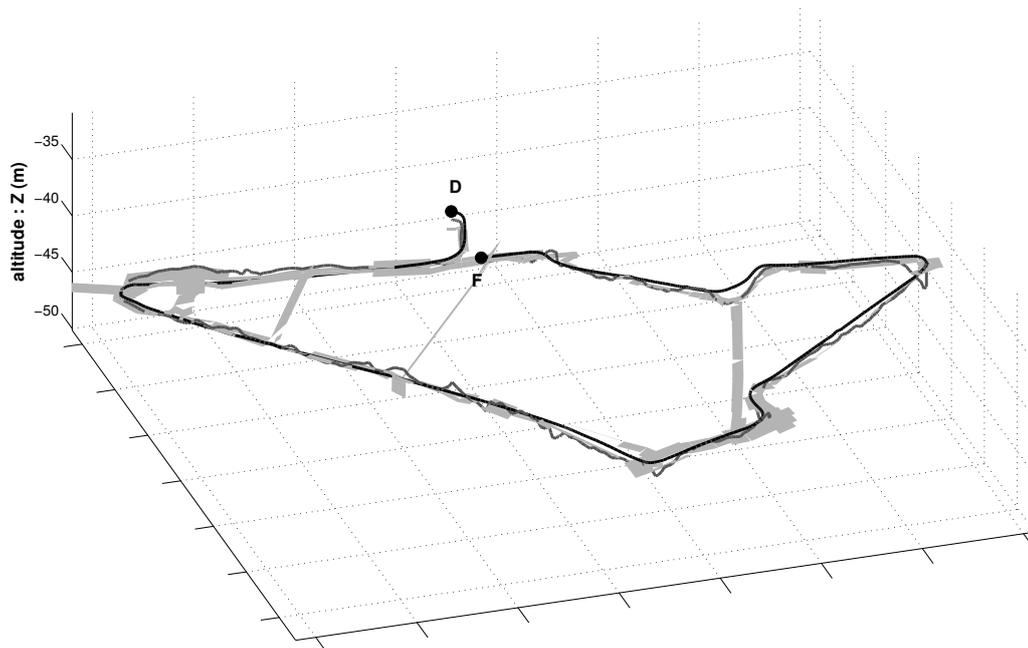


FIGURE 4.22 – Localisation obtenue par couplage serré odométrie GPS et Map Aiding (en gris foncé) - Comparaison avec la localisation fournie par la référence centrale inertielle LandINS (en noir) - Modélisation du réseau routier en gris clair.

Ceci est confirmé par les tracés des fonctions de distribution cumulés de l'erreur de position (Figs. 4.24 et 4.25). Ces deux figures attestent que cette solution basée sur l'alliance d'un couplage serré et du Map Aiding fournit l'estimation de position la plus précise et laisse entrevoir des résultats encore plus intéressants lorsque les études nécessaires à l'optimisation des paramètres auront été menées (que ce soit les paramètres concernant le couplage serré ou ceux concernant le Map Aiding).

En analysant l'évolution du volume du domaine de validité (Fig. 4.26), on se rend rapidement compte que le gain de confiance par rapport à la solution "couplage lâche et Map Aiding" n'est pas évident. Cette observation ainsi que l'allure quelque peu chaotique démontre une nouvelle fois qu'une optimisation apporterait sans doute une meilleure efficacité de l'algorithme.

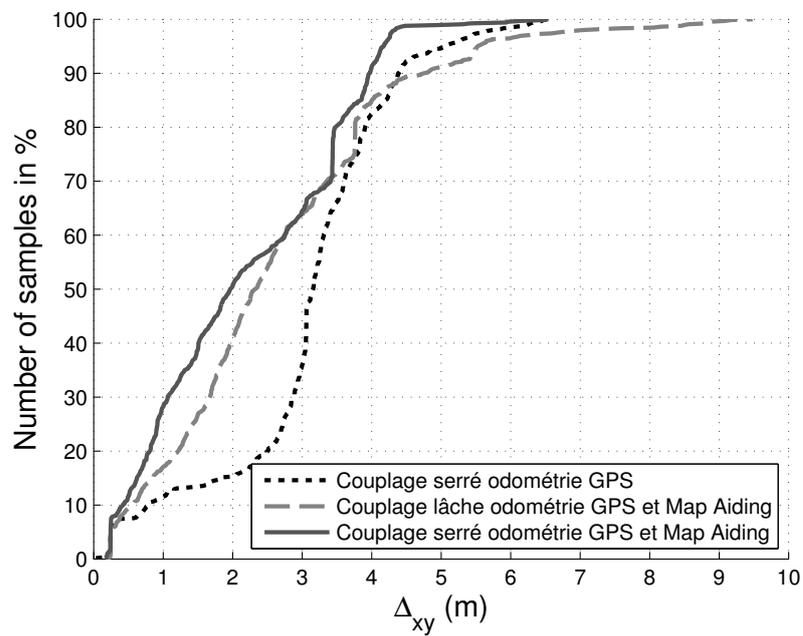


FIGURE 4.24 – Couplage serré odométrie GPS et Map Aiding - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xy .

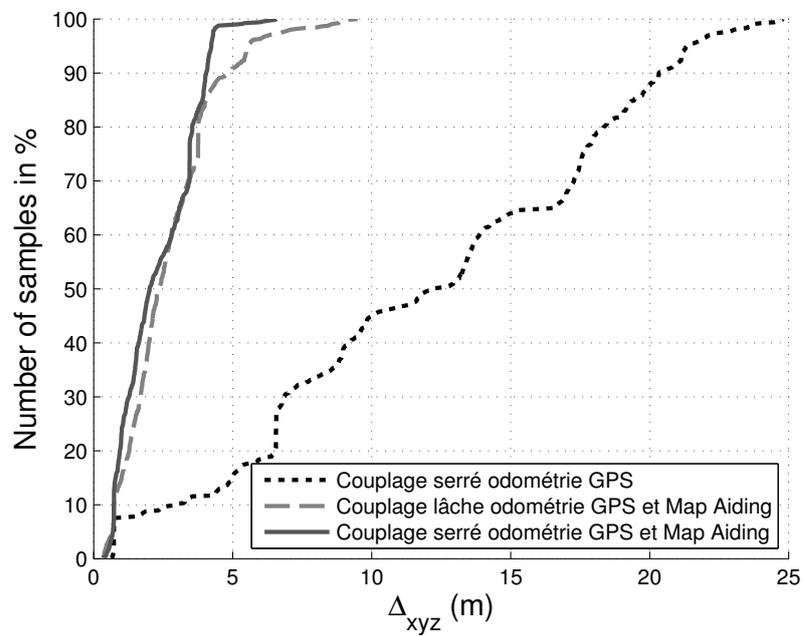


FIGURE 4.25 – Couplage serré odométrie GPS et Map Aiding - Fonction de distribution cumulée de l'erreur de position en xyz .

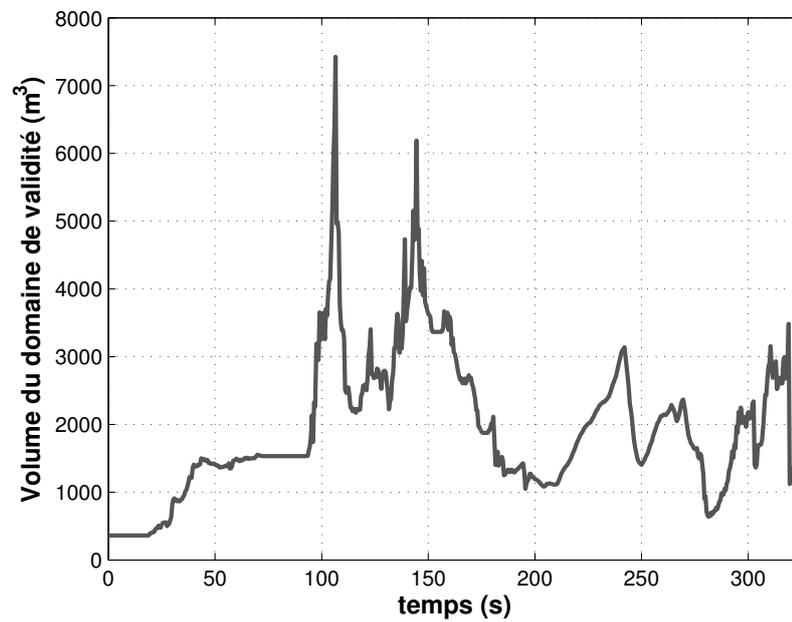


FIGURE 4.26 – Volume du domaine de validité.

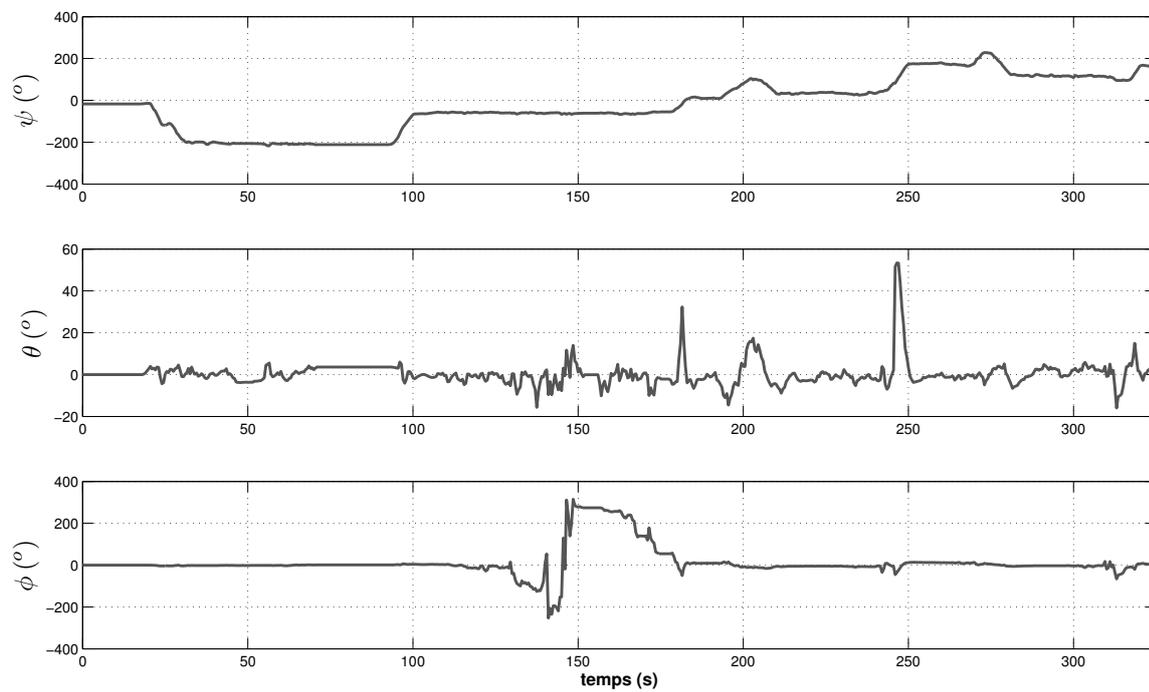


FIGURE 4.27 – Couplage serré odométrie GPS et Map Aiding - Tracé temporelle de l'estimation des angles d'attitude.

Enfin, le tracé temporelle de l'estimation des angles d'attitude (Fig. 4.27), consolide le fait que l'estimation de l'angle de cap est très satisfaisante. Cependant, le tracé de l'évolution de l'estimation des angles de pente et de dévers n'est pas concluant. En effet, alors que les voies utilisées au cours de cette essais présentent très peu de pente et de dévers, les estimations de ces angles font état de forte valeurs assez inexplicables.

Une éventuelle piste enfin de solutionner ce problème d'estimation serait d'utiliser l'algorithme OVE afin de contraindre les angles d'attitude.

4.6 Conclusion

Ce dernier chapitre a introduit la dernière étape du processus globale de localisation par fusion de donnée proposée dans ce rapport, le Map Aiding par OVE.

Cette technique permet de se servir de la modélisation du réseau routier pour contraindre à la fois l'état et sa matrice de covariance associée. Il en découle une amélioration de la localisation et une diminution des domaines de confiance.

Les résultats démontrent que son association avec le couplage lâche odométrie GPS compense les lacunes du couplage lâche seul. En effet, malgré les fortes dégradations des signaux GPS sur les données de Paris (notamment en Z), la trajectoire obtenue colle quasiment parfaitement au profil de la route. Les objectifs fixés en début de thèse sur cette méthode sont donc atteints.

L'algorithme final, alliant couplage serré et Map Aiding, répond également aux attentes. Les principaux avantages des différentes méthodes de localisation liées aux différentes informations disponibles se retrouvent dans cette approche. Une caractérisation des mesures dans un environnement type canyon urbain permettrait de régler plus finement cette méthode et d'obtenir de meilleurs résultats.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été réalisés grâce au logiciel Matlab. L'algorithme de couplage lâche odométrie GPS et Map Aiding a été implémenté et validé en temps réel sur le véhicule VERT lors des expérimentations finales du projet CityVIP. L'algorithme final a été validé en rejeu de données temps réel.

Conclusion générale

Conclusions

Ce mémoire de thèse a traité du développement d'une méthode de localisation 3D de mobile en milieu urbain par fusion d'informations satellitaires, proprioceptives et cartographiques.

Dans le premier chapitre, l'intention était de présenter ces trois types d'informations et d'étudier les méthodes de localisation qu'elles permettent de réaliser. L'analyse de ces méthodes a permis de mettre en exergue leurs qualités et leurs défauts. Il est apparu que les méthodes de localisation à l'estime, bien qu'idéales pour traiter des problèmes dynamiques, dérivent trop lors de longs trajets et ne sont pas assez robustes à de mauvaises mesures. De la même manière, la localisation par satellite, qui a l'énorme avantage de délivrer une localisation absolue, est fortement dégradée lors d'évolution dans des configurations type canyon urbain, allant même jusqu'à l'impossibilité de se localiser. Enfin, les méthodes de Map Aiding, reposant sur des informations cartographiques, ont pour seuls inconvénients de dépendre de la précision de la modélisation du réseau routier, et surtout de ne pas être autonomes. Il semble donc pertinent de fusionner ces informations pour profiter de l'ensemble de leurs avantages et atténuer leurs inconvénients.

Le deuxième chapitre aborde la partie localisation à l'estime du processus de fusion. Le modèle cinématique du véhicule est donc explicité et permet de définir un modèle de progression 3D. Les résultats obtenus par cette prédiction proprioceptive, présentant les défauts évoqués plus haut, valident une base de travail de bonne qualité en vue de la fusion avec les autres informations.

Le troisième chapitre a proposé la fusion des informations proprioceptives et satellitaires. Cette fusion est possible selon deux procédés, le couplage lâche et le couplage serré. Le couplage lâche permet une mise en œuvre relativement simple de la fusion en utilisant un filtrage de Kalman étendu. Les résultats confirment l'intérêt de faire collaborer ces deux types d'informations. Néanmoins, la non maîtrise du calcul de position du récepteur reste un point bloquant lors d'essais en environnement urbain. Le couplage serré, malgré la complexité de sa mise en œuvre et de son paramétrage, offre des garanties en termes de précision et de fiabilité bien plus convaincantes. Cependant, quelque soit le procédé utilisé, les résultats soulignent que cette fusion est insuffisante pour compenser les dégradations engendrées par les canyons urbains (notamment en terme d'altitude).

Le dernier chapitre a présenté les choix faits et l'algorithme retenu, l'OVE, pour réaliser le Map Aiding. L'analogie géométrique avec notre problème et la modélisation de l'espace roulant sous forme de parallélépipèdes rectangles se sont avérées des décisions pertinentes afin de contraindre la zone de confiance liée à la localisation du véhicule. Les

résultats proposés dans ce dernier chapitre ont été obtenues avec différentes versions (une avec couplage lâche, l'autre avec couplage serré) de la méthode de localisation la plus complète, intégrant odométrie, GPS et Map Aiding ensembliste. Ils attestent de la qualité de la localisation à la fois en précision et en fiabilité.

Cette dernière méthode (version en couplage lâche) a été éprouvée en condition temps réel sur le véhicule VERT de l'IFSTTAR lors des expérimentations finales du Projet CityVIP. Elle a permis la localisation temps réel du véhicule en continu durant trois heures sur une vingtaine de boucles (soit environ 20 km) autour de la mairie du XII^{ème} arrondissement de Paris. La version couplage serré à quand à elle était validée lors d'un jeu de données temps réel correspondant à un parcours d'environ 2km (10 minutes) également autour de la mairie du XII^{ème} arrondissement de Paris.

Perspectives

Pistes de perfectionnement de la méthode

La première piste consiste à effectuer dans les semaines qui viennent une série d'essais dans diverses conditions de visibilité satellitaires caractéristiques de l'environnement urbain. Cela permettra, d'une part une meilleure évaluation de la qualité des mesures de pseudodistances et de Doppler en approfondissant l'étude statistique présentée en annexe. D'autre part, cela permettra d'optimiser le choix des termes de pondérations utilisés pour la sélection du segment de route lors du Map Matching.

Des améliorations à plus long termes sont également envisagées. Actuellement, la méthode repose sur la collaboration de deux types d'approches mathématiques, d'une part, le filtrage de Kalman, s'appuyant sur des hypothèses d'erreurs à distributions gaussiennes et d'autre part, l'OVE soit une approche ensembliste.

L'étude d'une solution entièrement par approche ensembliste, concordant tout à fait à la problématique de cette thèse, est sans doute une piste pertinente à expérimenter.

Enfin, un aspect qui n'est pas traité dans ce rapport et qui permettrait d'augmenter fortement la robustesse de la méthode, est l'approche multi-hypothèse. Cette approche, particulièrement adaptée au Map Aiding, permet de gérer les situations ambiguës. En effet, au lieu de prendre une décision définitive à l'instant t , la stratégie de cette approche consiste à conserver les différentes solutions possibles et de les propager à l'étape suivante afin de suivre leur évolution en fonction des nouvelles observations.

Développement d'une plate-forme temps réel

Actuellement, le véhicule PRISM est capable d'effectuer des acquisitions synchronisées des données nécessaires à la méthode de localisation. Par contre, il ne permet pas le traite-

ment temps réel de ces informations. Même si ce fonctionnement suffit à valider l'efficacité des algorithmes, il reste difficile d'estimer si le coût de calcul est compatible avec un traitement temps réel.

C'est pourquoi, des actions vont prochainement être menées afin d'embarquer les méthodes de localisations développées dans le cadre de cette thèse et de les rendre fonctionnelles en temps réel. L'équipe possédera alors une plate-forme permettant d'exploiter pleinement ses travaux. De plus, une fois ce projet finalisé, le démonstrateur résultant pourra être une source de valorisation notable.

Collaborations

Le tri des satellites lors du processus de calcul de localisation par les RAW DATA est réalisé selon un critère de rapport signal à bruit. En effet, cette information s'avère être une image relativement juste de la pertinence d'utiliser ou non les données d'un satellite. Plutôt efficace pour filtrer les satellites rasants, cette technique reste cependant vulnérable aux phénomènes de multi-trajet pouvant faire croire qu'un satellite est en vue direct.

Afin d'optimiser ce tri, une collaboration au sein du projet CityVIP s'est développée avec le groupe Géolocalisation du département Mesure Auscultation et Calcul Scientifique (MACS) du centre IFSTTAR de Nantes. En effet, cette équipe a développé une méthode permettant de détecter les satellites NLOS (Non Line Of Sight) [30], c'est-à-dire n'étant pas en vue direct.

L'intégration de cette méthode à nos algorithmes a déjà permis une contribution scientifique [2], et les prochaines suites de cette collaboration devraient aboutir à une solution de localisation encore plus performante.

De la même manière, une collaboration avec le groupe GRAVIR (GRoupe Automatique, VIsion et Robotique) du LASMEA (LABoratoire des Sciences et Matériaux pour l'Électro-nique et d'Automatique) de Clermont-Ferrand aborde la problématique de la fusion de la méthode de localisation présentée dans ce rapport et de la méthode de localisation par vision développée par ce groupe.

Cette méthode de localisation repose sur un asservissement visuel (par suivi de points d'intérêts) basé sur la comparaison entre l'image courante acquise par une caméra et les images clés de la mémoire visuelle, acquises au préalable [31].

Les premières étapes de cette collaboration ont permis d'améliorer la robustesse de la localisation par vision face au brusque changement de luminosité. Néanmoins, il reste un travail conséquent dans le but de fusionner de manière pertinente et efficace ces deux méthodes.

Bibliographie

- [1] D. MEIZEL, S. PEYRAUD et S. RENAULT, « Un observateur non linéaire découplé pour estimer l'attitude 3d d'un véhicule », *in Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA)*, (Grenoble, France), Juillet 2012.
- [2] D. BÉTAILLE, S. PEYRAUD, F. MOUGEL, S. RENAULT, M. ORTIZ, D. MEIZEL et F. PEYRET, « Using road constraints to progress in real time nlos detection », *in IEEE Symposium on Intelligent Vehicles (IV)*, (Alcalá de Henares, Spain), June 2012.
- [3] S. PEYRAUD, S. RENAULT et D. MEIZEL, « 3d localization and map matching of urban vehicles », *in MECATRONICS*, (Yokohama, Japon), Novembre 2010.
- [4] S. PEYRAUD, S. RENAULT et D. MEIZEL, « Localisation 3d d'un véhicule en milieu urbain par map matching », *in Journées Doctorales et Nationales du GDR MACS*, (Marseille, France), Juin 2011.
- [5] E. D. KAPLAN et C. HEGARTY, édés, *Understanding GPS : Principles and Applications, Second Edition*. Artech House, November 2005.
- [6] V. DREVELLE, *Étude de méthodes ensemblistes robustes pour une localisation multi-sensorielle intégrée. Application à la navigation des véhicules en milieu urbain*. Thèse doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Décembre 2011.
- [7] Global Positioning System Directorate, Systems Engineering and Integration, *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces - Interface Specification IS-GPS-200F*, September 2011.
- [8] W. GURTNER, « Rinex : The receiver independent exchange format version 2.10 ». <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex210.txt>, December 2007.
- [9] u-blox AG, « Antaris positioning engine protocol specification ». [http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/ANTARIS_Protocol_Specification\(GPS.G3-X-03002\).zip](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/ANTARIS_Protocol_Specification(GPS.G3-X-03002).zip), 2003.
- [10] S. PETERS et K. IAGNEMMA, « Stability measurement of high-speed vehicles. », *Vehicle System Dynamics*, vol. 47, no. 6, p. 701–720, 2009.
- [11] R. LENAIN, B. THUILOT, C. CARIOU et P. MARTINET, « High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding : Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks. », *Autonomous Robots*, vol. 21, p. 79–97, August 2006.
- [12] A. KELLY, « A 3d space formulation of a navigation kalman filter for autonomous vehicles », rap. tech., Robotics Institute, Pittsburgh, PA, May 1994.
- [13] T. HOWARD et A. KELLY, « Optimal rough terrain trajectory generation for wheeled mobile robots. », *International Journal of Robotics Research*, vol. 26, p. 141–166, February 2007.
- [14] P. BONNIFAIT, *Localisation précise en position et attitude des robots mobiles d'extérieur à évolutions lentes*. Thèse doctorat, École Centrale de Nantes, Novembre 1997.

- [15] P. BONNIFAIT, P. BOURON, P. CRUBILLE et D. MEIZEL, « Data fusion of four abs sensors and gps for an enhanced localization of car-like vehicles, », in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, vol. 2, p. 1597–1602, May 2001.
- [16] A.-M. DESODT-LEBRUN, « Fusion de données. », *Techniques de l'ingénieur, Informatique industrielle*, vol. S1, no. R7226, p. 1–9.
- [17] N. DRAWIL et O. BASIR, « Emerging new trends in hybrid vehicle localization systems. », *Global Navigation Satellite Systems : Signal, Theory and Applications*, p. 279–298, February 2012.
- [18] R. E. KALMAN, « On the general theory of control systems. », in *First Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC)*, vol. 1, (Moscow, URSS), p. 481–492, 1960.
- [19] R. E. KALMAN, « A new approach to linear filtering and prediction problems. », *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. Series D, p. 35–45, 1960.
- [20] M. A. QUDDUS, W. Y. OCHIENG et R. B. NOLAND, « Current map-matching algorithms for transport applications : State-of-the art and future research directions. », *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 15, no. 5, p. 312–328, 2007.
- [21] N. VELAGA, M. QUDDUS et A. BRISTOW, « Developing an enhanced weight-based topological map-matching algorithm for intelligent transport systems. », *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 17, p. 672–683, March 2009.
- [22] V. DREVELLE et P. BONNIFAIT, « A set-membership approach for high integrity height-aided satellite positioning », *GPS Solutions*, vol. 15, p. 357–368, September 2011.
- [23] R. TOLEDO-MOREO, D. BETAÏLLE et F. PEYRET, « Lane-level integrity provision for navigation and map matching with gnss, dead reckoning, and enhanced maps. », *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, p. 100–112, March 2010.
- [24] L. LI, M. A. QUDDUS et L. ZHAO, « High-accuracy tightly coupled integrity monitoring algorithm for map-matching », in *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, (Washington DC, USA), January 2012.
- [25] S. RENAULT et D. MEIZEL, « Gps/gis localization using a set membership method, », in *IEEE Digital Signal Processing Workshop, 12th - Signal Processing Education Workshop, 4th*, p. 168–172, September 2006.
- [26] E. WALTER et H. PIET-LAHANIER, « Estimation of parameter bounds from bounded-error data : a survey. », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 32, p. 449–468, December 1990.
- [27] S. RENAULT, *Application de l'automatique au contrôle actif d'écoulements pulsés*. Thèse doctorat, Université de Poitiers, Février 1998.
- [28] M.-F. CHEUNG, *On optimal algorithms for parameter set estimation*. Thèse doctorat, Ohio State University, December 1991.
- [29] M. F. CHEUNG, S. YURKOVICH et K. M. PASSINO, « An optimal volume ellipsoid algorithm for parameter set estimation. », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 38, p. 1292–1296, August 1993.

-
- [30] F. PEYRET, D. BÉTAILLE et F. MOUGEL, « Non-line-of-sight gnss signal detection using an on-board 3d model of buildings, », in *IEEE International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, (Saint-Petersburg, Russia), p. 280–286, August 2011.
- [31] E. ROYER, M. LHUILLIER, M. DHOME et J.-M. LAVEST, « Monocular vision for mobile robot localization and autonomous navigation. », *International Journal of Computer Vision*, vol. 74, no. 3, p. 237–260, 2007.

Notations

2D	: Deux dimensions
3D	: Trois dimensions
ABS	: Antiblockiersystem : système de freinage anti-blocage
ADAS	: Advanced Driver Assistance Systems
AFS	: Adaptive Frequency Sampling
BPSK	: Binary Phase-Shift Keying
CAN	: Controller Area Network
CAO	: Conception Assistée par Ordinateur
CDMA	: Code-Division Multiple Access
CNES	: Centre National d'Études Spatiales
DAO	: Dessin Assisté par Ordinateur
DGPS	: Differential Global Positioning System
DoD	: Department of Defense
ECEF	: Earth Centered Earth Fixed
ECI	: Earth Centered Inertial
EGNOS	: European Geostationary Navigation Overlay Service
EKF	: Extended Kalman Filter
ENSIL	: École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges
ENU	: East, North, Up
ESA	: Agence Spatiale Européenne
ESP	: Electronic Stability Program (aussi appelé ESC pour Electronic Stability Control) : Contrôle Electronique de Stabilité
FDMA	: Frequency-Division Multiple Access
FOC	: Full Operational Capability
GBAS	: Ground-Based Augmentation System
GLONASS	: GLObalnaya NAVigatsionnaya Spoutnikovaya Sistema
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPS	: Global Positioning System
HOW	: Handover Word
IFSTTAR	: Institut Français des Sciences et technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IGN	: Institut Géographique National
IMU	: Inertial Measurement Unit
INS	: Inertial Navigation System
IOV	: In-Orbit Validation
IRS	: Inertial Reference System
MCS	: Master Control station
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NAVSTAR	: NAVigation System by Timing And Ranging
NLoS	: Non Line of Sight

NMEA	:	National Marine Electronics Association
NRL	:	United States Naval Research Laboratory
OVE	:	Optimal Volume Ellipsoid
PAO	:	Publication assistée par ordinateur
PPS	:	Precise Positioning System
PRISM	:	Plate-forme de Recherche et d'Innovation de la Section Mécatronique
PRN	:	Pseudo-Random Noise, séquences binaires pseudo-aléatoires, permet d'évaluer la distance émetteur-récepteur et sert d'identifiant aux satellites
PVT	:	Position, Velocity, and Time
RGP	:	Réseau GPS Permanent
RINEX	:	Receiver Independant EXchange Format
SA	:	Selective Availability
SBAS	:	Satellite-Based Augmentation System
SGBD	:	Système de Gestion de Base de Données
SIG	:	Système d'Information Géographique
SLAM	:	Simultaneous Localization And Mapping
SPS	:	Standard Positioning Service
SQL	:	Structural Query Language
TDoA	:	Time Difference of Arrival
TGD	:	Total Group Delay
TLM	:	Telemetry World
UTC	:	Universal Time Coordinated
VERT	:	Véhicule d'Essais et de Référence en Trajectographie
WAAS	:	Wide Area Augmentation System
WGS 84	:	World Geodetic System 1984

Modèles d'imprécision - Rappels théoriques

A.1 Modèle à erreur bornée

C'est le modèle qui correspond le plus directement aux spécifications de capteurs.

- Quand on dit que la précision de mesure d'une distance d est de 1cm, et qu'on mesure une distance de **34.5** cm, on sait que la vraie valeur d^* est dans l'intervalle $[34.5 - 1, 34.5 + 1]$ cm.
- Quand on dit que la précision relative de mesure d'une distance d est de 1%, et qu'on mesure une distance de **34.5** cm, on sait que la vraie valeur d^* est dans l'intervalle $\left[\left(1 - \frac{1}{100}\right) * 34.5, \left(1 + \frac{1}{100}\right) * 34.5\right]$ cm.

A.1.1 Définition

Un modèle à erreur bornée d'une mesure scalaire est donc la spécification d'un **intervalle connu** $[\beta_{\text{inf}}, \beta_{\text{sup}}]$ dans lequel l'erreur de mesure $(d - d^*)$ se trouve de façon garantie.

$$\beta_{\text{inf}} \leq d - d^* \leq \beta_{\text{sup}} \quad (\text{A.1})$$

A.1.2 Cas des mesures vectorielles

Quand on mesure m quantités simultanément, on dit qu'on mesure un vecteur $z \in \mathbb{R}^m$. La spécification de l'erreur se fait composante par composante (capteur par capteur). Pour chacun des capteurs, on spécifie un intervalle admissible $[\underline{\beta}, \overline{\beta}]$ (prononcer $[\beta_{\text{inf}}, \beta_{\text{sup}}]$) :

$$\underline{\beta}_i \leq z_i - z_i^* \leq \overline{\beta}_i \quad (\text{A.2})$$

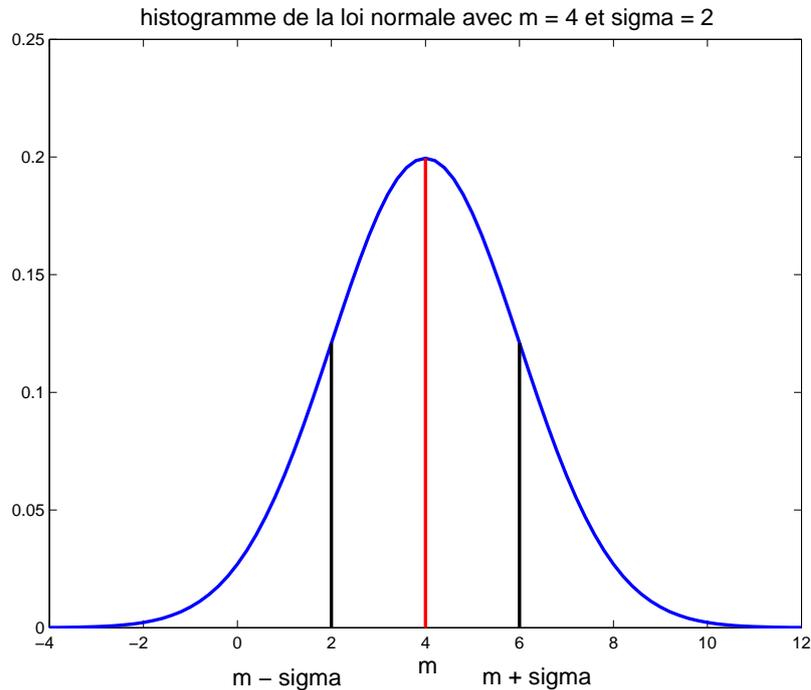
A.2 Modèle à bruit additif aléatoire gaussien

A.2.1 Cas scalaire

A.2.1.1 Définition

Considérons le cas scalaire. Dans ce modèle, on modélise l'erreur comme une variable aléatoire gaussienne :

$$\begin{cases} d = d^* + e \\ e \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma) \end{cases} .$$

FIGURE A.1 – Distribution de probabilité de la loi de Gauss avec $m = 4$ et $\sigma = 2$

$e \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$ signifie que e suit une loi normale de moyenne μ et d'écart type σ , ce qui signifie que sa la densité de probabilité est :

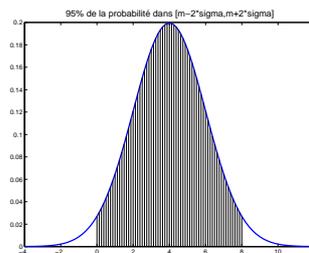
$$P(e = e_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(e_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Cette distribution est représentée Fig. A.1.

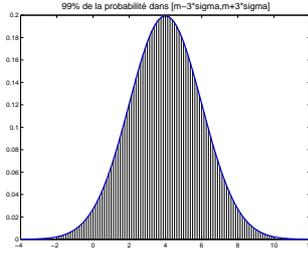
A.2.1.2 Intervalle de confiance

Lorsque la distribution de e obéit à la loi normale, on trouve :

- 68 % des réalisations dans l'intervalle $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$,
- 95 % des réalisations dans l'intervalle $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$,
- 99,7 % des réalisations dans l'intervalle $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$,



95 % de la probabilité est dans $[m - 2\sigma, m + 2\sigma]$



99 % de la probabilité est dans $[m - 3\sigma, m + 3\sigma]$

C'est un lien entre les modèles à erreur bornée et les modèles à bruit additif gaussien : ça permet de traduire les spécifications de capteur en termes de bruit additif gaussien.

A.2.1.3 Covariances

Soit 2 variables aléatoires \mathbf{x} et \mathbf{y} qui sont peut-être liées.

Pour chaque variable, on définit la moyenne et l'écart type; par exemple, pour \mathbf{x} : $\bar{\mathbf{x}} = E(\mathbf{x})$; σ_x ; $C_{xx} = \sigma_x^2 = E(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^2$.

On décrit la liaison entre les 2 variables par

$$c_{xy} = E((\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \cdot (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}))$$

Le coefficient de corrélation est

$$\rho_{xy} = \frac{c_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

On peut montrer qu'il est inférieur à 1 en valeur absolue

$$|\rho_{xy}| \leq 1.$$

- Si $|\rho_{xy}|$ est proche de 1 (typiquement ≥ 0.75), on peut dire que \mathbf{x} et \mathbf{y} sont des variables liées (cf. Fig. A.2 et A.4).
- si $|\rho_{xy}|$ est petit (typiquement ≤ 0.2), on peut dire que \mathbf{x} et \mathbf{y} sont des variables indépendantes (cf. Fig. A.3).

A.2.1.4 Matrice de variance covariance

On peut regrouper toutes les propriétés de \mathbf{x} et \mathbf{y} dans une notation vectorielle. On

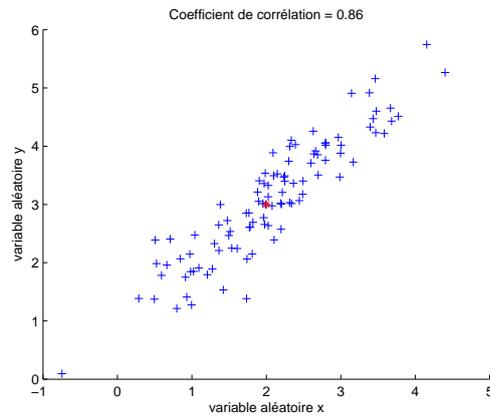
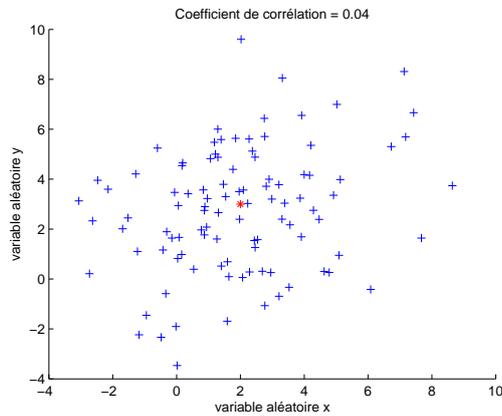
pose : $\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}$

La moyenne est

$$\bar{\mathbf{z}} = E(\mathbf{z}) = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}} \\ \bar{\mathbf{y}} \end{bmatrix}$$

Les moments d'ordre 2 sont contenus dans la matrice de variance-covariance \mathbf{P}_{zz} :

$$\mathbf{P}_{zz} = E((\mathbf{z} - \bar{\mathbf{z}}) \cdot (\mathbf{z} - \bar{\mathbf{z}})^T) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & c_{xy} \\ c_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$$

FIGURE A.2 – Exemple de variables corrélées : $\rho = 86\%$ FIGURE A.3 – Exemple de variables peu corrélées : $\rho = 4\%$

A.2.2 Cas vectoriel

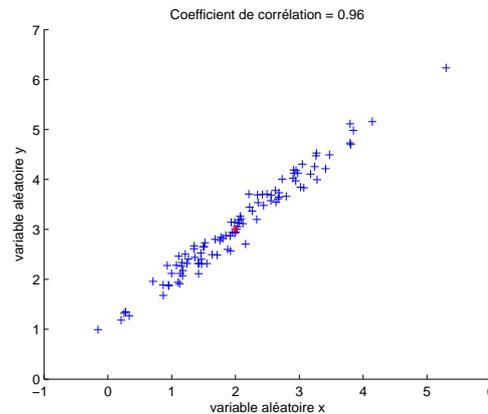
A.2.2.1 Définition

Considérons un vecteur de m observations simultanées : $z \in \mathbb{R}^m$ qui présentent un caractère aléatoire.

Sa moyenne (moment d'ordre 1) est :

$$\bar{z} = E(z), \bar{z} \in \mathbb{R}^m.$$

Son moment d'ordre 2 est une matrice appelée matrice de variance covariance :

FIGURE A.4 – Exemple de variables très corrélées : $\rho = 96\%$

$$P = E \left((z - \bar{z}) \cdot (z - \bar{z})^T \right)$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & \cdots & \cdots & \cdots & \sigma_{1,j} & \cdots & \sigma_{1,m} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \sigma_i^2 & & \sigma_{i,j} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \sigma_{1,j} & \cdots & \sigma_{i,j} & \cdots & \sigma_j^2 & \cdots & \sigma_{1,m} \\ \vdots & & & & & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1,m} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \sigma_m^2 \end{bmatrix}$$

Cette matrice contient en effet

- les variances $\sigma_i^2 = E \left((z_i - \bar{z}_i)^2 \right)$ des composantes z_i prises une à une sur sa diagonale,
- les covariances $\sigma_{i,j} = E \left((z_i - \bar{z}_i) \cdot (z_j - \bar{z}_j) \right)$ de chaque couple de variables dans les termes hors diagonaux. Ce terme décrit la dépendance statistique entre z_i et z_j .

La densité de probabilité d'une loi de Gauss multidimensionnelle est :

$$\boxed{f(z_0) = \frac{1}{(2\pi)^{m/2} \sqrt{\det(P)}} \exp \left(-\frac{1}{2} (z_0 - \bar{z})^T \cdot P^{-1} \cdot (z_0 - \bar{z}) \right)} \quad (\text{A.3})$$

A.2.2.2 Propriétés de la matrice de variance covariance

- P est symétrique et non négative.

Preuves

Elles sont basées sur la linéarité de l'opérateur espérance.

$$\begin{aligned} P^T &= \left(E \left((z - \bar{z}) \cdot (z - \bar{z})^T \right) \right)^T = E \left(\left((z - \bar{z}) \cdot (z - \bar{z})^T \right) \right)^T \\ &= E \left((z - \bar{z}) \cdot (z - \bar{z})^T \right) \\ &= P, \end{aligned}$$

donc P est symétrique.

$$\begin{aligned} \forall x \in \mathbb{R}^m, x^T P x &= x^T E \left((z - \bar{z}) \cdot (z - \bar{z})^T \right) x \\ &= E \left(x^T (z - \bar{z}) \cdot x (z - \bar{z})^T \right) \\ &= E \left(\left(x^T (z - \bar{z}) \right)^2 \right) \geq 0, \end{aligned}$$

donc P est non négative.

- P est diagonalisable, ses valeurs propres sont non négatives et la matrice de changement de base correspondante est orthogonale.

Preuves

C'est une propriété des matrices symétriques et non négatives :

$$\begin{aligned} \exists D, D &= \text{diag} \left([s_1^2, \dots, s_i^2, \dots, s_m^2] \right); \\ \exists U, U^{-1} &= U^T \\ P &= U^T D U \end{aligned}$$

A.2.2.3 Domaines de confiance

De même que dans le cas d'une seule variable scalaire (cf. § A.2.1.2), on peut définir des domaines dans lesquels se concentrent une probabilité P_0 de réalisation de z . Il sont définis à partir de la loi de Gauss multidimensionnelle (A.3) sous la forme :

$$(z_0 - \bar{z})^T \cdot P^{-1} \cdot (z_0 - \bar{z}) \leq \chi^2(P_0) \quad (\text{A.4})$$

ou de façon équivalente par :

$$(z_0 - \bar{z})^T \cdot \left(\chi^2(P_0) P \right)^{-1} \cdot (z_0 - \bar{z}) \leq 1$$

Ce domaine est l'intérieur de l'ellipsoïde de centre \bar{z} et de matrice $[\chi^2(P_0) \cdot P]^{-1}$.

On utilise l'inégalité (A.4) comme un test de validation d'une mesure z_0 lorsqu'on connaît la moyenne \bar{z} et la covariance P de la variable z dont z_0 prétend être une mesure.

Définition du seuil $\chi^2(P_0)$

Le seuil $\chi^2(P_0)$ peut facilement être déduit des seuils qui définissent les intervalles de confiance dans le cas scalaire (§ A.2.1.2).

On peut en effet les exprimer comme suit :

Intervalle de confiance à 68% :

$$\left(\frac{(z - \bar{z})}{\sigma}\right)^2 < 1$$

Intervalle de confiance à 95% :

$$\left(\frac{(z - \bar{z})}{\sigma}\right)^2 < 2^2$$

Intervalle de confiance à 99% :

$$\left(\frac{(z - \bar{z})}{\sigma}\right)^2 < 3^2$$

P étant une matrice symétrique définie positive, on sait que :

- elle est diagonalisable et ses valeurs propres sont positives. On pose : $\mathit{eig}(P) = (\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2)$,
- la matrice de changement de base U qui la diagonalise est orthogonale : $P = U^T \cdot \mathit{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2) \cdot U$,
- et de façon équivalente : $P^{-1} = U^T \cdot \mathit{diag}\left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_m^2}\right) \cdot U$.

En utilisant ces résultats, on peut utiliser la nouvelle variable aléatoire vectorielle : $\mathbf{y} = U \cdot \mathbf{z}$. Elle est gaussienne de valeur moyenne $\bar{\mathbf{y}} = U \cdot \bar{\mathbf{z}}$ et de covariance $\mathit{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2)$. Les composantes de \mathbf{y} sont donc décorrélées.

L'expression (A.4) devient :

$$(\mathbf{y}_0 - \bar{\mathbf{y}})^T \cdot \mathit{diag}\left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_m^2}\right) (\mathbf{y}_0 - \bar{\mathbf{y}}) \leq \chi^2(P_0)$$

c'est à dire :

$$\sum_{i=1}^m \frac{(\mathbf{y}_i - \bar{\mathbf{y}}_i)^2}{\sigma_i^2} \leq \chi^2(P_0)$$

On en déduit donc les intervalles de confiance pour une variable aléatoire (v.a) gaussienne multidimensionnelle \mathbf{z} de moyenne $\bar{\mathbf{z}}$ et de matrice de variance-covariance P :

Intervalle de confiance à 68% d'une v.a vectorielle gaussienne :

$$(z_0 - \bar{z})^T . P^{-1} . (z_0 - \bar{z}) < m,$$

Intervalle de confiance à 95% d'une v.a vectorielle gaussienne :

$$(z_0 - \bar{z})^T . P^{-1} . (z_0 - \bar{z}) < 4m,$$

Intervalle de confiance à 99% d'une v.a vectorielle gaussienne :

$$(z_0 - \bar{z})^T . P^{-1} . (z_0 - \bar{z}) < 9m.$$

Ces intervalles de confiance sont des intérieurs d'ellipsoïdes de centre \bar{z} .

Calcul de bruit d'état

B.1 Rappel du modèle de progression

$$\begin{aligned}
 \hat{q}_{k|k-1} &= \underbrace{I_6}_{A_k} \cdot \hat{q}_{k-1|k-1} + \overbrace{\begin{bmatrix} \cos \psi_k & 0 \\ \sin \psi_k & 0 \\ -\theta_k & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -\phi_k \\ 0 & \theta_k \end{bmatrix}}^{B_k} \cdot \overbrace{\begin{bmatrix} \delta s_k \\ \delta \psi_k \end{bmatrix}}^{u_k} + \omega_k \\
 &= f(\hat{q}_{k-1|k-1}, u_k) + \omega_k
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

ω_k représente le bruit d'état.

B.2 Définition du problème

Les grandeurs qui participent aux erreurs faites sur le modèle sont : R_d , R_g , E , $\delta\varphi_{dk}$ et $\delta\varphi_{gk}$.

$$f(q_k, u_k, R_d, R_g, E, \delta\varphi_{dk}, \delta\varphi_{gk}) = f(q_k, u_k, \hat{R}_d, \hat{R}_g, \hat{E}, \delta\hat{\varphi}_{dk}, \delta\hat{\varphi}_{gk}) + v_k \tag{B.2}$$

D'où :

$$v_k = B_1 \cdot \sigma_{R_d} + B_2 \cdot \sigma_{R_g} + B_3 \cdot \sigma_E + B_4 \cdot \sigma_{\delta\varphi_{dk}} + B_5 \cdot \sigma_{\delta\varphi_{gk}} \quad (\text{B.4})$$

$$\text{avec } \begin{cases} f_1(q_k, u_k, \hat{R}_d, \hat{R}_g, \hat{E}, \delta\hat{\varphi}_{dk}, \delta\hat{\varphi}_{gk}) = x_k + \cos \psi_k \cdot \delta s_k \\ f_2(q_k, u_k, \hat{R}_d, \hat{R}_g, \hat{E}, \delta\hat{\varphi}_{dk}, \delta\hat{\varphi}_{gk}) = y_k + \sin \psi_k \cdot \delta s_k \\ f_3(q_k, u_k, \hat{R}_d, \hat{R}_g, \hat{E}, \delta\hat{\varphi}_{dk}, \delta\hat{\varphi}_{gk}) = z_k - \theta_k \cdot \delta s_k \\ f_4(q_k, u_k, \hat{R}_d, \hat{R}_g, \hat{E}, \delta\hat{\varphi}_{dk}, \delta\hat{\varphi}_{gk}) = \psi_k + \delta\psi_k \\ f_5(q_k, u_k, \hat{R}_d, \hat{R}_g, \hat{E}, \delta\hat{\varphi}_{dk}, \delta\hat{\varphi}_{gk}) = \theta_k - \phi_k \cdot \delta\psi_k \\ f_6(q_k, u_k, \hat{R}_d, \hat{R}_g, \hat{E}, \delta\hat{\varphi}_{dk}, \delta\hat{\varphi}_{gk}) = \phi_k + \theta_k \cdot \delta\psi_k \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

Il faut maintenant déterminer les coefficients de l'équation (B.4)

B.2.0.4 Expression des erreurs sur δs_k et $\delta\psi_k$

$$\boxed{\delta s_k = \frac{R_d}{2} \cdot \delta\varphi_{dk} + \frac{R_g}{2} \cdot \delta\varphi_{gk}} \quad (\text{B.6})$$

$$\begin{aligned} - \frac{\partial \delta s_k}{\partial R_d} &= \frac{\delta\varphi_{dk}}{2} & \frac{\partial \delta s_k}{\partial R_g} &= \frac{\delta\varphi_{gk}}{2} \\ - \frac{\partial \delta s_k}{\partial E} &= 0 & \frac{\partial \delta s_k}{\partial \delta\varphi_{dk}} &= \frac{R_d}{2} & \frac{\partial \delta s_k}{\partial \delta\varphi_{gk}} &= \frac{R_g}{2} \end{aligned}$$

$$\boxed{\delta\psi_k = \frac{R_d}{E} \cdot \delta\varphi_{dk} - \frac{R_g}{E} \cdot \delta\varphi_{gk} = \frac{1}{E} \cdot (R_d \cdot \delta\varphi_{dk} - R_g \cdot \delta\varphi_{gk})} \quad (\text{B.7})$$

$$\begin{aligned} - \frac{\partial \delta\psi_k}{\partial R_d} &= \frac{\delta\varphi_{dk}}{E} & \frac{\partial \delta\psi_k}{\partial R_g} &= -\frac{\delta\varphi_{gk}}{E} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial \delta \psi_k}{\partial E} &= -\frac{1}{E^2} \cdot (R_d \cdot \delta \varphi_{dk} - R_g \cdot \delta \varphi_{gk}) & \frac{\partial \delta \psi_k}{\partial \delta \varphi_{dk}} &= \frac{R_d}{E} & \frac{\partial \delta \psi_k}{\partial \delta \varphi_{gk}} &= \\
-\frac{R_g}{E} & & & & &
\end{aligned}$$

Soit, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \delta s_k \\ \varepsilon \delta \psi_k \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} \frac{\delta \varphi_{dk}}{2} & \frac{\delta \varphi_{gk}}{2} & 0 & \frac{R_d}{2} & \frac{R_g}{2} \\ \frac{\delta \varphi_{dk}}{E} & -\frac{\delta \varphi_{gk}}{E} & -\frac{(R_d \cdot \delta \varphi_{dk} - R_g \cdot \delta \varphi_{gk})}{E^2} & \frac{R_d}{E} & -\frac{R_g}{E} \end{bmatrix}}^{E2_k} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{R_d} \\ \sigma_{R_g} \\ \sigma_E \\ \sigma_{\delta \varphi_{dk}} \\ \sigma_{\delta \varphi_{gk}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

B.2.1 Expression de la matrice d'erreur de q_k

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial f_1}{\partial \delta s_k} &= \cos \psi_k & \frac{\partial f_2}{\partial \delta s_k} &= \sin \psi_k & \frac{\partial f_3}{\partial \delta s_k} &= -\theta_k \\
-\frac{\partial f_4}{\partial \delta s_k} &= 0 & \frac{\partial f_5}{\partial \delta s_k} &= 0 & \frac{\partial f_6}{\partial \delta s_k} &= 0 \\
-\frac{\partial f_1}{\partial \delta \psi_k} &= 0 & \frac{\partial f_2}{\partial \delta \psi_k} &= 0 & \frac{\partial f_3}{\partial \delta \psi_k} &= 0 \\
-\frac{\partial f_4}{\partial \delta \psi_k} &= 1 & \frac{\partial f_5}{\partial \delta \psi_k} &= -\phi_k & \frac{\partial f_6}{\partial \delta \psi_k} &= \theta_k
\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon x_k \\ \varepsilon y_k \\ \varepsilon z_k \\ \varepsilon \psi_k \\ \varepsilon \theta_k \\ \varepsilon \phi_k \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} \cos \psi_k & 0 \\ \sin \psi_k & 0 \\ -\theta_k & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -\phi_k \\ 0 & \theta_k \end{bmatrix}}^{E1_k} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon \delta s_k \\ \varepsilon \delta \psi_k \end{bmatrix} \quad (\text{B.9})$$

En multipliant les matrices $E\mathbf{1}_k$ et $E\mathbf{2}_k$, on obtient le bruit d'état \mathbf{v}_k en fonction des différents σ , sous la forme d'une matrice (3 x 5).

B.2.1.1 Matrice reliant \mathbf{v}_k et les σ

$$\mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{R_d} \\ \sigma_{R_g} \\ \sigma_E \\ \sigma_{\delta\varphi_{dk}} \\ \sigma_{\delta\varphi_{gk}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.10})$$

$$\text{Avec } B_1 = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{13} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} B_{21} \\ B_{22} \\ B_{23} \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} B_{31} \\ B_{32} \\ B_{33} \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} B_{41} \\ B_{42} \\ B_{43} \end{bmatrix} \text{ et } B_5 = \begin{bmatrix} B_{51} \\ B_{52} \\ B_{53} \end{bmatrix}.$$

B.3 Calcul de la matrice Q_k

$$\begin{aligned} Q_k &= E(\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{v}_k^T) \\ &= B_1 \cdot E(\sigma_{R_d}^2) \cdot B_1^T + B_2 \cdot E(\sigma_{R_g}^2) \cdot B_2^T + B_3 \cdot E(\sigma_E^2) \cdot B_3^T \\ &\quad + B_4 \cdot E(\sigma_{\delta\varphi_{dk}}^2) \cdot B_4^T + B_5 \cdot E(\sigma_{\delta\varphi_{gk}}^2) \cdot B_5^T \\ &\quad + \text{termes en espérance de covariance (nuls dans notre cas car grandeurs décorrélées)} \end{aligned}$$

$$Q_k = \underbrace{\begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 \end{bmatrix}}_{B_k} \cdot \overbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{R_d}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{R_g}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_E^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\delta\varphi_{dk}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\delta\varphi_{gk}}^2 \end{bmatrix}}^{Q_I} \cdot \overbrace{\begin{bmatrix} B_1^T \\ B_2^T \\ B_3^T \\ B_4^T \\ B_5^T \end{bmatrix}}^{B_k^T} \quad (\text{B.11})$$

Jeux de données et Véhicules d'essais

C.1 Jeux de données

C.1.1 Limoges

Les données utilisées pour les résultats présentés dans ce document ont été acquises à l'aide du véhicule PRISM sur le site de la technopole d'ESTER à Limoges.

Le logiciel d'acquisition de données a été développé avec Labview et permet l'acquisition simultanée des données GPS (trame GGA et trame UBX), des données odométriques, des données de la centrale inertielle et de la webcam.

L'espace roulant modélisé sur ce site a été réalisé à l'aide de la base de données BD TOPO(RGE) et d'un MNT (Modèle numérique de Terrain) du département de la Haute-Vienne (87) fournis par l'IGN (Fig. C.1).

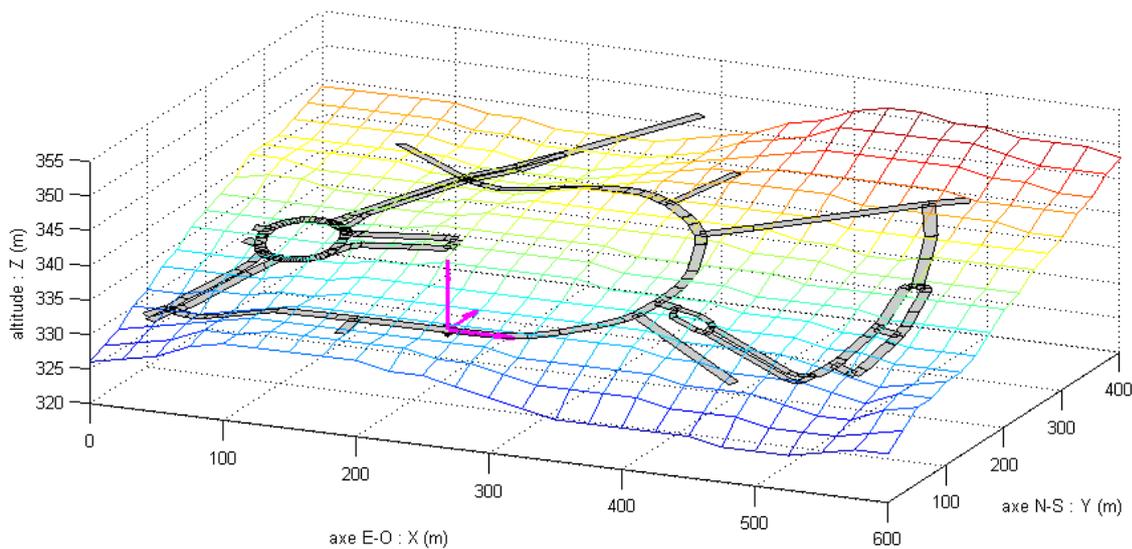


FIGURE C.1 – Modélisation de l'espace roulant sur le site d'ESTER.

C.1.2 Paris

Les données utilisées pour les résultats présentés dans ce document ont été acquises à l'aide du véhicule VERT sur un parcours situé à proximité de la mairie du XIIème arrondissement de Paris.

L'acquisition de données est réalisée par une application développée dans l'environnement AROCCAM, architecture logicielle multithread, qui permet également le traitement temps réel des algorithmes de localisation.

La modélisation de l'espace roulant a été fournie par l'IGN sous forme de facettes triangulaires 3D (Fig. C.2) dans le cadre du projet CityVIP. L'obtention des parallélogrammes rectangles découle de ces facettes (Fig. C.3).



FIGURE C.2 – Modélisation de l'espace roulant par facettes triangulaires - Projection sur le plan XY - Maire du XIIème arrondissement.



FIGURE C.3 – Modélisation de l'espace roulant par facettes triangulaires (gris) et par parallélépipèdes rectangles (noir) - Projection sur le plan XY - Maire du XIIème arrondissement.

C.2 Véhicules d'essais

C.2.1 Le véhicule PRISM

Le véhicule PRISM, Plate-forme de Recherche et d'Innovation de la Section Mécatronique, est un véhicule automobile léger à moteur thermique (véhicule deux places sans permis de marque Chatenet). La mise en place des différents dispositifs de mesure et d'acquisition a été effectuée dans le cadre de projets étudiants de la spécialité Mécatronique de l'ENSIL.

Ce véhicule est aujourd'hui équipé de nombreux dispositifs (Fig. C.4) :

- un récepteur GPS ublox LEAT-4T,
- un système odométrique composé, pour les deux roues arrières, de 2 capteurs inductif fixés au châssis et de plaques ferromagnétiques réparties sur la roue,
- une centrale inertielle Microstrain 3DM-GX2,
- une webcam,
- un PC embarqué,



FIGURE C.4 – Photos du véhicule PRISM.

- un écran de visualisation fixé au tableau de bord coté passager,
- un dispositif sécurisé d'alimentation de ces équipements.

C.2.2 Le véhicule VERT de l'IFSTTAR

VERT, Véhicule d'Essais et de Référence en Trajectographie développé par l'IFSTTAR (Fig. C.5), a été l'un des véhicules utilisé lors des campagnes d'essais du Projet CityVIP. Son équipement comprend :

- un récepteur GPS ublox LEAT-6T,
- des codeurs ABS/ESP sur chaque roue, disponible via le bus CAN,
- un gyromètre, disponible via le bus CAN,
- une centrale inertielle KVH,
- une centrale inertielle LandINS, considérée comme référence de vérité terrain (MRT : Mesure de Référence des Trajectoires),

- une caméra Marlin F131B,
- une webcam,
- un PC embarqué,
- deux écrans de visualisation, un fixé au tableau de bord coté passager, l'autre à l'arrière du siège passager,
- un dispositif sécurisé d'alimentation de ces équipements.



FIGURE C.5 – Photos du véhicule VERT de l'IFSTTAR.

Théorie sur le Filtrage de Kalman

D.1 Filtrage de Kalman

D.1.1 Cas linéaire

Rappel

Le modèle complet auquel le filtrage de Kalman s'applique est :

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

avec $\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k \in \mathbb{R}^n, \mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^p, \mathbf{z}_k, \mathbf{w}_k \in \mathbb{R}^m$.

Le **bruit d'état** $\mathbf{v}_k \in \mathbb{R}^n$ et le **bruit de mesure** $\mathbf{w}_k \in \mathbb{R}^m$, sont supposés :

- blancs (si $k \neq j, \mathbf{E}(\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{v}_j^T) = \mathbf{0}, \mathbf{E}(\mathbf{w}_k \cdot \mathbf{w}_j^T) = \mathbf{0}$),
- indépendants ($\mathbf{E}(\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{w}_k^T) = \mathbf{0}$),
- gaussiens ($\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_k), \mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$).
- à valeur moyenne nulle : $\overline{\mathbf{v}_k} = \mathbf{E}(\mathbf{v}_k) = \mathbf{0}, \overline{\mathbf{w}_k} = \mathbf{E}(\mathbf{w}_k) = \mathbf{0}$,
- de **matrices de variance-covariance** $\mathbf{Q}_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ (resp. $\mathbf{R}_k \in \mathbb{R}^{m \times m}$) **connues**.

Forme récursive

Il s'agit d'un observateur d'état qui met à jour simultanément

- $\hat{\mathbf{x}}$: l'estimation de l'état,
- $\mathbf{P} = \mathbf{E}(\tilde{\mathbf{x}} \cdot \tilde{\mathbf{x}}^T)$: la covariance de l'erreur d'estimation $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$,
- $\mathbf{S} = \mathbf{E}(\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^T)$: la covariance de l'erreur de sortie $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}}$ (ce qui permet de détecter les défaillances).

Le filtre de Kalman prend la forme d'un filtre récursif :

Estimation initiale : On donne

- l'estimation initiale : $\hat{\mathbf{x}}_{0|0} \in \mathbb{R}^n$,
- l'imprécision initiale cette estimation : $\mathbf{P}_{0|0} \in \mathbb{R}^{n \times n}$

Prédiction

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} &= \mathbf{F}_k \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{G}_k \cdot \mathbf{u}_k \\ \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{P}_{k|k} \cdot \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \\ \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k} &= \mathbf{C}_{k+1} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \end{aligned}$$

Innovation

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1|k} &= \mathbf{z}_{k+1} - \hat{\mathbf{z}}_{k+1|k} \\ \mathbf{S}_{k+1|k} &= \mathbf{C}_{k+1} \cdot \mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{C}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1} \end{aligned}$$

Correction

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{C}_{k+1}^T \cdot \mathbf{S}_{k+1|k}^{-1} \\
\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} &= \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1|k} \\
\mathbf{P}_{k+1|k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} - \mathbf{K}_{k+1} \cdot \mathbf{C}_{k+1} \cdot \mathbf{P}_{k+1|k}
\end{aligned}$$

Test d'acceptation de la mesure

Comme en théorie, $\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1|k}$ est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et de variance $\mathbf{S}_{k+1|k}$, on peut définir un domaine \mathcal{D} d'acceptation d'un tirage particulier de $\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1|k}$ pour tester si la mesure z_{k+1} qu'on vient de mesurer est bien conforme au modèle (D.1) qui contient une partie déterministe (les matrices $\mathbf{F}_k, \mathbf{G}_k, \mathbf{C}_k$) et une caractérisation des bruits (les matrices $\mathbf{Q}_k, \mathbf{R}_k$).

On peut définir un test d'acceptation $\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1|k} \in \mathcal{D}$ dont la **probabilité d'exactitude** est p_0 (typiquement 95% ou 99%). On peut dire aussi que le **taux de fausses alarmes** est $1 - p_0$.

Compte tenu des propriétés des lois gaussiennes, \mathcal{D} est une ellipsoïde de centre $\hat{z}_{k+1|k}$ et de matrice $\mathbf{S}_{k+1|k}$:

$$\left(z_{k+1} - \hat{z}_{k+1|k} \right)^T \cdot \mathbf{S}_{k+1|k}^{-1} \cdot \left(z_{k+1} - \hat{z}_{k+1|k} \right) \leq \chi^2(p_0) \quad (\text{D.2})$$

On appelle **distance de Mahalanobis** l'expression

$$d_M \left(z_{k+1}, \hat{z}_{k+1|k} \right) = \left(z_{k+1} - \hat{z}_{k+1|k} \right)^T \cdot \mathbf{S}_{k+1|k}^{-1} \cdot \left(z_{k+1} - \hat{z}_{k+1|k} \right) \quad (\text{D.3})$$

Mis en oeuvre

On réalise le filtre de Kalman par un programme qui est déclenché à chaque instant d'échantillonnage :

1	Mesure de z	
2	Calcul de l'erreur de sortie (appelée innovation)	$\boldsymbol{\varepsilon} = z - \hat{z}$
3	Covariance de l'erreur de sortie	$\mathbf{S} = \mathbf{CPC}^T + \mathbf{R}$
4	Test d'acceptation de la sortie	$\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{S}^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} \leq \chi^2(p_0)$
5	Si la mesure est valide, correction de l'estimation d'état	
	a) $\mathbf{K} = \mathbf{PC}^T \mathbf{S}^{-1}$	
	b) $\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \boldsymbol{\varepsilon}$	
	c) $\mathbf{P} = \mathbf{P} - \mathbf{KCP}$	
6	Prédiction de l'état pour le coup suivant	$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{G} u$
7	Covariance de l'erreur d'estimation	$\mathbf{P} = \mathbf{FPF}^T + \mathbf{Q}$
8	Prédiction de la sortie	$\hat{z} = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}$

D.1.2 Cas non linéaire - Filtre de Kalman Étendu

Rappel

Lorsqu'on a un modèle non-linéaire

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{v}_k \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k \end{cases} \quad (\text{D.4})$$

dont les fonctions sont suffisamment régulières (au moins de classe C_1) on peut utiliser le modèle linéarisé autour des estimées successives en espérant que les propriétés de convergence de l'estimation construite sur le modèle linéarisé se conserve dans le modèle initial.

Mis en oeuvre

On réalise le filtre de Kalman Étendu par un programme qui est déclenché à chaque instant d'échantillonnage :

1	Mesure de \mathbf{z}	
2	Calcul de l'erreur de sortie (appelée innovation)	$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}}$
3	Covariance de l'erreur de sortie	$\mathbf{S} = \mathbf{CPC}^T + \mathbf{R}$
4	Test d'acceptation de la sortie	$\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{S}^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} \leq \chi^2(p_0)$
5	Si la mesure est valide, correction de l'estimation d'état	
	a)	$\mathbf{K} = \mathbf{PC}^T \mathbf{S}^{-1}$
	b)	$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \boldsymbol{\varepsilon}$
	c) Calcul du linéarisé du modèle d'observation :	$\mathbf{C} = [\mathbf{h}_x(\mathbf{x}, \mathbf{u})]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}}$
	d)	$\mathbf{P} = \mathbf{P} - \mathbf{KCP}$
6	Prédiction de l'état pour le coup suivant	$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u})$
7	Calcul de la matrice de régime libre du linéarisé :	$\mathbf{F} = [\mathbf{f}_x(\mathbf{x}, \mathbf{u})]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}}$
8	Covariance de l'erreur d'estimation	$\mathbf{P} = \mathbf{FPF}^T + \mathbf{Q}$
9	Prédiction de la sortie	$\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$

On voit que le modèle linéarisé ne sert qu'à mettre à jour les matrices de covariance (\mathbf{S}, \mathbf{P}) (lignes 3 et 8) et le gain de Kalman \mathbf{K} (ligne 5a).

Calcul de la position d'un satellite

M_0	Mean Anomaly at Reference Time
Δn	Mean Motion Difference From Computed Value
e	Eccentricity
\sqrt{A}	Square Root of the Semi-Major Axis
Ω_0	Longitude of Ascending Node of Orbit Plane at Weekly Epoch
i_0	Inclination Angle at Reference Time
ω	Argument of Perigee
$\dot{\Omega}$	Rate of Right Ascension
IDOT	Rate of Inclination Angle
C_{uc}	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Argument of Latitude
C_{us}	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Argument of Latitude
C_{rc}	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Orbit Radius
C_{rs}	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Orbit Radius
C_{ic}	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Angle of Inclination
C_{is}	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Angle of Inclination
t_{oe}	Reference Time Ephemeris (reference paragraph 20.3.4.5)
IODE	Issue of Data (Ephemeris)

FIGURE E.1 – Définition des données d'éphémérides. © Interface Specification IS-GPS-200 version F [7]

$\mu = 3.986005 \times 10^{14} \text{ meters}^3/\text{sec}^2$	WGS 84 value of the earth's gravitational constant for GPS user
$\dot{\Omega}_e = 7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$	WGS 84 value of the earth's rotation rate
$A = \left(\sqrt{A} \right)^2$	Semi-major axis
$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}$	Computed mean motion (rad/sec)
$t_k = t - t_{oe}^*$	Time from ephemeris reference epoch
$n = n_0 + \Delta n$	Corrected mean motion
$M_k = M_0 + nt_k$	Mean anomaly
$M_k = E_k - e \sin E_k$	Kepler's Equation for Eccentric Anomaly (may be solved by iteration) (radians)
$v_k = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin v_k}{\cos v_k} \right\}$	True Anomaly
$= \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E_k / (1 - e \cos E_k)}{(\cos E_k - e) / (1 - e \cos E_k)} \right\}$	

FIGURE E.2 – Première partie des calculs. © Interface Specification IS-GPS-200 version F [7]

$E_k = \cos^{-1} \left\{ \frac{e + \cos v_k}{1 + e \cos v_k} \right\}$	Eccentric Anomaly
$\Phi_k = v_k + \omega$	Argument of Latitude
$\delta u_k = c_{us} \sin 2\Phi_k + c_{uc} \cos 2\Phi_k$	Argument of Latitude Correction
$\delta r_k = c_{rs} \sin 2\Phi_k + c_{rc} \cos 2\Phi_k$	Radius Correction
$\delta i_k = c_{is} \sin 2\Phi_k + c_{ic} \cos 2\Phi_k$	Inclination Correction
$u_k = \Phi_k + \delta u_k$	Corrected Argument of Latitude
$r_k = A(1 - e \cos E_k) + \delta r_k$	Corrected Radius
$i_k = i_0 + \delta i_k + (\text{IDOT}) t_k$	Corrected Inclination
$\left. \begin{aligned} x_k' &= r_k \cos u_k \\ y_k' &= r_k \sin u_k \end{aligned} \right\}$	Positions in orbital plane
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) t_k - \dot{\Omega}_e t_{oe}$	Corrected longitude of ascending node.
$\left. \begin{aligned} x_k &= x_k' \cos \Omega_k - y_k' \cos i_k \sin \Omega_k \\ y_k &= x_k' \sin \Omega_k + y_k' \cos i_k \cos \Omega_k \\ z_k &= y_k' \sin i_k \end{aligned} \right\}$	Earth Fixed coordinates

FIGURE E.3 – Seconde partie des calculs. © Interface Specification IS-GPS-200 version F [7]

Caractérisation des mesures de pseudodistance et de Doppler - Étude statistique

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une acquisition en un point fixe sur le parking de l'ENSIL. Les résultats de cette étude permettent d'estimer l'écart-type d'une mesure de pseudodistance et l'écart-type d'une mesure Doppler que l'on peut considérer dans le calcul de couplage serré.

F.1 Caractérisation des mesures de pseudodistance

Afin de caractériser ces mesures, nous avons représenté sur la figure F.1, pour les satellites retenus (dont le rapport signal à bruit est satisfaisant), l'écart entre la pseudodistance (après correction ionosphérique) et la distance estimée satellite-récepteur.

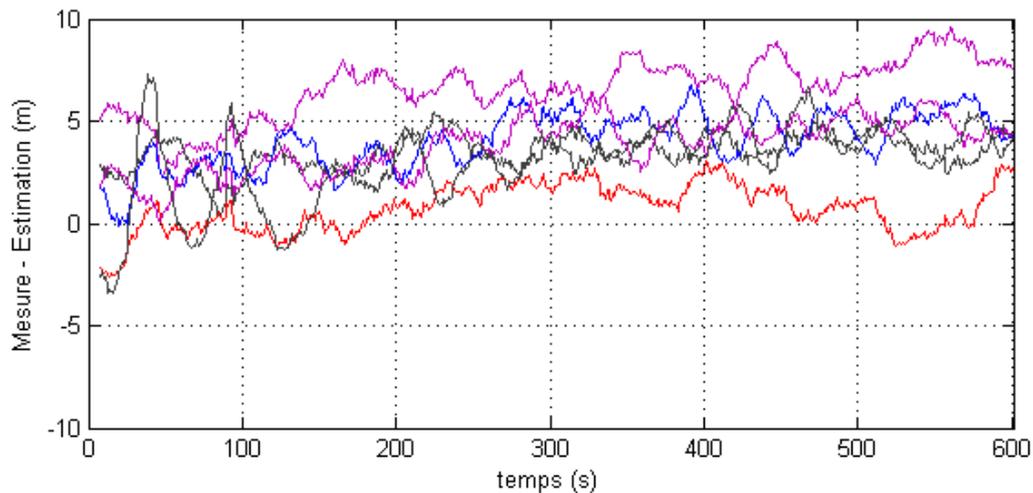


FIGURE F.1 – Écart temporel entre mesure et estimation pour les pseudodistances.

Ces résultats permettent de déterminer pour chaque satellite une moyenne et un écart-type. Les valeurs moyennes (Table F.1) peuvent être assimilées à la confiance que l'on va donner aux mesures, et donc définissent la partie concernant les pseudodistances de \mathbf{R}_k lors du calcul de couplage serré.

Satellite	Moyenne (m)	Écart-type (m)
5	6,64	1,44
7	3,48	0,85
8	4,10	1,39
10	0,75	1,16
26	3,83	1,31
28	3,02	1,97
Moyenne :	3,64	1,35

TABLE F.1 – Tableau de synthèse - Pseudodistance.

F.2 Caractérisation des mesures de Doppler

Afin de caractériser ces mesures, nous avons représenté sur la figure F.2, pour les satellites retenus (dont le rapport signal à bruit est satisfaisant), l'écart entre le décalage fréquentiel dû à l'effet Doppler mesuré par le récepteur et celui estimé à partir du calcul de la vitesse satellite-récepteur.

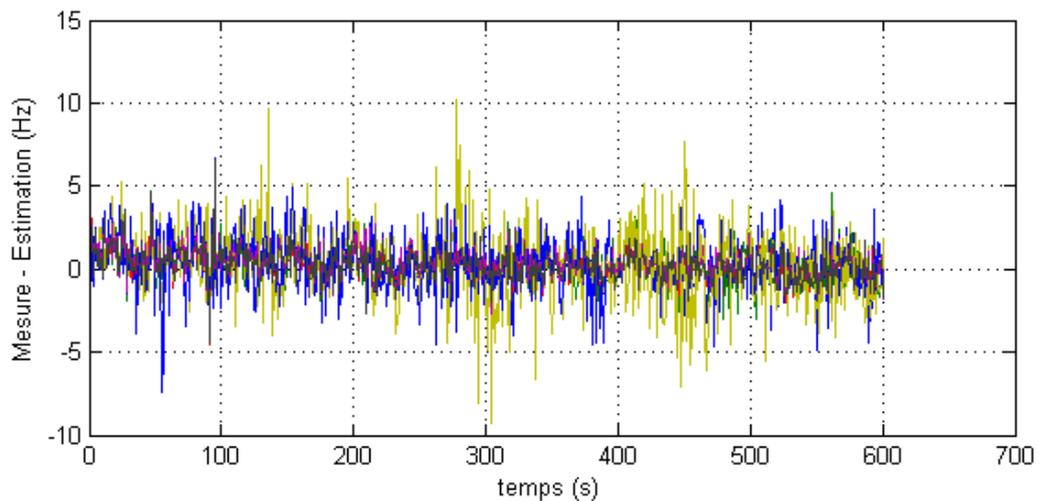


FIGURE F.2 – Écart temporel entre mesure et estimation pour les Doppler.

Ces résultats permettent de déterminer pour chaque satellite une moyenne et un écart-type. Les valeurs moyennes (Table F.2) peuvent être assimilées à la confiance que l'on va donner aux mesures, et donc définissent la partie concernant les Doppler de \mathbf{R}_k lors du calcul de couplage serré.

Satellite	Moyenne (Hz)	Écart-type (Hz)
5	0,34	0,97
7	0,33	1,01
8	0,33	0,97
10	0,30	1,01
26	0,40	0,96
28	0,27	1,01
Moyenne :	0,33	0,99

TABLE F.2 – Tableau de synthèse - Doppler.

Résumé

D'un point de vue technologique, ce travail s'inscrit dans la recherche de la maîtrise de la localisation de mobiles terrestres en utilisant conjointement des informations issues de constellations satellitaires dédiées à cet effet, de Systèmes d'Informations Géographiques et de capteurs de mouvement du véhicule. Dans la nombreuse production motivée depuis une quinzaine d'années par cette demande sociétale, ce travail se caractérise :

1. par une description de l'environnement en 3 dimensions alors qu'elle est généralement restreinte aux 2 dimensions d'un monde plat. La localisation consiste alors à estimer un vecteur de configuration de dimension 6 au lieu de 3 dans un monde plat. Cette préoccupation est essentiellement induite par l'exploitation de la vision des immeubles décrits nécessairement en 3 dimensions ainsi que par la prise en compte de l'occultation par ces immeubles de la vision directe des satellites.
2. par l'utilisation conjointe des informations satellitaires brutes conjointement aux données cartographiques et aux mesures proprioceptives, ce qu'on désigne par la notion de couplage serré. Le couplage serré permet de tirer profit des situations où le récepteur reçoit des informations de peu de satellites comme dans le cas des environnements urbains où la visibilité du ciel est restreinte. L'utilisation, pour chaque satellite visible, des données de (pseudo-)distances récepteur-satellite mais aussi des données de vitesses relatives (Doppler) a été formalisée comme un problème d'observation d'état dynamique où l'état est la configuration. Cette technique permet d'utiliser toute l'information transmise par le peu de satellites disponibles (même si moins de 4).
3. par l'utilisation conjointe d'algorithmes d'estimation basés sur des modèles stochastiques (Filtrage de Kalman) ou ensemblistes des incertitudes. Chacune modélisation est utilisée dans son domaine de pertinence et le pont entre les deux approches s'effectue au travers des domaines de validité ellipsoïdaux.
4. par l'expérimentation des méthodes proposées sur des jeux de données réelles et de grande taille. En particulier, le traitement des données de la démonstration finale du projet CityVIP autour de la mairie du XII^{ème} arrondissement de Paris apporte beaucoup de crédibilité aux méthodes proposées.

Les résultats présentés constituent une brique technologique dans la constitution de Véhicules Individuels Publics (VIP) qui pourront être pilotés selon toutes les modalités possibles entre le mode automatique et le mode manuel avec un système de supervision qui gère la flotte de l'ensemble de ces véhicules.

Cette approche par brique technologique a été motivée par le fait que cette thèse synthétise un ensemble de travaux effectués dans le projet CityVIP (ANR-07-TSFA-013-01) qui a été un projet véritablement collaboratif. Les méthodes présentées sont conçues pour s'interfacer avec d'autres briques logicielles comme par exemples des systèmes de navigation référencés sur la vision d'amers.

Enfin, les algorithmes présentés ne sont qu'un exemple de mise en œuvre d'estimateurs d'état, l'utilisation d'autres méthodologies restant ouverte.
