



HAL
open science

Localisation de véhicule par satellites couplée à la navigation à l'estime et aux données cartographiques

David Betaille

► **To cite this version:**

David Betaille. Localisation de véhicule par satellites couplée à la navigation à l'estime et aux données cartographiques. Automatique / Robotique. Ecole des Sciences et Technologies de l'Information et de Mathématiques de l'Université de Nantes, Angers, Le Mans, 2014. tel-01634339

HAL Id: tel-01634339

<https://hal.science/tel-01634339v1>

Submitted on 14 Nov 2017

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

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

Mémoire scientifique d'Habilitation à Diriger les Recherches
Ecole Doctorale STIM : Sciences et Technologies de l'Information et de Mathématiques de
l'Université de Nantes, Angers, Le Mans
Champ disciplinaire : Robotique

**Localisation de véhicule par satellites,
couplée à la navigation à l'estime
et aux données cartographiques**

David F. Bétaille

Soutenu le 8 avril 2014, devant le jury composé de :

Philippe Bonnifait, Professeur à l'Univ. de Technologie de Compiègne, Examineur
Roland Chapuis, Professeur à l'Institut Pascal, Clermont-Ferrand, Président du jury
Philippe Martinet, Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes (IRCCYN), Rapporteur
Dominique Meizel, Professeur à l'Univ. de Limoges (XLIM), Rapporteur
Bertrand Merminod, Professeur à l'EPF de Lausanne, Suisse, Examineur
François Peyret, Directeur de Recherche à l'Ifsttar, Nantes, Examineur
Jean-Yves Tourneret, Professeur à l'INP de Toulouse (ENSEEIH), Rapporteur
Yide Wang, Professeur à l'Univ. de Nantes, Examineur

Theory guides. Experiment decides.

Donald E. Simanek (1936-) US physicist, educator, humorist.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| <i>Chapitre 1</i> | 6 |
| INTRODUCTION | 6 |
| 1.1 – DIPLOME D’INGENIEUR ET SERVICE MILITAIRE | 6 |
| 1.2 – PREMIERS TRAVAUX COMME INGENIEUR PUIS CHERCHEUR AU LCPC EN ROBOTIQUE DE CHANTIER : PROBLEMATIQUE DU POSITIONNEMENT DE PRECISION CENTIMETRIQUE..... | 6 |
| 1.3 – LOCALISATION POUR LES APPAREILS A GRAND RENDEMENT : RECHERCHE SUR LE CONCEPT DE FUSION DE DONNEES MULTI-CAPTEURS POUR DES APPLICATIONS EN TEMPS DIFFERE | 9 |
| 1.4 – LOCALISATION DE VEHICULE POUR LES ITS : RECHERCHE SUR LE CONCEPT DE FUSION DE DONNEES MULTI-CAPTEURS POUR DES APPLICATIONS EN TEMPS REEL..... | 9 |
| 1.5 – PLAN DU MEMOIRE | 11 |
| <i>Chapitre 2</i> | 12 |
| SITUATION DES THEMATIQUES DE RECHERCHE PAR RAPPORT AU DIFFERENTS MODES DE POSITIONNEMENT GPS DYNAMIQUE | 12 |
| 2.1 – RAPPEL DES NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES MESURES GPS..... | 13 |
| 2.1.1 – Principe des mesures | 13 |
| 2.1.2 – Le modèle ultra-simplifié d’observation de code..... | 15 |
| 2.1.3 – Le modèle ultra-simplifié d’observation de phase..... | 16 |
| 2.1.4 – La référence temporelle du GPS et les erreurs d’horloges | 17 |
| 2.1.5 – La propagation des signaux et l’influence de l’atmosphère..... | 19 |
| 2.1.6 – Les trajets multiples..... | 20 |
| 2.1.7 – Modèles d’observation conventionnels..... | 21 |
| 2.2 – LES DIFFERENTS MODES D’UTILISATION DU GPS EN DYNAMIQUE | 22 |
| 2.3 – ORGANISATION DE LA SUITE DU MEMOIRE | 24 |
| <i>Chapitre 3</i> | 25 |
| CONTRIBUTIONS A LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE EN LOCALISATION POUR LA ROBOTIQUE DE CHANTIER | 25 |
| 3.1 – SESSYL | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2 – LA PRECISION DU GPS CINEMATIQUE | 28 |
| 3.3 – PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE DEVELOPEE EN THESE DE DOCTORAT | 31 |
| 3.4 – BILAN SCIENTIFIQUE EN ROBOTIQUE DE CHANTIER | 34 |
| <i>Chapitre 4</i> | 36 |
| DEVELOPPEMENT DE SOLUTIONS DE LOCALISATION DE VEHICULE PAR FUSION DE DONNEES MULTI-CAPTEURS ET CARTES | 36 |
| 4.1 – GENERALITES SUR LA FUSION DE DONNEES POUR LA LOCALISATION | 38 |
| 4.1.1 – Terminologie | 38 |
| 4.1.2 – Les capteurs | 38 |
| 4.1.3 – Le principe d'hybridation | 39 |
| 4.1.4 – Hybridation lâche et hybridation serrée | 41 |
| 4.2 – MISE EN APPLICATION DANS LE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE LOCALISATION DES AGR | 42 |
| 4.2.1 – Contexte | 42 |
| 4.2.2 – LocAGR | 43 |
| 4.3 – GYROLIS | 44 |
| 4.3.1 – Contexte | 44 |
| 4.3.2 – Algorithme de Gyrolis | 45 |
| 4.3.2.1 - Filtrage | 45 |
| 4.3.2.2 - Lissage | 47 |
| 4.3.2.3 - Algorithme complet | 48 |
| 4.3.3 – Conclusion | 49 |
| 4.4 – FUSION DE DONNEES EN TEMPS REEL | 50 |
| 4.4.1 – Algorithmes en couplage lâche | 51 |
| 4.4.2 – Algorithmes en couplage serré | 53 |
| 4.4.2.1 - Méthode n° 1 : couplage serré avec modèle non-holonome | 55 |
| 4.4.2.2 - Méthode n° 2 : couplage serré avec modèle accéléré plan | 56 |
| 4.5 – PROBLEMATIQUE DE L'INTEGRITE | 57 |
| 4.5.1 – Concept d'intégrité | 57 |
| 4.5.2 – Paramètres d'intégrité | 59 |
| 4.5.3 – EGNOS | 60 |
| 4.5.4 – Algorithme RAIM | 61 |
| 4.6 – INTEGRITE ET SPECIFICITE DE LA PROBLEMATIQUE POUR DES VEHICULES TERRESTRES | 62 |
| 4.6.1 – Introduction | 62 |
| 4.6.2 – Analyse expérimentale et approche en fusion serrée | 63 |

| | |
|--|-----------|
| 4.6.3 – Approche en fusion lâche avec contraintes cartographiques | 65 |
| Chapitre 5 | 68 |
| ANALYSE DES ERREURS DE PSEUDO-DISTANCE PAR MULTI-TRAJETS ET | |
| NAVIGATION URBAINE AIDÉE PAR LA CARTE 3D | 68 |
| 5.1 – CONTEXTE | 69 |
| 5.1.1 – Propagation et géométrie des bâtiments | 69 |
| 5.1.2 – Solutions existantes | 71 |
| 5.1.3 – Solution mise en œuvre dans CityVIP | 72 |
| 5.2 – ERREUR PAR MULTI-TRAJETS | 74 |
| 5.3 – LE MODELE DE TRANCHEE URBAINE MIS EN ŒUVRE DANS INTURB | 75 |
| 5.3.1. – Caractérisation de l’environnement urbain | 76 |
| 5.3.2. – Classification des satellites LOS/NLOS | 77 |
| 5.3.3. – Correction des mesures des satellites NLOS | 80 |
| 5.3.4. – Calcul de la solution de navigation | 80 |
| 5.4 – RESULTATS DE L’APPLICATION DU MODELE DE TRANCHEE URBAINE ET PERSPECTIVES | 81 |
| 5.4.1 – Résultats | 81 |
| 5.4.2 – Perspectives dans Inturb | 82 |
| 5.5 – RESUME DES CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES DANS LE DOMAINE DES ITS | 84 |
| REFERENCES | 85 |

Chapitre 1

INTRODUCTION

Ce chapitre donne un bref résumé de carrière, en replaçant celle-ci dans le contexte de recherche et développement du laboratoire. Le plan d'organisation du mémoire est donné à la fin de ce chapitre.

1.1 – Diplôme d'ingénieur et service militaire

Après mon **diplôme d'ingénieur en spécialité robotique de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes** en 1992 (dernière promotion avant que celle-ci ne devienne Ecole Centrale de Nantes), j'ai effectué mon service militaire comme secrétaire pendant quelques semaines estivales puis, à la faveur de la rentrée scolaire, comme formateur dans une unité de la base école de Rochefort en charge de formation continue des personnels, en traitement de texte, tableur et gestion de bases de données. J'ai gardé de cette première expérience un attrait certain pour l'enseignement : par la suite, je n'ai jamais décliné d'offres de cours ou de travaux dirigés. En plus d'un aspect différent de mon métier de chercheur, ils m'ont mis en relation avec des étudiants, ce qui est toujours appréciable du point de vue de mon laboratoire (qui n'est pas un laboratoire universitaire).

1.2 – Premiers travaux comme ingénieur puis chercheur au LCPC en robotique de chantier : problématique du positionnement de précision centimétrique

J'ai été embauché en contrat de 3 ans renouvelable au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en août 1993, comme ingénieur, dans une toute nouvelle section : **Robotique**

de Chantier, dirigée par François Peyret. L'activité de recherche en robotique de chantier au LCPC a été montée par François Peyret en 1990. A mon recrutement, l'équipe passe de deux à trois personnels à temps plein, avec Charles Lemaire, technicien supérieur, et le responsable de la section, François Peyret. Mon activité dans ce contexte est présentée au chapitre 3.

La mission globale que mentionnait ma fiche de poste consistait à participer aux activités de la section dans le domaine de l'automatisation et la robotisation des travaux de construction et d'entretien des routes, activités de recherche et développement, expérimentation, publication, valorisation industrielle, participation à des projets en partenariat... François Peyret m'a aussi confié la responsabilité du grand équipement de tests de systèmes de localisation : la Station d'Etudes des Systèmes de Localisation (chapitre 3) nouvellement implantée au Centre de Nantes du LCPC. Ainsi, SESSYL a été mon premier terrain de jeu en arrivant au LCPC.

Dans l'année qui a suivi, le statut de chercheur du Ministère en charge de l'Équipement, inspiré de celui du CNRS, a été proposé à certains personnels ingénieurs du LCPC (et d'équipes de recherche associées dans le réseau des Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées, de l'École des Ponts et de l'École de Travaux Publics de l'État). J'ai pu opter pour ce statut, et suis titulaire depuis février 1995. Devenu Chargé de Recherche sans doctorat, j'ai reçu comme première recommandation du comité d'évaluation des chercheurs de m'engager en thèse dès que possible.

En robotique de chantier, j'ai découvert les aspects de modélisation des machines et leur commande, notamment le finisseur de route. Mon DEA (passé en parallèle de ma première année d'exercice au LCPC) portait sur l'automatisation de cette machine et le concept de construction des routes assistée par ordinateur, ou CIRC (Computer Integrated Road Construction), lequel a d'abord été étudié en simulation (cf. figure 1.1).

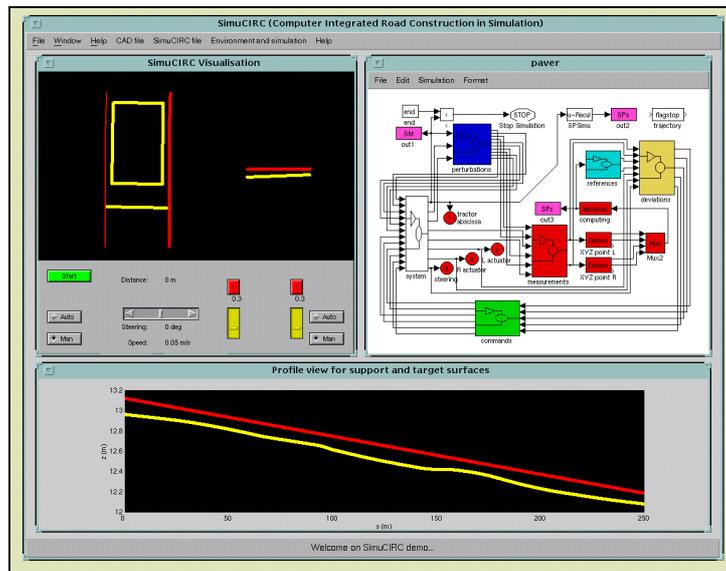


Figure 1.1 : l'interface utilisateur de SimuCIRC

Dans ce contexte, François Peyret a monté un projet européen (BRITE-EURAM CIRC) dans lequel j'ai travaillé sur les aspects métrologiques, tant GPS qu'autres systèmes, notamment à laser. Un tel projet en partenariat, renforcé par l'attractivité du banc d'essais SESSYL, a beaucoup élargi mon réseau. La section s'est étoffée avec le recrutement d'un technicien (Jean-Marie Prual), d'un Chargé de Recherche (Pierre-Olivier Vandanjon), et de deux doctorants (Charles-Eric Lemaire et Stéphane Durand). **Stéphane Durand et moi sommes co-auteurs de codes de calcul GPS sous Matlab et en C, toujours très utiles dans nos recherches aujourd'hui.**

Aussi, en 2000, après avoir mûri la question et identifié un bon environnement, j'ai choisi de m'inscrire à l'Université de Londres, **University College London**, département de géomatique, en réponse à un appel à candidature sur un sujet de thèse porté par Leica Geosystems. Je me suis donc engagé en **doctorat sur le sujet de l'amélioration du GPS cinématique et le traitement des multi-trajets**, pendant les années 2001 à 2003. J'ai soutenu ma thèse en février 2004.

Depuis, j'ai bénéficié d'une pleine reconnaissance du LCPC et de la communauté scientifique de mon domaine, tant pour participer à des projets d'envergure (à l'instar du

projet européen CIRC) ou à l'ouvrage collectif « **GPS – localisation et navigation par satellites** » [DUQUENNE et al., 2005], que pour **encadrer des thésards** (deux, qui ont soutenu avec succès en 2010 : Ahmed Selloum, et 2012 : Ré-Mi Hage, et un troisième qui commencera en 2014). Ces thèses sont du domaine des ITS (cf. § 1.4).

1.3 – Localisation pour les Appareils à Grand Rendement : recherche sur le concept de fusion de données multi-capteurs pour des applications en temps différé

A partir de la fin des années 1990, et en parallèle des développements en robotique de chantier, j'ai travaillé sur la problématique de la localisation des véhicules routiers dits AGR pour Appareils à Grand Rendement, utilisés par les services gestionnaires des routes pour des contrôles des infrastructures, des patrouilles, diverses études.

Dans ce contexte, j'ai été responsable d'un projet de développement nommé **LocAGR** qui a ensuite été valorisé sous la forme d'un produit MPLC et d'un logiciel (**Gyrolis**). La problématique scientifique est celle de la **fusion de données multi-capteurs** (en l'occurrence : GPS, odomètre, gyromètre), aussi appelée : hybridation pour la localisation (chapitre 4). La précision recherchée est métrique.

Une spécificité des applications visées pour l'auscultation et la gestion de routes et le caractère non temps réel, c'est-à-dire temps différé, de la demande de localisation du véhicule. Ainsi, j'ai mis en œuvre non seulement des solutions classiques de type filtrage de Kalman, mais aussi plus originales de type **lissage de Rauch**.

1.4 – Localisation de véhicule pour les ITS : recherche sur le concept de fusion de données multi-capteurs pour des applications en temps réel

Depuis 10 ans environ maintenant, la Section Robotique de Chantier a migré vers le domaine des ITS (**systèmes de transport intelligent**), pour devenir Laboratoire GEOLOC de l'Ifsttar. Cette migration a été progressive mais déterminée, non sans efforts de la part des intéressés, ceux-ci solidement munis d'un background issu d'une expertise

acquise précédemment dans les technologies de navigation par satellites. Le besoin de localisation pour les ITS est temps réel, et métrique en termes de précision : la localisation « à la voie de circulation près » est recherchée.

Plusieurs projets coopératifs ont jalonné cette période, dont en particulier **CVIS** (Cooperative Vehicle Infrastructure Systems) pour lequel j'étais responsable LCPC du sous-projet POMA (POsitioning and MApping). Par ailleurs, cette période a été très riche en termes de production : 5 articles [**BÉTAILLE and TOLEDO, 2010**], [**TOLEDO et al., 2010**], [**TOLEDO et al., 2009**], [**SCHLINGELHOF et al., 2008**], [**ZAMORA et al., 2008**] de revues internationales à comité de lecture (plus 2 articles [**BÉTAILLE, 2008**], [**JOLY et al., 2008**] de revues nationales), une vingtaine de communications à des conférences et ateliers internationaux et nationaux, 2 post-docs (Fabien Ramos et Jean Laneurit), deux chercheurs invités de l'Université de Murcie (Miguel-Angel Zamora-Izquierdo et Rafael Toledo-Moreo) et 2 thèses dont j'ai été le conseiller d'étude :

- Ahmed Selloum, « Localisation multi-capteurs d'un véhicule routier sous contraintes cartographiques – Mise en oeuvre d'un filtre particulière et d'une modélisation multi-voies de la route par des clothoïdes », dans le cadre de CVIS ;

- Ré-Mi Hage, « Estimation du temps de parcours d'un réseau urbain par fusion de données de boucles magnétiques et de véhicules traceurs – Une approche stochastique avec mise en oeuvre d'un filtre de Kalman sans parfum », dans le cadre plus général des ITS et des applications des systèmes de navigation pour automobile à la métrologie du trafic. Cette thèse a inauguré une coopération étroite entre le LICIT et GEOLOC.

Plus récemment, et alors que l'hybridation mise en oeuvre jusque là supposait un pré-calcul des positions GPS par le récepteur (hybridation dite *lâche*), j'ai approfondi la question en positionnant nos recherches en amont dudit calcul, c'est-à-dire au niveau des mesures de code, ou pseudo-distances récepteur-satellites (hybridation dite *serrée*), lesquelles subissent les perturbations par trajets multiples fréquentes en ville et rédhibitoires pour certaines applications nécessitant une localisation à la voie de circulation près. Ces derniers travaux sont présentés au chapitre 5. La production est aussi importante : un article [**PEYRAUD**

et al., 2013] d'une revue internationale à comité de lecture (plus 2 articles de magazines internationaux IEEE [PEYRET et al., 2014], [BÉTAILLE et al., 2013a] et un article d'un magazine national [VOYER et al., 2013]), une dizaine de communications, 2 post-docs (Donnay-Fleury Nahimana et Florian Mougel) et la prochaine thèse pour 2014.

A présent, je suis chercheur à la frontière des domaines des ITS, de la robotique et des GNSS : ces communautés ont leurs propres sociétés, congrès, rendez-vous... ce qui donne beaucoup de diversité à mes activités. J'ai choisi de m'affilier à l'IEEE ITS Society, et c'est dans cette communauté que je publie le plus, mais j'ai aussi quelques références et beaucoup de satisfaction avec la communauté robotique (GDR) et GNSS (US Institute of Navigation et European Navigation Conference). Avec Galileo, ceci est plus vrai que jamais. **La localisation est en fait une brique technologique de la robotique mobile et des applications en transport intelligent**, et c'est ainsi que je décris mon propre domaine de recherche.

1.5 – Plan du mémoire

Le chapitre 2 du présent mémoire est tiré de l'ouvrage précité [DUQUENNE et al., 2005] et présente brièvement quelles sont les mesures GPS que j'utilise dans mes travaux (code, Doppler et phase) et les modes de localisation sur lesquels portent mes développements : GPS RTK pour la localisation des engins de chantier (chapitre 3) et GPS naturel hybridé avec d'autres capteurs et des cartes numériques (chapitres 4 et 5). Le chapitre 4 introduit les concepts d'hybridation (ou couplage) lâche et serrée ; lâche : la position est pré-calculée par GPS, avant hybridation – serrée : les pseudo-distances mesurées par GPS, voire les Doppler, servent directement à l'hybridation). Enfin, les données cartographiques sont d'abord utilisées en couplage lâche dans le chapitre 4, alors que dans le chapitre 5, elles le sont en couplage serré (ce qui permet notamment de traiter des perturbations du signal et de la mesure satellite par satellite).

Chapitre 2

SITUATION DES THEMATIQUES DE RECHERCHE PAR RAPPORT AU DIFFERENTS MODES DE POSITIONNEMENT GPS DYNAMIQUE

Ce chapitre est introductif : il présente les différents modes de positionnement GPS dynamique, parmi lesquels deux (dits : « naturel » et « cinématique temps réel ») seront développés par la suite parce que mes travaux de recherche les concernent plus particulièrement. Les modes de positionnement dynamique diffèrent des modes de positionnement statique seulement par le fait qu'on ne cherche pas un jeu de coordonnées terrestres invariant dans le temps (ou lentement variant dans le temps) : ces derniers intéressent les géodésiens, et donnent lieu à des calculs pour lesquels on agrège des observations satellitaires sur de longues durées. En dynamique, on cherche généralement une solution à chaque époque d'observation, typiquement à la seconde.

La principale référence utilisée pour écrire ce chapitre est [DUQUENNE et al., 2005], un ouvrage dont je suis co-auteur.

A ces modes de positionnement correspond une modélisation des mesures brutes GPS : pseudo-distances, obtenues à partir du code du signal GPS ou de la phase, et mesures Doppler. Cette modélisation est traitée dans ce chapitre.

De même, à ces modes de positionnement correspondent des solveurs, i.e. des algorithmes plus ou moins complexes de calcul de solutions de navigation à partir des mesures brutes. Ces solveurs vont de la simple inversion du problème aux moindres carrés, à des filtres statistiques, les plus sophistiqués incluant la résolution des ambiguïtés de phase. De plus, l'utilisation de ces mesures suppose de savoir calculer les positions et les vitesses des satellites, ce qui est loin d'être trivial. J'ai acquis ces compétences en même temps que Stéphane Durand [DURAND, 2003] pendant nos thèses, à partir du document standard [ICD-

*GPS, 1999]. Nous avons mis au point du code Matlab et divers utilitaires en C pour effectuer ces calculs de bout en bout à partir des données délivrées par les récepteurs que nous utilisons. Par la suite, **ces codes de calcul et solveurs ont été indispensables dans beaucoup d'études menée par le laboratoire, et valorisés dans différentes collaborations, notamment avec l'UTC Heudiasyc** (thèses d'Amadou Gning (2006), Olivier le Marchand (2010) et Clément Fouque (2010)), et à venir avec l'IRCCyN dans le cadre de recherches entreprises sur le véhicule autonome.*

Aujourd'hui, je suis en mesure de mettre en œuvre à partir de mesures GPS un ensemble d'outils que j'ai développés ou co-développés, partant des mesures brutes faites par les récepteurs jusqu'aux calculs de navigation, sans et avec hybridation avec d'autres capteurs, et même, pour les développements les plus récents, en conplage avec des cartes numériques.

2.1 – Rappel des notions fondamentales sur les mesures GPS

2.1.1 – Principe des mesures

Les mesures GPS sont à la base des mesures de temps de parcours des signaux, desquels on peut déduire des distances géométriques entre le récepteur et les satellites, lesquelles distances sont ensuite utilisées pour calculer des positions.

De manière très simplifiée, en passant sous silence les différents prétraitements d'amplification, de filtrage et de conversion analogique/numérique des signaux, on peut retenir que les temps de parcours sont mesurés au niveau du récepteur par des **corrélateurs** qui déterminent, pour chaque signal satellite, le décalage existant : soit entre le code reçu et une réplique de ce code générée par le récepteur, soit entre la phase de la porteuse et une réplique de cette phase. La figure 2.1 illustre le principe de la mesure du délai de propagation par corrélation de code.

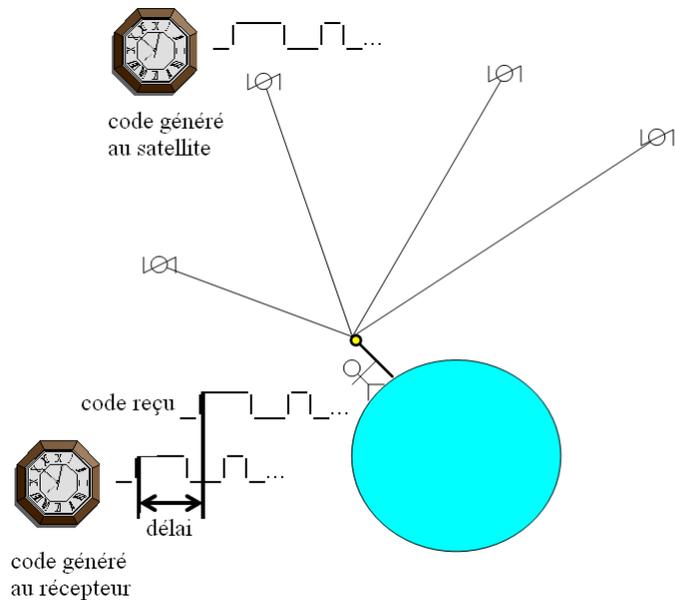


Figure 2.1 : le délai de propagation mesuré, par exemple de 75 ms, multiplié par la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s), donne la distance séparant l'émetteur du récepteur : 22500 km ici

Les corrélateurs font partie de fonctions électroniques plus complexes, appelées boucles de code et boucles de phase qui produisent les mesures et transmettent les messages de navigation décodés [WARD, 1996]. Ces boucles sont les composants essentiels de l'étage central des récepteurs GPS qui sont traditionnellement décomposés en cinq étages, chaque étage correspondant à des fonctions bien spécifiques :

- 1^{er} : antenne (réception, filtrage, sélection)
- 2^{ème} : tête radio-fréquence (conversion analogique/numérique, division de fréquence)
- 3^{ème} : traitement numérique (correlations, calcul des observations, décodage des messages)
- 4^{ème} : solveur de navigation (calcul des positions, des vitesses, du décalage d'horloge)
- 5^{ème} : interface d'application (enregistrement, communication, utilisation).

Le message de navigation et la mesure de phase (quand elle existe) sont produits en sortie de la boucle de phase (appelée également boucle de Costas), alors que la mesure de code est produite par la boucle de code¹.

Dans la suite, pour des raisons pédagogiques, nous introduirons les modèles d'observation de façon progressive. Nous commencerons par les modèles ultra-simplifiés, non réalistes parce qu'incomplets, puis nous les enrichirons progressivement en rajoutant les différents termes d'erreur jusqu'à l'obtention des modèles généralement utilisés dans la littérature, que nous appellerons « modèles conventionnels ».

2.1.2 – Le modèle ultra-simplifié d'observation de code

En faisant l'hypothèse que les deux codes sont générés par des électroniques **parfaitement synchronisées sur la même échelle de temps** et que le signal se propage en ligne droite à une **vitesse constante égale à la vitesse de la lumière**, le modèle ultra-simplifié de la mesure de code est :

$$\boxed{R_i^j = c \Delta t_i^j = \rho_i^j} \quad (2.1)$$

avec :

R_i^j la pseudo-distance mesurée par le code à l'instant t , entre le récepteur i et le satellite j , exprimée en mètres

Δt_i^j le temps de vol du signal entre le satellite j et le récepteur i , exprimée en secondes

ρ_i^j la distance géométrique entre l'antenne du récepteur i et l'antenne du satellite j , exprimée en mètres, et

c la vitesse de la lumière.

Dans ce cas ultra-simplifié, l'observation de code est égale à la distance géométrique.

¹ Des mesures Doppler sont aussi faites par les boucles de phase : c'est même une mesure relativement simple, présente sur des matériels bas-coût, alors que la mesure de phase, qui résulte de l'intégration dans le temps de l'effet Doppler, est délivrée par des récepteurs plus sophistiqués.

2.1.3 – Le modèle ultra-simplifié d’observation de phase

En faisant la même hypothèse en ce qui concerne la phase du signal, le modèle ultra-simplifié de la mesure de phase est :

$$\boxed{\lambda \cdot \Delta\phi_i^j = c \cdot \Delta t_i^j = \rho_i^j} \quad (2.2)$$

avec :

λ la longueur d’onde du signal, exprimée en mètres

$\Delta\phi_i^j$ le déphasage total entre la phase du signal reçu en provenance du satellite j et la phase du signal généré par le récepteur i, exprimée en cycles.

Nota : les phases en GPS sont traditionnellement exprimées en cycles.

Toutefois, étant donné le caractère périodique de la porteuse du signal, il est impossible de mesurer le déphasage total. Seul le déphasage modulo 2π peut être mesuré à chaque instant en même temps que le nombre entier de cycles mesurés depuis la mise sous tension du récepteur.

On écrit donc :

– à la mise sous tension du récepteur :

$$\Delta\phi(t_0) = \Delta\varphi(t_0) + N \quad (2.3)$$

avec :

$\Delta\varphi(t_0)$ la partie décimale du déphasage, comprise entre 0 et 2π , mesurée à l’instant t_0

N la partie entière de ce déphasage à t_0 , inconnue, appelée « **ambiguïté entière** » ;

– à un instant t quelconque :

$$\Delta\phi(t) = \Delta\varphi(t) + n(t) + N \quad (2.4)$$

avec :

$\Delta\phi(t)$ le déphasage entre 0 et 2π mesuré à l'instant t

$n(t)$ le nombre entier de cycles comptés depuis t_0

N la partie entière du déphasage à t_0 .

On note $\Phi(t) = \Delta\phi(t) + n(t)$ l'observation de phase.

L'expression 2.4 s'écrit alors $\Delta\phi(t) = \Phi(t) + N$ et le modèle représenté par l'équation 2.2 s'écrit finalement :

$$\boxed{\lambda\Phi_i^j = c.\Delta t_i^j - \lambda N_i^j = \rho_i^j - \lambda.N_i^j} \quad (2.5)$$

avec :

N_i^j ambiguïté entière de la mesure de phase entre le récepteur i et le satellite j .

La résolution des ambiguïtés de phase est une problématique en soi du GPS cinématique, qui va au-delà de ce manuscrit. Le lecteur francophone se référera à [DURAND, 2003], thèse qui elle-même renvoie à une littérature internationale abondante sur le sujet.

2.1.4 – La référence temporelle du GPS et les erreurs d'horloges

Le temps de référence continu est déterminé par des horloges atomiques (**TAI** : Temps Atomique International basé sur Cesium 133). La référence universelle, appelée **UTC** (*Universal Time Coordinated*), en est déduite par décalage régulier seconde par seconde afin d'être synchrone (à moins de 0,9 s) avec la rotation de la terre. La référence de temps du GPS dans laquelle toutes les mesures sont exprimées est le **temps GPS**, qui est une échelle continue de type TAI, qui coïncidait avec le temps UTC le 6 janvier 1980 à 0 h et en est maintenant (en 2013) décalé de 16 s. Elle est maintenue à 1 μ s (modulo 1 s) du temps UTC.

Chaque satellite embarque plusieurs horloges atomiques de grande précision qui lui permettent de piloter les oscillateurs utilisés dans son électronique et de dater avec précision les signaux transmis. Toutefois, l'horloge de chaque satellite est décalée par rapport au temps GPS : $t^j = t(GPS) - dt^j$ (par convention, le décalage est considéré comme négatif).

Les récepteurs possèdent également des horloges, mais de qualité standard et, bien entendu, décalées par rapport au temps GPS : $t_i = t(GPS) - dt_i$.

Etant donné que Δt_i^j s'écrit $\Delta t_i^j = t_{Ri} - t_E^j$: décalage mesuré entre le temps de réception du signal dans l'échelle de temps du récepteur i et le temps d'émission dans l'échelle de temps du satellite j , et que :

$$t_{Ri} = t_R(GPS) - dt_i \quad \text{et} \quad t_E^j = t_E(GPS) - dt^j .$$

on peut écrire :

$$\Delta t_i^j = t_R(GPS) - t_E(GPS) + dt^j - dt_i \quad (2.6)$$

et les modèles d'observation de code et de phase, que nous appellerons **modèles simplifiés**, qui tiennent compte cette fois de la non synchronisation des horloges, s'écrivent respectivement :

$$\begin{aligned} R_i^j &= c \cdot \Delta t_i^j = c[t_R(GPS) - t_E(GPS)] + c(dt^j - dt_i) \\ R_i^j &= \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) \end{aligned} \quad (2.7)$$

et :

$$\begin{aligned} \lambda \Phi_i^j &= c \cdot \Delta t_i^j - \lambda N_i^j = c[t_R(GPS) - t_E(GPS)] + c(dt^j - dt_i) - \lambda N_i^j \\ \lambda \Phi_i^j &= \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) - \lambda N_i^j \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dans les équations de mesure, les décalages d'horloge des récepteurs sont des inconnues au même titre que les inconnues principales qui sont les coordonnées du

récepteur. Dans la résolution du problème de positionnement, ils sont soit résolus soit éliminés par combinaison des observations. Les décalages d'horloge des satellites sont, quant à eux, soit partiellement modélisés soit éliminés par combinaison des observations.

2.1.5 – La propagation des signaux et l'influence de l'atmosphère

La propagation des signaux est affectée par la traversée de l'atmosphère de deux façons :

– du fait de la variation de la vitesse de propagation des ondes en fonction de l'indice du milieu ($v = c/n$, n étant l'indice du milieu), les signaux sont retardés ou avancés. Ce délai s'exprime différemment suivant la nature de la couche atmosphérique traversée (ionosphère ou troposphère) et suivant que l'on considère la phase de la porteuse ou le code modulant cette porteuse. La phase est retardée et le code est avancé ;

– du fait de la réfraction à travers des couches de l'atmosphère d'indice différents, le trajet de propagation des ondes, appelé « trajet optique », est différent du « trajet géométrique » porté par la ligne droite passant par le satellite et le récepteur ; cet allongement est appelé « allongement géométrique ».

L'allongement atmosphérique s'exprime finalement sous la forme suivante :

$$\delta\rho = \delta\rho^{iono} + \delta\rho^{tropo} + \delta\rho_g$$

avec :

$\delta\rho^{iono}$ l'allongement ionosphérique

$\delta\rho^{tropo}$ l'allongement troposphérique

$\delta\rho_g$ l'allongement géométrique.

À un allongement $\delta\rho$ correspond un délai $\delta\rho/c$, par rapport au temps de propagation dans le vide.

En première approximation, l'allongement géométrique peut être considéré comme négligeable par rapport aux allongements ionosphérique et troposphérique.

L'**ionosphère** étant un milieu dispersif, le **code** se propage avec une vitesse dite « vitesse de groupe » (due à l'étalement du spectre provenant de la modulation de phase), et on a, au premier ordre :

$$\delta\rho_{gr}^{iono} = \delta\rho^{iono} = \frac{40,28.TEC}{f^2} \quad (2.9)$$

La **phase** (porteuse) se propage avec une vitesse différente appelée « vitesse de phase » et on a, au premier ordre :

$$\delta\rho_{ph}^{iono} = -\delta\rho^{iono} = -\frac{40,28.TEC}{f^2} \quad (2.10)$$

avec $TEC = \int_{S^{iono}} N_e ds$, N_e étant la densité électronique de l'ionosphère, variable le long du chemin optique S^{iono} de l'onde. TEC signifie *Total Electron Content*. Les paramètres permettant le calcul du TEC sont radiodiffusés par GPS. Ils dépendent du cycle solaire (d'une durée proche de 11 années).

La **troposphère** étant un milieu non dispersif, on a, pour le **code** comme pour la **phase** :

$$\delta\rho_{gr}^{tropo} = \delta\rho_{ph}^{tropo} = \delta\rho^{tropo} \quad (2.11)$$

On utilise classiquement le modèle de Hopfield (avec les coefficients de Essen et Froome et des paramètres météorologiques standardisés par régions du globe).

2.1.6 – Les trajets multiples

Sur les premiers et les derniers mètres de leur trajet, les ondes GPS sont également affectées par des perturbations intervenant dans les mesures. Ce sont les trajets multiples

provenant de réflexions ou de diffractions à proximité des antennes d'émission ou de réception. Les ondes réfléchies ou diffractées se mélangent à l'onde directe et en modifient à la fois l'amplitude et la phase, ceci de façon variable suivant les positions des satellites et du récepteur. Cet effet se traduit par un autre terme dans les équations d'observation, différent suivant le type de mesures (code ou phase), et particulièrement difficile à modéliser.

Nous noterons $\delta\rho^m$ et $\delta\rho^\mu$ les termes d'erreur de propagation respectivement sur le code et sur la phase.

2.1.7 – Modèles d'observation conventionnels

Finalement, en tenant compte des erreurs dues à la propagation atmosphérique et aux trajets multiples, les modèles d'observation conventionnellement utilisés pour le code et la phase sont les suivants :

Observation de code (pseudo-distance) :

$$\boxed{R_i^j = \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) + \delta\rho_i^{j,iono} + \delta\rho_i^{j,tropo} + \delta\rho_i^{j,m} + e_i^j} \quad (2.12)$$

Observation de phase :

$$\boxed{\lambda\Phi_i^j = \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) - \lambda N_i^j - \delta\rho_i^{j,iono} + \delta\rho_i^{j,tropo} + \delta\rho_i^{j,\mu} + \varepsilon_i^j} \quad (2.13)$$

Les termes d'erreur e_i^j et ε_i^j représentent respectivement les bruits de mesure des récepteurs sur le code et sur la phase (en particulier les erreurs des corrélateurs) et sont traités dans les équations comme des bruits blancs.

Ces modèles peuvent être considérés comme les modèles des mesures brutes disponibles en sortie des récepteurs GPS.

Suivant le type de récepteur, les observations utilisées sont différentes :

- sur les récepteurs civils d'entrée de gamme mono-fréquence, seule la mesure de code C/A sur la fréquence L1 est utilisée pour le calcul de la position,
- sur les récepteurs professionnels moyenne gamme, les mesures de code (C/A) et de phase (Φ_1) sur L1 sont utilisées,
- sur les récepteurs professionnels de qualité géodésique, les mesures de code C/A, sur certains² les mesures de code P sur L1 et L2 (notés P₁ et P₂) et les 2 mesures de phase (Φ_1 et Φ_2) sont utilisées,
- sur les récepteurs militaires, sont utilisés principalement les mesures de code P₁ et P₂.

2.2 – Les différents modes d'utilisation du GPS en dynamique

Les modes d'utilisation du GPS sont extrêmement nombreux, suivant les mesures utilisées, le mode de fonctionnement (naturel ou différentiel) et le mode de mise en œuvre (temps réel ou temps différé).

Le Tableau 2.1 ci-dessous résume les différents modes d'utilisation du GPS pour la localisation en général et les mesures utilisées.

² Le code militaire P est chiffré par ajout d'un code W prévu pour résister au leurrage, ce qui le rend illisible pour les utilisateurs civils qui ne possèdent pas la clé de déchiffrement. Cependant, certains récepteurs civils performants, grâce à des techniques particulières qui ont été développées pour extraire la phase sur L2 (*Z-tracking*), délivrent également les observables P₁ et P₂.

| | | | | | C/A | Φ_1 | Φ_2 | P ₁ | P ₂ | |
|-----------------|---|-------------------------------|---|---|-----|----------|----------|----------------|----------------|---|
| GPS | Naturel (les mesures d'un seul récepteur sont utilisées) | Code seul | Temps différé | Possible, mais rarement utilisé | X | | | | | |
| | | | Temps réel | GPS naturel civil standard | X | | | | | |
| | | | | GPS naturel militaire | | | | X | X | |
| | | Code lissé par phase | Temps différé | Possible, mais rarement utilisé | X | X | | | | |
| | | | Temps réel | GPS naturel civil lissé par la phase | X | X | | | | |
| | | Code + Phase | Temps différé | Possible mais sans réel intérêt | X | X | X | X | X | X |
| | Temps réel | | Possible mais sans réel intérêt | X | X | X | X | X | X | |
| | Différentiel (les mesures d'au moins deux récepteurs sont utilisées) | Code seul | Temps différé | Possible, mais rarement utilisé | X | | | | | |
| | | | Temps réel | DGPS standard | X | | | | | |
| | | Code lissé par phase | Temps différé | DGPS lissé par la phase | X | X | | | | |
| Temps réel | | | DGPS lissé par la phase | X | X | | | | | |
| Code + Phase | | Temps différé | Statique | X | X | X | (X) | (X) | | |
| | | | Cinématique | X | X | (X) | (X) | (X) | | |
| | | Temps réel | Statique | X | X | X | (X) | (X) | | |
| | | | Cinématique temps réel ou <i>Real-Time Kinematic</i> (RTK) | X | X | (X) | (X) | (X) | | |

Tableau 2.1 : les différents modes d'utilisation du GPS pour la localisation

Six modes peuvent être employés pour le positionnement dynamique :

1^{er} : le mode **GPS naturel civil standard**, dit aussi « de navigation », utilisé principalement en temps réel (SPS = *Standard Positioning Service*)

2^{ème} : le mode **GPS naturel militaire**, utilisé exclusivement en temps réel (PPS = *Precise Positioning Service*)

3^{ème} : le mode **GPS naturel lissé par la phase**, amélioration du mode standard

4^{ème} : le mode différentiel de code, ou **DGPS**, utilisé en temps réel ou différé

5^{ème} : le mode **DGPS lissé par la phase**, utilisé en temps réel ou différé

6^{ème} : le mode **GPS cinématique**, utilisé en temps réel ou différé.

2.3 – Organisation de la suite du mémoire

Le prochain chapitre (chapitre 3) est consacré au GPS cinématique, c'est à dire au mode 6 cité ci-dessus. En effet, il est **le mode de positionnement dynamique utilisé en robotique de chantier et pour lequel j'ai eu une contribution significative, tant sur le plan expérimental avec le banc d'essais SESSYL dont j'étais en charge comme ingénieur au LCPC, que sur le plan théorique avec mes travaux en thèse à University College London.**

Le chapitre 4 présente **quelles solutions de navigation sont mises en œuvre dans le domaine des ITS : systèmes de transport intelligent.** Celles-ci se rapportent au mode 1 généralement. Même si le mode différentiel, et éventuellement le mode lissé par la phase, sont utilisés par certains récepteurs, un tel usage est marginal pour les applications automobiles, qui touchent ici un marché de masse et des récepteurs sans sophistication aucune : des chipsets à quelques euros sont courants dans le domaine.

On soulignera dans ce chapitre les difficultés d'utilisation du GPS, surtout en ville, et on montrera qu'elles sont telles qu'il est nécessaire de faire appel à une **hybridation avec des systèmes de navigation inertielle** pour obtenir les informations de position adéquates ou la trajectoire souhaitée. Par ailleurs, **les données cartographiques sont essentielles pour les ITS et mon apport sur ce point sera traité d'une part dans le chapitre 4 à un premier niveau, et d'autre part dans le chapitre 5 à un niveau beaucoup plus avancé.**

Chapitre 3

CONTRIBUTIONS A LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE EN LOCALISATION POUR LA ROBOTIQUE DE CHANTIER

Les exigences de précision, en particulier en nivellement, étant décimétriques voire centimétriques, seul le GPS cinématique temps réel, ou RTK, a permis d'égaliser les moyens traditionnels de topographie sur les chantiers : points de repères matériels divers (piquets, fils tendus), niveaux et plans laser, et surtout stations totales (tachéomètres). Au début des années 1990, ce mode de positionnement était inexistant. Les constructeurs GPS l'ont mis au point à cette période, et le LCPC disposait d'un banc (SESSYL) conçu spécialement pour en évaluer les performances et potentialités sur des chantiers de génie civil et travaux publics.

Mon activité sur cette problématique a généré :

- une méthodologie, tant pour l'étalonnage statique et dynamique, que pour la mise en œuvre d'essais, concernant la station SESSYL, reconnue internationalement [BÉTAILLE, 2003] (distinction reçue de l'ION, Institute of Navigation) ;

- un rayonnement du laboratoire sur la thématique de la robotique de chantier, ceci particulièrement abouti dans le projet européen CIRC : dans ce projet, mon travail d'expertise sur les systèmes de localisation a été important et productif au sein du projet (rapports d'essais SESSYL de récepteurs GPS RTK et du LASERGUIDE) et dans la communauté internationale [PEYRET et al., 2000], avec une valorisation dans les travaux de thèse de Denis Bouvet à l'IRCCyN entre 1997 et 2000 [BOUVET et al., 2001], [BOUVET et al., 2000] ;

- *une maîtrise des calculs de navigation GPS, acquise conjointement avec Stéphane Durand en thèse entre 1999 et 2002 dans l'équipe de François Peyret, et toujours très utile dans nos recherches aujourd'hui ;*

- *une contribution personnelle dans ma thèse, soutenue en février 2004, montée en partenariat avec University College London, Leica Geosystems et le LCPC, principalement sur la modélisation des multi-trajets perturbant les mesures de phase. Un article [BÉTAILLE et al., 2006] de revue internationale à comité de lecture et trois communications à des conférences de l'ION en 2003 [BÉTAILLE, 2003], [BÉTAILLE et al., 2003a], [BÉTAILLE et al., 2003b] ainsi qu'un transfert vers Leica de codes de calcul issus de ma thèse constituent les principales productions des recherches entreprises alors.*

3.1 – Sessyl

SESSYL a pour but principal l'évaluation des performances des systèmes de localisation qui sont mis au service des applications du domaine de la robotique mobile en général et de la robotique de chantier en particulier.

On entend par systèmes de localisation les matériels qui délivrent (en temps réel ou en temps différé) une position et/ou des angles d'orientation et d'attitude. Une suite de positions et/ou d'angles constitue un chemin. Si ces informations sont datées, une telle suite constitue une trajectoire. Une trajectoire s'entend ici comme une suite de positions et/ou d'angles datées. Avec SESSYL, on comparait les spécimens testés à la référence que fournissait le banc, aussi bien en termes de comparaison de chemin, qu'en termes de comparaison de trajectoire.

Les matériels testés dans l'histoire de ce banc d'essais ont principalement été des antennes et récepteurs GPS, mais pas exclusivement : des systèmes à principe optique ont aussi été étudiés, comme le LASERGUIDE : de nombreux rapports de littérature grise sont disponibles, et concernant le LASERGUIDE et ses applications en guidage de machines de chantier, le lecteur pourra se référer aux publications de Denis Bouvet en thèse à l'IRCCyN [BOUVET et al., 2001], [BOUVET et al., 2000], publications qui reprennent les résultats des essais SESSYL du système que j'ai menés.

SESSYL représentait un ensemble relativement complexe, composé à la fois d'une infrastructure de génie-civil sur lequel repose un monorail (structure toujours en place sur le site) et un robot mobile, capable d'évoluer sur ce monorail et doté d'une plateforme robotisée à 3 degrés de liberté :

- déplacement vertical ;
- variation de tangage ;
- variation de roulis.

Les travaux auxquels j'ai participé lors de la mise en œuvre de ce banc ont principalement concerné l'étalonnage statique de l'infrastructure et du robot (participation à l'encadrement des stages ingénieur d'Eric Guillo, 1994, et de Luc Guérin, 1995) et [PEYRET et al., 1996], ainsi que l'étalonnage dynamique de ce dernier (encadrement du stage licence de Vanessa Martineau, 2000, et participation à l'encadrement du stage ingénieur de Charles-Eric Lemaire, 1999). **J'ai été responsable qualité de ce grand équipement du LCPC pendant toute sa durée d'exploitation [NOTICE SESSYL].** De même, j'étais chargé de la définition des essais avec les clients, de leur mise en œuvre et de la rédaction des comptes-rendus des études livrées. La figure 3.1 montre le banc et le dispositif expérimental monté pour nos recherches sur les multi-trajets (cf. § 3.3) : **la méthodologie mise en œuvre alors a reçu une distinction par l'ION [BÉTAILLE, 2003].**

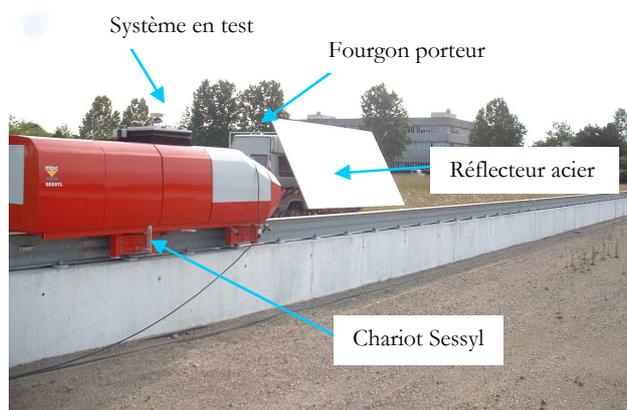


Figure 3.1 : SESSYL sur son monorail près du panneau réflecteur

3.2 – La précision du GPS cinématique

Le positionnement par satellites repose sur le principe géométrique de trilatération à partir de la mesure des temps de vol d'un signal électromagnétique émis par les satellites en direction de la Terre, et reçu par l'utilisateur.

Dans ses applications les plus précises, le GPS est utilisé en différentiel, c'est-à-dire entre stations d'observation plus ou moins proches de sorte d'éliminer les modes commun d'erreur dus à la traversée de l'atmosphère, et en cinématique, terme consacré pour désigner qu'on mesurera la distance non-seulement « grossièrement » au moyen du code du signal, mais surtout « finement » à partir de la porteuse elle-même dudit signal. Par grossièrement, on entend communément à mieux que le mètre : c'est la précision, en régime permanent, des boucles de poursuite (« tracking » en anglais) à corrélation de code des récepteurs standard, alors que finement signifie ici à mieux que le centimètre : les boucles de poursuite à corrélation de phase atteignent en effet cette précision dans la mesure de distance.

Nota : cette distance est ambiguë, et une littérature abondante existe sur la question de la résolution des ambiguïtés. Dans l'équipe, cette question a été activement traitée en deuxième partie de la thèse de Stéphane Durand [DURAND, 2003], avec qui j'ai appris l'essentiel du fonctionnement du GPS.

Dans le bilan des erreurs entachant la mesure de distance, outre les délais atmosphériques, il reste principalement les perturbations locales de propagation, aussi appelées multi-trajets. Il s'agit de diffraction et / ou de réflexion des ondes électromagnétiques sur des obstacles à proximité de l'antenne. Les trajets multiples, tant du point de vue de la mesure de code que du point de vue de la mesure de phase, ont été particulièrement bien décrits par [BRAASCH, 1996] ou [WEILL, 1997].

Pendant le stage ingénieur de Gaëtan Hintzy, **nous avons notamment adressé cette question de recherche directement sur des machines de chantier** (cf. figure 3.2) dont

on relevait le niveau au théodolite, en même temps qu'on les positionnait par GPS. L'article [PEYRET et al., 2000] a été publié à partir des travaux auxquels j'ai contribué alors : il est encore régulièrement cité dans la communauté robotique de chantier.



Figure 3.2 : chantier expérimental monté avec Colas pendant le stage de Gaëtan Hintzy

On y montrait que l'erreur est signée (c'est-à-dire positive ou négative, autrement dit pas toujours positive), et que cette signature se répète sur un même lieu quand la constellation GPS se reproduit (i.e. tous les jours sidéraux).

La figure 3.3 montre que les erreurs RTK (en altimétrie sur cette figure) se reproduisent, ici une ligne de base statique d'un kilomètre, sur plusieurs jours, tant que la constellation ne varie pas trop. Des changements dans la constellation sont visibles sur les graphes du bas (nombre de satellites et PDOP).

La problématique soulevée précédemment, i.e. comment réduire les multi-trajets, constitue le verrou technologique des applications précises et temps réel du GPS, donc le contexte de nombreux travaux scientifiques autour des années 2000 (dont ma thèse entreprise en 2001, cf. § 3.3).

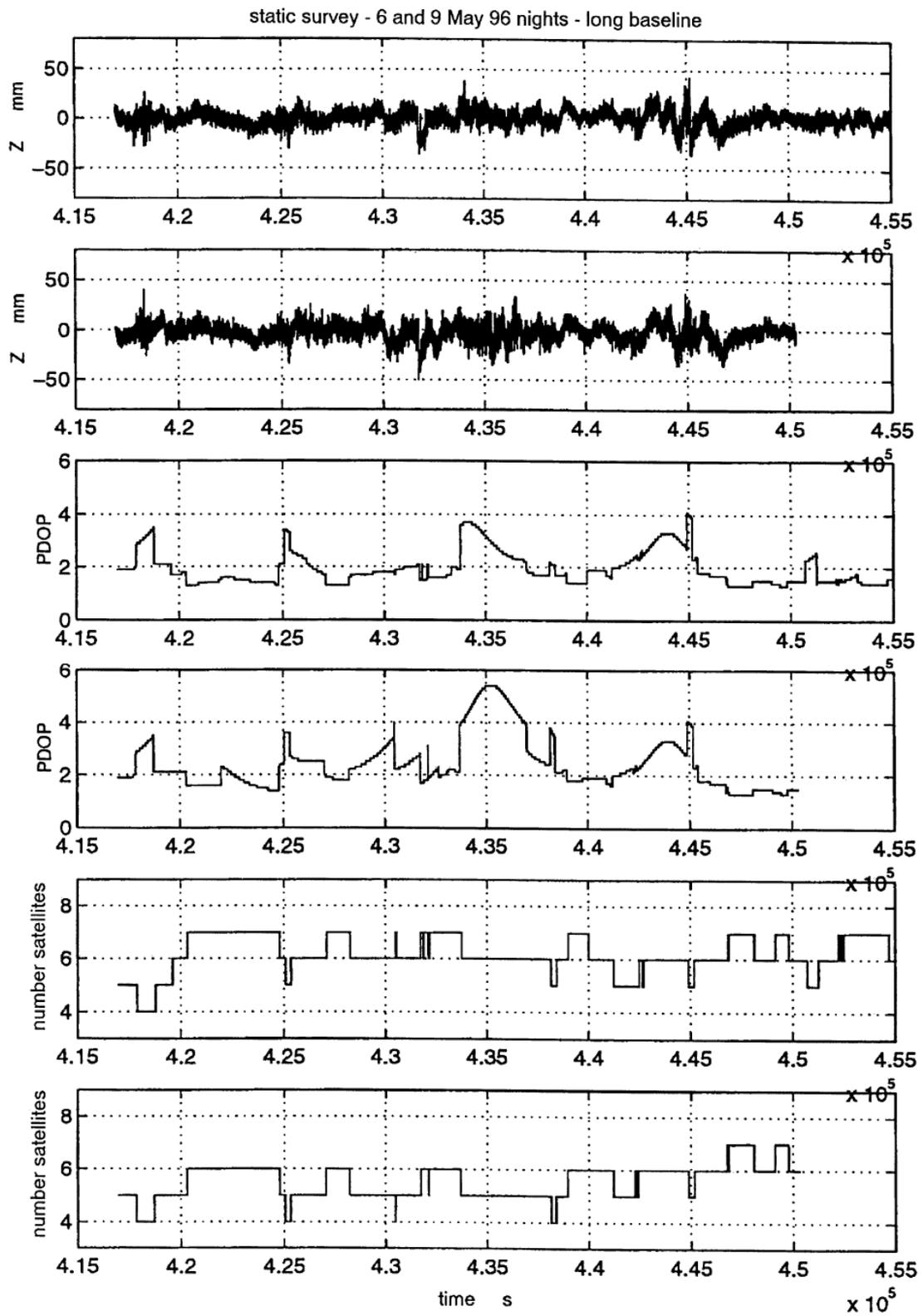


Figure 3.3 : illustration de la répétition des multi-trajets sur plusieurs jours

Les investigations portaient tous azimuts : sur les corrélateurs (cf. § 3.3) avec les **brevets Leica objets de mes propres investigations [BÉTAILLE et al., 2006]**, mais aussi antérieurement : [VAN NEE, 1992], [TOWNSEND et al., 1995], [GARIN and ROUSSEAU, 1996], [McGRAW and BRAASCH, 1999], [CHAGGARA et al., 2002], sur des dispositifs multi-antennes [RAY, 2000], ou des approches purement liée au calcul de navigation [COMP and AXELRAD, 1996], [BRUNNER et al., 1999], [BARNES, 2000].

3.3 – Problématique de recherche développée en thèse de doctorat

Le sujet et le contexte se résument ainsi : **améliorer la précision du GPS cinématique par modélisation stochastique des multi-trajets**. L'intitulé initial du sujet est en effet : « Improving the accuracy of RTK GPS through multipath stochastic modelling ».

J'ai effectué cette thèse à University College London (UCL) – Geomatic Engineering Department, sous la direction du Pr. Paul Cross, avec François Peyret pour conseiller d'étude LCPC. Les partenaires industriels étaient Leica Geosystems (Dr. Hans-Jürgen Euler) et le LCPC (je suis en effet resté salarié du LCPC pendant les trois années 2001, 2002 et 2003 pendant lesquels j'ai travaillé sur ce sujet). On peut dire que le montage s'apparentait à une thèse CIFRE tripartite, UCL, Leica et le LCPC.

Le GPS RTK (Real Time Kinematic) est utilisé de façon croissante pour des applications de haute précision en travaux publics (précision centimétrique) telles que l'implantation sur les chantiers de construction et le contrôle d'engins tels les bulldozers, niveleuses ou finisseurs routiers. University College London et Leica Geosystems ont proposé en 2000 un sujet de thèse qui correspond à une problématique étudiée au LCPC dans le cadre de ces applications, à savoir l'amélioration de la précision. En effet, les spécifications en termes de précision (notamment altimétrique) des applications visées justifient encore qu'on cherche à améliorer les performances du GPS RTK.

Les travaux ont donné lieu à une coopération entre l'UCL (encadrement académique), Leica Geosystems (Heerbrugg, Suisse) constructeur GPS, qui a financé le projet et fourni

les matériels GPS prototypes pour les essais, et le LCPC (centre de Nantes), qui a mis à disposition son banc d'essais des systèmes de localisation SESSYL.

Cette thèse concerne la modélisation des trajets multiples en mesure de phase par GPS. Dans les applications les plus précises du GPS, la phase de la porteuse constitue la mesure fondamentale et la source d'erreur principale résulte de trajets multiples (réflexion et diffraction des ondes électromagnétiques sur des surfaces proches de l'antenne). Le traitement de signal et les statistiques sont les principales disciplines scientifiques dans lesquelles s'inscrivent nos travaux, mais aussi l'électronique et la physique.

A l'issue de l'étude bibliographique (validée le 24 avril 2002 par Pr Paul Cross et un jury composé de plusieurs professeurs du département Geomatic Engineering), **les travaux se sont clairement orientés vers la modélisation des multi-trajets dans les mesures et leur traitement par des méthodes de filtrage adaptatif.** L'apport technologique dû à plusieurs brevets Leica (« Phase Multipath Mitigation Window Correlator ») par [STANSELL et al., 1996], [HATCH et al., 1997], [HATCH, 2000], [STANSELL et al., 2000] tout à fait essentiel dans le contexte explique aussi cette orientation. L'aspect stochastique présent dans le sujet tel que formulé initialement (c'est à dire la manière de combiner les mesures affectées ou non par des trajets multiples pour calculer la position) n'a donc pas été traité pendant la thèse. Ainsi, l'intitulé du sujet a évolué jusqu'au titre final du manuscrit : « Assessment and Improvement of the Capabilities of a Window Correlator to Model GPS Multipath Phase Errors ». En français : évaluation et amélioration des capacités du corrélateur Phase Multipath Mitigation Window (PMMW) à modéliser les erreurs de phase par trajets multiples.

Ce corrélateur repose sur une nouvelle technique d'échantillonnage du signal, conçue pour estimer l'erreur de phase par trajets multiples. La thèse contient une bibliographie sur l'ensemble des techniques de traitement des multi-trajets, et elle présente particulièrement un résumé de la technique PMMW déposée par Leica.

Les principales contributions concernent :

- **Une analyse mathématique rigoureuse des multi-trajets**, en partant de la physique du phénomène, jusqu'au procédé de mesure de phase lui-même, en particulier celui basé sur le corrélateur PMMW.
- **La conception d'une méthodologie générale de tests** dans un environnement contrôlé pour évaluer les performances de techniques de traitement des trajets multiples.
- **La réalisation d'essais en vraie grandeur** au LCPC en statique en en cinématique et l'évaluation des performances du corrélateur PMMW et de ses limitations. Deux campagnes d'essais ont eu lieu en 2002 et 2003.
- **Les premières investigations en vue de développer une nouvelle technique temps réel de traitement des multi-trajets, basée sur une combinaison de différents observables de ces trajets multiples**, incluant le rapport signal sur bruit, les mesures faites par le corrélateur PMMW et une estimation des erreurs de code par multi-trajets, obtenues en GPS bi-fréquence. Le point clé de l'algorithme proposé est sa capacité à dépasser la limitation principale de la technique PMMW, à savoir son inefficacité en cas de source de multi-trajets proche. Dans ce cas, cet algorithme conduit à une amélioration des mesures de phase de près de 20%, alors que les corrections directes PMMW sont quasiment sans effet.

J'ai soutenu ma thèse le 17 février 2004 à Londres, auprès des deux rapporteurs : Dr. David Welsh (University of Leeds) et Pr. Washington Ochieng (Imperial College).

Trois articles ont été publiés en 2003 aux congrès ION de l'institut de navigation des Etats-Unis (qui fait référence mondiale en matière d'innovation en technique de positionnement par satellites), plus un article au congrès GNSS 2003 au Japon en 2003 [BÉTAILLE, 2003], [BÉTAILLE et al., 2003a], [BÉTAILLE et al., 2003b] et [CROSS et al., 2003].

L'intégralité du code informatique développé ainsi que les mesures enregistrées et traitées lors des campagnes d'essais ont été demandés par Leica pour de futurs développements et lui ont été transférés en 2004.

En plus des quatre articles publiés au cours de la thèse à la fois à différents congrès ION aux Etats-Unis et au congrès GNSS 2003 au Japon, j'ai écrit dans l'année qui a suivi un article publié en 2006 dans la revue IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems qui présente l'ensemble de ma contribution [BÉTAILLE et al., 2006]. Celle-ci consiste d'une part en la conception d'une méthodologie originale d'évaluation statique et dynamique des multi-trajets GPS ; d'autre part en la proposition d'un filtre permettant de diminuer l'effet perturbateur des multi-trajets sur les mesures de phase avec une atténuation moyenne de 10%.

3.4 – Bilan scientifique en robotique de chantier

Résumé des contributions scientifiques en localisation pour la robotique de chantier : **une méthodologie expérimentale appliquée à l'étude des perturbations de la mesure de phase par multi-trajets a été apportée. Ces perturbations ont été étudiées, donnant lieu à la proposition d'un algorithme de correction des erreurs de phase applicable en temps-réel. Cette correction est notamment efficace (avec un gain de 20% par rapport à un corrélateur PMMW spécialisé) quand les multi-trajets sont issus de réflecteurs proches. [BÉTAILLE et al., 2006], aux *Transactions IEEE AES*, est la principale publication se référant à ces travaux.**

Les articles marquant ma contribution pendant ces quelque dix années de recherche en robotique de chantier sont : [BÉTAILLE et al., 2006] pour mes résultats de thèse, [BÉTAILLE, 2003] pour la méthodologie expérimentale développée pour l'étude des multi-trajets en GPS cinématique, article distingué par l'ION, [PEYRET et al., 2000] pour la première approche du guidage GPS RTK des machines de chantier.

La thèse a renforcé les connaissances relatives à la technologie des récepteurs GPS, et à la problématique du positionnement statique et dynamique dans un environnement perturbé, où la propagation subit de multiples réflexions / diffractions. Personnellement, j'ai consolidé mon expertise, et gagné un certain rayonnement, ce qui m'a permis de contribuer avec Françoise Duquenne, Serge Botton, François Peyret

et Pascal Willis à la réédition de l'ouvrage collectif « **GPS – localisation et navigation par satellites** » qui fait référence en France en la matière [DUQUENNE et al., 2005]. Dans cet ouvrage, j'ai plus particulièrement traité des questions relatives au mode de positionnement précis (utilisant la phase) et aussi d'aspects plus spécifiques comme la détermination d'attitude (roulis, tangage et lacet) par GPS ou encore la navigation hybride GPS et inertiel.

Dès lors, j'ai commencé à **diffuser ces connaissances** à travers une quinzaine d'heures d'enseignement sur le fonctionnement des récepteurs GPS, à des étudiants / élèves ingénieurs en traitement du signal et systèmes embarqués à l'UTC et à l'ESEO.

De plus, j'ai participé en tant qu'expert en juin 2008 au jury des entretiens pour le recrutement d'un CR2 en géodésie et géodynamique au LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie de l'IGN). **Enfin, le LAREG continue depuis de me solliciter pour participer à son comité scientifique et technique**, ce que j'ai toujours accepté.

Chapitre 4

DEVELOPPEMENT DE SOLUTIONS DE LOCALISATION DE VEHICULE PAR FUSION DE DONNEES MULTI-CAPTEURS ET CARTES

Ce chapitre concerne des applications de la localisation aux ITS, systèmes de transport intelligent. Les exigences fonctionnelles de ces systèmes sont assez différentes de celles des de la robotique de chantier : la précision recherchée est moindre, i.e. métrique (contre centimétrique), en continu même en ville (alors que les chantiers robotisés sont plutôt en rase campagne), à moindre coût (les applications de masse visées n'ont plus rien à voir avec les équipements sophistiqués qu'on peut mettre en œuvre sur des engins de chantier).

*Nous sommes donc sur du **GPS naturel et non plus cinématique (cf. § 2.2)**, qu'il convient d'hybrider pour assurer la continuité de positionnement. Nombre de mes travaux portent sur l'hybridation, aussi je commence ce chapitre par présenter les notions et comment je les ai mises en œuvre et développées dans différents contextes.*

*Premier contexte, celui des Appareils à Grand Rendement (AGR) pour l'auscultation et la gestion des routes. **Les produits sont un prototype issu d'une Opération de Développement du LCPC : LocAGR, et le logiciel Gyrolis [BÉTAILLE, 2008].** Le positionnement est temps différé, ce qui permet du lissage en plus du filtrage temps réel.*

Deuxième contexte, celui des véhicules routiers en général, pour lesquels on cherche un positionnement en temps réel, pour le marché de masse des applications ITS.

*Dans ce contexte, le projet européen CVIS (Cooperative Vehicle Infrastructure System) a été très structurant, amenant des coopérations nouvelles pour le laboratoire avec Navteq, Logica, le DLR, en plus des coopérations existant déjà au niveau national comme avec l'UTC, les Mines, l'INRLA ou Intempora dans le projet ARCOS. **J'ai co-encadré deux post-doctorants sur financement CVIS :***

Fabien Ramos et Jean Laneurit, avec qui nous sommes à l'origine des premiers travaux sur la localisation aidée par une carte précise multi-voies [SCHLINGELHOF et al., 2007].

Les produits des recherches entreprises dans ce contexte sont principalement :

- **deux thèses, pour lesquelles j'étais conseiller d'étude** ; la thèse d'Ahmed Selloum (soutenue en novembre 2010) porte spécifiquement sur la problématique de la localisation pour les ITS ; alors que celle de Ré-Mi Hage (soutenue en septembre 2012) concerne le calcul du temps de parcours d'itinéraires urbains obtenus à partir de véhicules traceurs. La thèse de Ré-Mi Hage se situe relativement loin de la colonne vertébrale de ce manuscrit centré sur la brique technologique localisation, c'est pourquoi je ne ferai que la citer ici. Les contributions d'Ahmed Selloum au contraire seront précisées (cf. § 4.3) ;

- **un nombre conséquent de publications, fruits des coopérations au sein de CVIS, mais aussi avec l'IRCCyN** (en particulier Eric le Carpentier, co-encadrant avec moi Cyril Joly en master recherche puis Ahmed Selloum en thèse) et **avec l'Université de Murcie** (deux chercheurs invités : Miguel-Angel Zamora-Izquierdo et Rafael Toledo-Moreo reçus respectivement 3 mois et un an dans le laboratoire, et en retour Cyril Joly en séjour à Murcie quelques semaines pendant son stage). Les principales références avec ces co-auteurs sont : [BÉTAILLE and TOLEDO, 2010], [TOLEDO et al., 2010], [SELLOUM et al., 2010], [TOLEDO et al., 2009], [ZAMORA et al., 2008] et [JOLY et al., 2008] ;

- **la participation à des thèses** (comités de suivi des doctorants UTC : Amadou Gning (2006), Olivier le Marchand (2010) et Clément Fouque (2010)) **et des projets nationaux** (ARCOS, CIEC, EOTR) comme expert tant en navigation et fusion de données pour la localisation qu'en métrologie de la trajectoire. En même temps qu'une **amélioration de la précision** était obtenue par les recherches pendant CVIS ou avec Cyril joly et Ahmed Selloum, une **avancée significative à laquelle j'ai pu contribuer concerne l'intégrité** (cf. § 4.6) au sein des projets CIEC et EOTR, et surtout en participant au suivi d'Olivier le Marchand en thèse ;

- enfin, mes travaux ont été valorisés avec le véhicule d'essais et de référence trajectographique **VERT** et la capacité du Laboratoire GEOLoc à fournir une trajectoire de référence lors d'expérimentations dans le domaine de la localisation de véhicule.

4.1 – Généralités sur la fusion de données pour la localisation

4.1.1 – Terminologie

On appelle **fusion** la fonction qui consiste à combiner, de façon la plus optimale possible, des mesures provenant de capteurs unitaires différents mais dont les sorties peuvent toutes concourir à estimer une même grandeur physique. Ces mesures peuvent être complémentaires ou redondantes. L'idée de base est d'apporter le maximum d'information pour obtenir la meilleure estimation possible.

A la place de fusion, on peut aussi parler d'**hybridation** ou de **couplage**, ces 3 termes pouvant être considérés comme synonymes.

Le problème de localisation consiste à obtenir une estimation de la **position** d'un mobile. Quand ce mobile est considéré comme un point, la variable position peut être un vecteur tridimensionnel (X, Y, Z) ou bidimensionnel (x, y) ou (Est, Nord) quand on se limite à une position sur un plan. Quand le mobile est considéré comme un repère, la variable position, qu'on appelle généralement **pose**, peut être un vecteur à 6 dimensions (X, Y, Z, L, R, T) ou à 3 dimensions (x, y, L) quand on se limite à une pose sur un plan. L, R et T sont les angles d'attitude (Lacet ou cap, aussi noté Ψ , Roulis et Tangage) qui définissent l'orientation dans l'espace du repère mobile par rapport à un repère de référence.

4.1.2 – Les capteurs

Couramment, en localisation, les principaux capteurs pouvant être utilisés pour calculer une position sont :

les récepteurs GNSS,

les centrales inertielles (3 gyromètres, 3 accéléromètres), qui mesurent des accélérations et vitesses de rotation par rapport à un repère Galiléen et peuvent, moyennant des calculs

dits « de mécanisation », permettre d'en déduire par intégration la pose à 6 dimensions dans un repère terrestre local,

les gyromètres de cap, qui mesurent une vitesse de rotation autour d'un axe vertical,

les odomètres qui mesurent la distance parcourue,

les capteurs vidéo, radars, lidars, qui peuvent mesurer des distances ou des angles par rapport à des amers dans l'environnement et permettent, à l'aide d'algorithmes de mise en correspondance plus ou moins complexes, de remonter à des poses ou des variations de pose.

En localisation automobile, hormis les capteurs GNSS qui s'imposent, les capteurs qui sont le plus souvent utilisés pour leur très intéressant rapport information/coût, sont les **gyromètres de cap et les odomètres**. Ces capteurs sont souvent appelés : **capteurs de navigation à l'estime**, parce qu'ils permettent, quand on les combine avec un modèle d'évolution du véhicule, de calculer par intégration une pose.

Il est à noter cependant que les capteurs de type odomètre nécessitent une interface mécanique ou électrique avec le véhicule porteur, ce qui peut s'avérer problématique, en particulier pour des raisons de coût.

4.1.3 – Le principe d'hybridation

Pour combiner des mesures de façon optimale, la théorie de la fusion dite bayésienne³ est à l'origine d'une famille de méthodes, dont la plus célèbre est le filtrage de Kalman. Pour la localisation de véhicule, la méthode d'hybridation la plus généralement appliquée est illustrée sur la figure 4.1.

³ Du mathématicien Bayes, qui est à l'origine du théorème de Bayes sur les probabilités conditionnelles, qui soutient cette théorie.

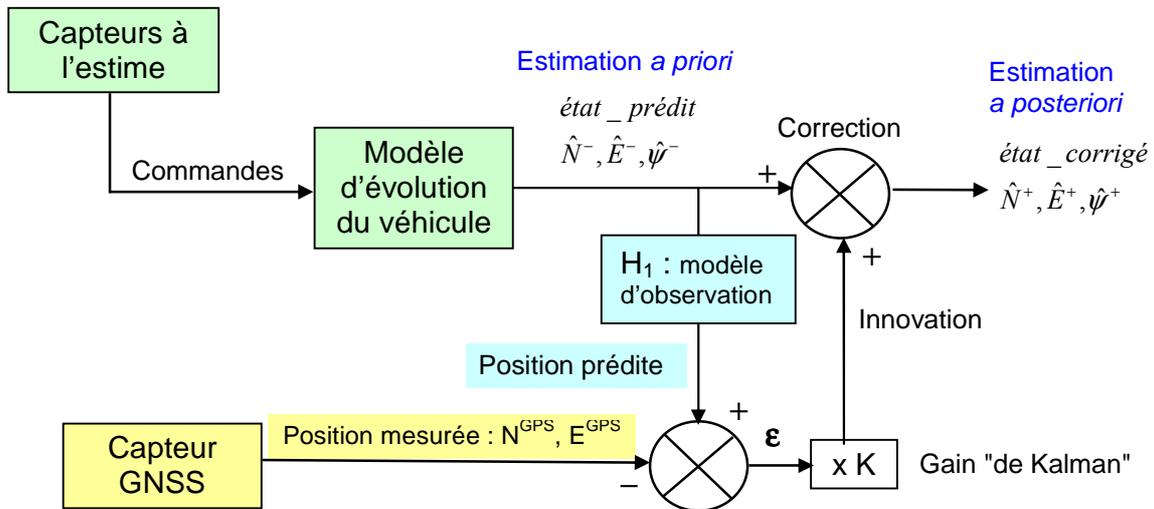


Figure 4.1 : la méthode d'hybridation lâche avec modèle d'évolution du véhicule

Le principe est le suivant :

- on dispose d'un capteur GNSS, capable de fournir une position, et de capteurs à l'estime,
- on définit un **état**, qui est ici la pose 2D (Est, Nord, cap Ψ) du véhicule, que l'on cherche à estimer,
- on dispose d'un **modèle d'évolution** du véhicule, ici un modèle de type bicyclette représenté sur la figure 4.2, respectant la contrainte de **non-holonomie** du véhicule (relation entre la rotation et l'avancement) qui permet, quand il est « alimenté » par des sorties des capteurs à l'estime (ds et $d\Psi$), aussi appelées « commandes », de prédire la pose à l'instant courant à partir de l'état précédent (ce modèle suppose deux hypothèses : roulement sans glissement et non variation de braquage entre deux instants d'estimation consécutifs, le mouvement est alors localement circulaire) : les équations complètes sont données dans [BÉTAILLE and BONNIFAIT, 2002] pour les deux cas (propulsion et traction) d'instrumentation de la boîte de vitesse d'un véhicule,

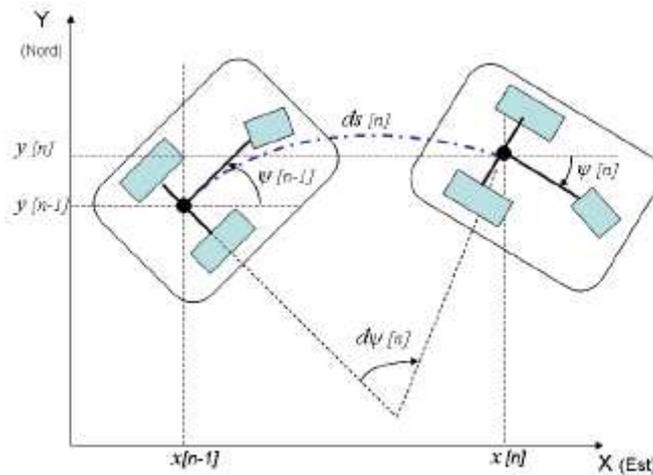


Figure 4.2 : le modèle d'évolution du véhicule

- on dispose d'un **modèle d'observation**, qui permet de relier les mesures GNSS (ici la position) à l'état.

La fusion se déroule alors selon le processus suivant :

- estimation **a priori** (prédiction) de la pose à l'instant courant à partir de l'instant précédent et des sorties des capteurs à l'estime,
- calcul des mesures prédites (ici la position) via la fonction H , et de l'erreur ϵ , obtenue par différence entre les mesures prédites et les mesures réelles,
- calcul de l'**innovation** obtenu dans le filtrage de Kalman par multiplication de l'erreur ϵ par le **gain de Kalman** K , qui dépend de la confiance estimée dans l'état prédit et de la confiance dans les mesures. K pondère l'apport de la prédiction et l'apport de la mesure pour estimer une pose estimée **a posteriori** qui soit optimale.

4.1.4 – Hybridation lâche et hybridation serrée

Sur ce principe d'hybridation, une multitude de variantes peuvent exister, suivant les variables d'état choisies et les sorties capteurs utilisées.

Dans la communauté du positionnement GNSS, on parle **d'hybridation lâche** quand le calcul de l'erreur ϵ se fait au niveau des coordonnées (ou de la solution dite de navigation) du véhicule. On parle **d'hybridation serrée** quand l'erreur se calcule au niveau des mesures brutes : pseudo-distances et éventuellement Doppler (composante de la vitesse relative récepteur-satellite sur le rayon vecteur concerné) dans notre cas.

Pour pouvoir calculer des pseudo-distances prédites, il faut calculer la position prédite 3D du récepteur, donc tenir compte de l'altitude du récepteur, et introduire la quatrième inconnue dans le calcul : le terme d'horloge d : produit de la vitesse de la lumière par le décalage temporel entre horloge récepteur et temps GPS.

Pour pouvoir calculer des mesures Doppler prédites, il faut calculer la vitesse du récepteur en 3D, et considérer la vitesse du terme d'horloge (aussi appelée dérivée) en m/s quand d est en m.

4.2 – Mise en application dans le développement d'un système de localisation des AGR

4.2.1 – Contexte

Les éléments de contexte sont les suivants :

- la demande d'un nouveau système de localisation des AGR a clairement été (ré)affirmée par les exploitants d'AGR (réseau des Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées) au travers des enquêtes menées par Jean-François Corté, alors Directeur Technique Routes ;
- les contacts directs entre l'équipe de François Peyret et ce réseau au sein du club GPS que lui et moi animions ont confirmé cette demande, et l'impulsion donné au projet par les futurs utilisateurs ;

- François Peyret m'a progressivement passé la responsabilité de l'animation du sujet de recherche concerné, dans le cadre de la Commission Technique 02, sujet « Banques de Données Routières - SIG -Repérage ».

J'ai commencé par diriger la rédaction d'un rapport de synthèse des travaux faits dans le cadre de ce sujet en 1997 et 1998, et auxquels j'avais déjà participé (« Etude de faisabilité de la localisation des AGR »). Ils concernaient le temps réel et des techniques de filtrage avaient été mises en œuvre (Kalman par exemple).

En 1999, j'ai mené une recherche expérimentale sur le sujet, avec l'aide d'un stagiaire ingénieur de l'Ecole Centrale de Nantes (Pierrick Brochot). Les travaux ont porté sur le traitement en temps différé des mesures des différents capteurs embarqués : DGPS (GPS différentiel), odomètre et gyromètre ou gyroscope pour l'estime, avec mise en œuvre de techniques de lissage.

Différentes méthodes classiques ont été comparées et certaines d'entre elles combinées avec des transformations géométriques bien choisies. Les résultats ont été publiés aux Journées GPS (organisées par François Peyret et moi-même dans le cadre du club GPS) et au congrès de l'Institute of Navigation (ION) en 2000.

4.2.2 – LocAGR

Dans le même temps, le LCPC a lancé un marché pour l'étude et le développement d'un prototype d'un système de localisation des AGR et son intégration finale dans un AGR. Je suis responsable au LCPC de ce projet, et à ce titre chargé de la partie technique du dossier de consultation des entreprises, de la consultation elle-même (appel d'offres sur performance) et du suivi du marché et des travaux par la suite. Le projet est alors nommé LocAGR.

Le projet LocAGR (localisation des Appareils à Grand Rendement d'Auscultation et de Gestion de la Route) a donné lieu à des essais de réception en 2002, après que le prototype ait été construit (en sous-traitance) sur la base de l'étude de faisabilité menée en interne et évoquée précédemment. J'ai piloté au niveau du LCPC l'étude, la construction et

la réception du prototype. Il y a eu une publication au congrès GPS ION (US Institute Of Navigation) en septembre 2002, faisant suite à deux autres en 2000.

Le prototype a finalement évolué vers une version de série moins avancée mais plus économique, qui a été diffusée au sein du réseau des Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées. La suite de cette opération de développement prototype a consisté alors à étudier la possibilité d'importer des mesures d'AGR géoréférencées dans des Systèmes d'Information Géographiques, avec en particulier la possibilité d'associer ces mesures à des éléments de la base par des techniques de map-matching en temps différé, ainsi que le développement d'outils métier pour agréger et analyser ces mesures suivant des critères de nature géographique. Ce travail, mis à part pour ses aspects purement localisation, a été ensuite pris en charge au sein du projet SAGIR par une autre équipe de recherche du LCPC, spécialisée dans l'auscultation et la gestion des routes.

4.3 – Gyrolis

4.3.1 – Contexte

La problématique de la localisation de véhicule a commencé à occuper mon activité de recherche en même temps que la robotique de chantier et ses innovations en matière de positionnement précis (contexte de ma thèse). Les différences portent sur les spécifications (positionnement métrique et en tous sites, parfois difficiles comme la ville – contre positionnement centimétrique sur chantier bénéficiant d'une bonne couverture GPS) et par conséquent sur les solutions : en localisation de véhicule, le GPS seul ne convient pas. Il faut concevoir des solutions hybridant le positionnement par satellites aux capteurs proprioceptifs embarqués, tels odomètre et gyromètre, voire centrale inertielle. La problématique se résume à pourvoir positionner en continu un véhicule, avec des contraintes de coût (notamment en automobile), et en quantifiant la confiance (ou intégrité) dans la position calculée. Le contexte applicatif est temps différé ou temps réel.

Les applications en temps réel seront spécifiquement traitées en § 4.4.

En matière de calcul de trajectoire en temps différé, l'offre sur étagère se limite soit au GPS cinématique seul, soit au couplage du GPS avec des centrales inertielles coûteuses et spécifiques à chaque offre. Ainsi, l'offre pour la trajectographie en temps différé adresse, ou bien le calcul GPS cinématique seul à l'exclusion de tout autre capteur (Grafnav, GNSS Solutions, Trimble Total Control, Ski Pro...), ou bien des centrales inertielles complètes (i.e. instrumentant les 3 axes) dont le coût dépasse d'un ordre de grandeur (voire davantage) celui d'un seul gyromètre vertical assez satisfaisant pour nombre d'applications en navigation terrestre. Cette offre, très limitée, existe chez Ixsea (couplage « lâche » navigation inertielle et positions GPS – loose coupling) et chez Applanix et Novatel (couplage « serré » navigation inertielle et distances mesurées du récepteur GPS aux satellites – tight coupling), avec une spécialisation certaine des logiciels de fusion à des matériels particuliers. **Aussi, j'ai proposé une solution simple et ouverte en termes de capteurs, basée sur une instrumentation de véhicule où le seul capteur inertiel est un gyromètre vertical.**

A cet effet, j'ai développé le logiciel **Gyrolis** (avec une contribution de Philippe Bonnifait à l'IRCCyN). C'est **un produit de la recherche en robotique et localisation qui est arrivé à maturité avec sa mise en ligne en freeware sur le site internet du LCPC en 2007** dans le contexte très porteur de la géomatique et particulièrement ses applications en milieu urbain. Du point de vue traitement de données, **l'algorithme comporte un filtre de Kalman et un lisseur de Rauch, tous deux modifiés pour tenir compte de la non-linéarité du modèle cinématique du véhicule.**

La suite du § 4.3 est tirée de [BÉTAILLE, 2008].

4.3.2 – Algorithme de Gyrolis

4.3.2.1 - Filtrage

Gyrolis est basé sur une modélisation très classique du véhicule et des capteurs à bord, et la phase initiale du calcul puise dans la théorie bien connue du filtrage bayésien avec un EKF ou filtre de Kalman étendu. Le vecteur d'état (noté X_k à l'instant k d'échantillonnage

temporel) contient la position projetée dans un plan localement tangent à la surface de la terre et le cap : $X_k = (x_k, y_k, \theta_k)$; x et y représentent en général respectivement les coordonnées Est (E) et Nord (N). Il serait possible d'y ajouter le biais du gyromètre et éventuellement le pas odométrique, mais leur estimation se ferait au détriment de la position et du cap. Le vecteur de commande $U_k = (\Delta s_k, \omega_k)$ se compose de la vitesse angulaire et la distance parcourue ; quant au vecteur d'observation $Y_k = (x_k^{\text{GPS}}, y_k^{\text{GPS}})$, il se résume à la solution de navigation GPS (elle aussi projetée), quand elle est disponible. Voici résumées les étapes du filtre implémenté :

- étape d'évolution (ou de prédiction)

$$\begin{aligned} x_{k+1|k} &= x_{k|k} + \Delta s_k \cdot \cos(\theta_k + \Delta \theta_k / 2) + v_x \\ y_{k+1|k} &= y_{k|k} + \Delta s_k \cdot \sin(\theta_k + \Delta \theta_k / 2) + v_y \\ \theta_{k+1|k} &= \theta_{k|k} + \Delta \theta_k \end{aligned} \quad (4.1)$$

Δs_k représente la variation de distance parcourue entre deux instants d'échantillonnage et $\Delta \theta_k$ correspond à une variation élémentaire du cap dans le même temps (T_s). Avec un gyromètre, qui donne une vitesse de rotation ω_k , on a : $\Delta \theta_k = \omega_k \cdot T_s$. Ces équations sont non linéaires. Les bruits de modèle (v_x et v_y additifs, l'équation en θ est exacte) et de commande (v_{odo} et v_{gyro} , additifs respectivement sur Δs_k et ω_k) sont supposés centrés, gaussiens et blancs, de matrice de variance-covariance Q_{mod} et Q_{com} .

Le filtre de Kalman dit « étendu » s'applique en fait aux équations (4.1) linéarisées autour de l'état courant (développement de Taylor au premier ordre). La matrice de variance-covariance a priori $P_{k+1|k}$ est donnée par :

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + B_k Q_{\text{com}} B_k^T + Q_{\text{mod}} \quad (4.2)$$

où A_k et B_k représentent les matrices jacobiennes d'évolution par rapport à l'état et à la commande (dérivées partielles des équations (4.1) par rapport à (x_k, y_k, θ_k) d'une part et à $\Delta s_k, \omega_k$ d'autre part, calculées en l'état et la commande courants à l'instant k).

Nota : s'il y a prédiction seule (en l'absence de position GPS), on remplace la notation $X_{k+1|k}$ et $P_{k+1|k}$ par $X_{k+1|k+1}$ et $P_{k+1|k+1}$ dans les équations (4.1) et (4.2).

- étape d'observation (ou d'estimation), elle aussi bruitée (bruits V_{xGPS} et V_{yGPS} , sur x_k^{GPS} et y_k^{GPS} , additifs), de matrice de variance-covariance Q_{gps}

$$X_{k+1|k+1} = X_{k+1|k} + K_{k+1} (Y_{k+1} - HX_{k+1|k}) \quad (4.3)$$

avec $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ et avec K_{k+1} , gain de Kalman, égal à :

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H^T (HP_{k+1|k} H^T + Q_{gps})^{-1} \quad (4.4)$$

La matrice de variance-covariance a posteriori $P_{k+1|k+1}$ est donnée par :

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} H) P_{k+1|k} \quad (4.5)$$

Le modèle d'évolution (qui sert à l'étape de prédiction) et l'observation GPS sont entachés d'erreur : on considère que l'erreur de prédiction et l'erreur d'observation sont caractérisées par des distributions normales, dont les moyennes sont supposées nulles et dont les variances doivent être ajustées en fonction des conditions de roulement/glisement et des capteurs choisis. La blancheur de l'erreur d'estimation de position GPS est une hypothèse communément admise, et dont on s'approche en GPS différentiel (DGPS). Enfin, notons que le modèle d'évolution dans le plan tangent (2D et non 3D) constitue une approximation corrigée à l'étape d'observation et donc négligeable (sauf à parcourir des dizaines de km sans GPS).

4.3.2.2 - Lissage

A l'issue du filtrage de Kalman, qui est applicable en temps réel, Gyrolis se propose de tirer partie du temps différé. La causalité n'est pas contraignante et on va chercher à lisser les sorties du filtre. La phase de lissage qui suit celle du filtrage est donc nettement plus originale. Le lisseur s'initialise en le dernier état prédit (ou estimé) après application du filtre

de Kalman : $X_{k+1,lis} = X_{k+1|k+1}$, avec comme matrice de variance-covariance : $P_{k+1,lis} = P_{k+1|k+1}$. Puis on obtient l'état lissé suivant en ajoutant à l'état prédit (ou estimé) une correction proportionnelle à l'écart entre l'état lissé précédent et l'état correspondant prédit par le filtre de Kalman. Le gain, pour un modèle d'évolution non linéaire, comporte à nouveau la jacobienne A_k . Ainsi les équations de lissage s'écrivent, s'il y a prédiction et estimation :

$$X_{k,lis} = X_{k|k} + C_k (X_{k+1,lis} - X_{k+1|k}) \quad (4.6)$$

avec C_k , gain de lissage, égal à :

$$C_k = P_{k|k} A_k^T P_{k+1|k}^{-1} \quad (4.7)$$

La matrice de variance-covariance après lissage $P_{k,lis}$ est donnée par :

$$P_{k,lis} = P_{k|k} + C_k (P_{k+1,lis} - P_{k+1|k}) C_k^T \quad (4.8)$$

S'il y a prédiction seule, la notation indiciaire $_{k+1|k+1}$ remplace $_{k+1|k}$ dans les équations (4.6) à (4.8) : en effet, le lisseur s'applique aussi bien entre un état prédit et l'état prédit précédent, qu'entre un état corrigé et l'état prédit précédent.

4.3.2.3 - Algorithme complet

L'algorithme complet déroule les étapes suivantes à la période d'échantillonnage : $T_s = 0.1$ s (le cas échéant, Gyrolis pré-intègre les mesures du gyromètre à la fréquence de 10 Hz) :

- calcul de la trajectoire filtrée : on note que 10 prédictions se suivent entre deux estimations. Celles-ci donnent lieu à détection et rejet éventuels de solution GPS aberrante (une distance de Mahalanobis est calculée et l'on recherche pour la loi du χ^2 avec une confiance donnée, par exemple 95%, si cette distance est acceptable) ;

- calcul de la trajectoire lissée : on repasse par les mêmes étapes de prédiction et d'estimation successives que lors du filtrage.

Au final, les trajectoires filtrée et lissée sont fournies, ainsi que les précisions estimées.

On note que les états $X_{k+1|k}$ et les matrices de variance-covariance $P_{k+1|k}$ intermédiaires quand il y a prédiction et estimation ne sont généralement pas conservées quand on procède au seul filtrage ; ils deviennent nécessaires au lissage.

4.3.3 – Conclusion

En développant Gyrolis et en le mettant en œuvre avec différents jeux de capteurs, j'ai montré comment la dérive en position croît pendant des périodes de masquage GPS d'une minute et 5 minutes. Pour deux gyromètres de classes différentes notamment : un gyromètre à fibre optique KVH RD 2100 et un gyromètre micro-électromécanique MicroStrain 3DMG, cette dérive est d'un ordre de grandeur plus grande s'agissant du MicroStrain 3DMG (MEMS) par rapport au KVH RD 2100 (FOG). On retiendra pour le KVH une erreur planimétrique qui croît en $t^{1/2}$ (car l'erreur du modèle d'évolution est grande devant l'erreur d'intégration angulaire) à raison de 5 m en une minute environ, et 10 m en 5 minutes, alors qu'elle croît plutôt en $t^{3/2}$ pour le 3DMG. L'enveloppe d'erreur de ce dernier correspond à un bruit blanc (modélisant l'erreur du gyromètre) après une double intégration [BÉTAILLE, 2008].

Dans le cadre de l'opération de recherche « Métrologie des Trajectoires et du Trafic », une extension de Gyrolis a été développée avec Sio-Song Ieng, extension qui exploite les résultats de ses travaux de thèse au LIVIC. Cette extension met en œuvre une solution d'hybridation telle que celle de Gyrolis, augmentée des distances au marquage routier géoréférencé [BÉTAILLE et al., 2010]. Ces distances résultent d'un traitement d'images obtenues par caméra embarquée comme source d'information complémentaire.

Enfin, l'extension de nos recherches en localisation de véhicule pour des applications non seulement temps différé mais aussi temps réel (cf. § 4.4), qui répondent aux demandes des gestionnaires de la route tout en contribuant aux études de sécurité routière et aux développements d'aides à la conduite, a confirmé le besoin de se doter d'un véhicule

spécialisé pour la détermination de trajectoire, équipé d'une plate-forme sophistiquée de localisation, qui soit en capacité de fournir une référence trajectographique.

Ainsi, le LCPC a financé en 2007 une centrale inertielle Ixsea LandINS (de qualité bien supérieure à nos capteurs au standard automobile) et une paire de récepteurs GPS cinématique bi-fréquence Novatel, afin de fournir partout une trajectoire de référence du véhicule porteur, aussi bien en position qu'en orientation et attitude. Le choix de ces matériels et logiciels, et leur mise en service opérationnel, ont été facilités par l'expertise acquise par le Laboratoire Géolocalisation, laboratoire qui a accueilli dans le même temps un nouvel ingénieur, Miguel Ortiz, en remplacement de Charles Lemaire. **J'ai procédé de 2005 à 2007 à la mise au point et à la qualification de cette centrale inertielle selon nos spécifications** (notamment : contenir la dérive à 1 dm RMS en 1 minute) [BÉTAILLE et al., 2007], [KAIS et al., 2006], [BÉTAILLE et al., 2005], et supervisé les premières campagnes de mesures utilisant cet équipement. 24 heures d'enregistrement ont notamment été faites à Toulouse pour l'étude R&T CNES CIEC (Concept d'Intégrité en Environnement Contraint 2007-2010) avec Thales et M3Systems sur l'intégrité du positionnement différentiel EGNOS en ville [DUCHATEAU et al., 2009], [BÉTAILLE et al., 2008]. Un poster à Toulouse Space Show 2008 a été réalisé, ainsi qu'au Carrefour du PREDIT 2008. Depuis, mon expertise sur l'outil de trajectographie LandINS a été complètement transférée à Miguel Ortiz.

4.4 – Fusion de données en temps réel

Nous avons, avec Gyrolis, valorisé en le diffusant, un outil de filtrage et surtout de lissage pour la trajectographie de véhicule. Dans le cadre du développement des activités du Laboratoire Géolocalisation dans le domaine des aides sécuritaires, de l'assistance au conducteur, des ITS en général, le caractère temps réel du filtrage des données des capteurs embarqués devient primordial. La notion d'intégrité de localisation (cf. § 4.5 et § 4.6) s'impose aussi, vu le contexte sensible de certaines applications qui utilisent la géolocalisation pour tarifier des services.

4.4.1 – Algorithmes en couplage lâche

Par couplage lâche, on entend que les observations sont des solutions de navigation, c'est-à-dire des positions du mobile dans le repère géocentrique (en cartésien : X, Y, Z ou en géographique : latitude, longitude, hauteur) ou des coordonnées de projection (par exemple Est et Nord en Lambert 93). Ce ne sont pas les distances entre le récepteur et les satellites qui sont ici considérées comme observations.

Dans le contexte de la localisation, les filtres développés sont 2D et utilisent toujours un modèle cinématique du véhicule, alimenté par des mesures d'odométrie des roues et éventuellement d'un gyromètre de cap.

Des variantes de l'algorithme de filtrage de Kalman implémenté dans Gyrolis ont été produites lors du **master recherche de Cyril Joly**. En particulier, nous avons développé une version sommant un nombre fini de filtre de Kalman parallèle, un filtre de Kalman sans parfum et un filtre particulière [ZAMORA et al., 2008], [JOLY et al., 2008].

Quand la non linéarité à traiter par l'EKF n'est pas trop forte, le filtrage non linéaire se résout simplement par des filtres de Kalman locaux en parallèle, en nombre suffisant pour couvrir l'ensemble des régions linéarisables distinctes. Celles-ci, sont au nombre de 4 pour des non-linéarités trigonométriques dans le plan : ici nous avons simplement affaire à un problème de cadran dans l'initialisation du cap.

Le fonctionnement des 4 filtres est identique à celui présenté en section 4.4, mais à chaque instant k on effectue en plus une estimation au moyen de la somme des 4 particules déterministes gaussiennes pondérées par leur poids respectif w^i . Les estimations de l'état et de la matrice de variances-covariances s'écrivent comme suit :

$$\hat{X}_k = \sum_{i=1}^{i=4} w^i X_{k|k}^i \quad (4.9)$$

$$\hat{P}_k = \sum_{i=1}^{i=4} w^i \left(P_{k|k}^i + (X_{k|k}^i - \hat{X}_k)^T (X_{k|k}^i - \hat{X}_k) \right) \quad (4.10)$$

Le test de Mahalanobis du point GPS s'effectue avec cet estimateur et sa variance.

Le poids est quant à lui mis à jour par une simple multiplication par la vraisemblance de l'état $(x_k, y_k)^t$, sachant les positions GPS observées $(x_k^{\text{GPS}}$ et y_k^{GPS}), et sous hypothèses gaussiennes tant pour l'état que pour les observations.

Une seconde alternative afin de palier le manque de robustesse pressenti du filtre de Kalman étendu face aux non linéarités est le filtre de Kalman sans parfum. Il a été développé par Julier en 1996 ([JULIER, 1996], [JULIER, 1997]) dans le but de traiter des problèmes non linéaires sans avoir à utiliser de jacobien. Ceci a conduit à la création de la transformée sans parfum, c'est-à-dire à l'application des équations d'évolution et d'observation à des échantillons déterministes (appelés *sigma-points*) pris en fonction de l'état et la covariance courants, puis à la mise à jour de ces mêmes état et covariance, et ce sans jamais passer par la dérivation.

Le filtrage particulaire est, comme le filtre de Kalman et ses variantes, basé sur la théorie de l'estimation bayésienne dont le but est d'estimer la densité de probabilité d'une variable aléatoire par rapport au temps connaissant une série de mesures jusqu'à cet instant. Il est en général impossible de connaître analytiquement cette densité, excepté dans le cas linéaire gaussien (le résultat s'obtient alors avec le filtre de Kalman).

L'idée est d'approcher cette densité avec un jeu de N particules. La véritable loi étant inconnue, les particules sont tirées récursivement à l'aide d'une densité qu'on sait échantillonner par un code programmé sur ordinateur. Pour tenir compte du fait que les particules ne sont pas générées avec la bonne densité de probabilité, une pondération est appliquée. Les poids sont aussi calculés récursivement, et font appel aux observations.

Plus de détails concernant les filtres particulaires pourront être trouvés dans [JOLY, 2006].

Les avantages et inconvénients des divers filtres ont été montrés dans l'article [JOLY et al., 2008]. Sur le problème relativement simple de la localisation 2D, et une fois tous les problèmes liés à l'initialisation résolus (régime « permanent »), les variantes ne présentent

pas vraiment d'intérêt par rapport au filtre de Kalman étendu classique. Les quatre filtres produisent des résultats pratiquement identiques. Ceci peut s'interpréter par le fait qu'effectivement les densités de probabilités sont gaussiennes (ce qui est l'hypothèse de base des filtres de Kalman), auquel cas le filtre particulaire n'est pas particulièrement valorisé .

Cependant, l'intérêt principal du filtre particulaire en localisation 2D de véhicule réside dans sa robustesse quant à l'angle de cap initial (régime « transitoire »). Mais à l'évidence dans ce cadre d'application plusieurs filtres de Kalman en parallèle permettent d'obtenir une performance en robustesse tout à fait équivalente, et ce à moindre coût en terme de charge de calcul et de difficulté de réglage. Cet avantage n'est pas anodin du point de vue de l'implémentation. En effet, même si le particulaire et les EKF parallèles permettent tout deux de s'affranchir de mises au point empiriques (inévitables avec un EKF simple ou un UKF), les variantes en parallèle ont l'avantage du temps de calcul, et donc de la possibilité de concevoir une implémentation en temps réel.

On privilégiera les variantes à l'EKF dans d'autres problèmes, où les non-linéarités sont plus fortes, où les équations d'évolution ou d'observation ne sont pas explicites, ou encore quand le problème présente de nombreuses hypothèses : c'est typiquement le cas du map-matching sur lequel on reviendra en § 4.6.3. Aussi, la maîtrise de ces variantes de la théorie de l'estimation bayésienne par le laboratoire a permis dès lors de pouvoir choisir selon les problèmes et leur modélisation tel ou tel type de filtre, dans le contexte de la localisation (thèse d'Ahmed Selloum), ou dans tout autre contexte (thèse de Ré-Mi Hage, sur l'écoulement du trafic et la mesure des temps de parcours).

4.4.2 – Algorithmes en couplage serré

Par couplage serré, on entend que les observations sont les distances entre le récepteur et les satellites. Dans la littérature, on parle de pseudo-distance, car la mesure de la distance géométrique est entachée d'erreurs d'horloges (satellites et surtout récepteur) et d'erreurs de propagation (lointaine : ionosphère et troposphère ; proche : multi-trajets au voisinage de

l'antenne), pour ne citer que les principales sources d'erreurs de mesure GNSS. Les mesures Doppler faites par le récepteur sont aussi des observations utilisées.

Les filtres développés sont 2D + 1 ou 3D. La troisième dimension est toujours nécessaire : en effet, il faut pouvoir prédire la position du mobile, dans toutes ses dimensions, pour ensuite pouvoir exprimer la mesure attendue, i.e. la norme du vecteur satellite-récepteur.

Le modèle cinématique du véhicule est plus ou moins compliqué, selon qu'on y inclut les contraintes non holonomes de roulement, ou selon qu'on considère un mouvement 3D type balistique, à vitesse ou accélération constante, respectivement à simple ou double intégration. Ce dernier modèle est le plus simple (on le trouve implémenté dans le solveur de la plupart des récepteurs GPS) : mais il n'est pas bien adapté à la navigation automobile. La littérature abonde de divers modèles, dont une collection assez complète est présentée par [SCHUBERT et al., 2008].

Pour nos études, par exemple dans le cadre du **projet EOTR (EGNOS on the road)**, ou des **travaux de thèse d'Olivier le Marchand** (contribution personnelle en comité de suivi), nous avons retenu des méthodes d'hybridation serrée relativement simples comparées à celles basées sur l'intégration des mesures d'accélération et de vitesse de rotation des centrales inertiels 3 axes [GREWAL et al., 2001]. Ces dernières s'accommodent en effet mal des instabilités des biais et facteurs d'échelle assez typiques des matériels inertiels MEMS bas-coût utilisés en automobile dans les années 2000-2010 (depuis, ces technologies ont progressé sensiblement). **A suivre, deux méthodes 2D + 1 d'hybridation serrée utilisées dans nos travaux sont présentées brièvement. Elles diffèrent par leur modèle d'évolution :**

- la première avec modèle non-holonyme du véhicule, présenté plus haut,
- la deuxième avec modèle accéléré plan.

La deuxième méthode présente l'avantage de pouvoir être appliquée dans le cas où l'on utilise des capteurs à l'estime, comme dans le cas où l'on n'en utilise pas, ce qui permet de mettre en évidence l'apport de ces capteurs.

4.4.2.1 - Méthode n° 1 : couplage serré avec modèle non-holonome

Les différences par rapport au 2D sont :

- le vecteur d'état est augmenté des composantes : altitude (Z), terme d'horloge (d) et sa dérivée (d'), dont l'évolution est gouvernée par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} z_{k+1|k} &= z_{k|k} + v_z \\ d_{k+1|k} &= d_{k|k} + \Delta t_k \cdot d'_{k|k} \\ d'_{k+1|k} &= d'_{k|k} + v_{d'} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Les bruits de modèle sont : v_z et $v_{d'}$ additifs, l'équation en d est exacte.

- les mesures, réelles ou prédites, sont les pseudo-distances (PRi) satellites-récepteur,
- le modèle d'observation (H2) plus complexe, prenant en compte la position 3D du mobile et la quatrième inconnue du problème canonique qui est le terme d'horloge.

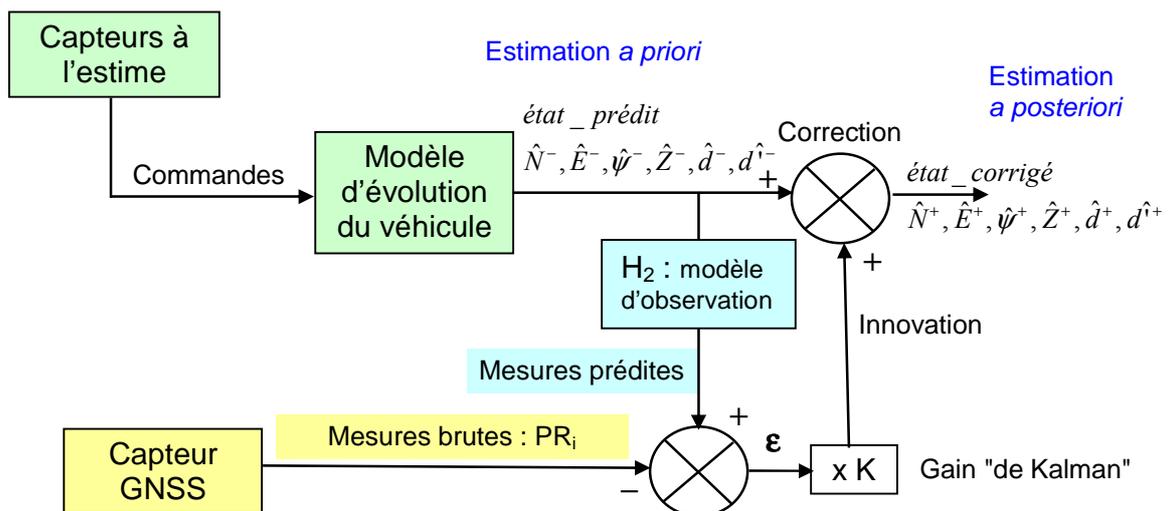


Figure 4.3 : la méthode d'hybridation serrée n°1 avec modèle non-holonome du véhicule

4.4.2.2 - Méthode n° 2 : couplage serré avec modèle accéléré plan

Les différences par rapport à la méthode n° 1 sont :

- la disparition du modèle d'évolution du véhicule, qui est remplacé par un modèle plus général, appelé accéléré plan, qui ne rend plus compte de la contrainte de non-holonomie du véhicule, traduisant uniquement le fait que la position plane résulte de la double intégration de l'accélération plane et que l'altitude reste constante à un bruit près entre 2 instants d'intégration,

- le vecteur d'état est sensiblement différent de celui des précédentes méthodes et comprend : coordonnées planes (E, N), altitude (Z), vitesses et accélérations planes suivant l'Est et le Nord ($V^E, V^N, \Gamma^E, \Gamma^N$), terme de décalage d'horloge récepteur (d) et dérivée du terme d'horloge (d'),

- les mesures des capteurs à l'estime ne sont plus prises en compte via le modèle d'évolution, mais au même niveau que les mesures GNSS, c'est-à-dire comme des observations qui vont venir corriger l'estimation a priori, à une cadence cependant différentes de celle du capteur GNSS,

- on utilise en fait 2 modèles d'observation (H3), qui diffèrent suivant que la mesure traitée provient des capteurs à l'estime (cadencés tous les deux à 10 Hz) ou du capteur GNSS (à 4 Hz) :

- le modèle pour l'estime rend compte du fait que l'odomètre permet d'observer la vitesse plane du véhicule et que le gyromètre permet d'observer la vitesse de rotation du véhicule qui s'exprime en fonction des composantes de la vitesse et de l'accélération planes.

$$\omega_{k+1|k} = \frac{\Gamma_{k+1|k}^N V_{k+1|k}^E - \Gamma_{k+1|k}^E V_{k+1|k}^N}{(V_{k+1|k}^E)^2 + (V_{k+1|k}^N)^2} \quad (4.12)$$

$$\Delta s_{k+1|k} = \sqrt{(V_{k+1|k}^E)^2 + (V_{k+1|k}^N)^2} \Delta t_k$$

– le modèle pour le GNSS utilise à la fois les mesures de pseudo-distances et de Doppler qui permettent d’observer respectivement la position et la vitesse du mobile.

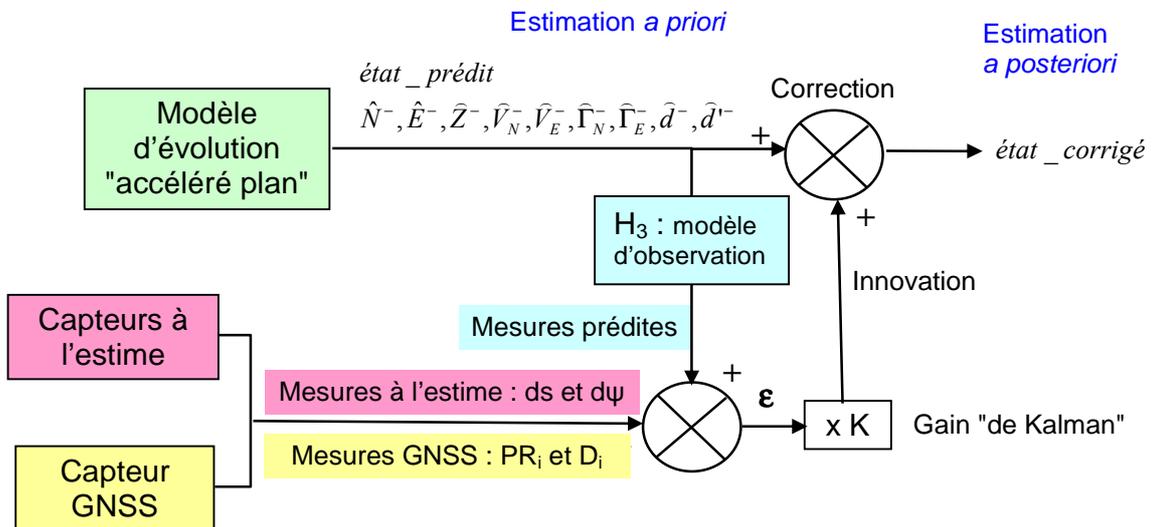


Figure 4.4 : la méthode d’hybridation serrée n°2 avec modèle accéléré plan du véhicule

4.5 – Problématique de l’intégrité

L’intérêt des filtres précédents, outre qu’ils assurent la continuité de positionnement là où les GNSS dysfonctionnent, c’est qu’ils ouvrent un champ de possibilités en matière d’intégrité de positionnement bien plus large qu’un simple solveur aux moindres carrés. C’est ce qui est développé maintenant.

4.5.1 – Concept d’intégrité

Les acceptations du concept d’intégrité sont différentes en informatique, traitement du signal, aéronautique, etc. Il est d’ailleurs clair que dans le contexte du positionnement terrestre, et particulièrement dans le contexte routier, une nouvelle nuance du concept a été apportée par les chercheurs sur ce sujet.

Historiquement, c’est l’aviation civile internationale (OACI) qui a fourni une définition de l’intégrité d’un système de navigation :

« Integrity : a measure of the trust which can be placed in the correctness of the information supplied by the total system. Integrity includes the ability of the system to provide timely warnings to the user when the system should not be used for the intended operation. »

L'information que mentionne cette définition concerne, en navigation, **la position ET la précision estimées par le système**. Ainsi, un système de positionnement donnant une position et une erreur possible (i.e. une imprécision) très grande sera parfaitement intègre, mais totalement inutile. En fait, l'erreur possible associée à une position doit être raisonnable, conforme aux attentes des utilisateurs.

De plus, **la notion d'alerte** est sous-jacente dans la définition OACI de l'intégrité : le système doit informer les utilisateurs – et ce, suffisamment vite – qu'il faut interrompre l'utilisation du système.

Ainsi, l'intégrité mesure le risque que l'utilisateur ne soit pas informé à temps que l'information délivrée n'est pas vraie... autrement dit, que la position vraie diffère nettement de la position estimée, erreur comprise.

Les paramètres (niveau d'erreur, délai d'alerte) qui dimensionnent l'intégrité dépendent évidemment de l'utilisation.

On remarque donc d'une part que l'intégrité est un concept indissociable de la précision et d'autre part que c'est un concept dont au final dépendent la disponibilité et la continuité du service.

La disponibilité caractérise (par une probabilité d'utilisation possible) la possibilité d'utiliser le service en un lieu et un instant donnés, avec une intégrité minimale garantie.

La continuité caractérise (par une probabilité d'utilisation possible) la possibilité d'utiliser le service en un lieu donné pendant une durée donnée, avec une intégrité minimale garantie.

4.5.2 – Paramètres d'intégrité

L'intégrité est une mesure de la confiance : il y a donc une métrique, et l'objet de cette section est d'en préciser les principes. En aéronautique, cette métrique est caractérisée (horizontalement et verticalement) par :

- la comparaison d'un niveau de protection (*protection level*) à un seuil d'alerte (*alert limit*):
- un délai d'alerte (*time to alert*).

Commentons ces mesures...

Le niveau de protection (HPL ou VPL) est calculé par le système de navigation, et en général, il surestime l'erreur vraie (le système est pessimiste, car il est prudent). Pour une application donnée, on compare le niveau de protection calculé à un niveau d'alerte. A cause du pessimisme du système, il est fréquent qu'on atteigne le niveau d'alerte bien que l'erreur vraie soit bien moindre... Le risque d'intégrité existe quand au contraire on a sous-estimé l'erreur vraie alors que celle-ci dépasse le niveau d'alerte ! (voir figure 4.5).

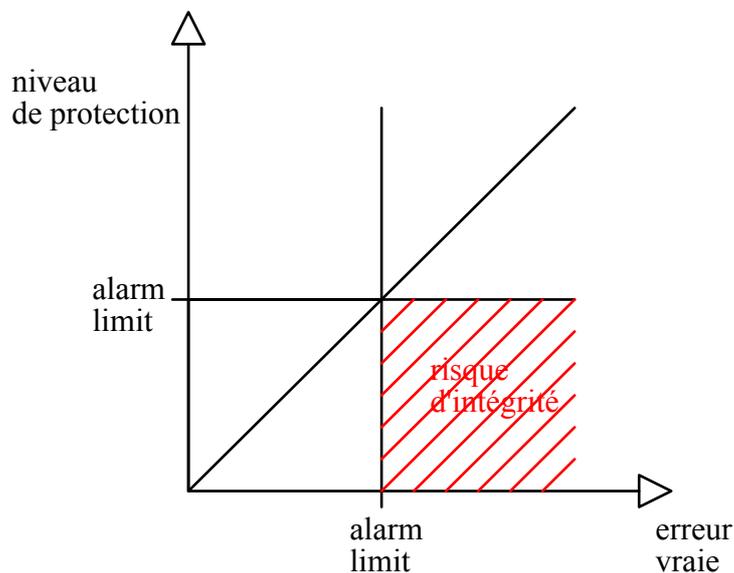


Figure 4.5 : diagramme dit de Stanford

Le délai d'alerte correspond à l'intervalle de temps (à ne pas dépasser) entre l'occurrence d'une alerte et son indication à l'utilisateur, de sorte que celui-ci décide à temps de la conduite à tenir (par exemple, interrompre une manœuvre d'atterrissage en aéronautique).

4.5.3 – EGNOS

Grâce à un réseau de stations permanentes en Europe, EGNOS permet la modélisation des délais de traversée atmosphérique et la correction des dérives d'orbites et d'horloges prédites et diffusées par GPS et GLONASS, délais et dérives qui évidemment affectent les calculs de navigation.

Ainsi, les principaux biais dans les mesures de distance entre les satellites et le récepteur peuvent-ils être corrigés au moyen d'EGNOS. A la différence des corrections différentielles obtenues au moyen de sa propre station de référence, les corrections EGNOS sont ici calculées par l'utilisateur par interpolation des corrections modélisées spatialement et temporellement sur toute la zone de couverture.

De plus, EGNOS analyse en permanence les mesures faites par le réseau, et, comme celles-ci présentent conceptuellement une certaine redondance, les corrections diffusées sont toujours qualifiées en terme de précision.

Au niveau du récepteur donc, on utilisera des distances corrigées et, par propagation des erreurs, on estimera la précision de la solution de navigation obtenue, tant en horizontal qu'en vertical. Le calcul des HPL et VPL est donc tout à fait pertinent partout sur la zone EGNOS et en permanence, parce-que la précision des corrections est déterminée a priori par EGNOS.

On note que n'entrent pas en considération dans ces calculs les erreurs propres au récepteur comme les trajets multiples.

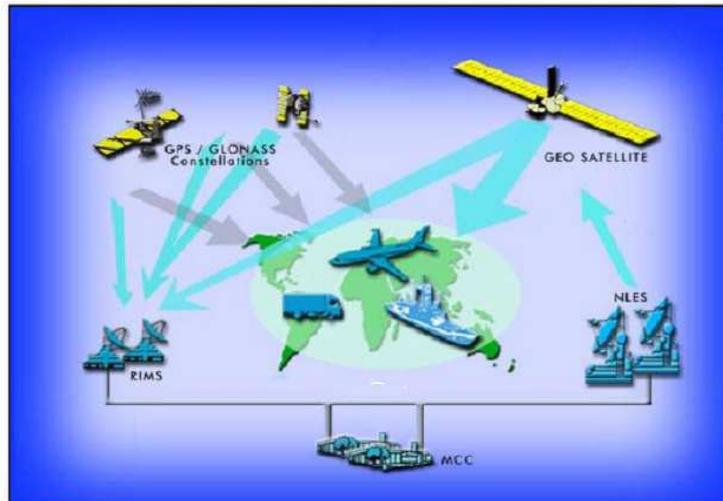


Figure 4.6 : schéma d'EGNOS et ses composantes principales :
 l'observation = RIMS (*ranging and integrity monitoring stations*),
 le calcul et la supervision = MCC (*mission control centres*),
 la diffusion = NLES (*navigation land earth stations*) + des satellites géostationnaires.

En termes d'intégrité EGNOS préfigure ce que Galileo permettra à l'échelle planétaire.

4.5.4 – Algorithme RAIM

RAIM signifie *receiver autonomous integrity measurement*. C'est une technique largement éprouvée qui permet à un récepteur GNSS de détecter à chaque instant un signal satellitaire erroné et de l'isoler.

Cette technique est qualifiée d'autonome car elle ne s'appuie que sur les mesures GNSS et sur le modèle du calcul de navigation. Aucun autre capteur n'est nécessaire dans la mise en œuvre de la mesure RAIM.

On parle de *snapshot* RAIM quand cet algorithme n'utilise qu'une époque de mesure, et non pas une séquence de mesures à différentes époques.

On peut résumer en quelques lignes l'algorithme RAIM [TEUNISSEN, 1998] : la détection repose sur l'analyse des résidus (ou du vecteur de parité). On forme la somme quadratique des résidus, qui, sous hypothèse d'absence d'erreur à détecter, suit la loi

statistique du χ^2 . Un test de cette hypothèse est donc fait, sur la base d'une probabilité que l'on se donne de faire une fausse détection.

Une fois l'erreur détectée, il faut diagnostiquer quelle observation est en cause : c'est l'étape de diagnostic, ou d'isolation. En analyse des résidus, cela repose sur un autre test, appelé w-test, où l'on examine chaque résidu pris individuellement par rapport à l'ensemble. Là encore, on se donne une probabilité de fausse détection. Si le vecteur de parité est utilisé au lieu des résidus, on calcule l'angle de ce vecteur avec les vecteurs de parité qui sont obtenus par application d'une erreur individuelle sur chaque satellite. L'angle minimum révèle quel satellite est en cause. Un test statistique est aussi associé à l'utilisation du vecteur parité.

Il existe aussi une famille d'algorithmes cousins du RAIM (on parle de AAIM) où des mesures inertielles (accéléromètres et gyromètres) sont combinées aux pseudo-distances GNSS. Le couplage dit « serré » est indispensable si l'on veut faire de la détection d'erreurs (le couplage « lâche » opère après calcul des solutions GNSS... donc trop en aval pour vérifier l'intégrité). La technique AAIM s'applique aux instruments de navigation des avions, et n'est pas adaptée aux véhicules routiers, qui ont leur spécificité.

4.6 – Intégrité et spécificité de la problématique pour des véhicules terrestres

4.6.1 – Introduction

A la différence des applications aéronautiques, les applications routières des GNSS présentent des conditions d'observation des satellites beaucoup plus difficiles : ceux-ci subissent fréquemment des masquages, des incidents de propagation par réflexions et diffractions sur les obstacles environnants (trajets multiples), et on comprend que l'intégrité du positionnement ne va pas adresser les seules erreurs du segment spatial des GNSS, par ailleurs très rares (de l'ordre de grandeur de quelques unes par an, certaines années aucune...), détectées par les algorithmes de l'aviation civile.

Le segment utilisateur est donc au cœur de la problématique de l'intégrité pour un mobile terrestre, alors qu'en aéronautique, c'est principalement au segment spatial que s'applique ce concept.

Le problème apparaît donc plus complexe. Mais on remarque aussi qu'à priori les véhicules, à la différence des avions, évoluent sur des routes, qui localement peuvent être assimilées à des surfaces planes (plan tangent local) et l'on pourrait donc envisager de conduire un raisonnement plutôt en 2 dimensions qu'en 3, et à tout le moins, considérer qu'il existe une contrainte locale sur l'évolution de la position du véhicule au cours du temps.

On a vu que les algorithmes les plus sophistiqués que présente la bibliographie traitent l'intégrité de la navigation aérienne par GNSS et centrales inertielles. Mais l'automobile dispose d'autres informations, fort intéressantes, comme la distance parcourue, l'angle des roues et/ou du volant, les rotations de chaque roue... autant de capteurs qui lui sont propres et dont il faut savoir tirer profit. Comment peut-on à partir de ces capteurs mais aussi à partir des contraintes d'évolution sur un plan, élaborer une mesure de l'intégrité ?

4.6.2 – Analyse expérimentale et approche en fusion serrée

Pour résumer la problématique, on peut dire que la recherche vise à quantifier une propriété du système de localisation (son intégrité) que l'on sait désormais bien qualifier. Ainsi, il sera possible de fonder sur l'intégrité certaines décisions prises au niveau des applications de la localisation du véhicule routier (navigation, aide à la conduite, sécurité active...) ou du mobile terrestre en général.

D'assez nombreux travaux très intéressants sont menés dans quelques universités dans le monde [POTOVELLO, 2003], [KUUSNIEMI, 2005], [HEWITSON and WANG, 2007] sans qu'on puisse dire qu'une soit réellement leader. Il faut dire que l'intégrité de la localisation pour un mobile terrestre se situe à l'intersection de nombreuses disciplines, et que les spécialités historiques des équipes (aéronautique et espace, signal, robotique, automatique, math et stat...) doivent fusionner pour que la question progresse.

Nos travaux ont porté principalement sur l'analyse du problème à partir de mesures en vraie grandeur, analyse possible car le véhicule VERT nous donne une trajectoire de référence de précision décimétrique. Ainsi j'ai monté les expérimentations pour le projet CIEC financé par le CNES avec les partenaires Thales, ENAC/Supaero et l'UTT, qui ont permis **d'évaluer des propositions d'adaptation des algorithmes de l'aéronautique à l'automobile**. De même, j'ai participé à plusieurs projets européens liés à cette même problématique (au sein desquels on retrouve certains des organismes précités comme partenaires) : GIROADS - *Galileo Introduction in Roads*, et surtout CVIS - *Cooperative Vehicle Infrastructure Systems*.

Par ailleurs, j'ai été associé aux travaux de thèse d'Olivier le Marchand, comme membre du comité de suivi (thèse UTC, sur bourse CIFRE Renault, le LCPC étant associé en co-direction). Plusieurs séminaires LCPC-UTC Heudiasyc ont été organisés par Philippe Bonnifait et moi dans ce cadre, puis dans celui de CVIS avec la thèse de Clément Fouque.

Revenons sur les travaux d'Olivier le Marchand. L'une des faiblesses de l'algorithme RAIM est qu'il ne tire pas partie de la redondance temporelle. Celle-ci est intuitivement très utile en terme d'intégrité, et particulièrement simple à concevoir dans le cas d'un mobile qui roule sur une route : par exemple, la mesure de la distance que ce mobile parcourt entre deux instants offre un moyen de contrôle des positions calculées par le récepteur GNSS en ces deux instants.

Cette approche est inspirée de l'automatique et plus précisément du diagnostic. Le doctorant a posé le problème sous la forme d'un observateur d'état à mémoire finie, comportant au moins l'instant courant et l'instant précédent, voire davantage en remontant plus avant. Les observations extéroceptives (pseudo-distances et mesure Dopplers) sont regroupées dans le même vecteur que les commandes qui font évoluer le véhicule, et qui sont mesurées par les capteurs proprioceptifs (rotation de roues, de volant...). Le concept de « forme statique » est utilisé, avec empilement non seulement des données mais aussi des états. Il permet de détecter et d'identifier des défauts qui ne pourraient l'être dans un traitement au seul instant courant. C'est l'idée force de la thèse d'Olivier le Marchand.

4.6.3 – Approche en fusion lâche avec contraintes cartographiques

Il faut enfin mentionner l'utilisation des cartes numériques routières. Celles-ci sont généralement (pour ne pas dire systématiquement) couplées aux instruments de navigation. Calcul de position et map-matching peuvent être fait conjointement, et non pas séquentiellement, et il est intéressant d'utiliser la carte comme une contrainte dès lors que ses propriétés métriques (exactitude) sont connues. Même si les cartes actuelles n'offrent pas une exactitude meilleure que quelques mètres, on sait que la cartographie numérique progresse, que les bases *vecteur* remplacent de plus en plus les bases *raster*, que la précision pourra être renseignée à l'avenir non plus seulement globalement mais pour tout objet routier numérisé. Ceci ouvre des opportunités d'utilisations nouvelles des cartes.

Cette piste a commencé d'être explorée dans le projet CVIS (projet européen FP6 e-safety CVIS Cooperative Vehicle Infrastructure Systems 2006-2010) [SCHLINGELHOF et al., 2007], puis dans la thèse d'Ahmed Selloum, pour laquelle j'étais conseiller d'étude avec Eric le Carpentier, Maître de Conférence à l'IRCCyN.

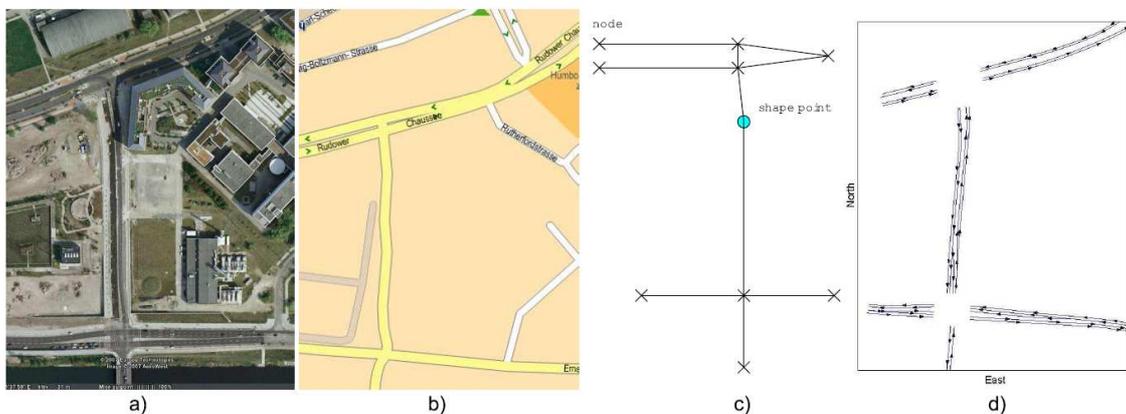


Figure 4.7 : vue aérienne (a) du site de test CVIS à Berlin, rendu cartographique standard (b), topologie standard (c), et carte précise multi-voies (d) du même site

Dans CVIS, plus particulièrement dans POMA (qui est le sous-projet dans lequel sont élaborés les systèmes de positionnement et map-matching des véhicules hébergeant les applications) j'ai introduit un nouveau concept de carte numérique (cf. figure 4.7), d'un

niveau de précision submétrique [BÉTAILLE and TOLEDO, 2010], [SCHLINGELHOF et al., 2008], [PEYRET et al., 2008], [SCHLINGELHOF et al., 2007]. Certaines applications CVIS requièrent en effet une précision au niveau de la voie de circulation (lane-level) dans différents environnements : inter-urbain, ville...

J'ai recherché comment il est possible de fusionner non seulement les technologies inertielles et satellitaires mais aussi d'ajouter la connaissance a priori que constitue la carte numérique. Ainsi, nombre de publications vers la fin du projet (puis au-delà en thèse avec Ahmed Selloum) portent sur l'utilisation de cartes précises (Emap pour *Enhanced map*), avec une collaboration étroite avec l'UTC. Dans ces cartes numériques, la géométrie des voies de circulation est décrite par des clothoïdes, et toutes les voies sont représentées. J'ai proposé une **méthodologie pour élaborer les cartes précises et multi-voies d'une part, et d'autre part les utiliser dans un système de localisation temps réel** (Map-Aided Location).

Le concept d'utilisation d'une Emap pour la localisation a été validé d'abord sur la zone de Nantes Cheviré, rocade ouest, où la plupart **des essais de faisabilité ont été réalisés sous ma responsabilité avec la co-opération de deux post-doctorants** (Fabien Ramos et Jean Laneurit) **et un chercheur invité de l'Université de Murcie** (Rafael Toledo-Moreo). Ces travaux sont jugés d'un grand intérêt par les partenaires cartographes de CVIS (NavTeq et TeleAtlas).

En thèse au LCPC sur le sujet de la localisation aidée par la carte numérique, **Ahmed Selloum** a principalement produit une analyse mathématique approfondie du concept de localisation sous contraintes cartographiques introduit par le Laboratoire Géolocalisation pendant CVIS, avec des cartes précises, et l'optimisation des performances en précision, intégrité, robustesse et temps de calcul à l'implémentation en temps réel.

J'ai co-encadré avec François Peyret et Eric le Carpentier (IRCCyN) les travaux d'Ahmed Selloum. Je suis avec eux co-auteur de quatre articles [SELLOUM et al., 2010], [SELLOUM et al., 2009a], [SELLOUM et al., 2009b], [SELLOUM et al., 2009c] qui dans leur ensemble présentent les avancées pendant la thèse. Ce sont des articles de

conférences à comité de lecture : GRETSI 2009 (communauté française de traitement du signal), IEEE ITS 2009 et 2010 (Intelligent Transportation Systems Society), et un article de revue aux éditions numériques de l'INRETS (2009). Ces avancées sont :

- de nature conceptuelle : l'introduction des informations d'une carte précise dans la formulation du problème de l'estimation de la position du véhicule ;
- de nature opérationnelle : avec un filtre particulière implémentable en temps réel, et robustifié grâce à la carte, de sorte que les positions GPS du filtre en couplage lâche et les mesures du gyromètre sont confrontées aux données cartographiques et contraintes par celles-ci.

Pour terminer sur la localisation sous contraintes cartographiques, je tiens à mentionner tout particulièrement le **succès des deux démonstrations faites dans le cadre de CVIS à Stockholm (ITS World Congress 2009) et à Amsterdam (Intertraffic & Cooperative Mobility 2010)** (cf. figure 4.8). **J'ai personnellement contribué aux algorithmes et cartes précises implémentés lors de ces démonstrations.** Ces rendez-vous nous ont permis de monter à la communauté scientifique et industrielle des ITS des résultats de recherches applicables.



Figure 4.8 : interface de démonstration de l'application *lane-matching* de CVIS

ANALYSE DES ERREURS DE PSEUDO-DISTANCE PAR MULTI-TRAJETS ET NAVIGATION URBAINE AIDEE PAR LA CARTE 3D

Le Laboratoire Géolocalisation de l'IFSTTAR s'intéresse aux besoins de positionnement pour la mobilité, pour des applications du domaine des systèmes de transport intelligents. Le chapitre 4 a montré des solutions satisfaisantes pour le contexte inter-urbain, ce qui couvre déjà un certain nombre de besoins. Mais beaucoup d'autres applications sont concentrées essentiellement en ville. Le contexte urbain est propice aux perturbations dans la réception des signaux des satellites, qui compliquent la localisation précise des équipements, par ailleurs peu sophistiqués (afin de minimiser le coût de telles applications pour l'utilisateur).

*GEOLOC s'est engagé dans des projets pluriannuels consacrés à la localisation en ville, tels que CTS-Sat (ULISS, 2007-2009), CityVIP (ANR, 2008-2011) et Inturb (MEDDE, DGITM 2012-2014). Ce chapitre, qui reprend l'article co-écrit avec Maxime Voyer [VOYER et al., 2013], s'intéresse à la **problématique de localisation GNSS en milieu urbain où la connaissance a priori du bâti est disponible sous la forme d'une base de données numérique.***

La fusion de données mise en œuvre ici est serrée, car on s'intéresse aux mesures brutes de pseudo-distances (et non aux solutions pré-calculées par les récepteurs GPS), et cette fusion inclut des données cartographiques, nécessairement 3D s'agissant ici de modéliser les trajets satellites-récepteur. Les données ont été fournies principalement par l'IGN : Bati 3D™ et dernièrement BD Topo®. En conclusion, les algorithmes développés ici sont parmi les plus avancés que GEOLOC ait produits.

En termes de production de recherche, on notera :

- **les post-doctorats de Donnay-Fleury Nahimana**, sur financement ULISS (projet CTS-Sat) : *analyse de la visibilité satellitaire GPS par lancer de rayons et planification des trajets du robot mobile de transport de visiteurs à la Cité de l'Espace*, **et Florian Mougel**, sur financement PREDIT (projet CityVIP) : *développement d'un algorithme de tri des satellites utilisant Bati 3D™ ;*

- *des articles phares comme : [PEYRAUD et al., 2013] dans CityVIP, auquel j'ai largement contribué grâce aux résultats obtenus pendant le post-doctorat de Florian Mougel, [BÉTAILLE et al., 2012], présentant la modélisation mise en œuvre dans Inturb, et comment elle permet d'améliorer la qualité du service de géolocalisation en ville.*

Les perspectives sont nombreuses : le stage de Maxime Voyer en 2013 [VOYER et al., 2013] a déjà permis d'entrevoir des résultats prometteurs utilisant simplement la base de données BT Topo® de l'IGN, exploitables pour la suite et la fin du projet Inturb.

5.1 – Contexte

La principale cause de dispersion des signaux GNSS en milieu urbain est due à la morphologie de l'environnement et notamment la géométrie des bâtiments. Ces derniers non seulement cachent certains satellites, dont le signal n'est plus reçu, mais provoquent également des multi-trajets qui, s'ils n'atténuent pas totalement le signal, le retardent et provoquent ainsi une erreur de positionnement.

5.1.1 – Propagation et géométrie des bâtiments

Les bâtiments constituent principalement des obstacles qui bloquent le trajet direct du signal en « portée optique » ou, en anglais, line-of-sight (LOS), c'est-à-dire sur la droite qui relie le satellite au récepteur. En conséquence, il faut une constellation de satellites suffisamment fournie pour obtenir le minimum de quatre satellites visibles requis pour le calcul de la position.

Dans le projet CTS-Sat, le **post-doc Donnay-Fleury Nahimana** a analysé par lancer de rayons au moyen d'Ergospace® la visibilité de la constellation GPS et planifié des trajets du robot dans l'environnement de la Cité de l'Espace, modélisé en 3D [LUCET et al., 2009] (cf. figure 5.1).

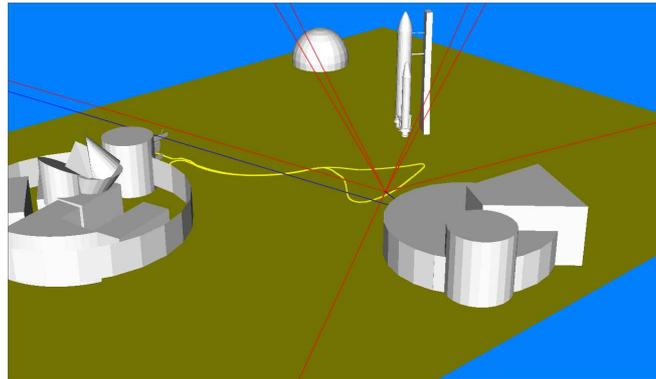


Figure 5.1 : le modèle 3D de la Cité de l'Espace, la trajectoire du robot et le lancer de rayons

Plus généralement en ville, le signal étant bloqué de part et d'autre de la rue, on se retrouve à récupérer des signaux uniquement dans le sens des rues. La géométrie de la constellation utile se trouve alors très dégradée. On utilise habituellement comme critère la *dilution of precision* (DOP) pour qualifier cette géométrie. Par exemple, si on roule dans une rue orientée Est-Ouest, l'erreur en longitude reste faible tandis qu'elle augmente fortement en latitude. Statiquement, une étude menée dans les canyons urbains de Londres [GROVES et al., 2012] prouve que, lorsqu'une solution est possible, le DOP perpendiculaire à la rue dépassera 5 dans 22% des cas, alors que le DOP axial ne dépassera 5 que dans 12% des cas.

De plus, les façades des bâtiments réfléchissent le signal. Ainsi, en plus des signaux reçus directement, le récepteur capte des signaux réfléchis, parfois plusieurs fois : on parle de multi-trajets. Si l'électronique reçoit d'un satellite à la fois des signaux directs et réfléchis, le codage orthogonal (CDMA) utilisé par le système lui permet quasiment d'éliminer les multi-trajets. Mais il arrive souvent que seuls les trajets indirects existent (NLOS : non light-of-sight), ce qui entraîne une erreur de positionnement considérable. En effet, les signaux NLOS parcourent une distance additionnelle par rapport à la pseudo-distance

normalement mesurée entre le récepteur et le satellite. Cette erreur est toujours positive et peut atteindre plusieurs mètres selon la géométrie.

5.1.2 – Solutions existantes

Des solutions existent pour diminuer les effets des multitrajets et des satellites NLOS. On peut les classer en trois catégories :

- Les solutions traitées par le récepteur : ce dernier trie les signaux et élimine ceux dont la polarisation est incorrecte ou le niveau de réception (RSSI) trop faible. Cette méthode donne des résultats mitigés ;

- Les solutions sous contraintes (cf. § 4.6.3) : on essaie de réduire l'imprécision en imposant une contrainte, issue généralement d'une base de données spatiales. Par exemple, à bord d'un véhicule, on élimine toutes les positions qui ne correspondent pas à la voirie (*l'espace roulant*). L'altitude est ensuite extraite d'un MNT. Cette méthode suppose que les bases de données utilisées sont plus précises que le positionnement temps réel, ce qui se révèle parfois douteux ;

- L'utilisation d'un modèle 3D de la ville : à l'aide de ce modèle, un masque d'élévation détermine une zone de confiance où la visibilité des satellites est bonne [BRADBURY et al., 2007]. Pour déterminer quels signaux sont NLOS, il suffit tout simplement de calculer l'élévation de chaque satellite et de décider s'il est contenu dans la zone de visibilité fournie par le masque d'élévation. Le problème est que cette zone de visibilité est évidemment dépendante de la position (inconnue) du mobile.

Les caméras embarquées constituent une aide pour caractériser l'environnement et au final déterminer la nature des signaux. En utilisant un objectif panoramique pointé vers le ciel (ou un ensemble de caméras), on peut générer une image représentant la vue du récepteur GNSS [MEGURO et al., 2009], [MARAIS et al., 2012]. Si l'on connaît l'orientation de la caméra ainsi que la constellation GNSS à l'instant de la prise de vue on peut alors déterminer les satellites bloqués. Cette technique est utilisable avec des véhicules qui ont la capacité et la taille d'accueillir ce type d'équipement.

Si l'on dispose d'une base de données du bâti, on peut créer un masque d'élévation des bâtiments à partir d'un SIG : tout d'abord, on génère une grille sur le modèle 3D de la ville représentant toutes les positions possibles du véhicule autour d'une position a priori, puis, à chaque maille de cette grille, on calcule le masque d'élévation par lancer de rayons (*ray tracing*). En phase de navigation, il faut se donner un critère selon lequel telle ou telle position de la grille sera la plus vraisemblable, eu égard les mesures disponibles et les solutions calculées correspondantes. [OBST et al., 2012], [JIANG and GROVES, 2012], [MIURA et al., 2013] et nos travaux présentés ensuite constituent l'état de l'art (auquel s'ajoute [BOURDEAU et al., 2012] en phase de « tracking » du signal GPS). On peut également citer le calcul affiné grâce au shadow matching [GROVES, 2011] : il s'agit de restreindre l'espace dans lequel le récepteur peut se situer en identifiant certains satellites fournis par les éphémérides mais pour lesquels le récepteur n'a pas fait de mesure directe.

Notre première solution originale, combinant les contraintes et le modèle 3D, a été mise en œuvre dans le projet CityVIP.

5.1.3 – Solution mise en œuvre dans CityVIP

CityVIP regroupe huit partenaires universitaires, industriels ou institutionnels dont l'IFSTTAR. Ce projet, qui a duré de 2009 à 2012, avait pour objectif de développer des méthodes et systèmes de géolocalisation 3D précis et intègres pour l'aide à la conduite ou la navigation autonome de véhicule en environnement urbain. En particulier, il s'agissait de corriger les perturbations liées au système GNSS, notamment les multi-trajets ou coupures des signaux possibles en milieu urbain.

Le projet a été divisé en quatre lots : **localisation par GPS aidée par la carte et odométrie** ; localisation par vision ; évitement d'obstacles et planification de trajectoire ; **bases de données géographiques et images**. Ce dernier lot consistait à utiliser un SIG 3D embarqué permettant de séparer les signaux LOS des signaux NLOS, afin d'affiner la localisation développée par le premier lot. Pour permettre cette discrimination, on doit connaître les positions du récepteur (position prédite et contrainte en largeur et altitude de la route), des satellites (positions connues) ainsi que l'environnement urbain 3D à proximité

du récepteur [PEYRAUD et al., 2013], [BÉTAILLE et al., 2012]. Cet environnement est modélisé dans la base de données IGN Bati 3D™ : les éléments 3D au voisinage du récepteur GNSS sont extraits de la base de données et le SIG 3D embarqué fournit directement une image virtuelle dans les directions azimutales de chaque satellite. Un traitement d'image en temps réel fournit la hauteur de la façade, et donc l'élévation critique imposée par le bâtiment (el_c) en deçà de laquelle le satellite disparaît. Si son élévation, calculée à partir des éphémérides, est inférieure à l'élévation critique, alors on ne tient pas compte des observations de ce satellite dans le calcul. La figure 5.2 illustre le principe, mis au point pendant le résultats obtenus pendant le **post-doctorat de Florian Mougel**, [BÉTAILLE et al., 2012].

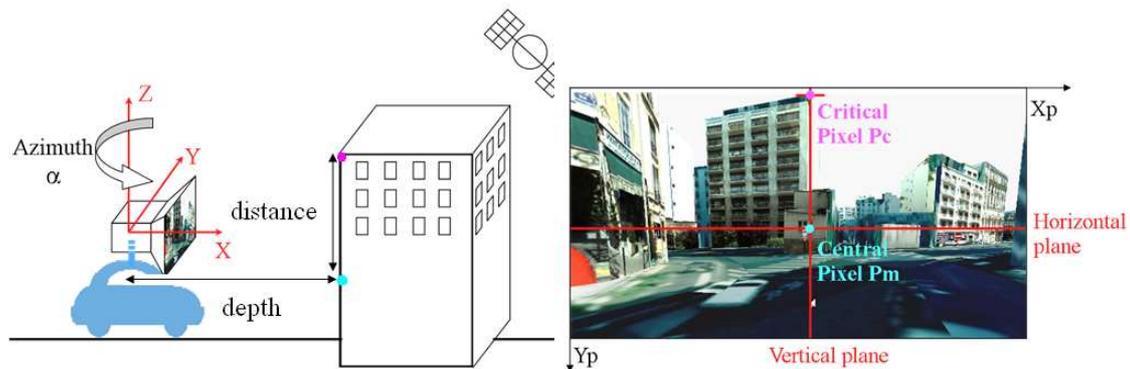


Figure 5.2 : une image virtuelle issue de la base de données et son traitement géométrique

La manière la plus simple d'illustrer l'utilité de cette méthode est d'observer la trajectoire d'un parcours en milieu urbain, obtenue ici par un récepteur standard uBlox LEA6-T en automobile, et de mesurer l'erreur plane de ce parcours sur une vue aérienne.

On voit alors (cf. figure 5.3a) que les méthodes basées sur la détection de signaux LOS/NLOS (bleu) et sur le rapport signal/bruit (SNR en rouge) sont relativement dispersées par rapport à la trajectoire de référence (vert) quand ces stratégies sont utilisées directement (c'est-à-dire sans contraintes). Ces mêmes méthodes combinées à des données odométriques et des contraintes de positionnement sur la voirie fournissent un résultat beaucoup plus satisfaisant avec un avantage pour le tri LOS/NLOS par rapport au tri SNR (cf. figure 5.3b).

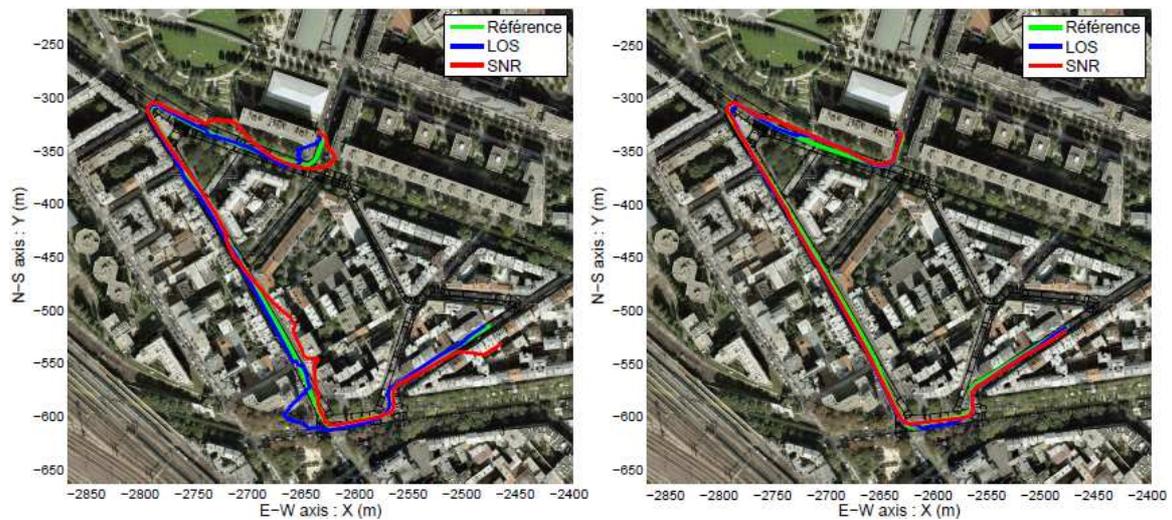


Figure 5.3 : vue des solutions obtenues selon les stratégies de tri (LOS/NLOS ou SNR) sans (a) et avec (b) applications des contraintes d'espace roulant

Le projet CityVIP apporte donc une amélioration importante de la précision de la solution de positionnement en environnement urbain grâce à différentes stratégies combinées : la navigation par odométrie contrainte par recalage sur l'espace roulant et corrigée par les seules observations des satellites en vue directe.

L'utilisation des données géométriques de la base de données Bati 3D™ est au coeur de cette méthode.

Cependant, la complexité de la modélisation précitée et de son usage en navigation en temps réel a motivé une approche plus simple dans le projet Inturb.

5.2 – Erreur par multi-trajets

Préalablement au projet Inturb, François Peyret a accueilli en stage ingénieur Katinka Mirk (Ecole Centrale de Nantes), avec qui nous avons mis au point une méthodologie de calcul des erreurs de mesures de pseudo-distances et Doppler par multi-trajets, en s'inspirant de mes travaux de thèse (qui portaient sur le même type d'erreurs mais en mesure de phase). Le récepteur en test est encore le uBlox LEA6-T.

Cette méthodologie de calcul des « erreurs vraies » s'appuie sur la trajectoire de référence du véhicule d'essais et de référence trajectographique (VERT) de l'IFSTTAR. Elle est obtenue en post-traitement par couplage de solutions PPK (post-process kinematic) Novatel bi-fréquence et de mesures inertielles par l'IMU Ixsea LandINS. Cette trajectoire de référence atteint une précision décimétrique [ORTIZ et al., 2013].

Le problème du décalage de l'horloge du récepteur en test est résolu au moyen du satellite le plus haut dans le ciel, réputé exempt de tout multi-trajet.

Pendant le stage de Katinka Mirk, il a été clairement mis en évidence sur des données réelles que **certains satellites, selon la configuration du bâti avoisinant le récepteur, sont fortement affectés par des trajets multiples**, et d'autres au contraire faiblement. En particulier, la relation entre la direction des rues parcourues et les erreurs de mesure est confirmée : dans des rues quasiment parallèles d'un même quartier, les satellites occultés sont les mêmes ; les satellites visibles simplement par réflexion sont aussi les mêmes. Par la suite, dans le projet Inturb, cette caractérisation de l'impact du bâti sur les signaux et leur propagation – dont l'interprétation géométrique sous certaines hypothèses simplificatrices est par ailleurs bien connue – a été vérifiée et exploitée dans le calcul de navigation.

5.3 – Le modèle de tranchée urbaine mis en œuvre dans Inturb

Le modèle dit tranchées urbaines a été développé en 2012 par GEOLOC dans le cadre du projet Inturb, en coordination avec la SCM (Société de Calcul Mathématique). Il représente la première étape d'un processus nommé méthode des tranchées urbaines. Cette méthode permet, grâce à une modélisation de l'environnement urbain a priori, de distinguer entre satellites LOS et NLOS [BÉTAILLE et al., 2013].

Le projet Inturb dispose de données de navigation issues de différentes mesures menées sur Paris, Nantes et Toulouse à l'aide du VERT. Le récepteur embarqué au cours de l'étude est un récepteur GPS uBlox LEA6-T fixé sur le toit.

La méthodologie consiste en quatre étapes :

- la caractérisation de l'environnement urbain 3D ;
- la classification des satellites LOS ou NLOS ;
- la correction des satellites NLOS en retranchant les distances additionnelles ;
- le calcul du positionnement.

5.3.1. – Caractérisation de l'environnement urbain

Nous ne prenons en compte que des tronçons de rue homogènes, c'est-à-dire correspondant à une portion de rue possédant approximativement les trois critères suivants :

- une même hauteur de bâti (identique de chaque côté de la rue) ;
- une même largeur de rue tout au long du trajet effectué par le véhicule ;
- une même position du véhicule dans la rue tout au long du trajet (entre 0 et 1 pour une largeur de rue, à partir de 0 pour l'extrême gauche et 1 l'extrême droite).

Pour estimer ces paramètres géométriques, la trajectoire de référence a été intégrée en kmz sous Google Earth™. Puis, chaque tronçon (ou tranchée urbaine) a été examiné(e) et la largeur de la rue estimée grâce à l'outil de calcul de distance de Google Earth™ (cf. figure 5.4).

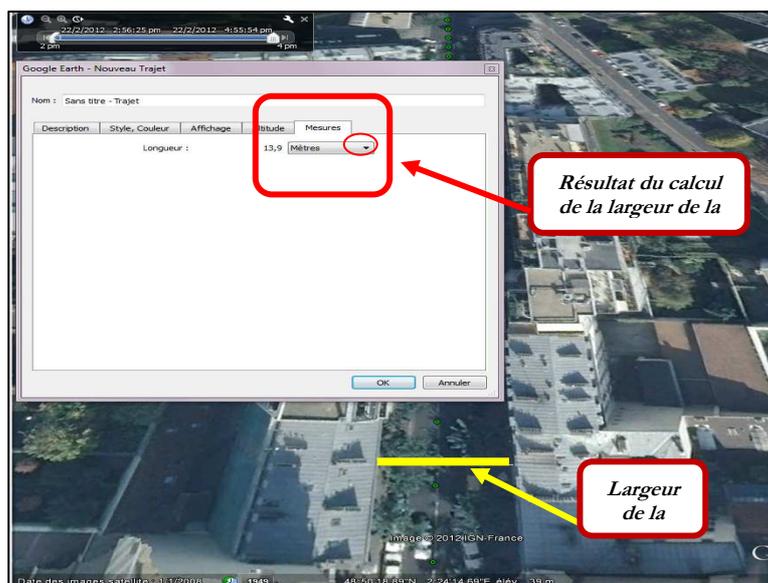


Figure 5.4 : saisie des tranchées urbaines sous Google Earth™

La hauteur des bâtiments est calculée grâce à l'outil Street View™ en comptant le nombre d'étages de chaque immeuble puis en multipliant par 2.5 à 3.5 m selon le type de la structure.

La position du véhicule est approchée par des valeurs fonction de la description de la rue : voie unique : P=0.5, deux voies : P=0.4 ou 0.6 selon le sens ou la voie, deux fois deux voies avec mail central : P=0.1, 0.2, 0.8 ou 0.9 selon le sens et la voie...

5.3.2. – Classification des satellites LOS/NLOS

À partir de la caractérisation de l'environnement urbain, on peut calculer une élévation critique (el_b) dans toutes les directions azimutales et représenter un « masque d'élévation » (cf. figure 5.5) pour chaque tranchée urbaine donnée, en supposant celle-ci infiniment longue. Ce masque va représenter les limites d'observation du récepteur à gauche et à droite. On distingue alors facilement les satellites qui ne sont pas masqués – ils se trouvent dans la zone délimitée par le masque gauche et le masque droite – des autres.

Une formulation géométrique simple de l'élévation critique (sous hypothèse de réflexions spéculaires) permet de déterminer, pour chaque satellite, sa classification LOS/NLOS, et, le cas échéant, le nombre de réflexions que son signal subit (jusqu'à trois réflexions sont considérées, cf. tableau 5.1).

| Pour les satellites situés du côté gauche de la rue | Pour les satellites situés du côté droit de la rue |
|--|--|
| $-\pi \leq \beta \leq 0$ OR $\pi \leq \beta \leq 2\pi$ | $-2\pi \leq \beta \leq -\pi$ OR $0 \leq \beta \leq \pi$ |
| $el_1 = el_b = \arctg \left \frac{H}{PW} \sin(\beta) \right $ | $el_1 = el_b = \arctg \left \frac{H}{(1-P)W} \sin(\beta) \right $ |
| $el_2 = \arctg \left \frac{H}{(2-P)W} \sin(\beta) \right $ | $el_2 = \arctg \left \frac{H}{(2-(1-P))W} \sin(\beta) \right $ |
| $el_3 = \arctg \left \frac{H}{(2+P)W} \sin(\beta) \right $ | $el_3 = \arctg \left \frac{H}{(2+(1-P))W} \sin(\beta) \right $ |

Tableau 5.1 : élévations critiques conduisant à 1, 2 ou 3 réflexions

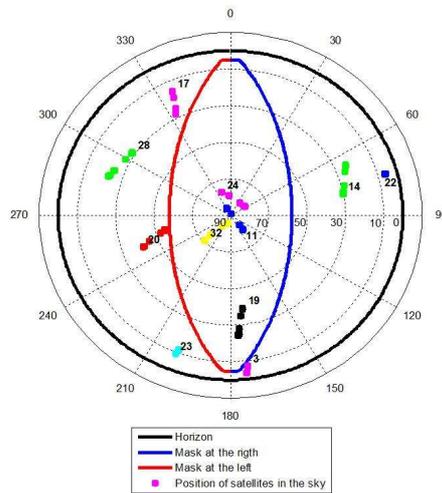
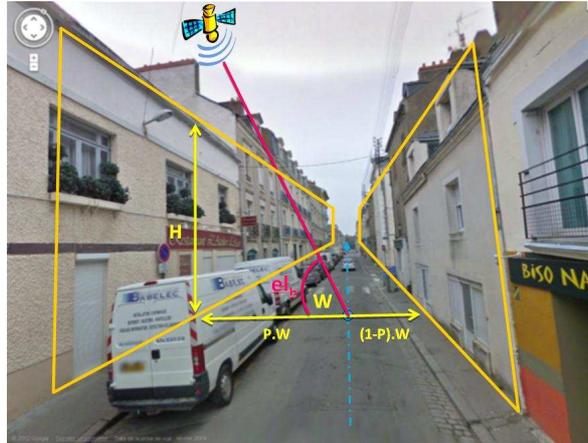


Figure 5.5 : illustration de l'application de la méthode dans la rue des Olivettes à Nantes.

Lors de l'étude de faisabilité à Nantes, quatre minutes de données ont été collectées rue des Olivettes à Nantes en quatre passages différents sur une demi-heure, soit environ 7500 observations satellites avec le récepteur LEA6-T à 5 Hz. En figure 5.4, les satellites LOS (PRN 11, 19, 24 and 32) et NLOS (PRN 3, 14, 17, 20, 22, 23, 28) se répartissent quasiment pour moitié de part et d'autre du masque d'élévation critique de la rue.

Toujours sur l'exemple de la rue des Olivettes à Nantes, après tri des satellites selon leur élévation par rapport à l'élévation critique d'une part, et calcul des erreurs vraies selon la méthodologie présentée en § 5.2 d'autre part, la figure 5.6 montre que la classification LOS/NLOS est pertinente et corrobore bien les biais caractéristiques des trajets multiples.

On note que lesdites erreurs sont globalement positives, car les signaux mesurés en NLOS parcourent un chemin additionnel par réflexion.

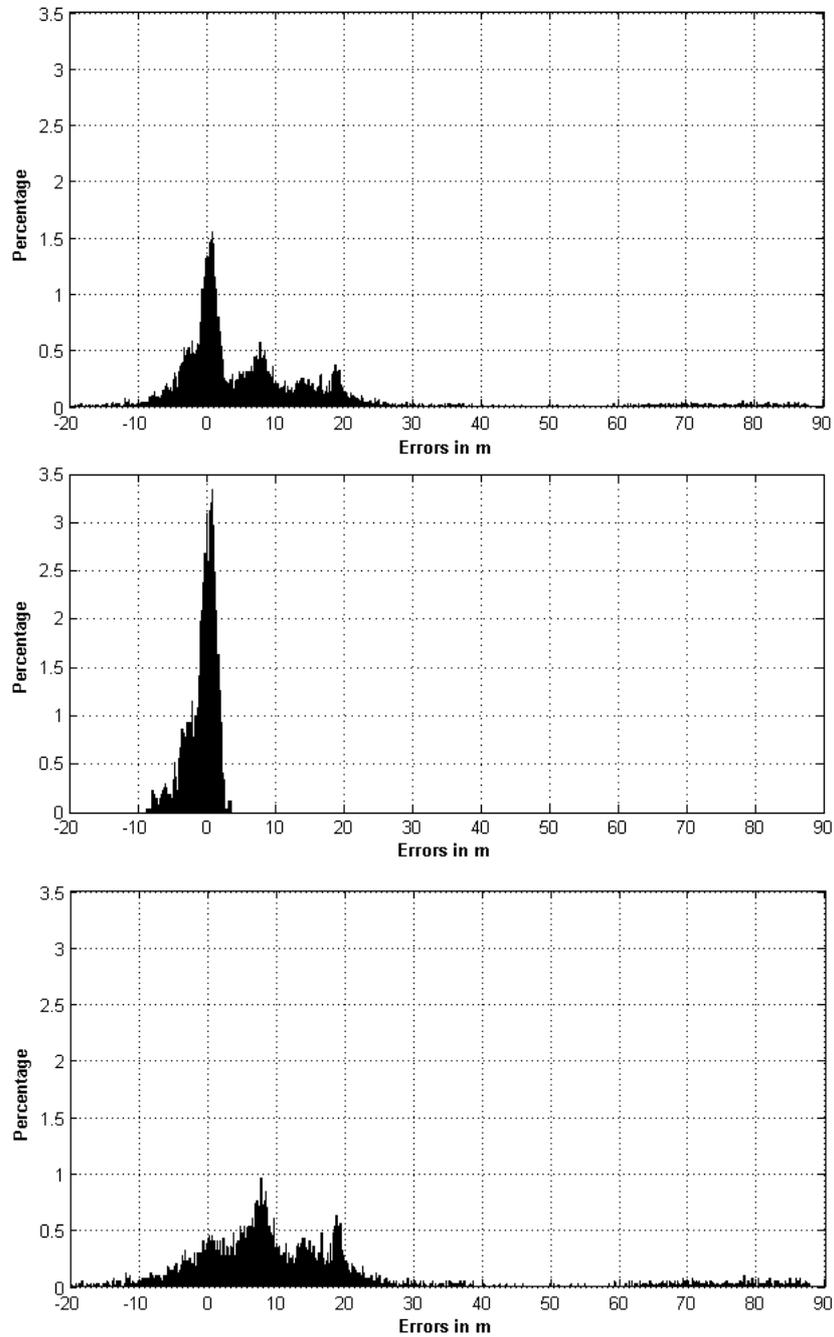


Figure 5.6 : densité de probabilité des erreurs de mesure dans une rue, pour tous les satellites (a), pour les satellites LOS seulement (b), et pour les satellites NLOS (c)

5.3.3. – Correction des mesures des satellites NLOS

Les signaux des satellites dont les élévations sont supérieures à celles des constructions sont captés directement tandis que les signaux des autres satellites subissent des phénomènes de réflexion à l'origine des multi-trajets. En conséquence, la pseudo-distance mesurée est composée de la distance réelle entre le satellite et le récepteur à laquelle s'ajoute une distance liée aux réflexions sur les obstacles environnants : la distance additionnelle.

Celle-ci est calculée sous hypothèse de réflexions spéculaires.

| Pour les satellites situés du côté gauche de la rue | Pour les satellites situés du côté droit de la rue |
|---|--|
| $-\pi \leq \beta \leq 0$ OR $\pi \leq \beta \leq 2\pi$ | $-2\pi \leq \beta \leq -\pi$ OR $0 \leq \beta \leq \pi$ |
| $\Delta_{d1} = 2W(1-P)\cos(el)\sin(\beta)$ | $\Delta_{d1} = 2W(1-(1-P))\cos(el)\sin(\beta)$ |
| $\Delta_{d2} = 2W\cos(el)\sin(\beta)$ | $\Delta_{d2} = 2W\cos(el)\sin(\beta)$ |
| $\Delta_{d3} = 2W(2-P)\cos(el)\sin(\beta)$ | $\Delta_{d3} = 2W(2-(1-P))\cos(el)\sin(\beta)$ |

Tableau 5.1 : élévations critiques conduisant à 1, 2 ou 3 réflexions

5.3.4. – Calcul de la solution de navigation

Contrairement à la méthode mise en oeuvre dans CityVIP qui supprime les satellites NLOS (avec pour conséquence de diminuer la disponibilité de la solution si quatre satellites en LOS ne sont pas visibles), le calcul du positionnement du récepteur dans Inturb peut utiliser des satellites en NLOS une fois la distance additionnelle corrigée.

Le principe d'application de la méthode des tranchées urbaines est le suivant. À chaque époque de calcul, on détecte les satellites en LOS. Si on en trouve au moins quatre, alors on les utilise pour le calcul de positionnement ; si la contrainte urbaine est très forte et que les satellites en LOS ne sont pas suffisants, alors on ajoute tous les satellites en NLOS 1 réflexion corrigés. De la même manière, si nécessaire, on ajoute les satellites en NLOS 2 réflexions corrigés puis éventuellement les satellites en NLOS 3 réflexions corrigés.

Le positionnement utilise alors une méthode classique de moindres carrés. On a choisi de ne pas pondérer (par exemple avec le SNR) et d'utiliser un filtre (ex : Kalman utilisant un modèle cinématique de navigation) pour mieux mettre en évidence l'effet du tri LOS/NLOS par rapport à tout autre effet.

5.4 – Résultats de l'application du modèle de tranchée urbaine et perspectives

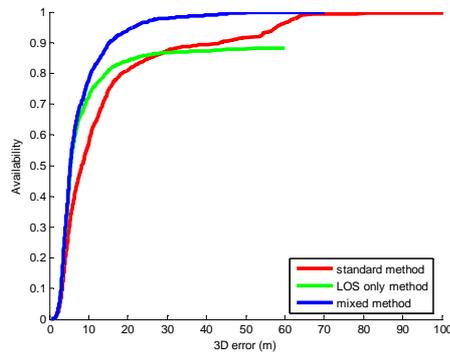
5.4.1 – Résultats

Avec l'application de la méthode des tranchées urbaines sur un récepteur bas coût, la disponibilité est la même qu'en GPS standard (c'est-à-dire sans tri de satellites ou prise en considération de signaux NLOS avec l'ajout de distances additionnelles) : elle atteint presque 100%. Le fait que les satellites en NLOS puissent être utilisés avec la méthode des tranchées urbaines permet de garantir une très forte disponibilité contrairement à une méthode qui les éliminerait (comme dans CityVIP).

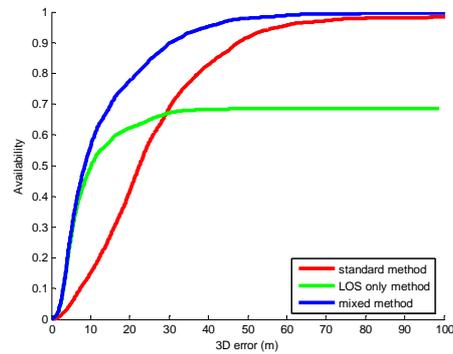
Les distributions cumulées de l'erreur de positionnement sont représentées figure 5.7 pour Nantes, Paris XIIème arrondissement, Paris Grands Boulevards, et Toulouse.

Chaque graphe montre la « disponibilité de précision », c'est-à-dire la disponibilité représentée entre 0 et 1 (i.e. 100%) en fonction de la précision en m (c'est l'erreur 3D par rapport à la trajectoire de référence). La solution standard tous satellites figure en rouge, la solution satellites LOS seuls en vert (on constate une diminution sévère de la disponibilité), et la solution *mixte* en bleu : satellites LOS, plus satellites NLOS corrigé (à disponibilité égale à la solution standard).

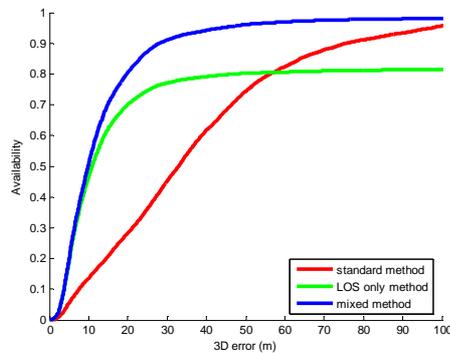
Sur Paris Grands Boulevards par exemple, totalisant plus de 3 heures de données enregistrées en tranchées urbaines, la médiane de l'erreur de positionnement passe de 32 m pour la méthode tous satellites (courbe en rouge) à 10 m environ pour la méthode des tranchées urbaines (courbe en bleu) soit une amélioration de 70% [BÉTAILLE et al., 2014b].



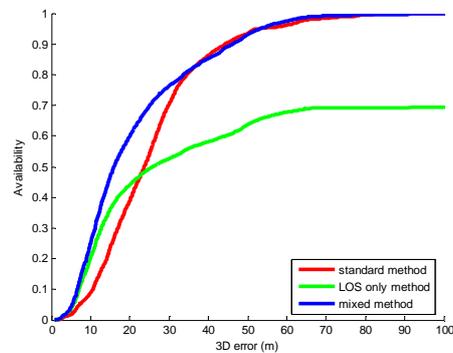
a : Nantes (5 min de données)



b : Paris XIIème (40 min de données)



c : Grands Bds (3h15 de données)



d : Toulouse (20 min de données)

Figure 5.7 : densité de probabilité cumulée des erreurs de localisation 3D à : Nantes (a), Paris XIIème (b), Paris Grands Boulevards (c), et Toulouse (d)

5.4.2 – Perspectives dans Inturb

La méthode des tranchées urbaines présente quelques limites :

- La constitution du modèle 3D de l'environnement urbain est très simple et oublie beaucoup d'éléments pouvant interférer dans le calcul de position du récepteur. Dans son élaboration, on omet le fait qu'une tranchée peut être asymétrique, c'est-à-dire avoir une hauteur de bâti différente de chaque côté de la rue (voire nulle d'un côté si la route longe un champ, par exemple). On ne prend en compte qu'une seule largeur et position du

véhicule. Or, on peut considérer que sur de grands boulevards, on dispose de plusieurs voies identifiables par sens de conduite et dans lesquelles on peut rouler.

- Le masque d'élévation est également touché par ce modèle. En réalité, il ne présente pas la forme d'un ovale : en effet, on considère que les 3 paramètres sont valables en tous points de la tranchée ; or, au début et à la fin du tronçon, logiquement, le masque d'élévation est bien plus ouvert. On suppose, en fait, dans la méthode que le tronçon est infini.

- Le calcul de la distance additionnelle considère que la surface sur laquelle le signal arrive réfléchit le signal sans le diffuser. C'est une approximation physique. En outre, l'environnement proche du véhicule est également idéalisé, puisqu'on ôte : les obstacles se trouvant dans les zones urbaines tels que les autres véhicules, et dans une moindre mesure cyclistes et piétons, passant en mouvements continuels à proximité de l'antenne du récepteur ; la végétation en général (arbres longeant les tronçons identifiés précédemment par exemple).

- Surtout, cette méthode est très coûteuse : il faut découper le parcours en tronçons de largeur et hauteur constantes. Pour chaque point de ces tronçons, il faut alors calculer le triplet de valeurs et l'intégrer dans la base de données. Cela prend un temps considérable à mettre en place.

- Enfin, on note que cette méthode utilise plusieurs fois la trajectoire de référence comme position a priori pour déterminer les rues dans lesquelles on se situe et donc identifier L et H ; et pour déterminer la position transversale dans cette rue, à savoir P.

J'ai suggéré deux nouvelles approches qui ont déjà produit des résultats préliminaires proches de ceux présentés ici.

Tout d'abord, s'agissant de la trajectoire de référence, il convient *a minima* de traiter plusieurs hypothèses de position transversale P (en supposant qu'on ait correctement identifié la rue par map-matching). Un critère simple basé sur la conformité de l'hypothèse avec le résultat de calcul de navigation a été testé avec succès [BÉTAILLE et al., 2013b].

Ensuite, une automatisation du modèle a été démontrée pendant le stage de Maxime Voyer, que j'ai encadré au premier semestre 2013. L'algorithme développé renseigne automatiquement les paramètres L et H, des deux côtés des rues indépendamment, à partir de la base de données géographiques BD Topo® de l'IGN, couches route et bâti. Elle est disponible sur toute la France (Référentiel à Grande Echelle) et offre des hauteurs de bâtiment avec une précision métrique au moins aussi bonne que l'approche précédente (cf. § 5.3.1). L'hypothèse de position correspond à la couche route, donc un réseau filaire simple (non multi-voies, cf. figure 4.7 c) mais standard. Là encore, les résultats obtenus restent du niveau de ceux présentés en § 5.4.1, confirmant la pertinence du modèle automatique [VOYER et al., 2013].

5.5 – Résumé des contributions scientifiques dans le domaine des ITS

Résumé des contributions scientifiques en géolocalisation de véhicules pour les ITS : la principale originalité des travaux menés – tant en couplage lâche que serré – tient à l'utilisation de données de la géomatique en localisation sous contraintes. Ainsi, la thèse d'Ahmed Selloum et le projet CVIS POMA ont démontré l'intérêt de résoudre ensemble les problèmes de localisation et de map-matching, avec production d'un indicateur d'intégrité associé. Les références remarquables, outre la thèse elle-même, sont : [TOLEDO et al., 2010] et [BÉTAILLE and TOLEDO, 2010], aux *Transactions IEEE ITS*. Des données numériques nouvelles présentant toutes les voies de circulation ont été proposées alors. Dans les recherches les plus récentes, les modèles urbains 3D disponibles à l'IGN ont été intégrés au calcul de la solution de navigation, avec correction des mesures de distances aux satellites identifiés comme invisibles en direct. Cette correction a montré son efficacité, avec un gain atteignant 70% par rapport à un solveur standard dans Paris par exemple. [PEYRAUD et al., 2013], à *Sensors*, et [BÉTAILLE et al., 2013a], au *Magazine IEEE ITS*, sont les principales publications se référant à ces travaux. Un article de synthèse dans une revue internationale à comité de lecture a été soumis début 2014 et accepté ([BÉTAILLE et al., 2014a], au *Journal of Navigation, Cambridge*).

REFERENCES

[BARNES, 2000] - Barnes, J.B., Real Time Kinematic GPS and multipath : characterisation and improved least squares modelling, PhD thesis, University of Newcastle, 2000

[**BÉTAILLE et al., 2014a**] - **Bétaille, D.**, F. Peyret, M. Voyer, From standard digital map data toward map-aided GNSS location at lane-level, Journal of Navigation, submitted in January 2014 and accepted

[**BÉTAILLE et al., 2014b**] - **Bétaille, D.**, F. Peyret, M. Ortiz, How to enhance accuracy and integrity of satellite positioning for mobility pricing in cities : the Urban Trench method, Transport Research Arena Europe, Paris, April 2014

[**BÉTAILLE et al., 2013a**] - **Bétaille, D.**, F. Peyret, M. Ortiz, S. Miquel, L. Fontenay, A new modelling based on urban trenches to improve GNSS positioning Quality of Service in cities, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 5, No. 3, Fall 2013

[**BÉTAILLE et al., 2013b**] - **Bétaille, D.**, F. Peyret, M. Ortiz, S. Miquel, L. Fontenay, GNSS accurate positioning including satellite visibility check in a multiple hypotheses 3D mapping framework, ENC GNSS Congress, Vienna, April 2013

[**BÉTAILLE et al., 2012**] - **Bétaille, D.**, S. Peyraud, F. Mougel, S. Renault, M. Ortiz, D. Meizel, F. Peyret, Using road constraints to progress in real-time NLOS detection, IEEE IV Symposium, workshop : navigation, perception, accurate positioning and mapping for intelligent vehicles, Alcalá de Henares, June 2012

[**BÉTAILLE and TOLEDO, 2010**] - **Bétaille, D.**, R. Toledo-Moreo, Creating enhanced maps for lane-level vehicle navigation, IEEE Transactions on ITS, Vol. 11, No. 4, December 2010

[**BÉTAILLE et al., 2010**] - **Bétaille, D.**, P. Nicolle, S.-S. Ieng, Trajectographie submétrique par couplage DGPS, carte précise des marquages et vision, Conférence PRAC, Paris, Mai 2010

[**BÉTAILLE, 2008**] - **Bétaille, D.**, Gyrolis : logiciel de localisation de véhicule en post-traitement par couplage GPS - gyromètre - odomètre, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No. 272, Octobre-Novembre 2008

[**BÉTAILLE et al., 2008**] - **Bétaille, D.**, F. Peyret, O. Nouvel, W. Vigneau, G. Duchâteau, H. Secretan, How to produce a reference trajectory for studying GNSS errors in urban environments, ENC GNSS Congress, Toulouse, April 2008

[**BÉTAILLE et al., 2007**] - **Bétaille, D.**, A. Chapelon, B. Lusetti, M. Kais, D. Millescamps, High integrity reference trajectory for benchmarking land navigation data fusion methods, IEEE IV Symposium, Istanbul, June 2007

[**BÉTAILLE et al., 2006**] - **Bétaille, D.**, P. Cross, H.-J. Euler, Assessment and improvement of the capabilities of a window correlator to model GPS multipath phase errors, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No. 2, April 2006

[**BÉTAILLE et al., 2005**] - **Bétaille, D.**, M. Kais, Ph. Bonnnifait, F. Peyret, Development of loosely-coupled FOG/DGPS and FOG/RTK systems for ADAS and a methodology to assess their real-time Performance, IEEE IV Symposium, Las Vegas, NE, June 2005

[**BÉTAILLE, 2004**] - **Bétaille, D.**, Assessment and improvement of the capabilities of a window correlator to model GPS multipath phase errors, PhD thesis, University College London, 2004

[**BÉTAILLE, 2003**] - **Bétaille, D.**, A testing methodology for GPS phase multipath mitigation techniques, Proceedings of ION 16th International Technical Meeting of the Satellite Division, Portland, OR, September 2003

[**BÉTAILLE et al., 2003a**] - **Bétaille, D.**, J. Maenpa, H.-J. Euler, P. Cross, Overcoming the limitations of the phase multipath mitigation window, Proceedings of ION 16th International Technical Meeting of the Satellite Division, Portland, OR, September 2003

[**BÉTAILLE et al., 2003b**] - **Bétaille, D.**, J. Maenpa, H.-J. Euler, P. Cross, A new approach to GPS phase multipath mitigation, Proceedings of ION National Technical Meeting, Anaheim, CA, January 2003

[**BÉTAILLE and BONNIFAIT, 2002**] - **Bétaille, D.**, Ph. Bonnifait, Vehicles modeling and multi-sensor smoothing techniques for post-processed vehicles localisation, Proceedings of ION 15th International Technical Meeting of the Satellite Division, Portland, OR, September 2002

[**BOURDEAU et al., 2012**] - Bourdeau, A., M. Sahmoudi, J.-Y. Tourneret, Tight integration of GNSS and a 3D city model for robust positioning in urban canyons, Proceedings of ION GNSS-2012, The Institute of Navigation, Nashville, Tennessee, 2012

[**BOUVET et al., 2001**] - Bouvet, D., G. Garcia, B.J. Gorham, **D. Bétaille**, Precise 3-D localization by automatic laser theodolite and odometer for civil-engineering machines, IEEE ICRA, Seoul, May 2001

[**BOUVET et al., 2000**] - Bouvet, D., G. Garcia, B.J. Gorham, **D. Bétaille**, 3-D localization of pavers in a computer integrated road construction context, IARP workshop : advances in robotics for mining and underground applications, Brisbane, October 2000

[BRAASCH, 1996] - Braasch, M.S., Multipath effects, chapter 14 in Global Positioning System : theory and applications, edited by B.W. Parkinson and J.J. Spilker, Progress in Astronautics and Aeronautics Series, AIAA, 1996

[BRADBURY et al., 2007] - Bradbury, J., M. Ziebart, P. Cross, P. Boulton, A. Read, Code multipath modelling in the urban environment using large virtual reality city model : determining the local environment, Journal of Navigation, Vol. 60, No. 1, January 2007

[BRUNNER et al., 1999] - Brunner, F.K., H. Hartinger, L. Troyer, GPS signal diffraction modelling : the stochastic SIGMA- Δ model, Journal of Geodesy, Vol. 73, 1999

[CHAGGARA et al., 2002] - Chagarra, R., C. Macabiau, E. Chatre, Using GPS multi-correlator receivers for multipath parameters estimation, Proceedings of ION GPS-02, The Institute of Navigation, Portland, Oregon, 2002

[COMP and AXELRAD, 1996] - Comp, C.J., P. Axelrad, An adaptive SNR-based carrier phase multipath mitigation technique, Proceedings of ION GPS-96, The Institute of Navigation, Kansas City, Missouri, 1996

[CROSS et al., 2003] - Cross, P., **D. Bétaille**, F. Peyret, Improving GPS accuracy for construction applications through phase multipath mitigation, International Symposium on GNSS, Tokyo, October 2003

[DUCHATEAU et al., 2009] - Duchâteau, G., O. Nouvel, W. Vigneau, **D. Bétaille**, F. Peyret, H. Secrétan, How to assess and improve satellite positioning performances in urban environments, ITS World Congress, Stockholm, September 2009

[DUQUENNE et al., 2005] - Duquenne, F., S. Botton, F. Peyret, **D. Bétaille**, P. Willis, GPS – localisation et navigation par satellites, 2ème édition, Hermès-science Lavoisier, 2005

[DURAND, 2003] - Durand, S., Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS : étude détaillée des

équations d'observation et du problème de résolution des ambiguïtés entières, thèse de Doctorat, Observatoire de Paris, 2003

[GARIN and ROUSSEAU, 1996] - Garin, L., J. Rousseau, Enhanced strobe correlator multipath rejection for code and carrier, Proceedings of ION GPS-97, The Institute of Navigation, Kansas City, 1999

[GREWAL et al., 2001] - Grewal, M.S., L.R. Weill, A.P. Andrews, Global positioning systems, inertial navigation and integration, published by Wiley & Sons Inc., 2001

[GROVES et al., 2012] - Groves, P.D., Z. Jiang, L. Wang, M.K. Ziebart, Intelligent Urban Positioning using Multi-Constellation GNSS with 3D Mapping and NLOS Signal Detection, Proceedings of ION GNSS-2012, The Institute of Navigation, Nashville, Tennessee, 2012

[GROVES, 2011] - Groves, P.D., Shadow masking : a new GNSS positioning technique for urban canyons, Journal of Navigation, Vol. 64, No. 3, July 2011

[HATCH et al., 1997] - Hatch, R.R., R.G. Keegan, T.A. Stansell, Leica's code and phase multipath mitigation techniques, a Leica's letter, Torrance, California, 1997

[HATCH, 2000] - Hatch, R.R., Method and apparatus for code synchronisation in a GPS receiver, US patent 6,163,567, 2000

[HEWITSON and WANG, 2007] - Hewitson, S., J. Wang, GNSS receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) with a dynamic model, Journal of Navigation, Vol. 60, No. 2, April 2007

[ICD-GPS, 1999] - Navstar GPS Space Segment / Navigation User, Revision C, 11 October 1999

[JOLY et al., 2008] - Joly, C., **D. Bétaille**, F. Peyret, Étude comparative des techniques de filtrage non-linéaire appliquées à la localisation 2D d'un véhicule en temps réel, Revue Traitement du Signal, Vol. 25, No. 3, Mai-Juin 2008

[JOLY, 2006] - Joly, C., Caractérisation métrologique de capteurs inertiels et fusion avec un récepteur GPS/EGNOS en navigation automobile avancée », mémoire final de master recherche, Ecole Centrale de Nantes (IRCCyN), 2006

[JULIER and UHLMANN, 1996] - Julier, S., J. Uhlmann, A général method for approximating nonlinear transformations of probability distributions, Technical Report, Department of Engineering Science, University of Oxford, 1996

[JULIER and UHLMANN, 1997] - Julier, S., J. Uhlmann, A new extension of the Kalman filter to nonlinear Systems, Proceedings of the 11th International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, 1997

[KAIS et al., 2006] - Kais, M., D. Millecamp, **D. Bétaille**, B. Lusetti, A. Chapelon, A multi-sensor acquisition architecture and real-time reference for sensor and fusion method benchmarking, IEEE IV Symposium, Tokyo, June 2006

[KUUSNIEMI, 2005] - Kuusniemi, H., User-level reliability and quality monitoring in satellite-based personal navigation, PhD thesis, Tampere University of Technology, 2005

[LUCET et al., 2009] - Lucet, E., **D. Bétaille**, D.-F. Nahimana, M. Ortiz, D. Sallé, J. Canou, Real-time 2D localization of a car-like robot using dead-reckoning and GPS, with satellite masking prediction, workshop GDR Robotique : Localisation Précise pour les Transports Terrestres, Paris, Juin 2009

[MARAIS et al., 2012] - Marais, J., S. Ambellouis, A. Flancquart, S. Lefebvre, C. Meurie, Y. Ruichek, Accurate Localisation Based on GNSS and Propagation Knowledge for Safe Applications in Guided Transport, Proceedings of TRA-2012, Athens, 2012

[McGRAW and BRAASCH, 1999] - McGraw, G., M. Braasch, GNSS multipath mitigation using gated correlator technique, Proceedings of ION NTM-99, The Institute of Navigation, San Diego, California, 1999

[MEGURO et al., 2009] - Meguro, J.-I., T. Murata, J.-I. Takiguchi, Y. Amano, T. Hashizume, GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 1, 2009

[MIURA et al., 2013] - Miura, S., S. Hisaka, S. Kamijo, GPS Multipath Detection and Rectification using 3D Maps, IEEE ITS Conference, The Hague, October 2013

[OBST et al., 2012] - Obst, M., S. Bauer, P. Reisdorf, G. Wanielik, Multipath detection with 3D digital maps for robust multi-constellation GNSS/INS vehicle localization in urban areas, IEEE IV Symposium, Alcalá de Henares, June 2012

[**ORTIZ et al., 2013**] - Ortiz, M., V. Renaudin, F. Peyret, **D. Bétaille**, Using a reference vehicle for solving GNSS localization challenges, Inside GNSS, September-October 2013

[**PEYRAUD et al., 2013**] - Peyraud, S., **D. Bétaille**, S. Renault, M. Ortiz, F. Mougel, D. Meizel, F. Peyret, About Non-Line-Of-Sight Satellite Detection and Exclusion in a 3D Map-Aided Localization Algorithm, Sensors, Vol. 13, January 2013

[**PEYRET et al., 2014**] - Peyret, F., **D. Bétaille**, C. Piñana-Díaz, R. Toledo-Moreo, A.-F. Gómez-Skarmeta and M. Ortiz, GNSS autonomous localization : Non-Line-Of-Sight satellite detection based on digital maps of city environments, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 21, No. 1, March 2014

[**PEYRET et al., 2008**] - Peyret, F., **D. Bétaille**, J. Laneurit, R. Toledo-Moreo, Lane-level positioning for cooperative systems using EGNOS and enhanced digital maps, ENC GNSS Congress, Toulouse, April 2008

[**PEYRET et al., 2000**] - Peyret, F., **D. Bétaille**, G. Hintzy, High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning, Automation in Construction, Vol. 9, No. 3, May 2000

[**PEYRET et al., 1996**] - Peyret, F., **D. Bétaille**, Ch. Lemaire, Mise en service de la station d'étude des systèmes de localisation SESSYL, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No. 205, Septembre-Octobre 1996

[**POTOVELLO, 2003**] - Potovello, M.G., real-time integration of a tactical-grade IMU and GPS for high accuracy positioning and navigation, PhD thesis, University of Calgary, 2003

[**RAY, 2000**] - Ray, J.K., Mitigation of GPS code and carrier phase multipath effects using a multi-antenna system, PhD thesis, University of Calgary, 2000

[**SCHLINGELHOF et al., 2008**] - Schlingelhof, M., **D. Bétaille**, Ph. Bonnifait, K. Demasure, Advanced positioning technologies for co-operative systems, IET Intelligent Transport Systems revue, Vol. 2, No. 2, June 2008

[**SCHLINGELHOF et al., 2007**] - Schlingelhof, M., **D. Bétaille**, Ph. Bonnifait, Ph. Poiré, K. Demasure, Advanced positioning technologies for Cooperative Vehicle Infrastructure Systems (CVIS), ITS Europe Congress, Aalborg, June 2007

[**SCHUBERT et al., 2008**] - Schubert R., E. Richter, G. Wanielik, Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Information Fusion, 2008

[**SELLOUM et al., 2010**] - Selloum, A., **D. Bétaille**, E. le Carpentier, F. Peyret, Robustification of a map aided location process using road direction, IEEE ITS Conference, Madeira, October 2010

[**SELLOUM et al., 2009a**] - Selloum, A., **D. Bétaille**, E. le Carpentier, F. Peyret, Lane-Level Positioning using Particle Filtering, IEEE ITS Conference, Saint-Louis, MO, October 2009

[**SELLOUM et al., 2009b**] - Selloum, A., E. le Carpentier, **D. Bétaille**, F. Peyret, Localisation 2D d'un mobile sur une carte numérique précise, Congrès du GRETSI, Dijon, Septembre 2009

[**SELLOUM et al., 2009c**] - Selloum, A., **D. Bétaille**, E. le Carpentier, F. Peyret, 2D vehicle localisation using an enhanced map, workshop GDR Robotique : Localisation Précise pour les Transports Terrestres, Paris, Juin 2009

[STANSELL et al., 1996] - Stansell, T.A., J.E. Knight, R.G. Keegan, R.R. Hatch, C.R. Cahn, Mitigation of multipath effects in GPS receivers, world patent WO 96/37789, 1996

[STANSELL et al., 2000] - Stansell, T.A., J.E. Knight, R.G. Keegan, C.R. Cahn, Mitigation of multipath effects in GPS receivers, US patent 6,160,841, 2000

[TEUNISSEN, 1998] - Teunissen, P.J.G., Quality control and GPS, in GPS for geodesy, edited by P.J.G. Teunissen and A. Kleusberg and published by Springer Inc., 1998

[**TOLEDO et al., 2010**] - Toledo-Moreo, R., **D. Bétaille**, F. Peyret, Lane level integrity provision for navigation and map-matching with GNSS, dead-reckoning and enhanced maps, IEEE Transactions on ITS, Vol. 11, No. 1, March 2010

[**TOLEDO et al., 2009**] - Toledo-Moreo, R., **D. Bétaille**, F. Peyret, J. Laneurit, Fusing GNSS, dead-reckoning and enhanced maps for road vehicle lane-level navigation, IEEE Journal of selected topics in signal processing, Vol. 3, No. 5, October 2009

[TOWNSEND et al., 1995] - Townsend, B., P. Fenton, K. Van Dierendonck, R.D.J. Van Nee, L1 carrier phase multipath error reduction using MEDLL technology, Proceedings of ION GPS-95, The Institute of Navigation, Palm Springs, California, 1995

[VAN NEE, 1992] - Van Nee, R.D.J., The Multipath Estimating Delay Lock Loop (MEDLL), IEEE Second International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Yokohama, Japan, 1992

[**VOYER et al., 2013**] - Voyer, M., **D. Bétaille**, F. Peyret, Amélioration de la position GNSS en ville par la méthode des tranchées urbaines, *Géomatique Expert*, No. 93, Juillet-Août 2013

[WARD, 1996] - Ward, P., GPS satellite signal characteristics, acquisition and tracking, in *Understanding GPS principles and applications*, edited by E.D. Kaplan and published by Artech House Inc., 1996

[WEILL, 1997] - Weill, L.R., Conquering multipath : the GPS accuracy battle, *Innovation in GPS World*, Vol. 8, No. 4, April 1997

[**ZAMORA et al., 2008**] - Zamora-Izquierdo, M.-A., **D. Bétaille**, F. Peyret, C. Joly, Comparative study of Extended Kalman Filter, Linearised Kalman Filter and Particle Filter applied to low-cost GPS-based hybrid positioning system for land vehicles, *Int. J. Intelligent Information and Database Systems*, Vol. 2, No. 2, March 2008

[ZIANG and GROVES, 2012] - Jiang, Z., P. Groves, GNSS NLOS and multipath error mitigation using advanced multi-constellation consistency checking with height aiding, *Proceedings of ION GNSS-2012*, The Institute of Navigation, Nashville, Tennessee, 2012