Contribution à la localisation dynamique d'automobiles.Application à l'aide à la conduite.

Philippe Bonnifait

▶ **To cite this version:**

Philippe Bonnifait. Contribution à la localisation dynamique d'automobiles.Application à l'aide à la conduite.. Autre [cs.OH]. Université de Technologie de Compiègne, 2005. tel-00358011

HAL Id: tel-00358011

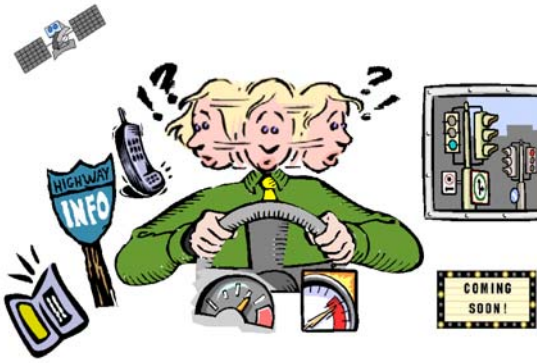
https://theses.hal.science/tel-00358011

Submitted on 2 Feb 2009

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.

Contribution à la localisation dynamique d'automobiles. Application à l'aide à la conduite.



Synthèse scientifique présentée pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Technologie de Compiègne.

Présentée par

Philippe Bonnifait

Soutenue le 13 décembre 2005 devant le jury :

- M. Dubuisson B. Professeur, Université de Technologie de Compiègne,
- M. Khalil W. Professeur, Ecole Centrale de Nantes (rapporteur),
- M. Meizel D. Professeur, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges,
- M. Millot P. Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (rapporteur),
- M. Peyret F. Directeur de recherche, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes,
- M. Ragot J. Professeur, Institut National Polytechnique de Lorraine,
- M. Rives P. Directeur de recherche, INRIA Sophia-Antipolis (rapporteur),
- M. Thompson C. Professeur, Cranfield University (UK).

Table des matières

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE....9

1 HISTORIQUE....9
2 SYSTEMES DE LOCALISATION....11
3 PROBLEMATIQUE ETUDIEE....12
4 ORGANISATION DU MANUSCRIT....13

CHAPITRE 2. RADIOLOCALISATION. 15

1 INTRODUCTION....15
2 UN EXEMPLE INTRODUCTIF : LE LORAN C....16
3 LE GPS AMERICAIN....22
4 SYSTEMES GNSS ET GALILEO....32
5 CONCLUSION....33

CHAPITRE 3. CARTES ET INFORMATION GEOGRAPHIQUE. 35

1 INTRODUCTION....35
2 CARTES D'AMERS....36
3 ELEMENTS DE GEODESIE....41
4 INFORMATION GEOGRAPHIQUE....46
5 EXEMPLES DE SIG POUR LA NAVIGATION....51
6 CONCLUSION....60

CHAPITRE 4. LOCALISATION HYBRIDE. 61

1 INTRODUCTION....61
2 LA LOCALISATION A L'ESTIME POUR UNE AUTOMOBILE....62
3 L'OBSERVATION D'ETAT : UNE METHODOLOGIE POUR LA LOCALISATION DYNAMIQUE....68
4 LOCALISATION ABSOLUE PAR COUPLAGE LACHE DE GPS ET LOCALISATION A L'ESTIME....92
5 LOCALISATION SUR CARTE....100
6 LOCALISATION EN MILIEU URBAIN....111
7 CONCLUSION....119

CHAPITRE 5. AIDE A LA CONDUITE AUTOMOBILE. 121

1 INTRODUCTION....121
2 ASSISTANCE AVANCEE....121
3 EVALUATION DU COMPORTEMENT DU CONDUCTEUR FACE A UNE ADAS....127
4 UTILISATION DE LA FONCTION DE LOCALISATION POUR L'AIDE A LA CONDUITE....137
5 CONCLUSION....144

CHAPITRE 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES. 145

1 CONCLUSION....145
2 CONTRIBUTIONS SIGNIFICATIVES....146
3 PERSPECTIVES....149

BIBLIOGRAPHIE....153

PUBLICATIONS REFERENCEES DANS CE DOCUMENT 155

1 JOURNAUX INTERNATIONAUX 155
2 JOURNAUX FRANÇAIS 155
3 ATELIERS INTERNATIONAUX 155
4 CONGRES INTERNATIONAUX AVEC COMITE DE LECTURE ET ACTES 156

GLOSSAIRE 157

Table des matières détaillée

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE....9

1 HISTORIQUE....9
2 SYSTEMES DE LOCALISATION....11
3 PROBLEMATIQUE ETUDIEE....12
4 ORGANISATION DU MANUSCRIT....13

CHAPITRE 2. RADIOLOCALISATION. 15

1 INTRODUCTION....15
2 UN EXEMPLE INTRODUCTIF : LE LORAN C....16
2.1 Mise en équations....17
2.2 Différence de mesures de temps de vol : méthode hyperbolique....18
2.2.1 Exemple de résolution avec une méthode itérative de Newton-Raphson....19
2.2.2 Mesure du temps....19
2.2.3 Estimation de l'imprécision sur la localisation....19
2.3 Mesure de date de réception : résolution circulaire....20
2.4 Mesure de temps et synchronisation d'horloges....21
2.5 Mesures d'azimut....21
3 LE GPS AMERICAIN....22
3.1 Présentation générale....22
3.1.1 Services de positionnement....22
3.1.2 Constitution du système GPS....22
3.1.3 Signaux....23
3.1.4 Observables....24
3.2 Calcul autonome par mesure de code....24
3.2.1 Equation d'observation associée au code....24
3.2.2 Calcul de la solution de navigation en mode autonome....25
3.2.3 Phénomènes dégradant la mesure de code....26
3.2.4 Utilisation des modèles de dégradation pour améliorer le calcul autonome....28
3.3 Calcul de la vitesse à partir des mesures de Doppler....28
3.4 Modes différentiels....29
3.4.1 Différentiel monobase....29
3.4.2 Différentiel multi-bases....31
3.5 Utilisation des mesures de phase....31
4 SYSTEMES GNSS ET GALILEO....32
5 CONCLUSION....33

CHAPITRE 3. CARTES ET INFORMATION GEOGRAPHIQUE. 35

1 INTRODUCTION....35
2 CARTES D'AMERS....36
2.1 Cartes d'amers statiques artificiels....36
2.2 Cartes d'amers statiques naturels....36
2.2.1 Amers visuels avec points caractéristiques 3D....37

2.2.2 Amers visuels avec points caractéristiques 2D....38
2.2.3 Amers visuels plans....39
2.2.4 Amers linéaires....39
2.2.5 Quantification de l'imprécision....41
2.3 Cartes d'amers en mouvement....41
3 ELEMENTS DE GEODESIE....41
3.1 Systèmes et réseaux géodésiques....42
3.2 Quelques systèmes en usage en France....42
3.3 Coordonnées tridimensionnelles....43
3.4 Projections....43
3.5 Transformation de coordonnées....45
4 INFORMATION GEOGRAPHIQUE....46
4.1 Systèmes d'information géographique....46
4.2 Représentation de l'information géographique....47
4.3 Les composantes de l'information géographique....47
4.4 Cartes routières numériques et bases de données navigables....48
4.4.1 Présentation....48
4.4.2 Le format GDF....50
5 EXEMPLES DE SIG POUR LA NAVIGATION....51
5.1 Système utilisé dans le projet SAACAM....51
5.2 Système utilisé dans le projet ARCOS....54
5.3 Système en cours de développement dans le projet MobiVip....56
5.3.1 Kit de développement....56
5.3.2 Planification d'itinéraire....57
5.3.3 Gestion des amers....57
5.3.4 Supervision de mission....59
5.3.5 Parties embarquées et débarquées du SIG....59
6 CONCLUSION....60
CHAPITRE 4. LOCALISATION HYBRIDE. 61
1 INTRODUCTION....61
2 LA LOCALISATION A L'ESTIME POUR UNE AUTOMOBILE....62
2.1 Principe....62
2.1.1 Odométrie différentielle....63
2.1.2 Odométrie avec les 4 roues....64
2.1.3 Localisation à l'estime combinant des odomètres et un gyromètre de lacet....67
2.2 Recalage de la dérive d'une localisation à l'estime....67
3 L'OBSERVATION D'ETAT : UNE METHODOLOGIE POUR LA LOCALISATION DYNAMIQUE....68
3.1 Représentation d'état d'un problème de localisation dynamique....69
3.2 Observabilité....70
3.3 Prise en compte des erreurs....71
3.4 Mécanisme prédicteur/estimateur....72
3.5 Approche bayésienne....73
3.5.1 Modélisation des erreurs....73

3.5.2 Filtrage de Kalman étendu 74
3.5.3 Filtrage UKF 75
3.5.4 Filtrage particulaire 77
3.6 Approche ensembliste 84
3.6.1 Introduction 84
3.6.2 Estimateur/prédicteur par inversion ensembliste 85
3.6.3 Propagation de contraintes 89
4 LOCALISATION ABSOLUE PAR COUPLAGE LACHE DE GPS ET LOCALISATION A L'ESTIME 92
4.1 Principe 92
4.2 Filtrage de Kalman étendu 93
4.3 Filtrage ensembliste 97
4.4 Prototype temps réel développé dans le projet ARCOS 99
5 LOCALISATION SUR CARTE 100
5.1 Problématique 100
5.2 Sélection de routes par fusion multi critère dans le cadre de la théorie des croyances 103
5.2.1 Principe 103
5.2.2 Formulation du problème 103
5.2.3 Fusion et décision 105
5.2.4 Illustration de la méthode locale 106
5.2.5 Cas particulier d'un itinéraire pré calculé 107
5.3 Localisation sur carte par filtrage de Kalman 108
5.3.1 Observation cartographique 108
5.3.2 Sérialisation des observations 109
5.3.3 Illustration de la correction de la dérive odométrique grâce à la carte seule 110
5.3.4 Filtre à état augmenté pour prendre en compte l'erreur absolue de la carte 110
6 LOCALISATION EN MILIEU URBAIN 111
6.1 Cartographie et localisation simultanées 112
6.2 Localisation par cartographie de trottoirs 112
6.2.1 Philosophie de la méthode 112
6.2.2 Fonctionnement 113
6.2.3 Illustration des performances de cette approche 116
7 CONCLUSION 119
CHAPITRE 5. AIDE A LA CONDUITE AUTOMOBILE. 121
1 INTRODUCTION 121
2 ASSISTANCE AVANCEE 121
2.1 Motivations et besoins 121
2.2 Classification des systèmes selon le temps de réponse 123
2.3 Perception de la situation de conduite 123
2.4 Développement d'ADAS 124
2.5 La démarche du projet ARCOS 125
3 EVALUATION DU COMPORTEMENT DU CONDUCTEUR FACE A UNE ADAS 127
3.1 Problématique et méthodologie suivie dans Roadsense 127
3.2 Le système DBITE 128

3.2.1 Présentation 128
3.2.2 Architecture informatique 130
3.2.3 Exemple de l'utilisation du DBITE au travers d'une étude de cas 132
3.3 Datation commune de données acquises par un réseau de calculateurs 135
3.3.1 Problématique 135
3.3.2 Principe de la méthode 135
3.3.3 Datation commune des données 136
4 UTILISATION DE LA FONCTION DE LOCALISATION POUR L'AIDE A LA CONDUITE 137
4.1 Horizon électronique 137
4.2 Gestion d'alertes échangées entre véhicules 138
4.3 Conseil de vitesse excessive 140
4.4 Localisation précise pour la récupération d'attributs d'une base de données navigable 141
4.5 Confiance dans un positionnement sur carte 142
5 CONCLUSION 144
CHAPITRE 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES. 145
1 CONCLUSION 145
2 CONTRIBUTIONS SIGNIFICATIVES 146
2.1 Contributions théoriques 146
2.2 Contributions applicatives 147
3 PERSPECTIVES 149
3.1 Perspectives scientifiques et technologiques 149
3.2 Perspectives de structuration de mon activité de recherche 151
BIBLIOGRAPHIE 153
PUBLICATIONS REFERENCEES DANS CE DOCUMENT 155
1 JOURNAUX INTERNATIONAUX 155
2 JOURNAUX FRANÇAIS 155
3 ATELIERS INTERNATIONAUX 155
4 CONGRES INTERNATIONAUX AVEC COMITE DE LECTURE ET ACTES 156
GLOSSAIRE 157

Chapitre 1. Introduction générale.

1 HISTORIQUE

Après mon service militaire en tant qu'enseignant à l'ESEAT (Rennes), j'ai passé 5 années à l'Ecole Centrale de Nantes (ECN) d'octobre 93 à août 98. A l'époque l'IRCCyN s'appelait le LAN. J'y ai d'abord effectué un DEA de robotique, puis une thèse de doctorat sur le problème de la localisation dynamique de véhicules se déplaçant sur des surfaces *gauches*. Il s'agissait de déterminer en temps réel les six degrés de liberté (position et attitude) de l'engin [JI 5, JI 4, JI 6][1]. L'application industrielle visée était l'aide à la conduite d'engins de travaux publics (des finisseurs) dans le but d'améliorer la qualité des routes en collaboration avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées [AI 3]. A la fin de ma thèse, j'ai participé à un contrat de sous-traitance pour la société ITMI, dans le cadre du projet européen BRITE-EURAM CIRC, de juillet à octobre 97. Ce projet et les projets d'élèves-ingénieurs de l'ECN que j'ai encadrés pendant l'année scolaire 97-98 m'ont permis d'étendre mon domaine de recherche puisqu'ils concernaient des machines plus rapides (des compacteurs se déplaçant à une vitesse de qq. km/h et des véhicules d'auscultation des routes se déplaçant aux vitesses d'une automobile) avec des capteurs embarqués différents (GPS différentiel RTK, gyromètre et radar à effet Doppler).

Suite à mon recrutement en tant que Maître de Conférences à l'UTC en septembre 98 et à mon intégration au laboratoire Heudiasyc, j'ai tout d'abord délaissé les problèmes de localisation pour travailler avec Dominique Meizel sur l'estimation ensembliste dans le cadre de la thèse de Pascal Bourron. J'ai participé activement à l'instrumentation du véhicule expérimental STRADA que le laboratoire venait d'acheter. J'ai découvert à cette période la problématique de l'assistance à la conduite automobile au travers notamment du GdR CNRS/INRETS CHMAC (Coopération Homme Machine pour l'Aide à la Conduite Automobile – 98-99). J'ai été très surpris de la difficulté et de l'extrême pluridisciplinarité du problème. A cette période, j'ai réalisé l'importance essentielle de la caractérisation de la situation de conduite soutenue avec grande conviction par Michèle Rombaut. C'est ainsi que j'ai commencé à trouver mes marques au niveau des besoins de perception temps réel qu'elle requiert. Ainsi, d'un point de vue méthodologique, je me suis orienté vers l'observation d'état, la fusion de données et les systèmes temps réel. Mes premiers travaux de recherche ont alors porté sur la localisation dynamique de véhicules routiers à partir de systèmes de positionnement satellitaires de type GPS associés à des données proprioceptives inertielles et odométriques.

---

[1] Sont référencées entre crochets mes publications (cf. page 155).

Au cours du carrefour du PREDIT de 1999 à Lille, j'ai découvert les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et j'ai vite été convaincu de leur grand intérêt pour l'aide à la conduite, notamment grâce à leur capacité à stoker une grande quantité d'informations géo-référencées et à fournir ces informations avec anticipation (horizon électronique). Mes travaux se sont alors orientés vers la localisation sur des cartes routières précises. Sur cette thématique, j'ai eu la chance de pouvoir encadrer la thèse M. E. El Najjar (soutenue en novembre 2003) qui a bénéficié d'une bourse du ministère. Ce travail a bénéficié de financements par le biais de deux projets : un projet du pôle de recherche picard DIVA (2000-2004) et le projet ARCOS du programme Prédit (2001-2004). Grâce à ces crédits, nous avons pu acheter des équipements et mener des expérimentations en grandeur nature avec le véhicule STRADA. Nos résultats ont été comparés au système ADAS-RP de la société NavTeQ. La thématique de la localisation est au centre de mes centres d'intérêt actuels. J'encadre une deuxième thèse sur ce sujet (A. Gning est en cours de rédaction) qui porte cette fois sur l'utilisation de méthodes ensemblistes de façon à apporter des solutions au problème de l'intégrité de la localisation.

En parallèle avec ce travail, j'ai participé au projet de recherche ROADSENSE du 5eme PCRD (février 01- juin 04) sur la conception d'un système de prototypage rapide de systèmes d'aide à la conduite pour l'analyse du comportement du conducteur. La méthode de resynchronisation garantie de plusieurs calculateurs que nous avons développée a été brevetée en janvier 2004 (brevet UTC/CNRS). Ce dispositif a été validé expérimentalement sur une étude de cas menée par Renault en novembre 2003 avec 20 conducteurs.

Enfin, depuis septembre 2003, je m'intéresse à la localisation en milieu urbain de petits véhicules autonomes (appelés VIP- Véhicules Individuels Publics) pour des applications de transports de personnes. Cette recherche s'appuie sur le projet MobiVip du Prédit (janv. 2004-janv. 2007) et le projet Bodega du programme ROBEA du CNRS (sept 2003 – sept. 2005). J'ai encadré un post-doctorat sur ce thème et j'encadre une nouvelle thèse (M. Jabbour actuellement en première année) dans laquelle nous cherchons à tirer bénéfice de toute information de localisation enregistrée dans un SIG.

Enfin, le laboratoire a répondu en 2004 à l'appel à propositions du CNRS pour la création de plates-formes de recherche nationales. Nous avons mené une réflexion en interne au laboratoire sur plusieurs mois, ce qui nous a permis d'identifier des problématiques scientifiques. Un plan d'investissement sur plusieurs années a été élaboré pour nous doter d'équipements de recherche et pour mener à bien des expérimentations. Notre plate-forme PACPUS a été retenue à l'automne 2004 et est en cours de création. J'en assure la responsabilité.

2 SYSTEMES DE LOCALISATION

La localisation est une fonctionnalité de base essentielle en robotique. On s'intéresse dans la suite de ce document à la localisation de mobiles en mouvement et particulièrement d'automobiles. On traitera du problème de l'égo-localisation, c'est-à-dire qu'on se mettra à la place d'un mobile qui cherche à se localiser. Nous n'aborderons pas le problème de la localisation externe qui consiste à localiser d'autres mobiles environnants.

Dans les travaux présentés ici, on distinguera deux notions : la localisation sur carte et la localisation absolue. La localisation sur carte consiste à trouver l'identifiant du tronçon de route sur lequel le véhicule se déplace. Se localiser en absolu signifie déterminer la matrice de passage entre un repère lié rigidement au mobile et un repère de référence R_0. Cette connaissance est équivalente à la connaissance de la pose du mobile, c'est-à-dire sa position et son attitude dans R_0. La localisation est qualifiée de dynamique lorsque le mobile est en déplacement. A ce propos, on peut noter que le mouvement peut être mis à profit pour améliorer la localisation.

Un système de localisation absolu est caractérisé par :

- sa dynamique, c'est-à-dire sa fréquence de rafraîchissement et sa latence,
- sa précision, c'est-à-dire l'écart entre la pose estimée et la pose réelle,
- sa couverture, soit la zone où il est opérant,
- son intégrité ou consistance qui signifie que l'imprécision estimée est correctement quantifiée,
- sa disponibilité qui est obtenue lorsque le système vérifie des niveaux désirés de précision tout en restant consistant,
- sa continuité traduisant la persistance de la disponibilité dans le temps.

Il est important de remarquer que la précision de la localisation dépend de la précision des mesures, de la précision de la localisation des balises et de leur configuration géométrique.

Avec l'apparition des systèmes satellitaires, la couverture devient globale à l'échelle de la terre. Les systèmes GPS devenant très bon marché, les domaines d'application sont gigantesques (cf. tableau 1). Nous reviendrons plus en détails sur l'application d'une fonctionnalité de localisation globale pour l'aide à la conduite automobile dans le chapitre 5.

Domaine	Fonctionnalités
Applications routières	Guidage et orientation, services d'urgence et d'intervention, gestion de flotte (loueurs, transport de fonds, taxis), informations relatives au trafic, protection des véhicules contre le vol, péages, applications de sécurité routière, "Boîtes noires" (enregistrement) conseil de vitesse contrôle de trafic urbain et périurbain…
Transports ferroviaire, maritime et aérien	gestion et régulation du trafic, information de l'usager, gestion de flotte
Support aux métiers	topologie, repérage, cadastre, géodésie, … génie civil synchronisation de réseaux, de centres, datation agriculture, sylviculture, pêche, … métiers de l'environnement (localisation des espèces, …)
Applications liées à la mobilité (*Location Based Services*)	Informations locales géolocalisées, Assistance à la navigation Services d'urgence (E 112) Commerce Routage/Facturation de la téléphonie cellulaire Assistance personnelle (non-voyants, personnes non autonomes)
Loisirs	Voile, randonnée, rallyes raid, chasses au trésor, recherche d'amis
Services d'urgence et de sécurité	Ambulances, police, lutte anti-incendie, sauvetage, protection individuelle traçabilité de matières dangereuses

Tableau 1. Domaines d'application d'une localisation globale.

3 PROBLEMATIQUE ETUDIEE

Ce manuscrit ne décrit pas de façon exhaustive tous mes travaux. Il a été rédigé sous l'angle de la localisation dynamique d'automobiles.

Le point de départ est, je pense, mon intérêt certain pour le GPS. Le potentiel de la technologie de radiolocalisation par satellites est immense et les retombées pour l'automobile gigantesques. La révolution GPS est en marche. Il faut en connaître les limites et l'utilité. Les limites se déclinent suivant le paradigme {précision, intégrité, disponibilité, continuité} étant entendu qu'il n'y a plus de problème de couverture pour tout mobile à la surface de la terre[2]. Les précisions que l'on obtient actuellement pour un prix modique sont plutôt très bonnes. Ce n'est pas le problème pour beaucoup d'applications. L'intégrité est une préoccupation plus récente pour laquelle l'aviation civile a un niveau d'exigence très élevée, ce qui rend la technologie GPS standard inadaptée. La disponibilité (et par voie de conséquence la continuité) est le talon d'Achille pour l'automobile. En effet, une automobile se déplace dans un environnement où la visibilité satellitaire est très variable (nulle dans les tunnels, avec un mauvais rapport signal sur bruit en forêt, mauvaise en milieu urbain, etc.) ce qui induit un fonctionnement intermittent du GPS, inacceptable pour beaucoup d'applications, notamment celles d'aide à la conduite.

A côté de ça, les voitures modernes sont équipées de nombreux capteurs, en particulier pour les applications liées à la dynamique du véhicule (ABS, ESP, etc.). A l'époque où les calculateurs embarqués s'échangent des informations via des bus pour de multiples

[2] Ceci risque de changer dans les années qui viennent : le futur GPS aura la possibilité de choisir des régions avec des performances moindres, voire nulles.

applications, pourquoi ne pas se servir de ces données proprioceptives pour la localisation du véhicule ?

Le troisième élément clé est l'utilisation presque banale en 2005 de systèmes de navigation (avec synthèse vocale et affichage graphique). Pour fonctionner, un tel système utilise une carte du réseau routier décrite de façon vectorielle dans une base de données embarquée. La carte définit le système dans lequel il faut se localiser pour bon nombre d'applications car les attributs sont souvent rattachés au réseau routier. D'un autre côté, la carte définit l'espace roulable et, en ce sens, contient une information de localisation.

Il ressort de ces remarques que

- le GPS seul est inadapté,
- la voiture est une véritable source d'information, soit par le biais des mesures qu'elle réalise avec ses capteurs proprioceptifs, soit grâce à la carte routière qu'elle embarque.

Une façon d'aborder ce problème réside dans une approche par fusion multisensorielle dans laquelle on cherche à tirer à profit du mouvement pour faciliter le processus de localisation.

4 ORGANISATION DU MANUSCRIT

Le manuscrit est organisé autour de 4 chapitres scientifiques et techniques. Le premier porte sur la radiolocalisation. Il en dresse un état de l'art en décrivant les mesures et le fonctionnement de systèmes de radiolocalisation sur la base des exemples du LORAN C et du GPS. Ces principes serviront aux modélisations du chapitre 4. Les amers utilisés par les systèmes de localisation ont été souvent peu considérés. Depuis quelques années et suite au progrès des techniques de cartographie et localisation simultanées, ils sont au centre des préoccupations de chercheurs. Ainsi dans le chapitre 3, je présente quelques types d'amers en cherchant à faire le lien avec l'information géographique et les bases de données navigables utiles pour leur gestion. Le chapitre 4 pose le problème de la localisation dynamique comme un problème d'observation d'état et décrit les différentes méthodologies que j'ai étudiées. C'est le chapitre le plus méthodologique dans lequel je présente le plus de résultats. Enfin, le chapitre 5 présente l'application de mes travaux à l'aide à la conduite automobile.

Le document se terminera par une synthèse de mes contributions scientifiques et dressera des perspectives de recherche.

Chapitre 2. Radiolocalisation.

1 INTRODUCTION

Ce chapitre dresse un état de l'art de la localisation et de la mesure de temps à l'aide de signaux radioélectriques émis par des balises identifiables de positions connues. De telles balises peuvent être des satellites ou des émetteurs au sol de systèmes spécifiques de localisation, de bornes de réseaux sans fils ou de relais de télécommunication. Dans ce dernier cas, l'identifiant de la cellule dans laquelle se situe le mobile constitue déjà une première information de positionnement. Nous allons nous intéresser par la suite aux méthodes dites de trilatération et de triangulation qui utilisent des mesures de différences de temps de vol (*Time Difference of Arrival – TDoA*), de dates de réception (*Time of Arrival – ToA*), d'angles d'arrivée (*Angle of Arrival - AoA*), de Dopplers, de phase des ondes porteuses et de puissance de réception du signal (*Received Signal Levels RXLEV*).

Pour calculer un positionnement, un récepteur mobile doit recevoir les signaux de plusieurs balises présentant une bonne configuration géométrique et être en mesure de les identifier pour connaître leurs positions. Une première hypothèse couramment faite consiste à supposer d'abord que les signaux suivent des trajets directs entre l'émetteur et le récepteur (*Line of Sight*). On peut estimer la courbure de la trajectoire des signaux, comme dans le cas du LORAN C où les ondes se propagent en rebondissant sur l'atmosphère et la surface de la terre. En milieu urbain ou en milieu d'intérieur, les multi-trajets dus à des réflexions des signaux représentent des perturbations délicates à compenser surtout si les réceptions sont indirectes (*Non-Line of Sight*) [Wylie and Holtzman, 96]. Dans de tels milieux, la propagation du signal est complexe et la mesure de puissance de réception, pourtant peu précise, peut permettre d'améliorer les performances par fusion avec des mesures de temps de vol [McGuire et al, 05].

Le calcul de la position est toujours effectué par le mobile ce qui rend le positionnement confidentiel sauf dans certains modes différentiels ou assistés, où un serveur peut recevoir une position approximative pour transmettre des informations pour que le mobile calcule une localisation précise.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux différentes mesures et aux façons de les exploiter en traitant deux exemples particuliers : le LORAN C et le GPS. Le premier nous permettra de poser le problème de localisation et de mesure de temps de façon à présenter les solutions classiques de résolution. Nous verrons ensuite que le GPS est une technologie plus moderne et plus complexe à mettre en œuvre, même si elle repose sur des principes semblables. Enfin, les augmentations GNSS et le futur système européen Galiléo seront présentés, ce qui nous permettra d'esquisser quelques évolutions prévisibles. Nous

n'aborderons pas les technologies des réseaux de télécommunication même si celles-ci représentent un formidable vecteur de localisation pour les années à venir, si les technologies nomades continuent à se développer à leur rythme actuel.

2 UN EXEMPLE INTRODUCTIF : LE LORAN C

Le LORAN C est un système de radiolocalisation[3] terrestre 2D et de référence de temps utilisant des signaux de fréquence 100 KHz émis depuis des stations terrestres puissantes et distantes de plusieurs centaines de kilomètres. La figure 2.1 présente les stations en Europe de du nord-ouest (*NELS – Northwest European Loran C*).

Il s'agit d'un système plutôt ancien puisqu'il est en service depuis 1982. Sur le point d'être abandonné ces dernières années à la faveur du GPS, il connaît un regain d'intérêt pour les applications où la sûreté de localisation est importante, notamment en marine, compte tenu des faiblesses démontrées du GPS vis-à-vis de brouillages. Son utilisation comme système de référence temporelle peut s'avérer essentielle pour de nombreuses applications comme les transactions bancaires ou les télécommunications en cas de perte du GPS. D'un point de vue stratégique, il est géré par des instances civiles contrairement au GPS américain sous contrôle du département de la défenses des Etats-Unis d'Amérique et donc sujet à un comportement imprédictible en cas de conflit pouvant porter atteinte à la sécurité des USA.

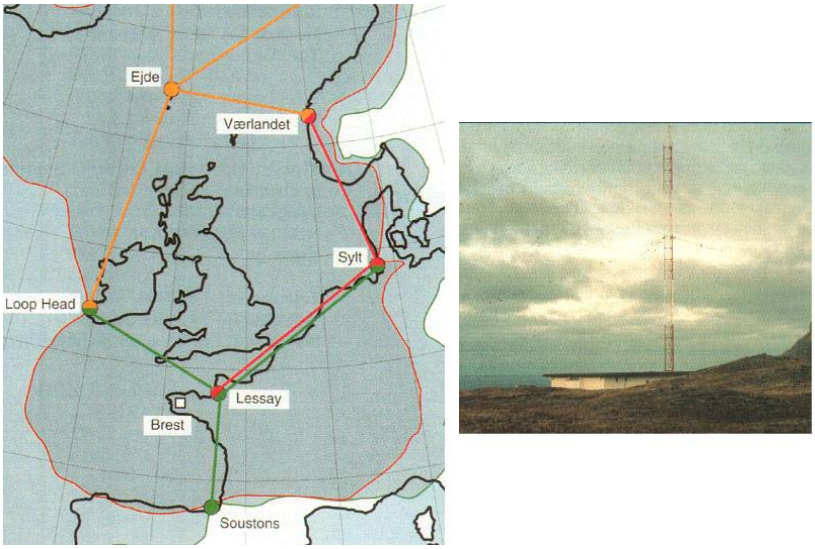


Figure 2.1 . Stations du NELS (GRI 6731) et aperçu d'une antenne.

Les stations émettrices sont regroupées en chaînes appelées GRI (*Groupe Repetition Interval*) avec pour chacune d'elle une station maîtresse qui émet de façon périodique une série de 9 impulsions et modulées en amplitude comme le montre la figure 2.2. Chacune des stations esclaves émet à son tour une série de 8 impulsions, ce qui les distingue de la station maîtresse.

[3] On le qualifie habituellement de « système de radionavigation » mais, je trouve personnellement ce terme mal adapté étant donné que le mot « navigation » signifie « l'action de conduire un véhicule d'un point à un autre et d'en déterminer le positionnement ».

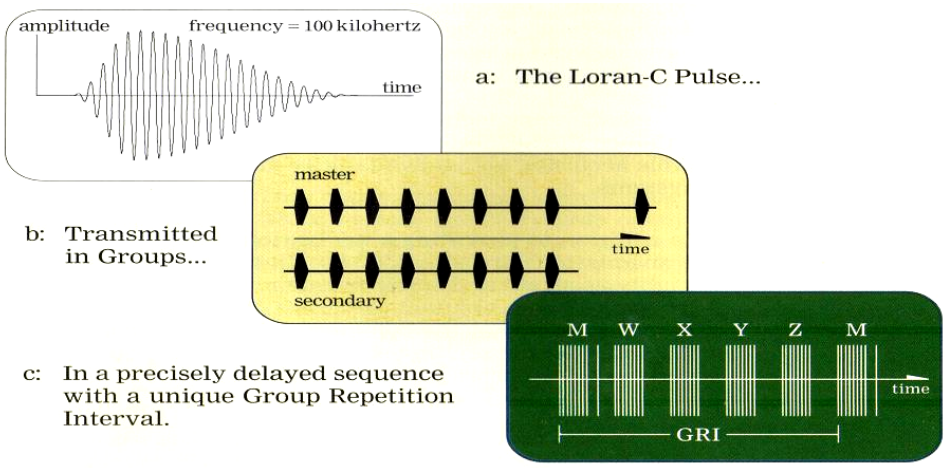


Figure 2.2. Signaux du LORAN C (extrait du document de présentation).

Les signaux LORAN ont une très bonne pénétration et se propagent très loin : ils sont utilisables avec des traitements standard jusqu'à 1000 Km. Le système est surveillé par un centre de contrôle (situé à Brest pour le NELS) 24 heures sur 24. De plus, les opérations de maintenance sont connues à l'avance. En outre, il présente un signal dit « d'intégrité » qui clignote en cas de problème.

La précision de positionnement est de l'ordre de 100 m, la répétabilité d'une dizaine de mètres et la précision d'un calcul de temps de l'ordre de 30 ns.

2.1 Mise en équations

Considérons le récepteur d'un utilisateur (noté *u*) et une balise émettrice notée *B*. En pratique, ni le récepteur ni la balise ne sont parfaitement à l'heure du système LORAN : ils présentent tous les deux un décalage dt_u et dt_B par rapport au temps de référence. On néglige dans ce qui suit les effets relativistes.

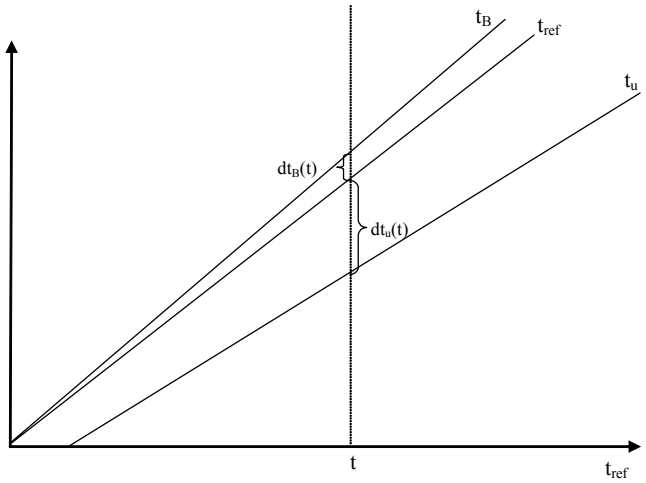


Figure 2.3. Illustration du décalage et de la dérive de temps d'une balise (t_B) et du récepteur (t_u) par rapport au temps LORAN de la station maîtresse (t_{ref}).

Dans le système LORAN C, dt_B est rendu négligeable par un mécanisme d'asservissement de l'heure des balises esclaves sur la station maîtresse.

Si on note t le temps du système LORAN, alors le temps $t_u(t)$ présente un décalage $d_{tu}(t)$

$t_u(t)=t+dt_u(t)$ (2.1)

On note te_i la date à laquelle a été émise la séquence de la balise n°i et $t_u(tr)$ la date à laquelle a été reçue la séquence dans l'échelle de temps du récepteur.

Le récepteur mesure le temps de vol $y_i(tr_i)$ à l'instant de réception tr_i :

$y_i(tr_i) = t_u(tr_i) - te_i = tr_i + dt_u(tr_i) - te_i$ (2.2)

En supposant que le signal se soit propagé à la vitesse de la lumière (notée c), on en déduit la *pseudo-distance* ρ_i (exprimée en mètres) entre la balise i et le récepteur par la relation :

$\rho_i(tr_i) = \mathrm{c}.y_i(tr_i) = \mathrm{c}.(tr_i - te_i) + c.\ dt_u(tr_i) = R_i(tr_i) + c.\ dt_u(tr_i)$ (2.3)

où R_i est la distance géométrique entre la balise i et le récepteur.

Si on néglige le déplacement du mobile et la variation de son décalage de temps entre l'acquisition du signal de la première et de la dernière balise (d'indice p),

$dt_u = dt_u(tr_1) = ... = dt_u(tr_p)$ (2.4)

$R_1(tr_1) = R_1(tr_p) = R_1, \ldots., R_p(tr_p) = R_p$ (2.5)

On obtient un système non linéaire de p équations où les inconnues sont (x, y, dt_u) :

$$\begin{cases} \rho_1(tr_1) = R_1 + dt_u \\ \quad\quad ... \\ \rho_p(tr_p) = R_p + dt_u \end{cases} \quad (2.6)$$

Ce système est posé à l'instant d'arrivée tr_p de la dernière mesure.

2.2 Différence de mesures de temps de vol : méthode hyperbolique

Intéressons nous à la résolution du système (2.6) si au moins 3 balises sont en vue en utilisant la méthode de différence de mesures (*TDoA*) [Torrieri, 84]. Le principe consiste à éliminer le décalage d'horloge pour calculer la position ; le récepteur n'a ainsi pas besoin d'avoir d'horloge absolue.

Si on soustrait la première équation à toutes les autres, on obtient un système de (p-1) équations :

$$\begin{cases} y_{21} = R_2 - R_1 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \\ \quad\quad ... \\ y_{p1} = R_p - R_1 = \sqrt{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \end{cases} \quad (2.7)$$

$\Leftrightarrow\ Y = \mathrm{h}(X)$ avec $X = (x, y)$ (2.8)

Chaque équation définit une hyperbole de foyers les 2 balises considérées, d'où le nom de la méthode. Avec 3 balises, on est amené à chercher l'intersection de deux hyperboles, ce qui induit 2 solutions. En l'absence d'information a priori de localisation, il y a ambiguïté. Avec 4 balises et plus, la redondance conduit à une solution unique.

2.2.1 Exemple de résolution avec une méthode itérative de Newton-Raphson

Si on connaît approximativement le positionnement, on peut résoudre le système (2.8) en le réécrivant sous la forme :

$f(X) = 0$ (2.9)

Soit un point X_0 « proche » de la solution. Le système est linéarisé autour de X_0 :

$f(X_0+dX) = f(X_0)+f'(X_0).dX$ (2.10)

où $f'(X_0)$ est la jacobienne de f en X_0. On a $f'(X_0) = h'(X_0)$ et on note $M = f'(X_0)$. On cherche dX tel que :

$f(X_0+dX) = 0 \Leftrightarrow M.dX = - f(X_0)$ (2.11)

Sil y a 3 balises, M est carrée. Si elle est inversible et bien conditionnée :

$dX = - M^{-1}. f(X_0)$ (2.12)

Si il y a plus de 3 balises, une estimation au sens des moindres carrés est donnée par :

$$dX = -\left[M^T \cdot M\right]^{-1} \cdot M^T \cdot f(X_0)$$ (2.13)

à condition que $\left[M^T \cdot M\right]$ soit inversible et bien conditionnée.

On obtient une nouvelle estimation $X_1=X_0+dX$

Tant que la norme de dX n'est inférieure un seuil prédéterminé, on itère le processus depuis l'équation (2.10).

2.2.2 Mesure du temps

Si le récepteur cherche à connaître le temps, il peut

- une fois la position connue par la méthode hyperbolique, calculer le décalage d'horloge en reprenant le système (2.6) et en le résolvant par moindres carrés.
- résoudre directement le système (2.6) en le résolvant par une méthode de Newton-Raphson.

2.2.3 Estimation de l'imprécision sur la localisation

En posant $X = \left[x, y, dt_u\right]^T$ et $Z = \left[\rho_1 ... \rho_p\right]^T$, on peut réécrire (2.6) comme

$Z=g(X)$ (2.14)

En supposant les erreurs petites, les matrices de variance-covariance P_Z et P_X des erreurs de mesure et d'estimation sont reliées par l'équation suivante :

$$P_Z = \left[\frac{\partial g}{\partial X}\right].P_X.\left[\frac{\partial g}{\partial X}\right]^T$$ (2.15)

En notant $\left[\frac{\partial g}{\partial X}\right] = N$ et en multipliant à droite par N, (2.15) devient :

$P_Z.N = N.P_X.N^T.N$ (2.16)

Si $N^T.N$ est inversible, alors

$P_Z . N . (N^T. N)^{-1} = N . P_X$ (2.17)

On procède pareillement à gauche :

$$(N^T . N)^{-1} . N^T . P_Z . N.(N^T . N)^{-1} = P_X \quad (2.18)$$

Si on fait l'hypothèse que les erreurs de mesure sont décorrélées entre elles et statistiquement identiques, alors la matrice P_Z est une matrice diagonale dont chaque terme peut s'écrire σ^2.

$$P_Z = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix} = \sigma^2 . I \quad (2.19)$$

L'équation (2.18) devient :

$$\sigma^2 . (N^T . N)^{-1} . N^T . N . (N^T . N)^{-1} = P_X \quad \Leftrightarrow \quad \sigma^2 . (N^T . N)^{-1} = P_X \quad (2.20)$$

La matrice $(N^T . N)^{-1}$ traduit donc comment l'imprécision de mesure se reporte sur l'état X.

On appelle GDOP (Global Dilution Of Precision)

$$GDOP = \sqrt{trace\left\{\left[N^T \cdot N\right]^{-1}\right\}} \quad (2.21)$$

Soit donc à un facteur près $\sqrt{Px + Py + Pdt}$.

Ces expressions traduisent le fait que l'erreur d'estimation sur X dépend du bruit de mesure (ce qui est normal) **mais également** de la configuration géométrique de l'ensemble {balises, récepteur} qui caractérise la matrice N.

De la même façon, on définit le PDOP comme l'imprécision sur (x, y) et le TDOP comme l'imprécision sur (dt_u).

2.3 Mesure de date de réception : résolution circulaire

Si le récepteur possède une horloge de dérive négligeable (par exemple, horloge atomique au Césium) et si on suppose que cette horloge est parfaitement à l'heure du système LORAN, alors deux balises sont suffisantes pour se localiser.

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ \rho_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \end{cases} \quad (2.22)$$

Chaque équation définit un cercle de centre la balise, d'où le nom de la méthode. Avec deux balises, il peut y avoir ambiguïté si l'on ne connaît pas approximativement le positionnement.

2.4 Mesure de temps et synchronisation d'horloges

Dans de nombreuses applications, la mesure de temps et la synchronisation d'horloges locales sont les objectifs recherchés et la mesure de position n'a pas d'intérêt.

Dans le cas limite, si le récepteur est statique et si la position de l'antenne du récepteur est connue avec une bonne précision, alors on peut connaître le décalage d'horloge avec une seule station (notée *i*) en reprenant l'équation (2.3) :

$$dt_u(tr_i) = \frac{\rho_i(tr_i) - \mathrm{R_i}(tr_i)}{c} \tag{2.23}$$

Le décalage connu, on en déduit l'heure dans le système de temps LORAN.

Dans certaines applications, on cherche à synchroniser des horloges. Grâce à la mesure de temps de vol (2.23), deux récepteurs peuvent asservir la dérive de leur oscillateur local et ainsi produire des signaux synchrones avec une précision meilleure que 100 ns sans échanger aucune information.

2.5 Mesures d'azimut

Certains types d'antennes permettent de mesurer l'angle de réception des signaux.

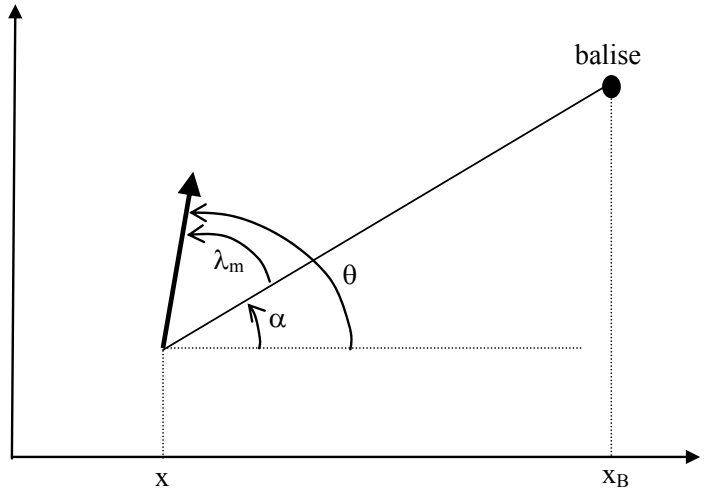


Figure 2.4. Mesure angulaire sur une balise.

Compte tenu du grand éloignement du récepteur avec chaque balise et de sa faible précision, la mesure angulaire λ_m n'est pas utilisée pour déterminer la position. Elle est utilisée pour calculer l'angle de cap θ après avoir calculé la position (x, y) du mobile :

$$\theta = \lambda_m + \mathrm{atan2}\left(y_B - y, x_B - x\right) \tag{2.24}$$

Cette mesure peut être précieuse lorsque l'on cherche à connaître l'angle de cap d'un récepteur se trouvant à l'arrêt.

3 LE GPS AMERICAIN

3.1 Présentation générale

Développé et contrôlé par les départements de la défense et des transports des Etats-Unis d'Amérique, le GPS a principalement été créé pour l'armée américaine. Il est actuellement utilisé par un nombre sans cesse croissant d'utilisateurs notamment civils. Depuis le lancement du premier satellite en 1978 et son fonctionnement actuel, le système a subit de nombreuses évolutions.

3.1.1 Services de positionnement

Le système GPS offre deux services se différenciant principalement par la précision, l'accès et une garantie de fonctionnement :

- SPS (*Standard Position Service*). Ce service est mis à disposition des utilisateurs civils. Une dégradation volontaire a été introduite jusqu'en mai 2000 et limitait la précision de positionnement à 100 m. La précision actuelle est de l'ordre de quelques mètres avec une très bonne visibilité satellitaire.
- PPS (*Precise Position Service*). Ce service est réservé aux militaires américains et à certains utilisateurs autorisés par le département de la défense américain. Les récepteurs sont équipés d'algorithmes de décryptage spécifiques.

3.1.2 Constitution du système GPS

On a l'habitude de distinguer trois secteurs appelés aussi *segments*.

3.1.2.1 Secteur spatial

La partie spatiale est constituée d'un ensemble de 24 satellites opérationnels répartis sur 6 plans orbitaux. Ces satellites évoluent à une altitude basse d'environ 20000 km et mettent 12 heures pour effectuer une rotation autour de la terre. Chaque satellite possède un oscillateur qui dispose d'une fréquence fondamentale de 10,23 MHz calibrée sur des horloges atomiques. L'émetteur génère deux ondes appelées L_1 et L_2 véhiculant

- des signaux horaires (codes),
- la description des orbites des satellites (éphémérides)
- d'autres informations appelées *GPS data* (almanachs, état des satellites, décalage d'horloge des satellites, etc.).

Figure 2.5 - Constellation du système GPS.

3.1.2.2 Secteur de contrôle

La partie de contrôle est composée de cinq stations au sol réparties le long de l'équateur. Elles écoutent les signaux émis par les satellites, les diagnostiquent, calculent leurs éphémérides, transmettent les données aux satellites et assurent leur pilotage. La station principale se trouve dans le Colorado.

Figure 2.6 - Stations de contrôle au sol.

3.1.2.3 Secteur des utilisateurs

La partie des utilisateurs comprend l'ensemble des récepteurs civils et militaires qui reçoivent des informations depuis les satellites ou depuis d'autres récepteurs ou encore des systèmes de positionnement précis.

3.1.3 Signaux

Chaque satellite émet simultanément sur deux fréquences porteuses différentes : L_1 à 1575 MHz et L_2 à 1227 MHz. Deux autres fréquences servent pour la génération de codes pseudo-aléatoires : 1,023 MHz pour le code C/A (*Coarse Acquisition*) et 10,23 MHz pour le code P (*Precise*).

Chaque satellite possède des codes qui lui sont propres et orthogonaux aux autres ce qui permet de l'identifier. Un code pseudo-aléatoire est une séquence numérique qui semble aléatoire mais qui est en fait parfaitement connue en termes de constitution et d'instants d'émission. Les codes C/A et P sont binaires et modulent les phases des porteuses L_1 et/ou L_2.

Le code C/A module L_1 et le code P L_1 et L_2. Le code C/A a une longueur de 1023 bits et se répète toutes les millisecondes, ce qui correspond à peu près à 300 m de parcours. Le code P a une longueur bien supérieure (de l'ordre de 10^{e14} bits).

En parallèle avec l'émission des codes, des données de navigation sont transmises (sur L_1 et L_2) à un faible débit de 50 bits/sec. Elles fournissent des éphémérides, c'est-à-dire des informations telles que l'état de santé du satellite, ses paramètres d'orbite, des paramètres de correction d'horloge, … Le message complet, long de 1500 bits, est donc transmis en 30 secondes, ce qui peut-être long dans certaines applications où le récepteur GPS démarre à froid. A la fin de chaque message, une partie des almanachs des autres satellites est transmise. La transmission de tous les almanachs dure 12 min 30 s.

Considérons la porteuse L_1. Elle est modulée par les données, par C/A et, avec un déphasage de 90°, modulée par P, ce qui donne :

$$L_1(t) = A_p.P(t).D(t).\cos(2\pi f_1 t) + A_{CA}.CA(t).D(t).\sin(2\pi f_1 t) \quad (2.25)$$

Où :

- A_p et A_{CA} sont les amplitudes associées aux codes P et C/A
- $D(t)$, $CA(t)$ et $P(t)$ sont respectivement les données du message, le code C/A et le code P sous formes binaires.

P a une fréquence 10 fois plus élevée et une amplitude plus faible que C/A ce qui le rend donc plus difficile à acquérir.

3.1.4 Observables

Le terme *observable* est utilisé dans la communauté GPS pour parler des mesures brutes d'un récepteur. Sur chaque satellite en vue, un récepteur mono-fréquence civil mesure toujours le code C/A et parfois la phase et le Doppler sur L_1. Un récepteur bi-fréquence peut quant à lui mesurer, le code C/A sur L_1, la phase et le Doppler sur L_1 et L_2. Un récepteur militaire mesure en plus le code P sur L_1 et L_2. Il est à noter que certains récepteurs civils performants, grâce à des méthodes de traitement du signal d'extraction de phase sur L_2, délivrent également des observables bruités de code P sur L_1 et L_2.

Les erreurs d'observable d'une même porteuse sont souvent considérées comme peu corrélées du fait que la traversée dans l'atmosphère n'induit pas les mêmes effets sur le code et la phase. Le Doppler, indispensable pour démodulation des signaux des satellites au niveau des boucles à verrouillage de phase, est mis à profit notamment pour la mesure de vitesse.

3.2 Calcul autonome par mesure de code

Intéressons-nous, dans ce paragraphe, à l'utilisation de la mesure de code C/A seule par un récepteur fonctionnant de façon autonome. On appelle également ce mode de fonctionnement le mode naturel, ou absolu ou encore *stand-alone*.

3.2.1 Equation d'observation associée au code

Comme pour le LORAN C, le principe repose sur une mesure du temps de vol. Les séquences C/A générées par les satellites sont émises à des instants connus dans le système de

temps GPS. Le récepteur génère à tout instant une réplique des codes pseudo-aléatoires des différents satellites ; les signaux ainsi générés sont comparés au signal reçu. Comme les codes des satellites sont orthogonaux, quand le signal répliqué et le signal reçu sont fortement corrélés, la signature du satellite recherché est présente dans le signal reçu. La figure (2.7) illustre le principe dans le cas simplifié où il n'y a qu'un satellite en vue.

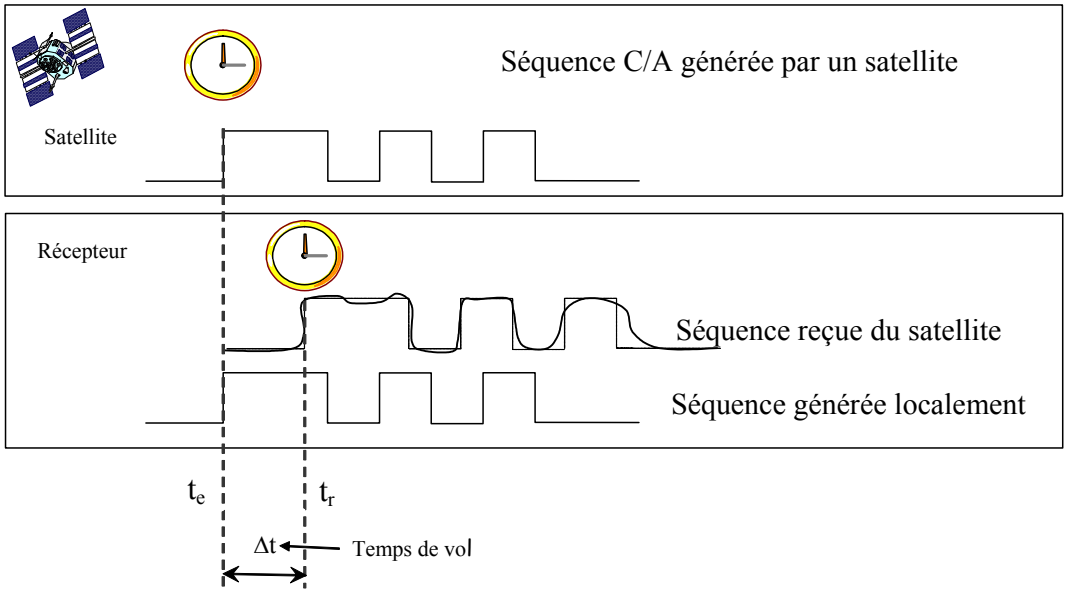


Figure 2.7. Principe de la mesure GPS par temps de vol TOA (Time Of Arrival)

En pratique, la recherche du signal d'un satellite doit aussi se faire en fréquence compte tenu de la vitesse élevée des satellites par rapport au récepteur qui induit un décalage de la fréquence de la porteuse par effet Doppler. Lorsque le récepteur connaît approximativement sa position, il peut mettre à profit les données des almanachs pour faciliter cette recherche.

Sous hypothèse que le signal se déplace à la vitesse c de la lumière et en négligeant toute perturbation, la pseudo-distance avec le satellite i s'écrit :

$$\rho_i(tr_i) = R_i(tr_i) + c.\, dt_u(tr_i) - c.\, dt_i(te_i) \qquad (2.26)$$

où

- $dt_i(te_i)$ traduit le décalage d'horloge du satellite i au moment de l'émission,
- $R_i(tr_i) = \sqrt{(x(tr_i) - x_i(te_i))^2 + (y(tr_i) - y_i(te_i))^2 + (z(tr_i) - z_i(te_i))^2}$ est la distance,
- $(x_i(te_i), y_i(te_i), z_i(te_i))$ sont les coordonnées du satellite à l'instant d'émission dans le repère géodésique WGS 84.

Il est à noter que, contrairement à la mise en équations du LORAN (cf. paragraphe 2.1 page 17), on prend en compte le décalage d'horloge de l'émetteur.

3.2.2 Calcul de la solution de navigation en mode autonome

Supposons qu'à un instant donné, n satellites soient visibles avec $n \geq 4$. Faisons l'hypothèse de simultanéité des observables à la réception (toutes les mesures se font au

même instant *tr* que l'on omet pour simplifier les expressions) et de variation négligeable du décalage de temps[4], le système à résoudre s'écrit :

$$\begin{cases} \rho_1 & = R_1 + c.dt_u - c.dt_1(te_1) \\ \dots & \dots \\ \rho_n & = R_n + c.dt_u - c.dt_n(te_n) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \rho_1 & = \sqrt{(x - x_1(te_1))^2 + (y - y_1(te_1))^2 + (z - z_1(te_1))^2} + c.dt_u - c.dt_1(te_1) \\ \dots & \dots \\ \rho_n & = \sqrt{(x - x_n(te_n))^2 + (y - y_n(te_n))^2 + (z - z_n(te_n))^2} + c.dt_u - c.dt_n(te_n) \end{cases} \quad (2.27)$$

Grâce aux paramètres radiodiffusés dans les éphémérides, il est possible d'estimer finement chacun des $dt_i(te_i)\ \forall i$. En notant $X = (x, y, z, dt_u)$ et $Z = (\rho_1, \dots, \rho_n)$, on obtient sous forme vectorielle :

$$Z = h(X) \quad (2.28)$$

Avec $n > 4$, on est amené à résoudre un système non-linéaire redondant proche conceptuellement du problème 2D du LORAN C. Cependant, contrairement au LORAN pour lequel les balises sont fixes, la détermination des coordonnées des satellites est un véritable problème en soit. Pour ce faire, il faut retrouver la date d'émission pour les calculer à partir des paramètres Képlériens des orbites diffusées. En pratique, on procède par itérations à partir d'une date d'émission prédite [Grewal et al, 01].

3.2.3 Phénomènes dégradant la mesure de code

Il existe de nombreux phénomènes qui dégradent la mesure de code et nous nous intéressons dans ce paragraphe à en présenter les principaux. Nous négligerons les retards électroniques correspondant au temps de traversée des différents composants.

3.2.3.1 Effet de la ionosphère « I »

Située entre 50 et quelques centaines de kilomètres d'altitude, la ionosphère est une couche haute de l'atmosphère ionisée par l'action des radiations solaires. Cette ionisation dépend de la latitude, de l'activité solaire, de la période de l'année, du jour et de la nuit.

Lorsque l'onde du signal traverse ce milieu, tout se passe comme si la distance mesurée (i.e. la pseudo-distance) était plus longue que la vraie distance géométrique satellite-récepteur[5]. Ceci est dû au fait que les ondes électromagnétiques traversant ce milieu sont retardées. L'effet sur la mesure induit un *allongement* (noté *I*) qui peut varier de 0 à 50 m.

---

[4] Ce sont les mêmes hypothèses que pour le LORAN.

[5] A noter que c'est l'inverse pour les mesures de phase.

3.2.3.2 Effet de la troposphère « T »

Située entre le sol et 8 à 17 kilomètres d'altitude, la troposphère est la couche basse de l'atmosphère. Son influence dépend de la température, de la pression, de l'humidité et de l'élévation du satellite mais pas de la fréquence. On peut recourir à l'utilisation de modèles pour la réduire.

Les retards du signal sont dus à deux phénomènes :

- le trajet des ondes passant dans ce milieu est courbé et donc la longueur du trajet est augmentée,
- la vitesse de propagation décroît.

L'effet sur la mesure peut varier de 2 à 30 m suivant l'élévation du satellite.

3.2.3.3 Les effets relativistes « Rel »

Les effets relativistes sont dus au fait qu'il y a une différence de champ gravitationnel et surtout une grande différence de vitesse entre le satellite et le récepteur. Cela se traduit par une dilatation du temps et un décalage des fréquences [Durand, 02]. Ainsi, vont être modifiés :

- le décalage d'horloge du satellite par rapport au temps GPS,
- le décalage d'horloge du récepteur par rapport au temps GPS,
- le signal satellite par rapport au récepteur (courbures et retards dus à la gravitation terrestre).

3.2.3.4 Les multi-trajets « M »

Un multi-trajet provient de la réflexion du signal avant réception. Le signal capté par l'antenne apparaît comme la somme du signal direct et des multi-trajets. Si l'antenne (par une analyse de la polarité de l'onde) ou le corrélateur ne parviennent pas à éliminer le ou les multi-trajets, il apparaît un allongement (noté *M*) [Bétaille, 03]. Dans le cas extrême, le trajet direct n'est pas présent ; la détection bas niveau du multi-trajet est alors difficile.

Des multi-trajets éphémères ne sont pas trop problématiques car ils sont filtrés par les boucles à verrouillage de phase des corrélateurs. Ce cas peut se produire en milieu urbain, par exemple, si le mobile est en mouvement : les multi-trajets apparaissent et disparaissent rapidement. Par contre, des multi-trajets persistants sont détectables s'ils sont importants en étudiant la cohérence du signal avec les autres. Remarquons que plus les satellites sont situés à la verticale du récepteur, moins ils sont sensibles aux multi-trajets.

3.2.3.5 Le bruit de mesures « b »

Le signal provenant du satellite étant fortement atténué, le récepteur procède à une amplification ce qui amplifie également le bruit. On a l'habitude de considérer que le bruit de la mesure induit une erreur minimum de 1% de la longueur d'onde du signal sur lequel on fait la mesure ; par exemple, pour le code C/A de longueur d'onde 300 m, on observe une erreur de 1 à 3 m. Ce bruit affecte la mesure d'un retard temporel et donc le calcul de la pseudo-distance.

3.2.4 Utilisation des modèles de dégradation pour améliorer le calcul autonome

En prenant en compte les diverses dégradations, on obtient selon le principe de superposition :

$$\rho = R + c.\,dt_u - c.\,dt_s + Rel + T + I + M + b \tag{2.29}$$

Afin d'améliorer la résolution de système (2.28), on corrige chaque pseudo-distance à l'aide de toute information disponible sur les allongements et à l'aide de la connaissance du décalage d'horloge du satellite. Par exemple, avec le système d'augmentation EGNOS, on peut estimer assez finement *I* à l'aide d'une grille de correction diffusée en temps réel. Si le récepteur est bi-fréquence, on peut aussi estimer *I* en comparant les mesures des deux porteuses compte tenu du fait que l'effet de la ionosphère dépend de la fréquence. Par ailleurs, il existe des modèles atmosphériques et relativistes qui permettent de compenser *T* et *Rel*. Les erreurs résiduelles non modélisables sont le bruit *b* et les multi-trajets *M*, même s'il existe des méthodes qui permettent de rejeter de façon logicielle un multi-trajet engendrant une inconsistance avec les autres mesures.

Pour finir ce paragraphe, précisons qu'il existe un mécanisme de correction assez semblable pour le LORAN C appelé ASF (*Additional Secondary Factor*). Il s'agit d'une grille de corrections qui permet de modéliser la variation de conductivité du milieu traversé par le signal, ce qui modifie la vitesse de propagation. En première approche, elle dépend principalement de la nature du sol (terre ou mer). L'utilisation de cette grille améliore très nettement les performances.

3.3 Calcul de la vitesse à partir des mesures de Doppler

Les mesures de Doppler des boucles à verrouillage de phase correspondent à la dérivée temporelle des pseudo-distances. En supposant que les différentes erreurs sont compensées par les valeurs issues des modèles et en négligeant le bruit de mesure et les multi-trajets, l'équation (2.29) devient :

$$\rho_i = R_i + c.\,dt_u \tag{2.30}$$

Supposons que dt_u soit très peu variable. La mesure de Doppler peut être assimilable à la variation de distance récepteur-satellite :

$$\dot{\rho}_i \approx \dot{R}_i \tag{2.31}$$

Pour simplifier, on note $\left(x_i(te_i), y_i(te_i), z_i(te_i)\right) = \left(x_i, y_i, z_i\right)$. On suppose ici avoir calculé au préalable la solution de navigation et donc $R_i = \sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2} \quad \forall i$ est connue. On obtient :

$$\dot{R}_i = \frac{(\dot{x}-\dot{x}_i)(x-x_i)+(\dot{y}-\dot{y}_i)(y-y_i)+(\dot{z}-\dot{z}_i)(z-z_i)}{R_i} \tag{2.32}$$

L'inconnue est le vecteur vitesse $\vec{v} = \left[\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}\right]^T$ que l'on isole à droite :

$$\dot{R}_i.R_i + \dot{x}_i(x-x_i) + \dot{y}_i(y-y_i) + \dot{z}_i(z-z_i) = \dot{x}(x-x_i) + \dot{y}(y-y_i) + \dot{z}(z-z_i) \tag{2.33}$$

Dans l'expression précédente, tous les termes à gauche sont connus et on les note m_i.

$$m_i = \begin{bmatrix} x - x_i & y - y_i & z - z_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

Si on considère 3 satellites, on obtient un système de 3 équations à 3 inconnues, inversible s'il est bien conditionné. Avec au moins 4 satellites en vue, on le résout par moindres carrés.

Les mesures de Doppler permettent donc d'estimer assez finement le vecteur vitesse. Cette mesure est mise à profit dans les systèmes d'hybridation avec des systèmes inertiels et, parfois, c'est même la seule mesure GPS qui soit utilisée.

3.4 Modes différentiels

L'ajout de moyens de communication aux récepteurs GPS a considérablement changé la donne. Les premiers systèmes utilisant des communications point à point propriétaires (avec des modems UHF par exemple) se voient remplacés par des systèmes multi-bases utilisant les nouveaux moyens de communication sans fil (satellite géostationnaire, RDS sur un signal FM, GSM, GPRS, UMTS, Wifi, etc.). Etudions dans ce paragraphe quelques principes.

3.4.1 Différentiel monobase

3.4.1.1 Principe

Soient deux récepteurs fonctionnant de façon simultanée : l'un fixe placé sur un point connu et l'autre mobile que l'on cherche à localiser.

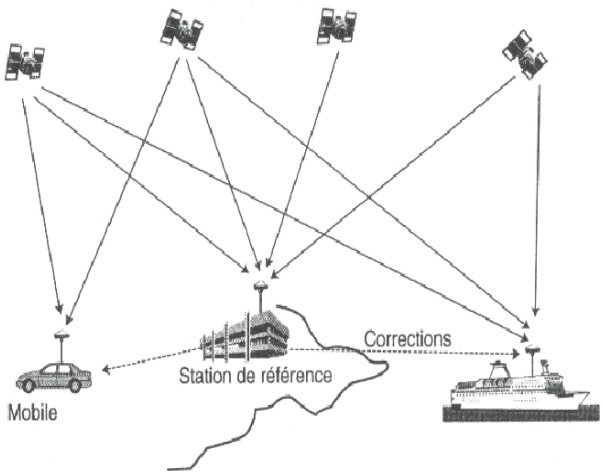


Figure 2.8. Principe du mode différentiel monobase.

On suppose que, compte tenu de l'altitude des satellites (20 000 Km) très grande par rapport à la distance séparant le récepteur mobile et le récepteur fixe (<100 km), ces derniers subissent les mêmes dégradations : c'est la corrélation spatiale des erreurs. Sous cette hypothèse, le récepteur fixe (appelé *base* et noté *B*) élabore des corrections différentielles qu'il transmet au mobile.

Supposons que la base soit parfaitement localisée dans le référentiel WGS 84 et supposons que la position radiodiffusée du satellite *i* soit sans erreur, la base calcule d'abord sa distance géométrique "exacte" au satellite *i* :

$$R_{b,i} = \sqrt{(x_B - x_i)^2 + (y_B - y_i)^2 + (z_B - z_i)^2} \quad (2.35)$$

Considérons les pseudo-distances au satellite *i,* à la base et au mobile :

$$\rho_{b,i} = R_{b,i} + c.dt_b + Rel_{b,i} + T_{b,i} + I_{b,i} + M_{b,i} + b_{b,i} \quad (2.36)$$

$$\rho_i = R_i + c.dt_u + Rel_i + T_i + I_i + M_i + b_i \quad (2.37)$$

On appelle *correction différentielle* :

$$\Delta\rho_i = \rho_{b,i} - R_{b,i} = c.dt_b + Rel_{b,i} + T_{b,i} + I_{b,i} + M_{b,i} + b_{b,i} \quad (2.38)$$

Cette correction est transmise au mobile qui l'applique à sa mesure de pseudo-distance :

$$\rho_i - \Delta\rho_i = R_i + c.dt_u + Rel_i + T_i + I_i + M_i + b_i - \left(c.dt_b + Rel_{b,i} + T_{b,i} + I_{b,i} + M_{b,i} + b_{b,i}\right) \quad (2.39)$$

Or, d'après les hypothèses, on suppose que les allongements sont les mêmes :

$$Rel_{b,i} = Rel_i \quad T_{b,i} = T_i \quad I_{b,i} = I_i \quad (2.40)$$

Si on note $\rho_{i,c}$ la pseudo-distance corrigée et $dt_{ub} = dt_u - dt_b$, on obtient :

$$\rho_{i,c} = R_i + c.dt_{ub} + M_i + b_i - M_{b,i} - b_{b,i} \quad (2.41)$$

Il apparaît dans l'équation (2.41) que la méthode différentielle ne permet pas de corriger les multi-trajets et les bruits de mesure des deux récepteurs mis en jeu. Au contraire, ces perturbations s'ajoutent, d'où l'intérêt d'avoir une base de bonne qualité dans un endroit bien dégagé.

En regroupant toutes les pseudo-distances, on obtient un système qui peut se résoudre de la même façon que le système d'équations du GPS autonome. On peut remarquer que dans ce cas, on ne calcule plus le décalage d'horloge du mobile mais la différence d'écart d'horloge entre le mobile et la base.

Par expérience, le mode différentiel améliore le positionnement d'un facteur 10.

3.4.1.2 Prise en compte de l'age des corrections

Dans le principe présenté au paragraphe précédent, les corrections de pseudo-distances doivent être utilisées à l'instant exact où elles ont été calculées. Or, il existe forcément un délai dû à leur élaboration puis à leur transmission. Le deuxième délai est souvent très variable. Par chance, les dégradations, en plus d'être corrélées dans l'espace, sont corrélées dans le temps. Ainsi, on transmet des corrections datées avec leurs dérivées temporelles pour que le mobile puisse extrapoler une correction élaborée à t_0 jusqu'à l'instant d'utilisation t_1. La durée (t_1-t_0) s'appelle *âge de la correction*. Pour donner un ordre de grandeur, un age de 30 secondes est souvent considéré comme acceptable.

3.4.1.3 Effet des erreurs d'éphémérides et de mauvaise estimation de position de la base

Les positions radiodiffusées des satellites sont en fait entachées d'erreur de l'ordre du mètre. Si on suppose que la base et le mobile utilisent les mêmes estimations (x_i, y_i, z_i) dans leurs calculs, les erreurs sur R_i et $R_{b,i}$ sont en fait très proches compte tenu du rapport « distance au satellite – ligne de base » qui induit deux angles de vue très proches. Ainsi, lorsqu'on retranche la correction différentielle à la mesure du mobile, on compense les erreurs d'éphéméride. L'effet d'une base mal localisée en WGS 84 est du même type.

3.4.2 Différentiel multi-bases

Soit un ensemble de stations de base pouvant être réparties à l'échelle d'un continent. Ces stations élaborent des corrections qui sont relayées à une station maîtresse qui les diffuse à son tour aux mobiles. Les moyens de diffusion ont d'abord utilisé des satellites géostationnaires (système Omnistar par exemple) mais, depuis quelques années, sont apparus des systèmes commerciaux utilisant des réseaux de communication sans fils (notamment GSM/GPRS).

De son côté, le récepteur reçoit l'ensemble des corrections et élabore une correction valable au point où il se trouve. Cette position est la première fois obtenue grâce à un positionnement en mode autonome. Ce mécanisme est connu sous le nom de *station de base virtuelle*.

Le GPS assisté (*AGPS*) appartient à cette classe de technologie. Le principe consiste à interroger un serveur qui indique par retour les éphémérides, les satellites visibles ainsi que leur Doppler. Le mobile n'a plus à scruter toutes les fréquences et, une fois les satellites détectés et suivis, le récepteur n'a plus besoin de télécharger à petit débit les éphémérides. Ceci lui permet de fixer un point en quelques secondes, même lors d'un démarrage à froid. En outre, la connaissance à l'avance des satellites en vue permet d'augmenter la sensibilité des corrélateurs GPS. Ainsi, le GPS assisté peut fonctionner dans des endroits où le signal est trop faible pour un fonctionnement standard (comme à l'intérieur d'un bâtiment par exemple).

3.5 Utilisation des mesures de phase

Une méthode alternative à la mesure de code pour estimer le temps de vol consiste en la mesure de phase de la porteuse. Dans le suivi d'un satellite, la boucle à verrouillage de phase fournit la différence de phase entre le signal reçu et le signal généré en interne, à 2π près, car il n'est malheureusement pas possible de distinguer les différents cycles de la porteuse. Ce problème induit une ambiguïté entière de longueurs d'onde. Il est à noter que chaque boucle dispose d'un compteur de tours qui comptabilise le nombre de cycles entiers de phase depuis la première mesure (tant qu'il n'y a pas d'interruption).

On obtient une équation d'observation assez semblable à (2.29) [Durand, 02] :

$$\Phi = R + \lambda.N + c.\,dt_u - c.\,dt_s + Rel(\Phi) + T(\Phi) + I(\Phi) + M(\Phi) + b(\Phi) \qquad (2.42)$$

où

- Φ est la mesure de phase,
- λ la longueur d'onde de la porteuse,
- N l'ambiguïté entière de cycles,
- $Rel(\Phi)$, $T(\Phi)$, $I(\Phi)$, $M(\Phi)$ et $b(\Phi)$ sont les perturbations sur la phase dues à la relativité, à la troposphère, à la ionosphère, aux multi-trajets et au bruit.

La mesure de phase est beaucoup plus précise que la mesure de code mais, pour pouvoir l'exploiter, il faut avoir au préalable estimé les ambiguïtés entières pour chaque satellite. Ce problème assez ardu possède plusieurs résolutions standard qui cherchent à tirer profit du caractère entier des ambiguïtés. On renvoie le lecteur à la thèse de Stéphane Durrand pour plus de détails [Durand, 02].

En pratique, les récepteurs cinématiques (appelés *RTK* comme *Real Time Kinematic*) procèdent en deux phases :

- une résolution des ambiguïtés avec 5 mêmes satellites,
- un fonctionnement en suivi (*RTK fix*) jusqu'à un saut de cycle où un masquage. Le récepteur repasse alors en mode résolution d'ambiguïtés (*RTK float*).

Si la première étape est résolue sans erreur, le positionnement peut atteindre une précision de l'ordre du centimètre. Pour un mobile ayant un déplacement important induisant des variations rapides de la visibilité satellitaire (une automobile en milieu urbain par exemple), le mode RTK est encore mal adapté car le récepteur n'a pas le temps de toujours fixer les ambiguïtés.

4 SYSTEMES GNSS ET GALILEO

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a proposé, en 1983, le développement d'un système mondial de positionnement et de référence de temps appelé Global Navigation Satellite System. Un GNSS est composé d'une ou plusieurs constellations satellitaires, d'un système de surveillance de l'intégrité et de systèmes complémentaires si nécessaire pour atteindre les niveaux de performance associés à chaque phase de vol.

Le système américain GPS constitue actuellement un des éléments du GNSS1 (cf. figure 2.9). Le système russe GLONASS est peu utilisé compte tenu de sa constellation très imparfaite. En 2005, il existe plusieurs systèmes d'augmentation : WAAS en Amérique du Nord, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) en Europe et MSAS au Japon.

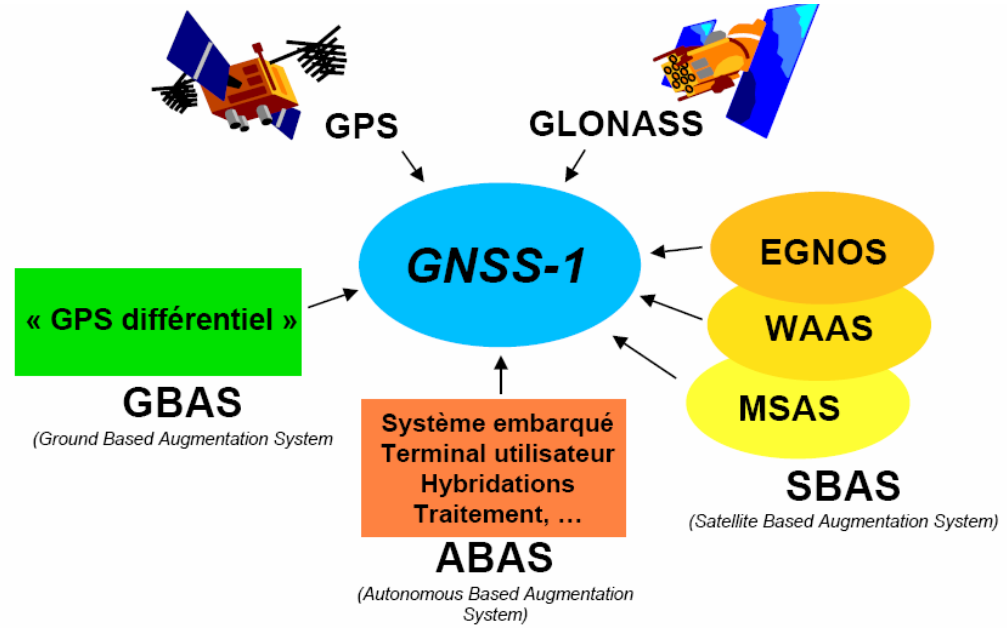


Figure 2.9. Le concept de GNSS1.

EGNOS est constitué de 3 satellites géostationnaires et d'un réseau de stations au sol. Chaque satellite transmet un signal GPS (dit *Ranging*), des corrections différentielles (dont une grille fine de corrections ionosphériques) et un indicateur d'intégrité (dit *Use/Don't Use*).

L'arrivée de Galiléo et la modernisation du GPS avec de nouveaux signaux vont constituer le GNSS2 vers 2010. Le credo de Galiléo est le suivant : exploitation civile, couverture mondiale, précision accrue, puissance supérieure et utilisation hybride avec le GPS. Il sera organisé autour de 5 services :

- Service grand public (*Open Service OS*), analogue au service standard SPS du GPS, mais avec plusieurs fréquences. Il s'agira d'un service gratuit, orienté grand public avec aucune information d'intégrité.
- Service commercial (*Commercial Service CS*). En plus du service OS, il offrira des capacités de transfert de données commerciales cryptées.
- Service sécurisé de haut niveau d'intégrité (*Safety Of Life Service SOL*). SOL sera certifiable et destiné aux applications critiques du point de vue de la sécurité (aviation civile, trafic maritime et portuaire, applications ferroviaires,…)
- Services gouvernementaux (*Public Regulated Services PRS*). Orientés sûreté et sécurité, ces services auront un accès réservé aux utilisateurs institutionnels (sécurité civile, police, lutte contre les incendies, …)
- Recherche et Sauvetage (*Search and Rescue SAR*) qui offrira un lien retour vers l'utilisateur en détresse (alors que les systèmes actuels offrent un lien à sens unique depuis l'utilisateur jusqu'au centre de secours).

5 CONCLUSION

La radiolocalisation est une formidable technologie pour la localisation et en particulier pour l'automobile. L'évolution des systèmes satellitaires sur 30 ans a été fulgurante et il faut s'attendre encore à des améliorations majeures des systèmes GNSS dans les 10 ans à venir avec la modernisation du GPS et l'arrivée de Galiléo.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les principaux principes de localisation à partir de deux exemples concrets : le LORAN C et le GPS. Les systèmes d'augmentation et les modes différentiels sont les clés d'un positionnement intègre et précis. Nous nous sommes limités ici à présenter les approches qui consistent à utiliser les mesures d'un seul système radiolocalisation à la fois. Pour être complet, on peut citer les systèmes hybrides « LORAN/GPS ». Dans un premier mode (appelé *Eurofix*), le LORAN peux servir de vecteur de communication de corrections différentielles pour le GPS. Dans un second, il peut servir de système de secours en cas de défaillance du GPS et, dans un dernier mode, ses mesures brutes de temps de vol peuvent être utilisées dans le calcul de la solution de navigation (couplage serré).

Le compromis « **précision/disponibilité** » est une caractéristique des systèmes GNSS. Nous avons vu que dans le principe, il faut 4 satellites en vue présentant un bon DOP et avec un rapport signal sur bruit suffisant. Un réglage standard de ce type induit de nombreuses indisponibilités du positionnement GPS en milieu de type urbain. La tendance actuelle pour les services de mobilité est d'être peu exigent sur la précision en augmentant les seuils d'acceptabilité (appelés *masques*) des DOP, en autorisant des rapports signal sur bruit faibles et en augmentant la sensibilité des corrélateurs des récepteurs. Ainsi, on trouve actuellement sur le marché des récepteurs capables de fonctionner avec des niveaux de réception très faibles mais au dépend de la précision.

Par ailleurs, nous avons vu que les systèmes satellitaires ont des performances bien supérieures au LORAN mais, il faut pas perdre de vue leur **grande sensibilité à des brouillages** (volontaires notamment). Ceci découle de la faible puissance et de la structure en spectre étalé des signaux (l'utilisation des signaux repose sur le calcul de la corrélation entre le signal reçu et une réplique locale). On dit parfois que la technologie GPS en est actuellement au stade des micro-ordinateurs avant l'apparition des virus informatiques. Ce problème ne pourra jamais être complètement gommé même s'il fait partie des préoccupations des concepteurs des futurs GNSS.

Le **faible cadencement** et une **latence** non négligeable font également partie du dénominateur commun des systèmes de radiolocalisation. La dynamique du positionnement n'est pas limitée par la faible bande passante des boucles à verrouillage de code et de phase, mais par la complexité calculatoire du calcul d'une solution de localisation s'exécutant sur des calculateurs embarqués aux ressources limitées.

Enfin, une dernière caractéristique essentielle de tout système de radiolocalisation réside dans la sensibilité aux **multi-trajets**. Une voie pour aborder ce problème consiste à développer de nouveaux corrélateurs [Bétaille, 03]. Dans sa thèse, Juliette Marais [Marais, 02] s'est intéressée à ce problème et a montré qu'une cartographie (des bords d'une voie ferrée notamment) permet de prédire les satellites visibles à chaque endroit et à tout instant, de façon à ne retenir que ceux qui sont bien positionnés.

Une solution multi-capteur ou multi-source d'information constitue une approche intéressante pour améliorer la disponibilité, la précision et l'intégrité de la localisation tout en permettant d'apporter des solutions au problème des multi-trajets. Ainsi, nous verrons dans les chapitres prochains des méthodologies d'hybridation avec des données cartographiques et des capteurs à l'estime bien adaptés au contexte de l'automobile.

Chapitre 3. Cartes et information géographique.

1 INTRODUCTION

Tout système de localisation absolu utilise pour fonctionner des amers ou balises de positions connues dans un repère de référence R_0. Le mot *amer* est généralement utilisé pour désigner des points de repère naturels. Le mot *balise* s'emploie habituellement pour décrire des amers artificiels, passifs ou actifs, disposés dans la zone de couverture du système de localisation. Une balise active contient des composants électroniques et dispose d'une source d'énergie embarquée de façon à émettre un signal. Ainsi, des aimants dans la chaussée ou des catadioptres constituent des balises passives. Les balises sont souvent statiques mais peuvent également être en mouvement, comme les satellites GPS. Une dernière caractéristique des balises tient dans la capacité du système de localisation à les distinguer ; des balises distinguables possèdent une signature qui leur est propre, ou bien leur séquencement permet de les différencier. Dans la suite de ce document, on utilisera le mot *amer* au sens large pour désigner des amers naturels ou des balises.

Explicitement ou non, les amers sont regroupés dans des *cartes* locales ou globales. Une carte locale contient un ensemble d'amers géographiquement proches ou bien appartenant au même système de localisation local. Une carte globale regroupe des amers utilisables sur la terre entière. Ainsi, les satellites GPS constituent des balises actives, distinguables et en mouvement. Les éphémérides constituent leur carte globale.

Par ailleurs, l'évolution rapide des connaissances et outils relatifs à l'information géographique permet d'imaginer la conception de systèmes de localisation utilisant des amers très variés potentiellement générateurs de grandes quantités de données. Un des objectifs de ce chapitre est d'illustrer ce concept récent. Pour ce faire, nous allons d'abord nous intéresser à l'étude de différents types d'amers et à leur organisation en cartes. Ensuite, un paragraphe sur la géodésie présentera les systèmes géodésiques et les principales projections utilisées en France, ce qui permettra de comprendre ce que sont les différentes coordonnées et comment passer d'un système à un autre. Ensuite, le paragraphe 4 sera consacré à l'information géographique, notamment afin de comprendre l'organisation de bases de données *navigables* utilisant des cartes routières numériques. Enfin, trois exemples de systèmes d'information géographique pour la navigation seront décrits. Ils ont été utilisés ou sont en cours d'utilisation dans des projets de recherche auxquels j'ai participé.

2 CARTES D'AMERS

Les amers peuvent présenter différentes formes. Ils peuvent être ponctuels ou à forme complexe, avec ou sans des liens entre eux.

2.1 Cartes d'amers statiques artificiels

Les amers artificiels ponctuels sont les plus fréquents. Une carte est l'ensemble des données précisant les positions des balises et des informations associées (identifiant, codes, etc). La carte doit être transmise au récepteur avant chaque fonctionnement du système. Elle est souvent stockée sur une mémoire de masse locale au système.

Dans le cas du LORAN C, les balises sont distinguables dès que l'utilisateur choisit d'utiliser un GRI. En effet, les balises émettent toutes dans le même ordre après la station maîtresse. Le fichier des coordonnées des amers d'un GRI constitue donc une carte locale. Pour un système optique comme SIREM ou le LASERGUIDE [Bouvet et al, 01], les positions des balises sont également des données transmises a priori au système de localisation. Il est à noter que pour le LASERGUIDE, les balises sont toutes identiques ; on ne peut les utiliser qu'après une étape de mise en correspondance avec des mesures prédites.

2.2 Cartes d'amers statiques naturels

Les amers naturels sont plus complexes à utiliser : il faut les caractériser et les retrouver en phase de navigation. En milieu d'intérieur, de très nombreux travaux ont eu lieu sur ce thème en robotique. Dans certains environnements d'extérieurs, comme pour l'exploration des planètes ou en milieu urbain, ils constituent une approche alternative intéressante à la radiolocalisation.

Figure 3.1. Un Cycab à Nancy le 18 juin 2005.

Dans le cadre des projets MobiVip du Prédit (2004-2007) et Bodega du programme ROBEA (2003-2005), nous étudions cette approche à l'aide de la vision et de la télémétrie

laser. En effet, les environnements urbains présentent la caractéristique d'être fortement structurés. Trois partenaires des deux projets travaillent sur la commande référencée vision dans le but d'asservir le mouvement d'un véhicule en utilisant des caméras. Ces véhicules sont appelés VIP (Véhicule Individuel Public) et le Cycab en est un modèle particulier (figure 3.1). Chaque laboratoire décompose ses traitements en deux parties : la première consiste à faire des acquisitions d'images sur un parcours puis de faire un traitement hors ligne pour caractériser les amers. La seconde partie consiste à utiliser ces amers pour la navigation.

2.2.1 Amers visuels avec points caractéristiques 3D

Ces amers sont des points caractéristiques dans des images appelés points de Harris dont on reconstruit les positions 3D à partir d'une séquence d'images[6] (cf. figure 3.2). La méthode décrite ici s'applique à une séquence d'images acquises à la cadence vidéo [Royer et al, 04].

Dans un premier temps, la méthode consiste à calculer les points caractéristiques dans chacune des images. Puis, par une méthode de suivi, on sélectionne les points les plus pertinents. L'étape suivante consiste à calculer les coordonnées homogènes *(x, y, z, t)* pour chaque point dans un référentiel commun. Ce référentiel est le repère lié à la pose de la caméra qui a pris la première image. Ensuite, une matrice de projection *M (3x4)* est calculée pour chaque image, ce qui permet de transformer les coordonnées *(x, y, z, t)* des points caractéristiques en coordonnées *(u, v, t)* dans l'image désignée.

Figure 3.2. Quelques images d'une séquence prise à Antibes (origine INRIA).

La figure 3.3 illustre une vue de dessus de points caractéristiques reconstruits et des positions successives des cameras (petits carrés). Cette figure permet de comprendre la répartition des points caractéristiques par rapport aux images clé.

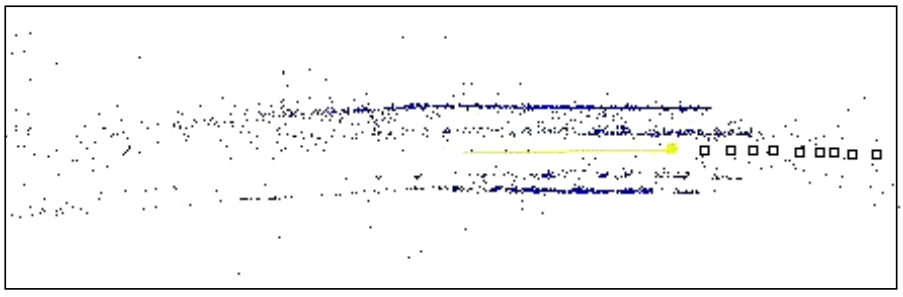


Figure 3.3. Positions clés et points caractéristiques 3D (origine LASMEA).

[6] Approche du LASMEA

Donc, pour un apprentissage d'une région urbaine, on obtient des points de Harris 3D référencés dans le repère lié au véhicule et une liste d'images clés dans lesquelles ces points ont été détectés. Le traitement en ligne lors de la phase de navigation consiste à rechercher des points d'intérêt dans l'image courante puis à rechercher ces points dans l'image clé la plus proche et, enfin, à appliquer les algorithmes qui permettent d'estimer la configuration de la caméra qui a fait la prise de vue par rapport au référentiel de la camera qui a acquis l'image de référence.

On peut donc en déduire qu'un amer est une image clé avec des points caractéristiques correspondants et des matrices de projection associées. Cependant, ces images clés sont associées à des positions clés qui sont exprimées relativement à une pose de référence. Ce n'est donc pas une image isolée qui est utile lors de la navigation mais un ensemble d'images clés dans lesquelles on trouve des points caractéristiques communs.

On propose de regrouper cet ensemble d'images de références et le référentiel associé dans *une carte locale* contenant la structure suivante :

Carte locale avec points caractéristiques 3D
- Images clés (Ik) - Matrices de projection associées à chaque image clé - Points caractéristiques localisés en 3D dans le repère de la carte avec des arcs précisant les images où ces points se retrouvent.

2.2.2 Amers visuels avec points caractéristiques 2D

Il y a beaucoup d'analogie entre cette approche et la précédente. Les amers utilisés ici sont aussi des points de Harris mais contrairement au cas précédent, l'information 2D dans l'image est suffisante[7].

Soit un ensemble d'images de l'environnement extraites d'une séquence d'apprentissage. Pour chaque image, on extrait des points caractéristiques avec, pour chaque image, les appariements des points caractéristiques avec les points caractéristiques d'autres images. Ces appariements aident à déterminer le mouvement nécessaire pour se déplacer de l'image i vers l'image j. L'ensemble constitue une carte locale dont la structure est la suivante :

Carte locale avec points caractéristiques 2D
- Images clés (Ik) - Points caractéristiques avec des arcs précisant les images où ces points se retrouvent.

Avec cette approche, la localisation n'est pas explicite : le robot s'asservit par commande référencée vision.

[7] Approche IRISA Lagadic

2.2.3 Amers visuels plans

Un amer plan est un ensemble de points caractéristiques (détecteur de Harris) appartenant à un même plan d'équation connue[8]. A cet ensemble de points est associée une imagette caractéristique [Simond et Rives, 04]. Ces amers sont également obtenus après une phase d'apprentissage, et sont, par exemple, les coins des fenêtres comme sur la figure 3.4.

Figure 3.4. Détection d'amers plans appartenant à une façade.

Dans le cadre du projet Bodega, on fait l'hypothèse que les façades sont verticales (monde 2D ½). Les amers sont localisés dans un repère commun à toute la carte par leur origine et leur normale. Leur structure est la suivante :

Amer plan 2D ½
- Imagette (ou patch vertical) - Points caractéristiques - son origine O (x, y, z) dans le repère de la carte - sa normale N (nx, ny, 0) ou bien un angle de lacet par rapport à la verticale dans le repère de la carte.

Les amers plans permettent de calculer une localisation explicite. Le robot peut donc s'écarter de façon significative de la trajectoire d'apprentissage.

2.2.4 Amers linéaires

Certains amers sont assimilables localement à des droites. Ce sont par exemple les lignes blanches du marquage au sol ou bien les trottoirs. Pour détecter les lignes blanches, on peut utiliser une caméra frontale ou latérale. Pour détecter les trottoirs, la vision et la télémétrie laser sont deux alternatives. Par exemple, dans [Wijesoma et al, 04], un télémètre à balayage est situé à l'avant et est légèrement incliné vers la route. Dans le cadre de la thèse de Maged Jabbour (qui a débuté en 2004), nous nous intéressons à la détection de trottoirs en milieu urbain à l'aide d'un télémètre placé verticalement, orthogonalement à l'axe du véhicule (cf. figure 3.5). Les trottoirs sont modélisés par des segments de droite dont les extrémités sont mémorisées dans la carte. L'idée que nous développons repose sur le fait que la dérive d'une

[8] Approche INRIA ICARE

localisation à l'estime est plus importante en latéral qu'en longitudinal. Avec une approche de localisation et cartographie simultanées[9], il est possible de tirer profit de passages successifs au même endroit pour affiner la localisation en cas d'indisponibilité du GPS.

Figure 3.5. Montage d'un télémètre SICK à balayage à l'avant de STRADA.

Les difficultés résident dans des détections erronées ou dans de mauvaises détections des trottoirs lors de la création de la carte. En effet, le trottoir peut être trop éloigné pour obtenir une détection fiable ou bien un véhicule peut être stationné sur la chaussée. Pour traiter ces problèmes, nous proposons de mémoriser les coordonnées des extrémités des segments d'un tronçon de route dans un vecteur (noté *Seg*) et d'y associer un autre vecteur précisant la connexité (*Connex*). Conceptuellement, *Connex* est un vecteur booléen mais nous proposons de le rendre flou. Ainsi, la valeur « 0 » indique une absence de trottoir et la valeur « 1 » une existence certaine. Entre, ces deux valeurs la valeur de *Connex* quantifie la confiance en l'existence d'un trottoir. A chaque passage sur un tronçon, la valeur de *Connex* diminue ou augmente selon qu'il y a détection ou non, tout en saturant à 0 et à 1. La figure 3.6 illustre ce concept.

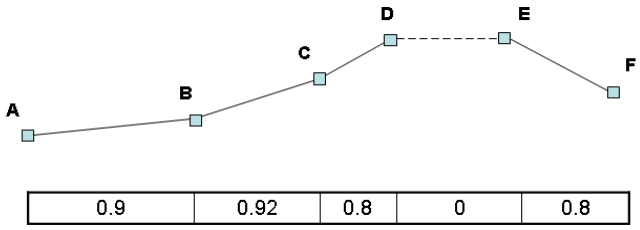


Figure 3.6. Exemple d'un vecteur de connexité associé à des amers de type segment.

Ainsi, une carte a la structure suivante :

Carte d'amers linéaires
- Ensemble de vecteurs Seg_i indiquant les coordonnées des segments d'un tronçon, - Ensemble de vecteurs $Connex_i$ associés quantifiant la confiance dans la connexité.

[9] sur laquelle nous reviendrons dans le chapitre 4 paragraphe 6 page 111.

2.2.5 Quantification de l'imprécision

Les amers naturels étant caractérisés par le système de localisation lui-même, il est souvent important de modéliser l'imprécision de la localisation des amers et de la mémoriser dans la carte. Ce concept a été proposé dans [Smith, Self, Cheeseman, 88] sous le nom de carte probabiliste, les imprécisions étant modélisées à l'ordre deux par des variances. Ce concept a été largement utilisé en robotique pour la localisation et cartographie simultanées (*Simultaneous Localisation And Mapping*) sur lesquelles nous reviendrons dans le chapitre 4.

La carte des amers linéaires devient donc :

Carte d'amers linéaires avec imprécisions
- Ensemble de vecteurs Seg_i indiquant les coordonnées des segments d'un tronçon, - Ensemble de vecteurs $Connex_i$ associés quantifiant la confiance dans la connexité, - Ensemble de matrices de covariance associées.

2.3 Cartes d'amers en mouvement

Pour les GNSS, les amers sont les satellites. Les cartes utilisées en temps réel et en post-traitement sont différentes.

En temps réel, la carte des amers correspond aux paramètres Képlériens des orbites des satellites diffusés dans les almanachs et éphéméride. On peut noter que la carte est transmise par le système GNSS ce qui permet une remise à jour fréquente. Le récepteur n'a qu'à mémoriser les derniers paramètres reçus. Chaque trajectoire des satellites étant une fonction du temps, dès qu'on retrouve l'instant d'émission, on retrouve la position du satellite (cf. paragraphe 3.2.2, page 25).

En temps différé, le problème est analogue mais les trajectoires précises (fichiers SP3 téléchargeables sur Internet) sont décrites de façon discrète par des points.

3 ELEMENTS DE GEODESIE

La géodésie est la science qui étudie la forme et les dimensions de la terre. Elle est devenue une des bases scientifiques de la physique du globe pour l'étude des mouvements et déformations de la croûte terrestre. La géodésie permet d'assurer le positionnement des bases de données géographiques nécessaires aux Systèmes d'Information Géographique (SIG).

La terre a d'abord été considérée comme sphérique puis ellipsoïdale due à l'aplatissement engendré par la rotation de la terre. Au XIX^{ème} siècle, on a assisté au développement de nombreux réseaux géodésiques et à la création de modèles mathématiques ellipsoïdaux. Cependant, la géodésie reste un concept local ; les réseaux nationaux ne concordent pas entre eux et on se rend compte officiellement que la terre n'est pas exactement un ellipsoïde. Grâce aux mesures de pesanteur, on matérialise la déviation relative de la verticale et on définit des surfaces équipotentielles de niveau perpendiculaires en tout point à la verticale locale (géoïde).

3.1 Systèmes et réseaux géodésiques

Un système géodésique de référence est un repère (O, i, j, k) tel que :

- son centre soit proche du centre des masses de la terre,
- son axe OZ soit proche de l'axe de rotation terrestre,
- son plan OXZ soit proche du plan méridien origine.

Dans un système de référence géodésique, un point de la croûte terrestre est quasiment fixe bien qu'il soit soumis à de faibles mouvements dus aux marées terrestres (d'amplitude inférieure à 30 cm), à la surcharge océanique et aux mouvements tectoniques globaux ou locaux, inférieurs à 10 cm par an.

De nombreux systèmes coexistent, en raison de dispositions légales, réglementaires ou historiques. Les systèmes locaux, issus de réalisations terrestres, sont positionnés à quelques centaines de mètres du centre des masses de la terre. Les systèmes spatiaux sont mondiaux, leur origine est située à quelques mètres du centre des masses de la terre.

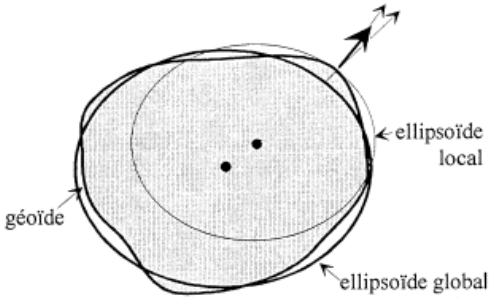


Figure 3.7. Géoïde et ellipsoïdes (source IGN).

Un réseau géodésique est un ensemble de points physiquement liés à la croûte terrestre dont on décrit la position par des coordonnées estimées et leurs variations. Avec le réseau, une réalisation géodésique nécessite la mise en œuvre d'un système géodésique qui peut être résumé par l'ensemble des constantes et algorithmes qui doivent intervenir dans le processus d'estimation des coordonnées.

3.2 Quelques systèmes en usage en France

La Nouvelle Triangulation de la France (NTF) est un système ancien encore très largement utilisé à l'heure actuelle. Ses caractéristiques sont

- un point fondamental à la croix du Panthéon,
- un ellipsoïde associée : Clarke 1880 IGN
- une représentation plane associée : Lambert zone I, II, III, IV
- un méridien origine : Paris.

Le Réseau Géodésique Français 1993, appelé RGF 93, tridimensionnel et géocentrique sert de base à la création du réseau géodésique moderne français, par densification des points européens du réseau mondial associé ETRS 89 (ellipsoïde GRS 80). Les coordonnées sont exprimées dans le système RGF 93, soit sous la forme tridimensionnelle géographique, soit sous forme bidimensionnelle, selon la projection Lambert 93, unique pour l'ensemble du territoire.

Le système WGS 84 (World Geodetic System 1984) a été mis au point par le département de la défense des États-Unis. Il est utilisé pour exprimer les éphémérides radiodiffusées du GPS. Son exactitude de l'ordre du mètre et son ellipsoïde associé est IAG-GRS80.

3.3 Coordonnées tridimensionnelles

Les coordonnées peuvent être exprimées sous la forme de coordonnées cartésiennes (x, y, z) ou sous la forme de coordonnées géographiques (longitude, latitude et hauteur ellipsoïdale) associées à un repère géodésique.

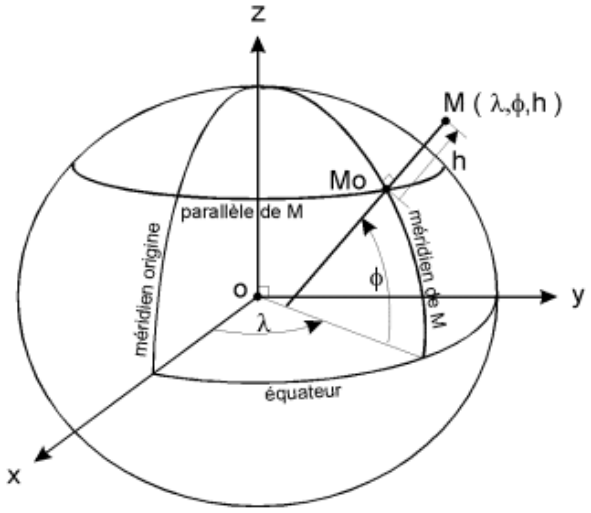


Figure 3.8. Coordonnées géographiques.

Les longitudes sont le plus souvent comptées positivement vers l'est, par rapport à un méridien origine. Ce méridien origine peut être celui de Greenwich (méridien international), ou encore propre à la géodésie d'un pays (méridien de Paris pour la France).

3.4 Projections

On peut aussi définir les coordonnées en représentation plane suite à une projection. On utilise une représentation plane de la terre pour représenter sur une surface plane une partie d'un modèle ellipsoïdal de la terre, obtenir des valeurs métriques plus exploitables que l'unité angulaire et rendre plus facile une évaluation des distances.

Une projection induit forcément des déformations. On choisit une projection dans le but de minimiser certaines déformations. On choisit le plus souvent soit de conserver les surfaces (projections équivalentes) soit de conserver localement les angles (projections conformes). Dans la plupart des projections, le nord de la projection n'indique pas la direction du pôle nord géographique[10]. Sur la projection, les méridiens convergent en un point alors que les axes nord-sud de la projection sont parallèles (cf. figure 3.9). Ainsi, deux points qui ont la même

[10] A ne pas confondre avec le nord magnétique. L'angle entre le Nord magnétique et le Nord géographique s'appelle déclinaison magnétique.

latitude n'ont pas forcément la même ordonnée et deux points qui ont la même longitude n'ont pas forcément la même abscisse.

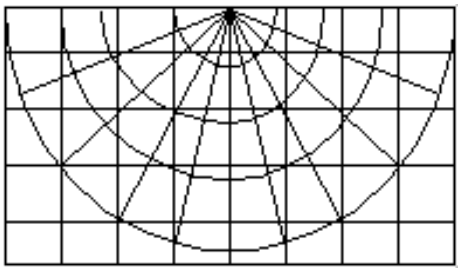


Figure 3.9. Représentation graphique de la convergence des méridiens (source IGN).

Il existe de nombreuses projections. La projection cylindrique est obtenue à partir d'un cylindre tangent ou sécant au modèle de la terre (figure 3.10).

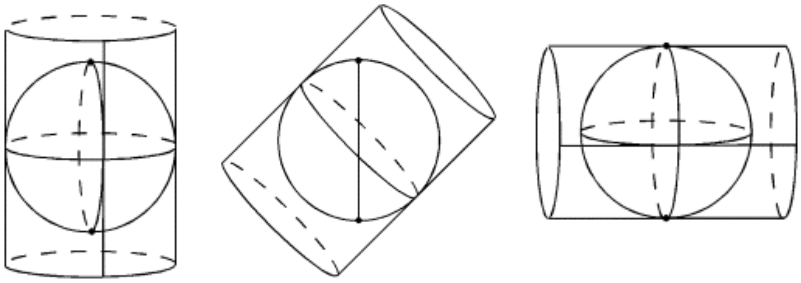


Figure 3.10. Représentations cylindriques directe, oblique et transverse.

Pour une projection conique comme le Lambert et le Lambert93, la surface de projection est un cône tangent ou sécant (figure 3.11).

Figure 3.11. Représentations coniques directes tangente et sécante.

La projection réglementaire en France associée à la NTF est une conique conforme et tangente. Dans le but de minimiser les déformations, la France a été découpée en 4 zones (figure 3.12). Une projection appelée "Lambert II étendu" couvre la France entière pour des besoins d'amplitude nationale.

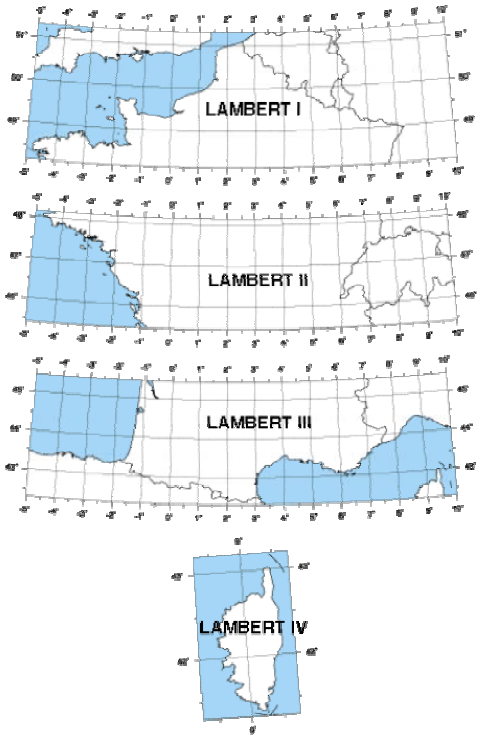


Figure 3.12. Projections Lambert NTF (source IGN).

Une projection conique conforme sécante appelée "Lambert-93" a été retenue en sept. 1996 pour une utilisation cartographique du nouveau système géodésique français, le RGF 93.

3.5 Transformation de coordonnées

Le changement de système de coordonnées est un problème délicat pour lequel il faut être vigilent pour ne pas obtenir des résultats grossièrement erronés, le décalage pouvant atteindre plusieurs mètres. Par exemple, dans le cadre du projet ARCOS, une carte précise du circuit de Satory (Yvelines) a été réalisée par des géomètres en Lambert I. Il a été constaté par nos collègues du LCPC que la carte présentait un décalage de l'ordre du mètre dans le NTF. En outre, l'utilisation des paramètres standard de la projection Lambert I pour convertir des positions GPS ajoutait à cet endroit un décalage supplémentaire de l'ordre de 1,5 mètre. Cet offset peut être compensé grâce à l'utilisation de la grille de projection fournie par l'IGN (et intégrée au logiciel Circé 2000 accessible gratuitement sur le site web de l'IGN).

L'utilisation systématique du RGF 93 permet d'éviter de tels problèmes. C'est le choix que nous avons fait dans le projet MobiVip.

4 INFORMATION GEOGRAPHIQUE

4.1 Systèmes d'information géographique

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont issus des systèmes de gestion de bases de données (SGBD) et permettent de manipuler des bases de données numériques dans lesquelles les informations sont localisées géographiquement. Ils permettent le stockage, l'interrogation, la manipulation, le partage, la diffusion et la restitution à l'écran, sur des cartes ou des plans, d'informations à composantes géographiques, telles que des parcelles, des rues ou des fleuves. On peut désigner un SIG comme un outil d'intégration et d'aide à la décision précieux pour un utilisateur désirant gérer et analyser des données géographiques.

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

L'évolution des performances des SIG est impressionnante. Par exemple, le navigateur d'information géographique *Google Earth* gratuit et disponible sur Internet depuis le printemps 2005 illustre pleinement les fonctionnalités de lecture et d'affichage de l'information géographique (figure 3.13). Grâce à une fonctionnalité de *streaming* sur Internet, les données sont téléchargées au fur et à mesure des besoins de l'utilisateur.

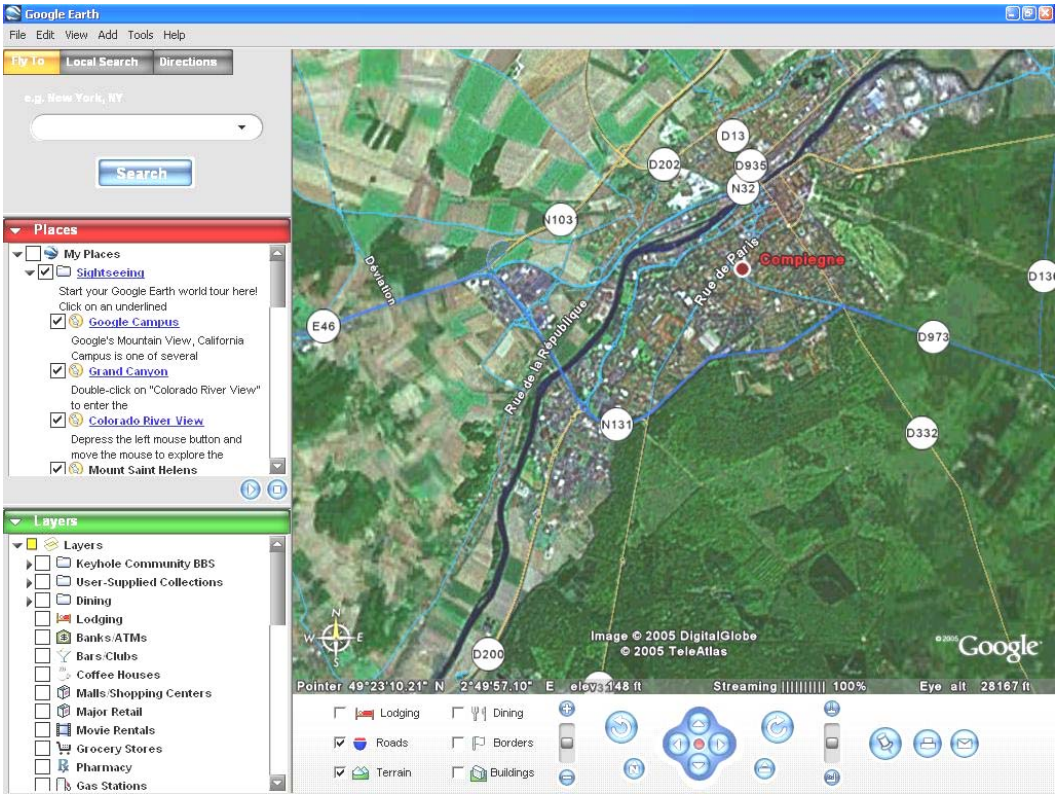


Figure 3.13. Aperçu de l'interface du navigateur d'information géographique Google Earth.

4.2 Représentation de l'information géographique

On peut définir l'information géographique comme une schématisation numérique du monde réel. Elle donne une description d'objets et de phénomènes géo-référencés dans un repère géodésique global ou dans un repère local associé à une projection. L'utilisation de coordonnées en projection plane simplifie la visualisation et les calculs.

Les sources d'information géographique et le géo-référencement des données sont très variables. On peut par exemple numériser des cartes existantes, utiliser le cadastre, des photographies aériennes ou des relevés GPS. Le géo-référencement quant à lui peut être défini comme une adresse, un code postal, un nom de place ou de ville ou encore des coordonnées géographiques ou projetées.

L'information géographique est par nature vectorielle mais on lui superpose assez souvent des images aériennes ou des cartes numérisées lors de la visualisation comme sur la figure 3.13. Ces images sont appelées *raster.* Pour *caler* un raster, on identifie au moins trois points sur l'image et on leur associe leurs coordonnées terrain.

Les SIG travaillent de façon privilégiée en mode vectoriel dans lequel l'information est décrite de façon schématique par des points, des traits ou des éléments géométriques complexes (cercles, ellipsoïdes, clothoïdes, etc.). Ce mode permet de disposer d'un accès direct à des objets complexes comme par exemple une route ou une parcelle de terrain et de les manipuler dans leur ensemble. Les primitives géométriques de base que l'on trouve actuellement couramment dans les SIG sont les points, les polylignes (arcs) et les polygones (surfaces fermées).

4.3 Les composantes de l'information géographique

L'information géographique est de nature géométrique, descriptive, topologique, ou graphique. Elle permet de répondre à des questions comme : quelle est la longueur de tel tronçon de route, la surface de tel champ, la position de telle école, etc. Elle réunit l'ensemble des éléments utiles à la description de la forme et à sa localisation. Elle s'appuie sur des objets géométriques élémentaires ; les pixels en mode raster, point, polyligne ou polygone en mode vecteur. A l'origine, le souhait d'intégrer cette composante dans les systèmes de gestion de base de données (SGBD) contribua à l'apparition des SIG.

L'information descriptive ou sémantique ou encore attributaire a pour objet la description de l'information géographique. Elle permet de répondre a des questions comme : quel est le nombre de voies de tel tronçon de route ? Quelle est la nature des cultures de tel champ ? C'est une information textuelle, qualitative ou quantitative, classiquement administrée par les systèmes de gestion de base de données.

L'information topologique permet de répondre à des questions du type : quel est le plus court chemin entre deux points ? Quels sont les affluents de tel fleuve ? C'est une information relative aux liens entre objets.

L'information graphique définit l'affichage des objets (épaisseur de trait, couleur, symbole, image, etc.). L'utilisateur choisit comme bon lui semble la valeur des attributs de

l'information graphique mais il s'agit de représenter le monde avec pour seule contrainte de rechercher la meilleure lisibilité alliée à une certaine esthétique. Par exemple, on peut choisir comme primitive graphique d'un cours d'eau une spline mieux adaptée avec ses courbes qu'une polyligne anguleuse.

4.4 Cartes routières numériques et bases de données navigables

4.4.1 Présentation

Une carte routière numérique est la représentation vectorielle numérique d'une carte décrivant en premier lieu la topologie du réseau routier et, dans une moindre mesure, la géométrie. L'intérêt premier d'une carte est de se déplacer dans un endroit inconnu.

La figure 3.14 donne un rendu graphique d'une carte NavTeQ : les routes sont dessinées suivant une *charte graphique* dans laquelle les routes importantes sont en trait épais. A la base, c'est un outil de planification de chemin pour rejoindre un lieu A à un lieu B. Un système de navigation pour automobile propose cette fonctionnalité en supportant, en plus, la fonctionnalité de localisation sur carte en temps réel (*map-matching*). C'est pour cette étape que l'information géométrique est cruciale. La composante sémantique n'a cessé de prendre de l'ampleur en venant enrichir la carte d'informations diverses comme les noms de rues, les sens de parcours, les péages, les radars fixes, des points d'intérêt (stations services, restaurants, informations touristiques) etc (cf. table 3.1). Si l'on ajoute à cet ensemble des fonctionnalités graphiques performantes et un système de synthèse vocale, on obtient ce que l'on appelle une *base de données navigable*.

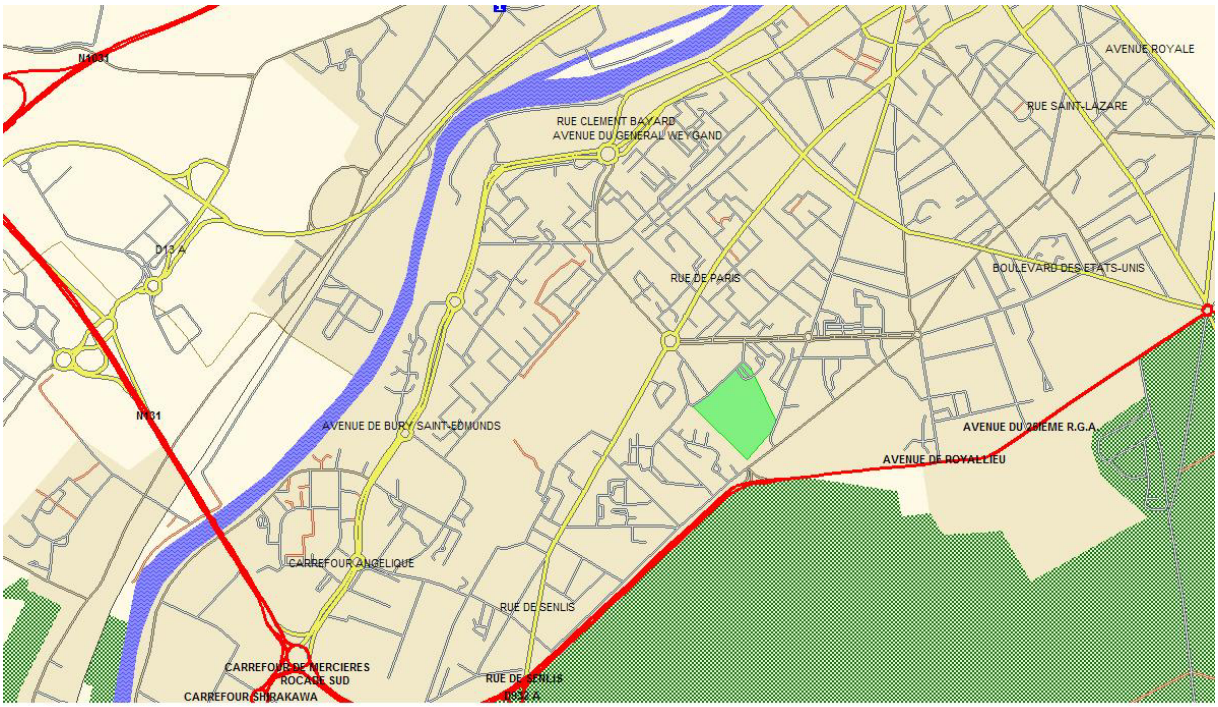


Figure 3.14. Une visualisation de la cartographie NavTeQ de Compiègne avec un visionneur développé avec le kit de développement de la société Benomad.

Bases de données navigables standard en 2005
Géométrie du réseau routier : précision absolue = 15m, relative = 3m Classification fonctionnelle des voies : 5 niveaux destinés aux algorithmes de calcul d'itinéraire. Restrictions d'accès (sauf PL) : auto, bus, taxi, urgences, livraisons, riverains, piétons. Restrictions de manœuvre VL : sens uniques, interdictions de tourner, terre-pleins, barrières. Identifiants géographiques d'information trafic : localisants des tables TMC Alert C. Identifiants administratifs et postaux : hiérarchie administrative complète Géométrie de l'occupation du sol : voies ferrées, hydrographie, limite d'agglomération,… Points d'intérêt : localisation de services répartis en 44 catégories.

Table 3.1. Contenu des bases de données standard.

Touché par le succès des systèmes de navigation, le développement et l'utilisation des bases de données navigables ont connu une évolution fulgurante ces dernières années. De nombreux projets de recherche ont eu lieu récemment pour améliorer et enrichir leur contenu. Par exemple, le projet européen NextMAP et le projet français ARCOS (thème 3, tâche 1) ont chercher à définir, tester et évaluer le contenu des bases de données géographiques nécessaires à des applications automobiles futures, en particulier celles d'assistance au conducteur. Le résultat des attributs préconisés pour les 4 fonctions ARCOS est décrit dans la table 3.2. Ces bases de données enrichies ouvrent de nouvelles perspectives pour toutes les applications automobiles futures utilisant des données géographiques.

Base de données navigable enrichie proposée pour les fonctions ARCOS
Base standard + Géométrie plus précise des routes (précision absolue = 5m, relative = 1m). Nouvelles signalisations verticales. Signalisation horizontale partielle (nombre de voies et largeurs de voies). Nature des bords de voie. Pente. Dévers. Courbure.

Table 3.2. Enrichissements proposés par la tâche T3.1 du projet ARCOS.

Les bases de données navigables sont des bases de données vectorielles dans lesquelles les routes sont modélisées en 2D par des points correspondant au centre de la chaussée (voir figure 3.15). Les points d'intersection ou jonctions sont appelés *nœuds* (représentés par des carrés). Les points intermédiaires ou points de passage (représentés par des ronds) sont utilisés pour mieux modéliser les routes courbes. Plus il y a des points intermédiaires, plus une route courbe est modélisée fidèlement.

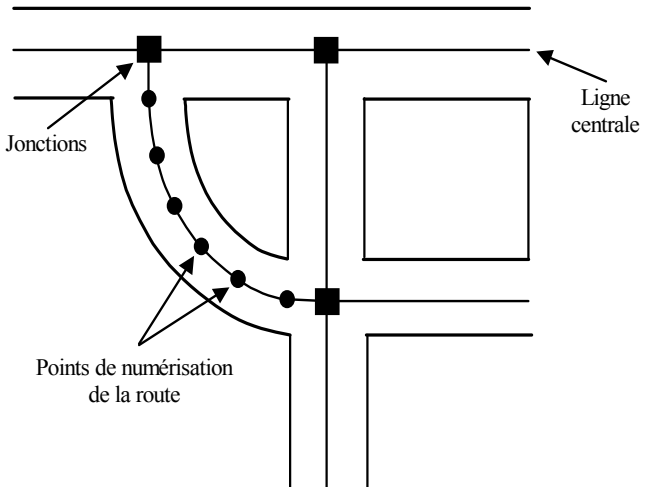


Figure 3.15. Représentation des routes par leurs lignes centrales.

Les bases de données routières numériques existantes ont une précision absolue d'environ 10 mètres dans les zones urbaines et d'environ 25 mètres ailleurs. La précision relative est généralement bien meilleure et peut être métrique. La précision absolue se définit comme l'écart existant entre les coordonnées estimées d'un point et sa position réelle dans un repère géodésique. La précision relative correspond à l'erreur de distance mesurée entre deux points proches. Il est important de noter que pour des raisons de gain de place, les coordonnées ont une résolution limitée souvent au mètre. Par exemple, dans les bases NavTeQ, les points ont des coordonnées géographiques en WGS 84 (longitude et latitude) avec un nombre limité de chiffres après la virgule induisant une erreur d'arrondi maximum de 50 cm sous nos latitudes. Pour cette raison, dans les bases NavTeQ, les points sont espacés d'au moins 3 mètres.

Par ailleurs et encore pour des raisons d'espace mémoire, tous les détails des routes ne sont pas cartographiés. Par exemple, de petits ronds-points seront modélisés par des nœuds et certaines bretelles d'accès seront volontairement omises. On constate donc qu'une carte routière décrit de façon approximative la géométrie du réseau routier. Si on rajoute à cela le fait que les sources d'information sont très diverses avec des précisions assez variables, la carte constitue réellement une vue déformée et simplifiée de la réalité. Cette remarque est à l'origine des travaux de la thèse de Maan El Badaoui El Najjar soutenue en décembre 2003. Les résultats de ces travaux seront présentés dans le paragraphe 5 du chapitre 4.

4.4.2 Le format GDF

Le format GDF (*Geographic Data Files*) est un standard Européen utilisé pour décrire et transférer des données de réseaux routiers avec les attributs associés. Il a été développé dans le projet EDRM (*European Digital Road Map*) principalement pour les systèmes de navigation automobile. GDF est plus qu'un format d'échange car il décrit comment les données doivent être décrites et acquises et comment les attributs doivent être renseignés. Les deux principaux fournisseurs, NavTeQ et TeleAtlas, peuvent fournir des bases de données navigables dans ce format. Un fichier GDF n'est jamais utilisé tel quel pour naviguer. Il doit d'abord être converti dans un format binaire plus compressé et optimisé pour l'application considérée.

Un utilisateur de base de données doit préciser ses besoins en termes

- de thèmes de données (routes, voies navigables, zones administratives, ponts, tunnels, transports public etc.)
- d'attributs
- de précision
- d'age
- de complétude.

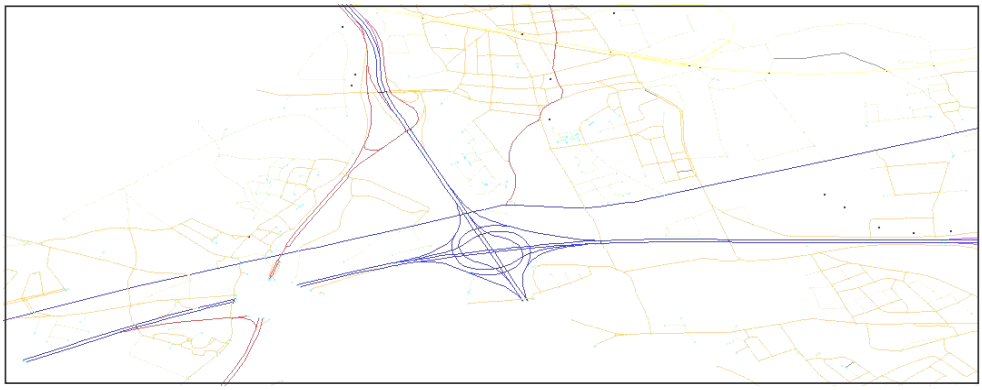


Figure 3.16. Rendu graphique de l'aéroport de Bruxelles au format GDF.

5 EXEMPLES DE SIG POUR LA NAVIGATION

Il existe de nombreux SIG pour la navigation déjà commercialisés et accessibles dorénavant au grand public à des prix raisonnables par l'intermédiaire, par exemple, d'un GPS associé à un assistant personnel doté d'un SIG. Nous allons nous intéresser dans ce paragraphe à trois exemples de systèmes multicapteurs utilisés et développés dans les projets SAACAM, ARCOS et MobiVip.

5.1 Système utilisé dans le projet SAACAM

Ce système a été développé pour accéder à la géométrie d'une carte IGN *Géoroute* précise et étudier des méthodes de localisation sur carte. Il a ensuite été utilisé pour implémenter une méthode de conseil de vitesse excessive par durcissement de la pédale d'accélérateur en cas de dépassement de la vitesse limite enregistrée dans la base comme nouvel attribut.

Avec une base de données importante (notamment avec de nombreux attributs ADAS), une architecture mono-machine n'est pas adaptée. Il est certainement opportun de déporter le système d'information géographique sur un calculateur dédié. Dans ce cadre, l'utilisation d'un intergiciel (*middleware*) comme *SCOOT-R*[11] est bien appropriée. En effet, *SCOOT-R* permet l'échange temps-réel d'objets entre des processus s'exécutant sur des calculateurs reliés par un réseau selon un modèle client-serveur en respectant les échéances temporelles de annoncées par les différents composants.

[11] Serveur-client Orienté Objet et Temps-Réel développé par Paul Crubillé au laboratoire Heudiasyc.

SCOOT-R comprend un ensemble de protocoles mis en oeuvre au travers d'une API[12] orientée objet pour des systèmes temps-réel constitués par l'interconnexion de plusieurs calculateurs. Chaque calculateur peut supporter plusieurs capteurs ou plusieurs logiciels. Pour pouvoir communiquer entre les différentes composantes (un capteur ou un logiciel), chaque composant doit le faire suivant le modèle *SCOOT-R* en respectant des échéances temporelles. Par exemple, si un capteur S1 fournit des données, pour qu'un client C1 accède aux données de S1, un serveur doit-être associé au capteur S1. *SCOOT-R* véhicule les requêtes du client et retourne les données du serveur en surveillant le processus d'échange.

Le moteur cartographique a été développé sur la base du logiciel Géoconcept version 5 à l'aide du kit de développement C++ fourni par la société. La base de données est au format binaire Géoconcept. Le réseau routier appartient à une classe appelée « tronçon_route » et l'attribut « vitesse limite » a été rajouté à cette classe (cf. figure 3.17). On peut noter qu'un deuxième attribut a été rajouté : il s'agit de la largeur de la chaussée utile pour la localisation sur carte.

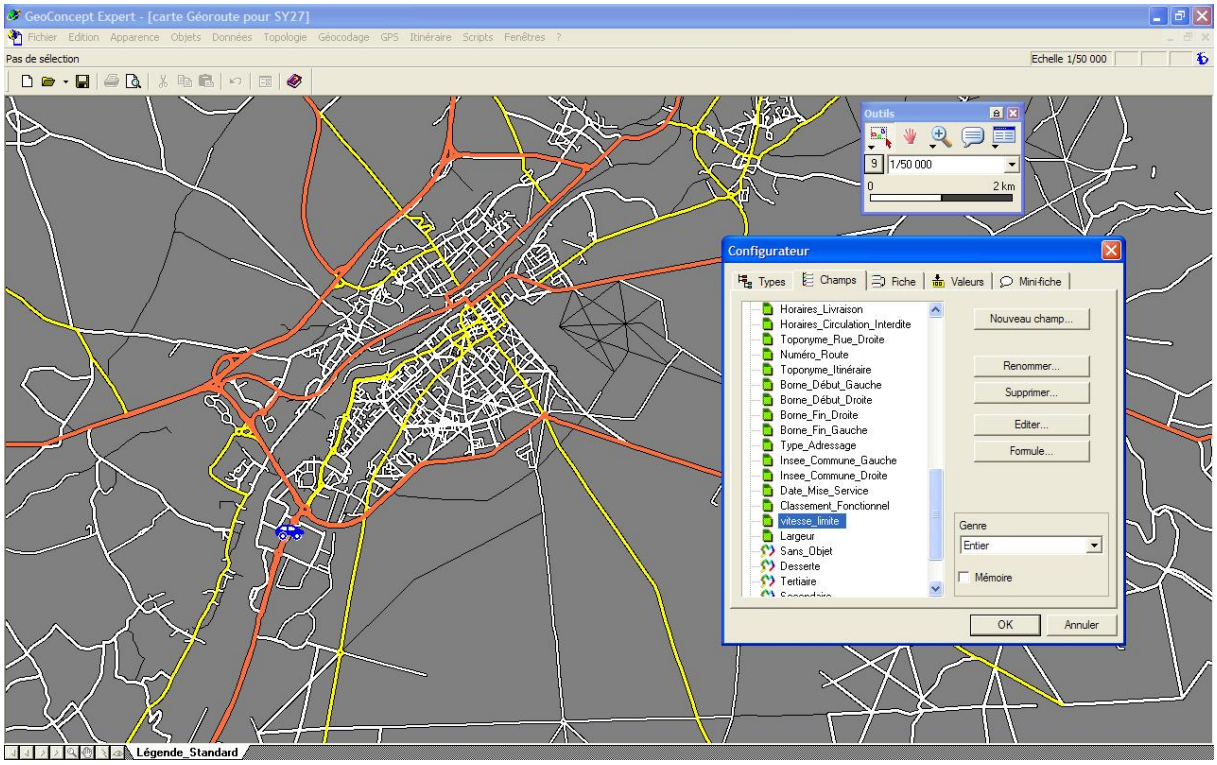


Figure 3.17. Interface du logiciel Géconcept avec la carte Géoroute. Le configurateur montre l'attribut « vitesse_limite » rajoutée dans la base de données.

L'architecture temps réel du système de localisation utilisant la cartographie routière et utilisant deux PC est illustrée sur la figure 3.18.

[12] Application Programming Interface

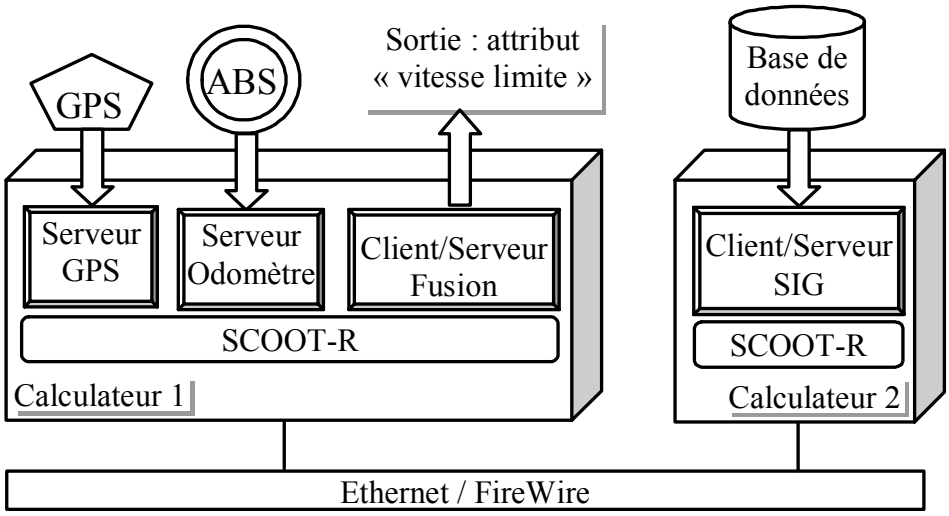


Figure 3.18. Architecture distribuée du système de localisation du projet SAACAM.

- Serveur GPS : ce serveur a pour rôle de récupérer les trames de données provenant d'un récepteur GPS à travers un port série (GGA, VTG et GST). La trame GGA contient le temps, la latitude, la longitude, l'altitude, le nombre de satellites vus par le récepteur GPS et aussi d'autres paramètres. La trame GST contient le temps et les paramètres caractérisant l'ellipse d'erreur du récepteur GPS. La trame VTG, quant à elle, contient le temps et la vitesse. Ce serveur comprend deux activités (*threads*) qui coopèrent ensemble afin d'assurer le traitement souhaité tout en diminuant le temps de traitement.
- Serveur ABS : ce serveur récupère, à travers une carte d'acquisition, les impulsions générées par les capteurs ABS pour calculer les déplacements et les rotations élémentaires ainsi que la vitesse moyenne du véhicule.
- Client/Serveur SIG : le client/serveur SIG utilise le moteur cartographique de Géoconcept qui manipule la base de données navigable. Ce programme est à la fois client et serveur : il est client quand il reçoit la position estimée autour de laquelle il doit présélectionner les routes les plus proches et il est serveur quand il fournit le tableau des routes les plus proches avec les attributs associés. Ce tableau de données en assimilable à une mémoire cache.
- Client/Serveur Fusion : c'est dans ce composant que s'effectuent la localisation sur carte et l'extraction d'attribut.

Une maquette de cette architecture a été développée avec un récepteur GPS émettant des trames à 1 Hz et deux PC équipés de Pentium III. A l'époque (en 2000), le réseau utilisé était de l'Ethernet 100 Mbits/s mais, avec les nouveaux développements faits au laboratoire lors du projet ROADSENSE, il est préférable d'utiliser une version pour un réseau FireWire car elle est plus déterministe. En outre, avec des processeurs plus modernes et des traitements améliorés depuis, le système fonctionne maintenant à 5 Hz.

5.2 Système utilisé dans le projet ARCOS

Le système utilisé dans le projet ARCOS pour les applications d'aide à la conduite s'appuyait sur l'environnement ADAS-RP (version 3.8) développé par la société NavTeQ. C'est un outil très performant utilisé couramment par les constructeurs automobiles pour prototyper des applications mettant en œuvre de la cartographie routière. Il se veut assez ouvert pour accéder à la géométrie et aux attributs d'une base de données. Il offre les fonctionnalités de calcul d'itinéraire et d'*horizon électronique* et utilise une boite de capteur (*sensor box*) comprenant un GPS naturel, une entrée odomètre et un gyromètre vibrant. Un microcontrôleur met en forme les données et les transmet à 10 Hz sur une liaison série à un PC sous Windows supportant ADAS-RP. L'horizon électronique consiste à extraire la géométrie et les attributs associés de tous les chemins possibles que peut prendre le véhicule selon des critères de temps et de distance minimums. Si l'un des chemins de l'horizon électronique est inférieur à la distance minimale choisie ou bien s'il est inférieur à la distance parcourue par le véhicule pendant l'horizon de temps choisi en supposant la vitesse constante, l'horizon électronique n'est plus valide et il est remis à jour.

La structure d'ADAS-RP est illustrée sur la figure 3.19.

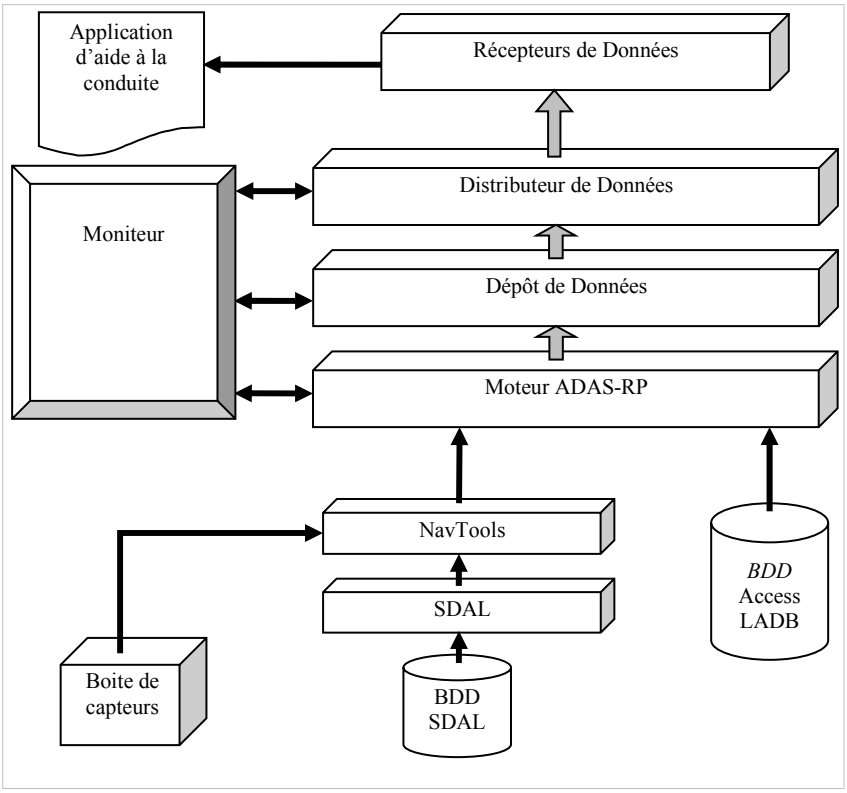


Figure 3.19. Structure d'ADAS-RP V3.8.

Les données sont stockées dans deux bases. La première est au format SDAL de NavTeQ et contient les informations standard des bases commercialisées par la société NavTeQ. La deuxième est une base de données au format Microsoft Access appelée LADB (*Look Aside Data Base*). Sur des pistes de test, ces bases sont fournies par NavTeQ et décrivent avec plus de précision la géométrie (il y a plus de point intermédiaires) et contiennent plus d'attributs qu'une base de données SDAL standard.

Le composant *SDAL* de la figure 3.19 permet d'accéder aux informations de la base de données (BDD) au format SDAL. Les composants *NavTools* prend en charge le positionnement sur la carte, le calcul d'itinéraires et l'affichage graphique. Le *moteur* détermine l'horizon électronique en utilisant en outre la LADB. L'horizon électronique est ensuite placé dans un espace mémoire appelé *dépôt de données*. Le dépôt de données contient *n* horizons électroniques. Notons qu'il contient en plus, les positions du véhicule et les données correspondantes des capteurs. Le *distributeur de données* a pour rôle d'informer des récepteurs de données au préalablement inscrits dès qu'une nouvelle information est disponible. Le *moniteur* permet de synthétiser une interface graphique qui sert à l'utilisateur pour configurer les paramètres de fonctionnement des différents composants et afficher la position du véhicule avec son horizon électronique. Enfin, les *récepteurs de données* sont des composants créés par l'utilisateur pour récupérer les données pour réaliser l'application d'aide à la conduite.

L'architecture d'ADASP-RP est mono-calculateur, orientée objet et flot de données. La communication entre les composants n'est pas à temps de réponse garantie mais suit le paradigme du meilleur effort (*Best effort*). Lors du stage d'ingénieur de Zaher Malak (printemps 2004) nous avons étudié le temps de calcul d'un horizon électronique avec ADAS-RP (dans les conditions suivantes : ordinateur IBM avec 512 Mo de mémoire RAM et un processeur Celeron 1.7 GHz, LADB correspondant au circuit de test de Satory d'ARCOS).

Les résultats sont illustrés dans la table 3.3.

Horizon		Temps mini (ms)	Temps maxi (ms)	Temps moyen (ms)
1500 m	Sans LADB	5	331	76
	Avec LADB	6	1159	93
750 m	Sans LADB	6	233	35
	Avec LADB	6	967	46
300 m	Sans LADB	5	132	20
	Avec LADB	5	985	40

Table 3.3. Analyse du temps de latence d'ADAS-RP avec et sans LADB et en fonction de la distance de l'horizon électronique (EH).

Il faut noter que l'horizon électronique n'est mis a jour que s'il ne respecte plus la distance minimale pour la position actuelle du véhicule. C'est pour cette raison qu'on observe des temps de latence très faibles (i.e 5 ms) : l'horizon électronique est toujours valide en on y accède directement. Si un horizon électronique n'est plus valide, il faut récupérer de nouveaux segments de la base de données SDAL pour le mettre à jour.

On constate que la LADB rajoute des latences importantes (de l'ordre de la seconde). Le temps de latence quant à lui est très variable dans un intervalle dont les bornes sont difficiles à définir et dépendantes de la longueur de l'horizon. On remarque que le temps de latence moyen n'est pas très affecté par l'utilisation de la LADB (augmentation de 1.5 environ). Mais si on considère la latence maximale, l'utilisation de la LADB est très pénalisante car elle peut atteindre 10 fois la latence sans LADB. Une telle variation de latence (*jitter*) est révélatrice d'un mauvais comportement temps réel mais ceci n'a pas semblé affecter le fonctionnement des fonctions prototypées dans le projet ARCOS.

On peut conclure qu'ADAS-RP constitue un très bon SIG pour le prototypage rapide d'assistance à la conduite, ses qualités principales étant une mise en œuvre assez facile et une grande modularité tout en conservant la confidentialité des Navtools. Les défauts majeurs de la version 3.8 étaient un fonctionnement temps-réel passable, une faible cadence, l'impossibilité de remplacer un Navtool (comme celui de la localisation sur carte par exemple) et le fait de faire appel aux services de la société NavTeQ pour la création des LADB. Il semble que la nouvelle version apporte des améliorations intéressantes concernant les deux derniers points.

5.3 Système en cours de développement dans le projet MobiVip

Dans le projet MobiVip, l'information géographique joue un rôle important, notamment pour la gestion et l'accès aux VIP par un serveur d'information. Le *lot*[13] qui concerne la localisation dynamique porte sur la navigation et le guidage autonome de petits véhicules électrique (des Cycabs cf. figure 3.1) en milieu urbain. Une solution de guidage prometteuse réside dans de la commande référencée vision utilisant des amers naturels. Une étape a été franchie récemment, démontrant ainsi la faisabilité d'une telle approche. En effet, une démonstration grandeur nature de pilotage d'un Cycab a été présentée à plusieurs reprises dans le cadre du projet MobiVip par des chercheurs du LASMEA.

Si on se limite aux fonctionnalités de navigation et de guidage, un SIG est essentiel et ce pour les raisons suivantes :

- Planifier l'itinéraire d'une mission grâce à une base de données navigable,
- Gérer les amers,
- Superviser la mission d'un VIP.

Dans le projet MobiVip, les développements du SIG se font à l'aide d'un kit de développement en C++ commercialisé par la société BeNomad partenaire du projet.

Dans la suite de ce paragraphe, présentons ce kit de développement et voyons comment il est utilisé dans le projet.

5.3.1 Kit de développement

Le kit informatique de développement (*SDK – Software Development Kit*) est un ensemble de librairies et structures de données, orienté objet, pour créer des applications à vocation nomade utilisant de l'information géographique sur des assistants personnels (*PDA*) fonctionnant sous Windows ou linux. Pour manipuler de l'information géographique avec des calculateurs ayant une basse puissance informatique et un accès réseau limité, un format de données compressé appelé *SVS* (*Scalable Vector Storage*) a été conçu et breveté par la société BeNomad. Grâce à ce format, la base de données peut être téléchargée par morceaux, chaque morceau étant un SVS. L'ensemble des SVS d'une zone géographique est vu comme une base de données unique par l'utilisateur. Les objets géométriques qui composent les fichiers SVS sont de type ouvert (polylignes), fermé (polygones) ou ponctuel.

[13] Ce que l'on appellerait un *workpackage* dans un projet PCRD.

La version 1.4 du SDK propose quatre modules, chaque module formant un ensemble de classes :

- **Géocodage** (*Geocoding*) contenant les classes de localisation donnant la position à partir d'une description textuelle du lieu (adresse postale par exemple) et vice-versa.
- **Affichage** (*Rendering*) permet de visualiser une cartographie interactive avec des éléments dynamiques.
- **Gestion de flotte** (*Fleet Management*) permet d'exploiter différents types d'éléments dynamiques comme les positions, les trajets ou historiques et gérer un parc de véhicules (zonage géographique pour les services d'alerte et de supervision, gestion des états des véhicules comme arrêtés, en livraison, etc.).
- **Calculs d'itinéraires** (*Routing*) contenant les classes permettant de calculer un chemin optimal entre positions appartenant au réseau routier de la carte, avec éventuellement des points de passage. Ce module fournit en outre un rendu graphique et textuel de la feuille de route.

5.3.2 Planification d'itinéraire

Pour un VIP, la planification de l'itinéraire est produite à partir de la destination saisie par l'utilisateur du véhicule. C'est un cas particulier du calcul d'itinéraire dans lequel le point de départ est la position courante du véhicule. Un SIG est un composant essentiel pour réaliser l'Interface Homme Machine (IHM) via une interface graphique adaptée et accessible depuis un écran tactile ou via un PDA relié au VIP par réseau sans fils par exemple.

La fonctionnalité de planification d'itinéraire utilise donc les modules *géocoding* et *routing* du kit de développement et une base de données navigable. En sortie, on obtient un ensemble de tronçons de route compatibles avec le véhicule utilisé (respectant notamment le code de la route) et triés suivant l'ordre de parcours.

5.3.3 Gestion des amers

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.2 à la page 36, les amers naturels visuels sont sources d'un volume de données gigantesque compte tenu du fait qu'ils contiennent des images ou morceaux d'image. Puisqu'ils décrivent de l'information géographique, il est naturel de les géoréférencer dans une base de données, suite à une phase d'apprentissage, afin de les extraire pendant les phases de navigation pour les besoins de guidage du véhicule.

L'information géographique des fonctions de navigation et guidage présente plusieurs facettes que l'on présente sous forme de couches. Dans la figure 3.20, la couche supérieure contient les routes et les informations associées pour la navigation et le calcul d'itinéraire. La couche intermédiaire ou couche cadastrale décrit de façon enrichie le milieu d'évolution et enfin, la couche du bas contient les amers naturels nécessaires au guidage du véhicule. Cette dernière couche est également appelée *mémoire visuelle*. Cette décomposition n'est pas exhaustive. Par exemple, certains de nos collègues[14] imaginent utiliser des bases de données vectorielles 3D du paysage urbain, ce qui, en théorie, éviterait la phase d'apprentissage.

[14] Equipe Maia du LORIA de Nancy.

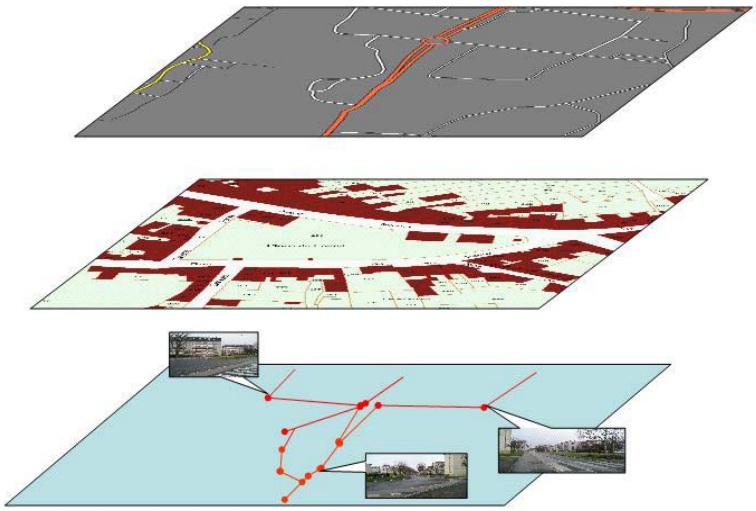


Figure 3.20. Couches d'information géographique.

La gestion d'amers naturels est une problématique nouvelle pour les SIG. La difficulté principale consiste à trouver des stratégies et méthodes adaptées aux types d'amers considérés pour leur géoréférencement (phase d'apprentissage) et leur extraction (phase de navigation).

Concernant les amers visuels avec des points caractéristiques 3D (cf. paragraphe 2.2.1 page 37), une stratégie a été étudiée, prototypée[15] et a fait l'objet d'une démonstration à Nancy le 17 juin 2005 lors de l'évaluation à mi-parcours du projet MobiVip. Lors de la phase d'apprentissage, les amers sont regroupés en cartes locales correspondant à un tronçon de route et à un sens de parcours (cf. figure 3.21). Pour ce faire, les images, datées à l'acquisition, sont géoréférencées en absolu grâce à un positionnement GPS hybridé (odomètre et gyromètre) puis localisées (*matchées*) sur le réseau routier. D'un point de vue informatique, les images clés sont placées dans un répertoire commun et chaque carte locale est un répertoire qui contient les identifiants des images clés, les points caractéristiques et leurs mises en correspondance.

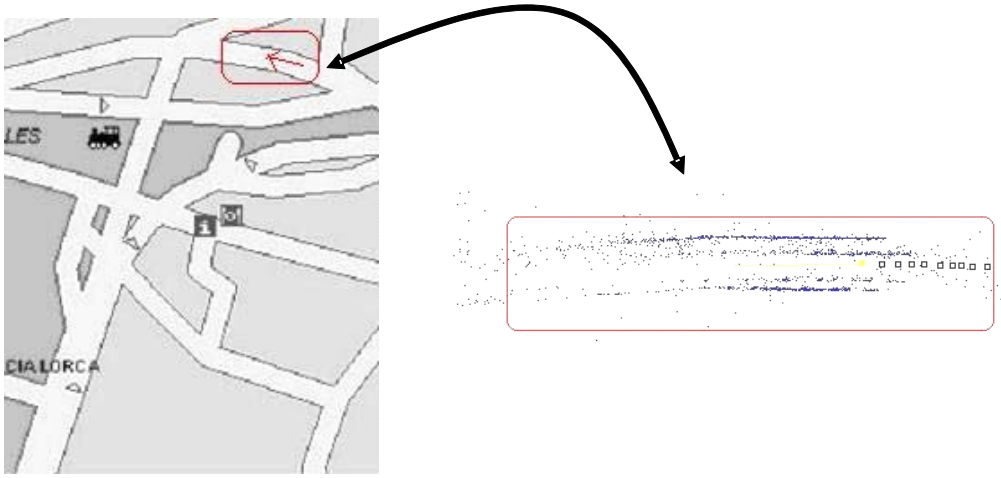


Figure 3.21. Exemple d'association d'une carte locale à une route.

[15] Stage ingénieur de Nicole Chalhoub (mars-juillet 2005).

Lors de la phase de navigation, la position courante absolue est estimée par un positionnement GPS hybridé, puis matchée sur la carte ce qui permet d'identifier la carte locale. A l'entrée d'un nouveau tronçon, l'idée est de charger en mémoire la carte locale pour que le VIP assure le contrôle de son déplacement par vision[16]. L'image clé la plus proche peut être identifiée grâce à l'estimation de la position absolue ou bien par une recherche locale grâce aux points caractéristiques [Royer et al, 04].

5.3.4 Supervision de mission

Une troisième utilité d'un SIG pour la navigation autonome réside dans la fonction de supervision d'une mission. Cette supervision peut être réalisée localement ou par un système distant (appelé *serveur d'information* dans le projet). La supervision locale vise à accroître la sûreté de fonctionnement et la supervision distante la gestion de la flotte de véhicules.

Pour assurer ces fonctions de supervision, la localisation absolue sur la carte routière est l'élément crucial. Premièrement, elle est indispensable à l'initialisation des fonctions de Commande Référencée Vision (CRV) et, deuxièmement, elle peut être mise à profit pour vérifier que la tâche de contrôle du mouvement est stable, soit en étudiant la cohérence entre la trajectoire du mobile et la carte, soit en vérifiant que les images clés utilisées par la CRV sont compatibles avec le positionnement absolu estimé.

5.3.5 Parties embarquées et débarquées du SIG

Le SIG du projet MobiVip fait clairement ressortir des parties embarquées et des parties débarquées souvent avec des contraintes de temps réel.

Les parties débarquées concernent

- la phase d'apprentissage pour le géoréférencement des amers et la constitution de la base de données embarquée,
- le serveur d'information pour la gestion de la flotte et les services aux voyageurs.

En effet, il semble a priori difficile que le VIP procède lui-même à la phase d'apprentissage compte tenu du fait que cette dernière est très consommatrice de puissance de calcul. En outre, une mémoire visuelle créée par un VIP peut être mutualisée à d'autres véhicules.

Les parties embarquées dans le VIP servent

- au calcul de l'itinéraire,
- à l'extraction d'amers,
- à la supervision locale.

Ces deux dernières tâches sont celles qui présentent les exigences de temps réel les plus élevées.

[16] Il semblerait que l'on s'oriente vers une solution dans laquelle le contrôle automatique ne soit que latéral, le contrôle longitudinal pouvant être fait par l'utilisateur par l'intermédiaire d'un joystick par exemple.

6 CONCLUSION

Ce chapitre a mis l'accent sur les amers pour la localisation. Nous avons vu que les amers sont de nature très variée, naturels ou artificiels, statiques ou dynamiques, actifs ou passifs, distinguables ou non, ou encore ponctuels ou complexes. La tendance actuelle est de concevoir des systèmes de localisation utilisant de grandes quantités d'amers naturels. Dans ce cas, la gestion de ces derniers par un SIG est un point essentiel de façon à les géoréférencer et à les extraire lors des phases de navigation.

Par ailleurs, nous avons vu que les systèmes de coordonnées peuvent être locaux ou globaux. Les projections, utiles pour manipuler des cartes 2D, deviennent de plus en plus précises et leur usage tend à se normaliser, comme l'illustre l'utilisation préconisée de la projection Lambert 93 en France associée au RGF. Les systèmes géodésiques globaux ne cessent d'être de mieux en mieux matérialisés ce qui permet des changements de coordonnées précis.

Les cartes du réseau routier, une fois enrichies d'information attributaire, constituent des bases de données navigables très précieuses pour la planification d'itinéraires et l'extraction d'informations en phase de navigation. De tels attributs peuvent être utilisés pour l'aide à la conduite automobile (projets SAACAM et ARCOS) ou la gestion d'amers naturels pour une localisation précise adaptée à la navigation autonome de VIP (projet MobiVip). Pour accéder à ces attributs, une localisation sur carte est une nécessité. Cette localisation étant contrainte à coller à un modèle déformé de la réalité (les routes sont représentées par des polylignes), elle ne peut être précise et présente donc un caractère macroscopique. Nous présenterons dans le chapitre suivant des méthodes pour se localiser sur carte de façon récurrente.

Enfin, plusieurs SIG navigables utilisant différents fonds de carte et différents moteurs cartographiques ont été présentés. Malgré des fonctionnalités communes comme le géocodage, le calcul d'itinéraire, la localisation sur carte ou encore l'affichage graphique, leurs domaines d'application sont assez différents selon qu'ils s'adressent à l'aide à la conduite ou à la navigation autonome.

Chapitre 4. Localisation hybride.

1 INTRODUCTION

Le chapitre 2 a présenté les principes de base de la radiolocalisation et nous a permis de mettre en évidence les faiblesses d'une solution monotechnologique. Considérons par exemple un système de localisation pour automobile utilisant uniquement un récepteur GPS naturel. Un tel système ne peut pas fournir une disponibilité de 100% même en utilisant les nouveaux récepteurs à haute sensibilité. En effet, une automobile est souvent amenée à traverser des tunnels ou utiliser des routes présentant les caractéristiques d'un canyon, en particulier en milieu urbain. Le deuxième point faible réside au niveau de la précision de la localisation dégradée par les multi-trajets. En effet, comme nous l'avons vu, il faut trouver un compromis entre la précision et la disponibilité : en acceptant d'utiliser des signaux à faible rapport signal sur bruit, correspondant à des satellites bas sur l'horizon et présentant un mauvais GDOP, on dégrade de façon significative le résultat de la localisation. La troisième faiblesse est liée à la sûreté de fonctionnement. Le GPS seul n'est pas intègre car il peut présenter des défaillances non signalées et car, il est, dans sa forme actuelle, très sensible aux brouillages. Enfin, un système GPS présente de mauvaises caractéristiques dynamiques au niveau du cadencement (du Hz ou à quelques Hz) et de la latence. La disponibilité a été ces dernières années la problématique mise en avant par les constructeurs et équipementiers automobiles essentiellement pour la fonction de navigation, assez peu exigeante en termes de précision et de dynamique. Alors qu'elle a été peu considérée, l'intégrité du positionnement devient un point essentiel pour la conception d'assistances à la conduite.

Pour accroître la disponibilité, la précision, l'intégrité ou encore la dynamique, il ressort le besoin d'une solution de localisation multi-capteurs ou multi-sources d'information qui sera appelé par la suite *localisation hybride*. L'objet de ce chapitre est d'en étudier les caractéristiques et de présenter quelques méthodologies permettant d'aborder ce problème.

Par ailleurs, il faut noter qu'il existe d'ors et déjà dans les véhicules modernes de nombreuses sources d'information qui peuvent être mises à profit pour la localisation grâce à la mise en réseau (appelé *multiplexage* dans le monde automobile) des différents calculateurs du contrôle du moteur et du châssis (ABS, ESP, etc.). Ces capteurs, qualifiés de proprioceptifs, sont utiles pour calculer une localisation à l'estime. Ce sera l'objet du premier paragraphe de ce chapitre.

Dans le paragraphe 3, nous poserons le problème de la localisation dynamique comme un problème d'observation d'état dont le modèle d'évolution s'appuie sur une localisation à l'estime. Les capteurs extéroceptifs interviennent alors dans le modèle d'observation. Après avoir posé le problème, nous verrons les approches que j'ai étudiées pour traiter le problème

de l'observation d'état. Elles se déclinent en deux catégories : les approches bayésiennes et ensemblistes. Pour chacune d'elles, nous étudierons la philosophie et les hypothèses mis en jeu.

Le paragraphe 4 sera dédié à l'application des méthodes d'observation d'état au problème de l'hybridation de données GPS avec une localisation à l'estime. Nous y verrons des résultats expérimentaux réalisés avec des données enregistrées avec le véhicule expérimental du laboratoire.

Enfin, dans le 5^{eme} paragraphe, nous discuterons du problème de la localisation sur carte avec des données GPS et proprioceptives. Nous verrons qu'il s'agit d'un problème de fusion de données dynamiques qui peut se mettre sous la forme d'un problème d'observation d'état après avoir appliqué une méthode de sélection de routes. Grâce à la création d'une *observation cartographique*, on peut appliquer les méthologies du paragraphe 3.

2 LA LOCALISATION A L'ESTIME POUR UNE AUTOMOBILE

Il existe dans une automobile moderne plusieurs capteurs utilisables pour la localisation à l'estime même si, à l'origine, ils n'ont pas été installés pour cela. Par exemple, un système ABS utilise des capteurs sur chaque roue pour en mesurer la vitesse de rotation par *tachymétrie impulsionnelle*[17]. Les signaux produits par ces capteurs peuvent être intégrés par un compteur et utilisés ensuite comme des odomètres. Un système de régulation de l'ensemble du comportement dynamique d'un véhicule (ESP) utilise fréquemment un capteur d'angle au volant, un gyromètre de lacet et un accéléromètre transversal. Les données de ces capteurs peuvent être, elles aussi, mutualisées avec un module de localisation.

Du fait de leur caractère *proprioceptif*, ces capteurs peuvent être utilisés pour réaliser une fonction de localisation à l'estime[18]. Pour ce faire, les mesures des capteurs sont intégrées sur la base d'un modèle d'évolution pour estimer la pose courante, en partant d'une pose connue. Une localisation à l'estime possède une bonne dynamique, une intégrité et une continuité de fonctionnement idéale au dépend d'une contrainte d'initialisation et d'une dérive dans le temps et l'espace.

Même s'il existe de nombreuses méthodes de localisation à l'estime 3D (notamment des modèles odométriques 3D comme ceux que j'ai proposés dans ma thèse), on se limite dans la suite de ce paragraphe à des modèles 2D pour localiser une automobile dans un plan.

2.1 Principe

Soit un repère mobile dont l'origine M est située au milieu de l'axe des roues arrière d'un véhicule automobile traditionnel. L'axe x est longitudinal et définit le cap θ comme le montre la figure 4.1.

---

[17] C'est une technique qui utilise un compteur associé à une horloge à haute fréquence pour mesurer la durée entre deux fronts du signal carré délivré par un capteur.

[18] ou localisation inertielle *strapdown* dans le cas qui nous intéresse.

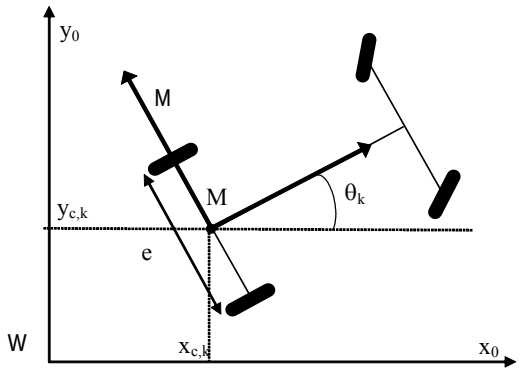


Figure 4.1. Définition d'un repère mobile d'un véhicule.

2.1.1 Odométrie différentielle

L'odométrie consiste à intégrer des rotations élémentaires de roues pour en déduire une estimation de la pose courante en parant d'une pose connue.

Considérons un modèle odométrique classique utilisant les codeurs ABS des roues arrière. Pour la mise en équations, on suppose que la route est parfaitement plane (pas de trou ni de bosse) et parfaitement horizontale (pas de déclivité ni de dévers), les roues ne glissent pas et la voie *e* est constante[19] (cf. figure 4.1).

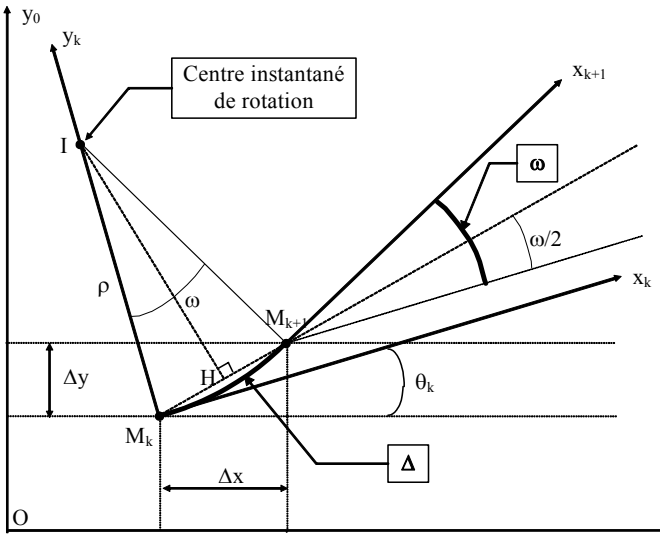


Figure 4.2. Déplacement élémentaire entre deux échantillonnages.

Notons M_k and M_{k+1} deux positions successives. Sur la figure 4.2, nous avons :

$$\Delta = \rho \, . \, \omega \tag{4.1}$$

où Δ est la distance parcourue le long de l'arc de cercle décrit par le point M, ω la rotation élémentaire et ρ le rayon de courbure.

En supposant que la voiture se déplace en marche avant, la variation de position est donnée par :

[19] Ces deux dernières hypothèses supposent une modélisation simplifiée à l'extrême du contact roue/sol et d'autant plus valable si le véhicule considéré est à traction avant

$$\begin{cases} \Delta x_c &= |M_k M_{k+1}|.cos(\theta_k + \omega/2) \\ \Delta y_c &= |M_k M_{k+1}|.cos(\theta_k + \omega/2) \end{cases} \quad (4.2)$$

Puisque $\Delta \approx |M_k M_{k+1}|$ jusqu'à l'ordre 2, le processus d'intégration s'écrit :

$$\begin{cases} x_{c,k} &= x_{c,k-1} + \Delta.cos(\theta_{k-1} + \omega/2) \\ y_{c,k} &= y_{c,k-1} + \Delta.sin(\theta_{k-1} + \omega/2) \\ \theta_k &= \theta_{k-1} + \omega \end{cases} \quad (4.3)$$

Entre deux instants d'échantillonnage, les rotations élémentaires de roues modifient les valeurs $\Delta q_{\mathrm{R,k}}$ et $\Delta q_{\mathrm{L,k}}$ des compteurs relatifs respectivement à la roue droite et à la roue gauche. La distance élémentaire parcourue Δ_k et la variation de cap ω_k sont données par :

$$\begin{cases} \Delta_k &= \dfrac{r_R \cdot \Delta q_{\mathrm{R,k}} + r_L \cdot \Delta q_{\mathrm{L,k}}}{2} \\ \omega_k &= \dfrac{r_R \cdot \Delta q_{\mathrm{R,k}} - r_L \cdot \Delta q_{\mathrm{L,k}}}{e} \end{cases} \quad (4.4)$$

où r_R et r_L représentent les coefficients reliant les distances parcourues aux valeurs des compteurs et e la voie.

2.1.2 Odométrie avec les 4 roues

Si l'angle au volant est mesuré, alors il est possible de réaliser une technique odométrique utilisant les 4 roues. Grâce à la redondance des mesures, les performances sont alors meilleures qu'une odométrie différentielle n'utilisant que les roues arrière. De plus, l'utilisation de l'angle au volant permet de réaliser un échantillonnage spatial très bien adapté aux hypothèses odométriques.

Considérons un model d'Ackerman d'une automobile à 4 roues comme sur la figure 4.3.

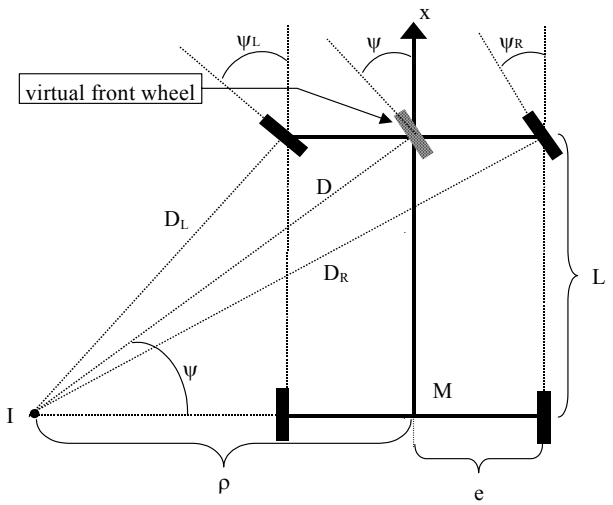


Figure 4.3. Modèle d'Ackerman d'une automobile.

L représente l'empattement et ψ l'angle au volant d'un modèle bicyclette.

Les variations Δ and ω peuvent être estimées grâce aux mesures de l'angle au volant ψ et des distances élémentaires parcourues par chaque roue (notées Δ_{RL}, Δ_{RR}, Δ_{FL} et Δ_{FR} pour les roues arrière gauche et droite et avant gauche et droite respectivement).

Sur la figure 4.3, on a :

$$\tan(\psi) = \frac{L}{\rho} \tag{4.5}$$

En combinant (4.1) et (4.5) :

$$\tan(\psi) = L.\frac{\omega}{\Delta} \tag{4.6}$$

A partir du modèle de déplacement de la figure (4.4), on obtient :

$$\Delta_{RL} = \omega \,.\, (\rho - e) = \Delta - e \,.\, \omega \tag{4.7}$$

$$\Delta_{RR} = \omega \,.\, (\rho + e) = \Delta + e \,.\, \omega \tag{4.8}$$

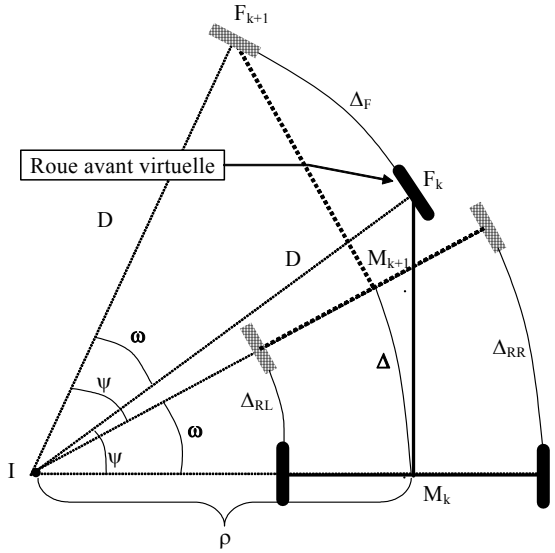


Figure 4.4. Déplacement élémentaire d'un véhicule.

Les mesures de déplacement des roues avant sont plus délicates à utiliser car ces dernières présentent une orientation variable par rapport au véhicule. La distance parcourue par la roue avant virtuelle est (figure 4.4) :

$$\Delta_F = D.\omega \tag{4.9}$$

Comme,

$$D = \frac{L}{\sin(\psi)} \tag{4.10}$$

En utilisant (4.5), on obtient :

$$D = \frac{\rho}{\cos(\psi)} \tag{4.11}$$

En multipliant de chaque côté par ω :

$$\Delta_F \,.\, \cos(\psi) = \Delta \tag{4.12}$$

La même procédure peut être appliquée à chaque roue avant (ψ_L et ψ_R sont indiqués sur la figure 4.3), ce qui donne :

$$\tan(\psi_L) = \frac{L}{\rho - e} \text{ et } \tan(\psi_R) = \frac{L}{\rho + e}. \tag{4.13}$$

ρ peut être éliminé dans (4.13) en utilisant (4.5) :

$$\psi_L = \text{atan}\left(\frac{\tan(\psi).L}{L\text{-}e.\tan(\psi)}\right) \text{ et } \psi_R = \text{atan}\left(\frac{\tan(\psi).L}{L+e.\tan(\psi)}\right) \quad (4.14)$$

Finalement, les adaptions de l'équation (4.12) pour chaque roue sont :

$$\Delta_{FL}.\cos(\psi_L) = \Delta\text{-}e.\omega \quad (4.15)$$

$$\Delta_{FR}.\cos(\psi_R) = \Delta+e.\omega \quad (4.16)$$

Les équations (4.6, 4.7, 4.8, 4.15, 4.16) définissent un système redondant et non linéaire qui relie le vecteur de quantités inconnues $\zeta=[\Delta, \omega]^T$ aux variables (Δ_{FL}, Δ_{FR}, Δ_{RL}, Δ_{RR}, ψ) :

$$\begin{cases} \tan(\psi) = L.\dfrac{\omega}{\Delta} \\ \Delta_{RL} = \Delta - e.\omega \\ \Delta_{RR} = \Delta + e.\omega \\ \Delta_{FL}.\cos(\psi_L) = \Delta - e.\omega \\ \Delta_{FR}.\cos(\psi_R) = \Delta + e.\omega \end{cases} \quad (4.17)$$

En définissant le vecteur z par (4.18), l'équation (4.17) prend la forme d'un modèle d'observation (4.19) :

$$z = [\tan(\psi), \Delta_{RL}, \Delta_{RR}, \Delta_{FL}.\cos(\psi_L), \Delta_{FR}.\cos(\psi_R)]^T \quad (4.18)$$

$$z = h(\zeta) \quad (4.19)$$

L'estimation de ζ avec le système (4.19) conduit à une meilleure connaissance de l'entrée du modèle odométrique (4.3) qu'avec l'utilisation des codeurs arrière uniquement, du fait de la redondance des données.

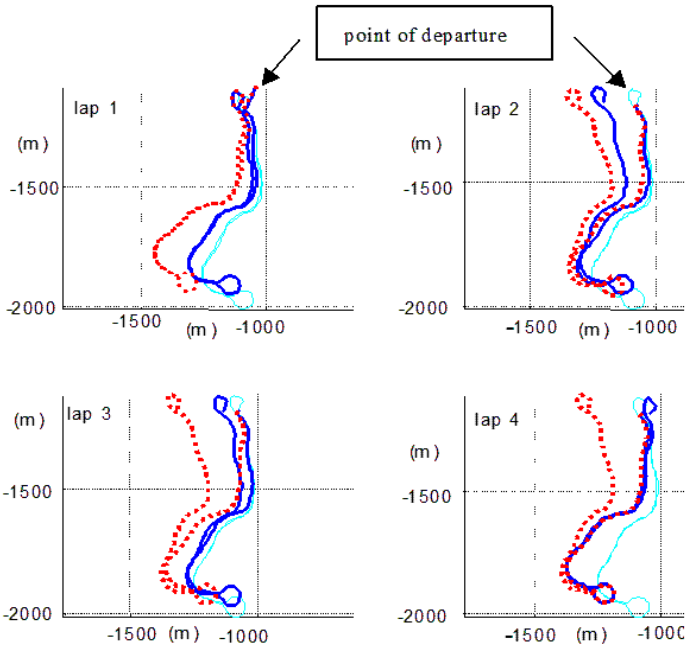


Figure 4.5. Résultats d'essais du printemps 2000. En trait fin, la trajectoire de référence, en trait fort l'odométrie à 4 roues et en pointillés l'odométrie différentielle.

Des essais ont été réalisés au printemps 2000 avec le véhicule Strada sur un circuit de 2,4 km de long, parcouru 4 fois à une vitesse maximum de 50 km/h. Les résultats de la figure 4.5 illustrent clairement le bénéfice de l'odométrie à 4 roues dont la dérive est moindre. Ces résultats ont été présentés dans [JI 3] et [CI 13] et comparés à d'autres modèles dans [CI 9].

2.1.3 Localisation à l'estime combinant des odomètres et un gyromètre de lacet

Les systèmes de navigation industrialisés utilisent souvent des gyromètres lorsqu'ils sont intégrés en première monte dans une voiture [Zhao, 97]. Grâce à un gyromètre, on obtient une estimation du cap plus précise [Chung et al, 01] qu'avec les capteurs ABS dont la résolution angulaire est très faible et dont l'étalonnage est délicat. En effet, une bonne maîtrise de la dérive du cap est essentielle pour obtenir de bonnes performances pour une localisation à l'estime.

Une première approche consiste à réduire le rôle des mesures odométriques à celui d'estimateur d'abscisse curviligne. Il est cependant dommage de négliger la mesure odométrique de rotation élémentaire précieuse, en particulier, pour estimer l'offset d'un gyromètre. Une approche par fusion de données peut être formulée comme dans le paragraphe précédent en augmentant le système (4.19) de la mesure gyrométrique et en explicitant l'offset dont l'évolution peut être modélisée comme constante par morceaux. Une autre approche, appelée *gyrodométrie* dans [Boreinstein, Feng, 96] consiste à utiliser l'estimation odométrique de la variation de cap lorsqu'elle est cohérente avec la mesure du gyromètre. Lors d'une incohérence, c'est la mesure du gyromètre qui est utilisée. Il semble que cette solution apporte un gain de précision notamment sur les surfaces de roulement imparfaitement planes engendrant des glissements des roues.

Dans le projet ARCOS (thème 3, tâche 2), un prototype de localisation temps-réel a été développé par le laboratoire sur la base d'un gyromètre à fibre optique (de marque KVH) et des ABS des roues arrières. Compte tenu de la très bonne mesure de vitesse de lacet de ce gyromètre, il était inutile d'utiliser la mesure odométrique de rotation élémentaire. L'entrée était simplement mesurée par les formules suivantes (ω_g étant la mesure du gyromètre et Δt la période d'échantillonnage) :

$$\begin{cases} \Delta_k &= \dfrac{r_R \cdot \Delta q_{\mathrm{R,k}} + r_L \cdot \Delta q_{\mathrm{L,k}}}{2} \\ \omega_k &= \omega_{g,k} \cdot \Delta t \end{cases} \tag{4.20}$$

2.2 Recalage de la dérive d'une localisation à l'estime

Une localisation à l'estime présente nécessairement une dérive due à l'intégration du bruit des capteurs et à l'imperfection inévitable du modèle d'évolution. Un système absolu est nécessaire pour l'initialisation et le recalage. L'algorithme 4.1 présente un fonctionnement dans lequel une localisation à l'estime est calculée à fréquence élevée et recalée, quand cela est possible, par un système extéroceptif utilisant un amer à la fois. On peut noter la façon élégante dont est traité l'asynchronisme des données. Pour un bon fonctionnement en temps réel, il faut que le temps de traitement des informations extéroceptives soit compatible avec la période d'échantillonnage.

Eventuellement, pour recaler la localisation à l'estime, on peut recalculer une pose complète absolue si cela est possible (c'est la méthode du marin).

Algorithme de localisation avec amer ponctuel

X_0 ← pose initiale

Répéter à fréquence élevée

Acquérir les données proprioceptives

Intégrer les données avec le modèle d'évolution

Si une mesure extéroceptive est disponible

Alors

Rechercher l'amer correspondant (éventuellement avec un test de mise en correspondance)

Recaler la localisation à l'estime.

Fin Si

Fournir le résultat

Fin répéter

Fin

Algorithme 4.1. Algorithme de localisation basé sur une navigation à l'estime recalée.

3 L'OBSERVATION D'ETAT : UNE METHODOLOGIE POUR LA LOCALISATION DYNAMIQUE

L'algorithme 4.1 constitue la base des développements de ce paragraphe. Il peut être illustré comme sur la figure 4.6 avec deux modes de fonctionnement principaux : un mode d'initialisation et un mode dynamique de suivi de pose (*pose tracking*). L'observation d'état est une méthodologie qui permet d'aborder le problème de la localisation dans son ensemble. En pratique, son rôle est souvent réduit à la phase de suivi de pose étant donné les non linéarités apparaissant dans les problèmes de localisation. En effet, la convergence d'un observateur d'état présente souvent un caractère local. L'initialisation doit donc être proche de la solution.

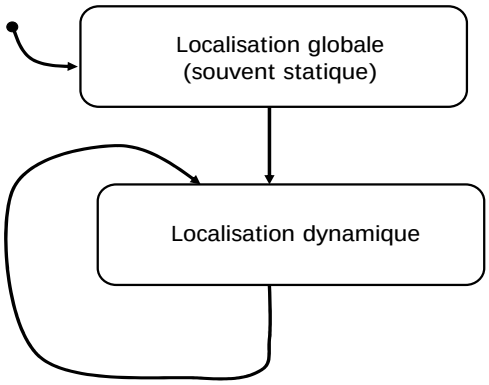


Figure 4.6. Diagramme d'état d'un système de localisation.

3.1 Représentation d'état d'un problème de localisation dynamique

Intéressons nous à un problème 2D où la pose x du repère mobile dans un repère de référence est caractérisée par sa position cartésienne et son cap par rapport à l'axe des abscisses $x = [x_c, y_c, \theta]^T$. Notons p_f les paramètres du modèles et u_k les mesures proprioceptives et supposons qu'elles soient synchrones et échantillonnées à la période Te. Un modèle d'évolution discret est fourni par la localisation à l'estime et s'écrit :

$$x_k = f\left(x_{k-1}, u_k, p_f\right) \text{ avec } x_k = x(t_0 + k.\text{Te}) \tag{4.21}$$

Le modèle odométrique (4.3) en est un exemple dans lequel les paramètres sont e, r_R et r_L.

On remarquera que les mesures u_k de l'instant d'échantillonnage k servent à calculer une estimation de l'état au même instant.

Soit maintenant une mesure y_j à un instant j d'un système extéroceptif servant pour le recalage. En général, on néglige la dynamique du capteur extéroceptif par rapport à celle du véhicule et, souvent, on considère que sa mesure est immédiatement disponible (pas de retard). Le modèle d'observation utilise des amers stockés dans une carte notée m_j[20]. Comme l'ont montré les exemples du chapitre 2, ce modèle est généralement non linéaire et non stationnaire. Il s'écrit sous la forme :

$$y_j = g(x_j, u_j, m_j, p_g) \tag{4.22}$$

où p_g représente les paramètres du modèle d'observation.

Si le système utilise des balises distinguables, alors les paramètres m_j sont soit directement connus, soit à reconstruire. Dans le cas de balises indistinguables ou d'amers naturels, il faut procéder à une étape de mise en correspondance.

L'apparition de l'entrée u dans le modèle d'observation est un phénomène assez rare (appelé transmission directe de l'entrée sur la sortie en automatique) que j'ai rencontré dans ma thèse de doctorat pour développer un filtre d'ordre réduit.

Très souvent, un capteur extéroceptif fonctionne comme un émetteur de données dont l'échantillonnage est régi par une horloge propre au capteur[21], ce qui rend l'observation y_i asynchrone de l'échantillonnage proprioceptif.

Une façon de résoudre l'asynchronisme consiste à échantillonner la localisation à l'estime à une fréquence suffisamment élevée pour chaque date d'apparition d'une mesure extéroceptive puisse être jugée suffisamment proche d'un échantillonnage proprioceptif. On obtient alors une représentation d'état *continue* à observations discrètes asynchrones et non stationnaires :

$$\begin{cases} x_k = f\left(x_{k-1}, u_k, p_f\right) \\ y_j = g\left(x_j, u_j, m_j, p_g\right) \end{cases} \text{ où } j \text{ est un multiple de } k \tag{4.23}$$

[20] On conserve un indice temporel car on a vu au chapitre 3 que certaines cartes dépendent du temps.

[21] Dans le cas de l'utilisation de caméras, on peut se servir du déclenchement de l'une pour synchroniser les autres comme ce qui est fait dans le projet MobiVip avec des caméras FireWire CMOS.

On réservera par la suite le terme d'*observation* aux mesures intervenant dans le modèle d'observation et celui d'*entrée* aux mesures proprioceptives utilisées dans le modèle d'évolution.

Sur la base de cette représentation d'état, on peut appliquer une technique d'observation d'état comme illustré sur la figure 4.7. Il est à noter que l'entrée est mesurée et non pas connue du système, contrairement à un problème d'automatique dans lequel on synthétise un régulateur.

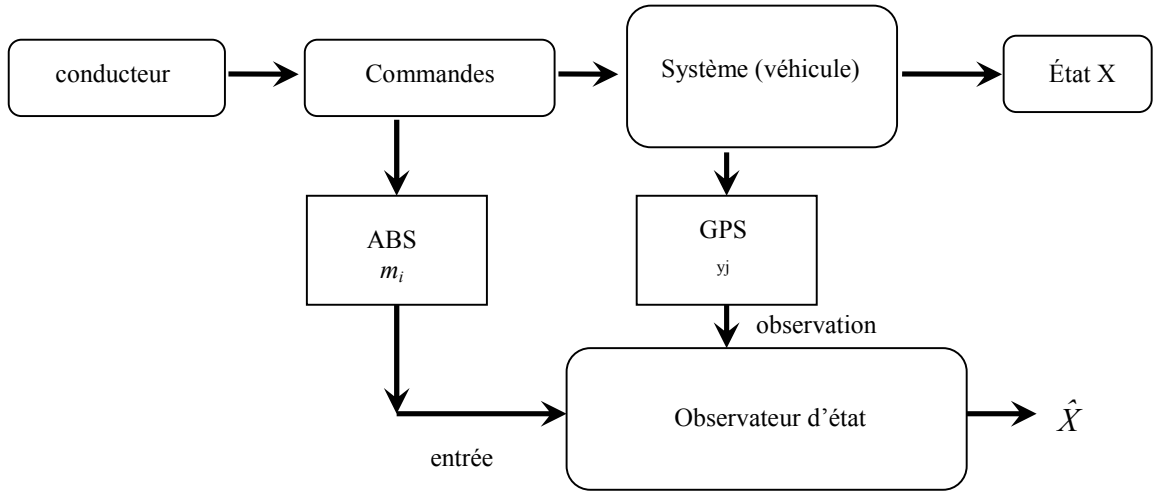


Figure 4.7. Illustration du problème d'observation d'état.

La représentation d'état 4.23 est la base mathématique sur laquelle sera formalisée le problème de localisation dynamique de l'algorithme 4.1.

Note : Il existe une autre approche utilisant un *filtrage complémentaire* (cf. [Brown, Hwang, 97] chapitre 10) qui conduit à une formulation linéaire. L'idée consiste à observer les erreurs du système de localisation à l'estime à partir de signaux d'innovation relatifs aux observations y_i. Sous sa forme *feedforward* appelée aussi *à dynamique exacte*, la solution de localisation est la localisation à l'estime corrigée par les erreurs reconstruites issues d'un observateur linéaire. Malheureusement, cette méthode ne fonctionne qu'avec des systèmes inertiels haut de gamme dont la dérive est faible. Pour des systèmes peu coûteux, il faut impérativement un terme de contre-réaction (*feedback*) qui introduit des non linéarités.

3.2 Observabilité

Un système observable est un système dont on peut reconstruire de façon unique l'état à partir de l'observation des sorties. Pour un système non linéaire, l'observabilité dépend en outre de l'entrée.

Une façon de poser le problème consiste à

- négliger les bruits,
- supposer que les observations extéroceptives sont
    - synchrones des entrées proprioceptives
    - stationnaires (les amers restent les mêmes).

L'étude de l'observabilité permet de se rassurer sur le bon fonctionnement d'un système ou bien de détecter des situations dans lesquelles le système sera mis en défaut. Par exemple, le calcul d'une localisation GPS autonome (cf. paragraphe 2.2.1 du chapitre 2, page 19) nécessite 4 satellites pour garantir l'observabilité. Dans ce cas simplifié à l'extrême, il n'y a pas de modèle d'évolution et l'observabilité s'étudie en considérant le rang de la jacobienne du modèle d'observation. Une perte d'observabilité apparaît lorsque le rang chute et, dans ce cas, le GDOP augmente alors de façon importante : c'est le cas quand les 4 satellites sont alignés. Il est impossible de se localiser dans une pareille situation.

Si on considère une visibilité satellitaire réduite (par exemple 2 satellites visibles depuis un canyon urbain), on conçoit intuitivement que cette information extéroceptive partielle peut corriger certaines dérives d'un système de localisation à l'estime. L'étude de l'observabilité (dans ce cas ci, très compliquée à réaliser) permettrait de savoir précisément les situations et mouvements du véhicule pour lesquels il serait envisageable de se localiser.

Dans ma thèse, en suivant l'approche continue d'Hermann et Krener [Hermann, Krener, 77], j'ai identifié des situations dans lesquelles il était impossible de se localiser avec le système SIREM. A l'inverse, j'ai pu montré qu'avec 2 balises uniquement un système multi-capteur était capable de fournir une localisation très souvent avec un véhicule en mouvement.

3.3 Prise en compte des erreurs

Les sources d'erreur interviennent à deux niveaux :

- au niveau des capteurs (erreurs de mesure dues à du bruit, des non linéarités, des mauvais calibrages),
- au niveau des modèles (erreurs dues au fait qu'un modèle est forcément une vision simplifiée de la réalité et dues à une mauvaise connaissance des paramètres).

La prise en compte et la modélisation des diverses erreurs sont deux étapes fondamentales pour le déploiement d'une approche multisensorielle s'appuyant sur des méthodologies de fusion de données.

Pour prendre en compte les erreurs, on réécrit la représentation d'état 4.23 sous la forme :

$$\begin{cases} x_k = f\left(x_{k-1}, u_k, p_f, \alpha_{f,k}, \gamma_k\right) \\ y_j = g\left(x_j, u_j, m_j, p_g, \alpha_{g,j}, \beta_j\right) \end{cases} \tag{4.24}$$

où :

- $\alpha_{f,k}$ et $\alpha_{g,j}$ représentent les erreurs de modèle,
- γ_k les erreurs des capteurs proprioceptifs,
- β_j les erreurs des capteurs extéroceptifs.

3.4 Mécanisme prédicteur/estimateur

Un observateur d'état se décrit par une représentation d'état. Parfois, l'observateur peut se mettre sous une forme *filtre* ou sous une forme *prédicteur* (la forme *lisseur* n'a, à ma connaissance, pas d'intérêt en temps réel). C'est le cas, par exemple, d'un observateur de Luenberger ou de Kalman pour un système linéaire à paramètres constants. En général, le système est variable et non linéaire, et l'on décrit l'observateur sous une forme *estimateur/prédicteur* (bien adaptée pour de la commande) ou bien *prédicteur/estimateur* (bien adaptée pour une localisation hybride).

Considérons un problème de localisation hybride linéaire à entrée mesurée u_k et à observations synchrones distinguables décrit par :

$$\begin{cases} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_k \\ y_k &= Cx_k \end{cases} \tag{4.25}$$

La forme prédicteur/estimateur est donnée par :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k-1} &= A\hat{x}_{k-1|k-1} &+ Bu_k \\ \hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} &+ K_k\left(y_k - C\hat{x}_{k|k-1}\right) \end{cases} \tag{4.26}$$

où K_k est une matrice de gain à définir. A chaque échantillonnage k, la sortie de l'observateur est $\hat{x}_{k|k-1}$ dont l'indice signifie que la dernière observation extéroceptive utilisée était *k-1*.

Il est essentiel de noter la structure récurrente de ce type d'observateur dynamique qui permet de ne pas avoir besoin de mémoriser les entrées $\{u_0,\ldots,u_{k-1}\}$ et les observations $\{y_1,\ldots,y_{k-1}\}$, le traitement à l'instant k se faisant juste avec u_k et y_k.

Le mécanisme prédicteur/estimateur est très important d'un point de vue temps réel car il permet de minimiser le temps de calcul. En outre, il permet de traiter élégamment certains problèmes où l'observation extéroceptive présente une latence (on étudiera cette propriété au paragraphe 4.4). La figure 4.8 indique que la fourniture du résultat d'observation est la localisation à l'estime. Cette prédiction est ensuite recalée de façon à préparer l'étape suivante. La dérive de la localisation à l'estime sur un pas d'échantillonnage est négligeable.

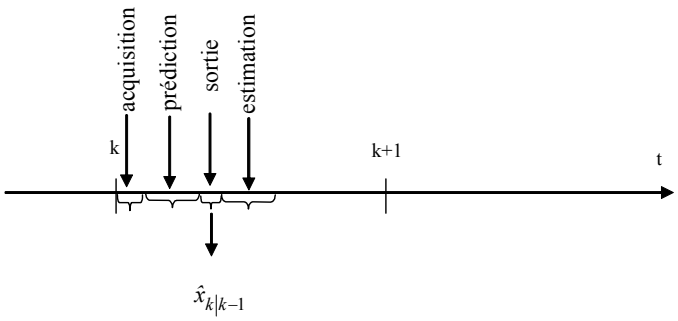


Figure 4.8. Fonctionnement temporel d'un observateur d'état pour un système de localisation

Si les observations extéroceptives ne sont pas synchrones des mesures proprioceptives (ce qui constitue la grande majorité des cas), l'étape de prédiction est répétée jusqu'à l'apparition d'une mesure extéroceptive. Un observateur d'état prédicteur/estimateur formalise donc l'algorithme 4.1 de la page 67.

La suite de la section 3 est consacrée à la présentation de quelques méthodologies d'observation d'état que j'étudie ou ai étudiées pour la localisation hybride. Les critères qui me semblent essentiels pour ce problème sont :

- l'aptitude au temps réel,
- l'aptitude à accepter des sources d'information variées, redondantes et complémentaires,
- la capacité à fournir une estimation consistante de l'erreur de localisation,
- l'aptitude à détecter des incohérences et des données aberrantes,
- la possibilité d'auto-caractériser un bon ou mauvais fonctionnement.

3.5 Approche bayésienne

3.5.1 Modélisation des erreurs

Selon l'approche bayésienne, les erreurs sont traitées comme des variables aléatoires, c'est-à-dire des grandeurs dont la valeur dépend du hasard. Cette dépendance est exprimée par une loi de probabilité mais on se limite souvent à une étude statistique à l'ordre deux, c'est-à-dire qu'on considère qu'une variable aléatoire est caractérisée par ses moments statistiques centrés du premier et deuxième ordre (moyenne et covariance). Cette approche est généralement incomplète, sauf dans le cas gaussien, où l'on connaît la densité de probabilité dès que l'on connaît la moyenne et la variance.

Cependant et pour un système de localisation dynamique, un phénomène aléatoire ne peut être caractérisé uniquement par ses caractéristiques spatiales (cf. figure 4.9) : il faut en plus modéliser ses caractéristiques temporelles.

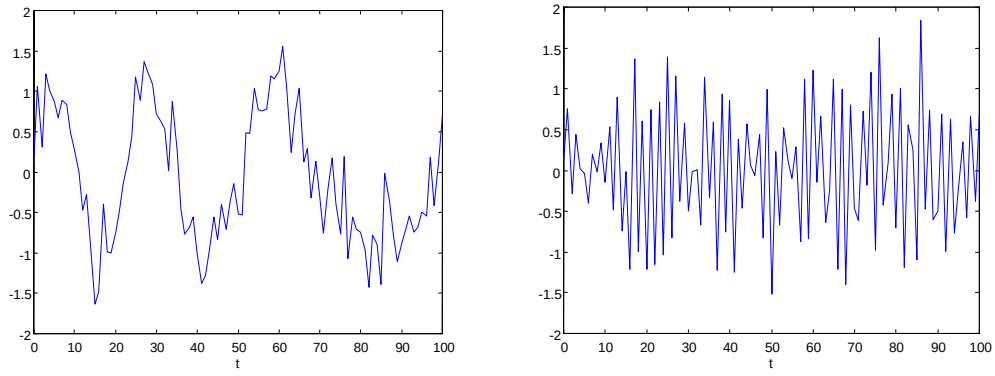


Figure 4.9. Deux signaux aléatoires de même variance.

En se limitant à l'ordre deux toujours, un signal aléatoire est ainsi caractérisée par

- sa moyenne statistique
- sa fonction d'autocorrélation.

En pratique, on est emmené à supposer souvent le signal aléatoire stationnaire, c'est-à-dire que ses caractéristiques spatiales et temporelles ne dépendent pas du temps. Un cas particulier est l'hypothèse souvent formulée qui consiste à supposer les bruits centrés et blancs (leur fonction d'autocorrélation est un Dirac à l'origine).

3.5.2 Filtrage de Kalman étendu

Le filtrage de Kalman étendu (*EKF – Extended Kalman Filter*) est la technique d'observation d'état la plus populaire et et la plus utilisée pour la localisation hybride.

Il doit son succès à

- sa très bonne robustesse du fait de son caractère « moindres carrés »,
- sa stabilité numérique bien maîtrisée grâce à des implémentations sous forme factorisée,
- sa très bonne aptitude au temps réel (l'EKF étant une déclinaison particulière d'un observateur prédicteur/estimateur)
- sa mise en œuvre reposant sur des techniques connues (il suffit de modéliser les phénomènes aléatoires au second ordre).

Son principe consiste à revenir au filtrage linéaire, après une linéarisation au premier ordre autour des valeurs prédites ou estimées précédemment.

Réécrivons la forme générale 4.24 comme suit :

$$\begin{cases} x_{k+1} = f\left(x_k, u_k, p_f, \gamma_k\right) + \alpha_{f,k} \\ y_j = g\left(x_j, u_j, m_j, p_g, \gamma_j\right) + \beta_j \end{cases} \tag{4.27}$$

Dans cette représentation d'état, les erreurs du modèle d'observation (α_g) sont souvent négligées (ce qui suppose un bon modèle parfaitement identifié) et on suppose le bruit d'observation β additif, tout comme α_f et γ.

Chacun des bruits est supposé centré, blanc[22] et de variance connue. Si tel n'est pas le cas, on peut modéliser la corrélation temporelle (par un filtre auto-régressif par exemple) et augmenter l'état de façon à faire apparaître des processus générateurs blancs. Par ailleurs, les différents bruits sont souvent supposés décorrélés. S'ils ne le sont pas, le formalisme de Kalman est toujours adapté, à condition de connaître la corrélation entre les phénomènes aléatoires.

Afin d'illustrer son fonctionnement[23], considérons un problème de localisation hybride non linéaire à entrée mesurée et à observations discrètes distinguables et à bruits décorrélés de la forme suivante (cas particulier de 4.27) :

$$\begin{cases} x_k = f\left(x_{k-1}, u_k, p_f, \gamma_k\right) + \alpha_{f,k} \\ y_j = g\left(x_j, m_j, p_g\right) + \beta_j \end{cases} \tag{4.28}$$

On observe l'état récursivement avec l'algorithme 4.2, respectant le paradigme de la figure 4.8. La représentation d'état est la description mathématique du problème et le filtrage de Kalman est le formalisme de fusion.

---

[22] Un bruit blanc est un signal imprédictible dont la fonction d'autocorrélation présente un Dirac à l'origine.

[23] Pour plus de détails, le lecteur est renvoyé à l'annexe A de ma thèse de doctorat.

//initialisation
$\hat{x} =$ une_valeur_bien_choisie ; $P =$ une_valeur_bien_choisie
$A = \left[\frac{\partial f}{\partial x}(\hat{x}, 0, p_f, 0) \right]$ $B = \left[\frac{\partial f}{\partial u}(\hat{x}, 0, p_f, 0) \right]$
Boucle à la période du système de localisation à l'estime
    $u_k \leftarrow$lire_mesure *// on acquiert les données des capteurs proprioceptifs*

    //prédiction
    $\hat{x} = f(\hat{x}, u_k, 0)$
    $A = \left[\frac{\partial f}{\partial x}(\hat{x}, u_k, p_f, 0) \right]$
    $B = \left[\frac{\partial f}{\partial u}(\hat{x}, u_k, p_f, 0) \right]$
    $P = A \cdot P \cdot A^T + B \cdot Q_\gamma \cdot B^T + Q_\alpha$
    Fournir l'estimation $\hat{x}$ et la variance estimée de l'erreur d'estimation P

    Si une observation y_j est disponible alors //estimation
        Rechercher l'amer correspondant dans la carte m_j
        $C = \left[\frac{\partial g}{\partial x}(\hat{x}, m_j, p_g) \right]$
        $K = P \cdot C^T \cdot \left(C \cdot P \cdot C^T + Q_\beta \right)^{-1}$
        $\hat{x} = \hat{x} + K \cdot \left(y_j - g(\hat{x}, m_j, p_g) \right)$
        $P = (I - KC) \cdot P \cdot (I - KC)^T + K \cdot Q_\beta \cdot K^T$
    Fin Si
Fin Boucle

Algorithme 4.2. Algorithme de localisation basé sur un EKF
($\hat{x}$ et P correspondent tantôt à des prédictions, tantôt à des estimations).

3.5.3 Filtrage UKF

Le filtre de Kalman Unscented[24] a été présenté pour par Julier et Uhlmann [Julier, Uhlmann, 97] pour répondre aux faiblesses suivantes du filtrage de Kalman étendu :

- la difficulté à régler un EKF (il faut procéder par essais/erreurs),
- la difficulté de l'implémentation (il faut réécrire le filtre sous forme quadratique),
- le comportement du système doit être assez linéaire entre deux recalages.

Un filtre UKF est un prédicteur/estimateur qui ne linéarise pas les fonctions *f* et *g* comme le fait le filtrage de Kalman étendu. Cette méthode évalue directement les moments de premier et second ordre des images par *f* et *g* de variables d'intérêt en utilisant une *transformation non parfumée* (*UT - Unscented Transformation*). L'implémentation numérique d'un UKF peut-être très performante en utilisant la factorisation de Cholesky.

[24] Que l'on voit appelé parfois « sans parfum » ou « sans biais ».

Soit un vecteur aléatoire de dimension n caractérisé par sa moyenne $\bar{x}$ et sa matrice de covariance P_{xx}. Cherchons à estimer les deux premiers moments $\bar{y}$ et P_{yy} du vecteur y de dimension m tel que :

$$y = T(x) \tag{4.29}$$

où $T(.)$ est une transformation non-linéaire.

La transformation non parfumée est basée sur l'intuition « qu'il est plus simple d'approximer une densité de probabilité gaussienne que d'approximer une fonction ou une transformation non-linéaire ». Elle utilise un ensemble de points $\{x_i\}_{i=1,\ldots,2n+1}$ formés de (2n+1) éléments, appelés *sigma points*, créés à partir de $\bar{x}$ et de P_{xx}. A chaque point x_i est associé un poids W_i.

On peut remarquer que cette méthode ressemble aux méthodes de Monte Carlo (dont on parlera au paragraphe 3.5.4.2). Cependant, les points de la transformation non parfumée ne sont pas pris au hasard, mais choisis de façon déterministe de façon à estimer la distribution de y avec un petit nombre de points. La transformation calcule d'abord la fonction non linéaire en chaque point x_i, puis estime la moyenne et la covariance de y en utilisant les points transformés avec leurs poids associés :

$$y_i = T(x_i) \quad i = 0,\ldots,2n$$

$$\bar{y} = \sum_{i=0}^{2n} W_i y_i \tag{4.30}$$

$$P_{yy} = \sum_{i=0}^{2n} W_i (y_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})^T$$

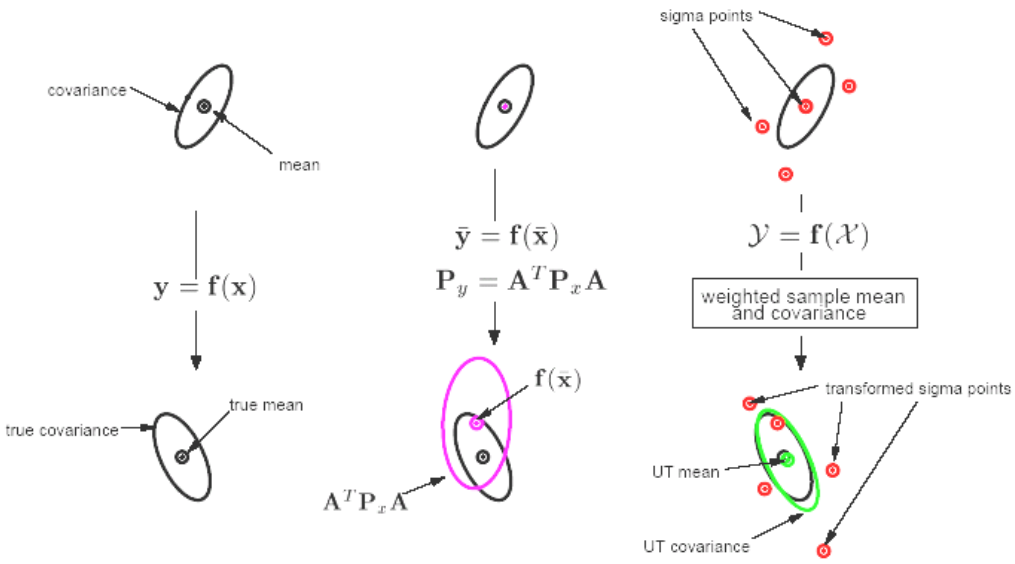


Figure 4.10. Illustration de la transformation non parfumée.

Considérons la même représentation d'état que celle utilisée pour décrire l'EKF. Pour mettre en œuvre un filtre UKF, le vecteur d'état est augmenté avec les composantes des bruits de modèle, d'entrée et d'observation :

$$x_k^a = [\, x_k^T \quad \gamma_k^T \quad \alpha_k^T \quad \beta_k^T \,]^T \tag{4.31}$$

Cette augmentation de l'état est nécessaire pour appliquer la transformation non parfumée.

Le filtre UKF rencontre un succès formidable actuellement, notamment en robotique. Il est utilisé en lieu et place de l'EKF dans de nombreuses applications. Il est à noter que l'UKF a plusieurs cousins comme les filtres à dérivées numériques (*DD1* d'ordre 1 et *DD2* d'ordre 2) [Norgaard et al, 00] et le *CDKF* (*Central Difference Kalman Filter*). Ces filtres utilisent tous une stratégie d'échantillonnage déterministe. La bibliothèque Matlab ReBEL (Recursive Bayesian Estimation Library[25]) développée par Rudolph van der Merwe propose des implémentations de ces différents filtres.

Fahed Abdallah, dans son post-doc au laboratoire, a appliqué l'UKF à un problème de localisation synchrone en simulation. Il est ressorti de cette étude que l'UKF n'apporte pas de gain de performance significatif par rapport à l'EKF dans les problèmes où les non linéarités sont faibles.

3.5.4 Filtrage particulaire

3.5.4.1 Filtrage bayésien

Le filtrage bayésien consiste à estimer la densité de probabilité $p(x|y)$ caractérisant la distribution de l'état x dans l'espace d'état connaissant les mesures y. Cette densité de probabilité est, en général, difficile à caractériser alors que l'opposée $p(y|x)$ est une entité facile à calculer à partir d'un modèle d'observation.

Un filtre bayésien se décline en trois phases : prédiction / filtrage / estimation. Etudions son principe. Considérons le système non linéaire représenté par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_k) + \alpha_k \\ y_k = g(x_k) + \beta_k \end{cases} \tag{4.32}$$

α_k et β_k représentent les bruits de modèle et d'observation, de densités de probabilité p_{α_k} et p_{β_k} respectivement. α_k et β_k sont supposés additifs et indépendants. L'entrée u_k est mesurée sans erreur. Notons $Y_k = \{y_i\}_{i=1,\cdots,k}$ l'ensemble des mesures jusqu'à l'instant *k*.

Prédiction

Intéressons nous d'abord à l'étape de prédiction et au calcul de $p(x_k|Y_{k-1})$. Une astuce consiste à le réécrire comme une densité de probabilité marginale par rapport à x_{k-1} :

$$p(x_k|Y_{k-1}) = \int_{\Re^n} p(x_k, x_{k-1}|Y_{k-1}) dx_{k-1} \tag{4.33}$$

Utilisons la règle $p(x,y) = p(x|y)p(y)$ sur la fonction à intégrer dans (4.33) :

$$p(x_k, x_{k-1}|Y_{k-1}) = p(x_k|x_{k-1}, Y_{k-1}) p(x_{k-1}|Y_{k-1}) \tag{4.34}$$

L'hypothèse de blancheur des bruits fait que le modèle d'état est un processus Markovien d'ordre 1, ce qui donne :

$$p(x_k|x_{k-1,}Y_{k-1}) = p(x_k|x_{k-1}) \tag{4.35}$$

[25] accessible à l'adresse http://choosh.ece.ogi.edu/rebel/

Le modèle d'évolution de (4.32) permet d'écrire

$$p(x_k|x_{k-1}) = p_{\alpha_k}\left(x_k - f\left(x_{k-1}, u_k\right)\right) \tag{4.36}$$

En utilisant (4.35) et (4.36), on obtient une nouvelle expression pour (4.33) :

$$p(x_k|Y_{k-1}) = \int_{\Re^n} p_{\alpha_k}\left(x_k - f\left(x_{k-1}, u_k\right)\right) p(x_{k-1}|Y_{k-1})\, dx_k \tag{4.37}$$

Filtrage

Considérons maintenant le modèle d'observation non linéaire $y_k = g(x_k) + \beta_k$. Le nom « d'approche bayésienne » vient de l'utilisation de la règle de Bayes :

$$p(x|y) = \frac{p(y|x)\,p(x)}{p(y)} \tag{4.38}$$

Le théorème de Bayes permet donc de passer de la probabilité a priori *p(x)* à une nouvelle probabilité $p(x|y)$ compte tenu de la vraisemblance $p(y|x)$ des nouvelles observations.

En considérant toutes les mesures Y_k, la règle de Bayes se réécrit sous la forme :

$$p(x_k|Y_k) = p(x_k|y_k, Y_{k-1}) = \frac{p(y_k|x_k, Y_{k-1})\,p(x_k|Y_{k-1})}{p(y_k|Y_{k-1})} \tag{4.39}$$

La vraisemblance $p(y_k|x_k, Y_{k-1})$ est donnée par le modèle de bruit de l'observation :

$$p(y_k|x_k, Y_{k-1}) = p_{\beta_k}\left(y_k - g(x_k)\right) \tag{4.40}$$

En combinant (4.39) et (4.40) :

$$p(x_k|Y_k) = \delta_k^{-1} p_{\beta_k}\left(y_k - g(x_k)\right) p(x_k|Y_{k-1}) \tag{4.41}$$

où $\delta_k = p(y_k|Y_{k-1})$ peut être considéré comme un facteur de normalisation.

Le filtrage particulaire repose sur les équations (4.41) et (4.37) permettant de calculer de façon récurrente $p(x_k|Y_k)$ à partir d'une densité initiale donnée $p(x_0)$.

Estimation

A partir d'une de la densité de probabilité a posteriori $p(x_k|Y_k)$, une estimation de l'état peut être obtenue en considérant la valeur moyenne :

$$\hat{x}_k = \int_{\Re^n} x_k\, p\left(x_k|Y_k\right) dx_k \tag{4.42}$$

La matrice de covariance peut être calculée à partir de

$$P_k = \int_{\Re^n} \left(x_k - \hat{x}_k\right)\left(x_k - \hat{x}_k\right)^T p\left(x_k|Y_k\right) dx_k \tag{4.43}$$

Le filtrage bayésien est souvent impossible à résoudre analytiquement, sauf si le système est linéaire et si les bruits suivent des distributions gaussiennes. Dans ce cas, la solution est donnée par le filtre de Kalman.

3.5.4.2 Méthodes séquentielles de Monte Carlo : filtres particulaires

Les méthodes séquentielles de Monte Carlo permettent une implémentation d'un filtrage bayésien par le biais d'approximations numériques. Leur principe consiste à utiliser des échantillons discrets obtenus par simulation pour approximer une distribution de probabilité que l'on ne sait pas calculer analytiquement. Les méthodes séquentielles de Monte Carlo

simulent $p(x_k|Y_k)$ par un nombre fini d'échantillons ou particules. Plus le nombre de particules est grand, meilleure est l'approximation. Avec l'évolution des moyens informatiques, ces filtres sont devenus très populaires et commencent à avoir des applications pratiques.

L'idée principale du filtrage particulaire est d'approximer $p(x_k|Y_k)$ avec un ensemble de N particules $\{x_k^{(i)}\}_{i=1,\cdots,N}$ auxquelles on associe un poids. Le poids de chaque particule reflète la probabilité que la particule soit à une position pertinente de l'espace d'état.

Comme on l'a vu, lors de la phase d'estimation d'un filtre bayésien, on est amené à calculer des intégrales (eq. 4.42 et 4.43). C'est en traitant ce problème d'estimation que les méthodes de Monte Carlo apportent une solution au problème de filtrage bayésien. Considérons l'intégrale suivante :

$$E(h(x_k)) = \int_{\Re^n} h(x_k)p(x_k|Y_k)dx_k \tag{4.44}$$

S'il est possible de générer des échantillons $\{x_k^{(i)}\}_{i=1,\cdots,N}$ selon $p(x_k|Y_k)$, alors une approximation de l'intégrale est donnée par :

$$E(h(x_k)) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} h(x^{(i)}) \tag{4.45}$$

Malheureusement, il est impossible de générer les échantillons à partir de $p(x_k|Y_k)$ dans notre problème puisque $p(x_k|Y_k)$ est ce que l'on cherche. La solution est de proposer une autre distribution $q(x_k|Y_k)$ à partir de laquelle on peut générer des échantillons. Cette approche porte le nom d'échantillonnage pondéré (*importance sampling*).

L'intégrale devient dans ce cas

$$\begin{aligned} E(h(x_k)) &= \int_{\Re^n} h(x_k)\frac{p(x_k|Y_k)}{q(x_k|Y_k)}q(x_k|Y_k)dx_k \\ &= \int_{\Re^n} h(x_k)\frac{p(Y_k|x_k)p(x_k)}{p(Y_k)q(x_k|Y_k)}q(x_k|Y_k)dx_k \\ &= \int_{\Re^n} h(x_k)\frac{w_k}{p(Y_k)}q(x_k|Y_k)dx_k \end{aligned} \tag{4.46}$$

où on a posé $w_k = \dfrac{p(Y_k|x_k)p(x_k)}{q(x_k|Y_k)}$

$$
\begin{aligned}
E(h(x_k)) &= \frac{1}{p(Y_k)} \int_{\Re^n} h(x_k) w_k q(x_k|Y_k) dx_k \\
&= \frac{\int_{\Re^n} h(x_k) w_k q(x_k|Y_k) dx_k}{\int_{\Re^n} p(Y_k|x_k) p(x_k) \frac{q(x_k|Y_k)}{q(x_k|Y_k)} dx_k} \\
&= \frac{\int_{\Re^n} h(x_k) w_k q(x_k|Y_k) dx_k}{\int_{\Re^n} w_k q(x_k|Y_k) dx_k} \\
&= \frac{E_{q(x_k|Y_k)}(w_k h(x_k))}{E_{q(x_k|Y_k)}(w_k)}
\end{aligned}
\tag{4.47}
$$

où $E_{q(x_k|Y_k)}$ représente l'espérance calculée avec $q(x_k|Y_k)$. Ainsi, en générant les échantillons suivant $q(x_k|Y_k)$, on peut approximer l'espérance à calculer par l'estimation suivante :

$$
\hat{E}(h(x_k)) = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} h(x_k^{(i)}) w_k^{(i)}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w_k^{(i)}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} h(x_k^{(i)}) w_k^{(i)}}{\sum_{i=1}^{N} w_k^{(i)}} \tag{4.48}
$$

Avec les hypothèses de modèle de Markov d'ordre 1 et d'indépendance des bruits, on montre [Doucet et al, 00] que les poids peuvent être estimés de façon récurrente par :

$$
w_k = w_{k-1} \frac{p(y_k|x_k) p(x_k|x_{k-1})}{q(x_k|x_{k-1}, Y_k)} \tag{4.49}
$$

L'équation (4.49) offre un mécanisme séquentiel pour estimer les poids d'importance, étant donné une distribution $q(x_k|x_{k-1}, Y_k)$ bien choisie. Le choix de cette distribution est le point crucial. Le choix $q(x_k|x_{k-1}, Y_k) = p(x_k|x_{k-1})$ est le plus populaire car il conduit à une formulation simple :

$$
w_k = w_{k-1} p(y_k|x_k) \tag{4.50}
$$

Ainsi, la mise à jour des poids des particules consiste à multiplier le poids précédant de chaque particule par la vraisemblance correspondante.

Pour faire fonctionner un filtre particulaire, il faut donc connaître les modèles et les bruits et en plus disposer d'un générateur de nombres aléatoires. L'algorithme de filtre particulaire pour la représentation d'état (4.32) peut se résumer comme suit :

//Initialisation :

Pour $i = 1, \cdots, N$, générer $\{x_0^{(i)}\}_{i=1,\cdots,N}$ selon $p(x_0)$ et poser $w_0^{(i)} = 1/N$

Boucle

// Etape 1 : acquisition des mesures
(u,y) ← acquérir_mesures()

// Etape 2 : prédiction
Pour i de 1 à N, faire évoluer chaque particule suivant le modèle d'état avec des réalisations de bruit différentes pour chaque particule : $x_k^{(i)} = f\left(x_{k-1}^{(i)}, u_k\right) + \alpha_k^{(i)}$
Fin pour

// Etape 3 : filtrage
//Mise à jour des poids
Pour i de 1 à n, $w_k^{(i)} = p\left(y_k \middle| x_k^{(i)}\right) w_{k-1}^{(i)} = p_{\beta_k}\left(y_k - g(x_k^{(i)})\right) w_{k-1}^{(i)}$ Fin pour
//normalisation des poids
Pour i de 1 à n, $w_k^{(i)} = \dfrac{w_k^{(i)}}{\sum_{j=1}^{N} w_k^{(j)}}$ Fin pour

// Etape 4 : estimation
$\hat{x}_k \approx \sum_{i=1}^{N} w_k^{(i)} x_k^{(i)}$ // moyenne
$P_k \approx \sum_{i=1}^{N} \tilde{w}_k^{(i)} \left(x_k^{(i)} - \hat{x}_k\right)\left(x_k^{(i)} - \hat{x}_k\right)^T$ // covariance

Fin Boucle

Algorithme 4.3. Principe d'un filtre particulaire appliqué à la forme (4.32).

Le filtre particulaire présenté ici n'est pas viable en pratique car on constate que les poids dégénèrent rapidement vers zéro. C'est tout à fait logique puisque ce filtre ne met à jour que le poids des particules, laissant ces dernières explorer l'espace d'état au gré du modèle bruité. Celles qui s'égarent ont un poids devenant infiniment petit et le risque est que le nombre de particules significatives devienne trop faible.

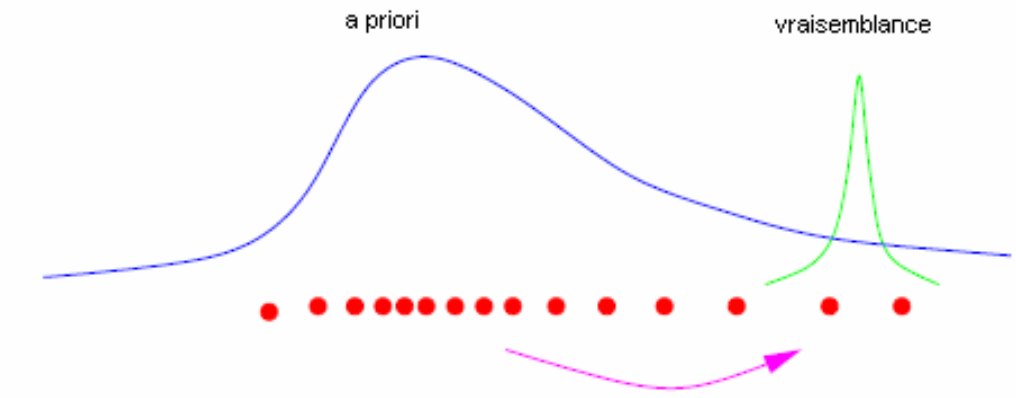


Figure 4.11. Illustration du risque de dégérescence et de l'intérêt du rééchantillonnage.

Pour traiter ce problème on procède à des rééchantillonnages de particules suivant leurs poids : celles qui ont un poids faible sont éliminées et celles qui ont un poids fort sont dupliquées éventuellement plusieurs fois (leurs clones suivront différentes trajectoires puisque pour chacune le bruit de modèle sera différent).

Il est à noter qu'un rééchantillonnage ne permet pas de traiter le problème des mesures aberrantes. En effet, il peut déplacer les particules vers une zone sans intérêt où elles se perdront. Dans ce cas, le filtre diverge mais ceci est détectable compte tenu que toutes les particules sont peu vraisemblables.

Le rééchantillonnage peut se faire à chaque étape (on obtient dans ce cas un filtre particulaire SIR - Sequential Importance Resampling) où lorsque ceci est jugé nécessaire compte tenu du pourcentage de particules significatives (filtre SIS - Sequential Importance Sampling). Pour évaluer le nombre effectif de particules, on utilise l'estimation suivante :

$$\hat{N}_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \left(w_k^{(i)} \right)^2} \tag{4.51}$$

Le nombre $\hat{N}_{eff}$ des particules effectives est maximisé lorsque tous les poids sont égaux. Il est minimum lorsqu'un seul poids est non nul. Ainsi, quand $\hat{N}_{eff}$ est plus petit qu'un seuil N_{seuil} choisi on procède à un rééchantillonnage.

Pour pouvoir appliquer le filtrage particulaire au problème de localisation hybride, il convient de prendre en compte le bruit sur l'entrée que nous avons négligé jusqu'ici. Si l'on suppose ce bruit blanc et indépendant des autres phénomènes aléatoires, alors on peut très facilement l'introduire lors de l'étape de prédiction en considérant pour chaque particule une réalisation de bruit.

Illustrons le filtrage particulaire sur un problème de localisation hybride non linéaire à entrée mesurée et observations synchrones distinguables et bruits décorrélés (cas particulier de 4.27) :

$$\begin{cases} x_k = f\left(x_{k-1}, u_k, p_f, \gamma_k\right) + \alpha_{f,k} \\ y_k = g\left(x_k, m_k, p_g\right) + \beta_k \end{cases} \tag{4.52}$$

//Initialisation :

Pour $i = 1, \cdots, N$, générer $\{x_0^{(i)}\}_{i=1,\cdots,N}$ selon $p(x_0)$ et poser $w_0^{(i)} = 1/N$

Boucle

// Etape 1 : acquisition des mesures
(u,y) ← acquérir_mesures()

// Etape 2 : prédiction
Pour i de 1 à N,
faire évoluer chaque particule suivant le modèle d'état avec des réalisations des bruits α et γ différentes pour chaque particule :
$x_k^{(i)} = f\left(x_{k-1}^{(i)}, u_k, p_f, \gamma_k^{(i)}\right) + \alpha_k^{(i)}$
Fin pour

// Etape 3 : filtrage
//Mise à jour des poids
Pour i de 1 à n, $w_k^{(i)} = p\left(y_k \middle| x_k^{(i)}\right) w_{k-1}^{(i)} = p_{\beta_k}\left(y_k - g\left(x_k^{(i)}, m_k, p_g\right)\right) w_{k-1}^{(i)}$
Fin pour
//normalisation des poids
Pour i de 1 à n, $w_k^{(i)} = \dfrac{w_k^{(i)}}{\sum_{j=1}^{N} w_k^{(j)}}$ Fin pour

// Etape 4 : estimation
$\hat{x}_k \approx \sum_{i=1}^{N} w_k^{(i)} x_k^{(i)}$ // moyenne
$P_k \approx \sum_{i=1}^{N} \tilde{w}_k^{(i)} \left(x_k^{(i)} - \hat{x}_k\right)\left(x_k^{(i)} - \hat{x}_k\right)^T$ // covariance

// Etape 5 : rééchantillonnage si besoin est
Si $\hat{N}_{eff} = \dfrac{1}{\sum_{i=1}^{N} \left(w_k^{(i)}\right)^2} < N_{seuil}$ alors
générer N nouvelles particules et remettre tous les poids à $\dfrac{1}{N}$
Fin Si

Fin Boucle

Algorithme 4.4. Filtre particulaire SIS appliqué à la localisation hybride synchrone.

Dans son post-doc, Fahed Abdallah a étudié cette méthode. Sa formidable nouveauté est la multimodalité, c'est-à-dire l'aptitude à caractériser plusieurs solutions probables. Pour le problème de localisation sur carte (comme on le verra plus tard), cette propriété permet de gérer naturellement plusieurs hypothèses[26]. La contrepartie réside dans les points faibles suivants :

- difficulté pour déterminer le bon nombre de particules,
- sensibilité à des biais,
- risque de divergence en cas de mesure aberrante,
- lourdeur d'implantation temps réel.

[26] C'est cette même propriété qui est mise à profit actuellement dans les méthodes de suivi de cible dites *track before detect*.

3.6 Approche ensembliste

3.6.1 Introduction

Selon l'approche ensembliste (ou à erreurs bornées), la solution du problème d'observation est un ensemble dans lequel se trouve l'état de façon garantie. Si l'on obtient l'ensemble vide, c'est qu'il n'y a pas de solution.

Les ensembles peuvent être modélisés de diverses façons (par des pavés ou boites, des cercles, des ellipses, des polytopes à n côtés, n pouvant varier ou encore des zonotopes à n côtés, n étant fixe, etc.). Le modèle ellipsoïdal a été largement étudié, notamment à cause de son analogie avec les ellipsoïdes gaussiens. Dans la suite de ce paragraphe, on se limite aux ensembles de type pavé, c'est-à-dire des vecteurs d'intervalles.

Contrairement à l'approche bayésienne, l'approche ensembliste permet de s'affranchir de :

- la connaissance des distributions statistiques des phénomènes aléatoires,
- la couleur des erreurs (bruits de mesures blancs, modèles auto-régressifs, etc.),
- d'une identification supposée parfaite des paramètres des modèles (induisant des biais notamment).

Un phénomène aléatoire et une grandeur mal connue sont modélisés de la même façon par un intervalle. Dans ce cas, on interprète un intervalle comme le représentant d'un réel mal connu. Par exemple, soit une mesure m de la grandeur X avec une erreur centrée de valeur maximum b. Alors, X est inclus dans l'intervalle $[m - b, m + b]$. De la même façon, la voie e d'une voiture (distance entre les roues d'un même essieu) est aisément modélisé par $[e_{min}, e_{max}]$ étant donné que c'est une grandeur difficile à caractériser qui est, de plus, sujette à des fluctuations. Ainsi, pour modéliser un phénomène aléatoire avec un intervalle, il faut être capable de déterminer les bornes de bruit les plus proches possibles des valeurs minimales. Le risque est de surestimer ces bornes et d'obtenir un observateur pessimiste.

L'analyse par intervalle [Moore, 66] fournit un cadre formel pour traiter les problèmes ensemblistes de type pavés. Pour une présentation détaillée et pédagogique, on renvoie le lecteur à l'ouvrage [Jaulin et al, 01].

Pour fixer les idées, voici deux exemples numériques :

- $\begin{pmatrix}[-1,2]\\[1,5]\end{pmatrix}\cdot[-2,3]=\begin{pmatrix}[-4,6]\\[-10,15]\end{pmatrix}$
- Soit $f(x) = (x + 2)^2 - 4$. Alors $f([-1, 1]) = [-3, 5]$

Dans les problèmes d'automatique, la notion de *fonction d'inclusion* est très utile du fait que l'image d'un intervalle par une fonction n'est pas toujours un intervalle.

Soit f une fonction réelle définie sur $\mathbb{IR}^n$ à image dans $\mathbb{IR}^m$. L'image par f d'un pavé $[x]$ est par définition l'ensemble $\{f(x) \mid x \in [x]\}$. Une fonction d'inclusion pour f notée $[f]$ est une fonction qui vérifie, pour tout pavé $[x]$, les deux assertions suivantes :

- $[f]([x])$ est un pavé,
- $f([x]) \subseteq [f]([x])$.

Pour une fonction *f*, on peut souvent trouver une multitude de fonctions d'inclusion (cf. figure 4.12). La recherche de la fonction d'inclusion minimale est un problème parfois compliqué mais important au même titre que la détermination des bornes de bruit.

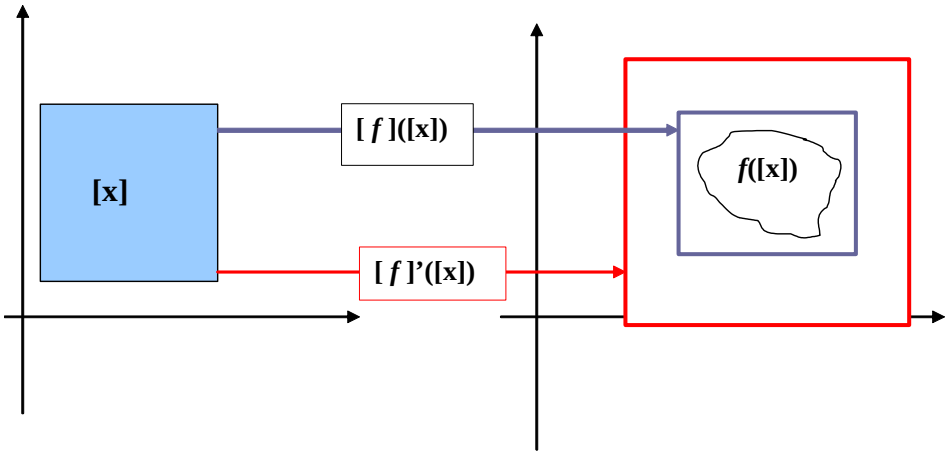


Figure 4.12. L'image par f du pavé [x] est englobée par les images des fonctions d'inclusion [f] et [f]'

3.6.2 Estimateur/prédicteur par inversion ensembliste

Dans un problème d'inversion ensembliste, on cherche à caractériser les états compatibles avec des observations de type pavé.

Soit *f* une fonction de $\mathbb{IR}^n$ dans $\mathbb{IR}^m$ et $[y]$ un pavé de $\mathbb{IR}^m$. Cherchons à caractériser l'ensemble $\mathbb{X}$ tel que :

$$\mathbb{X} \equiv \{x \in \mathbb{IR}^n \mid f(x) \in [y]\} \tag{4.53}$$

En général, $\mathbb{X}$ n'est pas un pavé (figure 4.13).

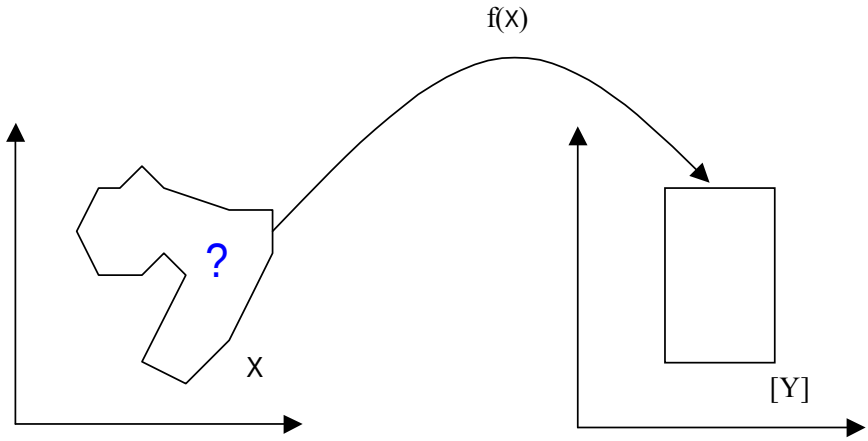


Figure 4.13. Le problème de l'inversion ensembliste.

L'algorithme SIVIA [Jaulin et al, 01] traite le problème de façon numérique en proposant de partitionner la solution $\mathbb{X}$ en un ensemble de sous-pavés $[x]$. Pour savoir si un sous-pavé $[x]$ est à l'intérieur de la solution, on utilise le test d'inclusion :

$$[f]([x]) \subset [y] \Rightarrow [x] \subset \mathbb{X}$$

$$[f]([x]) \cap [y] = \varnothing \Rightarrow [x] \cap \mathbb{X} = \varnothing$$

Les pavés pour lesquels il n'est pas possible de montrer qu'ils sont à l'intérieur ou à l'extérieur de X sont bissectés[27] sauf s'ils sont trop petits, c'est-à-dire de taille inférieure à la précision recherchée. Le pavé initial de recherche X_0 est supposé contenir la solution ou bien détermine l'espace qui est intéressant vis-à-vis du problème considéré.

```
Algorithme SIVIA. Entrée : [X0], [Y], [f] et ε (précision)
  In =   liste contenant les pavés inclus dans la solution
  Out =  liste contenant les pavés à l'extérieur de la solution
  P =    liste contenant les pavés de longueur inférieure à la précision recherchée
Step 1 L:={[X0]}; In:={∅}; Out:={∅}; P:={∅}; //L est la liste courante
Step 2 [x]:=Extraire_debut_liste(L)
Step 3 Si        [f]([x])⊂[Y]  alors In :=(In, [x])
Step 4 Sinon Si  [f]([x])∩[Y]=∅  alors Out :=(Out,[x])
Step 5 Sinon Si  longueur([x])< ε alors P :=(P,[x])
Step 6 Sinon     bissecter([X)] en [x1] et [x2] et L :=(L,[x1],[x2])
Step 7 Si L≠∅ Aller à Step 2
```

Algorithme 4.5. Forme récursive de l'algorithme SIVIA de Jaulin et Walter.

Les figures 4.14 à 4.16 illustrent les trois cas de figure qui peuvent se produire lorsque l'on traite un pavé.

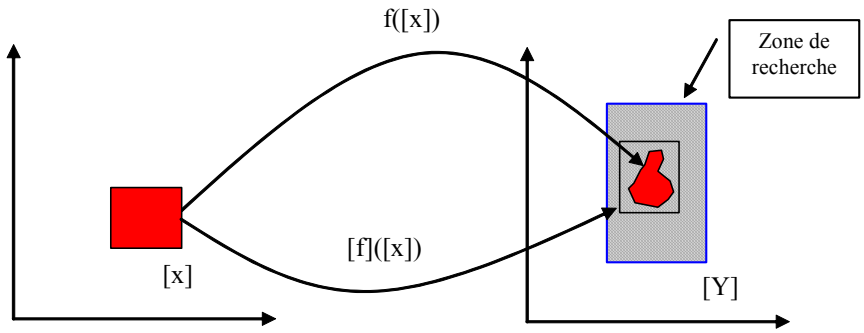


Figure 4.14. Exemple d'un pavé solution.

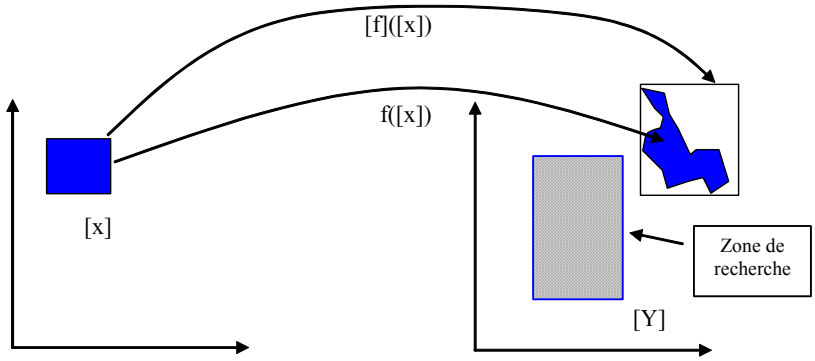


Figure 4.15. Exemple d'un pavé non solution.

[27] i.e. coupés en deux selon leur plus grande direction.

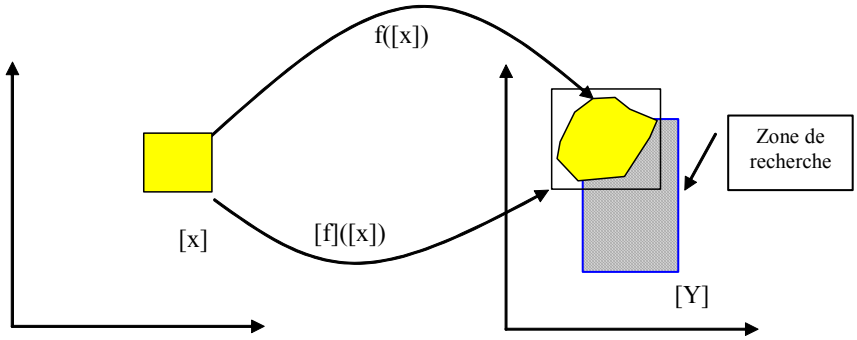


Figure 4.16. Exemple d'un pavé qui conduit à une indétermination.

L'inversion ensembliste s'applique de façon parfaite au problème de la localisation statique [Meizel et al, 02] et [Bouvet et al, 01].

Par exemple, soit un robot équipé d'un télémètre qui effectue une mesure de distance d d'imprécision e sur une balise distinguable de position connue (x_b, y_b). Il s'agit d'inverser la fonction $d = \sqrt{(x-x_b)^2+(y-y_b)^2} = f(x,y)$ pour trouver les états compatibles avec $[d] = [d-e, d+e]$. Une fonction d'inclusion (dite naturelle et optimale ici) est donnée par $[f]([x],[y]) = \sqrt{([x]-x_b)^2+([y]-y_b)^2}$. On peut noter qu'il serait facile d'intégrer l'imprécision de la balise ici, en remplaçant ses coordonnées par des intervalles.

Le résultat de l'algorithme SIVIA est présenté sur la figure 4.17 et correspond logiquement à une couronne.

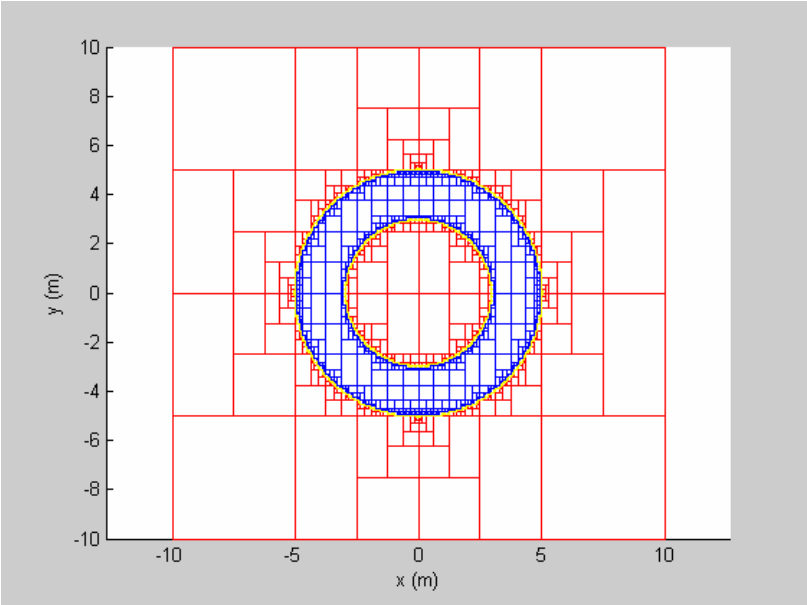


Figure 4.17. Localisation d'un robot avec la mesure [d]=[3 5].
La balise est à l'origine du repère.

Considérons à présent le problème de localisation hybride sous sa forme la plus générale (4.24) que l'on rappelle pour mémoire :

$$\begin{cases} x_k = f\left(x_{k-1}, u_k, p_f, \alpha_{f,k}, \gamma_k\right) \\ y_j = g\left(x_j, u_j, m_j, p_g, \alpha_{g,j}, \beta_j\right) \end{cases} \tag{4.54}$$

Dans ces équations, toutes les grandeurs peuvent être considérées comme des pavés en formulant la seule hypothèse que les phénomènes aléatoires sont bornés et de bornes connues.

On peut noter ici que les incertitudes paramétriques sont aisément prises en compte dans le problème.

Le mécanisme d'observation prédicteur/estimateur peut s'appliquer comme pour les méthodes bayésiennes (cf. figure 4.18). Dans son principe, l'étape de prédiction consiste à calculer l'image par f de la pose précédente augmentée de l'entrée, des paramètres et des bruits. L'étape d'estimation consiste à inverser l'ensemble des mesures et à l'intersecter avec l'ensemble prédit.

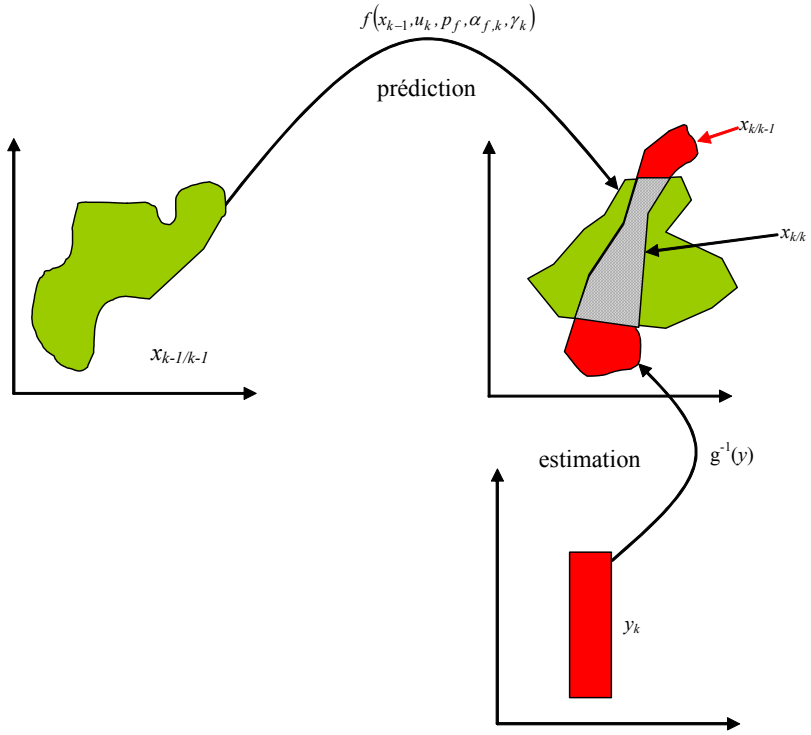


Figure 4.18. Observateur prédicteur/estimateur ensembliste.

Pascal Bourron dans sa thèse de doctorat de l'UTC a étudié cette approche.

Phase de prédiction

On suppose que l'ensemble $x_{k-1/k-1}$ est caractérisé par un pavé. Une solution est de calculer son image par une fonction d'inclusion. Ceci est en général très pessimiste. Une amélioration consiste à

- caractériser l'ensemble $x_{k-1/k-1}$ par un sous-pavage,
- calculer l'image de chaque petit pavé par une fonction d'inclusion,
- régulariser la liste des pavés obtenus pour re-fabriquer un sous-pavage ou un pavé unique.

Cette solution est moins pessimiste mais conduit à des calculs longs et en nombre indéterminé a priori, ce qui n'est donc pas adapté à une implémentation temps réel.

Une autre solution consiste à inverser le modèle d'évolution, ce qui est toujours possible en théorie si le modèle continu a été discrétisé en faisant une approximation d'Euler. En effet, $\dot{x} = f(x)$ peut se discrétiser comme $x_k \approx x_{k-1} + Te \cdot f(x_{k-1})$, ou bien, comme $x_k \approx x_{k-1} + Te \cdot f(x_k)$ ce qui est tout aussi approximatif. On obtient alors :

$$x_{k-1} \approx x_k - Te \cdot f(x_k) = f^*(x_k) \qquad (4.55)$$

Dans ce cas, pour estimer x_k à partir de x_{k-1}, on est ramené à un problème d'inversion ensembliste que l'on peut résoudre avec SIVIA.

Phase d'estimation

La phase d'estimation consiste à

- inverser la mesure ensembliste avec, par exemple, l'algorithme SIVIA,
- caractériser l'intersection de cet ensemble avec l'ensemble prédit.

Ces stratégies ont été présentées dans [CI 14].

3.6.3 Propagation de contraintes

Pascal Bouron dans sa thèse de doctorat[28] a testé plusieurs observateurs ensemblistes en simulation. Le mécanisme d'observateur prédicteur/estimateur a été validé sur des données réelles mais s'est avéré très lourd à mettre en œuvre (même avec un état de petite taille) et mal adapté au temps réel, du fait qu'il repose sur de l'inversion ensembliste.

La propagation de contraintes est une approche nouvelle en automatique, actuellement très populaire car très efficace en termes de temps de calcul.

3.6.3.1 Problème de satisfaction de contraintes

Les problèmes de satisfaction de contraintes (*CSP Constraints Satisfaction Problems*) ont été et sont très étudiés pour les domaines discrets, i.e. pour lesquels les grandeurs xi appartiennent à des ensembles discrets. Ils ont été ensuite étendus aux domains continus avec des pavés de IR^n [Jaulin, 02].

Soit un pavé $[x]$ de IR^n. Considérons m relations appelées contraintes qui relient les composante $[x_i]$ de $[x]$:

$$f_i(x_1, \ldots, x_n) = 0, \quad i = 1 \ldots m \tag{4.56}$$

L'équation (4.56) se réécrit sous forme vectorielle $f(x) = 0$.

Le problème qui consiste à rechercher le plus petit pave $[x]$ satisfaisant toutes les contraintes f_i correspond à un CSP noté $\mathcal{H}$, que l'on peut formuler comme suit :

$$\mathcal{H}.\ (f(x) = 0 \mid x \in [x]) \tag{4.57}$$

L'ensemble solution de $\mathcal{H}$ est

$$S = \{x \in [x] \mid f(x) = 0\} \tag{4.58}$$

3.6.3.2 Consistance

Un réel x_i appartenant à la i^{th} composante de $[x]$ est *globallement* consistant avec $\mathcal{H}$, si il est possible de trouver un vecteur x dans S l'ayant comme i^{eme} coordonnée :

$$\exists\, x_1 \in [x_1], \ldots, x_{i-1} \in [x_{i-1}], x_{i+1} \in [x_{i+1}], \ldots, x_n \in [x_n] \mid f(x_1, \ldots x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \ldots, x_n) = 0 \tag{4.59}$$

Un réel x_i appartenant à la i^{th} composante de $[x]$ est *locallement* consistant avec $\mathcal{H}$ si pour chaque contrainte f_i prise séparément, il est possible de trouver un vecteur x consistant avec f_i l'ayant comme i^{eme} coordonnée :

$$\forall f_i,\ \exists\, x_1 \in [x_1], \ldots, x_{i-1} \in [x_{i-1}], x_{i+1} \in [x_{i+1}], \ldots, x_n \in [x_n] \,/\, f_i(x_1, \ldots, x_n) = 0 \tag{4.60}$$

[28] Soutenue le 5 juillet 2002.

Un intervalle $[x]$ est globallement (respectivement locallement) consistant avec $\mathcal{H}$ si $\forall\, x \in [x]$, x_i est globallement (respectivement locallement) consistant avec $\mathcal{H}$. La consistance globale implique la consistance localle.

La figure 4.19 illustre ces notions : S_1 and S_2 sont les solutions de deux constraintes considérées separément, S est la solution du CSP.

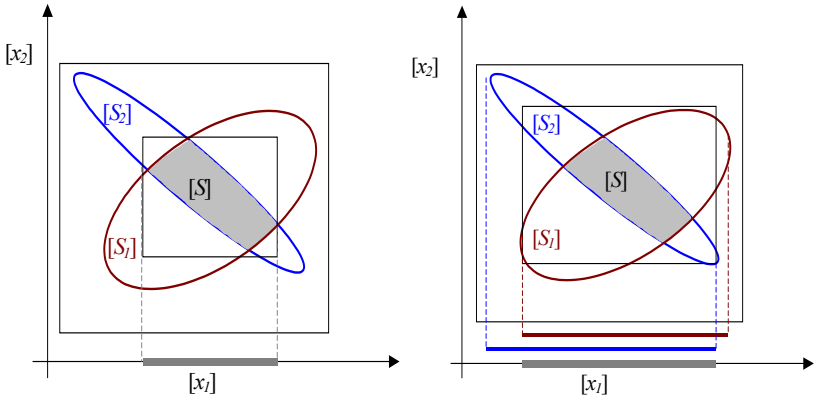


Figure 4.19. Consistance globale (à gauche) et locale (à droite).

3.6.3.3 Contracteurs

Contracter $\mathcal{H}$ signifie remplacer le pavé $[x]$ par un pavé $[x'] \subset [x]$ contenant toutes les solutions de $\mathcal{H}$ i.e. $S \subset [x']$. Un contracteur pour $\mathcal{H}$ est defini comme un operateur qui contracte $\mathcal{H}$.

Il existe de nombreux contracteurs [Jaulin et al, 01]. Un contracteur très à la mode est la propagation et rétropropagtion de contraintes primitives (*FBP Forward Backward Propagation*) [Kieffer et al, 02]. C'est un contracteur locallement consistant.

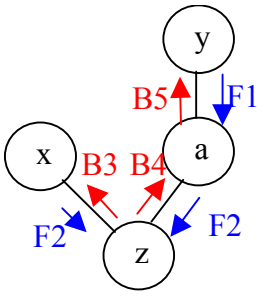
Prenons par exemple la constrainte $z=x.\cos(y)$. Elle est décomposée en contraintes primitives :

$$\begin{cases} a = cos(y) \\ z = x.a \end{cases} \qquad (1)$$

où a est une variable auxiliaire initialisée à [a] =[-∞,+∞].

Soient [cos] et [cos^{-1}] des fonctions d'inclusion de "cos" et "cos^{-1}". Le FBP fonctionne comme suit où l'ordre est important pour grantir l'optimalité :

% propagation	
$[a]=[a]\cap[\cos]([y])$	F1
$[z]=[z]\cap[x].[a]$	F2
% rétro-propagation	
$[x]=[x]\cap[z]/[a]$	B3
$[a]=[a]\cap[z]/[x]$	B4
$[y]=[y]\cap[\cos^{-1}]([a])$	B5



S'il existe des contraintes redondantes[29], le graphe des constraintes primitives contient des cycles. Dans ce cas, le FBP peut ne pas atteindre la consistance localle. Une solution consiste alors à appliquer l'algorithm de Waltz dont le principe est de répéter la propagation jusqu'à ce qu'aucun n'intervalle ne contracte plus. Cette stratégie n'est pas adaptée au temps réel et peut bloquer comme montré dans l'exemple de Jaulin [Jaulin et al, 01].

Cette stratégie a été mise en œuvre par Amadou Gning dans sa thèse et publiée dans [CI 7]. Elle a été comparée au filtrage de Kalman étendu dans [JI 1, CI 3] en considérant un horizon glissant de données. Les résultats sont plutôt bons, comme on le verra dans le paragraphe 4.3 page 97.

3.6.3.4 Vers une consistance globale

Comme nous l'avons vu, dès qu'un système est redondant, il existe des cycles dans le graphe des contraintes et la méthode de propagation de contraintes présentée précédemment ne permet pas de connaître le temps de calcul, car elle se base sur une boucle de type "répéter tant que ça contracte". Dans le meilleur des cas, cette approche ne permet d'atteindre qu'une consistance locale. Pour résoudre ces deux problèmes, nous proposons une nouvelle approche basée sur la notion de *domaine de consistance* illustrée ci-après.

Considérons le cas décrit par la figure 4.20 où $\mathcal{H}$ est un CSP à 2 variables (x, y) et constitué de 2 contraintes (une bande et une ellipse, ici). Pour la valeur de x_0 choisie, l'ensemble $D_F(x_0)$ des y tels que (x_0, y) soit globalement consistant avec $\mathcal{H}$ est représenté sur la figure 4.20. $D_F(x_0)$ représente donc le plus grand ensemble dans la dimension y tel que le produit cartésien de y avec x_0 donne un vecteur dans IR^n globalement consistant avec $\mathcal{H}$.

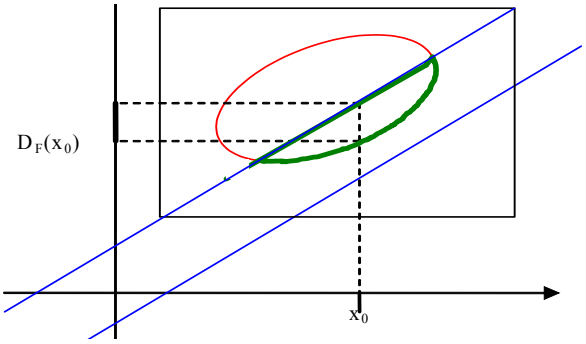


Figure 4.20. Domaine de consistance associé à la valeur x_0.

Considérons maintenant le cas décrit par la figure 4.21 où cette fois-ci, on cherche à caractériser pour un intervalle $[x]$ donné, l'ensemble des y pour lesquels $\exists\ x \in [x]$ tel que (x, y) soit globalement consistant avec $\mathcal{H}$. Cet ensemble, noté $D_F([x])$, est appelé domaine de consistance associé à l'intervalle $[x]$.

La caractérisation des domaines de consistance est une chose délicate pour laquelle nous n'avons pas trouvé de méthode systématique. Dans [JF 1, CI 5, CI 6], nous avons réussi à l'appliquer à des problèmes de fusion statique.

[29] ce qui est le cas dans les problèmes de localisation que l'on traite.

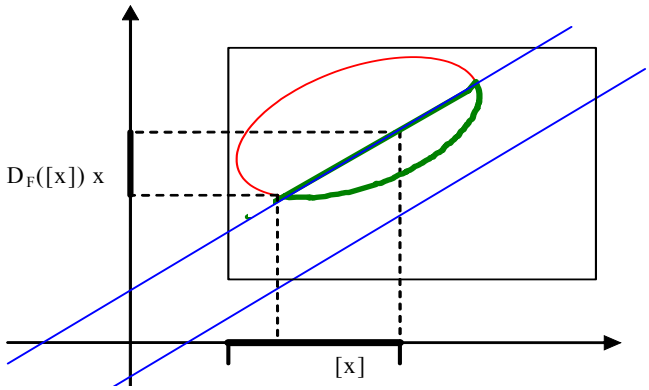


Figure 4.21. Domaine de consistance d'un intervalle.

4 LOCALISATION ABSOLUE PAR COUPLAGE LACHE DE GPS ET LOCALISATION A L'ESTIME

4.1 Principe

L'hybridation « GPS et localisation à l'estime » peut se faire à différents niveaux que l'on classe habituellement en deux catégories : *couplage serré* et *couplage lâche*.

Dans un couplage serré, on utilise les mesures brutes des différents capteurs. C'est l'approche que j'ai suivie dans ma thèse pour localiser en 3D un robot mobile à évolutions lentes avec le capteur SIREM, un odomètre et des inclinomètres. Elle a aussi été utilisée par exemple dans [Guivant et al, 00] pour hybrider un ladar avec des capteurs proprioceptifs et dans [Bouvet et al, 01] pour fusionner un capteur goniométrique 3D avec des techniques à l'estime. Dans le cas du GPS, les mesures brutes pouvant être utilisées sont les observables (cf. paragraphe 3.1.4 du chapitre 2 page 24). Par exemple, dans [Gaudin, 00], les observables utilisés sont les pseudo-distances des satellites.

Dans un couplage lâche (appelé aussi couplage faible), on utilise une solution de navigation calculée par un récepteur GPS. Cette méthode est plus simple d'approche car elle épargne au concepteur la gestion de la position des satellites, l'implantation de modèles de propagation d'onde dans l'atmosphère, l'utilisation des corrections différentielles, etc. De plus, le système GPS et le savoir faire des constructeurs étant sans cesse en évolution, le couplage lâche permet d'utiliser aisément une nouvelle technologie GPS. Par contre, le revers de la médaille tient au fait que les durées où la visibilité satellitaire est réduite doivent rester courtes. Ainsi, en cas d'évolution dans un canyon, cette méthode ne tire pas bénéfice de la visibilité de quelques satellites. Pour pouvoir implémenter une telle approche, la seule connaissance d'une solution de navigation calculée par le récepteur n'est pas suffisante. Il faut aussi prendre en compte des paramètres de qualité (rapport signal sur bruit, mode de fonctionnement, DOP) et des estimations de l'imprécision.

Supposons pour simplifier que l'antenne du récepteur soit fixée à la verticale du point *M* (cf. figure 4.1). L'équation d'observation est linéaire :

$$y = \begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ \theta \end{pmatrix} + \beta_i \tag{4.61}$$

Les caractéristiques (bayésienne ou ensembliste) de l'erreur d'observation β_i peuvent être estimées grâce aux informations de la trame NMEA GST souvent fournie par les récepteurs GPS. On obtient un problème de localisation hybride simplifié puisque le modèle d'observation est linéaire et qu'il ne fait pas apparaître les amers explicitement.

$$\begin{cases} x_k = f\left(x_{k-1}, u_k, p_f, \alpha_{f,k}, \gamma_k\right) \\ y_j = C \cdot x_j + \beta_j \end{cases} \tag{4.62}$$

Avec cette modélisation d'état, on peut appliquer un observateur comme expliqué au paragraphe 3.

J'ai étudié plusieurs des différentes approches du paragraphe 3 sur des données réelles acquises avec le véhicule Strada (figure 4.22). Les données ont été acquises et datées avec le système DBITE[30] par des calculateurs fonctionnant sous Windows (2000 professsionnel ou XP). Pour évaluer les performances des différentes méthodes, les essais ont souvent été effectués avec une bonne visibilité satellitaire et avec un système de référence. Les algorithmes ont été développés en Matlab.

Figure 4.22. Le véhicule expérimental STRADA avec 5 récepteurs GPS (3 Trimble et 2 Thales) sur le circuit de Satory en mars 2004.

4.2 Filtrage de Kalman étendu

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à un système de localisation très bon marché hybridant un GPS autonome à 1 Hz (un récepteur Motorola VP Oncore 8 canaux) et de l'odométrie différentielle utilisant uniquement les codeurs ABS des roues arrière à 50 Hz. La référence a été calculée en post-traitant en mode différentiel les données du GPS avec le logiciel Jupiter.

Un EKF a été développé selon l'algorithme 4.2 du paragraphe 3.5.2 et il a été testé sur un essai de 4,6 km de long avec un masquage du GPS débutant après 30 s (pour laisser le temps

[30] Qui sera présenté au chapitre 5.

au filtre d'estimer le cap) et allant jusqu'à la fin. Sur la figure 4.23, on constate que la divergence odométrique est de l'ordre de 10%, ce qui est, somme toute, très bon compte tenu de la simplicité du modèle utilisé. En outre, l'ellipse d'incertitude à 99% du dernier point montre que le calcul d'erreur est cohérent avec la réalité (la position DGPS, supposée représenter la réalité, est incluse dans l'ellipse).

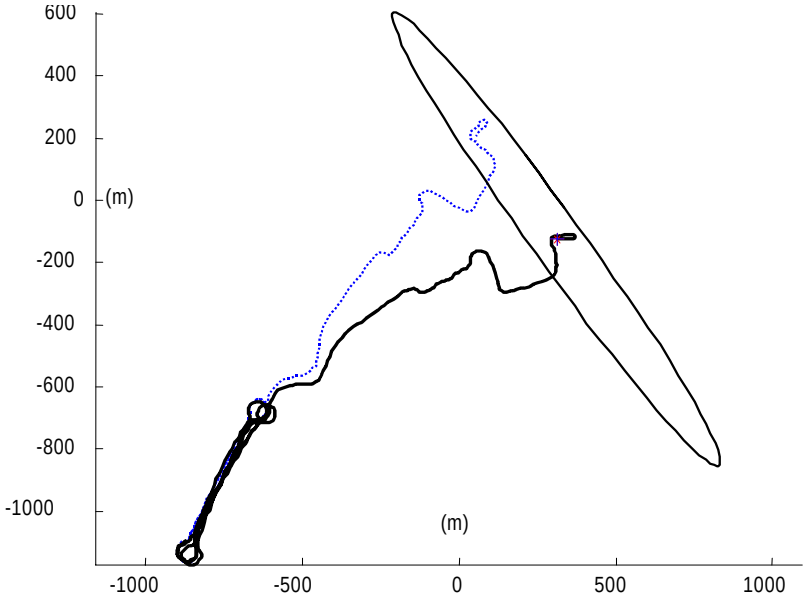


Figure 4.23. Trajectoire DGPS (pointillés), estimation odométrique seule et ellipse d'incertitude finale.

Pour apprécier plus en détails le comportement du filtre, la figure 4.24 reporte les estimations et les ellipses d'erreur à la fin d'un masquage de 10 s. On constate que les ellipses englobent convenablement les positions DGPS (en pointillés et supposées représenter les positions vraies). Quand le signal GPS redevient disponible, le filtrage diminue l'erreur par rapport à l'utilisation du GPS seul.

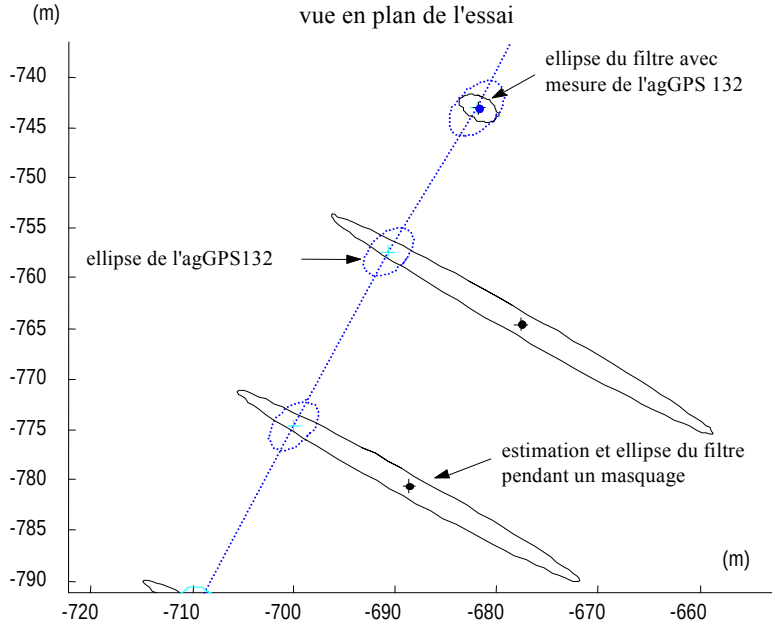


Figure 4.24. Illustration du comportement du filtre à la fin d'un masquage de 10 s.

Dans certains problèmes (en particulier pour vérifier l'intégrité d'un système), l'estimation de l'imprécision associée à une grandeur est un élément aussi important que l'estimation elle-même de cette grandeur. Dans les courbes des figures 4.25 et 4.26, on rapporte des erreurs d'estimation et des estimations d'imprécision issues de l'EKF.

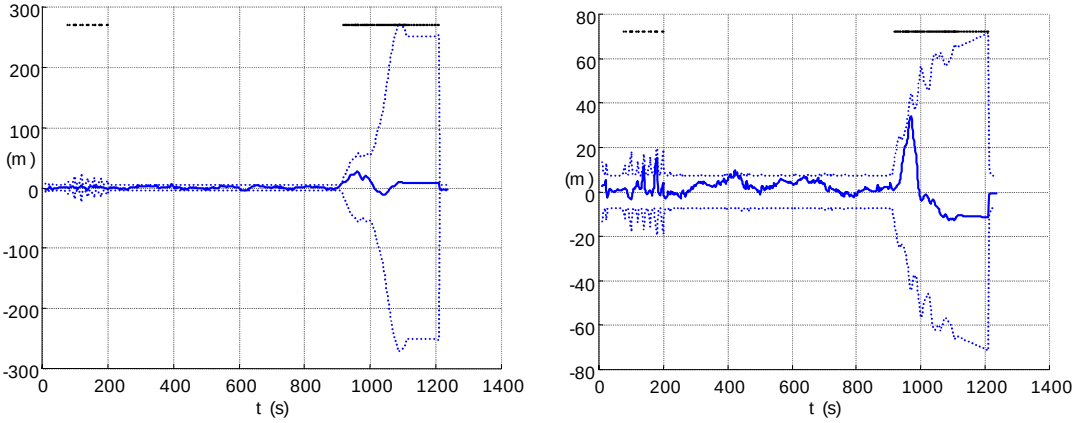


Figure 4.25. Erreurs en x et y 3 écarts types estimés

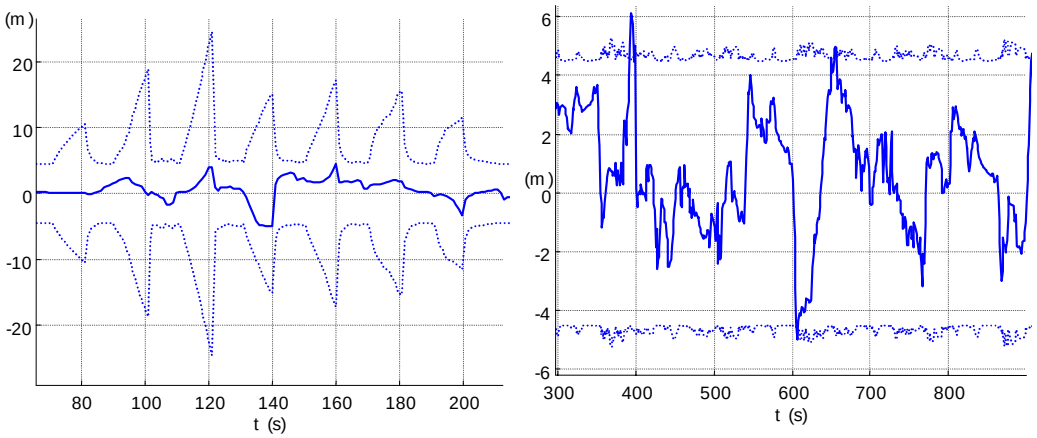


Figure 4.26. Erreur en x pendant de courts masquages GPS et quand le GPS fonctionne correctement

On constate que les erreurs effectives sont consistantes avec les erreurs estimées, ce qui tend à montrer que le modèle d'erreur gaussien et son calcul sont corrects. Enfin, on constate, sur la figure 4.27, que le filtre se comporte bien puisque les innovations sont centrées et puisqu'elles présentent des autocorrélations proches de la forme d'un Dirac (ce qui traduit le caractère d'un signal aléatoire blanc).

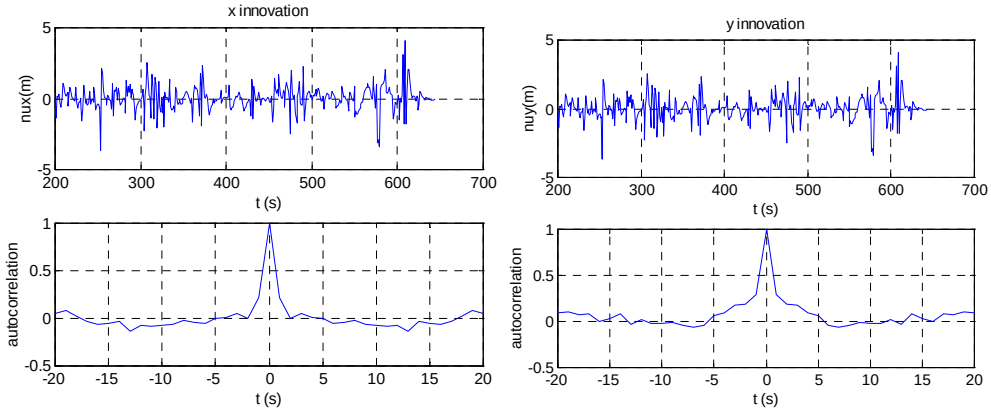


Figure 4.27. Innovations en x et en y et autocorrélations.

Remarques :

1) l'hypothèse de blancheur des erreurs GPS est souvent considérée comme peu valide. J'ai développé et identifié des **filtres formeurs** sur la base de modèles autorégressifs du premier et second ordre. Malgré le fait que l'identification semblait toujours produire de bons résultats, je n'ai jamais constaté de gain de performance en augmentant l'état avec les constantes de temps des modèles de bruit.

2) **Calibrage des coefficients odométriques**

Les automobiles utilisant des roues à pneus, le calibrage des coefficients de roues est fondamental pour obtenir de bonnes performances odométriques, surtout pour l'estimation du cap en odométrie différentielle. Le calibrage peut être réalisé en plaçant dans le vecteur d'état les coefficients des roues. N'étant identifiables que si la vitesse est non nulle, il est nécessaire de détecter les phases d'arrêt pour stopper le processus d'identification. Par ailleurs, la variation de ces coefficients étant très lente, un calibrage journalier et/ou tous les cent kilomètres, par exemple, est largement suffisant. Ce calibrage peut être fait avec un observateur à état étendu fonctionnant en parallèle avec l'observateur de position. Pratiquement, les données d'odométrie et de GPS sont enregistrées et, si une phase à vitesse non nulle de longueur "suffisante" (typiquement deux minutes) est détectée, alors le processus de calibrage est activé.

Considérons le problème de l'odométrie différentielle. L'état augmenté est $x = [x_c, y_c, \theta, r_{RR}, r_{RL}]^T$ et comme on calibre des constantes (par ailleurs assez bien connues), on choisit un modèle d'évolution de type constant par morceaux pour ces paramètres. Le bruit de modèle relatifs aux équations d'évolution de r_{RR} et r_{RL} est fixé à zéro, ce qui indique que les paramètres sont constants. Par contre, c'est en plaçant une variance initiale non nulle sur ces paramètres que le calibrage est rendu possible. Enfin, cette variance non nulle n'est pas appliquée dès le début du filtrage mais après quelques itérations de façon à ce que l'estimation du cap ait convergé.

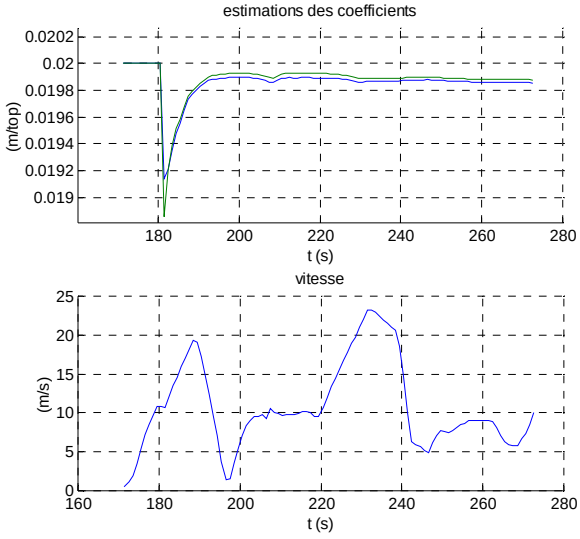


Figure 4.28. Estimation des coefficients des roues arrières sur une séquence de 1min 30s

La figure 4.28 présente les résultats de l'identification partant d'une valeur initiale de 2 cm/top. On vérifie que la séquence qui a servi à l'identification ne contient pas de phase

d'arrêt et que le processus de calibrage commence quelques secondes après le début du filtrage. La convergence est rapide (le temps de réponse est de l'ordre de quinze secondes) et stable malgré la présence de deux ronds-points dans la séquence (ce qui indique que la mesure de la voie *e* est correcte).

4.3 Filtrage ensembliste

Amadou Gning a étudié un algorithme de propagation de contraintes utilisant l'algorithme de Waltz (*FBP : Forward Backward Propagator*). Cet algorithme a été testé avec un récepteur GPS différentiel Omnistar (Ag132 de Trimble), les ABS des roues arrière et un gyromètre à fibre optique (KVH RD 2030, 30deg/s, sortie numérique à 100 Hz, résolution 7,3e-3°/s, biais 10e-5°/s, Bande Passante 50 Hz). Le système de référence était constitué d'un récepteur bi-fréquence Trimble post-traité avec une base locale à la piste de Satory (cf. figure 4.29)[31].

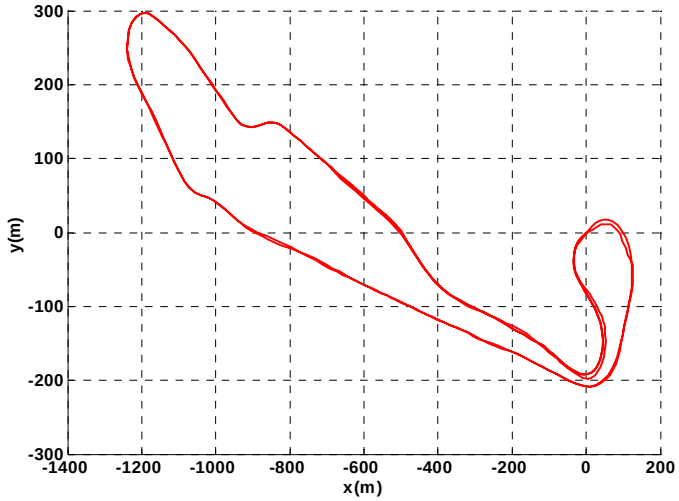


Figure 4.29. Piste de Satory.

Les erreurs en abscisse et en ordonnée en projection Lambert sont données sur la figure 4.30. Il est à noter que la valeur "0" appartient toujours à l'intervalle estimé par le FBP ce qui confirme le caractère garanti des résultats. A l'inverse, le filtre de Kalman est parfois trop confiant (ou inconsistant) comme aux instants 250 s (courbe de gauche) et 120 s et 400 s (courbe de droite). Pour se rendre compte plus précisément des inconsistances de l'EKF, il convient de prendre en compte l'inter corrélation en considérant des ellipses (cf. figure 4.31).

Enfin, la figure 4.32 illustre le fait que le FBP est capable de reconstruire une grandeur non observée directement : la longueur de l'intervalle d'estimation du cap reste petit.

Il faut retenir de cette étude que les observateurs ensemblistes peuvent fournir de bonnes performances puisque les erreurs d'observation de l'observateur ensembliste sont de l'ordre de grandeur de celles du filtre de Kalman étendu. La difficulté de mise en œuvre d'un FBP réside dans la quantification des bornes de bruits : une borne sous-estimée peut conduire à des inconsistances.

[31] Ce travail a été fait par D. Bétaille et C. Lemaire du LCPC de Nantes dans le cadre du projet ARCOS.

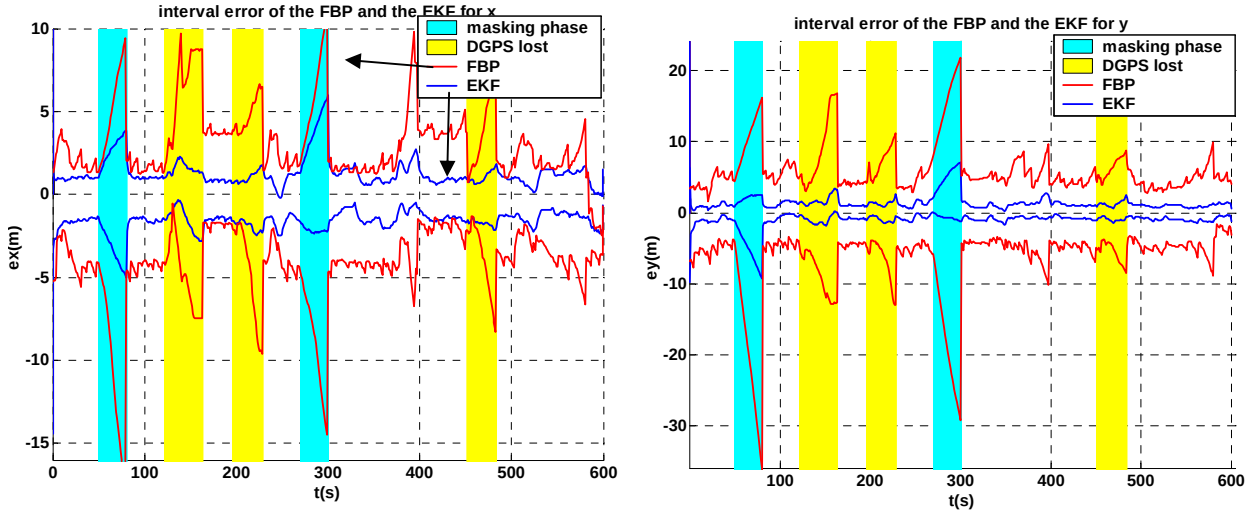


Figure 4.30. Comparaison des erreurs d'un EKF avec le FBP.

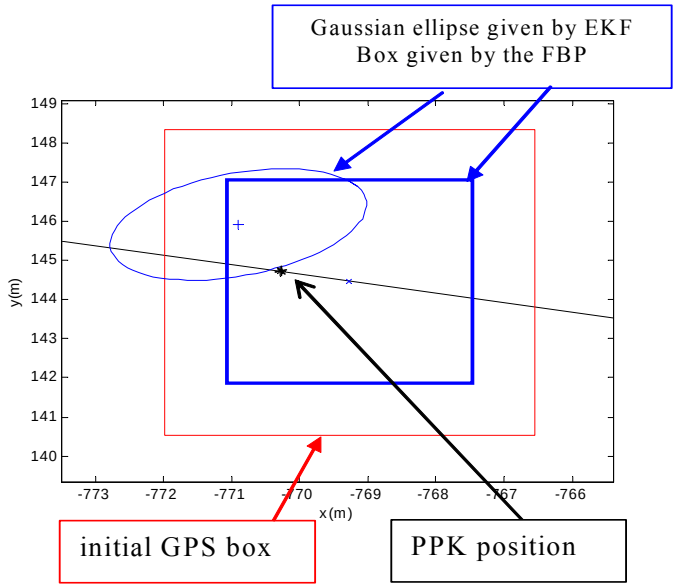


Figure 4.31. Illustration de l'inconsistance du filtre EKF à un instant donné.

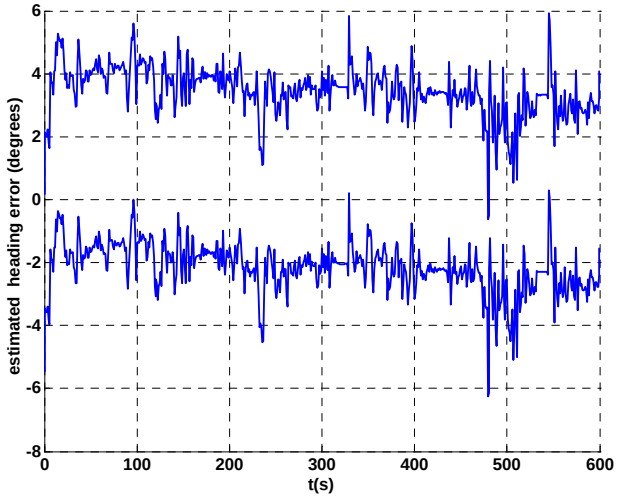


Figure 4.32. Erreur d'observation sur le cap faite par le FBP.

4.4 Prototype temps réel développé dans le projet ARCOS

Le filtre de Kalman présenté dans le paragraphe précédent a été prototypé sous Windows XP sous une forme synchrone à 5 Hz. Pour assurer une synchronisation précise du GPS avec les capteurs à l'estime, le signal PPS (*Pulse Per Second*) du GPS a été utilisé pour déclencher l'acquisition des données comme suit. Le récepteur a été utilisé en mode synchronisé l'obligeant à calculer une nouvelle solution de navigation à l'instant de chaque PPS. A l'arrivée d'un front montant PPS, les capteurs ABS et le gyromètre sont échantillonnés ; l'étape de prédiction est immédiatement exécutée de façon à fournir au plus vite l'état prédit. Lorsque les données GPS arrivent (avec du retard), l'étape d'estimation est réalisée (cf. figure 4.33). Le filtre fonctionne en mode "prédicteur" et présente donc un temps de latence très faible.

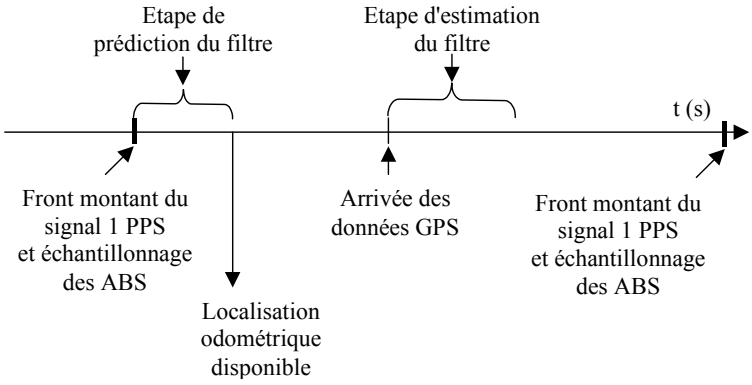


Figure 4.33. Chronogramme.

Comme la latence maximum du récepteur utilisé est de l'ordre de 150 ms, l'algorithme a pu être implanté à 5 Hz. Cet exemple illustre un autre intérêt de la forme "prédicteur/estimateur" qui permet donc de compenser des latences de mesures extéroceptives plus petites qu'une période d'échantillonnage. Le prototype a été évalué en août 2004 sur la piste de Satory. Les performances en temps réel sont du même niveau que celles des développements sur table. La figure 4.34 montre clairement que la latence est compensée puisque l'erreur axiale est du même ordre de grandeur que celle longitudinale. Ces résultats ont été publiés dans CI 1.

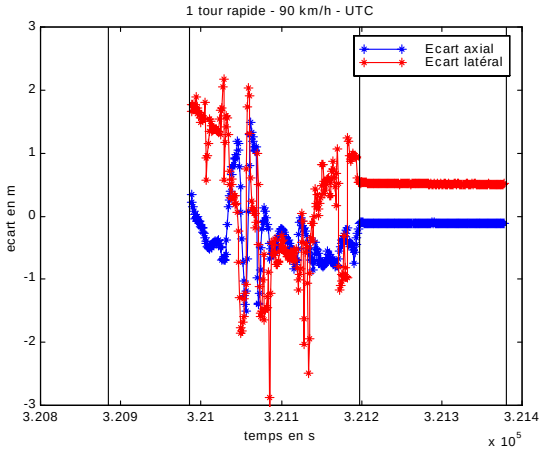


Figure 4.34. Erreurs axiale et latérale du prototype par rapport un récepteur GPS PPK (origine D. Bétaille, LCPC Nantes, extrait du rapport ARCOS T3.2)

5 LOCALISATION SUR CARTE

5.1 Problématique

Au paragraphe 4.4 du chapitre 3 (page 48), nous avons vu que les routes d'une base de données navigable sont représentées par des polylignes modélisant l'axe central des routes (cf. figure 4.35). A ces polylignes sont attachées des informations attributaires que l'on cherche à extraire pour réaliser une fonction d'assistance à la conduite ou pour gérer des amers visuels par exemple.

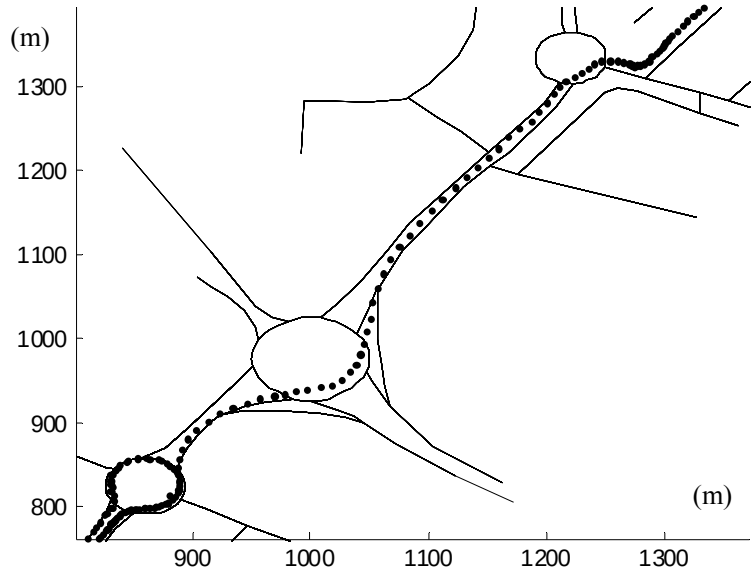


Figure 4.35. Illustration du problème de localisation sur carte
(essais réalisés à Compiègne avec un GPS différentiel et une carte IGN Géoroute).

Avec ce modèle de route, la localisation sur carte se définit de deux façons :

- dans un premier cas, se localiser sur la carte signifie déterminer le segment de la polyligne qui correspond à la route sur laquelle le véhicule se déplace.
- pour certains systèmes plus élaborés[32], la localisation sur carte correspond à la recherche du bon tronçon[33] puis à la détermination de l'abscisse curviligne par rapport au nœud de départ. Dans ADAS-RP, les attributs de la LADB (*Look Aside Data Base*) sont gérés de cette façon, ce qui évite de découper un tronçon à chaque fois qu'un attribut change.

Dans la suite de ce chapitre, c'est la première définition qui sera utilisée.

La localisation sur carte est souvent appelée *map-matching* ou *road-matching* dans la littérature. La très grande majorité des publications traitent de l'utilisation du GPS, souvent utilisé seul. Voici une classification des techniques dites *statiques* par [Bernstein, Kornhauser, 98] :

---

[32] comme le système ADAS-RP de la société NavTeQ – paragraphe 5.2 page 54.

[33] polyligne élémentaire entre deux nœuds.

- une simple projection sur le segment le plus proche si l'on ne connaît que la position,
- une projection sur le segment le plus proche avec prise en compte du cap et du sens de parcours du segment si l'on connaît la pose,
- une mise en correspondance *tronçon à tronçon* si l'on a mémorisé un morceau de trajectoire [Joshi, 02],
- une mise en correspondance tronçon à tronçon avec utilisation de la topologie si l'on connaît de façon certaine un point matché.

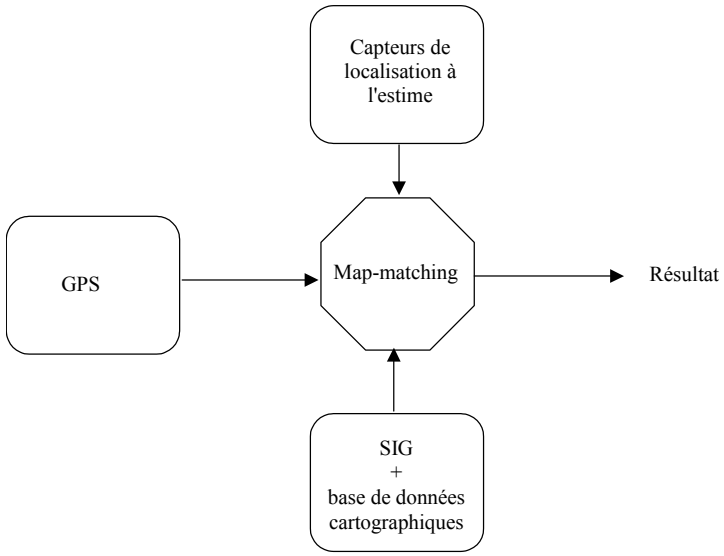


Figure 4.36. Le problème du map-matching.

Pour un véhicule équipé d'un récepteur GPS et de capteurs proprioceptifs du type de ceux que l'on a déjà vus, l'approche dynamique au problème de localisation sur carte consiste à rechercher une méthode récurrente tirant profit de la carte pour recaler les dérives de la localisation à l'estime.

Pour ce faire, je distingue deux approches :

- une localisation contrainte à rester "collée" au réseau routier : la carte contraint l'espace, la solution est forcément sur une polyligne.
- une localisation en absolu dans le référentiel de la carte puis une projection sur le segment le plus proche lorsque l'on recherche un attribut.

La première approche est celle utilisée par bons nombres de systèmes de navigation. La deuxième est celle que j'ai considérée dans mes travaux : elle permet de traiter sur un pied d'égalité les mesures GPS et cartographiques. Elle se prête donc mieux à une formulation du problème sous l'angle de la fusion de données.

Les approches dynamiques peuvent être classées en deux catégories : les approches *mono hypothèse* (principalement celles que j'ai étudiées) et les approches *multi hypothèses* (celles que je voudrais étudier dans les années futures) très populaires actuellement dans la littérature. Les travaux de Gustafsson [Gustafson et al, 02] en sont un exemple. Le problème est traité par filtrage particulaire avec un modèle d'observation non-linéaire (la distance au segment) avec comme objectif de faire converger la distance vers zéro. Dans cette méthode, les particules *se condensent* sur les routes les plus probables. S'il existe plusieurs nuages de probabilité significative, alors il y a plusieurs solutions au problème de la localisation.

Intéressons-nous dans la suite ce paragraphe à l'approche mono hypothèse qui a été étudiée dans la thèse de M. El Najjar. Elle appartient à la classe des méthodes bayésiennes [Zhao, 97].

La figure 4.37 dresse un synoptique de l'algorithme de base qui repose sur un mécanisme récurrent pour observer l'état.

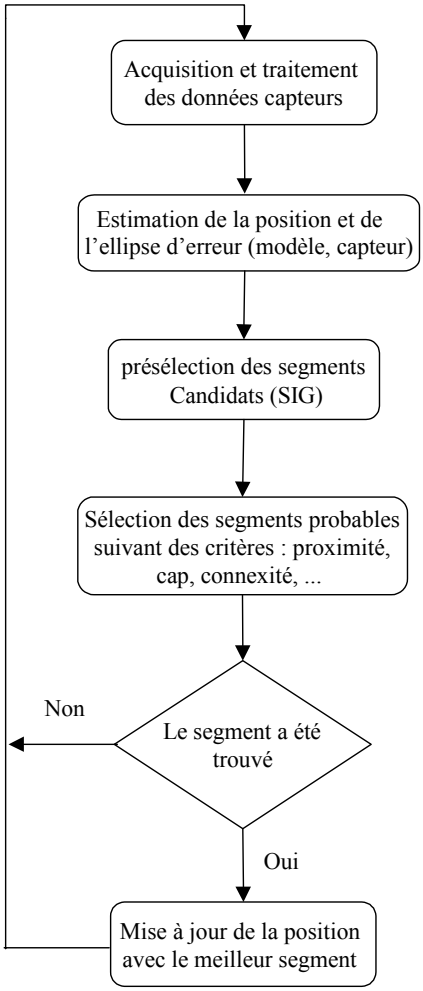


Figure 4.37. Synoptique d'un algorithme conventionnel de localisation cartographique mono-hypothèse bayésien récurent.

Après l'acquisition des données, la deuxième étape est classiquement réalisée en utilisant un filtre de Kalman. En plus de l'estimation de la pose, ce filtre fournit une matrice de variance-covariance associée au vecteur d'état qui représente une estimation de l'erreur faite par le filtre. A partir de ces valeurs, il est possible de calculer les paramètres de l'ellipse d'erreur (a, b et φ) où a est la longueur de la moitié du grande axe de l'ellipse, b la longueur de la moitié du petit axe et φ l'orientation du grand axe.

Lors de la troisième étape, le SIG effectue une recherche des données cartographiques. Généralement, l'ellipse obtenue précédemment est augmentée pour prendre en compte les erreurs de la carte. Elle définit une zone dans laquelle le SIG recherche les routes. Lors d'une implémentation sur un système temps réel, la phase d'extraction de route n'est pas effectuée à chaque étape : on gère une carte locale de routes (une mémoire *cache* de routes) qui est remise à jour lorsque le véhicule s'apprête à quitter la zone correspondante.

Après ces différentes phases, le système dispose d'un vecteur d'état (souvent position, cap et vitesse), d'une ellipse d'erreur et de segments candidats présélectionnés. A partir de ces éléments, différentes stratégies peuvent être développées pour choisir parmi ces segments le plus probable. Cette étape de sélection de routes est primordiale pour la stabilité de l'algorithme. Elle porte parfois le nom de *Road Reduction Filter* [Taylor et Blewit, 00].

Enfin, la dernière étape consiste à fusionner le meilleur segment avec la pose, si un bon segment a été trouvé.

5.2 Sélection de routes par fusion multi critère dans le cadre de la théorie des croyances

5.2.1 Principe

La sélection de route consiste à hiérarchiser les segments de façon à conserver le plus probable dans le cadre d'une approche mono hypothèse. C'est un problème pour lequel il existe de nombreuses heuristiques. Par exemple, Zhao [Zhao, 97] propose de ne retenir que les segments qui ont un cap proche de celui du véhicule en utilisant un simple seuillage. Ensuite, ils sont triés en fonction de leur distance à la position estimée. Enfin, si un segment n'est pas connexe au segment « matché » à l'étape précédente, on diminue sont rang dans la liste. A la fin de l'algorithme, le segment en haut de la liste est considéré comme le bon.

La sélection de routes avec la théorie des croyances[34] est certainement la contribution méthodologique la plus significative de la thèse de M. El Najjar pour manipuler incertitude et imprécision. *L'incertitude* sur une hypothèse représente le doute sur son existence réelle ou sur sa validité. *L'imprécision* représente l'erreur associée à une donnée fournie par une source d'information (par exemple un capteur) par rapport à la valeur vraie idéale. Elle modélise simplement une partie de l'imperfection du moyen de perception. On peut interpréter l'imprécision comme une évaluation de l'aspect quantitatif de cette imperfection et l'incertitude comme une représentation de l'aspect qualitatif.

5.2.2 Formulation du problème

Dans la théorie des croyances, la stratégie de l'affectation des masses est souvent très dépendante du problème traité et peut aussi bien utiliser une représentation probabiliste, une représentation floue ou simplement une grandeur physique comme par exemple une distance ou un angle. Dans la théorie des croyances, une fonction de croyance est une fonction qui attribue des masses de croyance à toutes les propositions tel que la somme des masses soit unitaire.

Soit un problème visant à rechercher le(s) segment(s) crédible(s) parmi $\boldsymbol{L}$ segments candidats Seg_1, Seg_2,…,Seg_L (après le filtre de présélection).

[34] La description de cette théorie est omise dans ce document : on peut trouver plus de détails dans [CI 12].

Le cadre de discernement est $\Theta = \{S_1, S_2, ..., S_L, S_*\}$ où

- S_i est l'hypothèse : *« le segment Seg_i est le segment sur lequel se situe le véhicule »*
- S_* est l'hypothèse « *le véhicule roule sur une route non cartographiée* ».

Le référentiel de définition déduit du cadre de discernement est :

$$2^\Theta = \{\varnothing, S_1, ..., S_m, ..., S_*, S_1 \cup S_2, ..., S_1 \cup S_{*,...}, S_1 \cup S_2 \cup S_m, ..., \Theta\}$$

Où par simplification de notation

- $S_1 \cup S_2 = \{S_1, S_2\}$
- $\Theta = \{S_1, S_2, ..., S_L, S_*\} = S_1 \cup S_2 \cup \ldots \cup S_L \cup S_*$.

Pour chaque segment, on définit une distribution de masses sur le sous-ensemble du référentiel de définition $N_i = \{S_i, \overline{S}_i, \Theta\}$ $i \in \{1, \ldots, L\}$ où $\overline{S}_i = \bigcup_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{L} S_k \cup S_*$ est la proposition « le véhicule peut se situer sur d'autres segments sélectionnés ou est sur une route non cartographiée » et où Θ est la proposition : « ce critère ne sait pas ». Cette façon d'affecter les masses est connue sous le nom *d'attribution de masses spécialisées*.

Nous avons utilisé deux critères géométriques pouvant être formulés comme suit :

1- plus un segment est proche de la position estimée, plus il est crédible et inversement,

2- plus un segment est colinéaire au cap du véhicule, plus il est crédible et inversement.

On remarquera que les critères sont entachés d'erreur et qu'ils peuvent être contradictoires.

Pour élaborer chaque attribution de masse ($m_{j,i}$), nous avons considéré une estimation de la pose, un segment (Seg_i) et un critère (C_j).

Illustrons cette approche avec le critère de proximité, basé essentiellement sur la mesure de la distance euclidienne entre la position estimée et chacun des segments candidats prélevés dans la base de données. L'erreur d'estimation de la position est quantifiée par une ellipse d'équi-probabilité. La position estimée *E* se situe au centre de l'ellipse.

Pour attribuer une masse à un segment candidat [P_1P_2], la procédure est la suivante :

Notons *d* la distance du segment au point $E : d = \left\| \overrightarrow{EP} \right\| = d_{EP}$. Le point *P'* se situe à l'intersection de la droite (*EP*) et de l'ellipse (cf. figure 4.38). La distance $d_{EP'}$ dépend de l'angle β que fait le vecteur $\overrightarrow{EP'}$ dans le repère propre de l'ellipse.

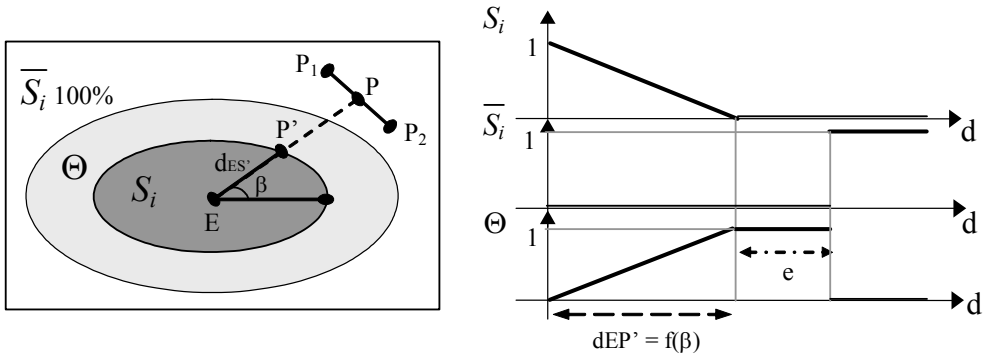


Figure 4.38. Affectation des masses pour le critère de proximité.

Pour quantifier le degré d'appartenance à l'ellipse d'erreur de position dans la zone $d < d_{EP'}$, on effectue une modélisation floue. La courbe supérieure de la figure 4.38 traduit la fonction suivant laquelle on affecte une masse à l'hypothèse S_i. En prenant le complément à un de la masse de S_i, on attribue une masse à la proposition Θ. Ensuite, la masse de Θ reste constante et unitaire entre $d_{EP'} < d < d_{EP'}+e$ pour prendre en compte l'erreur de la carte, l'erreur de la projection Lambert et l'erreur du changement de coordonnées. Enfin, la masse de la proposition $\overline{S_i}$ suit un échelon qui passe à un lorsque le point n'est pas dans l'ellipse augmentée de l'erreur *e*. Ceci traduit le fait que le segment en cours d'analyse a dépassé le seuil limite de sélection.

Le critère de cap n'est pas présenté dans ce document mais est détaillé dans JF 2.

5.2.3 Fusion et décision

Le résultat des attributions de masses spécialisées donne, pour une pose estimée, un ensemble de distributions de masses $m_{j,i}(\,)$:

$m_{j,i}(S_i)$: masse sur l'hypothèse : « *le segment Segi est le segment sur lequel se situe le véhicule selon le critère Cj* »

$m_{j,i}(\overline{S_i})$: masse sur la proposition : *« le véhicule peut se situer sur d'autres segments sélectionnés ou sur une route non cartographiée selon le critère C_j »*

$m_{j,i}(\Theta)$: masse sur la proposition : « *ce critère ne sait pas* ».

Pour les 2 critères choisis et pour *L* segments extraits de la base de données à l'aide du SIG pour une pose donnée, on dispose donc de $2*L$ distributions de masse. Afin d'aboutir à une décision, il est nécessaire de combiner ces distributions. Nous avons étudié deux méthodes de combinaison.

La stratégie locale consiste à appliquer une règle de décision à chacune des distributions de masse résultante de la combinaison des critères pour chaque segment. Nous avons élaboré une loi basée sur la décision idéale qui consiste à déterminer si oui ou non un segment est crédible. Cette stratégie de sélection est dite pessimiste ou prudente. En effet, dès qu'il y a un conflit important entre les 2 critères ou dès que la masse sur Θ (interprétée comme "peut-être est-ce ce segment ?") est importante, le segment est rejeté. Un segment n'est sélectionné que lorsque tout concorde localement (sans considérer les autres). Cette approche a été publiée dans [CI 10 et CI 11].

La stratégie globale (étudiée par C. Royère et V. Cherfaoui) consiste à fusionner à nouveau les masses issues de la fusion locale en gérant le conflit. Par rapport à la méthode locale, l'approche globale offre l'avantage de donner une fonction de croyance qui prend en compte l'ensemble des segments. Ainsi, la valeur avec laquelle on sélectionne un segment reflète l'ambiguïté (ou non) de la situation. D'autre part, la méthode permet de quantifier la croyance de ne pas être sur une route cartographiée et de détecter l'approche par le véhicule d'une route répertoriée. Par contre, la stratégie globale est plus complexe et donc son implémentation temps réel aussi. D'un autre côté, la méthode locale produit des résultats comparables en ce qui concerne la sélection de segments. Un seuillage du conflit permet d'éliminer les situations conflictuelles au sens de la contradiction des critères. Les situations

sont ambiguës lorsque plusieurs segments n'appartenant pas à une même route sont sélectionnés avec une crédibilité idéale[35]. Par contre, dans le cas d'un véhicule ne se situant pas sur une route cartographiée, il est impossible de savoir si des segments peu crédibles sont quand même à proximité.

5.2.4 Illustration de la méthode locale

La figure 4.39 présente une vue globale d'un essai effectué sur Compiègne. Cet essai a été fait sur une 2x2 voies et la séquence que l'on traite correspond aux instants où le véhicule quitte la route pour aller sur une bretelle de sortie. Il s'agit d'une situation difficile pour tout système de sélection de segments.

Figure 4.39. Vue en plan d'un essai sur le fond de carte "Géoroute" (les positions DGPS sont en pointillés).

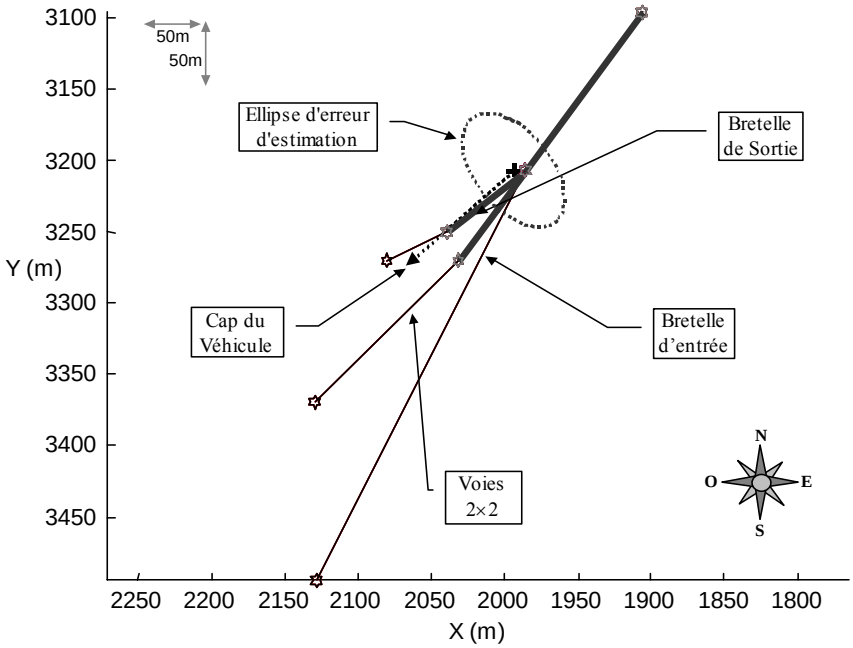


Figure 4.40. Résultats de la méthode à l'entrée de la bretelle (segments crédibles en traits forts).

[35] On verra au chapitre 5 comment c'est information peut être mise à profit pour calculer la confiance dans le positionnement.

Au début de la sortie, deux segments sont crédibles (segments en gras sur la figure 4.40) : l'un correspond à la 2x2 voies et l'autre à la bretelle de sortie. On remarque que le segment qui correspond à la bretelle d'entrée (situé de l'autre côté de la route) n'est pas sélectionné.

Plus loin (figure 4.41), la situation est toujours ambiguë car des segments de la 2x2 voies et de la bretelle de sortie sont crédibles. Par contre, quelques secondes après, l'ambiguïté est levée car les segments sélectionnés appartiennent tous à la même route (figure 4.42).

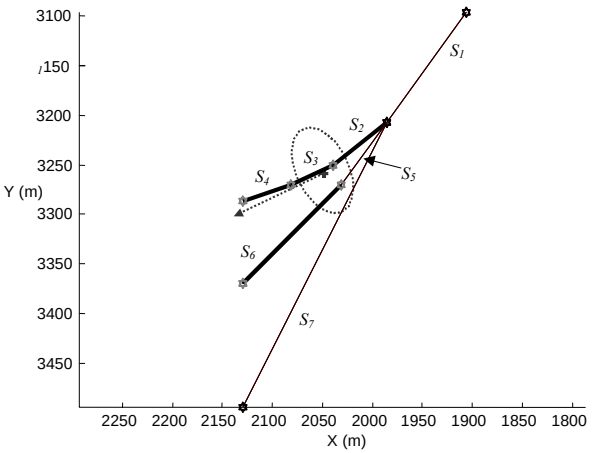


Figure 4.41. Résultats de la méthode dans la bretelle.

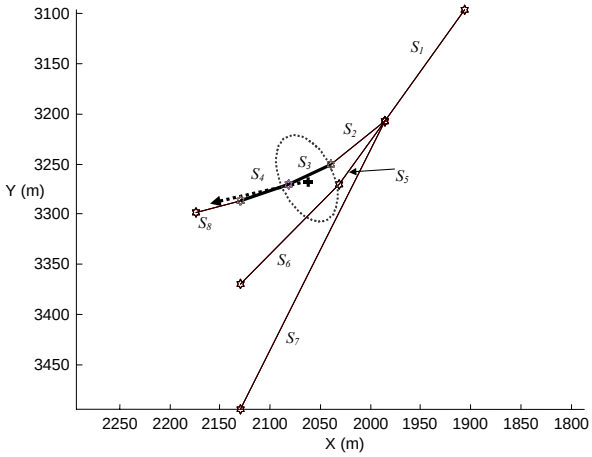


Figure 4.42. Le véhicule est positionné sur la bretelle.

La figure 4.43 montre l'évolution, en fonction du temps, de la croyance de chacun des segments.

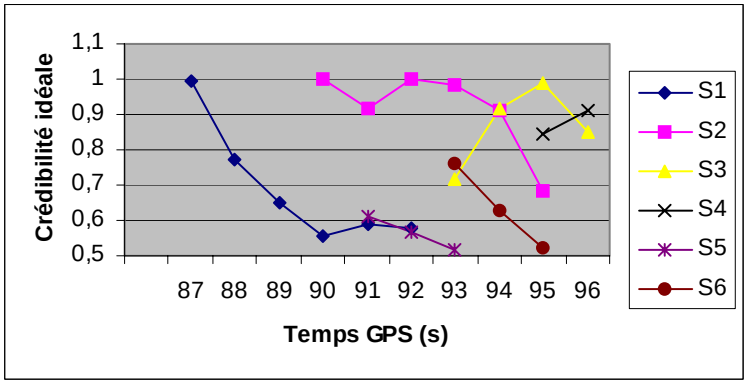


Figure 4.43. Evolution de la croyance des segments.

Compte tenu de ces résultats, on peut remarquer que la stratégie d'attribution des masses aux critères est correcte et que la méthode présente une bonne aptitude à détecter puis lever une ambiguïté.

5.2.5 Cas particulier d'un itinéraire pré calculé

Très souvent, il existe un itinéraire pré calculé. Si l'entité en charge de la conduite est un opérateur humain, il est très dangereux de supposer que le conducteur suit à la perfection l'itinéraire pré calculé. Par contre, s'il s'agit d'un robot (comme dans le projet Mobivip par exemple), on peut faire cette hypothèse. En effet, le module de planification de trajectoire définit un trajet sur lequel le robot doit s'asservir. Sous hypothèse que l'asservissement est stable, le robot suit l'itinéraire pré calculé.

Un itinéraire pré calculé simplifie considérablement le problème de deux façons principales :

- la sélection de routes est très simplifiée : il suffit de charger en mémoire au début de l'essai la séquence des routes qui définit une polyligne unique ne présentant des ambiguïtés que si le trajet planifié se recoupe,
- l'approche mono hypothèse de la localisation se trouve d'autant plus justifiable.

Cette méthode a été mise en œuvre dans le projet MobiVip (cf. chapitre 3 paragraphe 5.3 page 56). Dans ce cas, une méthode très simple de sélection de routes donne de bons résultats.

5.3 Localisation sur carte par filtrage de Kalman

Une fois la sélection de route effectuée, on peut appliquer un filtre suivant le paradigme du paragraphe 3.5.2, page 74. Limitons nous ici à présenter deux spécificités du filtrage dans ce cas particulier.

5.3.1 Observation cartographique

Les observations qui servent au recalage de l'odométrie sont les positions GPS, quand elles sont disponibles, et la cartographie quand au moins un segment est sélectionné. Dans l'approche mono hypothèse, c'est le segment le plus probable[36] qui est utilisé pour construire une *observation cartographique*. Nous avons opté pour la construction d'une observation ponctuelle (x_h,y_h) définie comme étant le point le plus proche du segment à la position estimée. Pour manipuler l'observation cartographique, il faut construire la covariance de cette observation, c'est-à-dire une ellipse sous hypothèse gaussienne.

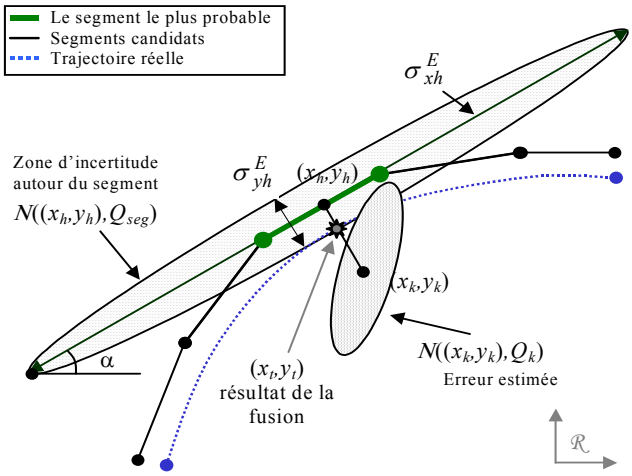


Figure 4.44. Approximation de la zone d'imprécision autour d'un segment à l'aide d'une ellipse.

Une façon de modéliser l'erreur de l'observation cartographique issue d'un segment consiste à prendre en compte d'abord les deux extrémités de ce segment. En effet, les erreurs absolues[37] et relatives[38] ne sont pas négligeables car, pour les meilleures cartes, elles sont

[36] ou le plus crédible ou encore le plus plausible selon le formalisme adopté.

[37] l'erreur absolue est l'erreur entre un point dans la base de données et la réalité du terrain.

respectivement de l'ordre de 5 mètres et de 1 mètre. Au regard de la discussion du chapitre 3 paragraphe 3.5 (page 45), ceci s'explique somme toute assez bien compte tenu de la diversité de l'origine des données. De plus, comme la voiture ne roule pas exactement sur le segment représentant le milieu de la route, il est alors plus rigoureux de tenir compte de la largeur de la chaussée. Enfin, un segment possédant la caractéristique d'avoir un capacité de recalage en latéral uniquement, on modélise l'imprécision par une ellipse au grand axe très allongé (cf. figure 4.44).

5.3.2 Sérialisation des observations

L'équation d'observation par rapport à l'état (x_c, y_c, θ) s'écrit :

$$y_k = \begin{bmatrix} x_k^{gps} \\ y_k^{gps} \\ x_k^h \\ y_k^h \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{c,k} \\ y_{c,k} \\ \theta_k \end{pmatrix} + Q_k^{\beta m} \tag{4.63}$$

où $Q_k^{\beta m}$ est la matrice de covariance de l'erreur de l'observation et (x_k^h,y_k^h) l'observation cartographique.

Supposons que la position fournie par le GPS et l'observation cartographique soient affectées par des perturbations non corrélées. La matrice de covariance de l'erreur d'observation peut s'écrire sous la forme d'une matrice diagonale par blocs, où :

- la partie supérieure correspond à la matrice de covariance de l'erreur de la mesure GPS,
- la partie inférieure à la matrice de covariance de l'erreur de l'observation cartographique.

$$Q_k^{\beta m} = \begin{pmatrix} \sigma^2_{x,gps} & Q_{xy,gps} & 0 & 0 \\ Q_{xy,gps} & \sigma^2_{y,gps} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2_{x,h} & Q_{xy,h} \\ 0 & 0 & Q_{xy,h} & \sigma^2_{y,h} \end{pmatrix}_k \tag{4.64}$$

Comme $Q_k^{\beta m}$ est une matrice diagonale, il est alors possible de séparer l'étape d'estimation du filtre de Kalman en deux étapes consécutives comme indiqué sur la figure 4.45. Cette approche a été publiée dans [CI 8].

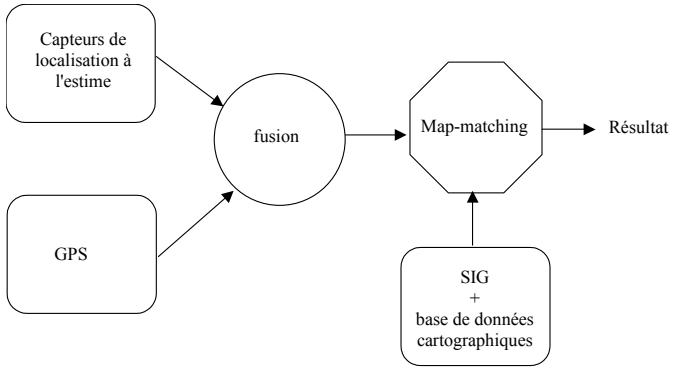


Figure 4.45. Synoptique de la méthode de localisation avec utilisation des segments.

[38] l'erreur relative est l'erreur de distance de deux points proches.

5.3.3 Illustration de la correction de la dérive odométrique grâce à la carte seule

Considérons une situation de masquage prolongé des signaux des satellites. Dans ce cas, intéressons nous à un filtre n'utilisant que les capteurs ABS pour calculer une estimation odométrique recalée par le segment le plus probable. Pour un essai en ville (donc avec beaucoup de routes et de situations ambiguës), l'observateur converge sur les 3,5 premiers kilomètres d'un essai de 4 km de long (cf. figure 4.46).

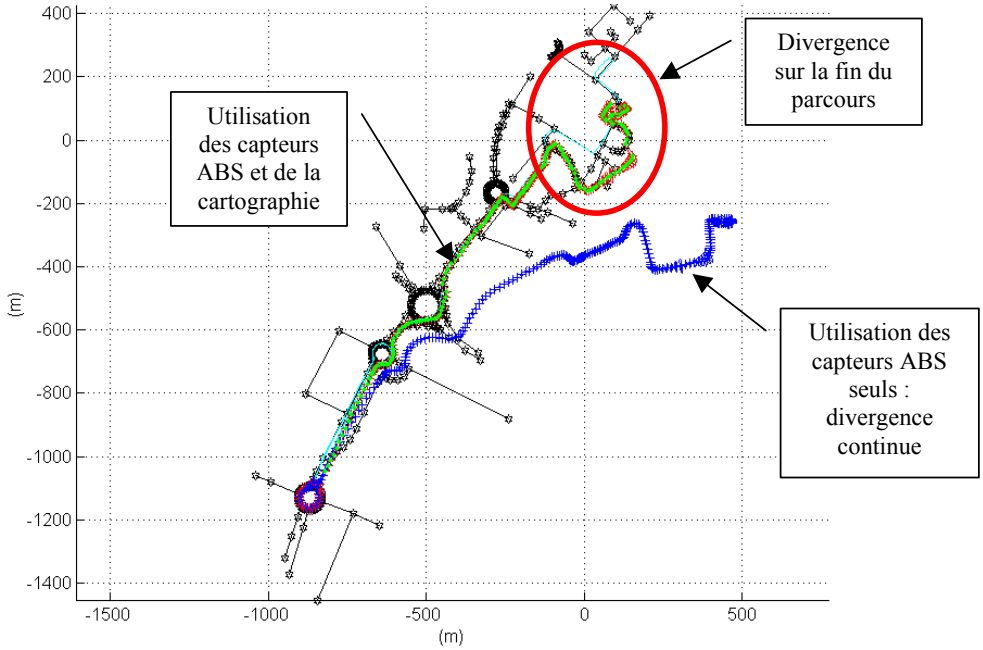


Figure 4.46. Exemple de résultat sans GPS. Base de données IGN Géoroute V2.

On conclut donc que la carte est à même de recaler l'odométrie pendant de courtes distances mais ne permet de se passer de GPS car lors d'une situation ambiguë le système peut se tromper de route. Le GPS reste donc le capteur extéroceptif essentiel nécessaire à la stabilité de la méthode.

5.3.4 Filtre à état augmenté pour prendre en compte l'erreur absolue de la carte

On a vu que la carte peut être utilisée comme une source d'information pouvant améliorer la localisation et même remplacer le GPS en cas d'indisponibilité de ce dernier. Cependant, la modélisation qui a été proposée précédemment suppose que les erreurs sont blanches et centrées. Cette hypothèse est trop simpliste car :

- les solutions GPS sont corrélées,
- le véhicule ne roule pas exactement sur le milieu de la route,
- la carte présente souvent une erreur absolue significative due à une cartographie ancienne.

Supposons que la superposition des phénomènes indiqués induise un décalage constant par morceaux. Puisque nous sommes dans un contexte d'observation d'état, l'observation du décalage suivant x et y peut être réalisée en ajoutant simplement δx et δy dans le vecteur d'état si ces paramètres sont observables (ce qui est le cas ici). Il s'agit d'identifier des biais à caractère déterministe.

Le nouveau vecteur d'état est de dimension cinq $X=[x, y, \theta, \delta x, \delta y]^t$.

Le modèle d'évolution du décalage est une constante. L'évolution est rendue possible en ajoutant un bruit blanc supposé indépendant de l'état et des autres bruits :

$$\begin{cases} \delta x_{k+1} = \delta x_k + \alpha_{\delta x} \\ \delta y_{k+1} = \delta y_k + \alpha_{\delta y} \end{cases} \tag{4.65}$$

On peut interpréter (δ_x, δ_y) comme les décalages (ou corrections) à appliquer aux positions GPS pour que celles-ci soient statistiquement centrées sur les arcs qui représentent les routes.

Cette simple stratégie améliore de façon significative les performances de l'algorithme. La figure 4.47 montre le décalage estimé tout au long du trajet de la figure 4.35. On peut remarquer que ce décalage à l'allure d'un phénomène basse fréquence. La plus grande valeur est de 13,2 mètres, ce qui est de l'ordre de grandeur de l'erreur absolue annoncée par le fournisseur de la base de donnée navigable.

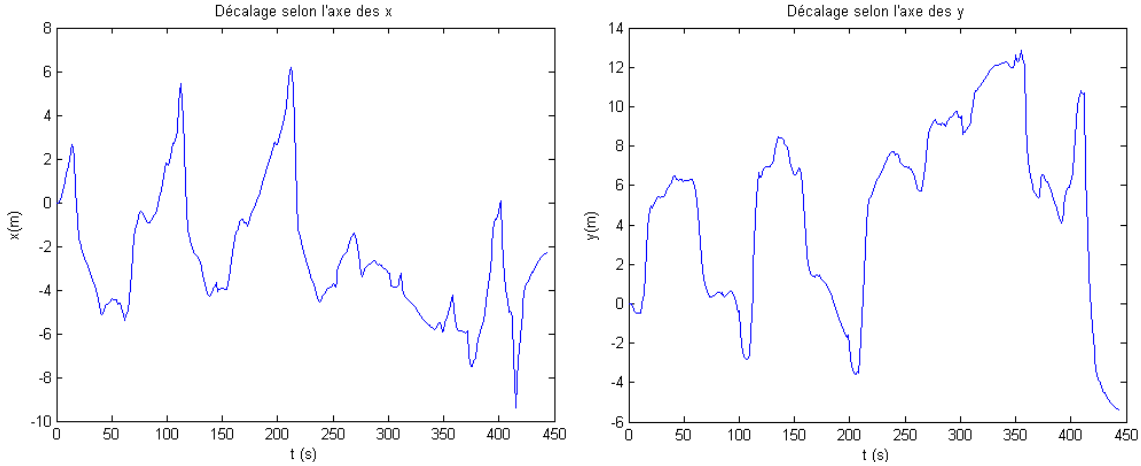


Figure 4.47. Estimation du décalage sur l'essai de la figure 4.35.

Ces résultats ont été publiés dans [JI 2].

6 LOCALISATION EN MILIEU URBAIN

En milieu urbain, le GPS souffre de masquages des satellites et de multi-trajets qui peuvent diminuer de manière significative la précision des positions fournies. Les conditions nécessaires pour avoir un nombre minimum de 4 satellites en vue directe sont rarement satisfaites à cause de bâtiments élevés notamment. De plus, une solution GPS hybridée avec des capteurs proprioceptifs peut dériver de façon inacceptable si les masquages des satellites durent trop longtemps. Ainsi, la communauté scientifique pense actuellement que, pour une localisation précise et fiable, l'utilisation de capteurs extéroceptifs complémentaires, comme des caméras ou des télémètres lasers, est nécessaire.

Dans le projet Bodega et dans la thèse de Maged Jabbour, nous étudions une méthode pour construire une carte, la mettre à jour tout en localisant le véhicule. Après un premier passage pendant lequel le véhicule est conduit manuellement, une première carte est construite même s'il y a des régions qui sont en masquage permanent. Puis, cette carte est mise à jour à chaque passage suivant.

Pour illustrer cette stratégie, nous considérons actuellement les trottoirs qui sont détectés par un télémètre laser vertical. Une représentation métrique/topologique de l'environnement est utilisée, dans laquelle les balises sont les bords de trottoir qui sont modélisés par des segments linéaires. Des vecteurs topologiques sont employés pour relier ces amers linéaires. Ils décrivent la certitude d'existence de chaque segment.

6.1 Cartographie et localisation simultanées

La technique qui consiste à localiser un robot et construire une carte de son environnement est connue sous le nom de SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*). L'idée de base repose sur la manipulation explicite de l'imprécision géométrique des amers. Dans [Dissanayake et al, 01], il est montré qu'un filtre de Kalman généralisée peut théoriquement résoudre le problème du SLAM sous l'hypothèse de perturbations blanches et gaussiennes. Le SLAM possède diverses implémentations dans différents environnements. Des travaux récents utilisent des filtres particulaires pour traiter les problèmes de multi modalité.

Les cartes peuvent être métriques ou topologiques. Les cartes métriques contiennent des balises ou des amers avec leurs coordonnées globales, tandis que les cartes topologiques représentent l'environnement par des graphes où les noeuds correspondent à des endroits significatifs et les arcs aux différents chemins ou transitions possibles entre ces endroits. Dans des approches hybrides, des cartes topologiques sont augmentées avec de l'information métrique.

Intéressons nous dans la suite à l'utilisations d'amers linéaires : des trottoirs.

6.2 Localisation par cartographie de trottoirs

6.2.1 Philosophie de la méthode

La méthode que nous étudions se base sur l'utilisation d'un télémètre laser pour bénéficier de passages successifs dans les mêmes secteurs afin d'affiner la localisation du véhicule. Nous supposons que le véhicule est également équipé d'un récepteur GPS différentiel, d'un gyromètre à fibre optique et d'un odomètre. La fusion du GPS et des capteurs proprioceptifs peut atteindre un niveau élevé de performance si la visibilité satellitaire est bonne et s'il n'y a aucun multi-trajet. Notre point de vue est de dire que le GPS doit être employé quand il est bon et cohérent avec les autres capteurs. En cas de doute, la solution navigation courante est rejetée. Évidemment, une telle stratégie rend l'utilisation du GPS plus fiable mais plus intermittentte. Le télémètre est précisément employé pour résoudre ce problème.

Lors du premier passage et simultanément avec le processus de localisation, le robot crée un modèle du monde : une carte de l'environnement. Pendant cette étape, la localisation n'est pas améliorée par l'utilisation du télémètre. Ainsi, pendant un masquage GPS, le véhicule navigue à l'estime avec ses capteurs proprioceptifs.

Le modèle du monde est mis à jour à chaque passage suivant, simultanément avec le procédé de localisation. Nous pensons (et nous verrons) que les contraintes imposées par

l'utilisation du télémètre associé à la carte rendent la précision de la localisation meilleure, puisqu'une approche de type SLAM est utilisée. En d'autres termes, le télémètre aide en corrigeant la dérive de la localisation à l'estime quand le GPS est défaillant. Plus le véhicule navigue dans le même secteur, plus la précision de la localisation est bonne.

Par ailleurs, on sait que la dérive latérale d'une localisation à l'estime est plus importante que la dérive longitudinale. Ainsi, le télémètre doit être utilisé pour détecter des amers latéraux autant que faire se peut. Comme dans les milieux urbains les trottoirs présentent naturellement cette propriété, le télémètre a été installé verticalement pour les détecter (voir figure 4.48). Puisque la portée du télémètre peut atteindre facilement plusieurs mètres, le véhicule peut naviguer dans le même secteur avec une distance variable au trottoir. Il n'est pas obligé de suivre exactement la même trajectoire.

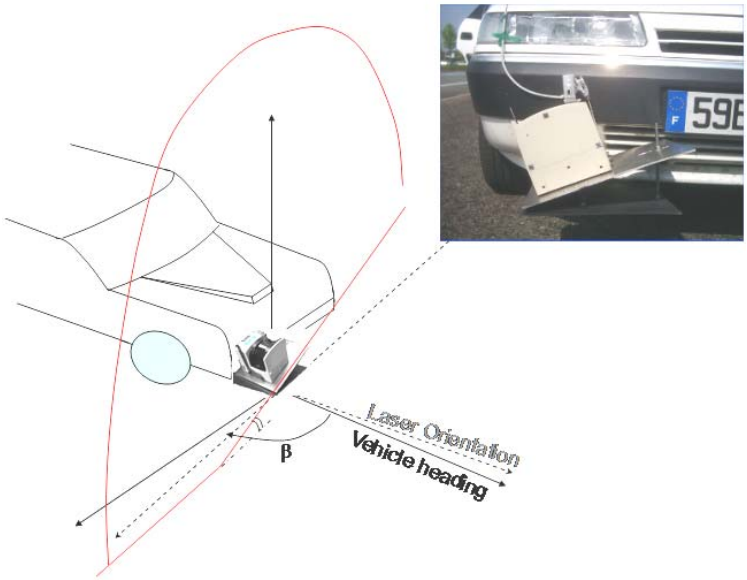


Figure 4.48. Vue du télémètre installé à l'avant droit du véhicule.

Il est à noter que notre objectif principal est d'étudier la faisabilité de la méthode. Le télémètre peut être remplacé par d'autres capteurs extéroceptifs comme des caméras ou des capteurs à ultrasons.

6.2.2 Fonctionnement

6.2.2.1 Construction d'une carte initiale

Afin de construire une carte initiale de l'environnement, il est nécessaire de connaître une estimation continue de la pose du véhicule, même si elle est imprécise. Puisque le GPS seul ne peut pas fournir en continu cette estimation dans des environnements urbains, le véhicule est localisé en fusionnant les informations d'un odomètre, d'un gyromètre et du GPS. Si le signal de GPS est indisponible ou incohérent, le modèle d'évolution permet de naviguer à l'estime pure.

La fusion du GPS et de l'odomètre est effectuée par un filtre de Kalman étendu selon le mécanisme de prédiction/estimation que nous avons vu. Quand une position GPS est disponible, une correction de la pose prédite est effectuée après avoir vérifié la cohérence de cette position.

6.2.2.2 Représentation de la carte

Considérons une carte composée d'un ensemble de segments représentant les bords de trottoir. Chaque segment est modélisé par ses deux extrémités et constitue un amer linéaire. Dans beaucoup de travaux, les amers sont modélisés par des points et sont directement observables par les capteurs extéroceptifs. Dans le problème considéré ici, les amers sont observés indirectement en raison de leur nature linéaire et à cause du montage du télémètre. L'observation est liée par une fonction non linéaire aux coordonnées des extrémités du segment sélectionné.

Soit P le vecteur constitué de l'association des coordonnées de tous les segments. Chaque extrémité peut appartenir à deux segments successifs. La connectivité entre les segments successifs est représentée par un vecteur de certitude d'existence. La représentation de la carte est hybride : la représentation géométrique provient des coordonnées des extrémités des segments du vecteur P et la nature topologique provient du vecteur de certitude d'existence qui modélise les raccordements entre les segments successifs.

La carte des amers peut être enregistrée dans un SIG comme nous l'avons vu au chapitre 3.

6.2.2.3 Construction de la Carte

Dans cette étape, la carte de l'environnement est construite en utilisant l'estimation de la pose du véhicule et les données segmentées du télémètre.

Soient (x_T, y_T) les coordonnées courantes du centre T du laser (figure 4.49) :

$$\begin{cases} x_T = x_M + t_x.\cos\theta + t_y.\sin\theta \\ y_T = y_M + t_x.\sin\theta - t_y.\cos\theta \end{cases} \tag{4.66}$$

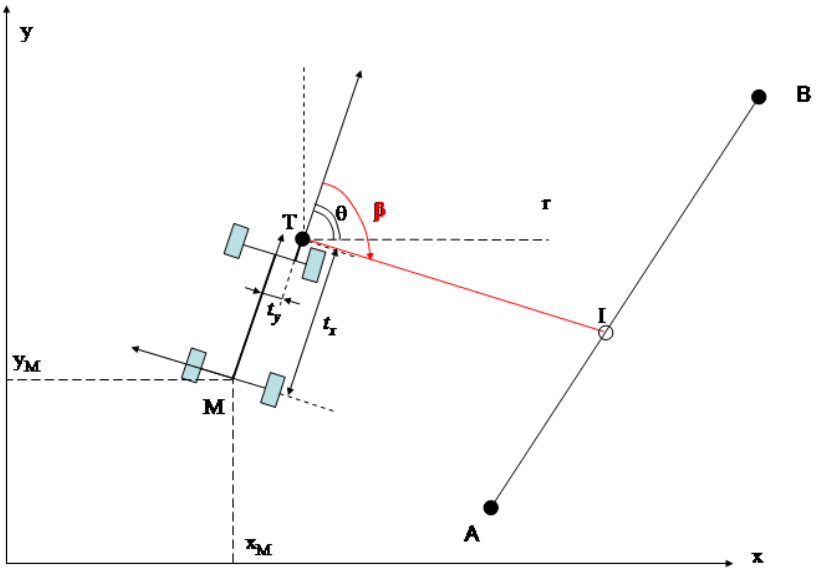


Figure 4.49. Modèle du véhicule avec l'observation télémétrique ; la valeur calibrée de l'angle β est de 88°26'.

Nous avons développé un algorithme pour détecter un trottoir et la distance à ce trottoir, s'il existe. Il repose sur une approche déterministe qui cherche à détecter des discontinuités de pente dans le signal. Cet algorithme est robuste à des données aberrantes à cause de personnes

ou voitures garées entre le véhicule et les bords de trottoirs. Tant que les points (x_I, y_I) sont contigus, ils sont bufférisés. Quand une discontinuité apparaît, la séquence est segmentée. La discontinuité peut être due, par exemple, à l'absence de trottoirs ou à un obstacle. Le module de segmentation renvoie un segment ou un ensemble de segments, suivant le niveau de la segmentation spécifié dans l'algorithme.

L'étape finale consiste à estimer la probabilité des liens topologiques entre les segments. Par exemple, des voitures peuvent être garées entre le trottoir et le véhicule. En quittant leur parking, ces voitures feront réapparaître le trottoir. En outre, la détection des bords de trottoirs peut être fausse. Des régions n'ayant pas de trottoirs et celles contenant des obstacles sont traitées de la même façon : une certitude d'existence nulle y est associée. Le vecteur de certitude d'existence (cf. figure 3.6 du chapitre 3) est construit au fur et à mesure de l'étape de la construction de la carte en même temps que le vecteur d'état contenant l'ensemble des coordonnées des segments. Les liens topologiques entre les segments successifs sont déduits du vecteur de certitude.

6.2.2.4 Localisation simultanée et mise à jour de carte

Tant que le véhicule navigue dans un secteur connu, la mise à jour de la carte est effectuée simultanément. L'algorithme de SLAM utilisé est basé sur un filtre de Kalman étendu et suit le paradigme de prédiction/estimation.

Le vecteur d'état global X est composé du vecteur d'état du véhicule $X_v = [x_k, y_k, \theta_k]^T$ et des coordonnées des segments linéaires de la carte notés p_i. Nous avons ainsi :

$$X = \begin{bmatrix} X_v & p_1 & \dots & p_q \end{bmatrix}^T \tag{4.67}$$

L'évolution de l'état est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \mathrm{X}_{v,k+1} \\ \mathrm{p}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f() & 0_{n,2q} \\ 0_{2q,n} & I_{2q,2q} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \mathrm{X}_{v,k} \\ \mathrm{p}_k \end{bmatrix} + \alpha_k \tag{4.68}$$

Où $f()$ est le modèle d'évolution à l'estime, $I_{2q,2q}$ est la matrice d'identité de dimension 2q, (les balises sont supposés statiques), n est la dimension du vecteur d'état du véhicule. $0_{2q,\,n}$ est la matrice nulle de dimensions ($2.q$, n).

Grâce aux capteurs extéroceptifs, il est possible d'estimer la carte et la pose de véhicule. Les observations sont les coordonnées fournies par le GPS et la distance au bord du trottoir :

$$Y = \begin{bmatrix} x_{GPS} & y_{GPS} & r_{laser} \end{bmatrix}^T \tag{4.69}$$

Comme il y a deux sources distinctes d'observation, il est possible de sérialiser les étapes de mise à jour, sous l'hypothèse que les bruits sont non corrélés. Si les données GPS sont présentes et cohérentes, une première étape de mise à jour du vecteur d'état global est effectuée. Ensuite, si des données du laser correspondent à un bord de trottoir et si elles sont valides et cohérentes, alors une deuxième étape de mise à jour est réalisée.

Si les traitements télémétriques bas niveau détectent des données valides correspondant à un bord de trottoir, une étape de mise à jour peut alors avoir lieu. Le segment sélectionné de la carte est le segment le plus proche. Pour être un vrai bord de trottoir, ce segment doit également avoir une certitude d'existence non nulle (supérieure à un seuil).

Supposons que le bon segment [AB] ait été extrait de la carte. L'observation est la distance télémétrique *r* au bord de trottoir. *r* peut être prédite par :

$$r_{pred} = \sqrt{(x_T - x_I)^2 + (y_T - y_I)^2} \tag{4.70}$$

Où (x_T, y_T) sont les coordonnées prédites du centre du laser et (x_I, y_I) sont les coordonnées prédites du point d'intersection du faisceau laser avec le segment [AB] (voir la figure 4.49).

Quand une observation valide du télémètre est disponible, il est important de vérifier sa cohérence. Le même test appliqué aux données GPS est utilisé ici.

La certitude d'existence des segments de la carte est maintenue en utilisant des compteurs bornés associés à chaque segment. Il y a une analogie avec la méthode exposée dans [Dissanayake et al, 01] pour contrôler ce qui est appelé "qualité". La valeur du compteur est incrémentée à chaque fois que l'algorithme de sélection de segment associe une observation télémétrique au segment concerné. Elle est décrémentée si le module de sélection de segment signale qu'il devrait y a une observation du trottoir et qu'il n'y en a pas.

6.2.3 Illustration des performances de cette approche

Des expériences ont été réalisées à Compiègne en utilisant un télémètre SICK LMS291 à 75 Hz avec une résolution d'un degré, un gyromètre KVH à fibre optique, une entrée odométrique et un GPS Trimble AgGPS 132 fonctionnant avec une correction différentielle géostationnaire (Omnistar).

Afin de calculer l'erreur d'estimation, un récepteur PPK GPS (un Trimble 5700) a été utilisé avec un logiciel de calcul hors ligne (*Trimble Total Control - TTC*). Pour simplifier les calculs, les Ag132 et les 5700 récepteurs ont partagé la même antenne. Le logiciel TTC utilise les données brutes du récepteur 5700 enregistrées à 1 Hz pendant les acquisitions. Afin d'obtenir une meilleure précision, les éphémérides précises SP3 ont été téléchargées de l'IGS (*International GNSS service*). Nous avons également récupéré les données ionosphériques précises (IONEX). Pour le calcul d'erreurs, seules les positions PPK avec une précision subcentimétrique (connues grâce à l'observation des résidus) ont été utilisées comme positions de référence. Puisqu'il est important de distinguer les erreurs latérales et longitudinales, les calculs ont été réalisés dans un repère de Frenet comme montré sur la figure 4.50.

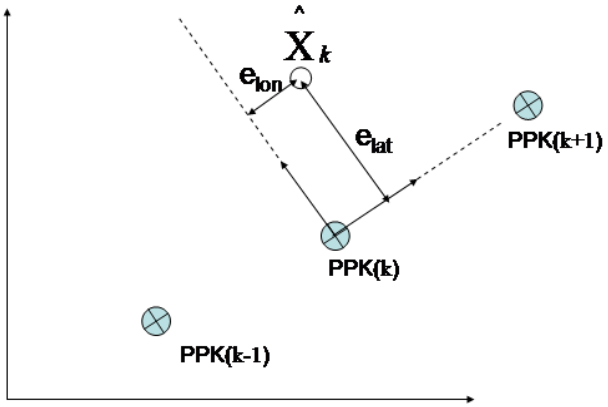


Figure 4.50. Calcul des erreurs latérale et longitudinale.

Comparons un système de localisation utilisant uniquement le GPS et des capteurs proprioceptifs au système complet qui utilise en plus le télémètre laser.

La figure 4.51 montre la carte et les positions successives du véhicule après 4 passages. Pour plus de réalisme, la carte initiale a été construite à une date différente des autres essais. Les segments correspondant aux bords de trottoirs sont tracés en trait fin. Les positions estimées du véhicule sont tracées en gras. Le secteur gris ombragé correspond à la zone où le GPS n'était pas disponible. Dans cet essai, la vitesse moyenne était d'environ 7 m/s.

La figure 4.52 montre les erreurs longitudinales et latérales des algorithmes de localisation dans le repère de Frenet. La courbe fine représente les erreurs en mètres de l'algorithme de localisation qui utilise le GPS couplé avec les capteurs proprioceptifs. Celle plus épaisse représente l'erreur de localisation du système complet. Le signal carré noir correspond aux masquages GPS : quand sa valeur est égale à 2, il signifie qu'un masquage GPS se produit.

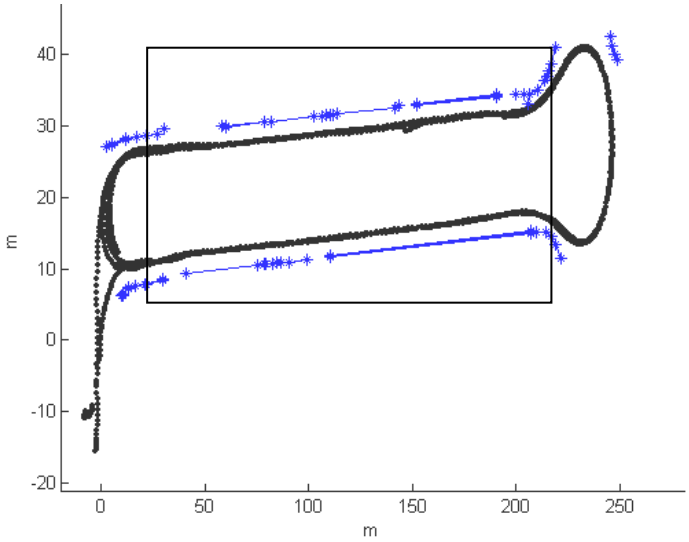


Figure 4.51. Localisation avec le système complet (le rectangle gris correspond à la zone sans GPS).

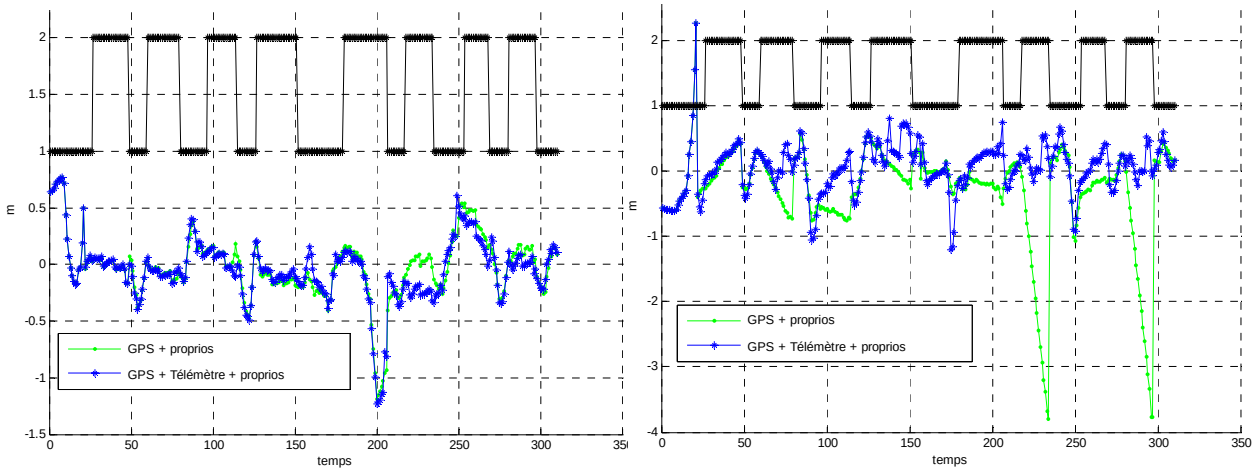


Figure 4.52. Erreurs longitudinale et latérale de localisation.

On peut remarquer que les deux méthodes ont des performances similaires dans la direction longitudinale. Au contraire, le système complet se comporte mieux dans la direction latérale. Ces résultats indiquent clairement que, quand il y a un masquage GPS, l'algorithme qui emploie le concept de SLAM est très robuste à la dérive latérale grâce à la fusion du

télémètre avec la carte et les capteurs proprioceptifs. L'erreur latérale dépasse rarement un mètre (ce qui est très bon), alors que l'algorithme de (GPS + capteurs proprioceptifs) peut dériver de manière significative pendant les masquages GPS. Quand le GPS est disponible, les deux systèmes de localisation donnent des résultats semblables.

La figure 4.53 affiche les erreurs en *x* et en *y* pour les deux algorithmes avec des bandes de 3σ estimés. L'erreur longitudinale est consistante avec le processus de SLAM, alors que l'erreur latérale manque un peu de consistance. Dans ces deux figures, l'erreur est calculée dans le référentiel global.

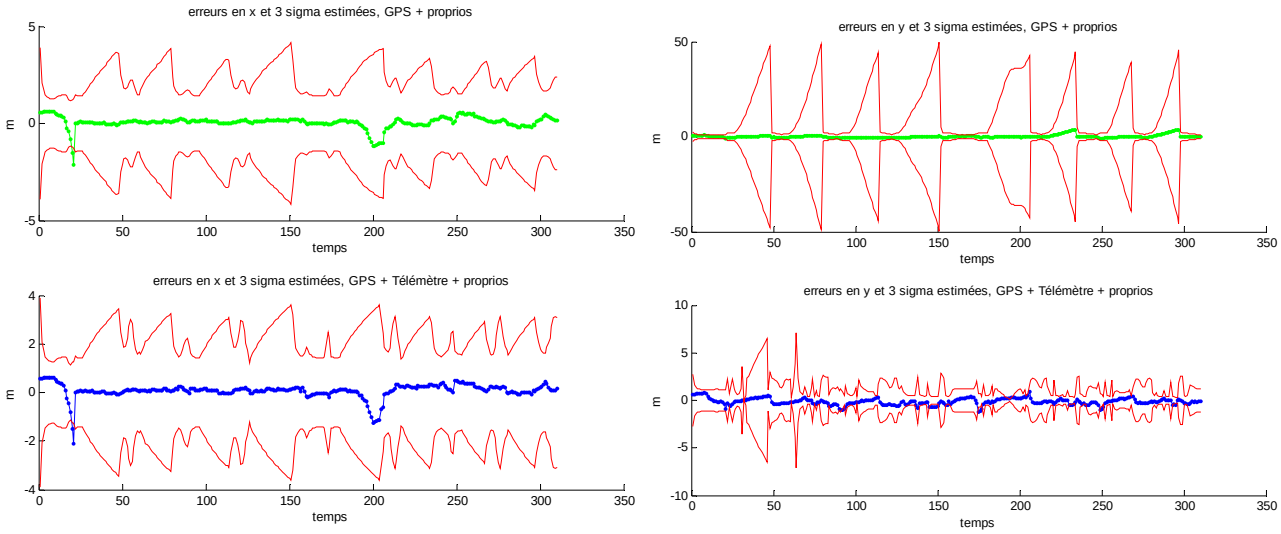


Figure *4.53. Erreurs en x et en y avec les 3σ estimés.*

La consistance du système a été calculée en utilisant le test NEES (*Normalized Estimation Error Squared*) défini par:

$$D^2 = \begin{pmatrix} \hat{x} - x_{ppk} \\ \hat{y} - y_{ppk} \end{pmatrix}^T . P_{xy}^{-1} . \begin{pmatrix} \hat{x} - x_{ppk} \\ \hat{y} - y_{ppk} \end{pmatrix} \tag{4.71}$$

Nous avons utilisé le test du *chi-2* suivant : $D^2 < \chi^2(0.05,2)$. La consistance du système complet a été testée tout au long de sa trajectoire. Elle est de 88,4% au lieu de 95% comme indiqué par la loi $\chi^2(0.05,2)$. Le manque de consistance vient du manque de consistance de la localisation latérale qui est trop optimiste. On pense que cela est dû à l'utilisation d'un EKF, sensible ici à la haute non linéarité du problème. L'utilisation d'un filtre UKF devrait améliorer de manière significative les performances.

Ces résultats sont en cours de soumission.

7 CONCLUSION

Ce chapitre, essentiel dans mon travail de recherche, a présenté la problématique de la localisation hybride pour l'automobile. A partir de capteurs existants dans les voitures modernes, tels que les capteurs ABS, un capteur d'angle au volant ou encore un gyromètre, il est possible de développer des techniques de localisation à l'estime dont plusieurs ont été développées et étudiées sur la base toujours de l'odométrie. Pour recaler la dérive de l'estime, on a considéré des systèmes de positionnement satellitaires et des cartes routières. Dans le premier cas, on obtient un positionnement absolu dans un repère géodésique, dans le second, un positionnement local sur la carte, dans son système de coordonnées. Bien que les deux problèmes diffèrent par leur nature, l'observation d'état offre un cadre méthodologique général pour les aborder.

Le problème de la localisation peut être traité en deux étapes : une phase d'initialisation et de localisation globale et une phase de localisation dynamique par suivi de pose. La phase d'initialisation n'a été abordée qu'au travers des méthodes d'inversion ensembliste dont nous avons souligné les très bonnes caractéristiques. La localisation dynamique a constitué l'essentiel des développements de ce chapitre. Nous avons d'abord modélisé ce problème sous forme d'une représentation d'état assez générale faisant apparaître un modèle d'évolution à l'estime et un modèle d'observation. Seule la latence des mesures extéroceptives n'a pas été prise en compte explicitement mais nous avons vu que le mécanisme prédicteur/estimateur permet de traiter le cas des latences inférieures à période d'échantillonnage, dans le cas d'un formalisme synchrone.

Deux grandes classes de méthodes d'observation d'état ont été présentées : l'approche bayésienne (comme le filtrage de Kalman étendu, l'UKF et les filtres particulaires) et l'approche ensembliste (prédiction/estimation par inversion ensembliste et propagation de contraintes). Plusieurs d'entre elles ont été illustrées sur des données réelles et, pour une des premières fois je pense, les méthodes ensemblistes par propagation de contraintes ont pu être validées expérimentalement. Le choix d'une approche par rapport à une autre dépend du problème à traiter. S'il s'agit de fournir un positionnement avec des exigences d'intégrité faibles, le filtrage de Kalman est la solution reine. Dans le cas contraire, il convient de considérer des approches plus performantes, soit bayésiennes, soit ensemblistes ou combinant des deux, car il semble que l'approche ensembliste puisse difficilement être utilisée seule, à cause de sa rigidité et de sa sensibilité aux mesures erronées. Par contre, cette propriété est une caractéristique dont on pourrait chercher à tirer profit dans un module de diagnostic ou de surveillance de l'intégrité. Il est à noter que les problèmes de cohérence des mesures ont volontairement été mis de côté dans ce chapitre. En effet, même si je suis très sensible à ce problème et même si j'utilise fréquemment des tests statistique ma contribution théorique sur ce point est nulle.

Le problème de la localisation sur carte a été formulé comme un problème d'observation d'état. Grâce à une méthode de sélection de routes fusionnant plusieurs critères, une méthode mono hypothèse a été bâtie sur la base du filtrage de Kalman. Pour être mise en œuvre, il

convient de construire une observation cartographique à laquelle on associe une imprécision ellipsoïdale. La faisabilité de cette méthode a été illustrée sur des données réelles et, notamment, il a été prouvé son aptitude à recaler une dérive à l'estime. Son point faible provient essentiellement du risque de divergence en cas de perte prolongée du GPS combinée à une géométrie cartographique ambiguë. Nous verrons dans le chapitre suivant comment l'étape de sélection de routes peut être utile à la quantification de la confiance dans le positionnement.

Enfin, nous avons vu une nouvelle approche pour localiser un véhicule dans des zones urbaines en utilisant les bords de route. L'idée principale est d'utiliser des amers naturels. Quand la zone est inconnue, le premier passage consiste en une étape d'apprentissage et permet la construction d'une carte initiale. Ensuite, la localisation et la mise à jour de la carte sont exécutées conjointement grâce à un filtrage de Kalman généralisé. On s'est concentré sur l'utilisation d'un télémètre laser qui a été installé verticalement à l'avant d'un véhicule pour détecter précisément les bords de trottoir. Dans ce cas-ci, la carte contient des segments utilisés comme amers linéaires. Leur imprécision et certitude d'existence sont traitées pour gérer les blocages du faisceau laser en raison de voitures garées le long du trottoir. Les résultats expérimentaux effectués avec la voiture de notre laboratoire indiquent que cette approche est appropriée à la navigation dans un environnement urbain réel. En effet, elle peut corriger de manière significative la dérive des capteurs proprioceptifs quand le GPS est masqué et elle permet de conserver une précision de localisation de l'ordre du mètre

Chapitre 5. Aide à la conduite automobile.

1 INTRODUCTION

Les systèmes avancés d'aide à la conduite (connus sous le nom d'*ADAS – Advanced Driver Assistance Systems*) sont étudiés depuis une quinzaine d'années au laboratoire Heudiasyc. Ce sont des systèmes mettant en œuvre des moyens artificiels de perception et des moyens soit d'action sur le véhicule, soit d'information vers le conducteur. Les ADAS constituent un des volets des systèmes de transports intelligents dont le dénominateur commun actuel est "télécommunication, localisation et traitement de l'information". Du fait que les ADAS augmentent les facultés de perception et d'action du conducteur, on juge également que ce domaine de recherche fait partie de la robotique. Une de ses caractéristiques réside dans son caractère très multidisciplinaire dû à la coopération homme-machine et aux spécificités de l'Interface "Homme-Véhicule" (IHV). Enfin, c'est une préoccupation très sociétale compte tenu des nombreux drames engendrés par les accidents de la route chaque année. Je m'intéresse à ce domaine depuis mon arrivée à l'UTC en cherchant à voir comment la fonction de localisation dynamique peut-être mise à profit pour le développement d'ADAS et/ou leur évaluation.

Ce chapitre commence par une présentation des ADAS et leur intérêt. Une démarche de conception est présentée. Elle repose sur le prototypage de fonctions pour les étudier avec de vrais conducteurs humains. Concernant ce point, je rapporte l'expérience que j'ai eu au travers des projets SAACAM et ARCOS. On s'intéressera, dans le paragraphe 3, à la méthodologie d'évaluation qui a été étudiée dans le projet ROADSENSE. Pour mettre en œuvre cette démarche, je présenterai l'outil *DBITE* que nous avons conçu en partenariat avec des universitaires et des industriels. J'insisterai en particulier sur la datation commune de données acquises par un système distribué. Enfin, dans le paragraphe 4, j'illusterai comment la fonction de localisation absolue ou sur carte peut être mise à profit pour l'aide à la conduite.

2 ASSISTANCE AVANCEE

2.1 Motivations et besoins

Les systèmes ADAS permettent d'améliorer la sécurité et le confort. La tendance actuelle est de voir comment ils peuvent contribuer à l'optimisation de l'utilisation de l'infrastructure, principalement en zone urbaine. Ce faisant, ils peuvent contribuer à la réduction de la pollution et au développement durable.

Le critère qui a été mis en avant ces dernières années porte sur la sécurité routière[39]. De nombreuses analyses ont permis d'identifier les principaux facteurs accidentogènes : inattention, fatigue, malaise, assoupissement, alcool, vitesse excessive, interdistances réduites, mauvaise météo et mauvaise prise en compte de cette dernière, présence d'usagers vulnérables (piétons, etc.), obstacles, défaillances mécaniques (en particuliers les crevaisons de pneumatiques). Ces facteurs concernent des défaillances physiques du conducteur, des fautes conscientes, une sous-estimation des risques, des facteurs liés à l'environnement et des défaillances des véhicules. Sous l'angle de l'amélioration de la sécurité, les ADAS peuvent être considérés comme des dispositifs de sécurité active qui concernent toutes les phases qui précèdent l'accident : perception, analyse, décision et action. En effet, grâce à des capteurs et des moyens de traitement embarqués, les ADAS sont capables de surveiller l'environnement proche. Des moyens de communication leur permettent également de réagir à des incidents plus éloignés au-delà de la portée des capteurs.

Les activités de recherche pour l'aide à la conduite automobile sont actuellement très actives et impliquent des laboratoires universitaires, des constructeurs automobiles et des équipementiers dans de nombreux programmes de recherche :

- européens (programme PCRD) : CARSENSE, RADARNET, DENSETRAFFIC, ROADSENSE, PREVENT, COMMUNICAR, AIDE,…
- nationaux (programme PREDIT) - ARCOS, PARAUTO,…
- régionaux (RT3, pôle DIVA, …).

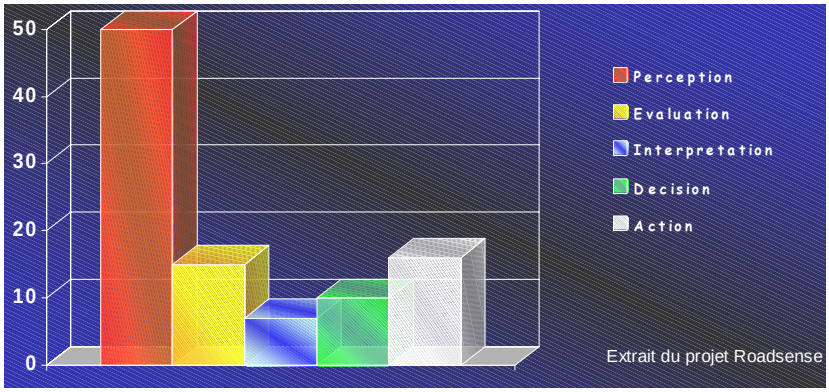


Figure 5.1. Pourcentage des différentes défaillances humaines pour un ensemble d'accidents mortels (origine LAB projet ROADSENSE).

Actuellement, le coût des systèmes électroniques et informatiques embarqués représente 25% du prix total du véhicule et on s'attend à un pourcentage de 40% en 2010. L'avancée des connaissances théoriques associée à l'évolution spectaculaire des capacités de calcul embarquées laisse présager d'évolutions importantes en terme d'aide à la conduite dans les années qui viennent[40]. Cela représente pour les constructeurs de véhicules un argument de vente auquel une majorité d'acheteurs sont de plus en plus sensibles.

---

[39] Même si ce chiffre a baissé de façon significative, il y a plus de 5000 morts par an sur la route en France.

[40] C'est une des motivations de la création de la structure de recherche public/privée "Numatec Automotive" qui regroupe des constructeurs automobiles français, des équipementiers de rang A et des centres de recherche (CEA, CNRS, INRIA notamment).

En termes d'automatique, l'activité de conduite peut se décliner selon le paradigme d'observation/réaction : le conducteur perçoit, analyse, décide et agit. Or, le conducteur commet inévitablement des erreurs dans chacune de ces phases, principalement lors de la phase de perception, comme indiqué sur la figure 5.1.

2.2 Classification des systèmes selon le temps de réponse

Actuellement, les systèmes commercialisés sont "à vitesse d'action rapide" et leurs effets peuvent se faire à l'insu du conducteur. C'est le cas par exemple, des systèmes ABS et ESP qui améliorent la maîtrise de la trajectoire : le système prend en main le pilotage du véhicule en cas de besoin, car les phénomènes à maîtriser sont extrêmement rapides et difficiles à appréhender et à maîtriser par un conducteur classique[41].

D'autres systèmes à vitesse de réaction plus lente sont en train de voir le jour et correspondent souvent à des systèmes d'anticipation de situation dangereuse. Ils fournissent des informations symboliques et analysables par le conducteur lui permettant d'agir par lui même. Ces systèmes assistent le conducteur en jouant le rôle de "copilote discret" et peuvent utiliser des canaux haptiques : le conducteur n'est pas submergé d'information visuelle ou sonore. Un bon exemple d'un tel système est le système AFIL (Alerte de Franchissement de Ligne) présenté par PSA au salon de l'automobile 2004 à Paris. Il est disponible sur les Citroën C4 et C5 et est vendu comme système d'hypovigilance qui avertit le conducteur d'un franchissement de ligne blanche en faisant vibrer son siège à gauche ou à droite selon le côté du franchissement.

Par ailleurs, une analyse des mécanismes d'accident[42] fait apparaître que, dans de nombreux cas, les constantes de temps des situations accidentogènes sont compatibles avec les capacités de contrôle du conducteur : entre l'instant où la situation d'urgence apparaît et l'instant où l'accident se produit, il peut se passer plusieurs secondes voir plusieurs dizaines de secondes.

2.3 Perception de la situation de conduite

Nous avons vu le rôle essentiel de l'aide à la perception du conducteur. Cette aide présente parfois un caractère local (détection de véhicule en cours de dépassement dans l'angle mort, par exemple) ou global (anticipation de virages dangereux avec une base de données, transmission d'alertes géoréférencées, etc.). La perception de la situation de conduite (*EDA - Enhanced Driver Awareness*) est un point clé absolument nécessaire ne serait-ce que pour configurer les ADAS.

Les sources d'informations utilisées pour obtenir une perception artificielles sont de natures très diverses et sont souvent redondantes et/ou complémentaires. En général, les sources d'information produisent des données par intermittence (sous un tunnel ou en forêt le

[41] Ceci est faux pour un pilote de rallye ou de voiture de course parfaitement entraîné.

[42] GT3 du GdR CHMAC.

GPS est absent ou très dégradé, la nuit la vision est handicapée et en cas de brouillard les télémètres lasers fonctionnent mal, etc.).

Pour élaborer une information plus fiable de la situation de conduite, il est opportun de s'intéresser à des méthodologies de fusion de données pour gérer :

- la redondance et de la complémentarité des sources d'information,
- les imprécisions et les incertitudes des données,
- les intermittences de fonctionnement des systèmes,
- un temps commun pour des systèmes multicapteurs distribués.

La figure 5.2 illustre le système de perception qui a été étudié dans le projet SAACAM. Il à noter la diversité des sources d'information traitées et fusionnées par un système informatique de façon à produire une assistance. Cette architecture permet de faire l'abstraction des capteurs physiques pour concevoir une assistance sur des données synthétisées et de plus haut niveau.

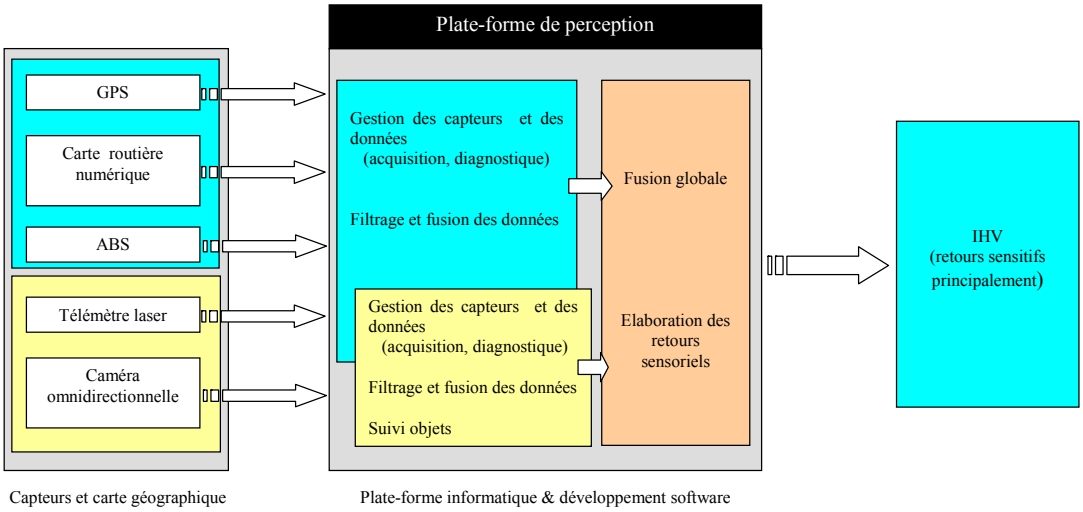


Figure 5.2. Plate-forme de perception étudiée dans le projet SAACAM.

2.4 Développement d'ADAS

Une nouvelle assistance peut être imaginée à partir d'un besoin clairement identifié (par exemple, comment m'aider à suivre le véhicule qui me précède avec un temps inter-véhiculaire supérieur à 2 s comme stipulé dans la loi ?) ou suite à l'apparition d'une nouvelle technologie (par exemple, quelles nouvelles ADAS pourrait-on concevoir si tous les véhicules étaient équipés d'un moyen de télécommunication bidirectionnel ?).

La première approche est le plus souvent celle des sciences humaines et la deuxième celle des sciences dures. Dans le GdR CHMAC, j'ai travaillé sur l'imagination de dispositifs de prévention des collisions arrière à partir d'analyses de procès verbaux d'accidents faites par l'INRETS. Il est apparu clairement le besoin d'émettre, avec le plus d'anticipation possible, une alerte géoréférencée de façon à prévenir les autres usagers en amont du danger. Les sciences humaines sont fondamentales pour apprécier le besoin, étudier la coopération homme machine et étudier la validité des approches au regard de l'acceptabilité sociale et culturelle et du contexte juridique.

La seconde démarche est poussée par le développement fulgurant des technologies de l'information et de la communication et de la robotique qui fournissent des composants et des outils porteurs de nouvelles idées.

Dans un cas comme dans l'autre, une étape essentielle dans l'étude d'une ADAS est son prototypage (c'est-à-dire sa réalisation sur un matériel de laboratoire comme le véhicule STRADA montré sur la figure 5.3 avec un certain nombre de capteurs) pour en prouver la faisabilité et permettre d'étudier le comportement d'un conducteur l'utilisant.

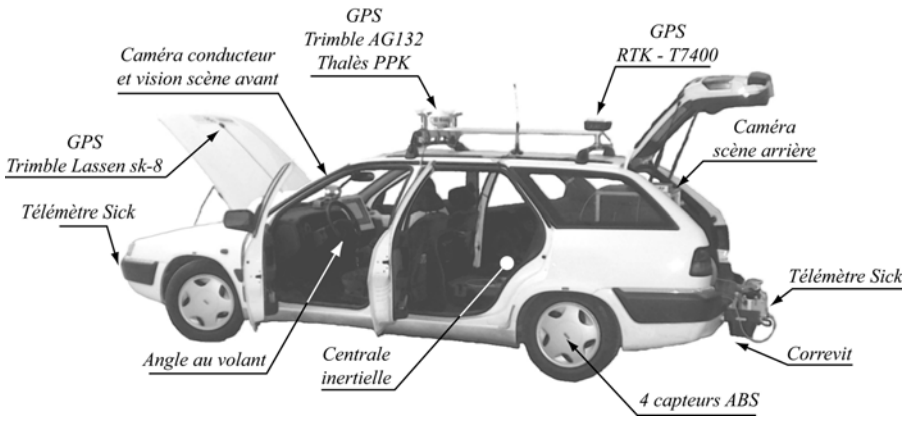


Figure 5.3. Le véhicule expérimental du laboratoire Heudiasyc comme outil de prototypage.

La mise en place des ADAS en est encore à ses balbutiements et nécessite de considérer de nouveaux capteurs et de nouvelles architectures informatiques enfouies, distribuée, temps-réel et sûres (tolérantes aux fautes notamment). En outre, il apparaît des challenges à relever en termes de quantité d'information à traiter par rapport à la dynamique mise en jeu et en termes de synchronisation des traitements.

2.5 La démarche du projet ARCOS

Le projet ARCOS a étudié et développé 4 fonctions :

1. gérer les interdistances entre véhicules,
2. prévenir les collisions sur obstacles fixes, arrêtés ou lents,
3. prévenir les sorties de route,
4. alerter les véhicules en amont d'accidents / incidents.

Dans ce cadre, j'ai participé au prototypage des fonctions "prévention des sorties de routes" et "alerter les véhicules en amont".

Figure 5.4. Vision du projet ARCOS : des véhicules équipés de moyens de perception communicant avec une infrastructure intelligente.

La démarche du projet ARCOS est mixte : des besoins ont été identifiés grâce à l'accidentologie et mis en rapport avec des possibilités techniques (cf. figure 5.4). En outre,

cette démarche a cherché à être complète grâce à une organisation en 10 thèmes : techniques de perception, visibilité et adhérence, traitement de l'information & élaboration de l'action, communication, évaluation & accidentologie, système homme-machine, acceptabilité sociale individuelle, aspects socio-techniques collectifs, moyens expérimentaux, pilotage fonctions.

Les modes de coopération homme-machine qui ont été proposés (figure 5.5) sont très intéressants et me semble proposer une décomposition pertinente.

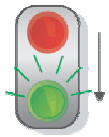
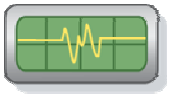
Représentation	Mode	Description
	Perceptif	Les sorties de la fonction (détection et activation) sont présentées via une interface visuelle au conducteur
	Avertissement	Dans ce mode, en cas d'activation de la fonction, l'interface visuelle est accompagnée d'une alerte sonore
	Suggestion d'Action	On suggère au conducteur l'action à entreprendre par une interface haptique : vibrations dans une pédale, le volant ou le siège
	Limite	On limite le conducteur dans ses manœuvres par un moyen haptique : durcissement de la pédale d'accélérateur, résistance dans le volant
	Correctif	On corrige les mauvaises actions du conducteur si elles sont dangereuses, ex : - remise sur la chaussée en cas de sortie de route - modification de sa vitesse si il y a un risque de collision
	Régulé	Le système agit sur le véhicule pour que celui-ci reste dans une plage de fonctionnement prédéfinie
	Médiatisé	Le système renforce l'action du conducteur si nécessaire, ex : - freinage renforcé pour un freinage optimal en cas de risque de collision
	Automatique	Conduite automatique par le système, ex : - freinage à la place du conducteur - direction pilotée par l'automate

Figure 5.5. Modes d'assistance du projet ARCOS.

Trois niveaux de *cibles*, classés par objectif selon les difficultés techniques et le degré de maturité des développements à réaliser pour concrétiser les fonctions, ont été envisagés :

- dans la cible 1, le véhicule et ses équipements de perception constituent un système autonome et on ne considère qu'une voie de circulation comme périmètre de sécurité,
- en cible 2, le véhicule et l'infrastructure constituent un système coopératif et on prend en compte plusieurs voies de circulation,
- en cible 3, le véhicule et les infrastructures sont interactifs, en temps réel, grâce à des communications généralisées.

D'un point de vue scientifique, j'ai participé au thème 3 du projet ARCOS concernant deux tâches :

- tâche 3.1 : attributs à ajouter aux nouvelles bases de données pour les futurs systèmes d'aide à la conduite[43],
- tâche 3.2 : localisation précise pour l'extraction d'attributs[44].

La démarche suivie dans la tâche 3.1 a été d'analyser la façon dont on peut utiliser l'information des bases de données géo-référencées précises à partir de systèmes d'information géographique pour prévoir les caractéristiques *statiques* de la trajectoire que le véhicule s'apprête à suivre. Cette anticipation permet de s'assurer que les marges de sécurité prévisibles sont suffisantes et, si ce n'est pas le cas, de prévoir une action adaptée. La définition des informations nécessaires (mais actuellement manquantes) qu'il est utile de stocker dans la base a fait aussi partie de l'étude. Mon implication dans la tâche 3.2 a concerné le travail scientifique qui a été présenté dans le chapitre 4.

3 EVALUATION DU COMPORTEMENT DU CONDUCTEUR FACE A UNE ADAS

3.1 Problématique et méthodologie suivie dans Roadsense

Tout nouveau système d'aide à la conduite n'est jamais commercialisé tel que, même si son fonctionnement autonome est jugé suffisamment fiable et robuste. Il doit au préalable avoir fait l'objet de nombreux tests avec de vrais conducteurs soit en situation réelle, soit avec un simulateur de conduite. Pour mener à bien l'étude du comportement du conducteur, il faut l'observer et le questionner. La méthodologie défendue par les ergonomes du projet ROADSENSE repose sur le calcul d'indicateurs du comportement, comme, par exemple, la fréquence de clignotement des paupières ou le temps de réaction du conducteur ou encore la variance de son écart latéral par rapport au bord droit de la route. Dans ce projet, une quarantaine d'indicateurs ont été proposés, normalisés et étudiés. Une grande partie du calcul de ces indicateurs peut être automatisée si le véhicule est équipé de moyens de perception et/ou si la fonction ADAS transmet des informations. Le système DBITE que nous avons développé offre cette possibilité de calcul, en temps réel ou en post-traitement, et permet à l'ergonome de renseigner les indicateurs difficilement mesurables ou inobservables avec des systèmes embarqués. Le DBITE a, par nature, une architecture matérielle distribuée du fait qu'il intègre des systèmes divers et qu'il enregistre des flux de données incompatibles avec les capacités d'un calculateur unique. De ce fait, la datation des données dans un référentiel commun représente le point clé pour lequel nous avons trouvé une invention nouvelle,

[43] Avec le laboratoire, les partenaires impliqués étaient l'INRIA, l'Ecole des Mines de Paris (coordinateur), le LIVIC et la société NavTeQ.

[44] Avec les mêmes partenaires et en plus le LCPC de Nantes (coordinateur).

entièrement distribuée et symétrique. Ce système a été breveté car il présente les caractéristiques intéressantes de ne pas avoir de maître, de supporter des pertes et des réinitialisations de réseaux et de ne pas agir en temps réel sur les horloges des calculateurs. Ces caractéristiques permettent de réaliser une re-datation garantie.

Le projet ROADSENSE a été un projet extrêmement pluridisciplinaire regroupant des ergonomes et technologues pour concevoir un système d'évaluation du comportement du conducteur face à une assistance avancée à la conduite. Il a impliqué des académiques (Cranfield University UK, TNO NL, LASMEA/UBP et Heudiasyc/UTC) et des constructeurs automobiles (Jaguar Cars coordinateur, PSA, Renault, FIAT et Porsche). Avec Cranfield University et le LASMEA, le laboratoire participé à la définition et la conception d'un dispositif de prototypage rapide de nouveaux systèmes d'aide à la conduite automobile appelé DBITE de type *driver in the loop*. En parallèle, une analyse des bases de données détaillées d'accidents et la définition précise des indicateurs ont été réalisés par les constructeurs. Au bout de deux ans, 4 études de cas ont été réalisées avec chacune une ADAS différente et une implémentation du DBITE :

- Maîtrise d'un temps inter véhiculaire de 2s (Renault/Heudiasyc),
- Vision de nuit (PSA/LASMEA),
- Systèmes avancés d'information trafic (Jaguar/ Cranfield University),
- Gestion intelligente de systèmes de communication (FIAT/ Cranfield University).

Nous reviendrons plus tard sur l'étude de cas de Renault.

3.2 Le système DBITE

3.2.1 Présentation

Le DBITE (*Driver Behaviour Interface Test Equipment*) est un outil pour des ergonomes et psychologues de la conduite afin qu'ils aient une vue adaptée :

- de l'environnement de conduite,
- de l'état du système en cours de test (incluant le véhicule et l'ADAS en cours d'analyse),
- du comportement du conducteur.

Ce dispositif doit être capable d'enregistrer une grande quantité de données à grande bande passante (cf. figure 5.6) et de les resynchroniser, tout en effectuant des calculs en temps réel.

Le DBITE concerne des véhicules expérimentaux équipés d'une ADAS à étudier. Dans ce cas, la philosophie de l'approche consiste à

- définir les indicateurs pertinents,
- équiper le véhicule d'un système DBITE adapté au calcul de ces indicateurs,
- procéder à des essais avec des conducteurs et enregistrer des données,
- analyser en post-traitement les données et tirer des conclusions.

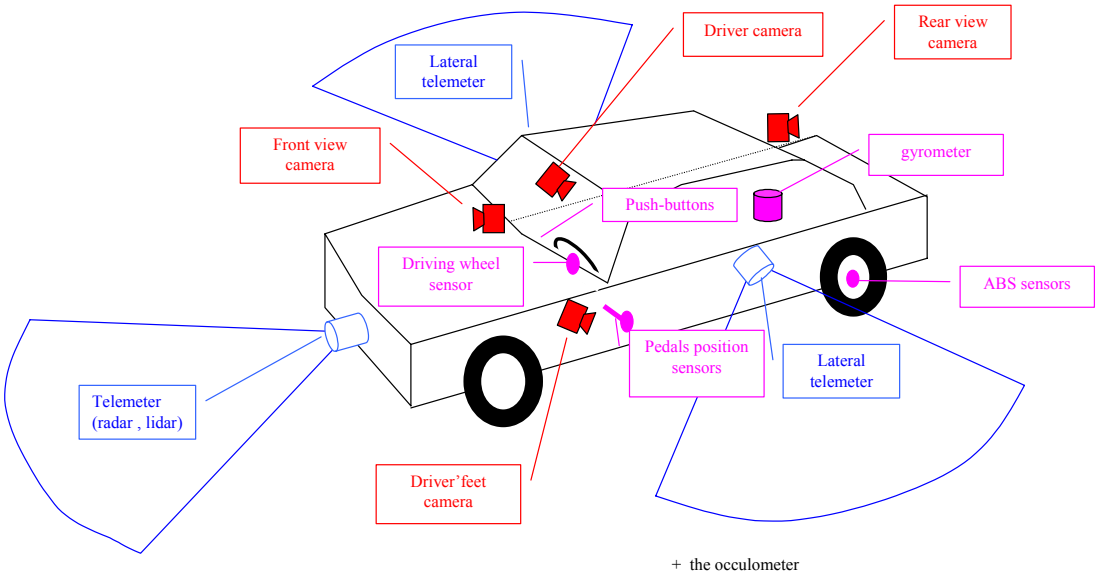


Figure 5.6. Configuration standard des capteurs nécessaires au calcul des indicateurs.

La figure 5.7 montre que le DBITE peut réutiliser les capteurs des fonctions ADAS si ces dernières sont suffisamment ouvertes. On voit également

- qu'il produit des indicateurs calculés en temps réel,
- qu'il enregistre des données élaborées et des données brutes (son, images, données CAN, etc.),
- qu'il fournit une interface de monitoring.

En effet, le DBITE n'est pas utilisé seul. Il existe toujours un opérateur dans le véhicule pour lancer les applications, donner des consignes au conducteur et surveiller le bon fonctionnement du système.

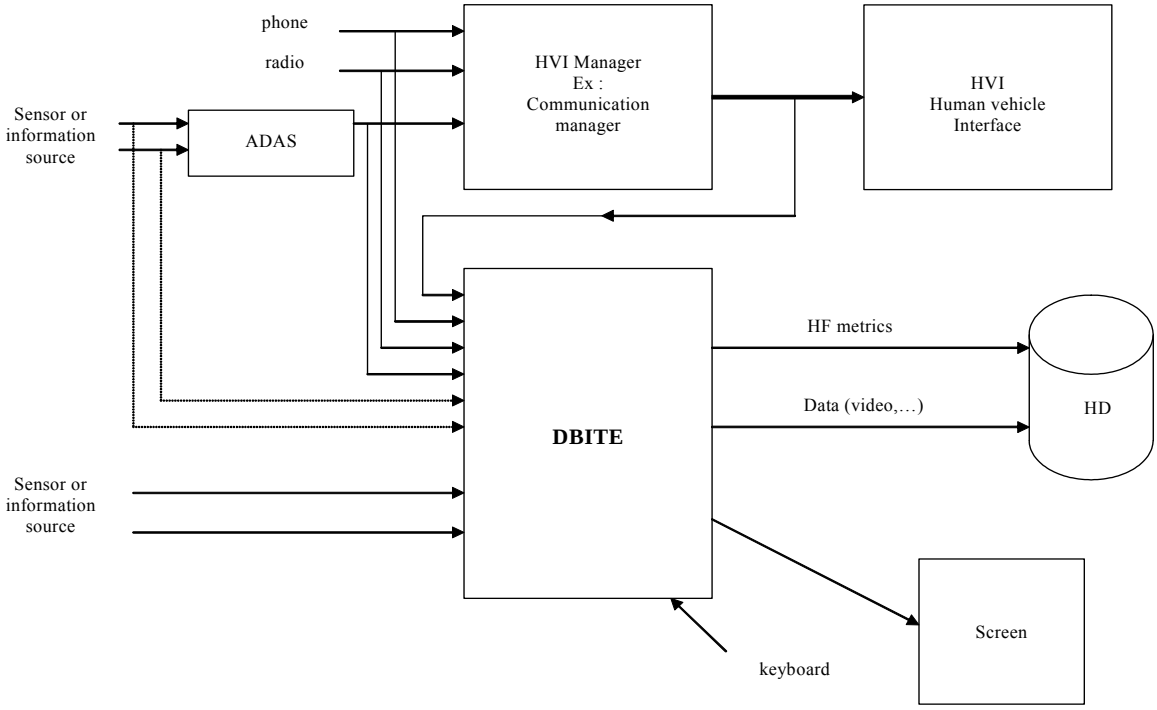


Figure 5.7. Synoptique de l'utilisation du DBITE.

Le cahier des charges du DBITE, au début du projet, peut être résumé comme suit :

- posséder de nombreuses interfaces (audio, vidéo, analogiques, numériques, capteurs intelligents, etc.),
- pouvoir calculer en temps réel des indicateurs,
- acquérir de grands flux de données pour faire une étude en post-traitement,
- avoir la possibilité de simuler de nouvelles fonctions ADAS,
- pouvoir s'interfacer à un simulateur,
- être modulaire,
- être facile à configurer,
- avoir une architecture *future proof*.

Lors du montage du projet en 2000, l'objectif était de concevoir le DBITE sur la base du réseau haut débit FireWire (qui s'appelait à l'époque IEEE 1394) avec des architectures DSP (*Digital Signal Processor*). Les DSP ont été mis de côté au profit d'architectures de type Intel compatibles avec des systèmes d'exploitation de PC (Windows NT/2000/XP et Linux/RTAI pour les composants temps réel). Le réseau FireWire a été conservé pour bâtir l'architecture (dans sa version à 400 Mbps).

3.2.2 Architecture informatique

Son architecture informatique repose sur des composants qui constituent un réseau d'applications distribuées sur la base d'un intergiciel (*middleware*). Les composants s'échangent des données selon un modèle transactionnel client serveur avec des contraintes de temps (figure 5.8) à la différence de RT MAPS[45] de l'Ecole des Mines de Paris qui suit un modèle flot de données.

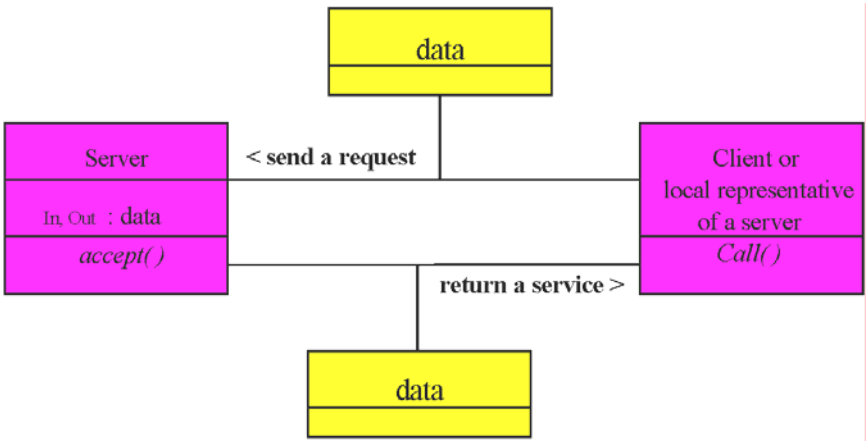


Figure 5.8. Echange orienté objets entre composants.

Cette architecture permet d'obtenir une grande modularité car les interfaces entre composants sont parfaitement spécifiées. Par exemple, en fonction des ressources nécessaires, l'architecture de la figure 5.9 peut être déployée sur un où plusieurs calculateurs.

[45] http://caor.ensmp.fr/french/recherche/sti/Rtmaps.php

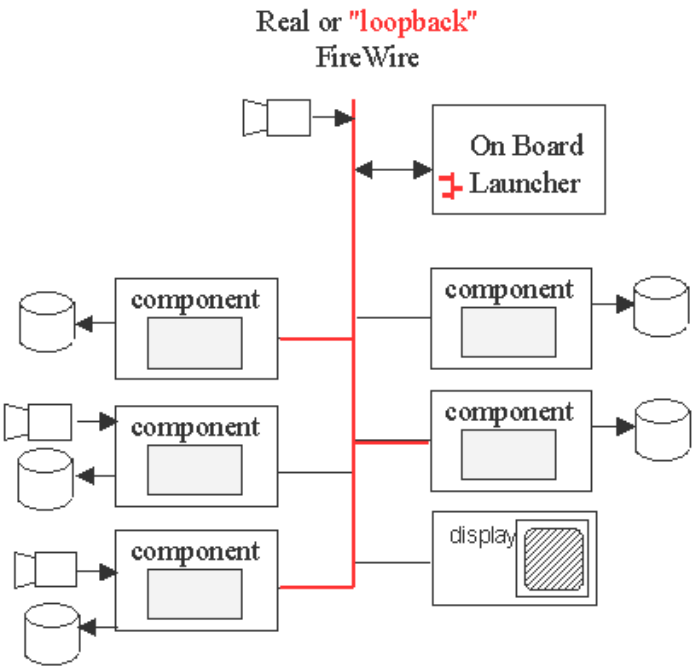


Figure 5.9. Exemple d'architecture du DBITE.

Plusieurs classes de composants ont été développées (cf. figure 5.10).

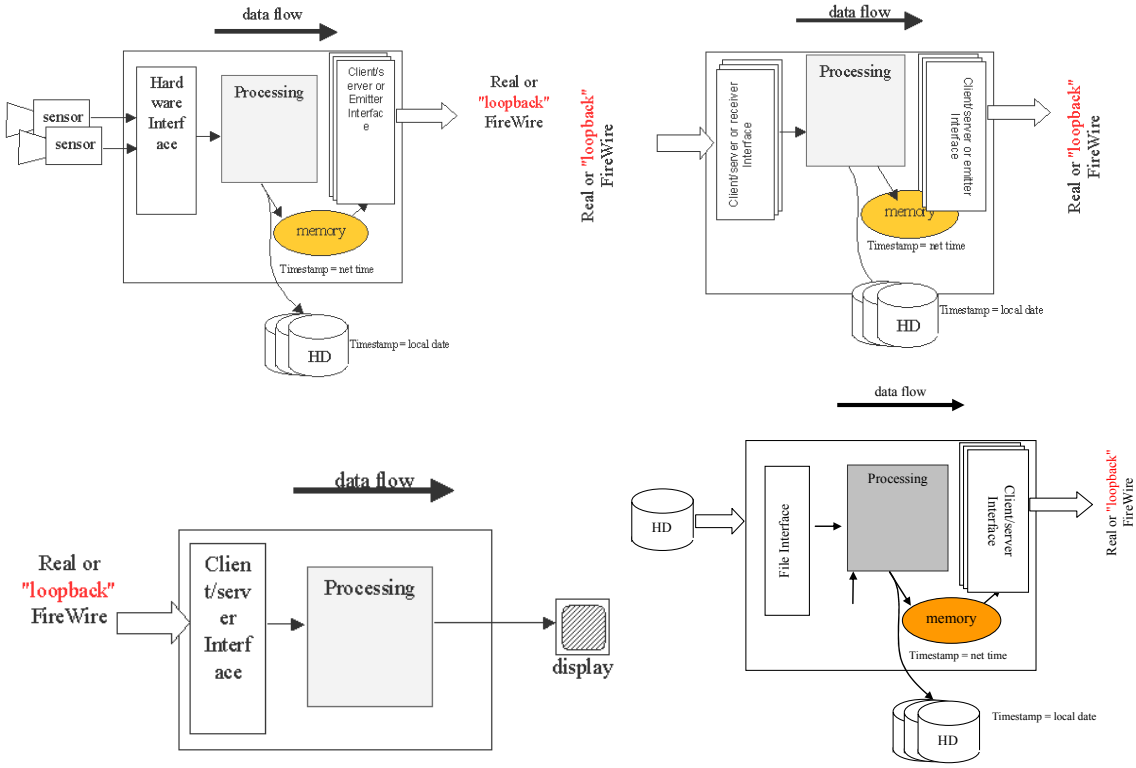


Figure 5.10. Quelques exemples de composants typiques du DBITE : composant de capteur (en haut à gauche) composant de traitement (en haut à droite) composant d'affichage (en bas à gauche) composant de rejeu (en bas à droite)

L'intergiciel pour lequel nous avons toujours plaidé était *SCOOTR (Serveur Client Orienté Objet et Temps Réel)* développé au laboratoire par P. Crubillé. L'architecture de *SCOOTR* permet l'échange d'objets entre processus fonctionnant sur différents ordinateurs reliés ensemble. Elle est basée sur les modèles client/serveur et émetteur/récepteur avec des

extensions temps réel. *SCOOTR* permet de distribuer des tâches sur plusieurs unités de traitement, tout en gérant les communications et les services de synchronisation. Il vérifie également les contraintes de temps réel et propose des stratégies de gestion des défaillances.

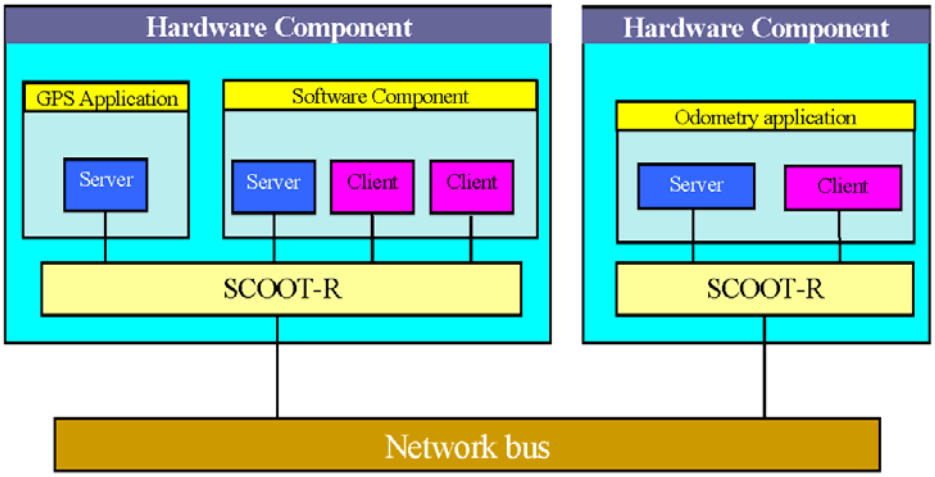


Figure 5.11. Exemple d'une application de localisation utilisant SCOOTR.

Le DBITE permet de faire des acquisitions de données et des traitements sur un système distribué. Grâce à SCOOTR les composants s'échangent des données en temps réel pour calculer les indicateurs. Il est intéressant de remarquer qu'un même composant producteur de données peut alimenter plusieurs composants de traitement. Par exemple, la vitesse est une grandeur qui intervient dans bon nombre de calculs. SCOOTR offre ainsi un mécanisme d'abstraction des sources d'information ce qui rend plus aisé le développement d'applications de fusion de données.

Pour l'enregistrement des données, un format binaire a été développé, ce qui permet un enregistrement compact et efficace de grands flux de données. Chaque fichier contient un entête qui décrit le format des données et permet de vérifier l'intégrité du processus d'enregistrement. Chaque donnée est estampillée d'une date locale de la machine qui a fait l'acquisition.

Démarrer une application distribuée étant toujours compliqué et délicat, un mécanisme appelé "launcher" a été développé pour qu'une machine puisse gérer les expérimentations en définissant le nom de l'essai en cours, en démarrant l'ensemble des applications et en rapatriant des données par FTP (*File Transfert Protocol*) à la fin de la manipulation.

3.2.3 Exemple de l'utilisation du DBITE au travers d'une étude de cas

Le DBITE a été utilisé par Renault dans le cadre d'une étude de cas du projet ROADSENSE portant sur l'étude du comportement du conducteur utilisant un dispositif de régulation d'inter-distance de type *Time Warning* utilisant un radar hyperfréquence à l'avant du véhicule. Le DBITE a été mis à profit pour l'étude du comportement de 20 conducteurs sur des essais de 100 km chacun, en novembre 2003, selon une procédure de test particulièrement détaillée : présentation de l'ADAS, roulage avec différents modes de fonctionnement de l'ADAS (retour visuel, sonore ou haptique dans la pédale d'accélérateur) sur un parcours adapté. A la fin de chaque essai, un questionnaire était filmé et enregistré par le DBITE.

Pour calculer les 17 indicateurs choisis[46], la configuration du DBITE était la suivante (cf. figure 5.12) :

- 3 flux vidéo (le conducteur, la scène et les pieds) à la cadence de 15 img/s et avec une résolution de 320x240 pixels,
- une entrée audio,
- une interface CAN,
- un occulomètre (FaceLab - figure 5.13),
- deux PC industriels,
- un disque dur extractible pour transférer facilement les données de la voiture vers le laboratoire,
- un écran, un clavier et une souris pour la surveillance de l'expérience.

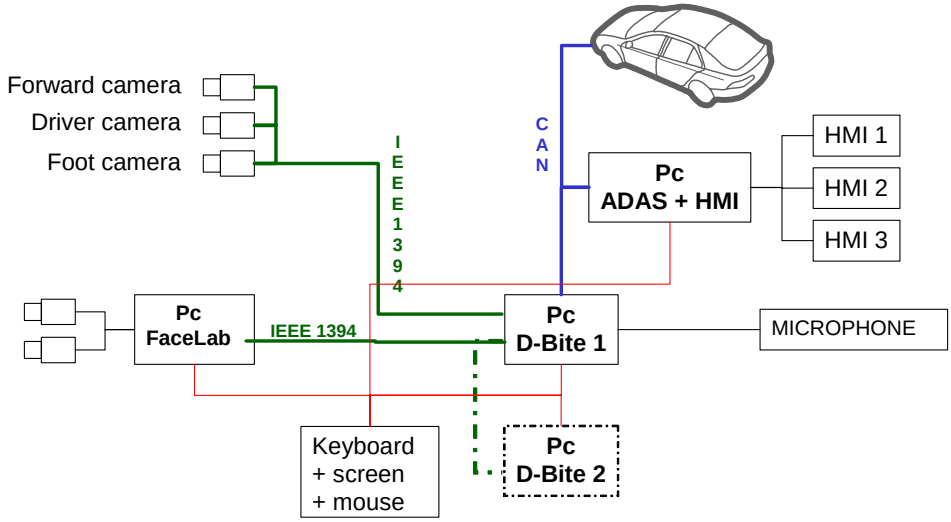


Figure 5.12. Partie embarquée du DBITE.

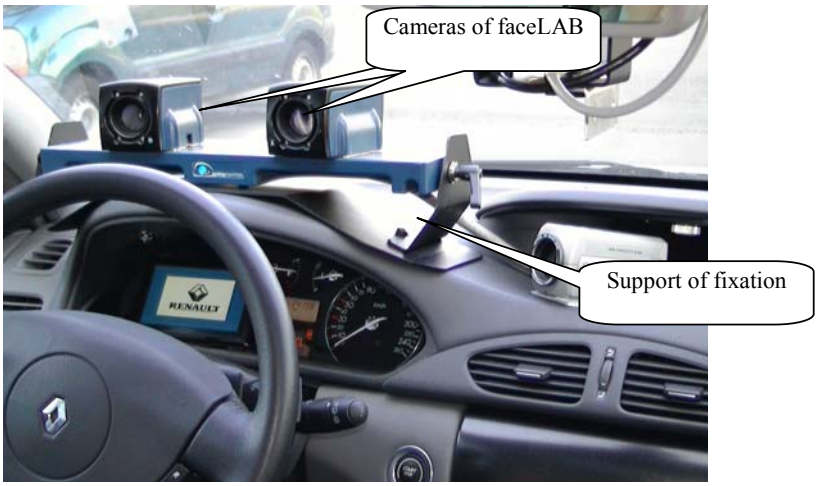


Figure 5.13. Aperçu de la paire stéréo de FaceLab dans la voiture expérimentale (Laguna).

[46] Liste des 17 indicateurs : Odometer, Mean Speed, Variance in longitudinal speed, Relative speed, Time headway, Time to collision, Accelerator lift, Brake pedal actuation: begin and end of actuation, Turn signals (right and left), Steering angle, State of the Time Warning HMI (display, sound, vibrations, force in the accelerator, takeover), Mean and variance of the accelerator pedal position, Target change, Time headway, Time headway classes duration, Reaction time – braking reaction time, Facelab Reaction time.

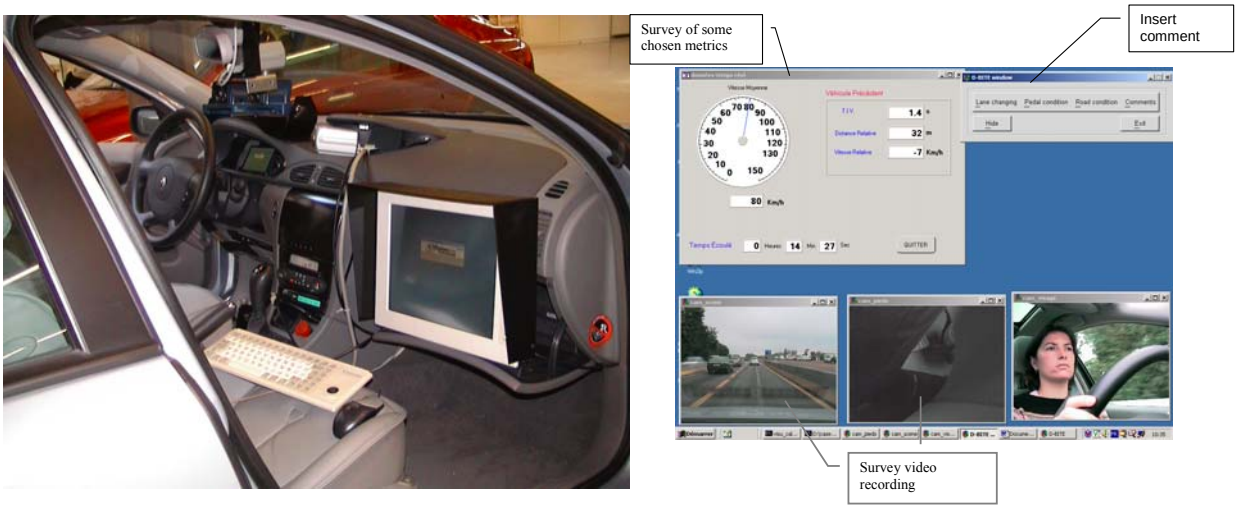


Figure 5.14. Aperçu du poste de l'ergonome et de l'affichage de plusieurs indicateurs en temps réel au cours des expériences.

Un outil de rejeu de données a été développé en collaboration avec les ergonomes de Renault. Il permet de rejouer le son et les vidéos (en marche avant, arrière ou en accéléré) tout en affichant les indicateurs du comportement. A la demande des utilisateurs de Renault, un lien vers Microsoft Excel a été développé pour que les données surlignées dans la feuille Excel soient toujours en synchronisme avec la vidéo (cf. figure 5.15).

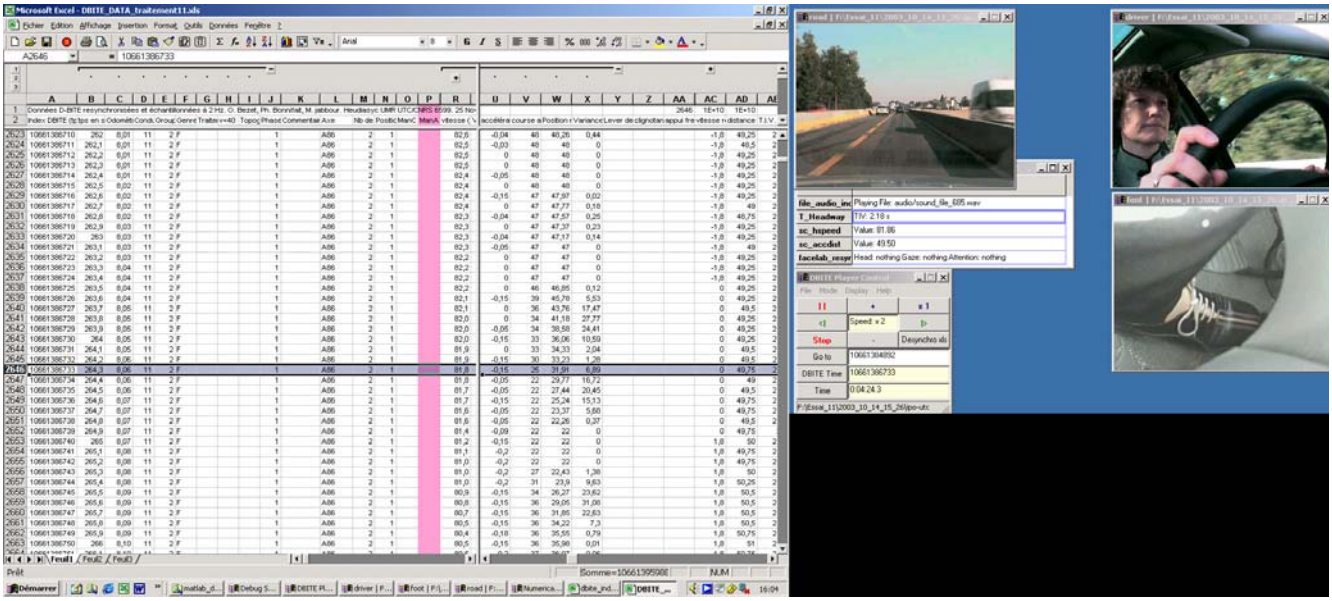


Figure 5.15. Aperçu de l'outil de rejeu de données du DBITE sur un PC équipé de deux écrans.

3.3 Datation commune de données acquises par un réseau de calculateurs

3.3.1 Problématique

Comme nous l'avons vu, l'architecture du DBITE est distribuée sur un ensemble de calculateurs. Lors de la phase d'acquisition des données dynamiques, cette architecture pose un problème de gestion du temps. En effet, leur datation s'opère à partir d'horloges locales[47] à chaque machine qui sont physiquement différentes les unes des autres.

Une première solution, qualifiée de matérielle, consiste à asservir ces différentes horloges sur un temps de référence comme celui du GPS. Il existe dans le commerce un certain nombre de composants qui réalisent ceci. Dans ce cas, il faut concevoir un système informatique temps réel à architecture matérielle spécifique pour utiliser cette horloge.

Une autre approche consiste à utiliser les horloges intégrées dans des calculateurs standard comme celles des PC et à les resynchroniser de façon purement logicielle. C'est ce que fait le protocole NTP (*Network Time Protocol*) utilisé sur Internet. Cette méthode est peu précise et inadaptée à des systèmes temps réel. Dans ses travaux sur le TTP (*Time Trigerred Protocol*) [Kopetz, 02], Kopetz dresse un état de l'art de différentes méthodes de synchronisation du temps en particulier sous l'angle de la sûreté de fonctionnement. Cette synchronisation est effectuée de sorte que le fonctionnement temps réel de l'application soit vérifié.

Nous avons abordé le problème de la datation commune de données estampillées avec des dates locales sous un angle différent. En effet, nous avons voulu prendre en compte une certaine variabilité de la structure du système au cours de sa phase d'enregistrement car

- il est possible qu'au cours d'un enregistrement déjà commencé, il faille enregistrer de nouvelles données avec un nouveau calculateur,
- un composant du système peut avoir une défaillance et subir une réinitialisation. Il serait dommage qu'il mette en péril toute l'expérience en cours.

3.3.2 Principe de la méthode

Supposons que les calculateurs d'enregistrement soient reliés par un réseau informatique. Le problème de redatation est rendu compliqué à cause des temps de transmission des données sur le bus en général non déterministes. Lorsqu'on utilise des exécutifs temps-réel, on peut au mieux donner un encadrement de ce temps de transmission par un intervalle qui spécifie les bornes inférieure et supérieure de ce temps de transmission. L'imprécision sur la datation peut aussi provenir du temps de latence de la source d'information : une donnée n'est pas fournie à l'instant où elle a été produite. Là aussi, ce décalage temporel peut généralement être circonscrit dans un intervalle. Enfin, même si cette source d'imprécision est en général négligée, l'erreur de quantification engendrée par l'utilisation d'un temps discret peut être

[47] Une horloge est vue ici comme un générateur d'impulsions périodiques associé à un compteur.

bornée dans un intervalle. Il apparaît donc opportun de représenter les dates par des intervalles, ce qui signifie que la datation réelle appartient de façon garantie à cet intervalle.

La méthode que nous avons développée fonctionne comme suit.

Pour mettre en correspondance les dates, on utilise une source de temps commune qui peut être

- élaborée à partir du cadencement d'un bus synchrone qui relie les différentes unités du système entre elles,
- un temps global tel que celui d'un système de positionnement satellitaire.

On notera que dans le cas des bus synchrones, la base de temps est réinitialisée à chaque reconfiguration. La méthode doit donc supporter l'utilisation d'un temps commun non monotone.

Le procédé consiste d'abord à enregistrer avec chaque donnée produite le temps de l'horloge locale. Ce temps est un intervalle qui contient de façon garantie l'instant de la donnée dans le référentiel de temps local. On suppose que les paramètres de l'horloge locale ne sont pas modifiés pendant un essai. En parallèle avec l'enregistrement et la datation des données, un processus informatique met en correspondance le temps local avec le temps commun. Cette mise en correspondance est réalisée de façon garantie comme suit : le temps local est lu (à un instant noté t1), le temps commun est lu (à un instant noté t2) et le temps local est lu à nouveau (à un instant noté t3). Ainsi, on est certain que t1<t2<t3 (dans le référentiel de temps local). Ce processus informatique peut être de basse priorité et de basse fréquence (typiquement 1 Hz), le résultat global étant insensible à des grandes différences entre t3 et t1 tant qu'elles sont occasionnelles. Cette stratégie perturbe au minimum l'acquisition et la datation des données par le système temps réel.

Dans le cas d'un bus synchrone, lors d'une nouvelle configuration du système, les unités réinitialisent les composantes locales de gestion du temps commun de façon à garantir qu'elles obtiennent toutes la même valeur. En pratique, ceci revient généralement à remettre à zéro le temps commun. Les instants des réinitialisations du bus sont mémorisés et un serveur de temps local est utilisé. Ce serveur de temps est implémenté par une machine du réseau et n'est utile que pour lever les ambiguïtés dues à la non monotonie du temps commun et aux changements de configuration du système. La précision du serveur de temps n'est pas critique.

3.3.3 Datation commune des données

Soit un système constitué de *n* unités ayant enregistré des données selon la méthode exposée précédemment. Le principe de redatation consiste à choisir une unité comme référence et à redater les données des *n-1* autres unités relativement à celle ci. Les méthodes utilisées sont basées sur l'analyse par intervalles de façon à garantir le résultat. On exploite toutes les relations d'antériorité pour diminuer la largeur des intervalles par des techniques de propagation de contraintes. La figure 5.16 illustre le principe pour convertir une date $[t_a]$ d'un système de temps à une date $[t_b]$ dans un autre système de temps sous hypothèse que la dérive entre les deux horloges est localement linéaire.

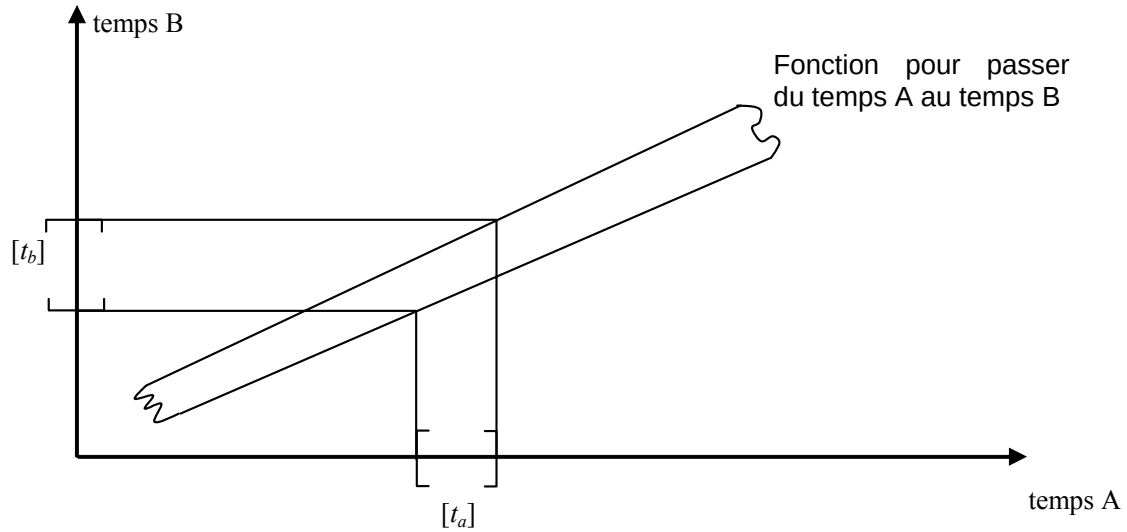


Figure 5.16. Passage d'une date intervalle dans le système A à une date dans le système B

Des résultats expérimentaux ont été réalisés avec un bus FireWire. Malgré le caractère intrinsèquement pessimiste de l'analyse par intervalles, les imprécisions ajoutées aux dates des données redatées sont les suivantes :

- pour des unités sous Windows 2000 professionnel, 500 µs,
- pour des unités sous linux/RTAI (Linux s'exécutant avec un sous noyau temps réel), 60 µs.

Ce procédé de datation commune et garantie de données acquises par plusieurs calculateurs a donné lieu à un brevet CNRS/UTC et est en cours de valorisation par le CNRS.

4 UTILISATION DE LA FONCTION DE LOCALISATION POUR L'AIDE A LA CONDUITE

Dans ce paragraphe, intéressons à quelques applications de la fonction de localisation qui ont été au cœur de mes centres d'intérêt et qui illustrent l'intérêt d'une localisation globale pour l'aide à la conduite automobile.

4.1 Horizon électronique

L'horizon électronique se définit comme la liste contenant tous les segments routiers que le véhicule est susceptible d'emprunter. Il est caractérisé par deux conditions :

- une distance maximale en mètres (800 mètres typiquement)
- un temps maximal de parcours (typiquement 30 secondes) qui est ramené à une distance en prenant en compte la vitesse courante du véhicule.

La figure 5.17 illustre cette notion. Sur cette image sont affichées toutes les routes que le véhicule, symbolisé par la flèche rouge, peut emprunter. On constate que les segments sont représentés par deux couleurs différentes :

- la polyligne foncée (en rouge) qui symbolise le chemin le plus probable,
- les polylignes grises qui sont les autres axes que le véhicule peut emprunter.

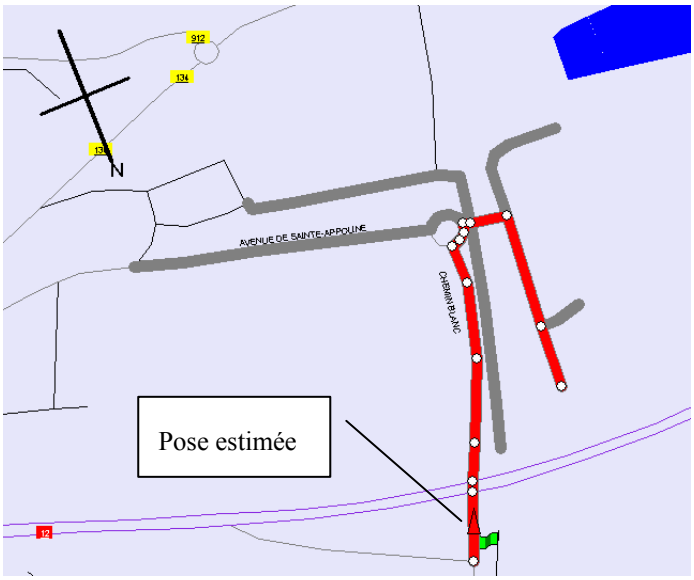


Figure 5.17. Horizon électronique d'ADASRP (NavTeQ)

La notion d'horizon électronique est particulièrement bien adaptée pour permettre au conducteur d'être averti suffisamment à l'avance d'un danger pouvant le concerner. C'est donc un composant important pour le filtrage d'informations selon des critères géométriques. Il est actuellement considéré pour orienter les communications entre véhicules (*Car to Car Communication*).

4.2 Gestion d'alertes échangées entre véhicules

Considérons la fonction « Alerter les véhicules en amont d'accidents/incidents » du projet ARCOS. On considère des véhicules équipés d'un système de localisation (sur carte ou en absolu) et d'un système de télécommunication[48] capable de transmettre des données d'alerte. Le schéma de la figure 5.18 présente l'architecture matérielle et logicielle embarquée dans chaque véhicule telle qu'elle a été développée dans le thème 9 d'ARCOS.

Figure 5.18. Architecture logicielle et matérielle de la fonction Alerte.

[48] Le système MTNET a été utilisé dans le projet ARCOS.

L'objectif est de prévenir le conducteur qu'il arrive sur une zone dangereuse et de lui spécifier le mieux possible la nature du danger. Le thème 6 d'ARCOS (coopération Homme-Machine) a défini le tableau de la figure 5.19 présentant les différentes sources d'alerte, leur origine et la manière dont elles seront restituées au conducteur (son : voix ou bip ; visuel : message et pictogramme).

Nom	Description	Pictogramme	Message affiché	Message sonore
AIRBAG	Alerte émise de façon automatique par le déclenchement d'un AIRBAG		Danger à 216 m ACCIDENT !	Danger à moins de 300m, Accident !
AFU	Alerte émise de façon automatique par le déclenchement d'un freinage d'urgence.		Danger à 478 m RALENTISSEMENTS !	Danger à moins de 500m, Ralentissements !
VAPV	Alerte émise à l'initiative du conducteur pour signaler un véhicule arrêté en pleine voie		Danger à 35 m ACCIDENT !	Danger à moins de 50m, Accident !
DEGRADE	Alerte émise à l'initiative du conducteur ou bien automatiquement pour signaler un environnement dégradé (verglas, brouillard etc)		Chaussée dégradée à 58m	Bip sonore
VT	Alerte émise à l'initiative du conducteur par un véhicule témoin d'un événement considéré comme dangereux pour les véhicules situés en amont		Attention à 92m	Bip sonore
WARNING	Alerte émise de façon automatique lorsque le conducteur actionne les feux de détresse (en queue de bouchon par exemple)		Signal de détresse à 354m	Bip sonore
BAU	Alerte émise à l'initiative du conducteur par un véhicule arrêté sur la bande d'arrêt d'urgence		Véhicule sur le bas-côté à 136m	Bip sonore
TRAVAUX	Alerte émise de façon automatique par une balise de bord de route située à l'entrée dune zone de travaux		TRAVAUX ! à 78m Ralentissez	Danger à moins de 100m, TRAVAUX !

Figure 5.19. Alertes considérées dans ARCOS.

La localisation est un composant essentiel dans cette application. Elle permet :

- de géoréférencer les alertes au moment de leur diffusion, soit en les localisant en absolu, soit en les localisant sur carte,
- de filtrer les alertes à la réception en ne laissant passer que celles qui sont pertinentes.

Plusieurs méthodes ont été étudiées dans le projet avec ou sans utilisation de la cartographie. Le filtrage utilisant un horizon électronique est celui qui donne les meilleures performances. La méthode qui a été employée est simple mais suppose l'utilisation de cartes NavTeQ uniquement : le véhicule émettant l'alerte diffuse l'identifiant NavTeQ du segment le plus probable. Le véhicule récepteur n'a plus qu'à regarder si cet identifiant appartient à la liste de ceux figurant dans son horizon électronique.

4.3 Conseil de vitesse excessive

Nous avons conçu et équipé le véhicule STRADA d'un accélérateur sensitif. Nous avons opté pour un montage mécanique simple qui garantit une bonne sûreté de fonctionnement : un câble s'enroulant sur une poulie tire la pédale vers le haut (il est donc impossible d'accélérer). Nous avons installé un moteur à courant continu sous le siège du conducteur (cf. figure suivante). Ce moteur est piloté en courant grâce à un variateur de couple qui assure l'asservissement bas niveau.

Pour l'indication de vitesse excessive, nous avons développé une stratégie de commande qui consiste à appliquer un effort moyen de quelques dizaines de Newtons en lui superposant un train d'impulsions (de l'ordre de 35 Hz après plusieurs essais). Cet effet vibratoire avertit le conducteur même lorsque son pied n'est plus sur l'accélérateur.

Nous avons développé une application temps réel d'indication de vitesse excessive (*ISA – Intelligent Speed Adaptation*). Elle intègre :

- l'acquisition des données GPS et ABS à 5Hz
- leur fusion
- la sélection de route
- l'extraction de l'attribut de vitesse limite attaché au segment le plus probable,
- une IHM graphique[49],
- la commande de l'accélérateur sensitif.

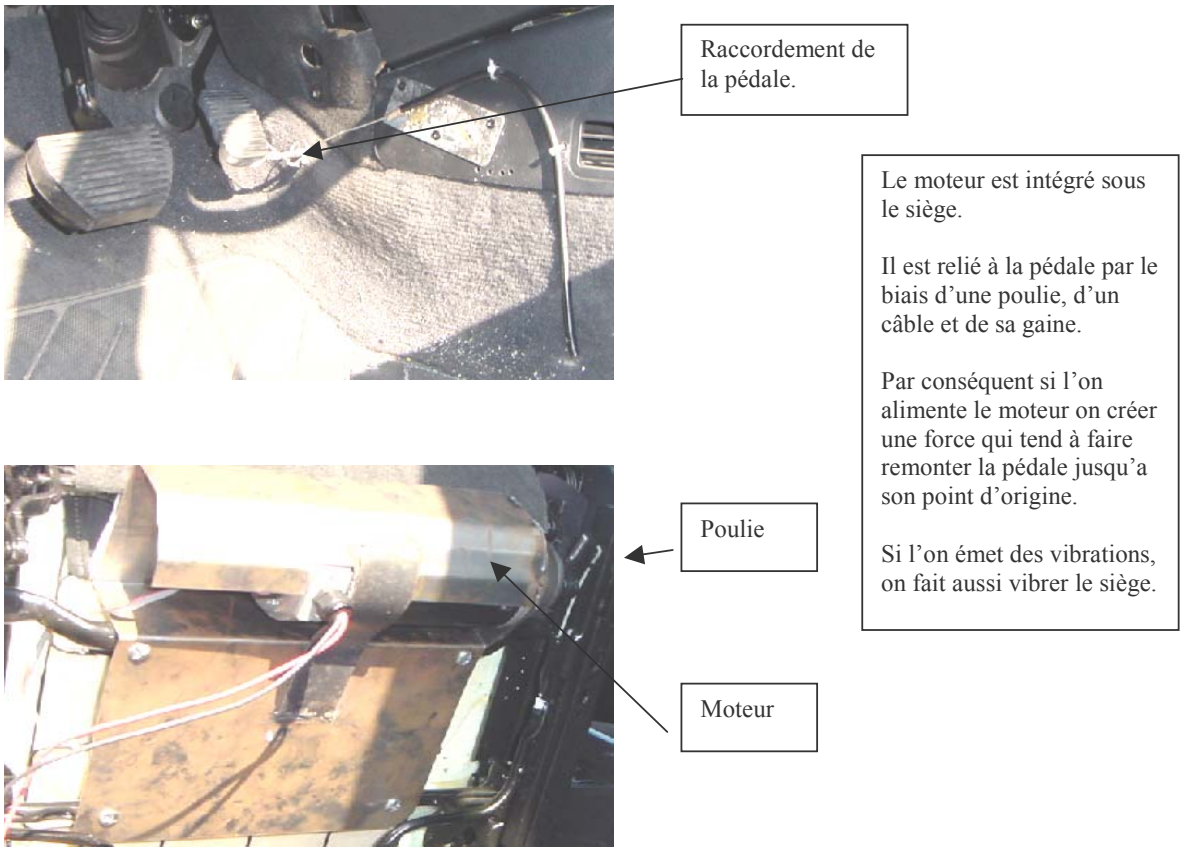


Figure 5.20. Prototype d'accélérateur sensitif permettant d'agir également comme vibreur de siège.

[49] pour apprécier le fonctionnement du système et pas pour avertir le conducteur.

Ce système est pleinement opérationnel dans le véhicule et a fait l'objet de nombreuses démonstrations. Pour qu'il fonctionne convenablement, il faut que la fonction de localisation produise de bons résultats. Cependant, la précision du positionnement n'est pas l'élément le plus important car l'attribut de vitesse limite est une grandeur souvent constante même si elle subit des discontinuités. Pour résoudre ce problème de discontinuité, l'utilisation d'une fonctionnalité d'horizon électronique permettrait de rendre moins brutale l'action sur la pédale. L'élément le plus important dans ce système est la validité de l'information vitesse limite enregistrée dans la base. A ce jour, il n'existe pas en France d'organisation permettant de maintenir à jour cette information à jour, car les décisions d'affectation de vitesse limite sont prises par des autorités très variées.

4.4 Localisation précise pour la récupération d'attributs d'une base de données navigable

Le conseil de vitesse est un exemple simple d'application ADAS utilisant de l'information géographique. De nombreux systèmes sont à l'étude pour utiliser des attributs avancés des bases de données navigables comme ceux étudiés dans le projet ARCOS[50]. Par exemple, le rayon de courbure est utile à la prévention des sorties de routes ou aux systèmes de phares intelligents. Contrairement à la vitesse limite, ces attributs peuvent avoir une dynamique plus élevée, ce qui demande une localisation plus précise sur la carte.

La figure 5.21 illustre un système que nous avons utilisé dans ARCOS pour récupérer la vitesse limite et la largeur de la voie.

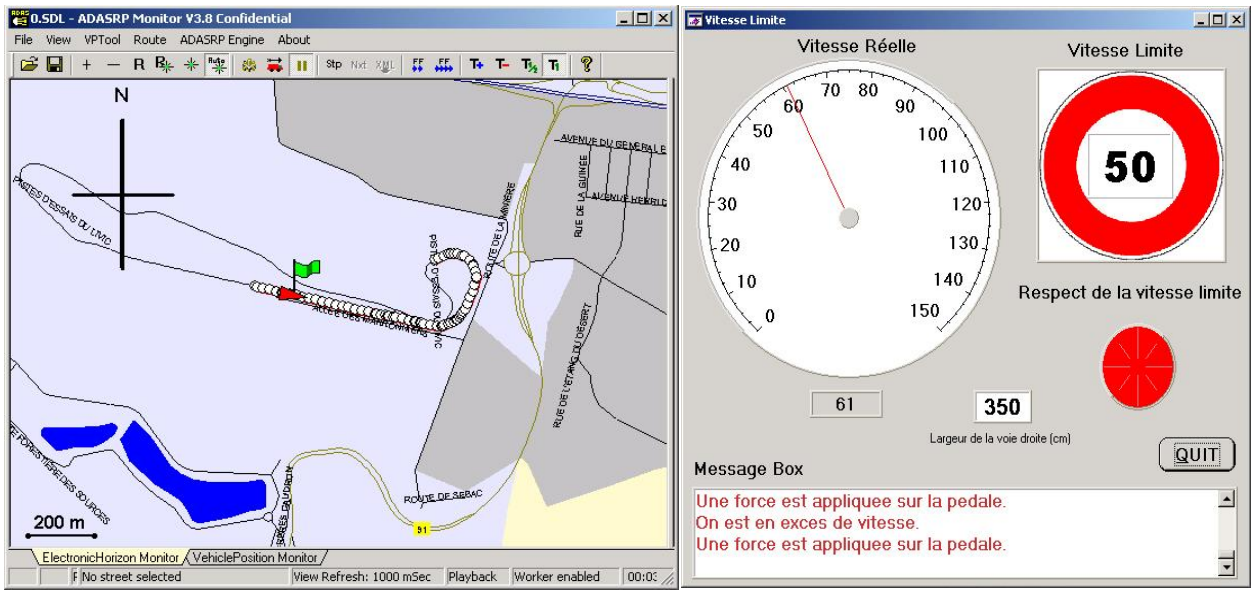


Figure 5.21. Interface graphique permettant de vérifier que la vitesse limite et la largeur de la voie extraite de la base sont conformes à la réalité.
On pourrait imaginer cependant qu'un certain nombre de composants (comme la valeur de la vitesse limite) soit affichés dans un tableau de bord électronique

[50] cf. chapitre 3, paragraphe 4, table 3.2.

4.5 Confiance dans un positionnement sur carte

Dans les bases de données navigables actuelles, les routes sont représentées par des polylignes 2D. Naturellement, cette représentation de la géométrie constitue une vision déformée de la réalité, d'autant plus que la carte peut ne pas être à jour. Ainsi, la solution au problème de localisation peut ne pas exister ou être difficile à trouver du fait de la déformation. Par ailleurs, même si on suppose la carte parfaite, une perte prolongée de signal GPS (en milieu urbain par exemple) peut être source d'ambiguïtés, la localisation à l'estime ayant toujours tendance à dériver. Quantifier la confiance dans un positionnement sur carte est donc un besoin essentiel si l'on envisage d'utiliser cette information pour concevoir une assistance.

Dans le paragraphe 5.2 du chapitre 4 (page 103), une approche par fusion de critères dans le cadre de la théorie des croyances a été présentée pour sélectionner les segments d'une base de données. Comme nous l'avons vu, cette approche présente un caractère local mais, grâce à l'étude de la configuration géométrique des segments crédibles, il est possible de quantifier la confiance dans le positionnement.

Considérons l'ensemble des segments déclarés crédibles (selon la loi de décision idéale) suite à une étape de sélection de routes pour une pose donnée. Cet ensemble permet de caractériser la configuration géométrique du réseau routier. On propose de quantifier un indicateur qu'on appelle MDOP (*Map Dilution Of Precision*) conformément à la figure 5.22.

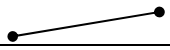
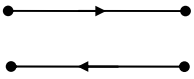
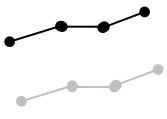
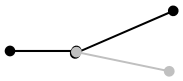
MDOP	Situation	Description	*Nature*
1	1 segment		*Non ambigu*
0.9	1 arc de plusieurs segments		*Non ambigu*
0.8	2 arcs connexes		*Non ambigu*
0.7	2 arcs parallèles à sens unique et de direction opposée		*Non ambigu si le cap est connu précisément et si le champ « sens » est bien renseigné*
0.6	Deux arcs sans point commun		*Ambigu*
0.5	Jonction		*Ambigu*

Figure 5.22. Facteur d'affaiblissement du positionnement sur la carte numérique.

Grâce au MDOP et à la crédibilité *Bel()* de sélection de chaque segment (issue de la fusion des critères), on définit la confiance dans le positionnement comme :

Confiance = *Bel*(*S*).*MDOP*

Où *Bel(S)* représente la crédibilité du segment le plus crédible.

Une telle information de confiance est importante, car toutes les fonctions d'assistance n'ont pas les mêmes besoins. Voici quelques exemples de seuils pour différentes fonctions d'assistance :

- *Confiance* > 0,5 : navigation et guidage,
- *Confiance* > 0,7 : émission d'alerte géoréférencée,
- *Confiance* > 0,9 : récupération d'attributs intervenant dans le contrôle du véhicule (adhérence, marquage, etc.).

Le calcul de l'indicateur de confiance en la localisation sur carte a été testé sur un essai de plusieurs kilomètres. Intéressons nous ici à l'approche d'une jonction (cf. figure 5.23). Logiquement, on constate qu'à l'approche du carrefour la confiance décroît sensiblement. Elle remonte ensuite bien que la carte soit fausse de façon très visible.

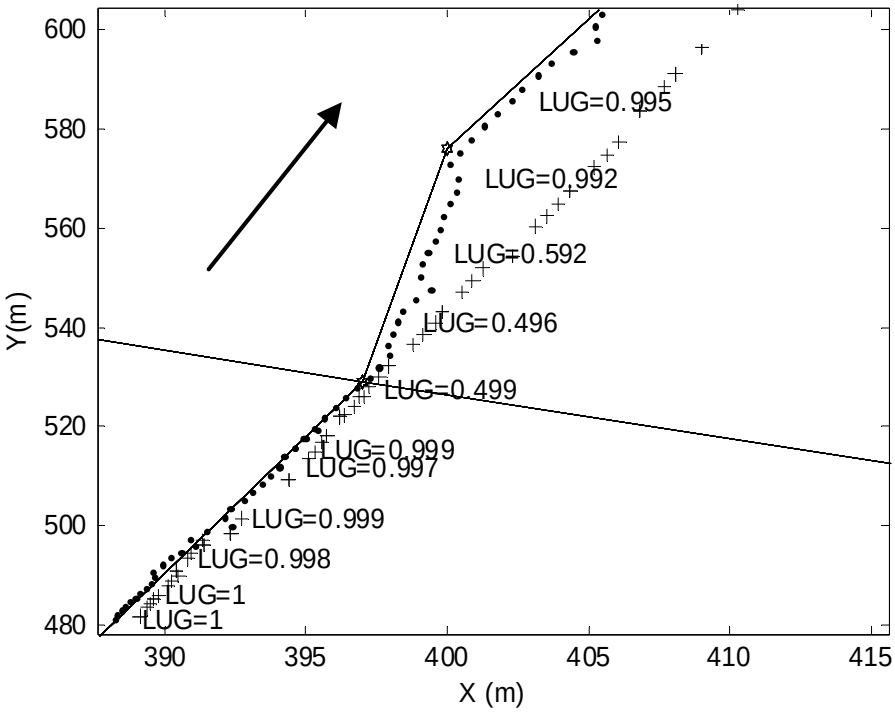


Figure 5.23. Estimation de l'indicateur de confiance (appelé LUG Localization Uncertainty Gauge) à l'approche d'un carrefour (les '+' sont les points GPS et les '.' sont les positions fusionnées).

Ces résultats ont présentés dans [CI 2] et [CI 4].

5 CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en exergue ma vision de l'assistance à la conduite ainsi que mes contributions. Dans la logique suivant laquelle le conducteur reste responsable de la conduite, le problème de l'assistance est un vrai problème fondamental. A l'inverse, la conduite automatique sur certaines routes spécialisées me semble plus simple à réaliser et faisable (à l'horizon de quelques dizaines d'années) si le besoin sociétale et économique se fait ressentir et s'il existe une volonté politique. Ceci étant, il y aura toujours besoin d'un mode manuel, assisté autant que faire se peut, pour bon nombre de conditions d'utilisation.

Le succès de l'utilisation d'une ADAS dépend de beaucoup de paramètres. Nous avons vu que la perception de la situation de conduite et l'étude du comportement du conducteur utilisant une ADAS sont deux points importants. Estimer la situation de conduite avec des systèmes de perception artificiels est une tâche très complexe pour laquel la fusion de données peut apporter des contributions. Dans ce cadre, nous avons vu que la fonction de localisation (absolue ou sur carte) est très utile car elle permet notamment de percevoir avec anticipation et de tirer profit des nombreuses informations contextuelles stockées dans les bases de données. Pour la gestion des alertes entre véhicules, la localisation absolue est même un besoin essentiel. Cette application illustre le potentiel de cette technologie pour les applications coopératives mettant en œuvre des systèmes de télécommunication. Au même titre qu'il faut dater les informations, il faut les référencer dans l'espace.

Enfin, la confiance dans un positionnement sur carte est une problématique nouvelle qui intéresse les constructeurs automobiles et les équipementiers. La méthode utilisant le résultat de la sélection de route constitue une première approche que je souhaite approfondir.

Chapitre 6. Conclusions et perspectives.

1 CONCLUSION

Ce manuscrit a présenté une synthèse de mes travaux de recherche depuis mon arrivée à l'UTC en 1998. Ma rédaction a été organisée autour d'un fils conducteur : la localisation dynamique multisensorielle appliquée aux véhicules automobiles pour l'aide à la conduite en particulier. Cet effort de synthèse m'aura été très profitable pour situer mes lignes méthodologiques par rapport aux objectifs finalisés des projets auxquels j'ai participé. Je pense avoir atteint cet objectif ce qui me permet de définir des orientations et centres d'intérêts pour les années qui viennent.

Le document a été structuré selon une logique que je rappelle ici. J'ai écrit le chapitre 2 pour faire un état de l'art sur la radiolocalisation au regard d'une localisation dynamique multisensorielle utilisant cette technologie prometteuse. Cet effort de bibliographie m'a été très bénéfique. Le deuxième volet technologique sur lequel je me suis penché porte sur l'information géographique et les systèmes pour la manipuler (chapitre 3). Je pense que ce point constitue une originalité de la démarche que je défends. L'évolution constante des capacités de traitement et stockage de l'information renforce ma conviction que l'utilisation de SIG pour la localisation est une voie à explorer, en particulier pour la gestion des amers. Le chapitre 4 a porté sur la modélisation sous forme d'état d'un problème de localisation. Sur cette base, la méthodologie d'observation d'état permet de traiter le problème de localisation dynamique avec des capteurs proprioceptifs, pour mettre en œuvre une localisation à l'estime, et des capteurs absolus pour procéder à des recalages. Dans ce chapitre, nous avons étudié des modèles odométriques pour l'automobile et plusieurs approches de localisation bayésiennes et ensemblistes ont été présentées. Deux grandes classes de problème ont été définies : la localisation absolue dans un repère géodésique et la localisation sur carte. Enfin, le dernier chapitre a abordé le problème de l'aide à la conduite automobile. Une méthodologie de conception d'ADAS a été présentée. Nous avons ensuite abordé la problématique de l'évaluation du comportement du conducteur et nous avons vu comment la localisation peut servir dans des fonctions avancées d'assistance à la conduite.

2 CONTRIBUTIONS SIGNIFICATIVES

2.1 Contributions théoriques

Modélisation du problème. Nous avons vu que la localisation dynamique peut se formuler comme un problème d'observation d'état non linéaire avec les spécificités suivantes :

- l'entrée est mesurée,
- les mesures sont asynchrones,
- il faut procéder à une étape d'association de données pour identifier les amers quand ceux-ci sont non distinguables,
- les mesures absolues présentent souvent une latence.

Généralement, la localisation est décomposée en deux étapes : une étape de localisation globale et une étape de suivi de pose. La formulation du problème sous forme d'observation d'état offre un cadre méthodologique intéressant qui permet d'aborder le problème du suivi de pose sous un angle rigoureux.

Approche bayésienne. Durant ma thèse, je m'étais rendu compte de l'importance de considérer des approches utilisant une modélisation explicite des erreurs pour fusionner les différentes sources d'information. Ma contribution aux approches bayésiennes se limite au filtrage de Kalman étendu que j'ai décliné sous différentes formes pour le suivi de pose :

- filtre à état continu et observations discrètes variant dans le temps,
- filtre à entrée mesurée,
- transmission de bruits d'entrée sur la sortie (filtre à bruits corrélés),
- prise en compte et modélisation de bruits colorés (filtres formeurs).

Approche ensembliste. Sous hypothèse d'erreurs bornées, j'ai travaillé sur des méthodes dans lesquelles les ensembles à estimer sont décrits par des pavés ou des sous-pavages. Mes premiers travaux avec D. Meizel et P. Bouron ont porté sur des mécanismes prédicteur/estimateur par inversion ensembliste. Cette approche a montré sa faisabilité mais s'est avérée inadaptée à une implémentation temps réel. Une alternative réside dans une approche par propagation de contraintes sur les intervalles réels qui peut se justifier s'il existe une redondance de mesures, ce qui est le cas pour un problème de localisation dynamique. Avec A. Gning nous avons démontré que ces méthodes peuvent donner de bons résultats même si la caractérisation des bornes des phénomènes aléatoires est un point sensible. Nous avons également remarqué que la recherche d'une méthode atteignant la consistance globale constitue une étape clé, car les méthodes locales (proposées par Luc Jaulin en particulier) peuvent se bloquer dans certains cas. Pour traiter ce problème, nous avons proposé une approche par domaines de consistance.

Temps réel. La contrainte de temps réel est une préoccupation que j'ai constamment à l'esprit, ce qui me fait rechercher des méthodes dont le temps de calcul peut être caractérisé par une borne fixe. Le mécanisme prédicteur/estimateur est particulièrement bien adapté au problème de localisation et permet de développer aisément des tâches temps réel (à mémoire interne). Comme nous l'avons vu, il permet en outre de traiter simplement le problème des

mesures extéroceptives à faibles latences. Concernant les méthodes par propagation de contraintes, l'approche par domaines de consistance est adaptée au temps réel puisqu'elle permet de trouver la solution globalement consistante d'un problème statique en un nombre fini d'opérations arithmétiques. On peut s'en servir pour la localisation dynamique, à condition de développer un observateur à mémoire finie travaillant sur un horizon temporel limité.

Association de données. L'association de données est un problème crucial qui intervient lorsque l'on utilise une information indistinguable pour procéder à un recalage. Je me suis penché sur ce problème pour la localisation sur un réseau routier cartographié provenant dans une base de données navigable. Ce problème revient à chercher le ou les segments compatibles avec l'estimation courante de la pose. C'est un problème de mise en correspondance pour lequel j'ai étudié une approche par fusion de critères dans le cadre de la théorie des croyances (thèse de M. E. El Najjar).

2.2 Contributions applicatives

Modélisation du problème pour l'automobile. Nous avons vu que la localisation dynamique d'une automobile présente des spécificités. Premièrement, les véhicules modernes possèdent de nombreux capteurs proprioceptifs qui sont rendus accessibles par l'intermédiaire de réseaux informatiques embarqués (réseau CAN en particulier). Ces capteurs peuvent être ainsi mis à profit pour la localisation au travers de modèles mathématiques de localisation à l'estime. J'ai étudié et proposé plusieurs modèles, notamment un modèle complet qui utilise les capteurs ABS des 4 roues, un gyromètre et une mesure de l'angle au volant. Deuxièmement, le positionnement satellitaire s'imposant comme la technologie reine pour l'automobile grâce à son coût très bas, j'ai étudié plusieurs systèmes GPS et je me suis intéressé à leur modélisation (GPS naturel, différentiel, mesures de code, de Doppler et de phase). Troisièmement, le fait que les voitures roulent sur des routes cartographiées de façon numérique est une propriété qui contraint l'espace de localisation. J'ai étudié la façon dont les routes sont modélisées de façon à mettre à profit cette information dans le processus de localisation. Ceci a conduit au développement d'un filtre de Kalman qui utilise une observation cartographique de façon analogue à une solution GPS.

Prototypage. Le prototypage fait partie de la culture roboticienne et est essentiel pour illustrer la faisabilité et les performances d'une approche. J'ai prototypé et développé un système complet de localisation hybride {dGPS Omnistar, gyromètre, odomètres} qui fonctionne en temps réel à 5 Hz à bord du véhicule expérimental du laboratoire. Ce système a été évalué en Août 2004 par le LCPC et s'est révélé de précision métrique et *consistant*, c'est-à-dire qu'il estime correctement son erreur de localisation. En effet, l'estimation de l'erreur de localisation est une grandeur nécessaire pour aborder les notions d'intégrité et de sûreté de fonctionnement.

Utilisation de SIG pour la localisation. L'information géographique a suivi une évolution considérable ces dernières années notamment en termes de modélisation et grâce à des capacités de stockage et de traitement sans cesse plus performantes. La mise en place de standards et de normes a profité au développement de Systèmes d'Information Géographique.

Un SIG peut être utile à un système de localisation de deux façons différentes. Premièrement, les amers et leurs caractéristiques peuvent être stockés dans des bases de données, au même titre que d'autres informations géographiques. Deuxièmement, l'information géographique vectorielle (comme la représentation des routes par des polylignes) est une donnée *a priori* pouvant contribuer au positionnement. J'ai travaillé sur ces deux aspects, en développant un prototype d'enregistrement et d'extraction d'amers avec le kit de développement d'applications cartographiques d'une petite société française (BeNomad – Nice) et en encadrant une thèse de doctorat sur l'utilisation de carte numérique pour la localisation (M. E. El Najjar).

Confiance dans le positionnement. Dans les bases de données navigables actuelles, les données sont associées à des polylignes 2D représentant le réseau routier. Naturellement, cette représentation de la géométrie constitue une vision déformée de la réalité, d'autant plus que la carte peut ne pas être à jour. La solution au problème de localisation peut ainsi ne pas exister ou être difficile à trouver du fait de la déformation. Par ailleurs, même si on suppose la carte parfaite, une perte prolongée de signal GPS (en milieu urbain par exemple) peut être source d'ambiguïtés, la localisation à l'estime ayant toujours tendance à dériver. Ainsi, quantifier la confiance dans un positionnement sur carte est un besoin essentiel si l'on envisage d'utiliser cette information pour concevoir une assistance. La sélection de routes suivant une approche par fusion de critères dans le cadre de la théorie des croyances présente un caractère local mais, grâce à l'étude de la configuration géométrique des segments crédibles, nous avons proposé une heuristique qui caractérise assez bien, à la vue de nos résultats expérimentaux, la confiance dans le positionnement.

Conception et prototypage de systèmes d'aide à la conduite. Dans le GdR CHMAC, j'ai travaillé sur l'imagination de dispositifs de prévention des collisions arrière à partir d'analyses de procès verbaux d'accidents faites par l'INRETS. Il est apparu clairement le besoin d'émettre, avec le plus d'anticipation possible, une alerte géoréférencée de façon à prévenir les autres usagers en amont du danger. Dans le projet ARCOS, 4 fonctions ont été imaginées à partir d'une démarche plutôt technologique. Dans ce cadre, j'ai participé au prototypage des fonctions "prévention des sorties de routes" et "avertir les véhicules en amont". Dans le projet SAACAM, j'ai prototypé un système de conseil de vitesse à retour haptique qui fonctionne comme suit : grâce à un positionnement sur une carte numérique contenant la vitesse limite, on durcit la pédale d'accélérateur si le conducteur dépasse la vitesse autorisée. Pour cette ADAS, la fonction de localisation sur carte est essentielle. D'une façon générale, la localisation sur carte associée à une base de données navigable permet de caractériser de façon symbolique la situation de conduite (*Enhanced Driver Awarness*) et peut servir soit directement dans une ADAS, soit pour la paramétrer.

Evaluation du comportement du conducteur. La méthodologie suivie dans le projet ROADSENSE a reposé sur le calcul d'indicateurs du comportement du conducteur. Une grande partie du calcul de ces indicateurs peut être automatisée si le véhicule est équipé de moyens de perception et/ou si la fonction ADAS transmet des informations. Le système DBITE que nous avons développé offre cette possibilité de calcul, en temps réel ou en post-traitement, et permet en outre à l'ergonome de renseigner les indicateurs difficilement mesurables ou inobservables avec des systèmes embarqués. Le DBITE a, par nature, une

architecture matérielle distribuée du fait qu'il intègre des systèmes divers et qu'il enregistre des flux de données incompatibles avec les capacités d'un calculateur unique. De ce fait, la datation des données dans un référentiel commun représente le point clé pour lequel nous avons trouvé une invention nouvelle, entièrement distribuée et symétrique. Ce système a été breveté car il présente les caractéristiques intéressantes de ne pas avoir de maître, de supporter des pertes et des réinitialisations de réseaux et de ne pas agir en temps réel sur les horloges des calculateurs. Ces caractéristiques permettent de réaliser une re-datation garantie.

3 PERSPECTIVES

3.1 Perspectives scientifiques et technologiques

Observation d'état. Je me suis intéressé au filtre UKF très populaire actuellement, spécialement en robotique : il semble mieux s'adapter que l'EKF aux non linéarités des modèles, s'implémente de façon simple et est numériquement robuste. Dans la thèse de Maged Jabbour[51], nous allons étudier cette approche en remplacement du filtrage de Kalman étendu. En effet, il semble que les mesures télémétriques et l'utilisation d'amers linéaires créent des non linéarités importantes qui rendent le système de localisation inconsistant.

Pour le problème de la localisation sur carte, j'envisage de travailler sur des méthodes mélangeant les approches bayésiennes et ensemblistes. Un premier travail a été fait dans le post-doc de F. Abdallah dans lequel nous avons montré qu'il est possible de développer un filtre particulaire dans lequel les particules sont de type pavé. Ceci permet de réduire considérablement le nombre de particules tout en permettant de traiter les **situations ambiguës**. Je crois énormément à l'approche par filtrage particulaire car elle permet de traiter de façon élégante des problèmes à plusieurs solutions grâce à son aptitude à caractériser une densité de probabilité multimodale. Cette caractérise permet de mettre en œuvre le paradigme que je qualifie de "*track before localize*" (adaptation à la localisation du paradigme *track before detect* étudié actuellement pour les problèmes de suivi de cibles). Les particules réalisent le *tracking*, et la localisation s'effectue grâce à une étape d'estimation sur la base de la densité de probabilité estimée par la distribution des particules discrètes : on peut obtenir dans ce cas plusieurs solutions. Avec des particules ensemblistes[52], les poids ne sont plus des probabilités mais ils sont interprétables comme des **masses de croyance**. Je vais travailler sur ce point avec Thierry Denoeux et Fahed Abdallah, deux collègues du thème ASTRID d'Heudiasyc.

Diagnostic. Les modèles d'une représentation d'état peuvent servir également au développement de méthodes de diagnostic, afin de détecter des défaillances ou des inconsistances entre les capteurs. Ce point revêt une importance primordiale actuellement compte tenu de la sensibilité importante des systèmes satellitaires à des brouillages

[51] Actuellement en fin de première année de thèse.

[52] Nos premiers travaux ont été présentés dans [AI 1].

volontaires et malveillants. Le diagnostic et la surveillance d'un système de localisation appartiennent donc à un domaine clé dans lequel j'envisage de m'investir, notamment avec l'utilisation d'une approche ensembliste. En effet, je pense que les **domaines de consistance** peuvent s'appliquer à la caractérisation garantie de résidus.

Confiance dans un positionnement sur carte. Nous avons vu que le problème de la localisation sur carte est plus compliqué qu'il n'y paraît car le véhicule peut ne pas être sur une route, être sur une route non cartographiée ou bien se déplacer dans un milieu inadapté au GPS. Dans ce dernier cas, chaque intersection est source d'ambiguïté lors de la phase de suivi de pose sur carte. Dans la thèse de M. El Najjar nous avons suivi une approche qui consiste à rechercher le segment plus *crédible*. Suite aux "journées fonctions de croyance" de mars 2005, je crois que le raisonnement inverse est plus adapté[53]. Il vaudrait mieux éliminer les segments *non plausibles* car cette approche génère moins de conflit.

Définition des besoins de localisation des futurs véhicules communicants. La fonction de localisation est un composant indispensable à la communication généralisée entre véhicules ou entre véhicules et infrastructure. L'aviation civile est très en avance dans le domaine de la spécification des besoins de localisation, déclinée selon les quatre critères suivants : intégrité, précision, disponibilité et continuité. Pour l'automobile, les besoins de localisation sont très variés et il s'agit des identifier. A l'heure de la conception du système de positionnement satellitaire européen Galiléo, la communauté européenne a lancé des appels à projet en mars 2005 dans le cadre du 6eme PCRD pour étudier l'utilisation de systèmes coopératifs pour les transports[54]. Dans ce cadre, la localisation absolue et la localisation sur carte sont deux points jugés importants. **L'intégrité** du positionnement absolu est une problématique nouvelle pour l'automobile. L'estimation de la **confiance dans le positionnement** sur carte est un problème qui a de nombreuses applications dans le domaine des systèmes de transport intelligents, notamment pour les fonctions ADAS. Une étape préalable réside dans une **caractérisation générique des sources d'information** utilisées pour la localisation d'automobiles (GPS, capteurs proprioceptifs, cartes).

Généralisation de l'utilisation des systèmes d'information géographique. Les SIG actuellement utilisés dans les véhicules proposent des fonctionnalités de navigation à partir de données non modifiables. Rendre possible un **accès en écriture** pour modifier la base de données ou l'enrichir ouvre des perspectives nouvelles. Par ailleurs, en contribuant à la **normalisation** des informations utiles à la localisation, on peut imaginer l'utilisation à grande échelle de systèmes de localisation s'appuyant sur des SIG et s'échangeant des informations non ambiguës, même si les bases de données initiales ont des origines différentes.

Cette problématique constitue la toile de fond de la thèse de M. Jabbour sur la localisation et la gestion d'amers simultanées avec un SIG en partant d'informations géographiques connues. Nous nous inspirons des mécanismes de localisation et cartographie simultanées

[53] Raisonnement suivi par A. Priou actuellement pour le suivi de cible.

[54] Au moment où j'écris ces mots, le laboratoire a participé au montage d'un projet intégré (en réponse à l'appel E-Safety de mars 2005). Ce projet semble avoir des chances raisonnables de se réaliser, étant donné qu'il est en phase de négociation.

(SLAM) pour maintenir un positionnement absolu précis en cas de perte GPS ou de mauvaise qualité de ce dernier. Nous étudions cette approche avec des capteurs télémétriques lasers, mais elle pourrait s'adapter à l'utilisation d'autres capteurs comme la vision.

Nouvelles technologies en émergence. Un problème de localisation est extrêmement dépendant des technologies qu'il utilise. Au niveau des GNSS, les systèmes **GPS haute sensibilité** que l'on commence à trouver sur le marché m'intéressent particulièrement (spécialement la technologie "SiRF Star III"). J'envisage de tester un système de ce type afin d'apprécier s'il ne privilégie pas exagérément la disponibilité au dépend de la précision. Une autre perspective à court terme porte sur l'utilisation d'**EGNOS** (bientôt opérationnel) pour l'automobile. Même si la transmission de corrections depuis un satellite géostationnaire n'est très certainement pas le moyen le plus adapté à l'automobile, les concepts de sûreté de fonctionnement sont très intéressants. A plus long terme, l'arrivée de **Galiléo** et la modernisation du GPS vont permettre d'accroître la sûreté de fonctionnement, la disponibilité et la précision du fait de la redondance de deux systèmes aux performances analogues. Cependant, même si le nombre de satellites va doubler dans le ciel, je suis convaincu que les problèmes de disponibilité et de multi-trajets vont demeurer : la localisation multisensorielle conservera toujours ses raisons d'exister.

Concernant la cartographie des réseaux routiers, je sais que les cartographes étudient des représentations plus fines de la géométrie. Dans le cadre du partenariat que j'entretiens avec la société NavTeQ par le biais d'un accord de confidentialité, j'envisage de voir si les méthodes de localisation sur carte connues actuellement sont toujours adaptées.

Enfin, je pense faire de la veille technologique sur des systèmes de radiocommunication (signaux *Ultra Wide Bande* et Wifi et dérivés, en particulier) dont les mécanismes peuvent être bien adaptés au problème de la localisation.

Normalisation de la localisation pour l'échange d'information entre véhicules. Comme nous l'avons vu, un positionnement peut être caractérisé de différentes façons dans différents systèmes de localisation. Les informations qui seront échangées entre véhicules seront datées (grâce à une horloge asservie sur le temps GPS) et géo-référencées. Il semble en 2005 que le codage de la position absolue se normalise vers une représentation en longitude et latitude en WGS84 avec 5 chiffres après la virgule. Concernant les positions matchées sur cartes, le problème me semble assez ouvert puisqu'il faut trouver des méthodes qui soient indépendantes du fournisseur de la carte. J'envisage de participer à ce travail de normalisation pour défendre en particulier l'échange d'informations de confiance dans le positionnement.

3.2 Perspectives de structuration de mon activité de recherche

La réforme de la recherche universitaire française (réforme du CNRS et création de l'ANR notamment) va contraindre les chercheurs à répondre de plus en plus à des appels à projets, ce qui va conduire à une recherche à objectifs finalisés et limitée dans le temps. Ce modèle anglo-saxon va constituer une réelle révolution de notre façon de travailler. En effet, il va devenir essentiel de planifier à l'avance des moyens humains et matériels en coûts complets.

Dans cette perspective, la vision que j'ai mon activité de recherche est la suivante :

- conserver une ligne méthodologique durable dans le temps,
- participer à des projets de recherche appliqués dans une équipe soudée en cherchant à voir comment ces projets peuvent être sources de connaissances théoriques et de problématiques scientifiques,
- investir dans des moyens expérimentaux pour réaliser soit des expérimentations lourdes dans des programmes de recherche, soit des expériences académiques libres de contraintes industrielles.

Ce dernier point est important et fait partie de la culture du laboratoire Heudiasyc. Grâce à l'appui du CNRS et de l'UTC, nous investissons beaucoup dans la plate-forme de recherche PACPUS sur les ADAS. Cette plate-forme, en cours de développement depuis l'automne 2004, implique 6 permanents du laboratoire. Elle est essentielle pour la visibilité de nos travaux notamment auprès des industriels et des organismes de recherche européens et internationnaux.

Bibliographie

[Bétaille, 03] D. Bétaille.
"Assessment and improvement of the capabilities of a window correlator to model GPS multipath phase errors", PhD thesis, University College of London; 2003.

[Bernstein, Kornhauser, 98] Bernstein D and Kornhauser A.,
"Map Matching for personal navigation assistants". 77th Annual meeting, The Transport Research Board, Jan 11-15, Washinton D.C, 1998.

[Bouvet et al, 01] D. Bouvet, G. Garcia, B.J. Gorham, D. Bétaille.
"Precise 3-D localization by automatic laser theodolite and odometer for civil-engineering machines". ICRA2001. Seoul, May 21-26, 2001. pp. 2045- 2050

[Boreinstein, Feng, 96] J. Boreinstein et L. Feng.
"Gyrodometry : a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots". IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis. Avril 1996. pp. 423-428.

[Brown, Hwang, 97] R. G. Brown et P. Y.C. Hwang.
"Introducing to random signals and applied Kalman filtering".Third edition. Wiley 1997.

[Chung et al, 01] H. Chung, L. Ojeda, J. Borenstein.
"Sensor fusion for Mobile Robot Dead-reckoning With a Precision-calibrated Fiber Optic Gyroscope". ICRA 2001. Seoul, May 21-26, 2001. pp 3588 - 3593.

[Dissanayake et al, 01] M. W. M. G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H.F. Durrant-Whyte, M. Csorba,
"A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem", IEEE Trans. on Rob. and Auto., 17, 3, pp. 229-241.

[Durand, 02] S. Durrand.
"Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS", Thèse de doctorat. Observatoire de Paris. 2002.

[Doucet et al, 00] A. Doucet, S. Godsill, and C. Andrieu.
"On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian fltering", Statistics and computing, 10:197-208, 2000.

[Grewal et al, 01] M. Grewal, L. Weil and A. Andrews,
"Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration", Whiley inter-science, ISBN 0471-35032-X. 2001.

[Gaudin, 00] J.M Gaudin.
"Conception d'un système hybride GPS-estime pour la localisation en condition de visibilité satellitaire réduite". Thèse de doctorat Cemagref - Université de Montpellier II. 8 dec. 2000.

[Guivant et al, 00] J. Guivant, E. Nebot, S. Baiker.
"High accuracy Navigation Using Laser Range Sensors in outdoors Applications". ICRA2000. San Francisco. pp. 3817-3822.

[Gustafson et al, 02] F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergman, U. Forssell, J. Jansson, R. Karlsson, P. Nordlund.
"Particle filters for positioning, navigation, and tracking". IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 50, pp. 425- 435, Feb. 2002.

[Hermann, Krener, 77] R. Hermann et A.J. Krener.
"Nonlinear controllability and observability", IEEE Transactions On Automatic Control. Vol. AC-22, n° 5, Octobre 1977. pp. 728-740.

[Jaulin et al, 01] Jaulin L., M. Kieffer, O. Didrit and E. Walter,
"Applied Interval Analysis with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics", Springer-Verlag, ISBN: 1-85233-219-0. 2001.

[Jaulin, 02] L. Jaulin.
"Nonlinear bounded-error state estimation of continuous-time systems". Automatica, 38, 1079-1082. 2002.

[Joshi, 02] Joshi R.
"Novel Metrics for Map-Matching in In-Vehicle Navigation Systems". IEEE Intelligent Vehicle Symposium. 18-20 juin 2002,Versailles, France.
[Julier, Uhlmann, 97] S. J. Julier and J. K. Uhlmann.
"A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems". In Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simul. and Controls, Orlando, FL, 1997.
[Kieffer et al, 02] M. Kieffer, L. Jaulin and E. Walter,
"Guaranteed recursive non-linear state estimation using interval Analysis", International journal of adaptative control and signal processing, 16:193-218, 2002.
[Kopetz, 02] Hermann Kopetz
"Time-Triggered Real-Time Computing", IFAC World Congress, Barcelona, July 2002, IFAC
[Marais, 02] J. Marais,
"Localisation de mobiles terrestres par satellites. Mise en œuvre d'outils permettant l'analyse de l'influence des conditions de propagation et des effets de masques sur la disponibilité du service offert". Thèse de doctorat de l'USTL, laboratoire LEOST (INRETS). 4 Juillet 2002.
[Meizel et al, 02] Meizel, O. Lévêque, L. Jaulin and E. Walter
"Initial Localization by Set Inversion". IEEE transactions on. on robotics and Automation. Volume 18, Number 6, pages 966-971. 2002.
[McGuire et al, 05] M. McGuire, K. N. Plataniotis, and A. N. Venetsanopoulos,
"Data Fusion of Power and Time Measurements for Mobile Terminal Location", IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, VOL. 4, NO. 2, MARCH/APRIL 2005.
[Moore, 66] Moore, R. E.
"Interval Analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1966.
[Norgaard et al, 00] M. Norgaard, N. K. Poulsen and O. Ravn,
"Advances in derivative-free state estimation for nonlinear systems", Technical report IMM-REP-1998-15, Technical University of Denmark, 2000.
[Royer et al, 04] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome and T. Chateau,
"Towards an alternative GPS sensor in dense urban environment from visual memory", Proceedings of the 15th British Machine Vision Conference, September 2004.
[Simond et Rives, 04] Simond and P. Rives,
"Trajectography of an Uncalibrated Stereo Rig in Urban Environments", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems, 2004.
[Smith, Self, Cheeseman, 88] R. Smith, M. Self et P. Cheeseman.
"Estimating Uncertainty Spatial Relationships in Robotics". 1988 Elsevier Science Publishers, Uncertainty in Artificial Intelligence, Vol 2. pp. 435-461.
[Taylor et Blewitt, 00] Taylor G., Blewitt Geoffrey,
"Road Reduction Filtering Using GPS", 3th AGILE Conference on Geographic Information Science – Helsinki, Finland, May 25-27, 2000.
[Torrieri, 84] D. J. Torrieri.
"Statistical theory of passive location systems". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. AES-20, n°2, 1984. pp. 183-198.
[Wijesoma et al, 04] W.S. Wijesoma, K.R.S. Kodagoda, and A. P. Balasuriya,
"Road Boundary Detection and Tracking using Ladar", IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 20, No.3, Jun. 2004, 456-464.
[Wylie and Holtzman, 96] M.P. Wylie and J. Holtzman.
"The non-line of sight problem in mobile location estimation", 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications, 1996. pp. 100-105.
[Zhao, 97] Y. Zhao.
"Vehicle location and navigation systems", Artech House, Intelligent transportation systems, pp. 43-81, 1997

Publications référencées dans ce document

Par rubrique et par ordre chronologique inverse

1 JOURNAUX INTERNATIONAUX

[JI 1] A. Gning, Ph. Bonnifait "Constraints Propagation Techniques on Intervals for a Guaranteed Localization using Redundant Data". ***Automatica.*** (à paraitre).

[JI 2] El Badaoui El Najjar M., Bonnifait P. "A Road-Matching Method for Precise Vehicle Localization using Kalman Filtering and Belief Theory." ***Journal of Autonomous Robots***, n°19, pp.1-19. April 2005. Kluwer Academic Publishers.

[JI 3] Ph. Bonnifait, P. Bouron, D. Meizel and P. Crubillé. "Dynamic Localization of Car-like vehicles using Data Fusion Of Redundant ABS sensors". ***The Journal Of Navigation***, Vol. 56, pp. 1-13. 2003.

[JI 4] Ph. Bonnifait and G. Garcia. "6 DOF Dynamic Localization of an outdoor mobile robot". ***Control Engineering Practice***. Elsevier Science. NO. 7 (1999) pp. 383 - 390.

[JI 5] Ph. Bonnifait and G. Garcia. "Design and Experimental Validation of an Odometric and Goniometric Localization System for Outdoor Robot Vehicles". ***IEEE Transactions on Robotics and Automation.*** REGULAR PAPER Vol. 14, NO. 4, August 1998, pp. 541 - 548.

[JI 6] Ph. Bonnifait et G. Garcia. "Un système de localisation 3D utilisant deux inclinomètres pour des véhicules à évolutions lentes". ***Journal Européen des Systèmes automatisés. RAIRO- APII - JESA.*** Volume 31. N° 9-10 - Décembre 1997. Pages 1645 - 1670.

2 JOURNAUX FRANÇAIS

[JF 1] A. Gning et Ph. Bonnifait. "Fusion de données redondantes avec une technique ensembliste atteignant la consistance globale". Article sélectionné dans CIFA 2004 à paraître dans la revue e-STA Sciences et Technologies de l'Automatique.

[JF 2] M. E. El Najjar, V. Cherfaoui, Ph. Bonnifait, C. Royère. "Elaboration de fonctions de croyance à partir de données GPS et SIG. Etude de stratégies de fusion pour la localisation d'un véhicule". Technique et Sciences Informatiques. RTSI série TSI. Volume 22 – n° 7-8/2003. Hermes Lavoisier.

3 ATELIERS INTERNATIONAUX

[AI 1] F. Abdallah, Ph. Bonnifait, A. Gning. "A Particle Filter on Interval Data for Mobile Localization". Worhshop IntCP 2005 *Interval Analysis and Constraint Propagation for Applications* de la conférence Eleventh International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2005), Sitges (Barcelona) Spain, October 1 - 5, 2005.

[AI 2] M. Shawky, P. Crubille, Ph. Bonnifait. "Archiving and Indexing of Large Volume Sensor Data of an Equiped Vehicle", DRiiVE 99, Espoo, Finland, July 21-23 1999.

[AI 3] Ph. Bonnifait, G. Garcia et F. Peyret. "A System for 3D Localization of Civil-Engineering Machines", présentation invitée au workshop "*Navigation Of Outdoor Autonomous Vehicles*" organisé par E. Nebot, de l'Université de Sydney, en marge du congrès "IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 98)". Louvain Belgique, 17 mai 98.

4 CONGRES INTERNATIONAUX AVEC COMITE DE LECTURE ET ACTES

[CI 1] M. Kais, Ph. Bonnifait, D. Bétaille, F. Peyret. “Development of Loosely-Coupled FOG/DGPS and FOG/RTK Systems for ADAS and a Methodology to Assess their Real-Time Performance”. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2005), Las Vegas, June 2005 (pp. 358-363).

[CI 2] M. E. El Najjar and Ph. Bonnifait. “Intelligent Vehicle Absolute Localisation using GIS Information”. 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, from July 4 to July 8, 2005.

[CI 3] A. Gning and Ph. Bonnifait. “Dynamic Vehicle Localization using Constraints Propagation Techniques on Intervals. A comparison with Kalman Filtering”. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 05). Barcelona. April 2005.

[CI 4] M. E. El Najjar and Ph. Bonnifait. “Towards an Estimate of Confidence in a Road-Matched Location”. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 05). Barcelona. April 2005.

[CI 5] A. Gning and Ph. Bonnifait. “Guaranteed Dynamic Localization using Constraints Propagation Techniques on Real Intervals”. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 04). December 8. 10, 2004. Hammamet, Tunisia.

[CI 6] A. Gning et Ph. Bonnifait. « Fusion de données redondantes avec une technique ensembliste atteignant la consistance globale ». Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 04) déc. 04, Tunisie.

[CI 7] A. Gning and Ph. Bonnifait. “Guaranteed Dynamic Localization using Constraints Propagation Techniques on Real Intervals”. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 04). New Orleans, LA. April 2004. pp1499-1504.

[CI 8] M. E. El Najjar and Ph. Bonnifait. "A Roadmap Matching Method for Precise Vehicle Localization using Belief Theory and Kalman Filtering ". IEEE/RJS/ISR 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 03). Portugal, July 03. pp. 1677-1682.

[CI 9] D. Bétaille and Ph. Bonnifait. "Vehicles Modeling and Multi-Sensor Smoothing Techniques for Post-Processed Vehicles Localisation". ION GPS 2002. Portland, Oregon. September 2002. pp 24-27.

[CI 10] M. E. El Najjar et Ph. Bonnifait. "Multi-Criteria Fusion for the Selection of Roads of an Accurate Map". Regular paper. 15th IFAC World Congress, Barcelona, 21-27 Juillet 2002.

[CI 11] M. E. El Najjar et Ph. Bonnifait. "Sélection de segments d'un réseau routier pour la localisation d'une automobile". CIFA – Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Nantes, du 8 au 10 juillet 2002.

[CI 12] M. E. El Najjar et Ph. Bonnifait. "A Road Reduction Method using Multi-Criteria Fusion". IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV 2002), June 18-20, 2002, Versailles, France.

[CI 13] Ph. Bonnifait, P. Bouron, P. Crubillé, D. Meizel. "Data Fusion of Four ABS Sensors and GPS for an Enhanced Localization of Car-like Vehicles", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 01). Séoul. May 2001. pp. 1597-1602.

[CI 14] P. Bouron, D. Meizel, Ph. Bonnifait. "Set-Membership Non-Linear Observers with Application to Vehicle Localisation". 6th European Control Conference (ECC01). Porto. Sept 2001.

[CI 15] D. Bétaille et Ph. Bonnifait. "Road Maintenance Vehicles Location using DGPS, Map-Matching and Dead-Reckoning: Experimental Results of a Smoothed EKF". IAIN World Congress in association with the US ION 2000. San Diego, June 26-28 2000. pp. 409 - 416.

Glossaire

ABS	Anti-lock Braking System ou AntiBlocage de Sécurité
ADAS	Advanced Driver Assistance System
AGPS	GPS assisté
ARCOS	projet de recherche soutenu par le PREDIT de déc. 2001 à déc. 2004
CSP	Constraints Satisfaction Problem
CRV	Commande Référencée Vision
DBITE	Driver Behaviour Interface Test Equipment
EDA	Enhanced Driver Awareness
EKF	Extended Kalman Filter
ESP	Electro-Stabilisateur Programmé (Système de régulation électronique de l'ensemble du comportement dynamique d'un véhicule).
GDF	Geographic Data Files
GDOP	Global Dilution Of Precision
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRI	Groupe Repetition Interval (LORAN C)
IGS	International GNSS service
IHM	Interface Homme Machine
ISA	Installation de Surveillance d'Allure ou Intelligent Speed Adaptation (Système faisant appel à un équipement externe qui, en cas de dépassement d'une vitesse limite, adresse un signal au conducteur ou commande automatiquement une adaptation de l'allure en agissant sur certains organes du véhicule)
LADB	Look Aside Data Base
MDOP	Map Dilution Of Precision
MobiVip	projet de recherche soutenu par le PREDIT de janvier 2003 à janvier 2007
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement technologique dirigé par la commission européenne
RGF 93	Réseau Géodésique Français 1993
RVE	Régulateur de Vitesse et d'Espacement ou ACC - Adaptive Cruise Control. (Dispositif embarqué agissant automatiquement et qui permet à un véhicule d'en suivre un autre à une distance appropriée).

SAACAM	projet de recherche soutenue par le pôle DIVA de la région Picardie de sept. 2000 à sept. 2004
SCOOT-R	Serveur-client Orienté Objet et Temps-Réel
SDK	Software Development Kit
SIG	Système d'Information Géographique
SLAM	Simultaneous Localisation And Mapping
UKF	Unscented Kalman Filter
VIP	Véhicule Individuel Public
WGS 84	World Geodetic System 1984