



HAL
open science

Positionner par satellite dans les environnements transports. Impact du canal de propagation sur les performances de localisation GNSS.

Juliette Marais

► To cite this version:

Juliette Marais. Positionner par satellite dans les environnements transports. Impact du canal de propagation sur les performances de localisation GNSS.. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Lille 1 Nord de France, 2017. tel-01886043

HAL Id: tel-01886043

<https://hal.science/tel-01886043>

Submitted on 8 Oct 2018

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

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

Mémoire scientifique d'Habilitation à Diriger les Recherches
Ecole Doctorale SPI : Sciences Pour l'Ingénieur de l'Université de Lille

Positionner par satellite dans les environnements transports. Impact du canal de propagation sur les performances de localisation GNSS.

Juliette Marais

Soutenu le 24 novembre 2017 devant le jury composé de :

Directrice d'habilitation :

Marion Berbineau, Directrice de recherche, Ifsttar

Rapporteurs :

Philippe Bonnifait, Professeur, Univ. de Technologie de Compiègne

Yannis Pousset, Professeur, Univ. de Poitiers

Jean-Yves Tourneret, Professeur, INP-ENSEEIH Toulouse

Examineurs :

Maan El Badaoui El Najjar, Professeur, Univ. de Lille

Christophe Chéron, SNCF Innovation et Recherche

Remerciements

Je tiens à remercier ici Philippe Bonnifait, Yannis Pousset et Jean-Yves Tournet d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette HDR et pour leur participation au jury. Merci à Maan El Badaoui de l'avoir présidé et à Christophe Chéron d'avoir bien voulu y représenter le secteur applicatif ferroviaire.

Un grand merci à Marion Berbineau, qui a accepté d'être le garant de ce mémoire, mais surtout pour son soutien sans faille depuis mon arrivée à l'INRETS en 1998. Merci d'avoir insisté pour que je reste en thèse : j'ai hésité mais je n'ai pas regretté ! Nos échanges réguliers ont participé à la construction de ce dossier, de ce projet et font que je fais ce métier de cette façon aujourd'hui.

Merci aux collègues du quotidien (Ifsttar et Railenium) pour leur soutien et leurs encouragements, et à ceux qui constituent mon réseau (académique, industriel...), avec qui j'échange, je construis, je chemine, j'avance. La richesse des sujets de recherches et des perspectives est le résultat de toutes ces interactions !

Enfin, merci à Simon et David d'avoir relu mon mémoire avant que je ne l'envoie.

Table des matières

INTRODUCTION	4
CURRICULUM VITAE ETENDU	6
1 CURSUS	6
2 ENSEIGNEMENT	6
3 ENCADREMENT	7
4 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE	11
5 PARTICIPATION A DES PROJETS OU GROUPES DE RECHERCHE	13
6 RESPONSABILITES COLLECTIVES ET ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE.....	18
7 COLLABORATION ET PARTENARIATS ACADEMIQUES	19
8 LIENS AVEC LE MONDE ECONOMIQUE	20
9 BILAN DES PUBLICATIONS	22
MEMOIRE DE RECHERCHE	23
1 CONTEXTE	23
2 LA PROPAGATION DES SIGNAUX GNSS EN URBAIN ET SES IMPACTS SUR LA QUALITE DE SERVICE GNSS.....	26
3 APPREHENDER L'ENVIRONNEMENT DE PROPAGATION PROCHE DE L'ANTENNE DE RECEPTION	43
4 CONNAITRE ET MODELISER LES ERREURS POUR AMELIORER LA PRECISION DE LOCALISATION	55
5 EVALUER LA CONFIANCE DANS LA POSITION, L'INTEGRITE : CONNAITRE ET QUANTIFIER LES ERREURS, UTILISER LES METHODES DE SdF	77
6 CONCLUSIONS.....	95
7 PERSPECTIVES.....	97
8 REFERENCES	105
ANNEXE : LISTE DES PUBLICATIONS	112
A1. THESE.....	112
A2. CHAPITRES DE LIVRES	112
A3. DIRECTION D'OUVRAGES PUBLIES PAR L'INRETS.....	112
A4. BREVET D'INVENTION.....	113
A5. ARTICLES DE JOURNAUX NATIONAUX OU INTERNATIONAUX A COMITE DE LECTURE.....	113
A6. ARTICLES DE JOURNAUX NON REPERTORIES DANS LES BDI	114
A7. CONFERENCES INTERNATIONALES AVEC ACTES A COMITE DE LECTURE.....	114
A8. CONFERENCES NATIONALES AVEC ACTES A COMITE DE LECTURE	120
A9. SEMINAIRES ET TUTORIAUX, COMMUNICATIONS SANS ACTES	120
A10. RAPPORTS TECHNIQUES	123
A11. AUTRES.....	126

Introduction

A la recherche d'un stage ingénieur début 1998, Gérard Leflon, enseignant à l'ISEN m'a interpellée dans un couloir pour me conduire sur la route de l'INRETS : Marion Berbineau, Marc Heddebaut et Jean-Pierre Deparis cherchaient un(e) stagiaire pour développer un outil de prédiction de la disponibilité satellitaire le long d'une voie ferroviaire alliant traitement d'images et propagation des signaux. Ce stage démarrait 3 jours plus tard et a été la porte d'entrée pour moi vers une carrière de recherche que je n'avais jamais envisagée...

J'ai soutenu ma thèse en juillet 2002 à l'Université de Lille 1 sous la direction conjointe de Pierre Degauque et Marion Berbineau et grâce à un financement de l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité). J'ai obtenu le poste de Chargée de Recherche au LEOST à l'issue de ma thèse en septembre 2002. Mes travaux s'inscrivent depuis dans la thématique localisation du laboratoire, en étroite collaboration avec les thèmes des télécommunications et de la perception. Depuis 2013 et la reformulation des thématiques du laboratoire, cette recherche s'inscrit dans la thématique PLS (Perception, Localisation, Surveillance) du LEOST au sein du département Cosys en collaboration avec la thématique RCA (Réseaux de Communications Adaptatifs et reconfigurables).

Mes axes de recherche s'inscrivent dans la continuité de mon sujet de thèse qui était « 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 masque sur la disponibilité du service offert ». Ce travail a permis le développement d'un outil de prédiction, original à l'époque, appelé PREDISSAT qui a permis de mesurer les difficultés liées au masquage des satellites par les obstacles autour de l'antenne. Cet outil permet d'attaquer le problème de l'évaluation des performances en général des systèmes de positionnement par satellites (GNSS – Global Satellite Navigation System) dans les environnements transport.

Mon travail de thèse s'est appuyé sur une approche multidisciplinaire que je m'efforce de conserver dans l'ensemble de mes travaux. Une approche système s'impose dans le domaine des transports. La thématique navigation par satellite couvre une palette de disciplines large : électromagnétisme, traitement du signal, automatique, sûreté de fonctionnement... que j'ai associé au traitement d'images dès ma thèse. L'ensemble de ces disciplines permet de considérer le canal de propagation et ses effets sur le signal reçu par l'antenne du récepteur GNSS, le traitement de ce signal avec ses caractéristiques, et la qualité du signal reçu en sortie. Dans mes travaux de recherche, plusieurs de ces disciplines ont été associées.

Cette pluridisciplinarité implique des collaborations avec des collègues des disciplines mentionnées que je citerai au fil de la présentation de mes travaux.

Ce document présente une synthèse des recherches que j'ai effectuées depuis 2002 au sein du Laboratoire LEOST de l'INRETS puis de l'Ifsttar en tant que chargée de recherche. Le fil conducteur de ce document est l'impact du canal de propagation GNSS en environnement contraint (urbain typiquement) sur la localisation. Dans ce document, je m'attacherai ainsi à présenter les recherches mises en place pour analyser les phénomènes de propagation en environnements urbains, les travaux visant à les atténuer et à les corriger, ainsi que les recherches liées à l'évaluation de la qualité de la position fournie dans ces conditions.

Mon mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches est composé de 3 parties principales.

La première section est consacrée à un CV détaillé. Elle reprend les principaux éléments de mon activité : encadrements de stages et de thèses, enseignements, projets nationaux et européens et responsabilités et collaborations diverses.

La deuxième section est la partie scientifique de ce mémoire. J’y développe les travaux menés, leurs articulations les uns avec les autres, leurs applications dans divers projets et les perspectives envisagées.

Enfin la dernière section reprend la liste de mes publications.

Curriculum Vitae étendu

1 Cursus

2008 -	Chargée de recherche 1 ^{ère} classe, IFSTTAR (ex-INRETS), LEOST
2002 – 2008	Chargée de recherche 2 ^{ème} classe, INRETS, LEOST
1999 - 2002	Doctorat Electronique. 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 de service offert. Thèse de l'Université de Lille 1, soutenue le 4 juillet 2002.
1998 – 1999	DEA d'Electronique de l'Université de Lille 1, mention Assez Bien
1993 - 1998	Ingénieur ISEN (Ecole Supérieur d'Electronique du Nord), option Signaux et Systèmes

Formations continues

- ETCS : Les principes de base, 03 avril 2014, Villeneuve d'Ascq
- GNSS receiver signal processing - GENIUS, 2-4 avril 2013, Bruxelles
- Propagation Effects, Channel Models and Related Error Sources on GNSS, 15-17 October 2012, Madrid
- Fault isolating Kalman GPS/INS Multisensor navigation, Juin 2004, Paris
- Télécommunications spatiales, 16-20 juin 2003, Paris

2 Enseignement

J'ai effectué des enseignements à hauteur de 161h de CM en école d'ingénieur, 15h de CM en master, 23 en mastère et 4h30 en formations plus spécifiques tous sur mes thèmes de recherche, en lien donc avec le GNSS et ses usages dans les transports.

Ecole d'ingénieur (dernière année)	2001*- auj.	Ecole d'ingénieur ISEN, option Télécom	10h30/an
	2009	INSA Rennes	3h
	2010 et 2011*	EuraRFID, inter écoles HEI, ENSAM, Polytech'Lille	1h/an
	2010 et 2011	Ecole Centrale de Lille, option ISD (Information et Systèmes Décisionnels)	3h/an
Masters	2006	Master MSIAG de l'ENPC, module "Systèmes d'acteurs, politiques d'exploitation"	3h
	2007	Master MSIAG de l'ENPC/Dépt VET : Coordination du module « Positionnement satellitaire et transport »	6h

	2007	IEP-Lille (Institut d'Etudes Politiques) – Enjeux du programme Galileo et ses applications dans le domaine des transports	1h
	2008	Master ferroviaire ENSIAME, module « Facteurs d'évolution institutionnels, industriels et technologiques »	3h
	2010-2012	Master MiNT	2h/an
Mastère	2015-2017	Mastère Capteurs-Géolocalisation-Navigation à l'ENSTA ParisTech	7h/an
	2017	Mastère Systèmes de transports ferroviaires et urbains	2h
Autres	2008*	Formation en géolocalisation organisée par ITS Bretagne à destination des élus et cadres des services décentralisés, avec Roger Pagny et François Peyret.	*
	2010	Le GNSS dans les applications ferroviaires, Formation Mitsubishi Rennes	3h
	2012	Université Technique de Braunschweig (Allemagne), étudiants en filière gestion du trafic (Verkehrleittechnik)	1h30

*En 2008 et 2010 certains cours ont été assurés par des collègues du LEOST pendant mes congés maternité.

Pendant ma thèse, j'ai également donné des cours d'initiation au logiciel Mathematica aux élèves ingénieurs d'HEI, ainsi que de l'initiation à la programmation en C à HEI et à l'IAAL.

3 Encadrement

a. *Encadrement de thèses*

J'ai encadré 4 thèses soutenues en 2009, 2011, 2013 et 2016 et j'en encadre une actuellement.

J'ai été encadrante principale des thèses de Fleury Nahimana et Nicolas Viandier ; impliquée à 20% pour la thèse de D. Attia dont le GNSS ne constituait que la partie applicative. J'ai co-encadré la thèse de Cyril Legrand portant sur les méthodes d'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système de localisation multi-capteur, avec Julie Beugin.

W. Renier, a démissionné après une période de démotivation à mi-thèse.

La thèse de Ni Zhu a démarrée le 1er octobre 2015 pour prendre la suite des travaux sur la modélisation du canal de propagation GNSS et ses impacts sur la qualité du service de géolocalisation.

19/02/2009

Donnay Fleury NAHIMANA, Impact de l'environnement proche sur les performances de localisation en navigation par satellite : caractérisation des phénomènes dégradants et mise en place de critères d'amélioration de la précision et de la fiabilité de la position.

Directeur de thèse : Prof. Emmanuel Duflos, LAGIS-EC Lille

Publications : 1 revue, co-auteur de 2 articles dans des colloques nationaux et 2 internationaux, auteur de 4 articles en colloques internationaux, **médaille d'or** dans la catégorie Transport, Mobility & Infrastructure au cours de la

		<p>compétition Young European Arena of Research (YEAR2008) à Ljubljana dans le cadre du Transport Research Arena (TRA).</p> <p><i>Position actuelle</i> : Après un Post-doc sur un projet de localisation indoor avec fusion de capteurs de type zigbee à l'UTT, Fleury a été chargé d'enseignement au département ICT de l'Université des Sciences Appliquées du Burundi. Il est aujourd'hui support technique chez GENEQ Inc., fabricant québécois de GPS professionnels « centimétriques ».</p>
07/06/2011		<p>Nicolas VIANDIER, Modélisation et Utilisation des erreurs de pseudo-distances GNSS en environnement transport pour l'amélioration des performances de localisation.</p> <p><i>Directeur de thèse</i> : Prof. Emmanuel Duflos, LAGIS-EC Lille</p> <p><i>Publications</i> : co-auteur de 2 articles en revues internationales à comité de lecture, auteur de 2 articles en colloques nationaux et 6 internationaux, co-auteur de 6 articles en colloques internationaux.</p> <p><i>Position actuelle</i> : Expert GNSS, DGA</p>
03/10/2013		<p>Dhouha ATTIA, Fusion de données GNSS et vidéo pour l'amélioration de la fiabilité et de la mesure de positionnement par satellite. Application à la mobilité en milieu urbain dense</p> <p><i>Directeur de thèse</i> : Prof. Yassine Ruichek, UTBM</p> <p><i>Co-encadrant principal</i> : Cyril Meurie, UTBM</p> <p><i>Publications</i> : co-auteur d'un article en revue internationale à comité de lecture, auteur de 3 articles en colloques internationaux et un national.</p> <p><i>Position actuelle</i> : Maître-assistant en télécommunication, Tunisie</p>
16/12/2016		<p>Cyril Legrand, Méthodes et modèles pour l'étude de sûreté de fonctionnement des systèmes de sécurité embarqués de localisation basés sur les Global Navigation Satellite Systems (GNSS).</p> <p><i>Directeur de thèse</i> : Marion Berbineau, Ifsttar/Cosys/LEOST et El Miloudi EL KOURSI, Ifsttar/Cosys/ESTAS</p> <p><i>Co-encadrants</i> : Julie Beugin, Ifsttar/Cosys/ESTAS, Blaise Conrard, CRISAL</p> <p><i>Publications</i> : auteur de 3 articles en conférences internationales et d'une revue.</p> <p><i>Position actuelle</i> : Temps partagé Railenium/EPF/ Pour Railenium : post-doctorat sur la modélisation organisationnelle des Systèmes de Gestion de la Sécurité, pour l'EPF : chargé de mission à l'EPF en lien avec le système ERTMS (European Railway Traffic Management System).</p>
Thèse soutenue (démission) Oct. 2011/Avril 2013	non	<p>Wilfried RENIER, Modélisation hybride du canal de propagation pour des applications GNSS en environnements contraints – Applications pour l'amélioration des performances des récepteurs.</p> <p><i>Directeur de thèse</i> : Marion Berbineau, Ifsttar/Cosys/LEOST</p> <p><i>Co-encadrants</i> : Rodolphe Vauzelle, XSLIM-SIC, Yann Cocheril, Ifsttar/Cosys/LEOST</p>
01/10/2015 - encours		<p>Ni ZHU, Modélisation du canal de propagation GNSS en milieux contraints : Contribution à l'amélioration de la qualité de service de géolocalisation.</p> <p><i>Directeurs de thèse</i> : Marion Berbineau, IFSTTAR/Cosys/LEOST et David Bétaille, IFSTTAR/Cosys/Geoloc</p> <p>Ni a obtenu le prix de présentation des doctorants Ifsttar de 1^{ère} année en 2016.</p> <p><i>Publications</i> : Une revue soumise à IEEE Trans. on ITS, 2 articles de conférence.</p>

b. Participation à des jurys

J'ai participé à 6 jurys de thèse en tant qu'examinatrice et 3 en tant qu'encadrante (en congé maternité pendant la soutenance de D. Attia)

2007	Maged Jabbour (Laboratoire Heudiasyc de l'UTC), Localisation de véhicules en milieu urbain à l'aide d'un lidar et d'une base de données navigable
2008	Cindy Cappelle (LAGIS-EC), Localisation de véhicules et détection d'obstacles : apport d'un modèle virtuel 3D urbain
2010	Clément Fouque (Laboratoire Heudiasyc de l'UTC), Apport des cartes routières navigables pour le positionnement par satellites des véhicules terrestres
2010	Fadoua Brahim (Télécom Bretagne), Acquisition et poursuite des signaux de géopositionnement et suppression d'interférences en radio-astronomie.
2015	Syed Mohd Fairuz Bin SYED MOHD DARDIN, (ISAE/ENSEEIH), New adaptive tracking loop algorithm for reliable positioning in harsh environment
2016	Julien Moreau (SeT-UTBM/Ifsttar), Construction de modèles 3D à partir de données vidéo fisheye. Application à la localisation en urbain.
2018 (prévu fév.)	Nabil Kbayer (ISAE), SPRING Usage for Modelling Multipath Effects on a Receiver (SUMMER)

Comité de sélection de maître de conférence

2015	Maître de conférences robotique pour l'UTC – Heudiasyc, comité de sélection du poste 0150 MCF 61/27 (référence Galaxie 4056)
------	--

Autres jurys

2006	Soutenance Master Ferroviaire ICAM sur l'impact de Galileo pour RFF Stage SNCF sur l'utilisation de SIG pour la gestion de matériel d'auscultation des voies
Presque tous les ans	Recrutement ISEN 1 ^{ère} année de cycle ingénieur

c. Encadrements de post-docs

07/12-02/14	Sarab Tay, Projet européen Qualisar : Corrélation entre performances GNSS et environnement de réception, Propagation des erreurs du GNSS dans une solution multi-capteurs. <i>Position actuelle</i> : Ingénieur système chez Valeo - Driving Assistance Research
01/09-01/10	Asma Rabaoui, CISIT, Estimation conjointe état-bruit dans une application GNSS en canyon urbain, <i>Position actuelle</i> : Responsable de projets numérique & santé, SATT Sud Est

03/07-08/11	Julie Beugin, Positionnement par satellites et sûreté de fonctionnement <i>Position actuelle</i> : CR1 à l'IFSTTAR ESTAS depuis 2010
-------------	---

d. Encadrements d'ingénieurs

2017/2018 (12 mois)	Rihab Hmida, IR, Mise en œuvre du concept PREDISSAT/CAPLOC pour l'acquisition et le traitement de données images et localisation.
2006/2007	Vincent Bénard, IR, Positionnement par satellites et sûreté de fonctionnement.
2003/2004 (12 mois)	Sébastien Lefebvre, IE, Mise en place et analyse des essais réalisés avec l'équipement PREDISSAT sur les lignes ferroviaires (LOCOPROL). <i>Position actuelle</i> : Chargé de mission Railenium
2002 (12 mois)	Sébastien Delcourt, IE, Evolutions de PREDISSAT. Analyses de disponibilité GNSS (LOCOPROL).

e. Encadrements de stages et bureaux d'études

Depuis 2003, j'ai encadré 7 stages de Master 2, 5 stages ingénieurs, 1 stage de mastère, 3 « diplom Arbeit » allemands et 2 stages d'IUP. Enfin j'ai proposé des sujets et suivi plusieurs bureaux d'études réalisés par les étudiants de l'ISEN.

Stages ingénieur	Thomas Tirtaine, 2004, ESGT, Emilie Masson, 2005, ISEN, Pierre-Louis Girard, 2006, ISEN, Laurent Facon, 2007, ISEN, Guodong Wang, 2015, ENAC.
Stages de Mastère	Charles Faes, 2015, Mastère géolocalisation ENSTA.
Stages de Master 2	Fleury Nahimana, 2005, Univ. de Valenciennes, Nicolas Viandier, 2007, ULCO, Pierre Verhille, 2008, ULCO Marcellin Ngoumetcha Leukam, 2012, Université Claude Bernard Lyon1, Olimpia Hoinaru, Université Lille 3, 2012 Boucif Kebdani, Université de Bourgogne, 2014 Tongsu Xue, Master of Science GNSS ENAC, 2016
Autres	Laure Wallyn et Xavier Perrin, 2003, IUP GMI 3ème année, Jean-Luc Boulanger, 2003, IUP 2ème année, Lena Thiele, Univ. de Braunschweig, Allemagne, Solange Dakoupki Ngantcha et Bertrand Djike Nana, 2008, Univ. de Braunschweig, Allemagne.
Bureaux d'études	Encadrement de bureaux d'étude ISEN. Elèves de dernière année. <ul style="list-style-type: none"> • Réalisation d'un module (en C) de génération des positions des satellites GPS le long d'une trajectoire donnée. • Modulation BOC du signal Galileo et sa comparaison avec la modulation BPSK des signaux GPS, 2006. • Simulation de la réponse impulsionnelle d'un canal satellitaire en

milieu urbain, ISEN, 2008

- Etude de l'environnement ferroviaire et son impact sur la localisation, ISEN, 2008
- Codage en C/C++ des algorithmes d'amélioration de la position d'un mobile en milieu urbain (200-250h pour un groupe de 5 étudiants ISEN, 2014)

f. Encadrements de thèse professionnelle

Suite au mastère ferroviaire 2017, Gemma MORAL SUAREZ, étudiante d'Ansaldo STS a souhaité réaliser son mémoire sur l'optimisation d'une solution « ERTMS Regional » intégrant les technologies satellitaires. Je suis tuteur pédagogique de ce travail.

4 Rayonnement scientifique

a. Distinctions

- Prix de la meilleure intervention au Congrès international ATEXPO France 2013
- 3^{ème} prix au Young Researchers Award 2005

b. Participation à des évaluations d'articles de conférences et journaux

Depuis 2006, j'effectue régulièrement des évaluations d'articles de conférences ou de journaux à raison de 4 ou 5 articles par an ces dernières années.

Articles de conférence

- IES (EEE Symposium on Industrial Embedded Systems) en 2006
- ITST (Intelligent Transport Systems on Telecommunications) depuis 2007
- IROS en 2008
- WCRR (World Congress on Railway Research) en 2008
- ITSC (Intelligent Transport System Conference) en 2009, 2015, 2017
- IV (Intelligent Vehicle) 2010, 2014, 2016, 2017
- ICCVE, 2012 à 2014
- Net4Cars 2012, 2014, 2015, 2016
- FORMS/FORMAT en 2012

Articles de journaux

- Transportation Research Part C en 2007
- Journal of Location Based Services en 2010 et 2012
- Journal of Aerospace Engineering en 2011, 2017
- Transactions on Intelligent Transportation Systems en 2011
- International Journal of Microwave and Wireless Technologies en 2011
- International Journal of Navigation and Observation en 2012
- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems and Intelligent Transportation Systems Magazine (9 depuis 2011; dernier en 2016)
- Chinese Journal of Aeronautics, 2014
- The International Journal of Railway Technology, 2014
- European Transport Research Review (ETRR), 2014, 2015, 2016
- Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014
- Sensors, 2014 et 2015
- ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015
- International Journal of High Performance Computing and Networking (IJHPCN), 2016
- IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems en 2017

Livre

- Evaluation d'un draft "GNSS for rail transportation: challenges and opportunities" pour la collection PoliTO Springer Series - 2016

En 2013, j'ai coordonné avec Pierre-Yves Gilliéron, François Peyret et Ioannis Kaparias un numéro spécial de RTS sur les systèmes coopératifs, 2013

c. Participation à des comités de programmes de conférences

- De 2003 à 2007, j'ai organisé la **journée annuelle de rencontre entre les doctorants et leurs encadrants**. Avec les doctorants du LEOST seulement en 2003 et 2004 puis avec d'autres équipes (LTN, LIVIC, ESTAS, LESCOT). Publication des actes aux collections actes INRETS [D3]-[D6].
- Membre du comité de programme et organisation du **workshop « Localisation précise pour les transports terrestres »**, 16 juin 2009, Paris. Co-organisation LEOST, LCPC, LAGIS, LASMEA. J'ai pris en charge la coordination et la publication des actes [D2].
- **ITST 2017**, Mai, Varsovie : j'ai organisé une session spéciale "issues and progress for the introduction of GNSS in railways".

Sur le plan logistique : j'ai également participé à l'organisation et à la répartition des tâches logistiques avant et pendant la conférence.

- **ITST 2009**, Lille, octobre 2009. ITST 2009 a été organisé par l'INRETS, à Lille. J'ai organisé et animé les sessions Galileo et participé aux choix et invitation d'orateurs en plénière (contact DGTREN, GSA).
- Co-organisatrice du **Séminaire Recherche et innovation ferroviaires – Les bénéfices de la navigation par satellite européenne**, le 20 Novembre 2014, Lille ; séminaire organisé par le MEDDE et le CNES en partenariat avec Railenium et l'Ifsttar. L'objectif du séminaire était de créer un lieu de rencontre entre les professionnels du ferroviaire et de la navigation par satellite pour réfléchir à des solutions techniques qui, à l'issue d'activités de développement, de normalisation et de certification, pourraient contribuer à l'atteinte de ces objectifs opérationnels. 85 participants.
- Organisation du "**workshop on integrity monitoring for terrestrial users**" le 15/12/2015 à Villeneuve d'Ascq. J'ai invité des acteurs ayant publié des travaux sur les spécificités du calcul de l'intégrité et du niveau de protection dans le transport urbain à introduire les concepts et à présenter leurs travaux afin de discuter ensemble de l'état de l'art et des axes de recherche à poursuivre.

d. Membre de comité de programme/comité scientifique/comité de lecture :

De 2006 à 2009, j'ai fait partie du comité de rédaction de la revue RTS (Revue Transport et Sécurité). Depuis 2008, j'ai participé à différents comités de programme, comités scientifiques ou comités de lecture dans les événements suivants :

- Ponctuellement : ENC (2008 et 2017), IV en 2012 Workshop on Accurate Positioning and Mapping for Intelligent Vehicles, FORMS/FORMAT, ITCS en 2014
- Régulièrement : ITS-T, Nets4Cars-Nets4Trains, ICCVE, International Conference on Connected Vehicles & Expo.

e. Animation de séminaires scientifiques

- Animation d'un atelier lors du séminaire Ferroviaire Applications GNSS. Intégration de solutions GNSS au système ERTMS, 24 mars 2016, Toulouse.

f. *Chair de session*

2017	Session « rail applications » European Navigation Conference, Lausanne, Mai 2017
2017	Session spéciale “Issues and progress for the introduction of GNSS in railways”, ITST, Varsovie, Mai 2017
2015	Session « automotive & railway navigation » de la conférence ENC, Bordeaux
2010	Chair d’une session dédiées aux Systèmes de Transport de la conférence IFAC-LSS 2010 Villeneuve d’Ascq
2009	Chair session Galileo de ITST, Lille

g. *Participation à des comités scientifiques et techniques*

- Je participe, selon les thématiques abordées, à la *Commission Géopositionnement de la CNIG* (Conseil National de l’Information Géographique)
- J’ai participé activement au *Groupe d’expert Galileo Rail de l’UIC* à partir de 2002. Le rôle de ce groupe, composé d’opérateurs et industriels du ferroviaires, ainsi que quelques académiques, a consisté à proposer des road maps pour la l’introduction et la certification des signaux Galileo pour le développement et la promotion des applications ferroviaires. Le groupe a publié plusieurs rapports [R21, R22]. Le groupe n’a plus d’activité aujourd’hui.
- J’ai été nommée animatrice de la thématique géolocalisation du GIS ITS en 2011 mais l’activité du GIS étant très bretonne, mon implication reste faible.
- Pour le MEDDE, j’ai participé à divers groupes ou consultations : Emergence des services GNSS (2014), Eléments fondamentaux (2014), comité de suivi du Plan d’Applications Satellitaire (2009-2014)
- Participation au *GNSS ITS USER FORUM* organisé par le projet EU SUNRISE, 2013-2014.

h. *Expertise de projets scientifiques et techniques*

- J’ai été amenée à **expertiser 7 dossiers de projets** :
 - Pour ULISS : deux dossiers déposés dans l’appel ULISS 2007 géré par le ministère de l’industrie,
 - Pour l’ANR : un dossier de l’appel ANR TSFA 2007, un dossier pour l’appel ANR VTT 2011 pour lequel j’ai été rapporteur, un dossier pour l’appel ANR ASTRID 2017,
 - Pour le PREDIT : 1 dossier du groupe 9 en 2005 et un dossier du GO2 en octobre 2009,
 - Pour le FUI : Expertise d’un dossier FUI14, 2012.
- J’ai effectué en 2006-2007 la *revue du projet européen* POSIRIS. POSIRIS est un projet financé par la GJU (la GJU a géré les projets liés à Galileo pour le compte du PCRD), porté par la PME Polestar. La revue de projet a été finalisée le 26 mars 2007.

5 Participation à des projets ou groupes de recherche

La participation aux projets de recherche régionaux, nationaux et européens constituent une part importante de mon activité. J’ai participé à 4 projets européens et 4 nationaux clos.

Je participe actuellement à une action COST et à deux projets européens (STARS et X2Rail-2). J’ai participé au montage de deux projets européens soumis début 2017 ; j’en ai monté un. Un projet national est en cours de préparation avec l’IGN et le groupe Thales.

Enfin, je suis très investie avec Railenium sur les thématiques liées au GNSS : portage de projet, participation à Shift2Rail...

Ma participation à chacun des projets sera décrite dans le corps de mon projet de recherche.

a. Au niveau régional

- Dans le cadre du CPER 2007-2013, j'ai activement participé à l'action *NAPVURA* du CISIT (Campus International sur la Sécurité et l'Intermodalité dans les Transports). Une des actions de Napvura a consisté à viser une localisation dynamique précise d'un véhicule, routier ou terrestre, dans les environnements transports complexes et en particulier l'environnement urbain. Les thèses de Fleury Nahimana et Nicolas Viandier, ainsi que le travail d'Asma Rabaoui en post-doc ont contribué à ce projet en collaboration avec Emmanuel Duflos, LAGIS.
- Dans le cadre du CPER en cours, je participe à l'action *Smarties*, dont le WP2 – Localisation, inclue un certain nombre des travaux de recherche présentés dans ce dossier.

b. Au niveau national

J'ai participé à 3 projets nationaux, mené 2 études pour la DGMT et monté le 4^{ème} projet (CAPLOC) que j'ai ensuite piloté.

- *TESS*, Transport, Espace et Société, R&T, 2002-2005

Le projet TESS a proposé un concept d'autobus communicant.

Action : L'analyse de la disponibilité satellitaire réalisée le long de lignes de bus urbains à Lille a montré l'importance d'une telle évaluation avant le déploiement d'un système pour une application donnée. Les résultats ont été publiés dans [CI55] et [CI58].

- *Etude des performances de Galileo pour des applications ferroviaires, notamment à caractère sécuritaire*, Etude réalisée pour la DGMT, 2007.

Dans cette étude, nous avons abordé les points suivants : la localisation dans les transports ferroviaires, les GNSS et leurs principes de fonctionnement, l'utilisation des GNSS, notamment du futur système de positionnement européen Galileo, dans les transports ferroviaires. Les atouts des GNSS, leurs performances demandées selon l'application ferroviaire, les applications existantes et les problèmes d'utilisation qui demeurent ont été détaillés. Les moyens disponibles pour évaluer par simulations ou par expérimentations. Cette étude a abouti au livrable [R15]. C'est dans ce cadre que nous avons commencé à collaborer avec Julie Beugin, alors post-doc au LEOST.

- *GARA* : application de Galileo à la localisation ferroviaire, Etude réalisée pour la DGMT, 2008-2010

GARA est une convention de recherche signée entre l'INRETS et le MEDDAT (à cette période) qui fait suite à l'étude mentionnée ci-dessus. La recherche réalisée a contribué à définir une méthode et un outil d'analyse expérimental des performances de Galileo dans l'environnement ferroviaire. Nous avons livré [R12].

- *ANGO*, PREDIT, 2007-2010, piloté par Véolia

Nouveaux développements de bus à guidage immatériel : amélioration du guidage optique et adjonction du pilotage longitudinal.

Action : Analyse de la disponibilité satellitaire le long d'une ligne de bus.

Des simulations ont été faites avec le logiciel de tracé de rayons ERGOSPACE. Des campagnes de mesures ont été organisées sur site propre (en environnement dégagé) et en milieu urbain sur le tracé de la ligne de bus, à Rouen. Trois stages ont été menés dans le cadre de ce projet.

ANGO a fait l'objet de 5 rapports de recherche [R17-20] et de 3 publications en conférences [CI42][CI46][CI50].

- *Tr@in-MD*, PREDIT/ANR/ADEME, 2006-2010, piloté par la SNCF

Le projet Tr@in-MD visait le suivi de wagon de marchandises dangereuses.

Action : Etude des conditions de réception des signaux GPS le long d'une ligne ferroviaire.

Nos travaux dans Tr@in-MD ont fait l'objet de 2 articles [CI40], [CI42] et une revue [J8].

- *CAPLOC, Combinaison de l'Analyse d'images et des conditions de Propagation des signaux GNSS pour la LOCALisation*, PREDIT/DRI, 2010-2014

Le projet CAPLOC a proposé d'étendre le concept de PREDISSAT portant sur l'hybridation de l'image et d'un récepteur GNSS pour offrir une précision GNSS plus importante en environnement urbain grâce à la connaissance des conditions de réception.

Action : Montage et pilotage du projet, responsable de la tâche 3 – localisation.

- Un peu en marge de mes axes classiques, en 2005-2007, j'ai fait partie d'une équipe de recherche interdisciplinaire, pilotée par Andrea Urlberger, docteur(e) en esthétique, sciences et technologies des arts, **dans le cadre d'une proposition de recherche du Ministère de la culture**. L'étude s'intitule « *Le paysage technologique, théories et pratiques autour du Global Positioning System* ». Il s'agissait d'explorer les théories qui envisagent les articulations entre paysage et techniques d'information et de communication, en particulier, l'articulation entre paysage et GPS, notamment à travers l'usage du GPS dans les pratiques artistiques. J'ai été chargée dans ce projet de la partie technique, en tant que « conseillère » et ai participé à la rédaction des livrables [RR14].

Site web :

http://www.ciren.org/ciren/laboratoires/Paysage_Technologique/index.html

c. *Au niveau Européen*

J'ai pris part à 6 projets passés, quatre portants sur des applications ferroviaires, et un (QualiSaR) visant l'évaluation des performances GNSS dans le routier.

- *LOCOPROL*, FP5, 2002-2005

Low Cost satellite based train location system for signalling and train Protection for Low density traffic railway lines

Action : Développement d'un outil de prédiction de la disponibilité satellitaire le long d'une ligne ferroviaire. Les simulations de l'effet des masques sur la solution développée ont été publiés dans [CI59]. L'estimation de la visibilité EGNOS dans [CI52].

- *GARE*, 2007

Le projet GARE a été l'objet d'une collaboration, non financée, avec l'équipe iVA de l'université de Braunschweig. Nous y avons posé les bases des collaborations que nous avons poursuivies dans les projets QualiSaR, GaloROI plus tard, et en particulier les réflexions sur les méthodologies à mettre en œuvre pour l'évaluation des performances des systèmes de positionnement GNSS pour le rail en environnement réel [CI34][CI38][CI48-49].

- *SATLOC*, FP7, 2012-2014

Satellite based operation and management of local low traffic lines

Action : WP 4.2, Concept de simulation hybridant simulateur de signaux et images géo référencées de l'environnement de réception, en collaboration avec Cyril Meurie et Amaury Flancquart.

Le concept a été présenté dans [CI5] et avec un poster [CI6].

- *QUALISAR*, FP7, 2012-2014

Qualification procedure for receivers of satellite-based localisation systems

Développement d'un processus de qualification d'un système de référence destiné à vérifier la qualité des mesures fournies par un récepteur GNSS

Responsable du WP1 : Attributes of localisation , en collaboration avec Julie Beugin, ESTAS

Le travail réalisé par Olimpia Hoinaru a été publié dans [CI11] et la collaboration avec les collègues danois du DTU dans [CI12].

- *GALOROI*, FP7, 2012-2014

Galileo Localisation for Railway Operation Innovation - Développement d'une solution de localisation sûre basée sur Galileo à destination des lignes secondaires

Responsable du WP5 : Validation/Tests/Démonstration, en collaboration avec Julie Beugin, ESTAS

Les résultats obtenus ont été présentés en conférence [CI4] [CI9] et publiés en revue [J3]

- *STARS*, H2020, 02-2016/01-2018

Satellite Technology for Advanced Railway Signalling

STARS vise la compréhension et la validation des conditions de réception et d'usage du GNSS dans le ferroviaire et en particulier d'EGNOS dans le WP5 où nous sommes impliqués.

Le 28/09/2015, mon expérience des projets m'a conduit à présenter mon « Retour d'expériences sur les projets européens » lors de la journée d'information sur les appels Transports intelligents du PCN Transport.

Début 2017, j'ai répondu à deux appels à projets en tant que contributeur :

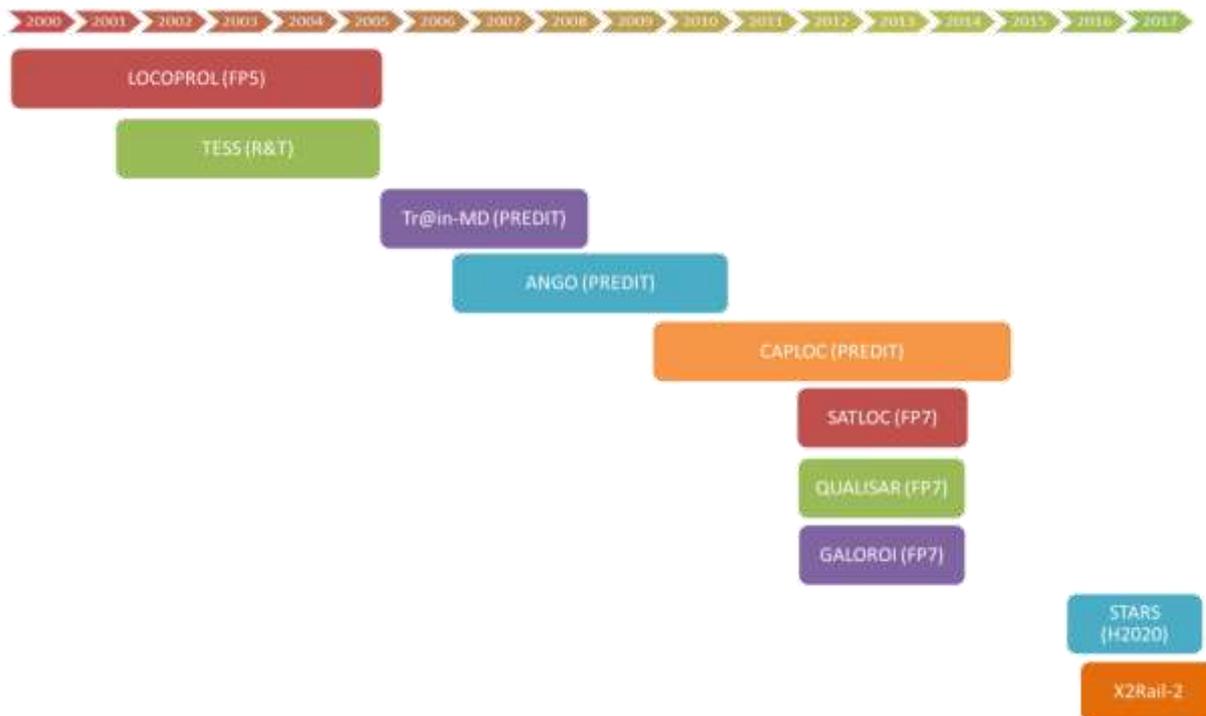
- *ITT ESA* : l'objet de cet appel de l'ESA est le développement d'un simulateur GNSS adapté à l'environnement ferroviaire. CEIT (Espagne) a monté une réponse à l'appel dans lequel je participerai (si retenu) avec David Bétaille à la rédaction des spécificités des phénomènes locaux rencontrés par les signaux GNSS dans ces environnements. Projet déposé le 30 janvier 2107 – en attente de réponse.
- *ERSAT GGC*, H2020 : ERSAT GGC est piloté par RFI avec le soutien scientifique d'ANSALDO STS Italie et vise le développement de méthodes pour la certification des solutions GNSS dans les applications ferroviaires. Je suis impliquée dans ce projet en particulier pour le développement de méthodes de caractérisation des voies ferroviaires pour la réception GNSS. Projet déposé le 1^{er} mars 2017 – en attente de réponse.

Dans le même temps, j'ai monté une réponse à l'appel ouvert Shift2Rail. L'appel couvre plusieurs sujets, en particulier : les solutions de navigation GNSS et leur robustesse dans l'environnement ferroviaire et l'utilisation des méthodes formelles.

- *Loc4Me* réunit autour de l'Ifsttar des partenaires des GNSS et des méthodes formelles pour un budget de 1.8M€. Au-delà du portage du projet, les axes d'intérêts pour mes travaux sont le développement et la comparaison des algorithmes les plus innovants de localisation (RAIM et déclinaisons, EGNOS, PPP,...) ainsi que l'étude de leur impact dans les solutions de signalisation ERTMS. Dossier déposé le 30 mars 2017. Le dossier a reçu une note d'évaluation de 13/15 et est pour l'instant en liste de réserve (en attente de fonds supplémentaires).

Dans le cadre d'un appel ITT de la GSA ("**Integration of Fundamental Elements**") (Ref GSA/OP/12/16)), FCD a piloté une réponse au Lot 1: Technical Support Platform for Fundamental Elements. Dans ce contexte, je serai expert support d'une consultation en novembre 2017 : User Consultation Platform" (UCP) pour débattre des besoins GNSS des utilisateurs ferroviaires.

Répartition des projets dans le temps



Je participe actuellement à deux groupes de recherche au niveau européen :

- Depuis 2013, je suis membre de *SaPPART*. COST Action TU1302, Satellite Positioning Performance Assessment for Road Transport – standardisation et certification des systèmes de positionnement pour le transport routier, pilotage Ifsttar – François Peyret.
 - Implication dans le WG2-Performance assessment methodology
 - Implication dans la Task Force 2-Dissemination
 - Participation à la rédaction des « GNSS basic principles » pour le White paper
 - Co-lead de la task 2.3 « review of the degradation models » avec David Bétaille.
- Depuis 2016 (et jusque 2019) je fais partie du Working Group 4.1.4 « Robust Positioning for Urban Traffic » de *l'International Association of Geodesy* (IAG). Le WG4.1.4 est un sous-groupe de la sous-commission SC 4.1 « Emerging Technologies and GNSS Augmentation » de la Commission 4, « Positioning and Applications ».

d. *Activité dans des réseaux :*

- *PEPSAT*, Pôle Européen de Positionnement par SATellites (2002-2007)

De 2002 à 2007, j'ai fait partie du pôle PEPSAT, piloté par Marc Heddebaut et dont l'objectif était de fédérer les compétences régionales dans un premier temps autour des systèmes de positionnement par satellites.

- *EURNEX*, European Rail Research Network of Excellence (2004-)

J'ai eu l'occasion de contribuer et d'intervenir dans le pôle 5 (Intelligent Mobility) du réseau EURNEX, lors de workshops notamment.

- *NEARCTIS*, Network of Excellence for Advanced Road Cooperative Traffic management in the Information Society (2008-2013)

J'ai participé aux différents workshops Nearctis (dont une communication), et à la rédaction de livrables sur l'utilisation des systèmes de positionnement par satellites dans les ITS.

- *IRT RAILENIUM*, depuis 2012 : La thématique GNSS est soutenue par Railenium. Une fiche projet a été rédigée dès 2012, qui n'a pas abouti en tant que projet mais qui a conduit aux actions suivantes :
 - Montage d'un projet pour l'AMI Transports ferroviaires (*Rosalie*). J'ai porté le montage avec Sébastien Lefebvre, responsable du WP4 Railenium en collaboration étroite avec le CNES. L'ADEME demandant l'implication d'un industriel fort, Thales s'est mobilisé pour une implication plus forte mais a renoncé au dépôt juste avant la clôture. Le projet est en attente pour l'instant mais son contenu toujours d'actualité.
 - Co-organisation d'un séminaire recherche GNSS et transport ferroviaire en novembre 2014.
 - Préparation d'un projet collaboratif Railenium avec Thales et le CNES. En juin 2014, un protocole d'accord a été signé entre l'IRT Railenium (avec les participations du CNES et de l'IFSTTAR) et les entités du groupe Thales dans le but de réaliser une étude sur l'opportunité d'utiliser une technologie complémentaire fondée sur EGNOS pour la signalisation ferroviaire. Le protocole n'a aujourd'hui pas abouti.
 - Mai-Juin 2016 : *Etude SatRail pour la SNCF* dans le cadre de sa réflexion sur les usages du GNSS : état de l'art des réalisations passées et en cours, des solutions hybrides à étudier ; soutien à la description des besoins en termes de performances de localisation.
 - Railenium fait partie d'un consortium appelé SmartRacon, membre associé de l'entreprise commune *Shift2Rail*. Dans le cadre de ce consortium, je suis le **contact scientifique Railenium pour la tâche TD2.4 « fail safe train positioning »**. Le projet X2Rail-2 qui formalise le travail dans Shift2Rail sur cette tâche notamment démarre en septembre 2017.
 - En 2017, nous sommes en préparation d'un projet pour la localisation précise et sûre avec la SNCF.
- Des contacts sont pris dans le cadre de **VEDECOM** pour des travaux liés à la localisation de véhicules coopératifs et à l'apport de Galileo.

6 Responsabilités collectives et administration de la recherche

a. *GERI LIO, Localisation Indoor Outdoor (ex PFI - Plate-forme Intégratrice) :*

De mars 2007 à 2011, j'ai animé la PFI GNSS, avec 3 chercheurs des laboratoires ESTAS, LESCOT et LTE. Le 21 mars 2007, une première journée thématique INRETS autour des GNSS a montré qu'à l'INRETS, l'objet « GNSS » était traité à divers niveaux : Les technologies GNSS sont un objet de recherche (signal, traitement du signal...) pour certains (LEOST) et un outil d'information pour d'autres (LIVIC, GRECIA, LICIT, LTE, LESCOT, DEST, CIR...). Pour toutes ces autres URs, l'objet de la recherche concerne davantage l'information de position plutôt que son origine.

Le succès de cette journée en nombre de participants a montré une réelle motivation collective autour de ce sujet et a conduit au montage d'une PFI (Plate-forme intégratrice – outil INRETS) dont j'ai pris la responsabilité avec des objectifs autant internes qu'externes, qui à la création de l'Ifsttar est devenu un GERI. En interne, les séminaires ont eu une double vocation de formation et de fédération entre équipes. L'équipe MACS/GEOLOC a rejoint l'animation et à partir de 2013 la thématique de la localisation indoor a été ajoutée au GERI devenu le GERI LIO (Localisation Indoor Outdoor).

Le GERI LIO a donné lieu à plusieurs séminaires dont, le 15/12/2015, « workshop on integrity monitoring for terrestrial users » avec interventions de collègues italiennes de Politecnico di Torino, d'un collègue espagnol de GMV, et d'un collègue de l'ISAE.

Il a été clos fin 2015.

b. Animation du PCI satellitaire

De 2010 à 2013, j'ai participé à la définition et, avec François Peyret, à la co-direction Ifsttar – CETMEF du comité technique du Pôle de Compétences et d'Innovation « Applications satellitaires et télécommunications » concernant le CGDD-DRI DGITM CETE du Sud-Ouest.

c. Participation à la vie de l'équipe et de l'institut

J'ai participé à plusieurs groupes de travail internes à l'institut : « Ressources humaines » en 2003-2004, « mieux communiquer en interne », « développer le management par projet dans les URs et services » et le chantier publications en 2007.

Je suis membre du comité d'action sociale de l'Ifsttar (2013-2017), membre du comité de suivi du plan d'action pour l'égalité professionnelle hommes-femmes (2014-2017), et membre du groupe de travail sur le SI-Recherche (outil de collecte des activités de recherche et d'expertise des chercheurs de l'Ifsttar).

7 Collaboration et partenariats académiques

Mes collaborations avec **l'École Centrale de Lille** ont été fortes entre 2006 et 2011 avec le **Prof. Emmanuel Duflos**. Elles ont vu le jour dans le cadre des encadrements des thèses de Fleury Nahimana et Nicolas Viandier. Cette collaboration a enrichi fortement les axes de recherche que nous avons proposés sur la modélisation des bruits causés par les multitrajets avec des compétences fortes en traitement du signal. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet CISIT NAPVURA.

Suite aux échanges partagés avec **Ales Filip, de l'université de Pardubice, rép. Tchèque**, en conférences et dans le cadre du groupe de travail de l'UIC sur l'usage du GNSS dans le rail, nous avons accueilli Ales Filip en tant que chercheur étranger au cours de l'année 2008. Son séjour au LEOST a permis de publier un certain nombre d'articles sur les analogies entre les performances GNSS et les besoins de sûreté de fonctionnement ferroviaire. Les travaux se sont interrompus avec le changement de parcours professionnel d'A. Filip mais son retour à l'université en 2016 devrait donner lieu à de nouveaux échanges.

Avec le montage du projet CAPLOC, nous avons travaillé avec l'UTBM SeT, en complémentarité. **Cyril Meurie, maître de conférence à l'UTBM** jusqu'en 2012 a apporté ses compétences en traitement d'image pour l'amélioration du concept PREDISSAT. Nous avons co-encadré la thèse de Dhouha ATTIA sur ce sujet, Cyril pour la partie traitement d'images (80% de la thèse) et moi pour l'application à la localisation (20%). C. Meurie est aujourd'hui CR au LEOST et nos collaborations se poursuivent.

Des collaborations sont naissantes :

- Avec **Prof. Maan El Badaoui el Najjar, CRISTaL**, qui travaille sur le développement d'algorithmes de localisation robustes aux fautes. Ses outils sont différents des nôtres mais les objectifs sont proches, notamment en ce qui concerne l'objectif d'intégrité.
- Au **Politecnico di Torino**, les travaux liés à l'intégrité des systèmes de localisation est un axe de recherche. L'équipe a notamment étudié comment caractériser un niveau de protection (PL – Protection Level) prenant en compte l'effet des multitrajets et des satellites reçus sans trajet direct. Le **prof. Letizia Lo Presti** a accepté de faire l'introduction du workshop sur l'intégrité en environnement urbain. Leurs activités sont proches des miennes et leur participation à plusieurs actions pour le ferroviaire pourraient également être des domaines de travaux communs. L'accueil d'un étudiant de Master of Science « Information and Communication Technologies for

Smart Societies (ICT4SS) » de Politecnico di Torino pour un stage de 300h est prévu courant 2017, en discussion avec **Fabio Dovis**.

- L'équipe travaillant sur l'usage du GNSS pour le ferroviaire de **l'université de Beijing Jiaotong** est venue nous rencontrer deux fois pour échanger autour de nos axes de recherche. Les travaux sur les définitions et l'évaluation des performances, dans le cadre de la sûreté de fonctionnement également, sont des sujets identifiés comme potentiels sujets de collaboration dont les modalités restent à définir. Les discussions scientifiques sont initiées à distance sur les concepts d'intégrité GNSS adaptés au ferroviaire.
- Nos relations avec le **DLR** ne sont pas nouvelles. Nous avons souvent échangé avec l'équipe « systèmes de transport » située à Braunschweig. Plusieurs connexions avec **l'équipe Navigation**, située à Oberpfaffenhofen, ont été faites ces derniers mois qui devraient nous pousser à collaborer autour des concepts de détection d'erreurs et d'intégrité avec **Okuary Osechas** et **Anja Grosch**.
- Avec **Mathieu Joerger, University of Arizona**, rencontré en janvier 2017, autour de la déclinaison du concept d'intégrité aéronautique vers le ferroviaire et autre transport terrestre.

8 Liens avec le monde économique

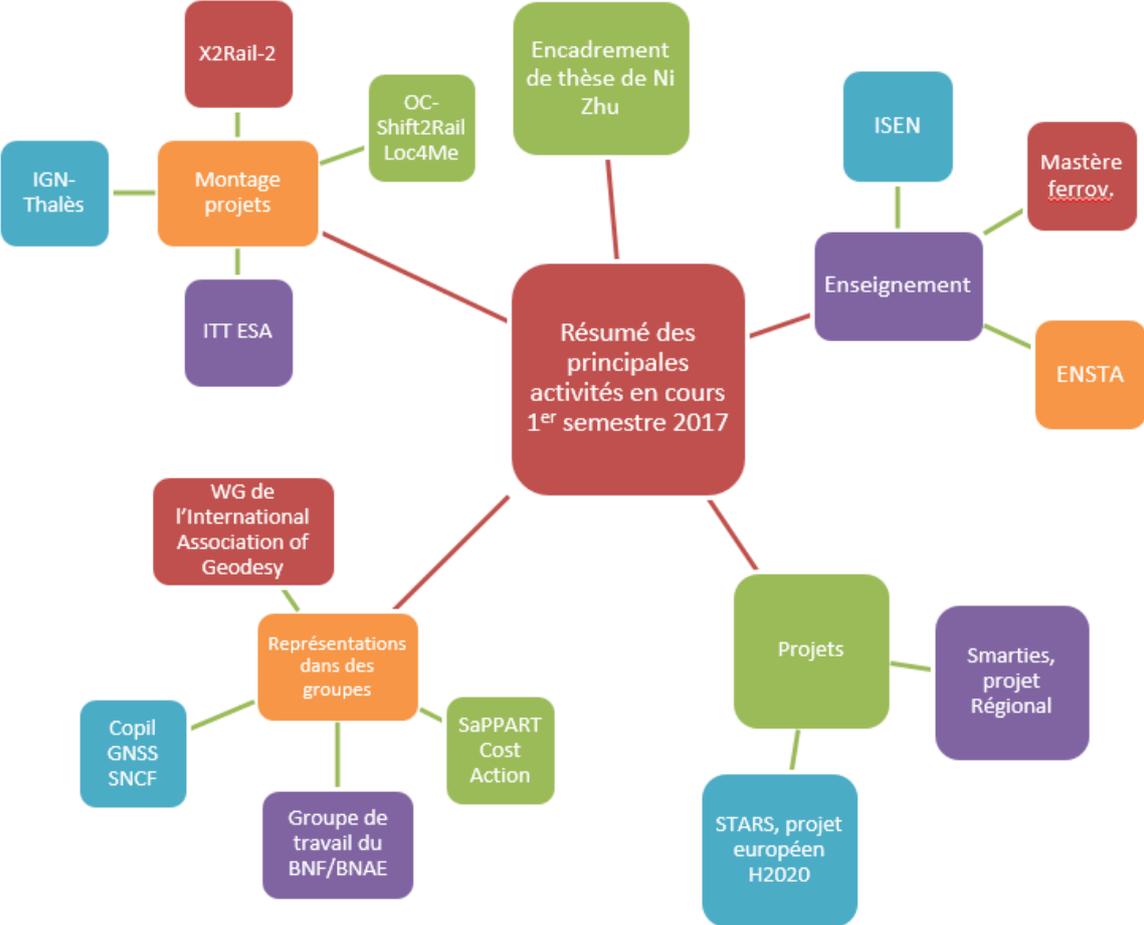
- *Expert BNF* (Bureau de Normalisation ferroviaire) dans un groupe sur la localisation par satellite : BNF/100E. Depuis 2015.
- *Expert ESNC* (European Satellite Navigation Competition), membre du jury français depuis 2009 (sauf 2013 – Congé maternité). J'ai représenté le jury français en 2014 à l'ESTEC pour le jury européen. Le concours ESNC vise à promouvoir les applications GNSS en sélectionnant les projets susceptibles de se transformer en start-up.
- Membre du *Comité de pilotage GNSS Rail pour le contrôle commande des circulations ferroviaires* de la SNCF et du *Groupe de travail sur les performances de localisation* (2016).

Si les activités GNSS autour du rail ont été continues, au niveau européen surtout, depuis la fin des années 90, les acteurs français se sont emparés du sujet plus récemment. Depuis 2014, une réflexion est en cours chez ces acteurs, notamment SNCF. Le projet Rosalie que nous avons porté avec Railenium n'a pas pu être déposé en raison de choix industriels. Une dynamique a démarré en 2014 avec un premier séminaire organisé à Lille suivi d'un deuxième (Toulouse, mars 2016, 180 personnes) et a donné naissance à un comité de pilotage SNCF pour le suivi des actions.

Dans le cadre de cette dynamique, ma participation concerne :

- le Copil, aux côtés de Railenium et du CNES,
- des activités scientifiques et prospectives dans ce groupe formalisées par un projet Railenium. Les attentes de la SNCF concernent l'état de l'art des activités passées et en cours ; l'identification des solutions d'hybridations envisagées ou encore l'identification des appels ou guichets pour le montage de projets.
- l'aide à la formulation des besoins en termes de performances de localisation au sein d'un groupe de travail spécifique ;
- Des contacts avec d'autres initiatives SNCF (Projet « train autonome » ; activités du centre de maintenance (CIM – SNCF mobilités)...

Résumé des principales activités en cours au moment de la rédaction de ce mémoire :



9 Bilan des publications

Ma stratégie de publication a évolué dans le temps. En 2002, en sortie de la thèse, la thématique GNSS au Leost était relativement nouvelle et la publication d'articles en conférences navigation (ENC-GNSS, CERGAL, ION, PLANS...) m'a permis de bâtir mon réseau, de m'intégrer à la communauté navigation à la fois dans le monde académique et économique. A partir de 2008, j'ai porté davantage d'efforts à la publication en revue et un article par an a été publié en moyenne. Les conférences cibles se partagent entre conférences navigation et transports. En matière de revue, le GNSS en lui-même n'étant pas une discipline académique, les cibles sont soit disciplinaires : traitement du signal ou sûreté de fonctionnement essentiellement soit dédiées au transport. Je suis aujourd'hui reconnue dans la communauté ferroviaire pour mes travaux et régulièrement sollicitée par les différents acteurs (Ansaldo, CNES, SNCF...).

Le tableau ci-dessous présente un bilan sommaire des publications, toutes listées en fin de mémoire.

Production scientifique	Publiés
Chapitres de livres (participation)	5
Direction d'ouvrages publiés par l'INRETS	6
BRNI : Brevets nationaux et internationaux	1
ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture	12 1 en correction, 1 en attente en 03/2017
Articles de journaux non répertoriés dans les BDI	7
ACT : Communications avec actes dans un congrès international ou national	71
Séminaires et tutoriaux	39
RP: Rapports de recherche sur contrats, livrables de projets	32
Articles ou mentions dans des articles de vulgarisation, médias	15

Mémoire de recherche

MEMOIRE DE RECHERCHE	23
1 CONTEXTE	23
2 LA PROPAGATION DES SIGNAUX GNSS EN URBAIN ET SES IMPACTS SUR LA QUALITE DE SERVICE GNSS.....	26
a. Généralités sur le signal GNSS.....	27
b. Le canal de propagation GNSS et ses modélisations.....	28
c. Les multitrajets vs satellites NLOS	36
d. Mes contributions/Plan du mémoire.....	41
3 APPREHENDER L'ENVIRONNEMENT DE PROPAGATION PROCHE DE L'ANTENNE DE RECEPTION	43
a. PREDISSAT – Prédire la disponibilité satellitaire, connaitre leur disponibilité	43
b. L'apport de CAPLOC	51
4 CONNAITRE ET MODELISER LES ERREURS POUR AMELIORER LA PRECISION DE LOCALISATION	55
a. Utilisation de la connaissance de l'état de réception des signaux GNSS.....	55
b. De l'état de réception aux retards de pseudo-distances	64
c. Connaissance déterministe des retards.....	66
d. Modélisation des retards a priori	67
e. Modélisation dynamique des retards	70
f. Conclusions.....	75
5 EVALUER LA CONFIANCE DANS LA POSITION, L'INTEGRITE : CONNAITRE ET QUANTIFIER LES ERREURS, UTILISER LES METHODES DE SDF	77
a. Le concept d'intégrité GNSS.....	77
b. Les limites du concept en environnement urbain et le besoin de nouvelles solutions	83
c. L'application ferroviaire et ses problématiques de sûreté de fonctionnement.	88
6 CONCLUSIONS.....	95
7 PERSPECTIVES.....	97
a. Techniques avancées de localisation	98
b. Vers des solutions dépendant du contexte.....	99
c. Conséquences de l'introduction des GNSS dans le rail.....	102
d. Géolocalisation et systèmes de communications (4 ou 5G).....	104
8 RÉFÉRENCES	105

1 Contexte

En 1998, dans le cadre du programme franco-allemand Deufrako-P, la SNCF souhaitait évaluer la disponibilité des satellites GPS le long d'une ligne de chemin de fer. La constellation GPS de satellites de navigation était déclarée opérationnelle depuis 1995 et les usages étaient peu développés comparés à leurs applications actuelles dans tous les modes de transport.

Ce stage et la découverte à la fois du monde de la recherche et des applications transports, m'ont conduit à poursuivre en thèse sans que j'aie une idée très précise sur la suite de ma carrière mais avec un goût confirmé pour ce sujet. C'est l'ouverture d'un poste de chargée de recherche à l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) mis au concours mi-2002 qui m'a ancrée alors davantage dans la recherche. Je développe depuis mes axes de recherche dans la continuité de ces premiers travaux, avec une forte implication dans le domaine ferroviaire tout en ne

négligeant pas les autres modes de transport terrestres, notamment dans l'idée d'une fertilisation croisée entre modes.

Ce mémoire de recherche synthétise les axes principaux que j'ai développés depuis 2002, leurs liens entre eux et leur positionnement dans le contexte scientifique international.

Depuis les années 2000, les applications des systèmes de positionnement par satellites (GNSS – Global Navigation Satellite System) ont envahi les systèmes de transport et les applications nomades avec les navigateurs automobiles d'abord et aujourd'hui leur intégration dans tous les smartphones vendus. L'évolution est visible sur les deux études de marché réalisées à 5 ans d'intervalle présentées figure 1. Les services fondés sur la localisation ou LBS (Location-Based Services) et le routier occupent toujours l'essentiel du marché mais le rail et le maritime sont aujourd'hui identifiés (ils ne l'étaient pas en 2012).

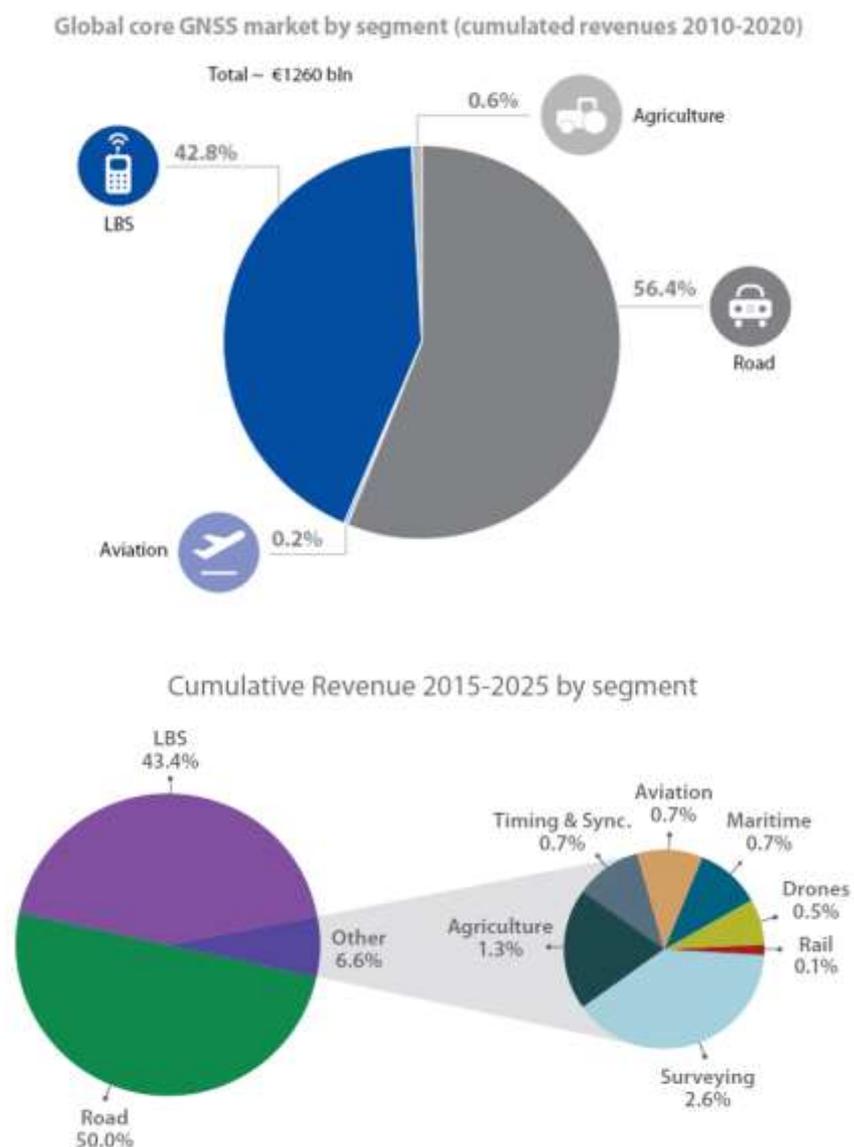


Figure 1. Marché global GNSS publiés en 2012 et 2017 par la GSA. (Source : GSA GNSS Market report, Issue 2, May 2012 & May 2017).

Les applications déployées aujourd'hui sont presque toutes des applications sans grandes exigences en matière de performance. Il s'agit souvent d'aide à la navigation : « quelle route dois-je emprunter pour me rendre du point A au point B ? », « où est le restaurant le plus proche ? »...

Pour proposer de nouvelles applications, les questions doivent s'élargir : « Puis-je guider un véhicule autonome à partir d'une position GNSS ? Est-elle assez précise ? Est-elle sûre ? Puis-je autoriser la circulation de trains sur la base de cette information, ou l'atterrissage d'un avion ? ». Ces questions posées aujourd'hui font intervenir les notions fondamentales de précision, disponibilité, continuité de service, intégrité et sécurité (safety) qui caractérisent les performances de la localisation.

Les axes de recherche que je présente dans ce mémoire sont guidés par ces exigences de performance. Mes premières expériences m'ont permis d'appréhender les exigences du transport guidé, particulièrement stimulantes parce que faisant souvent intervenir la sécurité des personnes et des biens ! C'est donc souvent dans ce contexte que mes recherches s'inscrivent, même si les projets TESS ou ANGO ont été appliqués aux bus et QualiSaR à la route.

Les discussions autour des applications ferroviaires progressent lentement depuis une quinzaine d'années maintenant mais les systèmes GNSS sont aujourd'hui identifiés comme des éléments clés des futurs systèmes de contrôle ferroviaire. Les Etats-Unis, par l'intermédiaire de l'agence FRA (Federal Railroad Administration), l'indiquent comme un élément du PTC (Positive Train Control), dans lequel il pourra être hybridé avec d'autres capteurs (Betts 2014). La Russie teste l'usage du GNSS sur une ligne pilote depuis 2010 (Rispoli 2013). On peut encore citer l'Australie (Acil Allen 2013) ou la Chine (Ning 2004) comme des pays particulièrement actifs.

L'Europe s'intéresse progressivement à ce mode de transport. Notons la création fin 2012 d'un GNSS rail User forum par la GSA (Galileo Supervisory Authority) et la signature d'un Memorandum of Understanding entre la commission Européenne, l'Agence ferroviaire Européenne (ERA) et les associations européennes du ferroviaire se focalisant sur le renforcement des coopérations autour de la gestion de l'ERTMS (European Rail Traffic Management System) et qui, en particulier, souligne que le GNSS peut jouer un rôle majeur dans le secteur.

En France, l'implication des acteurs est plus récente (2014) mais s'intensifie. Ma participation dans les séminaires de novembre 2014 et mars 2016 destinés à promouvoir et soutenir la démarche auprès des acteurs français m'a conduit à produire un travail approfondi d'état de l'art finalisé par : le livrable 5.1 du projet européen STARS [R1] ; un livrable fourni à la SNCF pour l'étude SatRail de Railenium sur les systèmes hybrides [R2] et la publication d'un état de l'art dans IEEE transactions on ITS [J3]. D'autres travaux seront menés à court terme dans le cadre du projet X2Rail-2 du programme européen Shift2Rail avec Railenium qui soutient fortement la thématique et sur lesquels je reviendrai dans les perspectives (chapitre 7).

Ce contexte très opérationnel implique des contraintes qui cadrent les réflexions et qui concernent les contraintes opérationnelles dictées par ces applications. Ici interviennent le coût, la portabilité, le volume, l'emplacement des équipements, ou encore la possibilité de démontrer leur sécurité.

Dans la plupart des systèmes de localisation utilisés dans les applications transports, sur route avec les ADAS (Advanced Driver Assisted System) ou sur rail avec les systèmes d'odométrie, le récepteur GNSS est hybridé avec d'autres capteurs afin de pallier ses inconvénients (faible fréquence, indisponibilité en zones denses, imprécision, manque de robustesse, de fiabilité...). Dans mes travaux, à l'exception de la thèse de Cyril Legrand, plus récente, j'ai fait le choix jusqu'ici de ne pas considérer ces autres capteurs. L'objectif de départ de mes recherches vise à trouver des solutions qui apportent des performances maximales en sortie du récepteur GNSS, en partant du principe que cet apport pourra bénéficier au système multi-capteurs et à une solution s'appuyant sur une cartographie embarquée (solution map-matchée).

Enfin, si l'ensemble des travaux réalisés et surtout les expérimentations menées jusqu'à maintenant concernent en général les signaux GPS, constellation opérationnelle principale utilisée dans les applications grands publics, mes travaux s'inscrivent bien sûr dans un contexte plus large :

- Les systèmes « augmentés » en particulier grâce à EGNOS,
- Les systèmes multi-constellations, puisque commencent à être déployées les constellations Galileo et Beidou et que GLONASS a été remis en service complet en 2012.

2 La propagation des signaux GNSS en urbain et ses impacts sur la qualité de service GNSS

Sans la prétention de proposer ici un chapitre complet sur les principes du GNSS, cette section a pour objet d'introduire les principes utiles pour aborder les travaux présentés dans ce mémoire et d'en faciliter la compréhension.

Les systèmes de localisation par satellites reposent sur la mesure du temps de propagation des signaux émis par les satellites de la constellation jusqu'à ce qu'ils atteignent l'antenne du récepteur. Les satellites GNSS émettent en continu des signaux que le récepteur exploite pour extraire leur temps de parcours ainsi qu'un certain nombre d'informations utiles contenues dans le message de navigation. Ce temps de parcours, multiplié par la vitesse de propagation des ondes, c , permet d'estimer la distance entre chacun des satellites reçus et le récepteur. C'est la pseudo-distance.

La position du récepteur est calculée par le récepteur lui-même à partir de la réception d'au moins 4 signaux simultanément appliquant un principe de trilatération à partir de 4 mesures de pseudo-distances. Mathématiquement, il s'agit de résoudre un système d'équations à 4 inconnues que sont la position du récepteur $\{x, y, z\}$ et le décalage d'horloge Δt .

Chaque équation est du type :

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + c\Delta t \quad (\text{Eq. 1})$$

où ρ_i est la pseudo-distance estimée pour le satellite i , $\{x_i, y_i, z_i\}$ sont les coordonnées du satellite i .

Classiquement, la résolution du système d'équations est réalisée par une estimation par moindres carrés ou par un filtre de Kalman Étendu (EKF). Ces différentes méthodes d'estimation d'un état ou vecteur d'états rappelés dans (Viandier 2011) ont chacune leurs spécificités, leurs avantages et leurs inconvénients. La méthode des moindres carrés (ou son extension pondérée) est une méthode dite « snapshot » qui ne tient compte que des mesures instantanées. Le filtre de Kalman utilise une connaissance a priori et filtre (lisse) les mesures en utilisant la connaissance de l'état précédent pour calculer le nouvel état. On notera également que la méthode des moindres carrés fournit l'estimation la plus simple sans hypothèse sur les bruits pour affiner l'estimation de position, contrairement au filtre de Kalman. Dans le cas où les hypothèses sur le bruit et le modèle dynamique de mouvement sont adéquats, l'EKF donne des résultats satisfaisants. Nous montrerons dans la suite que les hypothèses de départ ne sont cependant pas toujours satisfaites et que d'autres méthodes d'estimation peuvent améliorer les performances.

La figure 2 présente schématiquement les étapes du processus de l'émission du signal jusqu'au calcul de la position. Dans ce mémoire, nous nous concentrons sur les briques correspondant au canal de propagation et à la navigation.

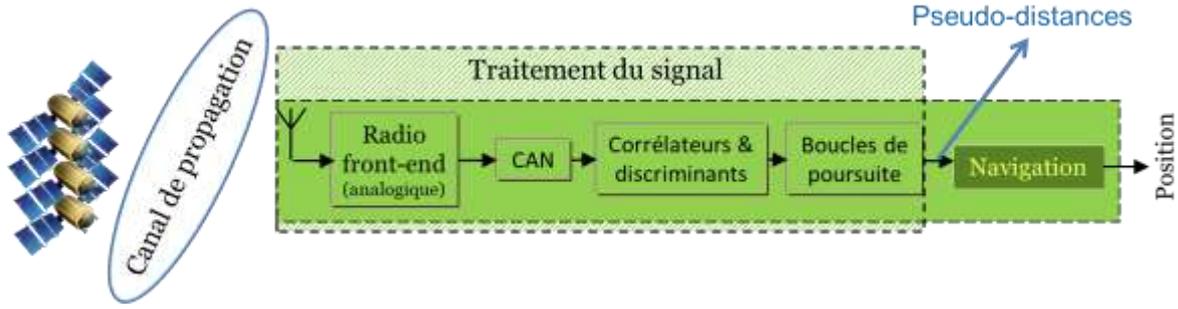


Figure 2. Chaîne de traitement des signaux satellitaires GNSS.

a. Généralités sur le signal GNSS

Le GPS est un système à étalement de spectre, ce qui permet de transmettre l'ensemble des signaux dans une même bande de fréquence. A chaque satellite de la constellation sont attribués deux types de codes PRN (Pseudo-Random Noise ou Code pseudo aléatoire) : un code « court » appelé *coarse/acquisition code* (C/A) et un code « long » dit « de précision » P. Une séquence de code PRN est une séquence binaire connue. Une séquence C/A a une période de 1 ms et se répète constamment tandis que le code P a une séquence de 7 jours. De plus, le code P est crypté et noté code Y (ou P(Y)) (Kaplan 2006).

Les signaux GPS des satellites de premières générations sont diffusés sur 2 fréquences porteuses différentes :

$$L1, L1C \approx 1575,42MHz \quad (\text{Eq. 2})$$

$$L2, L2C \approx 1227,6MHz \quad (\text{Eq. 3})$$

La porteuse L1 est modulée par une modulation de type BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) par les données de navigation et étalée par le code C/A. La porteuse L2 supporte également (et uniquement) le code P.

Ainsi $S_{L1,i}(t)$ qui correspond au signal émis sur L1, et $S_{L2,i}(t)$ qui est le signal émis sur L2 s'écrivent :

$$S_{L1,i}(t) = A_{P(Y)} \cdot D_i(t) \cdot P_i(t) \cdot \cos(2\pi f_{L1}t) + A_C \cdot D_i(t) \cdot C_i(t) \cdot \sin(2\pi f_{L1}t) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$S_{L2,i}(t) = A_{P(Y)} \cdot D_i(t) \cdot P_i(t) \cdot \cos(2\pi f_{L2}t) \quad (\text{Eq. 5})$$

où $A_{P(Y)}$ et A_C représentent les atténuations pour les codes $P(Y)$ et C/A respectivement ; D représente les données transmises ; P et C les codes $P(Y)$ et C/A pour le satellite i ; f_{L1} et f_{L2} les fréquences des signaux générés.

Les nouveaux signaux embarqués par les récentes générations de satellites supportent d'autres types de modulation et/ou de nouveaux codes (Van Dierendonck 2014). Par exemple L5, émise sur les satellites de bloc IIF lancés depuis 2010, (fréquence porteuse $\approx 1176,45MHz$) est modulée par une modulation de type QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) que nous ne détaillerons pas dans ce mémoire. Ce signal doit permettre de suivre des signaux plus faibles ou encore de garantir une meilleure immunité aux interférences.

Les signaux sont émis avec une polarisation circulaire droite (RHCP – Right Hand Circular Polarization).

A la réception, à la sortie du module front-end, le signal direct est représenté par un signal complexe $s(t)$.

$$s(t) = A \cdot D(t - \tau(t)) \cdot C(t - \tau(t)) \exp(j[2\pi f_{IF}t + \varphi(t)]) + n(t) \quad (\text{Eq. 6})$$

où $\tau(t)$ représente le retard de propagation, $\varphi(t)$ est la phase du signal reçu dépendant du retard, f_{IF} est la fréquence intermédiaire, compensée par le récepteur et considérée ici comme nulle, et $n(t)$ est le bruit additif souvent considéré comme Gaussien et blanc.

La mesure du temps de propagation est réalisée en corrélant le signal reçu à une réplique du signal émis, générée par le récepteur lui-même. Les codes PRN ont été choisis pour leurs propriétés d'autocorrélation, qui donnent à la fonction de corrélation un pic bien distinct lorsque les deux signaux sont synchrones (que l'on verra figure 14), dessiné en bleu. La mesure du temps de propagation est ainsi réalisée en faisant glisser dans le temps la réplique générée par le récepteur jusqu'à atteindre la corrélation des codes. Le décalage dans le temps entre la réplique générée à l'instant t_1 d'émission jusqu'à l'instant t_2 de la corrélation représente le temps de propagation Δt recherché.

b. Le canal de propagation GNSS et ses modélisations

Le canal de propagation est le médium à travers lequel circule le signal depuis son émission par le satellite jusqu'à sa réception par l'antenne du récepteur GNSS. Ce signal est perturbé par le médium et les perturbations sont constatées sur :

- Les variations du rapport C/N0 (carrier-to-noise ratio)
- Le temps de propagation du rayon direct et de ses échos
- La variation de la phase
- La fréquence Doppler.

Les signaux GNSS parcourent environ 20 000 km et atteignent l'antenne du récepteur atténués par la distance parcourue, retardés et entachés d'un certain nombre d'erreurs, notamment induites par la traversée de l'ionosphère et de la troposphère. Ces deux zones de l'atmosphère sont de natures différentes et affectent différemment le signal. Ainsi, les erreurs ionosphériques, fonctions de la fréquence, peuvent être en partie compensées par l'usage de récepteurs multifréquences. Ce n'est pas le cas des erreurs troposphériques. On doit donc recourir à des modèles pour compenser ses erreurs.

En environnement transport, et en particulier en environnement urbain, des perturbateurs supplémentaires s'ajoutent à ces perturbations connues : ce sont les obstacles proches de l'antenne de réception (« proche » étant relatif face aux 20 000 km d'altitude des satellites). La réception des signaux satellitaires est en effet fréquemment perturbée en environnement transport par les phénomènes de propagation tels que la réflexion ou la diffraction qui affectent l'ensemble des performances de localisation : disponibilité, précision et intégrité. La puissance moyenne de réception du code C/A est faible (environ -160 dBW) et des difficultés de réception apparaissent dès la présence d'atténuations du signal, soit en présence de réflexions multiples ou d'obstacles bloquants (bâti, tunnel).

La disponibilité est ainsi réduite lorsque la présence de masques est importante, comme cela arrive en milieu urbain dense ou ferroviaire. Si la densité du masquage ne permet pas la réception des 4 signaux nécessaires à la localisation, la position ne peut pas être calculée.

La précision de la localisation dépend en partie de la précision des mesures, c'est-à-dire, de la précision de l'estimation des pseudo-distances D . Lorsque le signal est reçu en trajet direct (Line-Of-Sight sur la figure 3a), le trajet du signal est le plus proche du chemin direct satellite-récepteur. Lorsque le signal est reçu après une réflexion comme sur la figure 3c, le temps de parcours du signal ne représente plus la distance D mais une distance $D + r$, r étant le retard causé par la réflexion. On parle alors de cas NLOS (Non-Line-Of-Sight).

Dans la suite de ce mémoire, nous distinguerons, comme sur la figure 3, les trajets réfléchis des multitrajets ; ces derniers résultants de la somme des réflexions et du trajet direct.

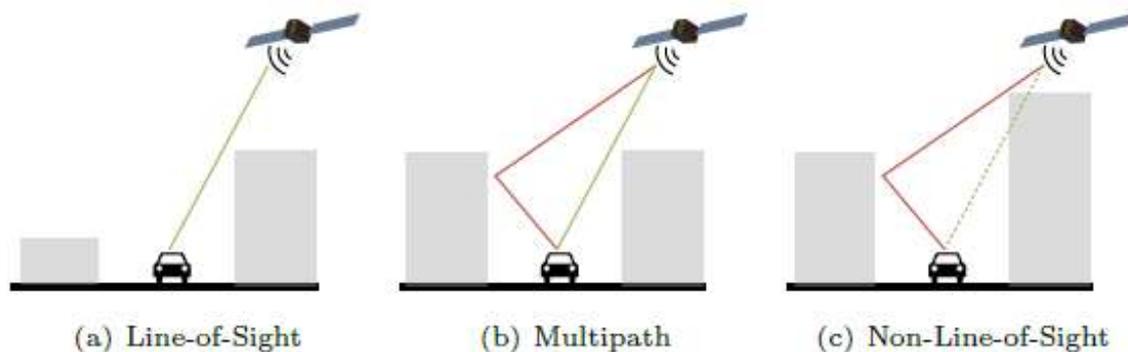


Figure 3. Etats de réception de signaux GNSS par trajet direct (a), multitrajets (b) et après réflexion (c) (Source : Obst 2014).

Dans un environnement réel, il est complexe d'évaluer des performances GNSS et de les quantifier. En effet, le contexte de la navigation par satellites en urbain se caractérise par :

- Un environnement qui évolue : le long d'un trajet, les conditions de réception évoluent continuellement du fait des variations des obstacles environnants.
- Des satellites qui se déplacent et dont l'azimut et l'élévation varient au fil du temps. Une mesure est difficilement reproductible.

Les données GNSS sont ainsi des mesures stochastiques et les performances des systèmes GNSS se caractérisent de façon statistique.

Les représentations les plus courantes de la précision quantifient l'erreur avec un cercle ou une sphère et une probabilité que la position soit comprise dans cette surface ou ce volume. La figure 4 représente ainsi l'erreur circulaire probable (CEP) dont la définition est « le rayon d'un cercle centré sur la position vraie, contenant l'estimation de la position avec une probabilité de 50%.

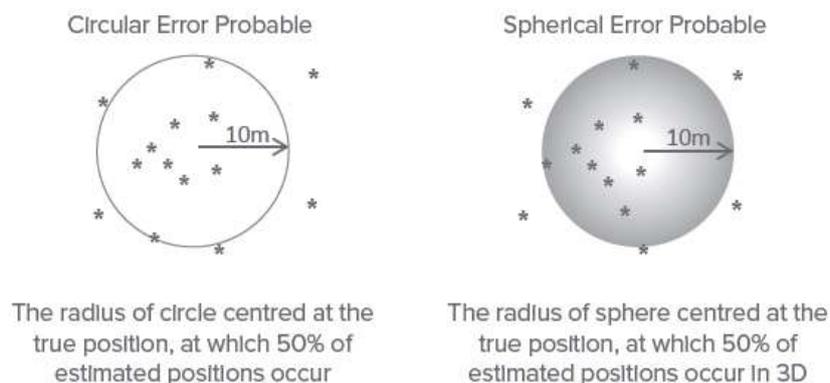


Figure 4. Représentation de l'erreur probable en 2D et 3D avec une probabilité de 50% (Source : Spirent 2016).

Dans la suite de ce mémoire, nous verrons que le caractère stochastique des mesures rend parfois complexe l'utilisation de méthodes déterministes notamment lorsqu'il s'agira de compenser les erreurs de mesure causées par l'environnement. C'est également vrai lorsqu'il s'agira d'évaluer les performances de systèmes dynamiques. Puisque la répétabilité parfaite n'est pas possible, nos

travaux ont souvent été évalués sur des trajectoires uniques et donc avec une seule réalisation par point.

Dans cette section, nous montrons comment le canal de propagation GNSS peut être caractérisé. Les modèles de canaux spécifiquement GNSS sont encore assez peu nombreux. Les modèles présentés ci-dessous sont plus souvent issus d'études liées aux systèmes de télécommunications.

Wilfried Renier a débuté sa thèse sur la modélisation du canal de propagation ; Guodong Wang en a fait l'état de l'art en stage de master 2.

Les études réalisées dans le domaine des télécommunications caractérisent essentiellement les variations de la puissance du signal reçu dans le temps. Trois types de fluctuations peuvent être caractérisés : les variations lentes, le masquage et les variations rapides comme représenté sur la figure 5.



Figure 5. Les trois types de fading

La figure 6 illustre l'atténuation du signal en fonction de la distance par rapport à la longueur d'onde λ . La courbe verte représente les variations lentes causées par les pertes en espace libre, la bleue les variations liées aux éventuels masquages et la rouge les variations rapides causées par les multitrajets.

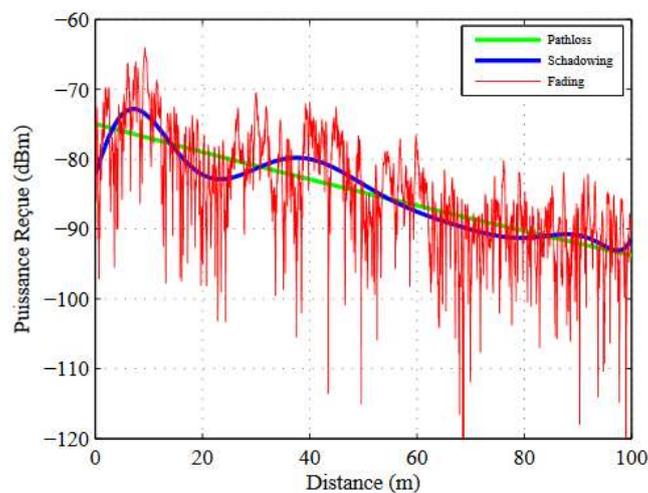


Figure 6. Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance (Tesserault 2008).

Historiquement, les modèles de canaux de propagation ont été proposés pour des applications de télécommunications. Les modèles satellitaires sont plus récents et concernent surtout les services de communications également, à l'exception de quelques-uns que nous mentionnerons ici. Les modèles de canaux peuvent être à bande étroite ou large bande. En bande étroite, on considère que le canal n'est pas sélectif en fréquence. Les modèles en bande large, par contre, permettent de modéliser la réponse du canal sur une large bande de fréquences (Fonction de transfert). Le canal peut être sélectif en fréquence. Ces modèles permettent aussi de modéliser la réponse impulsionnelle complexe du canal (transformée de Fourier inverse de la fonction de transfert).

Les modèles en bande étroite quantifient les atténuations lentes (path loss) et rapides du signal et pas directement les retards, qui nous intéressent pour la localisation. Ces retards pourront être modélisés grâce à la réponse impulsionnelle.

Les modèles peuvent être empiriques, statistiques, déterministes ou hybrides quand ils combinent les deux approches (Li, 2010). Les modèles déterministes reposent en général sur la résolution des équations de Maxwell dans des environnements particuliers qui imposent les conditions aux limites. Ces modèles nécessitent de fortes capacités de calcul. Les modèles statistiques ou empiriques caractérisent le comportement global du canal par des lois statistiques, généralement obtenues via des campagnes expérimentales. Ces lois sont faciles à utiliser mais ne sont valables que dans les environnements de mesure et pas toujours généralisables. Les paramètres du modèle peuvent avoir besoin d'être adaptés pour passer d'un scénario à un autre. A l'instar de ce qui se pratique en télécommunications, certains modèles statistiques sont issus d'une modélisation statistique de l'environnement qui permet d'exprimer la réponse impulsionnelle du canal de propagation.

Enfin, le canal GNSS en particulier pose plusieurs défis : la position du satellite qui varie en élévation et en azimut, le nombre de trajets reçus, les états LOS et NLOS, le mouvement du récepteur etc.

Les modèles statistiques

Les modèles empiriques statistiques sont souvent utilisés pour modéliser les variations du canal à grande échelle (Path loss) et à petite échelle ou « fast fading ». En communications terrestres, deux modèles sont principalement utilisés pour caractériser les variations rapides du signal autour d'une valeur d'atténuation donnée : le modèle de Rice lorsque le signal en vue directe (ou Line Of Sight) est disponible et le modèle de Rayleigh dans les cas où le trajet direct n'est pas disponible (ou Non Line of Sight). Il existe plusieurs autres modèles dans la littérature tels que les modèles de Weibull et de Nakagami. En particulier (Rubio 2007) a montré que le modèle de Nakagami-m permettait de caractériser les variations rapides du signal en environnement urbain. Ces modèles expriment la densité de probabilité de l'amplitude du signal reçu.

Pour prendre en compte le fait que l'émetteur soit satellitaire, Loo a proposé un premier modèle en 1985, complété par (Lutz, 1991) et considérant un satellite géostationnaire. Ces modèles considèrent deux états de réception : LOS et NLOS. (Perez-Fontán 2005) a ensuite ajouté un troisième état en différenciant faible et fort NLOS. Ces modèles combinent différentes lois statistiques pour exprimer les variations du signal.

Au cours de mes travaux de thèse (1999-2002), nous avons utilisé certaines des lois mentionnées plus haut pour distinguer les états LOS et NLOS, comme sur la figure 7 où nous avons fixé le seuil de réception après avoir modélisé les deux distributions des rapports C/N_0 des signaux reçus respectivement à partir de lois de Rice et Rayleigh (Saunders 1999). On notera la modélisation des distributions des rapports C/N_0 des satellites NLOS par des lois log normales dans d'autres publications (Irish 2014) comme sur celles que nous reprenons figures 8 et 9.

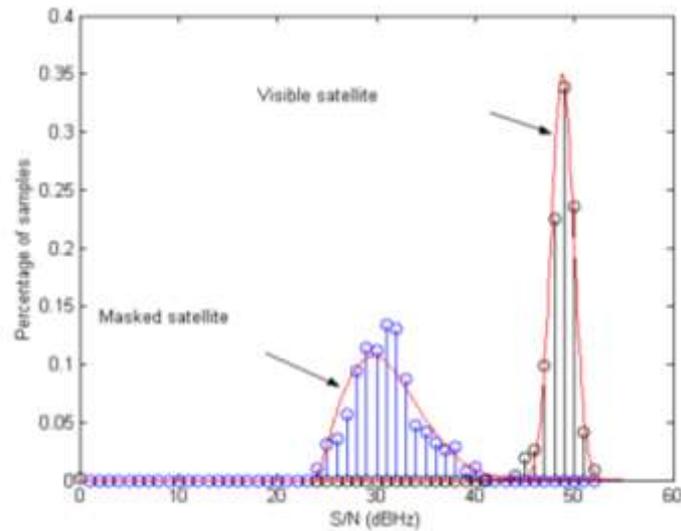


Figure 7. Distribution expérimentale des rapports CN0 de satellites reçus en direct et après réflexion [T1].

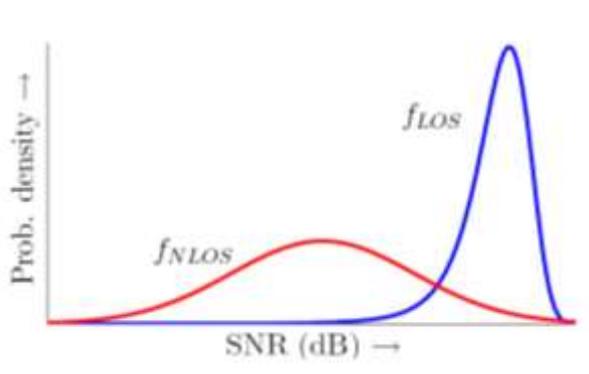


Figure 8. Distribution des signaux LOS et NLOS modélisés par (Irish, 2014) par des distributions de Rice et log-normale.

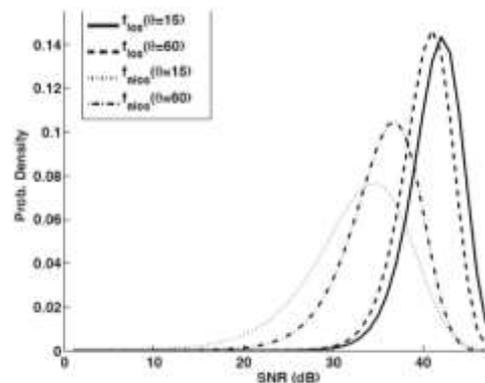


Figure 9. Distribution des signaux LOS et NLOS par (Isaacs, 2014) en intégrant aux modèles de Rice et log-normale l'élévation des satellites.

Dans (Isaacs 2014 – figure 8), les auteurs présentent une nouvelle approche de localisation et de cartographie simultanées (SLAM). Le modèle de mesure du rapport signal sur bruit (SNR) est utilisé pour assigner des probabilités que les signaux soient reçus en LOS et NLOS dans chaque cellule de la carte. La distribution peut enfin être affinée en fonction de l'élévation du satellite.

La connaissance de ces modèles statistiques a été peu utilisée seule dans le domaine des GNSS. Elle permet de modéliser des signaux reçus dans un environnement qui sont ensuite traités dans la chaîne du récepteur GNSS pour évaluer les performances de différents récepteurs.

Les modèles statistiques permettent une modélisation simple du canal avec un temps de calcul limité mais ils ne donnent pas accès aux retards de pseudo-distance qui dégradent les performances.

Ces modèles statistiques sont construits à partir de collectes de données empiriques. Ils seront d'autant plus pertinents que l'environnement d'utilisation est proche de l'environnement de la collecte. En changeant d'environnement (même d'un environnement urbain à un autre) il est possible que les paramètres du modèle soient à adapter.

Les modèles déterministes

Un modèle déterministe vise à reproduire un scénario réel en représentant les interactions entre des ondes électromagnétiques et l'environnement local. Généralement, on classe ces modèles déterministes en deux familles : les modèles exacts et les modèles asymptotiques. En pratique, les modèles exacts sont difficiles à utiliser et les modèles déterministes présentés dans la littérature sont des modèles dits asymptotiques.

Les modèles asymptotiques ne sont valables que lorsque la dimension des objets de l'environnement est plus grande que la longueur d'onde. Ces modèles nécessitent une modélisation 3D de l'environnement. Ces modèles reposent sur deux théories : l'optique physique (OP) et l'optique géométrique (OG).

L'optique géométrique décrit la réflexion d'un signal sur une surface plane ou réflexion spéculaire. Pour simuler la réflexion d'un signal GNSS sur une surface rugueuse, l'optique physique est nécessaire. Les phénomènes de réflexion et diffraction ont été décrits dans ma thèse [T1, chapitre 3]. On résumera la complémentarité des lois en disant que les réflexions sont traitées par l'optique physique et les diffractions par l'optique géométrique et en particulier par la Théorie Géométrique de la Diffraction (TGD) et la Théorie Uniforme de la Diffraction (TUD). Il existe deux familles de modèles asymptotiques : les modèles dit à tracé de rayons, les modèles dit à lancé de rayons et les modèles dit à lancé de faisceaux (Masson 2010).

Dans un certain nombre des travaux présentés dans la suite de ce mémoire, nous avons utilisé des modèles qui s'appuient sur la technique de tracé de rayons : Ergospace (de 2002 à 2010), SE-NAV (de 2011 à 2015). Nous disposons aujourd'hui de SPRING, outil du CNES. Les algorithmes de tracé de rayons déterminent l'ensemble des interactions du signal GNSS avec l'environnement proche de l'antenne, modélisé en 3 dimensions. Il s'agit de déterminer la trajectoire des rayons en traçant son chemin depuis le récepteur jusqu'à l'émetteur selon la théorie des images. Elle est parfois appelée méthode inverse. La figure 10 montre ces rayons et les retards induits sur un cas de canyon urbain.

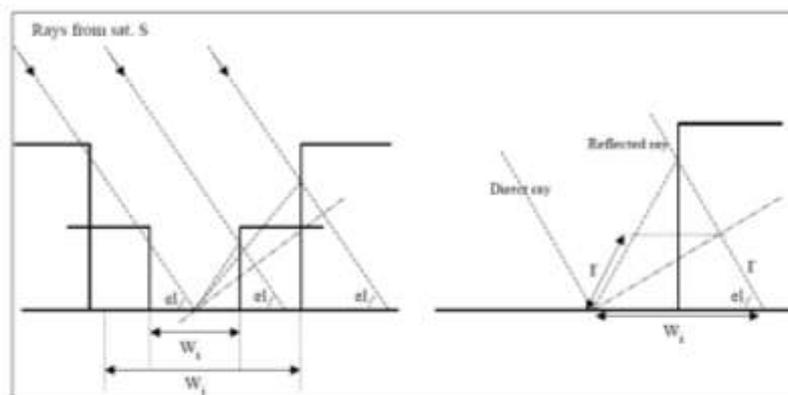


Figure 10. Calcul des rayons réfléchis dans un canyon urbain par la théorie des images [CI56] dans le cas d'un satellite d'azimut perpendiculaire au canyon.

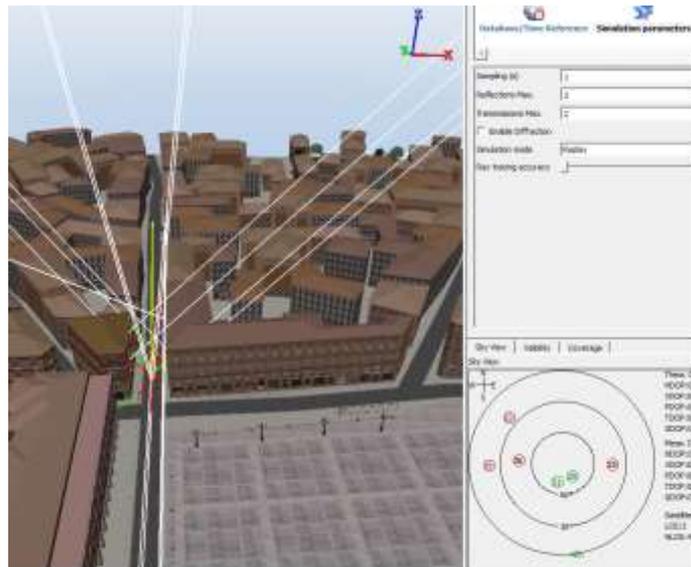


Figure 11. Capture SE-NAV (stage de Guodong Wang).

L'inconvénient de ces techniques réside dans l'utilisation de la théorie des images qui ne considère que des surfaces planes. Ces modèles fournissent la réponse impulsionnelle complexe du canal. Ce sont des modèles large bande.

Ces outils peuvent être très performants et peuvent offrir une représentation complète des phénomènes de propagation. Ils ont cependant des inconvénients forts : ils sont très lourds en temps de calcul. Ils requièrent des modèles d'environnement 3D complets, précis et réalistes quant aux dimensions des objets modélisés et aux caractéristiques des matériaux environnants. Ce sont en général des outils coûteux.

Les modèles hybrides

Le modèle hybride combine des modèles statistiques et à tracé de rayons. Le modèle hybride le plus répandu dans la communauté GNSS est le modèle large bande développé par le DLR¹.

En 2002, le DLR a réalisé une campagne de mesure avec un émetteur embarqué dans un ballon dirigeable destiné à simuler l'émission d'un signal satellite de largeur de bande 100 MHz et sur une porteuse entre 1460 et 1560 MHz proche de la bande L1 du GPS. Cette collecte de données a permis au DLR de modéliser la puissance du signal reçu dans différents types d'environnements. Le simulateur génère un environnement aléatoire à partir de lois statistiques (distribution des largeurs de rue, des hauteurs des bâtiments...) tel que représenté sur la figure 12. Le trajet direct et le retard de chaque trajet réfléchi (écho) sont calculés de façon géométrique. L'amplitude complexe de chaque signal est calculée selon une loi statistique. D'où la classification de ce modèle dans la famille des modèles hybrides.

¹ <http://www.kn-s.dlr.de/satnav/>

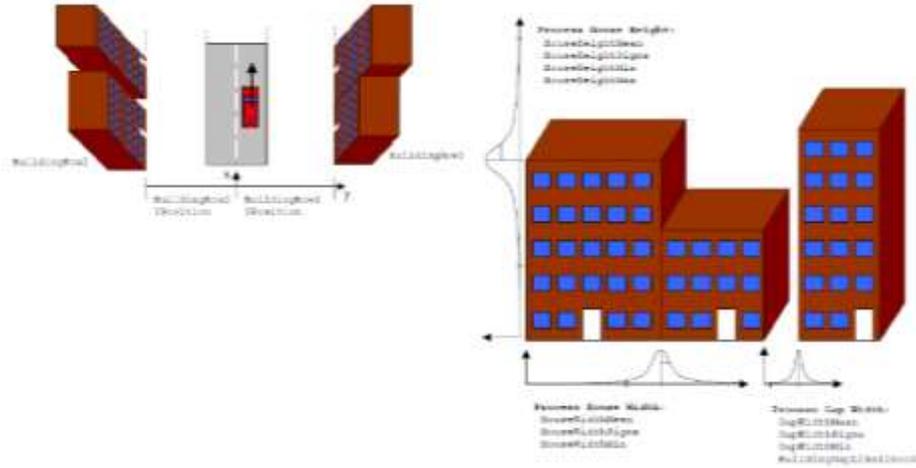


Figure 12. Le processus statistique de génération des bâtiments (Krach 2007)

L'outil du DLR fournit, pour un scénario d'environnement et un satellite donnés, la réponse impulsionnelle complexe du canal $h(\Delta\tau, t)$, soit : l'amplitude, la phase et le retard de chacun des échos reçus.

$$h(\Delta\tau, t) = \sum_{i=0}^N a_i(t) e^{-j\phi_i(t)} \delta(\Delta\tau - \Delta\tau_i(t)) \quad (\text{Eq. 7})$$

où N est le nombre d'échos, $\Delta\tau_i(t) = \tau_i(t) - \tau_0(t)$ et $\phi_i(t)$ représente les variations de la phase qui dépendent du mouvement du récepteur et de l'environnement.

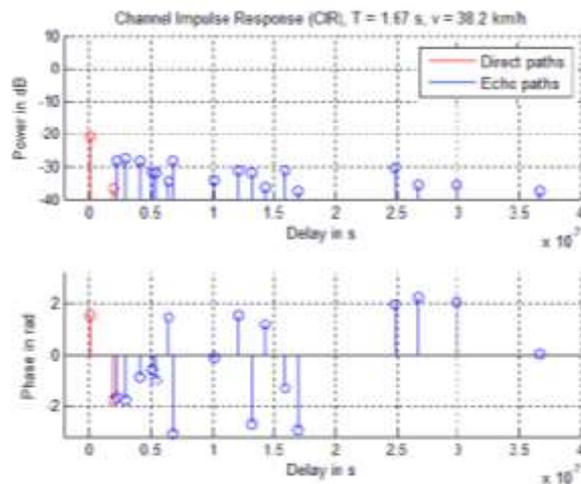


Figure 13. Exemple de réponse impulsionnelle dans un environnement urbain pour un satellite donné.

A partir de la description des réponses impulsionnelles du canal pour chacun des satellites reçus, le modèle du DLR nécessite l'implantation de la chaîne de traitement du signal du récepteur pour faire le lien entre le canal, l'ensemble des échos reçus et la position calculée. Ainsi, le modèle de canal proposé est principalement utilisé pour simuler la précision de localisation de récepteurs de navigation, tester les performances des nouvelles modulations de Galileo en environnement urbain (Schubert 2008) ou de nouvelles techniques de réduction des multitrajets (Bhuyian 2012).

A ce jour, ce modèle hybride est le modèle le plus complet de la littérature et le plus proche des applications GNSS.

Dans des perspectives à moyen terme et pour répondre aux interrogations encore présentes sur la pertinence des outils déterministes tels que SPRING (mis à notre disposition par le CNES pour la thèse de Ni Zhu), il serait intéressant de pouvoir mettre en œuvre une comparaison de résultats entre ces modèles. La brique de traitement du signal simulé statistiquement reste à implémenter au laboratoire pour faire le lien entre signal et estimation de la pseudo-distance.

Dans la suite de nos travaux, l'utilisation de tels modèles est envisagée pour plusieurs axes :

- Evaluation des performances dans un environnement type ferroviaire (il s'agira alors d'évaluer la pertinence du modèle d'environnement pour ce cas d'étude)
- Impact de ces signaux sur le calcul d'intégrité (cf chapitre 5).

Le canal de propagation influence d'abord la qualité des mesures réalisées par le récepteur GNSS et en particulier la qualité des mesures de pseudo-distances. Nous observerons dans la suite l'imprécision de la mesure de pseudo-distance causée par les multitrajets, et en particulier l'erreur induite par les satellites qui ne sont pas reçus en visibilité directe (NLOS). L'autre effet est directement visible sur la réception ou non des satellites et donc sur la géométrie des satellites disponibles, caractérisée par le DOP (Dilution of Precision).

c. Les multitrajets vs satellites NLOS

Les multitrajets sont caractérisés par la réception d'échos multiples, en provenance d'un même satellite. Chaque écho subit un retard par rapport au signal direct. La longueur de ce retard dépend de la distance à l'obstacle. Sa puissance dépend du coefficient de réflexion de la surface réfléchissante.

En présence de multitrajets, le signal reçu est composé d'échos multiples qui s'additionnent, selon la valeur des retards $\tau(t)$ variables et de leurs phases $\varphi(t)$. On notera alors le signal reçu comme une somme de signaux :

$$s(t) = \sum_{l=0}^{N-1} A_l \cdot D(t - \tau_l(t)) \cdot C(t - \tau_l(t)) \exp(j\varphi_l(t)) + n(t) \quad (\text{Eq. 8})$$

avec $\varphi_l(t) = \varphi_l(0) + 2\pi \int_0^t f_l(u) du$ où l est le numéro de l'écho et l'index 0 représente le trajet direct.

La fréquence f_l résulte de l'effet Doppler relatif au mouvement des satellites et de l'antenne GNSS.

Le traitement du signal reçu par le récepteur a pour objectif de déterminer les valeurs de $\tau_0(t)$, $\varphi_0(t)$ et $f_0(t)$, soit les valeurs de retard, phase et fréquence pour le signal direct s'il est disponible.

Les multitrajets influencent différemment les mesures de phase et de pseudo-distance. Les répliques additionnelles du signal causées par les réflexions dans l'environnement local introduisent un biais sur les boucles à retard de code (delay lock loops - DLLs), qui conduisent à une erreur de position.

L'impact de ces multitrajets est différent selon la présence ou non du trajet direct. De plus, en fonction du déphasage entre le signal réfléchi et le signal direct, l'interférence causée par le multitrajet peut être constructive ou destructive. Les caractéristiques de ces échos modifient la sortie du ou des corrélateurs et déforment la fonction de corrélation typiquement triangulaire. Une erreur de multitrajet est ainsi causée par la déformation de la fonction de corrélation telle que représentée sur la figure 14. Sur cette figure, la fonction de corrélation résultante des réceptions combinées d'un trajet direct (bleu) et d'un trajet réfléchi (vert) est représentée en orange dans le cas d'une combinaison constructive et en rouge dans le cas d'une combinaison destructive.

Dans cet exemple classique, 3 corrélateurs sont utilisés : un *Early* (avancé), un *Prompt* (« à l'heure »), un *Late* (retardé). Les corrélations Early et Late sont combinées afin d'assurer la détection du pic de corrélation. On utilise alors le discriminant (combinaison plus ou moins complexe des sorties de ces corrélateurs). Le lecteur trouvera plus d'information dans (Borre 2007)). Ici, les deux combinaisons conduisent à une estimation erronée de la mesure de temps (représentée au point P – « Prompt »). Le retard peut être positif ou négatif.

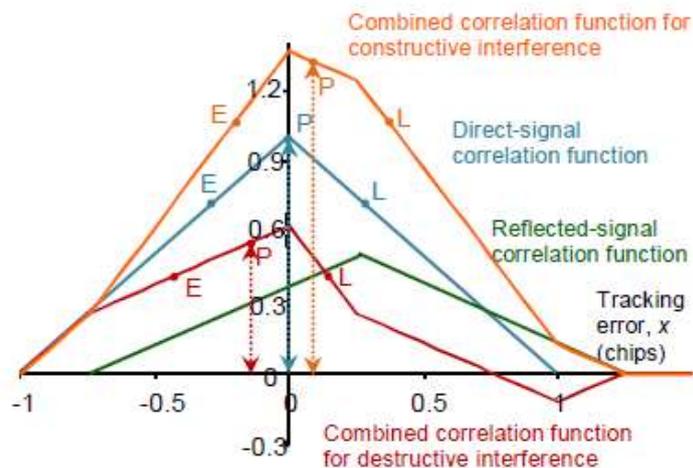


Figure 14. Effet constructifs ou destructifs des multitrajets sur la fonction de corrélation (Groves 2013)

Réduction des multitrajets – état de l'art

On trouve, dans la littérature, trois grandes familles d'approches développées pour réduire l'effet des multitrajets.

- Les multitrajets apparaissent en amont de l'antenne, dans le canal de propagation, et peuvent ainsi être traités ou atténués dès l'antenne avec l'utilisation d'antennes spécifiques (antenne Choke rings) ou des réseaux d'antennes (Rougerie 2012), (Closas 2011);
- au cœur du récepteur, pendant la phase de tracking ;
- ou au moment de l'estimation de la position.

Une autre solution consiste à combiner plusieurs capteurs de natures différentes. De nombreux systèmes visant à rendre les solutions satellitaires de localisation plus précises et plus robustes reposent en effet sur la multiplication des capteurs embarqués. Les solutions multi-capteurs peuvent cependant s'avérer plus coûteuses puisqu'on multiplie le nombre de capteurs. Dans notre approche, avant de combler les lacunes du GNSS avec d'autres capteurs, nous avons souhaité explorer les performances du GNSS.

Au cœur du récepteur, les travaux concernent la conception de corrélateurs spécifiques. Ces travaux ont commencé dans les années 90s avec les corrélateurs étroits et les discriminants. L'utilisation de corrélateurs étroits permet de réduire les effets négatifs des multitrajets à retards importants mais pas des plus courts. Les nombreuses propositions résumées dans (Bhuiyan 2012) reposent sur la multiplication du nombre de corrélateurs (banques de corrélateurs) et de leur résolution de façon à faciliter la distinction entre signaux directs et réfléchis.

Les techniques de poursuites vectorielles (*Vector Tracking*) visent également à améliorer les performances des algorithmes de poursuite du signal au sein d'un récepteur en présence de multitrajets. L'architecture vectorielle, d'abord développée pour atténuer l'effet de l'atténuation du signal et des interférences (Hsu 2014) permet également la détection des multitrajets et des signaux réfléchis. L'estimation de la position et de la vitesse sont utilisées pour détecter les multitrajets au

niveau des boucles de poursuite et ainsi éviter l'utilisation de mesures erronées dans l'estimateur de position (Syed Mohd Dardin 2015). Ces traitements visent cependant davantage à limiter les multitrajets en présence du trajet direct qu'à réduire l'impact des trajets reçus après réflexion seulement.

Dans la suite de ce document, nous nous attacherons à distinguer les multitrajets des signaux réfléchis ou NLOS et à traiter en particulier le cas NLOS qui peut causer en environnement urbain, une erreur de position de l'ordre de la dizaine à plusieurs centaines de mètres.

Les problématiques de détection et de réduction des trajets reçus après réflexion peuvent être distinguées des techniques de détection des multitrajets. Comme résumé sur la figure 15 – non exhaustive, le traitement de signaux NLOS peut varier. On peut choisir d'ignorer les trajets indirects bien sûr ou essayer de les éviter lorsque c'est possible (en choisissant un site de mesure statique ou de référence par exemple). Ces deux solutions étant peu satisfaisantes pour les applications transport, d'autres stratégies doivent être déployées pour détecter et identifier le signal concerné. Deux familles de stratégies sont alors possibles : la première consiste à exclure le signal identifié du calcul de position, la deuxième vise à adapter la solution pour exploiter cette mesure en minimisant l'erreur induite. La question de l'exclusion ou de la pondération de ces signaux sera abordée dans la suite du document dans la présentation de nos travaux, représentés en vert sur la figure 15.

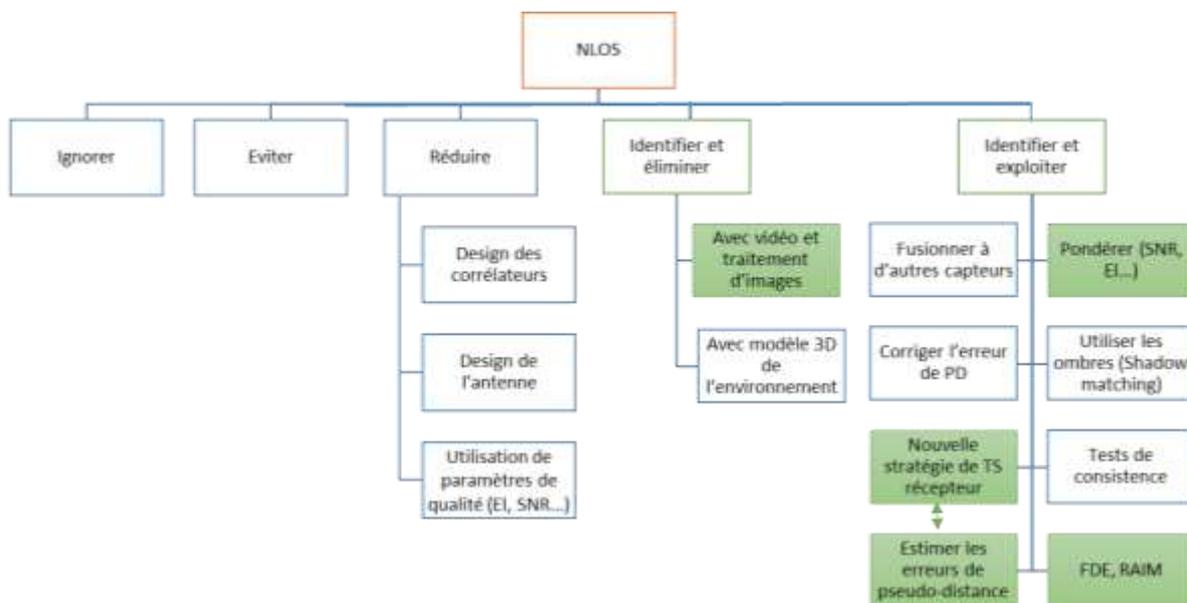


Figure 15. Classification des stratégies liées aux NLOS inspirée de (Breßler 2016).

Détection des signaux LOS/NLOS

L'impact des obstacles sur les signaux GNSS est directement visible sur l'amplitude des signaux reçus, répercutée sur la valeur du rapport signal sur bruit (C/N0). Un signal NLOS est atténué par la distance supplémentaire parcourue mais son C/N0 dépendra surtout du coefficient de réflexion de la surface sur laquelle il s'est réfléchi. De plus, contrairement aux signaux directs, polarisés circulaires droits, les signaux reçus après une réflexion sont devenus circulaires gauches et peuvent subir une atténuation supplémentaire liée à l'antenne (polarisée circulaire droite). La figure 16 montre des résultats de mesures de rapports C/N0 obtenues pendant ma thèse (2002) avec une antenne circulaire gauche directive pointant vers un satellite évoluant dans le temps. Les points bleus représentent le rapport C/N0 d'un satellite reçu en visibilité directe et en rouge d'un satellite reçu après une réflexion. On remarque que l'atténuation induite par la réflexion n'est ici que de 4 à 6dBHz. Il est ainsi parfois difficile de distinguer le C/N0 d'un signal réfléchi d'un signal direct. On notera sur les mesures

réalisées dans la thèse de Nicolas Viandier (2011) et tracées figure 17, les dispersions du rapport C/N0 d'un signal LOS en fonction de son élévation.

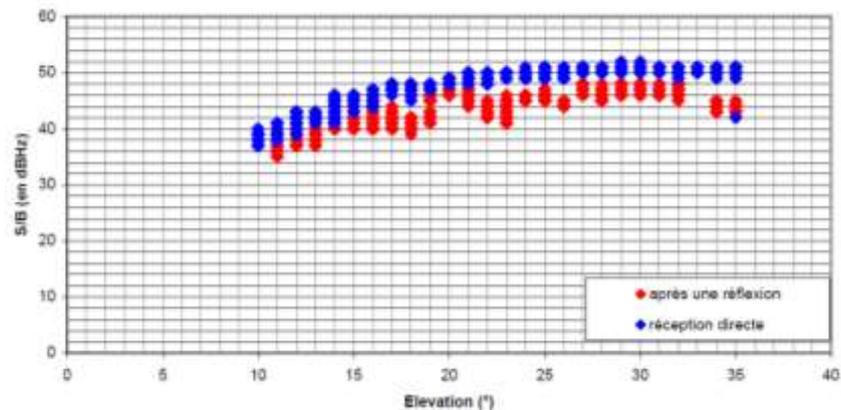


Figure 16. Comparaison des rapports C/N0 mesurés en LOS et NLOS (1 réflexion) en fonction de l'élévation du satellite [T1].

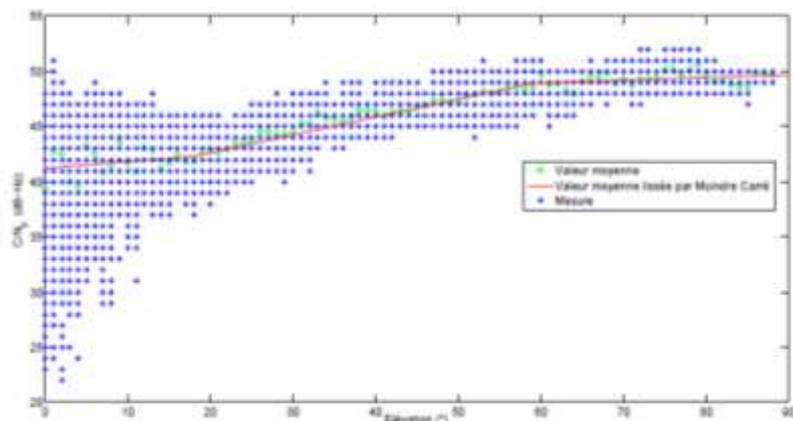


Figure 17. Valeur du C/N0 en fonction de l'élévation pour des signaux reçus en environnement totalement dégagé sur la base aérienne de Nierngnies. Les étoiles bleues représentent l'ensemble des mesures pour chaque valeur de C/N0 en fonction de l'élévation. La courbe pointillée verte représente la valeur moyenne du C/N0 en fonction de l'élévation. Les segments de droite rouges représentent la courbe précédente lissée par moindres carrés (Viandier 2011).

Dans nos travaux, nous avons parfois été amenés à utiliser un seuil de C/N0 comme critère de classification des signaux LOS et NLOS mais toujours avec précaution. Une calibration doit être réalisée avec l'équipement utilisé et l'hypothèse d'une classification imparfaite doit être notée comme nous allons l'illustrer.

Les approches ciblant les NLOS consistent à détecter et éliminer ou atténuer les signaux issus de ces satellites en particulier. Le rapport signal sur bruit (C/N0) est parfois utilisé mais comme mentionné, il dépend de l'équipement, et la dispersion des valeurs causée par les multitrajets implique de mauvaises détections. C'est pourquoi d'autres techniques sont aujourd'hui étudiées.

Pour exploiter le sens de la polarisation des signaux GNSS, une [T1] ou plusieurs antennes polarisées (Jiang 2014) peuvent permettre de distinguer un signal LOS d'un signal NLOS. Cette technique est d'autant plus efficace que les satellites sont à hautes élévations pour lesquelles la sensibilité de l'antenne à la polarisation est plus forte. Le dispositif présenté figure 18 a été testé pendant ma

thèse (2002) et a consisté à poursuivre, avec une antenne directive et une antenne polarisée les signaux reçus en NLOS après réflexion sur un bâtiment. Le dispositif de l'UCL (Jiang 2012), figure 20, compare les C/N_0 en sortie de deux antennes polarisées respectivement circulaire droite (RHCP) et gauche (LHCP).



Figure 18. Dispositif de mesure expérimentale des signaux NLOS avec une antenne polarisée [T1]

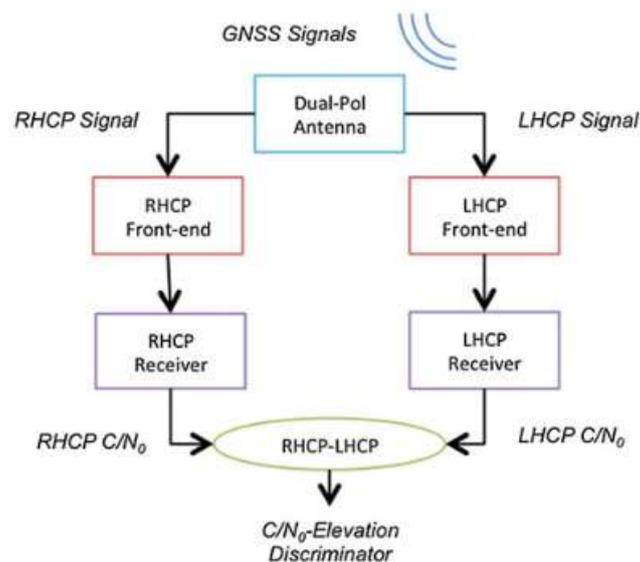


Figure 19. Dispositif de réception en polarisations circulaires droite et gauche de l'UCL (Jiang 2012).

Jean-Pierre Ghys (LEOST) a réalisé deux antennes polarisées (droite et gauche) et développé un système d'acquisition et de comparaison des mesures GNSS obtenues. A court terme, ces mesures pourront être utilisées pour alimenter nos propres techniques de sélection des satellites et ajouter la discrimination par la polarisation à notre panoplie de méthodes.

(Strode 2015) propose une méthode additionnelle au portfolio de (Groves 2013) qui reprend l'ensemble des techniques de réduction des effets des NLOS et multitrajets. Strode utilise l'influence de la fréquence sur le déphasage des échos et donc sur le rapport C/N_0 mesuré pour comparer les mesures réalisées à trois fréquences (le bloc IIF du GPS et de Galileo émettant sur trois fréquences). Une étape de calibration expérimentale vise à déterminer la valeur de C/N_0 attendue dans de bonnes conditions de réception en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Les différences de C/N_0 entre deux fréquences sont comparées à un test statistique qui détermine l'occurrence des multitrajets lorsque le seuil est dépassé.

Lorsque la détection se fait au niveau du bloc d'estimation, les caractéristiques de CNO des signaux peuvent être utilisées comme indicateur d'état de réception. Nous y reviendrons dans la suite de ce mémoire.

d. Mes contributions/Plan du mémoire

Comme annoncé dans l'introduction de ce mémoire de recherche, mes contributions portent sur l'amont et l'aval du traitement du signal par le récepteur tel que représenté figure 20 :

- Une partie de mes travaux porte sur la connaissance des conditions de propagation des signaux avant qu'ils n'atteignent le récepteur, et porte en particulier sur la connaissance des effets liés aux obstacles proches de l'antenne. Il s'agit alors de comprendre la disponibilité des signaux, et de détecter les signaux potentiellement corrompus, c'est-à-dire, les signaux reçus après réflexion.
- Pour l'autre partie, mes travaux commencent lorsque la mesure de pseudo-distance est fournie, après l'estimation des valeurs de $\tau(t)$, $\varphi(t)$ et $f(t)$. Il s'agit alors d'utiliser au mieux l'ensemble des mesures disponibles connaissant les conditions de propagation des signaux afin de fournir les meilleures performances possibles en sortie du calcul de position GNSS. La première performance est la précision ; la deuxième l'intégrité.

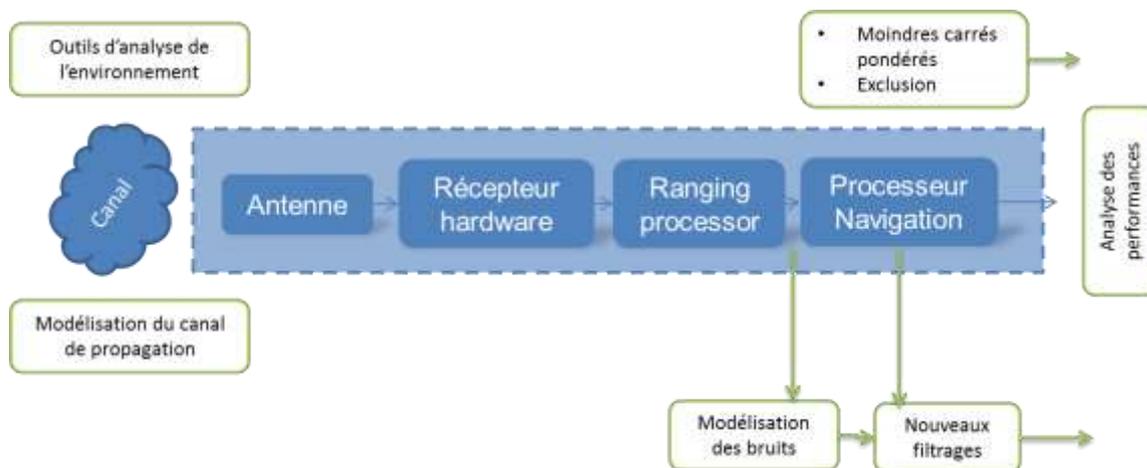


Figure 20. Travaux présentés dans ce mémoire, représentés sur la chaîne de traitement des signaux.

En pratique, un récepteur GNSS est aujourd'hui presque toujours utilisé en hybridation avec d'autres capteurs, notamment pour résoudre les problèmes de masquage des signaux satellitaires mais aussi parce que certains capteurs, bas coûts, sont maintenant disponibles et que leur bénéfice est démontré. La position est de plus souvent recalée sur une cartographie numérique (map-matching). Le choix de capteurs est vaste ainsi que les technologies qui peuvent être associées (utilisation des réseaux de communications, radars...). A ces architectures sont associées un large choix d'algorithmes de filtrage (Bayésien, théorie des croyances, théorie des ensembles, etc...). Les systèmes multi-capteurs, grâce à la présence de capteurs inertiels ou de systèmes de localisation indoor, permettront d'offrir des solutions au problème de disponibilité de service en environnement très contraint de type tunnel que le GNSS ne peut pas satisfaire.

Ces techniques sont déjà traitées par plusieurs équipes notamment en France par Heudiasyc ou CRISTaL. Par conséquent, **j'ai fait le choix de concentrer mes travaux sur le récepteur GNSS considéré comme un capteur de localisation seul. L'ensemble des pistes proposées consiste à améliorer sa précision. Mon approche considère que toute solution hybridée à partir d'un capteur GNSS plus précis fournira une position hybridée plus précise.**

De plus, l'intérêt d'une solution GNSS-seul plus performante dans un système multi-capteurs est de permettre l'utilisation de capteurs moins coûteux pour un niveau de service équivalent ou de permettre d'accroître encore les performances globales du système hybridé.

Dans ce manuscrit, nous avons choisi une logique de présentation de nos recherches en trois chapitres :

Le chapitre 3 concerne l'amont du récepteur : comment appréhender l'environnement de propagation des signaux GNSS, facteur important de dégradation des performances de localisation dans les environnements transports. Deux approches sont développées. La première consiste à développer des outils de détection des obstacles à proximité de l'antenne et à déterminer l'état de réception de chacun des signaux reçus. La deuxième, plus récente, vise à utiliser et à compléter si besoin les modèles de canaux GNSS existants.

Dans le chapitre 4, nous présenterons, d'une part, comment la connaissance de l'environnement permet d'améliorer la précision par exclusion ou pondération de certains satellites, et d'autre part, améliorer la précision de la localisation GNSS grâce à une connaissance déterministe ou statistique des erreurs liées à la propagation. Le travail réalisé en collaboration avec le Prof. Emmanuel Duflos de l'Ecole Centrale de Lille, a consisté à modéliser les bruits attribués aux multitrajets et à proposer un filtrage adapté à ces bruits.

Le chapitre 5 traite des questions liées à la sécurité avec, d'une part, les problématiques de sûreté de fonctionnement (SdF) des systèmes de localisation utilisant les signaux GNSS dans des applications ferroviaires et, d'autre part, des questions liées à la définition de nouveaux critères d'intégrité adaptés à l'environnement urbain. La question de la SdF constitue les recherches développées depuis 2007 avec Vincent Bénard puis Julie Beugin dès 2008 (au Leost d'abord, maintenant à l'Ifsttar/Estas) ; Celle de l'intégrité en urbain fait l'objet de la thèse de Ni Zhu en collaboration avec David Bétaille de l'Ifsttar/Geoloc et Marion Berbineau.

Enfin, dans les *chapitres 6 et 7*, je présenterai les conclusions de ce mémoire et les perspectives pour la suite de mes travaux, en développant trois axes de travail futurs.

3 Appréhender l'environnement de propagation proche de l'antenne de réception

Si les récepteurs GPS ont progressivement envahi nos véhicules et nos smartphones, en 1998, ils n'équipaient que les véhicules haut de gamme. Les gestionnaires de flottes de véhicules, comme la SNCF, se posaient alors la question de l'intérêt d'un investissement dans ces technologies. Les performances obtenues le long d'une voie de chemin de fer demandaient à être étudiées, si possible avec des équipements à coût réduit. Il s'agissait alors d'étudier la disponibilité d'une constellation de satellite de navigation le long d'une voie ferroviaire. Ces travaux ont été confiés à l'INRETS –LEOST et nous avons initié le développement d'un outil de prédiction de la disponibilité, appelé PREDISSAT (Predictive software for satellite availability in the field of transport), permettant de définir les zones de faible couverture radioélectrique nécessitant un déploiement particulier, de préciser si certains satellites devaient être exclus du calcul de position et d'évaluer l'erreur de positionnement en tout point.

Un brevet a été déposé pour protéger le concept PREDISSAT en 2006 en France et étendu en 2008 à l'international.

A partir de 2008, après avoir éprouvé PREDISSAT dans les projets LOCOPROL ou TESS, nous avons souhaité poursuivre le développement du concept avec des techniques de traitement d'images plus robustes. C'est ce que nous avons porté avec le projet CAPLOC.

Ce chapitre présente ainsi les méthodes développées pour connaître et analyser l'environnement de réception des signaux GNSS en environnement transport afin de distinguer les satellites reçus selon leur état de réception (LOS/NLOS). Dans le chapitre 4 nous montrerons comment cette connaissance peut être utilisée afin d'améliorer les performances de localisation.

a. PREDISSAT – Prédire la disponibilité satellitaire, connaître leur disponibilité

L'outil PREDISSAT et sa description sont le cœur de mon mémoire de thèse [T1] ainsi que des revues [J12-14]. Le concept a été breveté en 2006/2008 [B1].

Le développement de PREDISSAT a été impulsé par la Direction de la recherche et de la technologie de la SNCF, dans le cadre de la coopération franco-allemande DEUFRAKO qui existe depuis 1978 entre le ministère de la recherche et de l'enseignement supérieur en Allemagne et le ministère de l'équipement, du logement et des transports en France. Cette collaboration a d'abord porté sur le domaine de la grande vitesse ferroviaire et a été étendue depuis à d'autres secteurs, dont le transport urbain et mobilité, le transport de marchandises, la sécurité routière, les véhicules propres.

Le projet DEUFRAKO-P a porté sur l'étude de l'utilisation des satellites pour la localisation et les télécommunications dans le domaine ferroviaire. Un inventaire des différentes techniques de localisation et de communication par satellites a été dressé afin de déterminer quelles solutions étaient applicables au regard des spécifications des chemins de fer, par exemple pour des applications de contrôle-commande ou de gestion de flottes fret ou voyageurs.

L'objectif de l'étude réalisée par l'INRETS-LEOST dans le cadre du projet DEUFRAKO-P a été de démontrer qu'il était possible de développer un outil de prédiction de la disponibilité des satellites GPS en milieu ferroviaire [CI65]. Cet outil est fondé sur la combinaison d'informations concernant les angles d'élévation des satellites fournis par simulation, et l'analyse de l'image de l'environnement d'une antenne GPS fixée sur le toit d'un train.

PREDISSAT a ensuite été développé principalement dans le cadre de ma thèse, cofinancée par l'INRETS et la Région Nord-Pas-de-Calais [T1].

Plusieurs approches sont envisageables pour l'analyse des performances GNSS :

- L'expérimentation consiste à parcourir un même trajet à de nombreuses reprises, à heures différentes, pour observer les variations des satellites reçus, leurs positions, le nombre de satellites disponibles etc. Cette méthode demande une mobilisation longue de personnels et de matériels et pose des problèmes d'ordre pratique dès lors qu'il s'agit de réaliser des tests répétitifs, notamment sur des voies ferroviaires.
- La simulation permet de maîtriser complètement la configuration satellitaire, les conditions de réception ou encore d'assurer la répétabilité. Mais il est difficile de reproduire complètement en simulation l'environnement réel et les masquages.
- L'approche hybride consiste à limiter le nombre d'expérimentations et à les combiner à des simulations en temps différé. C'est ce que nous avons retenu.

Principe de PREDISSAT

Cette section est rédigée à partir de l'article [J12].

Dans un premier temps, PREDISSAT a été développé pour évaluer la disponibilité des constellations GNSS. L'approche retenue dès 1998 pour le développement de PREDISSAT consiste à limiter le nombre de campagnes expérimentales tout en considérant l'évolution dans le temps des constellations GNSS, et pour cela à exploiter le caractère guidé du transport ferroviaire. Le principe repose sur l'acquisition expérimentale de données relatives à l'environnement de réception (constructions, tranchées ferroviaires) par essence relativement stables dans le temps et à simuler en temps différé la constellation de satellites. L'originalité de l'outil réside dans l'utilisation de l'image pour analyser l'environnement autour de l'antenne afin de caractériser la qualité de la réception des signaux satellitaires.

Un signal est reçu en trajet direct lorsque le trajet émetteur-récepteur se fait au-dessus de la ligne de visibilité directe (figure 21). Cette ligne correspondant à la ligne d'horizon optique, nous avons développé, en nous inspirant des approches appliquées aux satellites de communication (Robet et al. 1992), un outil fondé sur la connaissance vidéo de l'environnement que l'on retrouve également plus tard dans (Bråten et al. 2002).

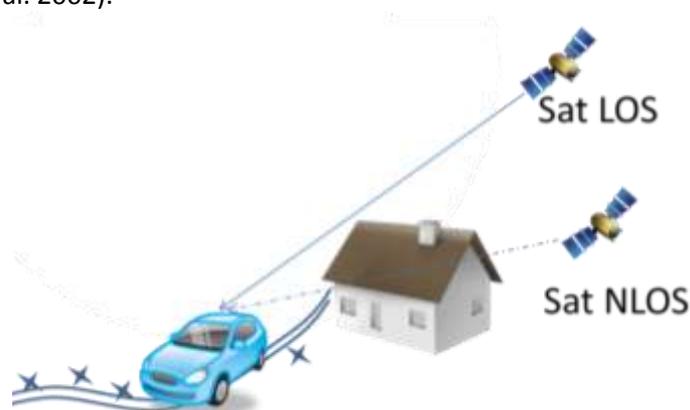


Figure 21. Visibilité satellitaire. Un satellite LOS est un satellite situé au-dessus de la ligne de masquage optique.

Lors des premières versions de PREDISSAT (1999-2002), la méthode adoptée pour l'analyse de l'environnement consiste à filmer, lors d'un passage unique, l'environnement de l'antenne à l'aide de caméras embarquées. Une analyse semi-automatique des images acquises permet de déterminer en laboratoire les propriétés des masques optiques le long du trajet en trois dimensions. L'outil détermine ainsi le nombre de satellites disponibles (LOS) en comparant le masque issu du traitement d'images aux positions simulées des satellites comme sur la figure 22.



Figure 22. Distinction des satellites LOS grâce à la détection de la ligne d'horizon.

Afin d'obtenir une vision de l'environnement de l'antenne, le premier système expérimental testé est composé de deux caméras matricielles analogiques noir et blanc équipées d'un capteur CCD (capteur à transfert de charge). Ces caméras sont placées sur le toit du véhicule, tel qu'illustré par les figures 23 et 24 et pour un trajet seulement. Chaque caméra fournit vingt-cinq images par seconde. La synchronisation de l'enregistrement des images avec le capteur odométrique nous permet d'enregistrer les images en fonction de la distance parcourue, soit une image par mètre parcouru. Cette information spatiale nous permet d'appliquer ensuite un procédé de stéréovision mono-caméra détaillé dans [T1].



Figure 23. Système d'acquisition vidéo de PREDISSAT installé sur le train SNCB (Locoprol).

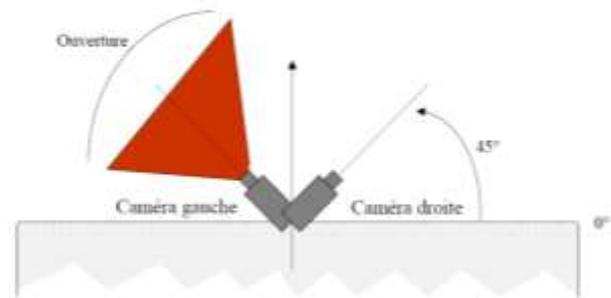


Figure 24. Disposition des deux caméras de PREDISSAT [T1].

Les premiers résultats issus de l'image reposaient sur un système à deux caméras placées dos à dos dont était extraite une colonne de pixels représentant la perpendiculaire à la trajectoire. Ces colonnes placées côte à côte représentent l'environnement perpendiculaire à la trajectoire. L'objet du traitement d'images est de détecter dans chaque colonne le pixel limite entre ciel et obstacle qui dessine ainsi la ligne d'horizon tel qu'illustré sur un exemple figure 25 [J12].

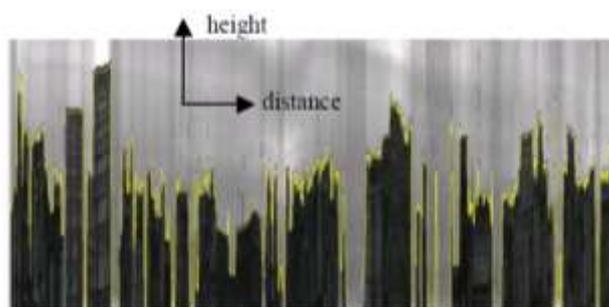


Figure 25. Détection ciel/non-ciel sur une image représentation la vision perpendiculaire au trajet du véhicule [J12].

Pour passer d'une appréhension des masques en 2D à une connaissance en 3D, nous appliquons un principe de stéréovision. La stéréovision permet en effet de calculer la profondeur des obstacles vus dans l'image, ainsi que leur hauteur, et donc de reconstituer a posteriori l'environnement masquant en trois dimensions (figure 26). Les zones situées à l'avant et à l'arrière du véhicule sont considérées comme dégagées de masques. La reconstruction de l'environnement se fonde sur l'hypothèse que les obstacles sont situés le long de la trajectoire, parallèlement à la direction du véhicule. La configuration est donc de type canyon, bien adaptée dans les environnements urbains. Le procédé est en « temps différé ».

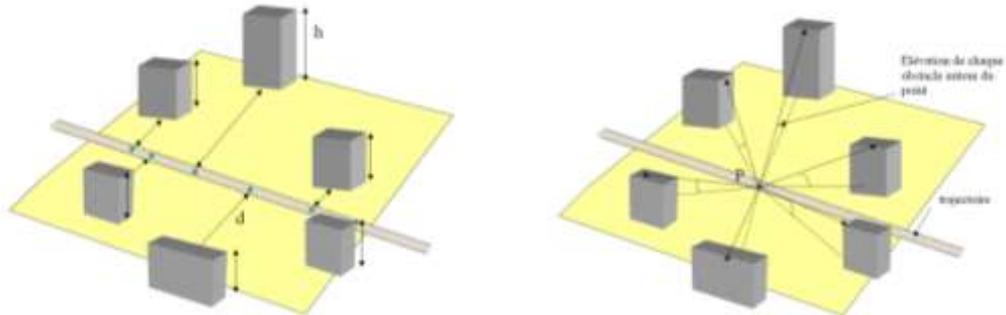


Figure 26. De la vision 2D perpendiculaire à la voie à la vision 3D du masque autour de l'antenne [T1].

Pour estimer le nombre de satellites reçus après une réflexion, des lois simples de l'Optique Géométrique ont été appliquées pour tracer une deuxième « ligne de visibilité » délimitant les élévations (min et max) des satellites réfléchis. La figure 27 illustre comment, avec la théorie des images, comme appliqué par un outil de tracé de rayon présenté figure 10, calculer l'élévation du rayon le plus bas avec lequel un satellite peut être reçu après une réflexion. Une zone intermédiaire entre le ciel et le masquage peut ainsi être dessinée comme sur la figure 28, dans laquelle les satellites sont reçus après réflexion.

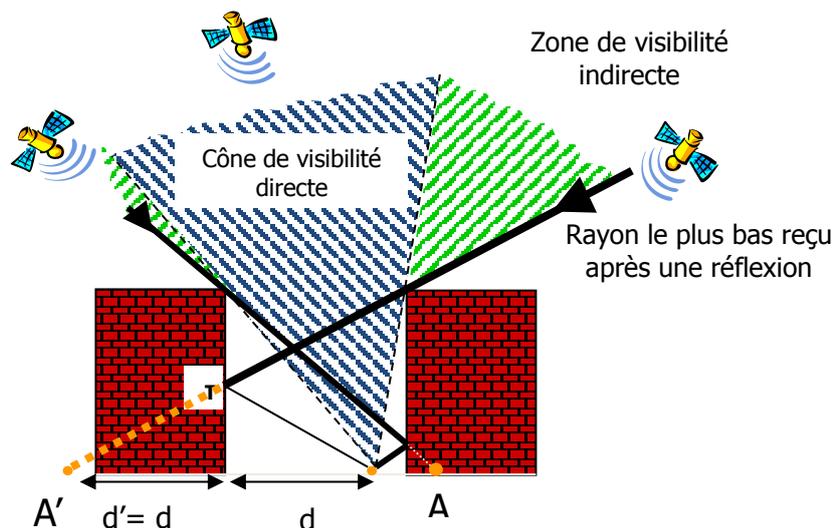


Figure 27. Utilisation des lois de l'optique géométrique pour le calcul de l'élévation des signaux reçus après une réflexion.

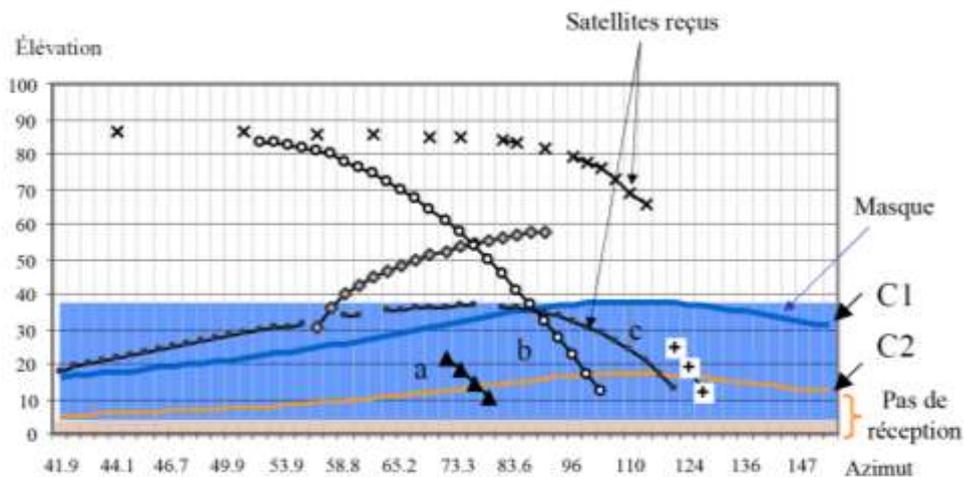


Figure 28. Représentation schématique de la zone « masquée ». Entre les courbes C1 et C2, les satellites reçus sont reçus après une réflexion [T1].

Evaluation

Une première version de l'outil a été testée dans des conditions réelles d'utilisation sur une ligne SNCF et les résultats ont été comparés au nombre de satellites effectivement reçus par un récepteur GPS à bord du train [CI65]. La figure 29 trace l'évolution du nombre de satellites reçus par trajet direct en prédiction et en mesure. Elle montre que les variations sont proches. On observe cependant un temps de latence entre prédiction et mesure, vraisemblablement dû au caractère immédiat du masquage sur la prédiction qui ne restitue pas le temps de traitement du récepteur. La représentation sous forme de distribution (figure 30) montre une estimation statistique assez proche du nombre de satellites reçus en NLOS, bien que sous-estimant légèrement la visibilité.

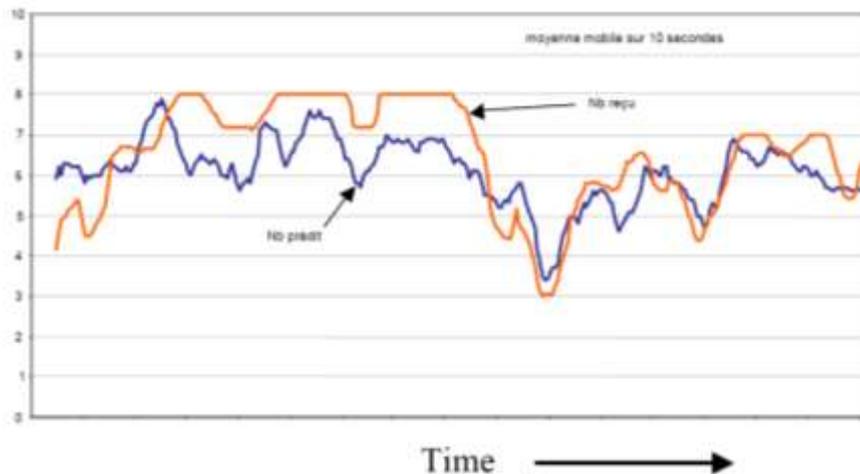


Figure 29. Nombre de satellites reçus par trajet direct le long d'un trajet ferroviaire (en bleu, le nombre prédit, en orange le nombre de satellites reçus) [CI65].

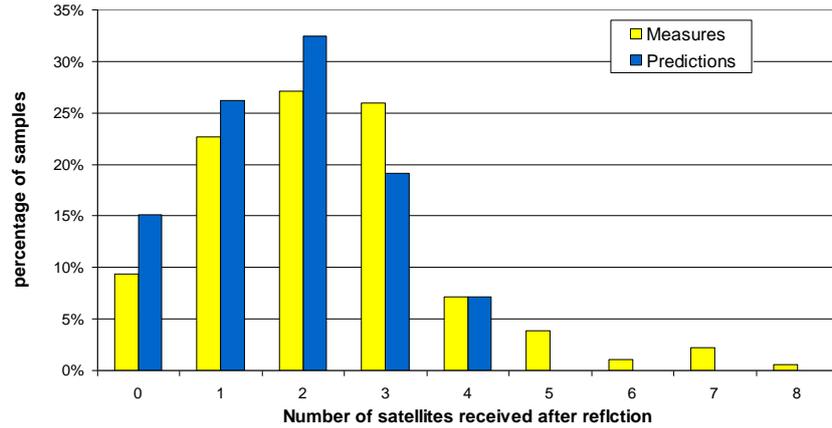


Figure 30. Comparaison du nombre de satellites reçus après réflexion prédits avec PREDISSAT et mesurés [CI65].

Pour valider les performances de la prédiction, les états de réception estimés à partir de rapports CNO ont été comparés aux états fournis par l'image [J10]. Le seuil de C/NO a été fixé à partir des distributions empiriques présentées figure 7 à 40 dB.

Le long d'un trajet à Lille, la comparaison sous forme de fonction de répartition des mesures (courbe grise) avec la prédiction (courbe noire) sur une portion de trajet de 3 min 26 secondes montre de bonnes correspondances sur la figure 31. Les erreurs résiduelles sont principalement imputées à une imprécision du traitement d'images en certains points et aux caractéristiques dynamiques du récepteur non implantées dans l'outil (qui considère les points indépendants les uns des autres).

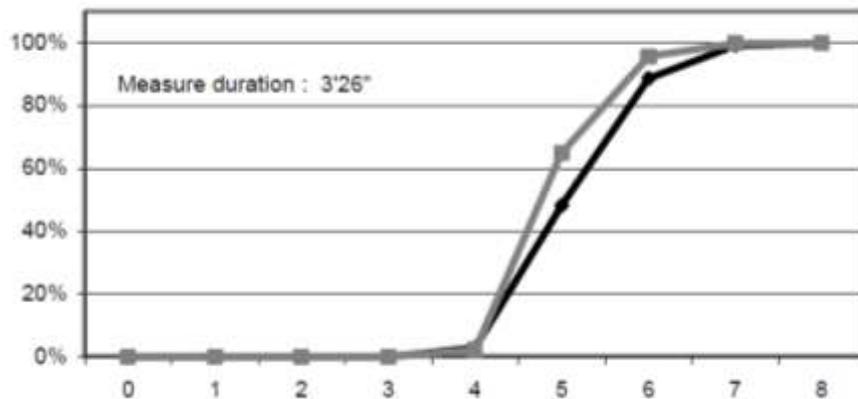


Figure 31. Fonctions de répartition des nombres de satellites prévus (en noir) et effectivement reçus (en gris) sur une portion de trajectoire.

Dans un deuxième temps (2006) [CI55], le système vidéo a été remplacé par une caméra à objectif fish-eye (figure 32), d'acquisition également synchronisée avec le capteur odométrique, afin d'obtenir, en tout point de la trajectoire, une vision à 360° des obstacles autour de l'antenne. L'avantage de ce capteur est la lecture directe des élévations des masques dans chacune des directions autour de l'antenne sans passer par l'étape de stéréovision qui induit un certain nombre d'erreurs. L'inconvénient majeur est la déformation forte de l'image par le capteur qui nécessite une phase de calibrage. De plus, nous n'appliquons pas de procédé de stéréovision sur cette image et ne disposons donc pas des informations géométriques en 3D qui nous permettent d'évaluer les satellites reçus après réflexion.

La figure 32 présente le dispositif d'acquisition développé par Amaury Flancquart. Par la suite, les travaux de Cyril Meurie (Leost) et la thèse de Dhouha Attia (2013) qu'il a encadré ont permis de détecter la ligne d'horizon en temps réel sur les images fish-eyes visible sur la figure 33 [J6].



Figure 32. Dispositif expérimental PREDISSAT composé des deux générations de systèmes d'acquisitions d'image et d'une antenne GNSS.

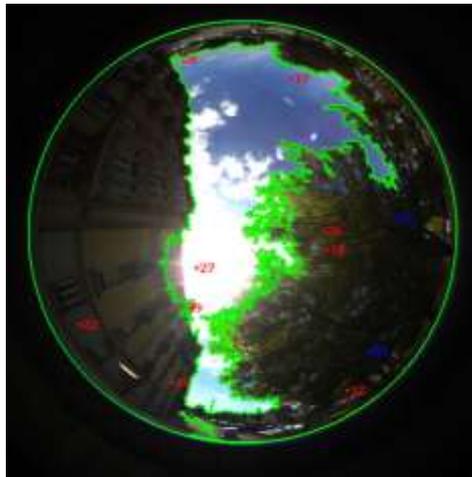


Figure 33. Détection ciel/non-ciel sur une image fish-eye.

Applications

PREDISSAT a été, alors, appliqué dans trois projets principalement :

- le projet **LOCOPROL** du 5^{ème} PCRD, dont le but était de développer un nouveau système de contrôle-commande ferroviaire, sûr et de faible coût, fondé sur l'utilisation du satellite pour sa fonction de localisation ; est visée ce faisant l'application aux lignes à faible densité de trafic (Simsky et al. 2004)[CI55; CI60; 62-63][R28, R30].
PREDISSAT a été utilisé dans deux campagnes de mesures : une première sur une ligne belge autour de Gembloux avec le système des deux caméras ; une deuxième sur la ligne Nice-Digne avec l'objectif fish-eye.
- le projet **TESS** (2005) qui se proposait de montrer dans quelle mesure il était possible de développer des services innovants, en mobilité et dans le cadre des transports terrestres, grâce à des moyens de communication et de navigation par satellite [R27][C5][CI58, 61].
- Le projet **ANGO**. ANGO visait à équiper les bus à guidage optique déployés sur la ligne Est-Ouest de Rouen de système d'assistance à la conduite longitudinale. L'intérêt de diffuser une consigne de vitesse au conducteur était de réduire de 20% sa consommation de carburant en limitant accélérations et freinage. Dans le projet, nous avons cartographié les performances GNSS le long de la ligne. PREDISSAT a en particulier été utilisé pour simuler la disponibilité la

plus faible (le nombre de satellites reçus) le long de la ligne, quelle que soit l'heure du passage du bus (figure 36) [R20-23][CI45, 49, 53].



Figure 34. Nombre de satellites minimal reçus par le bus ANGO lors d'un trajet, quelle que soit l'heure de son passage, d'après PREDISSAT [CI53].

Dans la zone montagneuse de la zone de test **LOCOPROL** Nice-Digne, la caméra à objectif fish-eye a offert tout son intérêt : la représentation en canyon urbain n'étant pas adaptée à cet environnement. Les résultats présentés dans [CI60] ont montré que l'outil pouvait permettre, par exemple, d'identifier le nombre de satellites réfléchis parmi les satellites reçus ou encore de déterminer, grâce à une chaîne de Markov à 3 états, la probabilité de passage d'un satellite d'un état à un autre. La figure 35 représente la chaîne de Markov, avec 3 états : direct, bloqué et alterné (soit, reçu après réflexion). P_i représente la probabilité que l'état du satellite à $t+1$ reste dans l'état i ; P_{ij} probabilité de transition quantifie la probabilité que l'état change de i à j .

$$P_{ij} = P(X_{k+1} = j | X_k = i) \quad (\text{Eq. 9})$$

Dans [CI55], l'outil a servi à quantifier la visibilité de satellites et en particulier la continuité de réception (figure 36). La continuité de la réception des satellites géostationnaires EGNOS est en effet une condition pour recevoir ses messages les plus longs. Si les messages liés à l'intégrité (use/don't use) durent 5 secondes, les messages requis pour la correction de la mesure de pseudo-distance nécessitent 360 secondes.

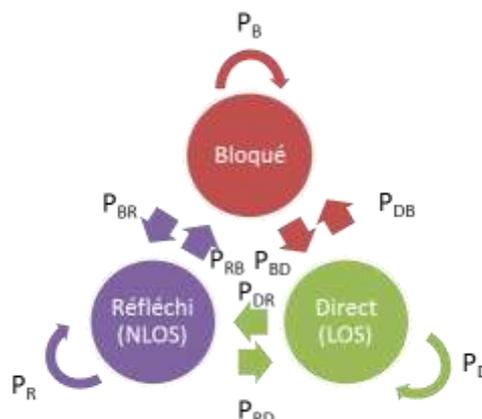


Figure 35. Evolution de l'état de réception sous forme de chaîne de Markov à 3 états.

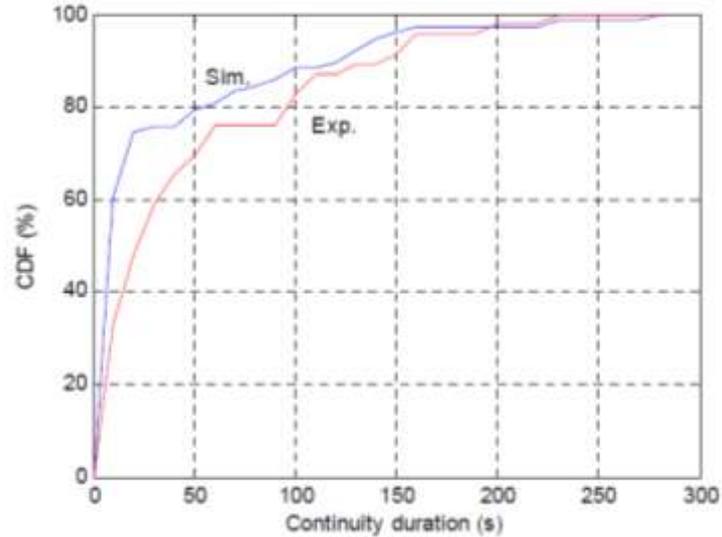


Figure 36. Fonction de répartition de la continuité de réception du satellite ARTEMIS le long d'un trajet ferroviaire de 40km, en prédiction (courbe bleue) et mesurée (courbe rouge) [CI55].

P_B	P_R	P_D	P_{BR}	P_{RD}	P_{RB}	P_{DR}	P_{BD}	P_{DB}
32,4%	25,0%	36,6%	1,4%	1,4%	1,5%	1,4%	0,3%	0,2%

Table 1. Exemple de probabilités obtenues pour un satellite le long d'un trajet de train Gembloux-Jemeppe sur Sambre, Belgique, dans le cadre de LOCOPROL [CI60].

En collaboration avec l'université technique de Braunschweig, nous avons porté le concept de plateformes de mesures pour l'évaluation et la validation de performances GNSS. Le système conjugait PREDISSAT avec les plateformes de mesures de références route et rails de TUBS (Carla & CaRail). Sans financement, le projet n'a pas vu le jour mais les principes ont été présentés dans [CI41, 51, 52].

La deuxième phase de développement du concept a été réalisée dans le cadre du projet CAPLOC.

b. L'apport de CAPLOC

CAPLOC a fait l'objet des articles TRC [J6], TEC [A1] et des conférences [CI3, 5, 11, 16-17]. Ce projet, que j'ai monté et piloté, est directement en lien avec les perspectives de ma thèse.

En 2009, dans la continuité du concept PREDISSAT et après l'expression, par ALSTOM, de besoins de précision pour les transports guidés urbains, nous avons initié le projet CAPLOC (Combinaison de l'Analyse d'images et de la connaissance de la Propagation des signaux pour la LOCALisation). CAPLOC a été retenu en 2010 par le GO2 du PREDIT et a été financé par la DRI (MEDDE) pour une période de 4 ans.

L'objectif de CAPLOC n'est plus de prédire la visibilité des satellites pour une information relative à la disponibilité de service mais d'utiliser la connaissance de l'état de réception des signaux satellitaires pour améliorer la précision de la localisation en prenant en charge les signaux réfléchis.

Dans CAPLOC (comme dans PREDISSAT), l'objectif n'est pas de se localiser par l'image mais d'utiliser l'image pour qualifier les performances de localisation d'un récepteur GNSS et les améliorer. L'approche reste donc originale par rapport aux approches de la littérature (Capelle 2008, Nogueira 2008, Royer 2004), dans lesquelles il est plus courant d'utiliser la vision artificielle pour localiser un

mobile dans son environnement de circulation en extrayant des amers visuels dans l'environnement du mobile.

Les travaux scientifiques du projet sont composés de 3 briques principales. Les deux premières sont liées au traitement d'images. Dans un premier temps, un algorithme de détection des régions de ciel et de non-ciel permet de déterminer les zones de l'espace à partir desquelles un satellite ne peut pas être reçu par trajet direct. Dans un second temps, il s'agit de calculer un modèle géométrique 3D de l'environnement de propagation des signaux qui, intégré à un logiciel de lancer de rayons, permettra de corriger les erreurs de pseudo-distance causées par les réflexions multiples.

La dernière brique concerne l'usage des informations apportées par ces traitements à des fins de localisation. Nous la présenterons dans le chapitre 4.

Sur le traitement d'image, je ne présente ici que les résultats, de façon synthétique, puisque les innovations sur ce sujet ne sont pas les miennes mais celles de Cyril Meurie, Douha Attia, Sébastien Ambellouis, Julien Moreau et Amaury Flancquart. Deux axes ont été poursuivis :

- Techniques de segmentation et de classification d'images fish-eye couleurs, comparées aux techniques de la littérature, permettant en temps réel, de détecter l'état de réception des signaux satellitaires reçus en fonction des obstacles rencontrés (bâtiment, végétation).
- Estimation de la structure 3D de l'environnement urbain à partir du traitement des images fournies par un système de perception mono et multi caméras fisheye. Positionnement du mobile relativement aux bâtiments pour estimer les retards dus aux réflexions multiples.

Traitement d'images fish-eye temps réel

Le traitement temps réel des images fish-eye développé par C. Meurie permet d'identifier l'état de réception de chacun des satellites reçus, par comparaison de leur position avec les obstacles environnants. Il permet également d'obtenir une empreinte des bâtiments, vue du sol. Cette idée est aussi appelée « building boundaries » dans certaines publications de l'University College of London (Wang 2013).

La figure 37 illustre les résultats de ces traitements sur des images acquises à Belfort dans le cadre du projet CAPLOC. Pour chacune des deux images acquises en mobilité et présentées sur cette figure (images de gauche), nous montrons la position des satellites dans l'image (images du milieu) ainsi que la détection de la ligne d'horizon (images de droite). En ce qui concerne, la position des satellites la zone bleue (respectivement marron) représente une zone de ciel (respectivement de non-ciel). Les satellites numérotés en vert sont reçus en direct (LOS). Ceux numérotés en bleu ou rouge ne sont pas reçus du tout ou reçus après réflexion (NLOS) [CI3]. Des détails sur les techniques de traitement des images sont donnés dans [J6][CI17][A1] ou dans la thèse de Dhouha Attia.

J'ai reçu le prix de l'ATEC ITS pour sa présentation lors du congrès ATEXPO de 2013 [ST11].

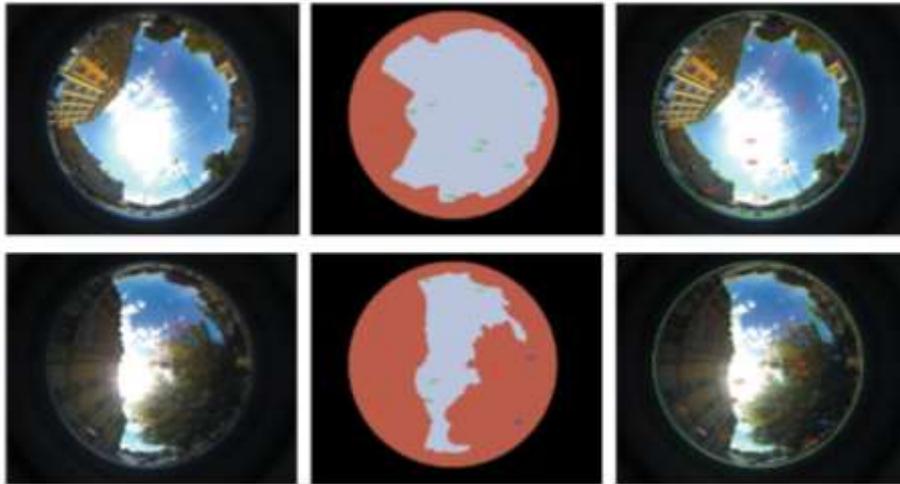


Figure 37. Traitement des images fish-eye et détection de la ligne d'horizon (« building boundary ») [C13].

Satloc

Plus récemment (2012), les masquages extraits du traitement d'images fish-eye ont été exploités dans le projet **Satloc** [C19], afin de fournir un masque réel au simulateur de signaux Spirent tel qu'illustré figure 39 [C17]. Le graphe d'élévation du masque extrait de l'image a été converti en matrice de visibilité comme représenté sur la figure 38 dans le simulateur de signaux.

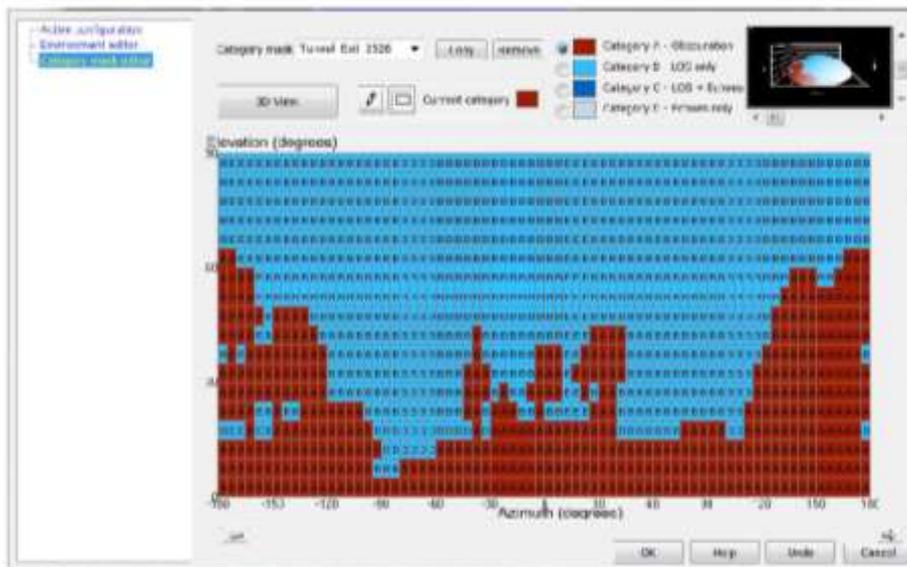


Figure 38. Modèle de masquage initié dans le simulateur Spirent à partir de données issues du traitement d'images de Predissat [C17].

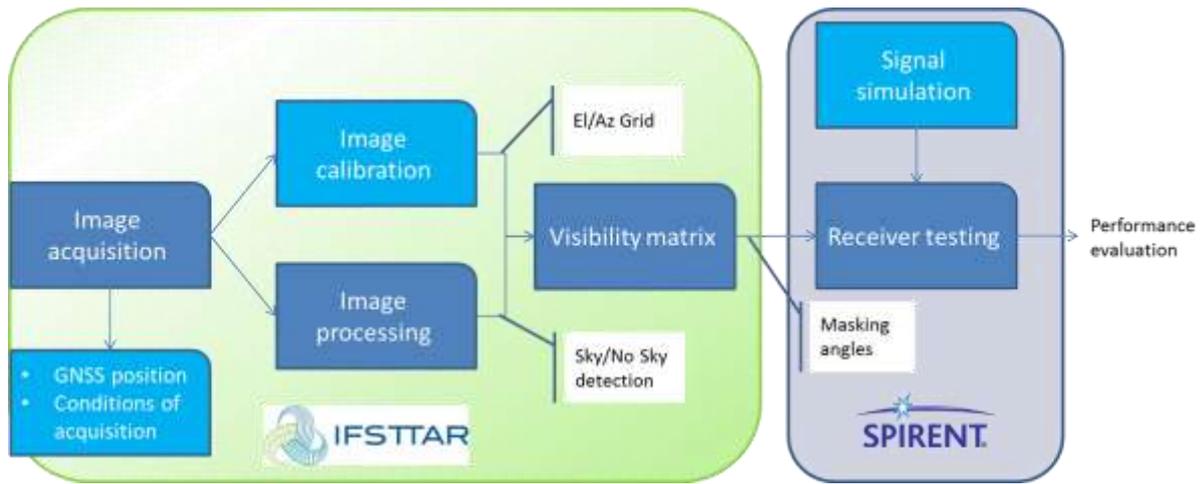


Figure 39. Représentation schématique du procédé d'évaluation des performances développé pour le projet Satloc avec Spirent.

4 Connaître et modéliser les erreurs pour améliorer la précision de localisation

Si l'objectif initial des procédés d'analyse de l'environnement était de déterminer et prédire la disponibilité de la localisation par satellite, il est rapidement devenu évident d'utiliser cette connaissance pour l'amélioration des performances GNSS et en particulier de la précision. La suite des travaux de PREDISSAT a donc conduit à étudier l'apport de la connaissance de l'état de réception des signaux reçus.

Dans une deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons une approche statistique visant à estimer ces états et leurs erreurs associées sans l'utilisation d'une caméra.

a. Utilisation de la connaissance de l'état de réception des signaux GNSS

Une base de données embarquée pour prédire les performances

La vocation première de PREDISSAT est de prédire, le long d'une trajectoire connue, la disponibilité satellitaire, et donc, pour une trajectoire de construire une base de donnée contenant ces informations de disponibilité pour, si besoin, anticiper les zones non couvertes.

Lorsque ces zones sont récurrentes, l'utilisation de capteurs supplémentaires et ponctuels peut être envisagée, comme dans le cadre du projet ANGO, avec des capteurs de type RFID.

Dans le cadre du projet ANGO, nous avons également caractérisé la ligne en précision, à partir de données de mesures et de simulation par tracé de rayons (Ergospace) afin d'avertir l'utilisateur d'une certaine confiance dans sa position (ou non).

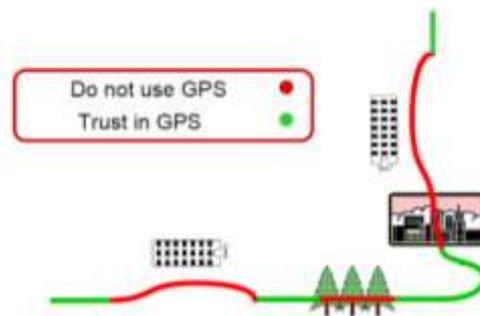


Figure 40. Principe de fonctionnement d'une base de données de confiance le long d'une trajectoire connue (exemple d'une ligne de bus ANGO).

J'ai proposé l'idée d'une base de données embarquée dès 2003 [CI63] puis en 2004 [CI60]. La figure 41 illustre ainsi qu'une base de données contenant les informations des états de réception des satellites GNSS pourra orienter un algorithme de navigation et permettre ainsi une information de position plus précise et plus fiable. Dans ces travaux, la position des satellites était issue de simulations réalisées avec le logiciel STK, que nous n'utilisons plus aujourd'hui.

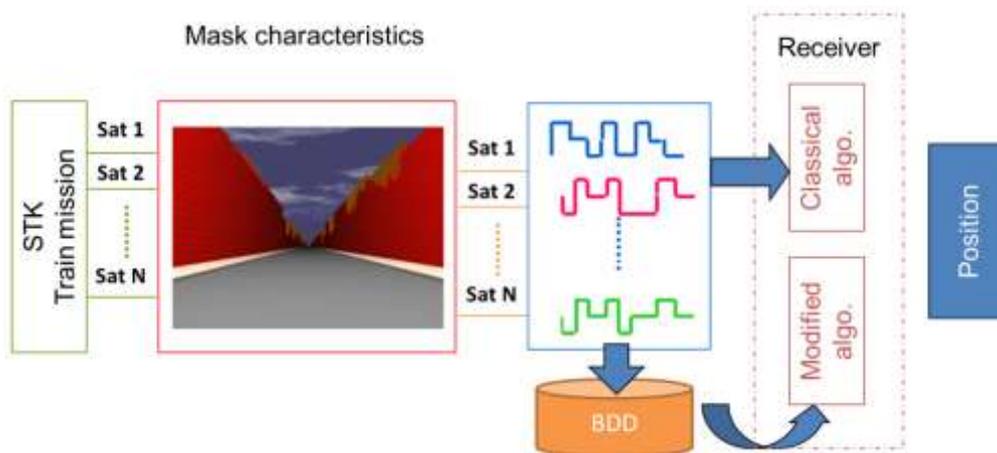


Figure 41. Représentation du concept d'utilisation d'une « look-up table » pour l'amélioration des performances de localisation [ST33].

Même si le stockage des informations dans un format « base de données » n'a pas été exploité (une expérience a cependant été mise en œuvre avec la base de données de la société BeNomad en 2006 avec le stage d'Emilie Masson), c'est cette approche qui a été poursuivie dans le projet CAPLOC et les techniques présentées ci-dessous. Nous reviendrons cependant sur cette idée de base de données embarquée dans les perspectives. Cette idée revient en effet dans les propositions récentes publiées dans (Niehoefer 2016), dans le dispositif KAPILLARA développé par Thales Avionics ou encore dans les pistes évoquées par le projet européen Rhinos.

Dans le projet CAPLOC présenté dans le chapitre 3, la connaissance de l'état de réception de chacun des satellites reçu (LOS ou NLOS) le long d'un trajet est déterminé de façon déterministe, soit en temps réel, soit pour un traitement différé. Dans le cadre de la tâche de localisation du projet CAPLOC, nous avons utilisé cette connaissance pour deux travaux principaux :

- L'exclusion des satellites identifiés comme NLOS
- La pondération des satellites NLOS pour limiter leur impact tout en préservant la disponibilité de service.

Ces deux solutions sont présentées dans la suite de cette section.

Exclusion des satellites NLOS

Ce travail a fait l'objet du dernier chapitre de la thèse de Dhouha Attia. J'ai co-encadré la partie de son travail de thèse relative à la localisation. Les travaux de Dhouha Attia ont fait l'objet d'un article en revue [J6], de 3 conférences internationales [CI19, 23, 27], d'une conférence nationale [CN3] et ont été intégrés dans les résultats du projet CAPLOC [R6, R8].

La contribution principale de la thèse de Dhouha Attia porte sur le traitement d'images fish-eye temps réel. Il permet d'exclure les satellites se trouvant dans les régions « non-ciel » des images fish-eyes afin d'éliminer toutes sources de trajets réfléchis. La théorie est simple : les pseudo-distances brutes de chacun des satellites reçus sont enregistrées (elles sont fournies par certains récepteurs). La position de chacun des satellites (azimut, élévation) est comparée à l'image afin de déterminer si ce satellite émet depuis une région ciel ou non-ciel. Un filtre de Kalman étendu (EKF) exploite les pseudo-distances des satellites LOS uniquement.

Cette théorie a été appliquée sur une base de données images et GPS enregistrées le long d'un trajet dans Belfort. Un récepteur RTK sert de référence. La trajectoire de référence est composée de 171 points RTK et 71 points GPS sont obtenus. La trajectoire entière est formée de deux portions quasiment perpendiculaires reliées par un virage. La première ligne droite du trajet est longue d'environ 81 mètres et comprend 32 points de mesure, soit une vitesse moyenne inférieure à 10 km/heure, qui commence par un temps d'arrêt identifiable parce qu'il forme un amas de points.

Sur la deuxième ligne droite, on compte 166 mètres et 26 points soit une vitesse moyenne de 23 km/heure.

Plusieurs images peuvent être disponibles pour un même point GPS puisque la fréquence d'acquisition des caméras est plus importante que celle du récepteur. Nous montrons sur la figure 42, les résultats obtenus lorsque la première image de chaque instant t est utilisée pour la classification des satellites.

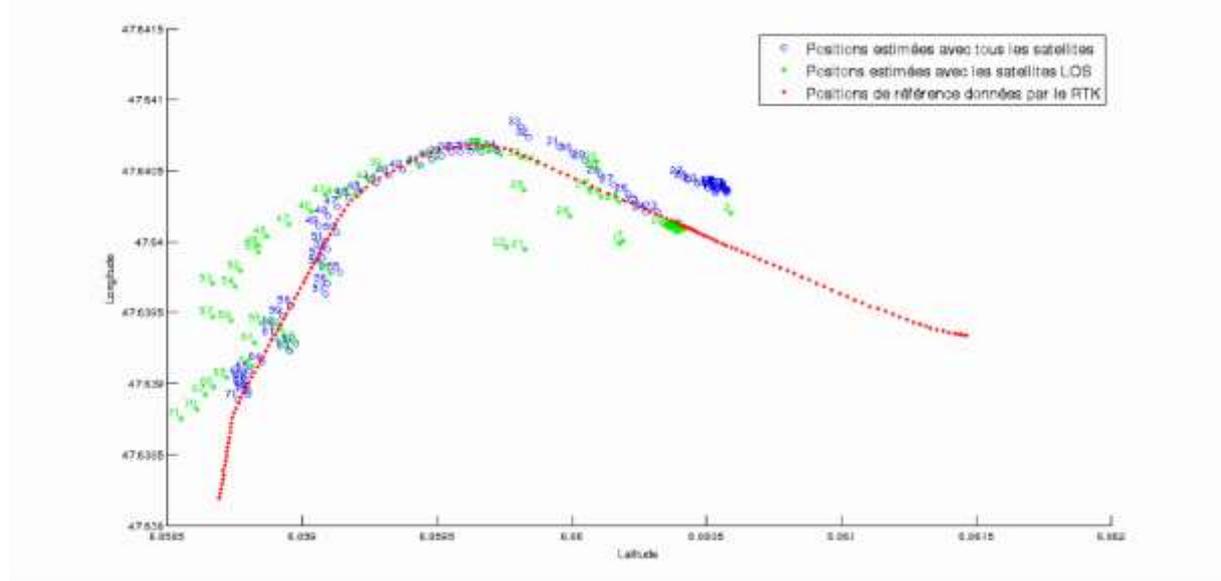


Figure 42. Trajectoires obtenues avec et sans les satellites NLOS pour le calcul des positions.

Les résultats ont montré que l'exclusion améliorait la précision sur la première moitié du trajet ainsi que dans le virage où les positions estimées sont visiblement plus proches de la trajectoire de référence. Entre les points 1 et 45 (sortie de virage), l'erreur moyenne est divisée par 2,25 grâce à l'exclusion. Dans la deuxième partie de la trajectoire (la fin de courbe verte), par contre, la géométrie des satellites restant est fortement dégradée par l'exclusion (l'erreur moyenne de localisation est multipliée par 4 entre les points 46 et 71 après l'exclusion). Cette configuration montre les limites de notre stratégie : les satellites disponibles, même s'ils sont reçus par trajet direct, ne sont pas disposés de façon optimale et la position est plus imprécise que lorsque tous les satellites sont utilisés.

Pour appliquer chaque stratégie de façon optimale, l'approche choisie a finalement consisté à alterner entre les deux solutions, c'est-à-dire à choisir la politique d'exclusion des satellites NLOS lorsque le DOP reste suffisamment bon (soit inférieur à un seuil choisi empiriquement - ici 3) et à garder tous les satellites dans le cas contraire. Ces résultats sont visibles sur la vue aérienne de la figure 43 et sont résumés dans le tableau 2.

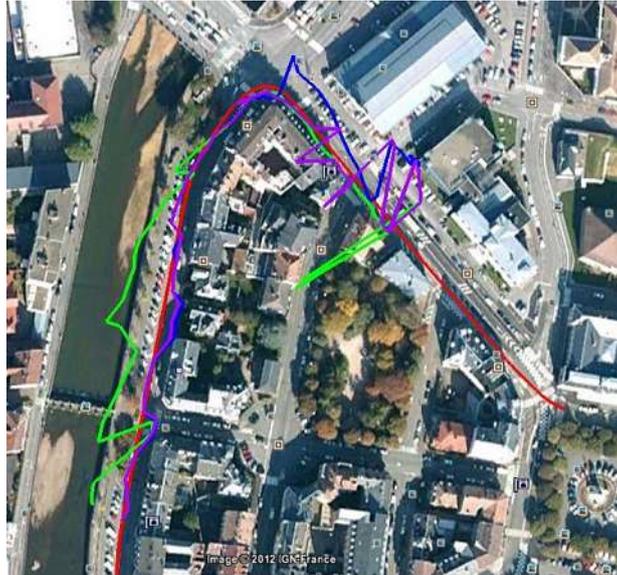


Figure 43. Vue aérienne (Google Earth) des trajectoires obtenues avec les trois solutions (en rouge : la référence, en bleu : tous les satellites utilisés, en vert : les satellites LOS uniquement, en violet : la solution combinée).

Tableau 2. Performance des différentes approches de calcul de position proposées sur le principe d'exclusion.

Stratégies	Mesures d'erreur (m)		
	Moyenne	Maximale	écart type
Tous les satellites	13.13	33.07	12.75
Tri de satellites LOS	10.5	59.23	12.14
Seuillage du DOP	5.73	32.92	7.66

De nouvelles équipes se sont récemment emparées du concept : L'équipe PLAN de l'Université de Calgary (Gakne 2015), l'université de science et technologie marine de Tokyo (Suzuki, 2014) et l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile)(Sanromà Sánchez 2016) ont récemment implémenté et testé notre concept à partir d'autres algorithmes de segmentation d'images. On notera encore les travaux de l'université de Nottingham dans le projet Rhinos, qui utilise l'image dans l'objectif de modéliser l'environnement ferroviaire (Roberts 2016). L'objectif de (Gakne 2015) est de rendre la segmentation plus robuste aux conditions météorologiques. L'impact sur l'exclusion de tous les satellites NLOS dans une résolution par moindres carrés a été mesuré dans un contexte de multitrajet sévère. Leurs résultats ont montré une amélioration de 78% de la valeur moyenne quadratique (RMS - Root Mean Square) des résidus, soit une précision de 19,5 m au lieu de 89,4 m avec tous les satellites.

La proposition de (Suzuki, 2014) segmente l'image fish-eye en zones « superpixels ». La méthode d'identification du ciel est un peu laborieuse : un modèle d'observation du rapport signal sur bruit est calculé a priori à partir de mesures réalisées à ciel ouvert, en fonction de l'élévation du satellite. Pour localiser la zone ciel, les auteurs repèrent un satellite à fort SNR. Ce satellite, classé visible, est localisé dans l'image pour identifier la zone ciel. L'amélioration de la localisation par exclusion est appliquée à un système RTK fusionné avec une solution inertielle. La solution est améliorée de 58,9 à 61,2 % selon les auteurs avec un écart-type de l'erreur de 0,22 m. (Sanromà Sánchez 2016) ajoute une hybridation avec des capteurs inertiels.

Enfin, l'extension de la disponibilité des cartographies 3D via Google Earth notamment conduit certaines de ces équipes à explorer le potentiel de ces outils pour la détection des signaux réfléchis et leur exclusion (Suzuki 2015).

L'exclusion a montré des limites sur l'exemple de Belfort et augmente l'indisponibilité dans des zones urbaines déjà contraintes par l'environnement masquant. Pour limiter ces effets, un filtrage par moindres carrés pondérés a été mis en œuvre.

Pondération des satellites reçus

Ce travail fait l'objet de deux publications en conférences internationales avec Sarab Tay, post doc, [CI5 et 11] et d'une conférence nationale [CN1].

Les filtrages par Moindres Carrés Pondérés permettent d'éviter de dégrader la disponibilité de la localisation et de tirer profit d'un maximum d'observations disponibles tout en atténuant l'impact des mesures potentiellement dégradées sur le résultat final.

L'intérêt des moindres carrés pondérés est qu'il permet d'ajuster le poids apporté par chacun des signaux en fonction de la confiance qui leur est accordée (Gebre-Egziabher 2007). En effet, il est intéressant d'accorder un poids plus fort à une observation précise pour qu'elle contribue davantage à la solution calculée que des mesures imprécises (Wieser 2005).

L'objectif des moindres carrés est de résoudre une équation du type $A \cdot x = b$ qui n'a pas de solution exacte, où b est le vecteur d'observations (ici les pseudo-distances). Le nombre d'observations doit être supérieur ou égal au nombre d'inconnues (ici 4) qui correspond au nombre de satellites reçus. L'estimation de la position par la méthode des moindres carrés donnée par :

$$\Delta\hat{X} = (H^t \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot \Delta\rho \quad (\text{Eq. 10})$$

où $\Delta\hat{X}$ est la mise à jour de l'estimation de la position. H est la matrice d'observation et $\Delta\rho$ la mise à jour de la mesure.

Pondérer consiste à introduire un poids P dans l'équation 10, par exemple en utilisant l'inverse de la matrice de variance-covariance des observations. En pratique, cette matrice est inconnue. Il faut donc soit l'estimer en fonction des mesures ou d'un critère de confiance sur la mesure, soit la remplacer par un modèle.

Lorsque P est introduit dans l'équation 10, celle-ci devient :

$$\Delta\hat{X} = (H^t \cdot P \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot P \cdot \Delta\rho \quad (\text{Eq. 11})$$

où $P = \begin{pmatrix} w_1 & \dots & 0 \\ \vdots & w_i & \vdots \\ 0 & \dots & w_n \end{pmatrix}$ et où le poids est défini pour chaque satellite i par $w_i = 1/\sigma_i^2$.

Les modèles de la littérature utilisent différents critères de poids tels que l'élévation du satellite reçu avec un poids proportionnel à $1/(\sin \theta_i)^2$ (Wieser 2005) ou plus complexes $\sigma_i^2 = a + b \times \exp(-\theta_i/\theta_0)$ ou a et b sont des constantes du modèle (Groves 13). Certains auteurs, comme (Li 09), considèrent qu'un modèle utilisant le rapport C/N0 permet de prendre en compte autant l'élévation que les conditions de propagation et retiennent cette caractéristique uniquement. Le modèle Sigma- ϵ propose ainsi une valeur de $\sigma_i^2 = c^2 \times 10^{-CN0_i/10}$ où c est une constante du modèle.

Notre proposition est de combiner ces deux critères, CNO et élévation, avec la connaissance déterministe de l'état de réception de chaque satellite. Pour appuyer l'effet de l'élévation sur le

pois, nous gardons un facteur en $1/(\sin \theta_i)^2$. Un facteur k est ajouté qui varie selon que le satellite est reçu en direct ou non. La variance que nous proposons est ainsi écrite :

$$\sigma_i^2 = k \times \frac{10^{(-0,1 C/N0_i)}}{\sin(\theta)^2} \quad (\text{Eq. 12})$$

avec $k = 1$ lorsque le satellite est reçu en trajet direct et $k = 2$ sinon. Notons que la valeur de k a été déterminée de façon expérimentale.

Nous avons comparé notre modèle aux modèles de la littérature présentés ci-dessus :

- moindres carrés sans pondération,
- modèle d'élévation, $\sigma_i^2 = 1/(\sin \theta_i)^2$
- modèles d'élévation et Sigma- ϵ avec les paramètres de (Groves 2013)
- modèle d'élévation avec ses paramètres $a = 0$; 13 m, $b = 0$; 56 m, et $\Theta_0 = 0,1745$ rad,
- modèle Sigma- ϵ avec $c = 1,1 \cdot 10^4 \text{ m}^2$.

Notre modèle est appelé CNO/Élévation ou CAPLOC sur les figures qui suivent. Trois valeurs de k ont été testées et une seule conservée pour la suite des résultats. Les méthodes ont été évaluées sur la base de données de mesures à Belfort déjà utilisée pour l'exclusion. Les précisions obtenues sont comparées sur la figure 44 qui présente les résultats obtenus avec une résolution par moindres carrés classique (losanges bleus), et plusieurs solutions par moindres carrés pondérés utilisant le modèle d'élévation classique (croix roses), celui de Groves (ronds bleus ciel), le modèle Sigma ϵ (ronds roses), et notre proposition combinant état de réception, CNO et élévation (étoiles rouges). L'erreur est calculée par projection des points calculés sur la courbe de référence obtenue grâce aux mesures RTK.

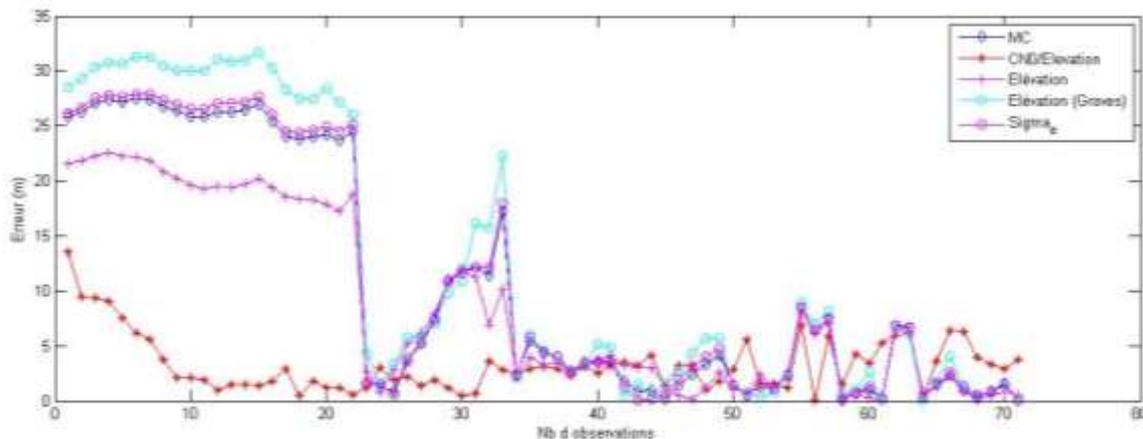


Figure 44. Précisions obtenues avec les méthodes des moindres carrés ordinaires, les pondérations par des modèles d'élévation, Sigma-epsilon et par notre modèle

Comme avec la technique d'exclusion, les résultats présentent deux phases différentes dans la mesure. La première période de mesure ($t = 0$ à 25 s) est une zone de démarrage, dans une zone fortement bruitée en raison de l'environnement de réception et de l'état statique du véhicule à $t = 0$. La deuxième partie de la trajectoire montre des erreurs inférieures à 10 m essentiellement, et correspondent typiquement à des erreurs obtenues avec un récepteur GPS en environnement urbain. Sur la première partie, les résultats diffèrent fortement selon les méthodes : l'erreur obtenue avec le modèle Sigma- ϵ oscille en effet autour de 30 m, contre 25 pour les moindres carrés classiques, 20 pour le modèle d'élévation et décroît très vite de 10 à quelques mètres avec notre méthode. Sur la deuxième partie de trajectoire les différences entre modèles sont moins visibles.

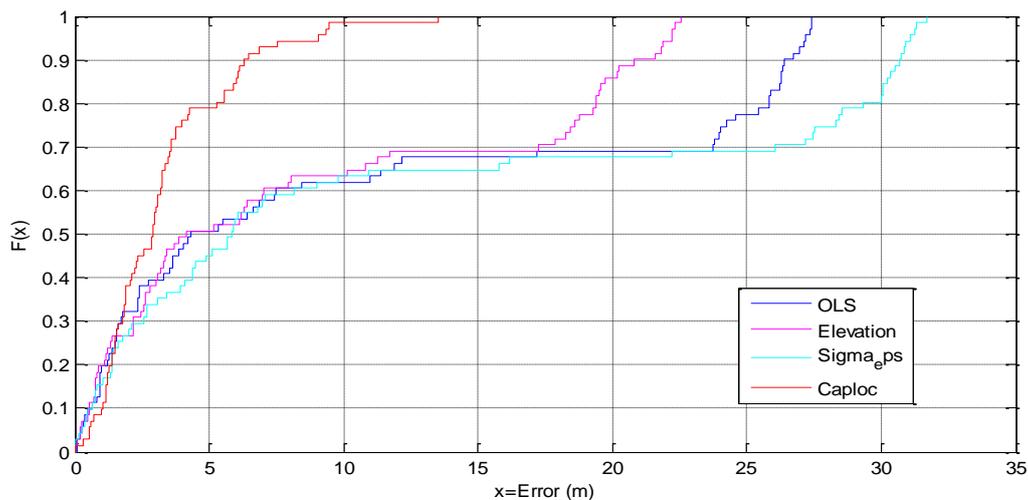


Figure 45. Comparaison des fonctions de répartition de l'erreur de position de 3 méthodes pondérées avec un moindres carrés classique : en rose, modèle pondéré par l'élévation, en bleu ciel, modèle sigma epsilon, en rouge la proposition CAPLOC.

La fonction de répartition de la figure 45 présente une visualisation du gain en précision. On constate que la méthode utilisant l'élévation en $(\sin \theta)^2$ réduit l'erreur moyenne de 8,59 m au lieu des 10,57 m avec la méthode des moindres carrés classique. Celle de (Groves 2013) ne modifie pratiquement pas les performances (erreur moyenne de 10,78 m). On peut en revanche s'interroger sur les performances obtenues avec la méthode Sigma- ϵ qui, telle qu'utilisée ici, dégrade les performances (12,22 m) et ce, quelles que soient les valeurs de c testées. Ces résultats montrent clairement l'intérêt de notre approche par rapport à la solution classique des moindres carrés avec une erreur moyenne de 3,28 m sur cette trajectoire.

La probabilité d'erreur au 90^{ème} percentile est de 6,34 m avec notre solution, et de 26,53 m avec la méthode des moindres carrés classique. Notons qu'avec le principe d'exclusion, on atteint une précision de l'ordre de 11 m.

Plus récemment, dans (Damy 2016) une nouvelle pondération est proposée. Le poids w_i tient compte de l'élévation du satellite reçu sat_{ei} et de la distance orthogonale entre la projection de la position du satellite dans le plan horizontal et la voie d , et du rapport CNO. La distance (projetée) d du satellite sur la voie est utilisée comme un indicateur de bonne visibilité. Un facteur $(1-d^2)$ donne du poids aux satellites proches de la voie, en considérant qu'ils seront moins affectés par les multitrajets. Il est accentué par un terme exponentiel. Il sera intéressant, à court terme, de confronter cette information à la donnée de visibilité obtenue par le traitement d'image. L'élévation du satellite est utilisée en facteur exponentiel également et vise à réduire le poids des satellites de faible élévation. Enfin, un coefficient C lié aux multitrajets est calculé à partir de la mesure de « code minus carrier » disponible avec un récepteur bi-fréquences.

Les solutions fondées sur la connaissance de l'environnement 3D

Avec le développement des modèles d'environnement 3D urbains, d'autres méthodes visent l'utilisation constructive de tous les signaux plutôt qu'une exclusion de satellites. Les publications relatives à la détection de satellites NLOS à l'aide de modèles d'environnements urbains en 3D se sont multipliées. (Groves 2011), (Bourdeau 2012), (Obst 2012) ou encore (Peyret 2011) ont publié en 2011-2012 des résultats montrant comment ces modèles peuvent également permettre de déterminer la présence ou non d'un trajet direct en comparant les positions des obstacles modélisés et les positions des satellites.

Ces méthodes sont aujourd'hui activement étudiées. Elles utilisent le modèle d'environnement 3D à différents niveaux.

(Obst 2012) utilise une carte 3D pour identifier, à partir d'une première estimation de la position donnée par GPS et avec la connaissance de la position des obstacles autour de ce point, les signaux reçus après réflexion et les exclure de la solution de navigation.

Groves défend une approche appelée « Shadow matching » qui consiste à comparer les états de réception prédits en un point aux observations réelles (Groves 2011) grâce à un modèle d'environnement 3D.

L'utilisation du modèle 3D permet de classer les signaux à recevoir en LOS et NLOS. Une grille de positions candidates est générée autour de la position estimée et le processus recherche parmi ces candidats la meilleure adéquation avec la prédiction. Cette approche repose donc sur une phase de préparation hors ligne de prédiction et la définition d'un seuil empirique de CNO destiné à séparer les états LOS et NLOS dans la phase expérimentale. Cette solution améliore essentiellement le positionnement latéral. L'approche « shadow matching » a été poursuivie récemment par (Irish 2015) qui traite le problème dans un cadre Bayésien (probabiliste plutôt que déterministe).

(Bourdeau 2012) utilise la carte comme une information utilisable dans l'étape de filtrage. Le concept appelé 3D AEKF (Augmented-Extended Kalman Filter) détermine par simulation l'état de réception des différents signaux. L'outil utilisé pour cette prédiction est le logiciel de tracé de rayon SE-NAV, que nous avons également utilisé dans d'autres travaux. Le tracé de rayons permet de calculer le retard issu du satellite reçu après réflexion. La correction de l'erreur de pseudo-distance engendrée par la réflexion est effectuée dans le modèle de mesure et sa matrice Jacobienne lorsqu'un état NLOS apparaît. Ce concept nécessite donc une simulation a priori de la trajectoire.

Enfin (Bétaille 2013) propose la solution la plus proche du concept CAPLOC et de son modèle 3D dans le projet INTURB. Une base de données topographique est utilisée pour extraire les caractéristiques géométriques d'une rue. Ces données sont moyennées afin de transformer les obstacles parfois hétérogènes le long d'une rue en une « tranchée » de hauteur de bâtiments moyenne et de largeur moyenne. La connaissance de la rue et de la position du satellite permettent aux auteurs d'affecter des probabilités de retards causés par une ou plusieurs réflexions. Les mesures issues des satellites NLOS sont ainsi corrigées et intégrées au calcul de la position lorsque le nombre de satellites directs est insuffisant.

Dans le projet CAPLOC, l'utilisation d'un modèle 3D a été abordée. Le système stéréoscopique développé par Julien Moreau encadré par Sébastien Ambellouis permet de créer un nuage de points 3D représentant les obstacles (figure 46), suivi d'une étape de détection des façades.



Figure 46. Nuage de points 3D [C13].

La thèse de Julien Moreau a conclu qu'il était possible de construire à partir de cette technique des modèles à échelle réelle avec une précision estimée entre 1 et 2 mètres. Son utilisation pour l'estimation de l'erreur de pseudo-distance et sa correction a été réalisée sur points fixes en considérant que jusqu'à 3 réflexions pour un même signal. Sur ces points fixes, l'erreur a été réduite de moitié : de 12 m à 6 m. La mise en œuvre dynamique, par contre, reste à réaliser.

Nous avons comparé les avantages et inconvénients de l'utilisation d'un modèle par rapport au traitement d'image embarqué :

- La méthode CAPLOC est plus complexe à mettre en œuvre. En effet, il s'agit d'acquérir et d'analyser les images autour de l'antenne mais l'approche apporte une vision réelle des alentours. Par contre les modèles doivent être mis à jour : les structures peuvent changer temporairement ou définitivement alors que la vidéo permet d'avoir une vue toujours à jour.
- Dans INTURB, les détails offerts par le modèle ont été volontairement simplifiés puisque la géométrie des obstacles a été moyennée de façon à représenter les rues en tranchées homogènes et infinies et le masque en « ballon de rugby », qui se rapproche alors du masque fourni par l'exploitation directe de l'image fish-eye. C'est également ce vers quoi l'équipe de l'UCL revient pour leur technique de shadow matching en faisant l'extraction d'empreinte des bâtiments à partir de modèles 3D. Le modèle d'une ville représente un volume conséquent de données à stocker (offline) et/ou transférer (online). Avec un traitement temps réel, le stockage peut se contenter de contenir les quelques secondes précédant la mesure uniquement.
- Dans CAPLOC les masques ont été extraits et utilisés avec leurs variations à 360°. Il n'y a pas avec CAPLOC, contrairement aux solutions avec modèles, à traiter le problème de l'initialisation, c'est-à-dire de la détermination, par map-matching, de la rue dans laquelle on circule effectivement.

Apports complémentaires de la carte et de l'image pour la localisation en milieu urbain [R4]

En collaboration avec David Bétaille, Geoloc

CAPLOC et INTURB ont démarré respectivement en 2010 et 2011 dans deux équipes aujourd'hui réunies au sein de l'Ifsttar mais à cette période dans deux instituts séparés l'INRETS et le LCPC. Les objectifs de ces deux études sont proches : améliorer la précision de la localisation d'un véhicule en

environnement urbain, et plus particulièrement en canyon ou tranchée urbain(e) et si possible assurer l'intégrité de cette localisation, c'est-à-dire garantir un niveau de confiance dans le calcul.

Les deux projets partent de la connaissance de l'environnement de propagation mais avec deux sources d'information différentes : la vision pour CAPLOC et une base de données topographique pour INTURB. La vision apporte une certaine complexité à CAPLOC puisqu'il s'agit d'acquérir et d'analyser les images autour de l'antenne mais apporte une vision réelle et directe des alentours.

L'usage des informations d'environnement n'est pas exactement le même dans les deux approches : CAPLOC a essentiellement proposé une détection de l'état de réception des signaux GNSS et l'utilisation de cet état dans des algorithmes d'exclusion et de pondération. INTURB calcule le retard causé par les réflexions dans la tranchée et corrige les pseudo-distances mesurées avec les estimations des retards.

Dans les deux approches la précision est considérablement améliorée. Dans le cadre d'INTURB, un calcul d'intégrité a également été proposé.

Des perspectives à ces travaux sont identifiées sur plusieurs sujets :

- Comme évoqué en conclusion d'INTURB, la complémentarité entre l'information fournie par la cartographie numérique et la vision est une première piste. Au moment du développement de CAPLOC, les modèles 3D étaient très peu disponibles. C'est une des raisons du choix de la vision. Aujourd'hui, ces modèles se démocratisent et ne sont pas forcément redondants avec la connaissance vidéo. On notera par exemple que la vidéo peut permettre le recalage dans le modèle ou la mise à jour d'un modèle.
- Dans la suite des premiers travaux sur l'intégrité, la thèse de Ni ZHU, co-encadrée par le LEOST et GEOLOC explore les différentes solutions de calcul de l'intégrité de ces nouvelles solutions de localisation en urbain.
- Enfin, à plus long terme, il s'agira de tirer pleinement parti de la richesse des modèles 3D embarqués ou reconstitués (aujourd'hui réduit à des modèles de type tranchée urbaine pour faciliter les calculs).

Enfin, puisque les terrains expérimentaux des deux solutions sont bien distincts, il s'agira de confronter les algorithmes sur les mêmes jeux de données.

b. De l'état de réception aux retards de pseudo-distances

Les travaux visant la modélisation des états de réception et des erreurs de pseudo-distances associées ont été réalisés dans le cadre des thèses de Fleury Nahimana, Nicolas Viandier et le post-doc d'Asma Rabaoui, en collaboration avec Emmanuel Duflos, Professeur à L'Ecole Centrale de Lille et au sein du projet NAPVURA du programme CPER 2013-2015 CISIT.

Ces travaux ont fait l'objet de deux mémoires de thèses, de deux articles de revues [J7] et [J8] et de 14 articles de conférences.

L'utilisation de PREDISSAT en environnement masquant nous a permis d'affiner des méthodes d'analyse des performances des systèmes satellitaires dans les environnements contraints. L'outil apporte une information sur les états de réception des signaux satellitaires et nous a permis de proposer des solutions pour l'optimisation des signaux reçus.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux erreurs de pseudo-distances associées aux conditions de réception des signaux.

Comme décrit dans le chapitre 2, les erreurs liées à l'environnement sont directement dépendantes de la configuration de la scène autour de l'antenne. Selon la configuration, le nombre de satellites reçus varie, leurs positions autour de l'antenne aussi, tout comme la distribution des retards causés par les trajets multiples.

Dans mes travaux de thèse présentés dans le chapitre 3, j'ai pu mettre en évidence et démontrer théoriquement et expérimentalement le phénomène appelé « alternate path » ou NLOS, c'est-à-dire le cas où un signal est reçu sans trajet direct mais après une réflexion [A7, CI63]. Ce cas est l'état de

réception le plus critique. Dans l'environnement transport, le problème du multitrajet et des satellites NLOS est considéré comme le poste d'erreur dominant. C'est pourquoi nous étudions l'impact de ces trajets réfléchis et donc de l'environnement sur les performances de localisation et notamment sur la précision de localisation.

Avec l'importance croissante de la notion d'intégrité dans les prochaines applications transport, le besoin de caractériser cette erreur pour la borner notamment est de plus en plus souvent adressé. L'impact du canal de propagation est visible à plusieurs niveaux dans la chaîne de traitement des signaux GNSS. Comme représenté sur la figure 47, les distributions des erreurs peuvent être observées à la sortie du bloc de traitement du signal (on observe alors les erreurs de pseudo-distances) ou à la sortie du filtre d'estimation PVT (on observe alors les erreurs de position). **J'ai concentré mes travaux sur l'étude de l'erreur de pseudo-distance causée par les réflexions (NLOS).**

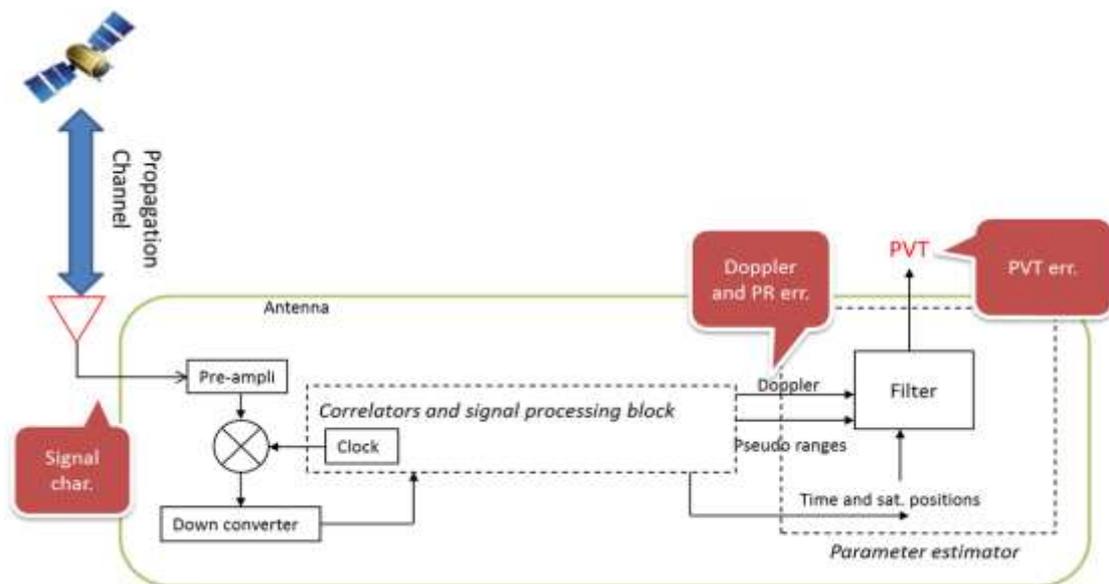


Figure 47. Propagation du signal et son traitement.

Etat de l'art modèles d'erreur de pseudo-distance causées par la propagation en urbain

A l'exception du modèle d'erreur lié aux signaux LOS, il existe peu de modèles d'erreurs, généralisés et affectés à un environnement type.

Dans le cas d'un signal reçu en trajet direct, on admet communément que la distribution des erreurs de pseudo-distance, après correction des principales sources d'erreur (en particulier des retards atmosphériques) est un bruit blanc Gaussien. (Wieser 2005) a, dans cet objectif, collecté des données de mesure afin de tracer cette distribution pour un environnement à ciel ouvert. Après différents post traitements, comprenant la détection d'observations aberrantes, la correction des orbites et des retards ionosphériques et troposphériques, les résidus sont supposés ne contenir que le biais d'horloge et l'erreur de dérive. La distribution empirique obtenue est représentée sur la figure 48, et montre que la majorité des erreurs sont inférieures à 10 m.

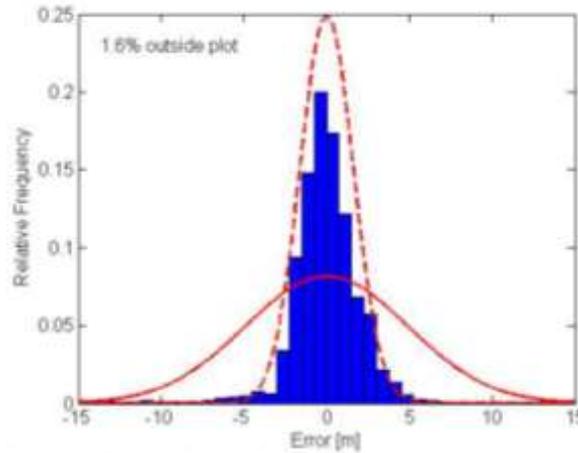


Figure 48. Histogramme des erreurs de pseudo-distances (6 heures de mesure sur un site statique avec faibles multitrajets, récepteur haute sensibilité). Deux modèles sont représentés : une loi normale et une loi robuste (Wieser 2005).

Pour la réception en environnement urbain, les seuls modèles issus des modèles de canaux satellitaires (LMS – Land Mobile Satellite) décrits dans le chapitre 2 proposent des modèles d’atténuation ou des réponses impulsionnelles mais pas de modèles d’erreur.

A partir de mesures réalisées avec un récepteur haute sensibilité, (Wieser 2005) a proposé un modèle d’erreurs de pseudo-distances. Il a appliqué les orbites précises de l’IGS (International GNSS Service), les corrections ionosphériques de Klobuchar et les modèles troposphériques de Saastamoinen pour éliminer les principales erreurs connues et a extrait des résidus principalement affectés par les biais dus aux multitrajets. Wieser a testé trois modèles de variance : “the equal-variance model” qui considère une loi normale ; un modèle de variance fonction de l’élévation du satellite reçu et le modèle “SIGMA- ϵ ” utilisant la valeur du CNO tel que proposé par (Hartinger 1999) pour l’observation de mesures de phase GPS. Dans un environnement fortement affecté par les multitrajets, (Wieser 2005) a montré que 80 à 90 % des observations étaient contenues dans la distribution SIGMA- ϵ .

Le modèle utilisé pour la variance du bruit affectant la distance est le suivant :

$$\sigma^2 = C \cdot 10^{-\frac{C/N_0}{10}} \quad (\text{Eq. 13})$$

où le paramètre C dépend du récepteur et de l’antenne utilisés mais est indépendant de l’environnement. On notera que 10 à 20% des erreurs de pseudo-distances ne sont pas modélisées correctement, en particulier en cas de satellites reçus après réflexion.

L’équipe GEOLoc a proposé des distributions d’erreurs mesurées dans quelques configurations d’environnement (Bétaille 2015) mais pas de modèle.

Pour estimer les retards liés à la propagation des signaux réfléchis, nous avons travaillé en considérant deux approches : l’approche déterministe et l’approche statistique.

c. Connaissance déterministe des retards

Pour connaître les trajets reçus par un récepteur situé dans un canyon urbain de façon déterministe, nous disposons d’outils de « lancer de rayons ».

En 2005, dans le cadre du stage de Thomas Tirtaine, nous avons évalué expérimentalement les résultats fournis par le logiciel ERGOSPACE [A4] : nombre de satellites visibles et état de réception des satellites. Dans cette étude, nous avons montré que, globalement le nombre de satellites visibles

était correctement estimé (en LOS et en NLOS), même si des différences apparaissent en certains points. La validation a été réalisée avec un modèle de terrain précis réalisé par l'IGN, plus fin que les modèles couramment utilisés dans nos études. De plus, on notera que les paramètres de suivi et d'accrochage n'ont pas été simulés et qu'ils induisent des différences dans les évaluations dynamiques.

Dans [CI59], à l'aide du logiciel ERGOSPACE, nous avons déterminé comment le lancer de rayons pouvait permettre de borner les erreurs causées par les satellites NLOS dans un canyon donné, quel que soit l'azimut du satellite dont le signal est réfléchi, connaissant la largeur du canyon et l'azimut des satellites.

La position des satellites GNSS évolue dans le temps. Pour prendre en compte cette dimension temporelle, l'approche géométrique, déterministe, peut être exploitée dans un contexte probabiliste. Différentes simulations, faisant varier l'élévation des satellites, permettent d'obtenir des valeurs statistiques de retards en fonction de l'azimut ou des dimensions du canyon par exemple, de chacun des satellites de la constellation au cours de 24 heures de réception dans un canyon urbain. Dans la suite, il s'agira de modéliser le comportement des retards dans un environnement donné. On envisagera par exemple la définition d'une densité de probabilité telle que $p(\text{retard}|\text{gabarit},\text{azimuth})$.

Cette connaissance déterministe pourrait être fournie par un modèle 3D embarqué et un moteur de lancer de rayons capable de fonctionner en temps réel. Si le concept est simple, la réalisation est plus complexe : le temps de calcul très lourd des solutions existantes est un premier frein et en 2005 n'était pas envisageable. Une approche de ce type est cependant proposée aujourd'hui dans (Niehoefer 2016). Le deuxième frein réside dans l'estimation de la position dans le modèle : le lancer de rayons requiert en effet une position du mobile dans le modèle. Si la position est la position estimée par le récepteur et donc la position erronée, l'estimation du retard ne sera pas précise. Les solutions proposées dans la littérature à ce sujet procèdent par itération (Groves 2011), pour affiner la première estimation. (Bétaille 2013) propose des valeurs de corrections moyennes de la pseudo-distance, issues de distributions des erreurs obtenues expérimentalement et en fonction de la zone {élévation, azimut} du satellite concerné.

La solution CAPLOC présente l'avantage de s'affranchir de ces contraintes (Moreau 2016). Pour ce projet et dans sa thèse, Julien Moreau a montré la capacité d'un système mono-caméra à modéliser en 3D l'environnement autour de l'antenne et montre comment ce modèle 3D peut être utilisé pour estimer le retard des pseudo-distances dans le cas de signaux reçus après une réflexion. La stratégie retenue est inspirée de (Bétaille 2013). Le modèle reconstitué est utilisé d'abord pour détecter l'état de réception LOS ou NLOS des satellites reçus et mesurer la distance des structures détectées dans l'environnement proche. Le retard lié à 1, 2 ou 3 réflexions est ensuite estimé géométriquement suivant le modèle de la tranchée urbaine de D. Bétaille. Le gros avantage de cette solution et que J. Moreau a montré qu'il pouvait réduire l'imprécision de la position sans base de données externe. L'application de cette méthode sur des données dynamiques reste cependant à réaliser. L'inconvénient de cette méthode réside dans ses hypothèses de départ : la rue est droite ; les bâtiments ont des façades parallèles de hauteurs égales et constantes de part et d'autre de la rue. De futurs travaux pourront vraisemblablement tirer pleinement parti du modèle complet sans dégrader ces informations.

Ceci pourrait passer par l'utilisation de techniques de tracé de rayons pour estimer au plus près les erreurs de propagation dans ce modèle. Cette idée sera rappelée dans les perspectives de ce mémoire.

d. Modélisation des retards a priori

Ce travail a été réalisé dans la thèse de Fleury Nahimana, publiés dans [CI39, 43, 48, 50] et [J7].

Une nouvelle façon d'aborder le problème de l'utilisation optimale des signaux satellites est de considérer que le signal fourni par chaque satellite peut être vu comme une source d'information contenant, outre les informations de position, d'autres informations qui doivent permettre de détecter un mode de fonctionnement : réception normale, réception dégradée,... Dans cette approche, inspirée des travaux de (Caron 2006), il est tout à fait possible de voir la détection d'un mode de fonctionnement comme l'estimation d'un état étendu d'un système non linéaire composé de plusieurs capteurs (satellites ici) qu'ils soient synchrones ou asynchrones.

Une première approche pour traiter ce problème d'estimation non-linéaire a consisté à mettre en œuvre des méthodes de filtrage statistique bayésien, grâce à la collaboration avec Emmanuel Duflos. La comparaison des méthodes classiques (Filtre de Kalman Étendu, Sans parfum ou filtrage particulière) a notamment fait l'objet du stage de Nicolas Viandier en 2007. Ces techniques sont appliquées au système de navigation par satellite seul, considérant chacun des signaux et ses caractéristiques de réception comme autant de capteurs du système.

Dans cette section, nous montrons que l'utilisation d'une méthode de filtrage statistique réalisée à partir d'une meilleure modélisation des bruits d'observation de chaque signal reçu permet d'augmenter la précision de localisation.

Les travaux de la thèse de Fleury Nahimana, démarrée en 2005, ont consisté, dans une première partie, à modéliser la distribution des erreurs liées aux réflexions en environnement urbain par des modèles plus représentatifs des erreurs rencontrées dans ces environnements. Les modèles à mélange de gaussiennes (GMM : Gaussian Mixture Model) ont été retenus. D'une part en raison de la forme des distributions des erreurs de pseudo-distances en milieu masqué analysées durant la thèse ; d'autre part, parce qu'un mélange de densités gaussiennes est une solution qui généralise la loi normale adaptée au cas d'une réception en milieu dégagé, ce qui permet dans la suite, de favoriser le passage d'un modèle à l'autre selon que le satellite est visible directement ou indirectement après réflexion.

En pratique, l'erreur de pseudo-distance exacte est impossible à déterminer en ligne. Par conséquent, pour estimer cette erreur, nous utilisons les résidus de pseudo-distances, soit la différence entre la position mesurée (l'observation) et la position estimée (l'estimée de cette observation).

Dans cette approche, la densité inconnue des résidus d'estimation de la position est modélisée par une somme pondérée de densités gaussiennes. [CI50]. Cette modélisation est valable pour une zone donnée (portion de trajectoire) et un intervalle de temps fixé. Le nombre de Gaussiennes est fixé pour simplifier l'algorithme. Un exemple représentatif est illustré dans la figure 49 montrant que la loi des résidus d'estimation peut être modélisée par une somme pondérée de quatre Gaussiennes.

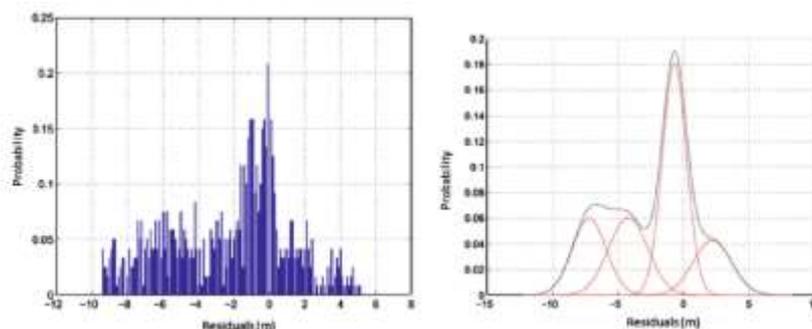


Figure 49. Résidus acquis en environnement suburbain et leur modélisation par un mélange de 4 Gaussiennes [J7].

Dans une deuxième partie de la thèse de Fleury Nahimana, nous avons repris les chaînes de Markov afin de traduire les changements d'états du canal de propagation dans un environnement donné en utilisant les méthodes présentées précédemment. Les chaînes de Markov permettent en effet de représenter les transitions dynamiques de l'état de réception d'un satellite à l'instant t connaissant son état à l'instant $t-1$ et la probabilité pour un signal d'être reçu dans l'un ou l'autre des 3 états retenu (bloqué, LOS ou NLOS) comme illustré sur la figure 36. Ces chaînes de Markov permettent d'appliquer un modèle à sauts (Jump Markov Systems) et ainsi d'associer à chaque état de réception de chacun des signaux, un modèle d'erreur approprié et défini a priori (bruit blanc Gaussien pour les LOS et mélange de Gaussiennes pour les NLOS). Soit ε_t^s défini comme le bruit à l'instant t pour le satellite s :

$$\text{Si LOS : } \varepsilon_t^s \sim \mathcal{N}(0, \sigma_s^2) \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\text{Sinon } \varepsilon_t^s \sim \sum_{j=1}^J \pi_{j,s} \mathcal{N}(\mu_{j,s}, \sigma_{j,s}^2) \quad (\text{Eq. 15})$$

avec J le nombre de composantes du mélange de Gaussiennes. Notons que chaque composante j a une moyenne μ_j , une variance σ_j^2 et un poids dans le mélange π_j .

La figure 50 Résume le modèle d'observations considéré, dans lequel les pseudo-distances y_t sont reliées aux états cachés (x_t et r_t) par une relation non linéaire avec un bruit additif ε_t .

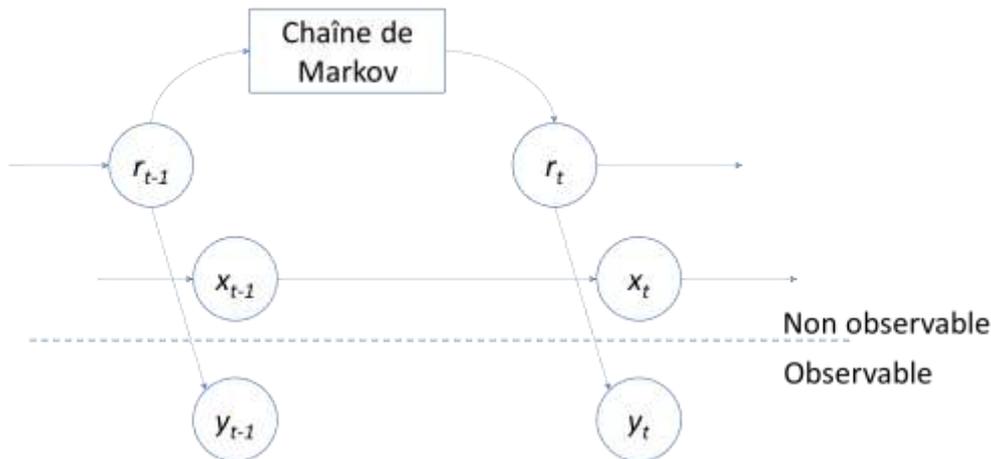


Figure 50. Modèle d'observation utilisant un système à saut de Markov. La variable r_t indique l'état de réception d'un satellite à l'instant t . Son évolution est fonction d'une chaîne de Markov.

Le filtrage de Kalman (ou Kalman étendu) fait l'hypothèse d'un bruit blanc Gaussien. Il n'est donc pas applicable en présence d'un bruit représenté par un mélange de Gaussiennes. Par conséquent, un filtrage particulière (FP) a été mis en œuvre et nous avons montré que l'association des sauts de Markov et du filtre particulière permettait d'améliorer les performances de localisation en précision (2,76 m au lieu de 5,47 m avec un filtre classique comme chiffré dans le tableau 3).

Sur des données de simulation, nous montrons dans [CI48] l'intérêt de cette solution en comparant les trajectoires simulées dans un modèle 3D de la ville de Rouen. Le résultat est 4 fois plus précis que lorsqu'un filtre de Kalman simple est appliqué.

Dans [CI33] nous avons montré que l'utilisation conjointe des satellites GPS et Galileo permettait non seulement d'améliorer la disponibilité (85 % de disponibilité au lieu de 54 % avec GPS seul sur un trajet simulé dans le centre de Toulouse), mais que l'utilisation de JMS/FP permettait également de réduire l'imprécision de localisation (tableau 3) en divisant l'imprécision par deux. L'utilisation

conjointe de GPS et Galileo avec la solution JMS/PF permet de limiter les erreurs importantes. On constate notamment, sur cette simulation, que 83 % des points sont localisés avec une précision inférieure à 3 m.

Tableau 3. Erreurs de positionnement obtenues avec 3 algorithmes différents (JMS, EKF et PF) et pour deux solutions différentes (mono et multi constellations) [CI33].

	JMS	EKF	PF
Mean error for GPS	2.76 m	5.47 m	4.07 m
Mean error for Galileo+GPS	2.09 m	4.15 m	3.15 m
% of points with error < 3m (GPS)	69.86%	44.58%	53.43%
% of points with error < 3m (GPS+Galileo)	83.75%	54.87%	66.61%

Dans [J7] nous avons obtenu, sur des données réelles acquises à Belfort, une précision de 10,5 m au lieu de 14,85 m.

e. Modélisation dynamique des retards

Ce travail a été réalisé dans la thèse de Nicolas Viandier et publié dans [CI20, 21, 28, 30, 34] et [J8].

Dans la suite, avec la thèse de Nicolas Viandier, nous avons remis en question le fait de considérer que l'ensemble des observations des erreurs suit un modèle unique, c'est-à-dire, un mélange de Gaussienne unique valable tout le long d'un trajet par exemple.

Une première contribution a montré l'importance de la taille de la fenêtre d'observation dans la modélisation de l'erreur. En effet, plus la fenêtre d'observation est petite, plus la loi Normale est adaptée pour modéliser la distribution des données. Inversement, plus la fenêtre d'observation est grande, plus le mélange de gaussiennes est adapté pour modéliser le bruit de mesure affectant la pseudo-distance.

La figure 51 montre ainsi l'évolution des densités d'erreurs de pseudo-distance en fonction du temps, estimées avec une fenêtre glissante d'observation. On remarque la variation dans le temps de l'écart type et de la valeur moyenne des densités. Notons que cette variabilité a été considérée dans (Spangenberg 2009) via un algorithme à saut de variances et dans (Giremus 2007) avec des sauts de moyennes. Les travaux de Nicolas Viandier considèrent ces deux types de variabilité à chaque instant de mesure.

Les dernières densités représentées dans le temps sont en particulier caractéristiques d'erreurs liées à un satellite réfléchi, de moyenne bien différente de zéro.

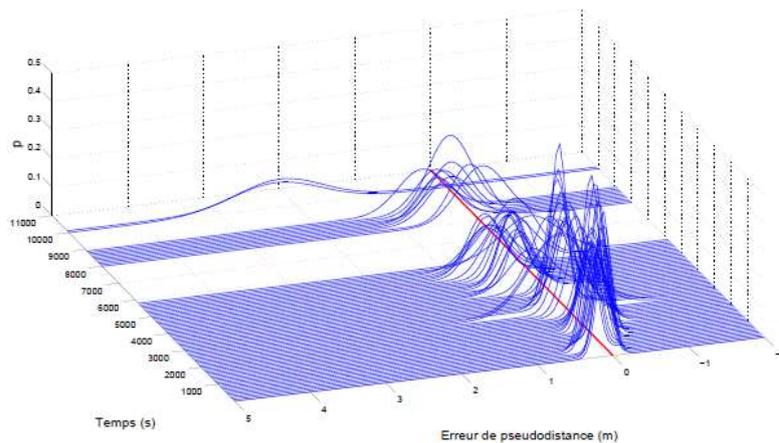


Figure 51. Evolution des densités d'erreur de pseudo-distance considérées dans une fenêtre d'observation glissante de 240 échantillons.

La figure 52 issue de (Viandier 2011) montre que la moyenne et la variance du bruit de pseudo-distance varient dans le temps et en fonction de l'état de réception du signal. Si les variables sont relativement constantes sur la première moitié des courbes, on remarque que le comportement de la moyenne et de l'écart-type change lorsque le satellite passe derrière le masque de visibilité généré par l'obstacle. Par conséquent, à partir de l'instant 5000, l'hypothèse de stationnarité ne peut plus être vérifiée et le bruit ne peut être blanc s'il n'est pas stationnaire.

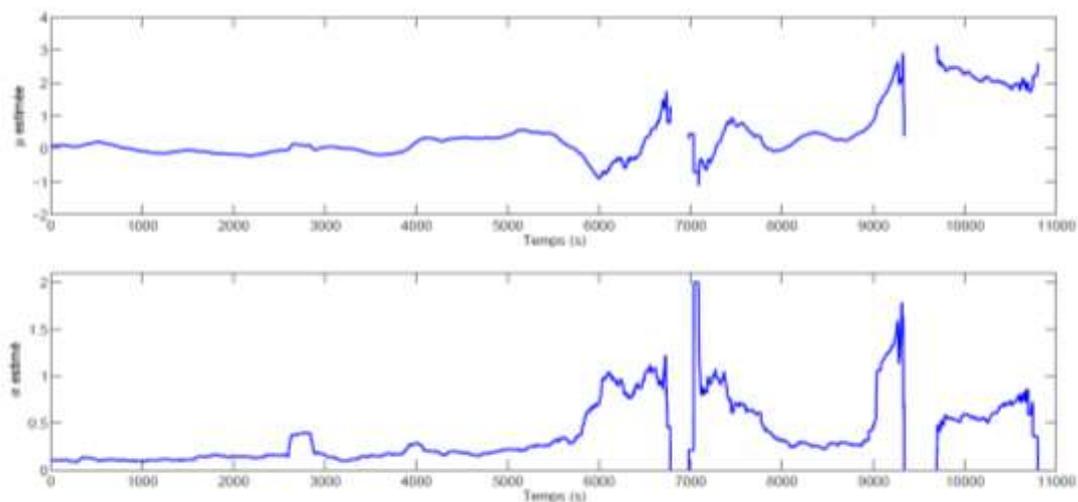


Figure 52. Estimation de la moyenne de la densité d'erreur de pseudo-distance d'un satellite dont la position évolue dans le temps d'un état LOS ($t=[0,5000s]$) à un état NLOS ($t=[5000,11000]$) (Viandier 2011).

Dans la thèse de Nicolas Viandier et dans les travaux de post-doc d'Asma Rabaoui, nous avons montré que l'estimation conjointe des états de réception et des erreurs de pseudo-distances des satellites NLOS permettait d'améliorer encore la précision de localisation.

Pour s'affranchir des limites liées aux mélanges finis de Gaussiennes pour l'estimation du bruit (nombre fini de Gaussiennes, hypothèse de stationnarité fautive en présence de NLOS), nous avons proposé un second modèle d'erreur de pseudo-distances construit sur les mélanges de processus de Dirichlet qui sont une méthode non paramétrique, séquentielle et flexible [C132]. Ces travaux ont été inspirés par les travaux de (Caron 2006).

Dans ces travaux, la densité de probabilité du bruit est inconnue. Dans ce mémoire, nous ne détaillerons pas ces techniques mais le principe est le suivant : nous considérons, qu'à un instant donné, le modèle du bruit d'observation correspond à une Gaussienne précise, comprise dans une loi plus complexe composé d'une infinité de Gaussiennes.

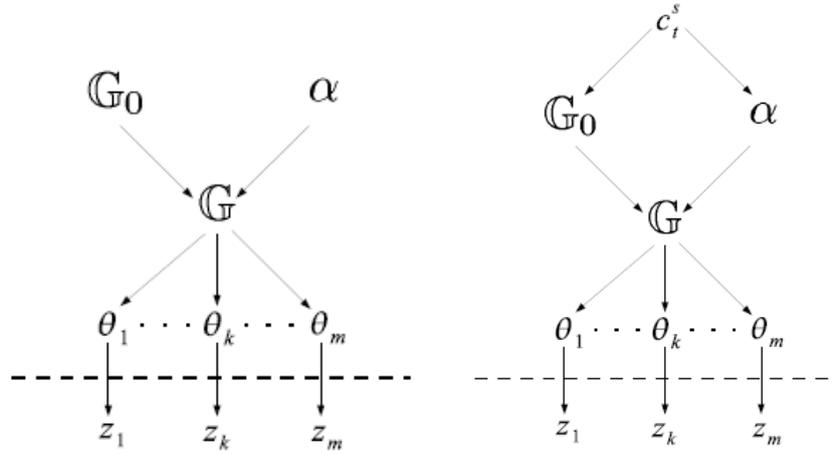


Figure 53. a/Représentation hiérarchique des DPM, b/ Représentation hiérarchique des DPM adaptés aux GNSS (Viandier 2011).

\mathbb{G} est une mesure de probabilité aléatoire (RPM - Random Probability Measure). Nous l'avons choisi comme étant un Processus de Dirichlet (DP) à cause de ses propriétés intéressantes (Caron 2006). La figure 53 représente les DPM comme un modèle hiérarchique. Le modèle hiérarchique est exprimé par :

$$\mathbb{G} \sim DP(\mathbb{G}_0, \alpha) \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\theta_k \sim \mathbb{G} \quad (\text{Eq. 17})$$

$$y_k | \theta_k \sim f(y | \theta_k) \quad (\text{Eq. 18})$$

La figure 53a est la représentation classique des DPM. \mathbb{G} est distribuée à partir d'un Processus de Dirichlet à deux paramètres α et \mathbb{G}_0 .

Les clusters $\theta_{1:n}$ sont distribués à partir de \mathbb{G} . Comme développé dans (Viandier 2011), la distribution des $\{\theta_1, \dots, \theta_n\}$ suit une représentation en urne de Polya. Ainsi θ_{n+1} peut prendre une valeur de cluster déjà existante avec une probabilité de $\frac{n}{\alpha+n}$ ou une nouvelle valeur aléatoire tirée de \mathbb{G}_0 avec une probabilité de $\frac{\alpha}{\alpha+n}$ soit :

$$\theta_{n+1} | \theta_{1:n} \sim \frac{1}{\alpha + n} \sum_{k=1}^n \delta \theta_k + \frac{\alpha}{\alpha + n} \mathbb{G}_0 \quad (\text{Eq. 19})$$

Il existe donc une probabilité positive non nulle que certains θ_i soient identiques. Notons que les variables z_k sont les observations, à savoir les mesures de pseudo-distances.

Pour $f(\cdot | \theta)$ gaussienne, le modèle de DPM Normal-inverse Wishart est utilisé pour décrire la distribution de la moyenne μ et de la variance σ .

Dans le cas de signaux GNSS nous avons montré que les distributions des erreurs varient suivant l'état de réception du signal. La même distribution de base \mathbb{G}_0 ne peut donc pas être appliquée dans les deux états indifféremment car cela entraînerait de nombreuses erreurs de modélisation. Par

conséquent, nous avons introduit un paramètre décisionnel supplémentaire dans nos travaux, c_t^s , représenté sur la figure 53b. c_t^s représente l'estimation déterministe de l'état de réception du satellite s à l'instant t . c_t^s permet ainsi de mettre à jour les paramètres de la distribution de \mathbb{G}_0 et le paramètre de dispersion α selon l'état du satellite.

Ainsi, dans le cas d'une réception LOS :

$$\mathbb{G} \sim DP(\mathbb{G}_0, \alpha_{LOS}) \quad (\text{Eq. 20})$$

$$\sigma_k \sim \mathcal{W}^{-1}(\Sigma_{LOS}, dof_{LOS}) \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\mu_k \sim \mathcal{N}(\mu_0, \frac{\sigma_k}{k_{LOS}}) \quad (\text{Eq. 22})$$

où μ_0 est la moyenne de la distribution Normale, k_{LOS} est un paramètre d'échelle, Σ_{LOS} et dof_{LOS} sont la covariance et le degré de liberté de la distribution Wishart inverse.

Dans le cas d'une réception NLOS :

$$\mathbb{G} \sim DP(\mathbb{G}_0, \alpha_{NLOS}) \quad (\text{Eq. 23})$$

$$\sigma_k \sim \mathcal{W}^{-1}(\Sigma_{NLOS}, dof_{NLOS}) \quad (\text{Eq. 24})$$

$$\mu_k \sim \mathcal{N}(\mu_0 + res_t^s, \frac{\sigma_k}{k_{NLOS}}) \quad (\text{Eq. 25})$$

avec res_t^s l'estimation de l'erreur de pseudo-distance pour le satellite s à l'instant t .

On notera les relations entre les différentes variables :

$$\begin{aligned} \Sigma_{NLOS} &> \Sigma_{LOS} \\ dof_{NLOS} &> dof_{LOS} \\ k_{NLOS} &< k_{LOS}. \end{aligned}$$

Pour tenir compte du caractère aléatoire des retards liés aux réflexions en environnement urbain, α est mis à jour de telle manière que, pour une réception NLOS, θ_k a une forte probabilité d'être tiré à partir de \mathbb{G}_0 plutôt que d'être égal à un cluster précédent.

$$\alpha_{NLOS} \gg \alpha_{LOS}.$$

L'estimation de la position est enfin réalisée à l'aide d'un filtre particulaire Rao Blackwellisé [J8], qui permet d'accroître l'efficacité des techniques d'échantillonnages nécessaires au filtrage particulaire.

Ces algorithmes ont été validés sur des données de simulation et des données expérimentales et publiés dans [J8][C121, 28, 30]. Nous illustrerons ici les résultats obtenus avec des données de simulation générées sous Ergospace. La figure 54 extraite de [J8] montre les positions obtenues avec différentes méthodes d'estimation (Kalman étendu en rouge, filtre particulaire en bleu ciel et DPM en étoiles bleues) comparées à la trajectoire de référence représentée en vert. La figure 55 quantifie l'erreur de localisation avec les différentes méthodes.

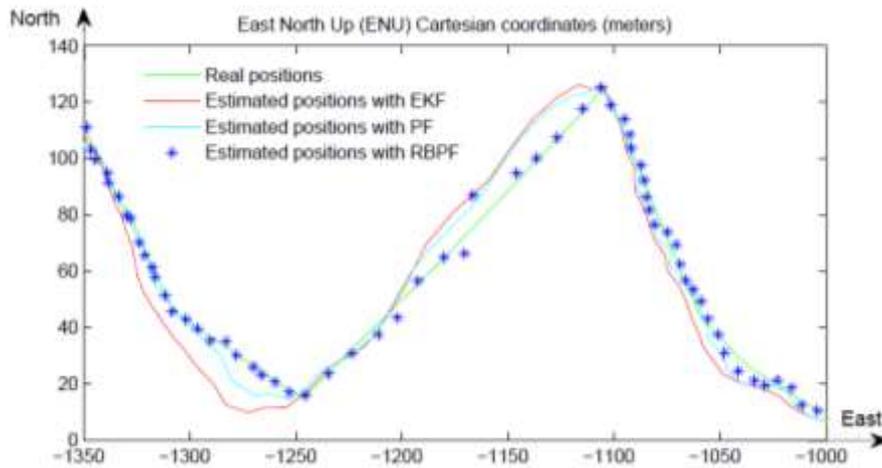


Figure 54. Précision de localisation obtenue avec différents filtres (EKF, Filtre particulaire et notre proposition) sur des mesures réalisées dans la ville de Rouen.

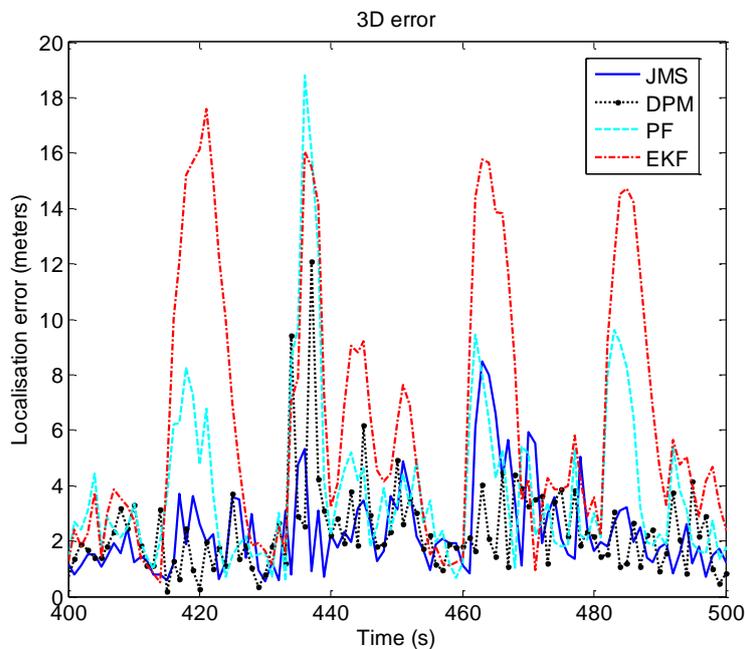


Figure 55. Erreurs de localisation le long d'une trajectoire obtenues avec les méthodes fondées sur les JMS (bleu), DPM (pointillés noirs), et filtre particulaire (bleu ciel), comparées aux erreurs obtenues avec un filtre de Kalman étendu classique (Viandier 2011).

Les performances de ces solutions ont été évaluées sur des données de mesure également. La figure 56 trace les couples (μ, σ) calculés en chaque instant pour un satellite donné. Ils sont représentés avec le résidu de pseudo-distance et montrent la capacité de l'algorithme à borner correctement les erreurs avec une probabilité de 93 % sur cet exemple. En considérant qu'une distribution Gaussienne borne correctement 68 % des données à 1σ , on peut noter la bonne performance de l'algorithme.

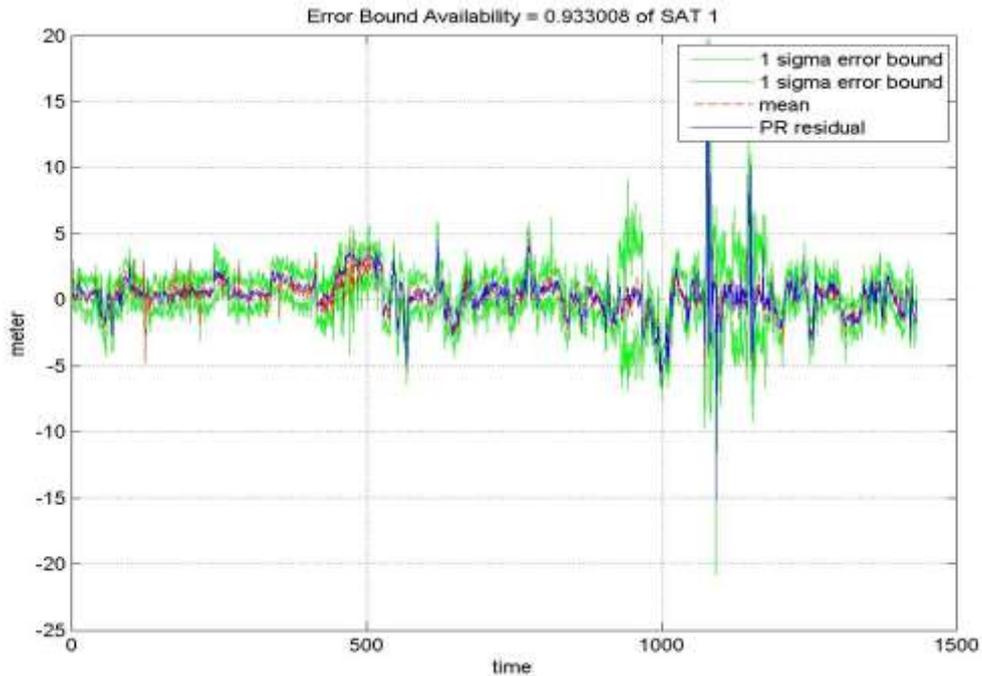


Figure 56. Résultats du suivi de densité sur données réelles (acquises à Nantes en environnement dense par l'équipe Geoloc) pour l'algorithme DPM à 1σ pour le satellite 1 (Résultat de Ni Zhu).

Le tableau 4 compare les performances de notre solution dans le cas de mesures acquises avec un récepteur bas coût classique (le récepteur uBlox intégré dans le boîtier Safedrive de M3System) à la solution présentée plus haut utilisant les chaînes de Markov et les mélanges de Gaussiennes. Sur les performances dans le plan horizontal, on note que la solution proposée permet de diviser par deux l'imprécision constatée en mesure et qu'elle limite le pourcentage d'erreurs importantes. L'erreur inférieure à 3 m est notamment deux fois plus fréquente avec cette solution qu'avec la solution en JMS/PF présentée précédemment.

Tableau 4. Performances de localisation pour les algorithmes JMS (GMM) et RBPF (DPM) et pour les positions mesurées par le Safedrive (Viandier 2011).

Performances 2D				
	Erreur moyenne (m)	Dispo. à 3 m	Dispo. à 5 m	Dispo. à 10 m
Safedrive	14,85	10%	30%	56%
JMS (GM)	10,50	18,21%	41,96%	71,05%
RBPF (DPM)	7,13	36,36%	63,44%	84,50%
Performances 3D				
	Erreur moyenne (m)	Dispo. à 3 m	Dispo. à 5 m	Dispo. à 10 m
Safedrive	20,85	3%	13%	42%
JMS (GM)	14,92	4,69%	16,93%	55,83%
RBPF (DPM)	10,19	10,03%	32,36%	75,04%

f. Conclusions

Les travaux menés dans ces deux thèses en collaboration avec Emmanuel Duflos ont montré l'intérêt de l'utilisation d'un modèle d'erreur le plus fidèle possible à la réalité pour l'amélioration de la précision. Une amélioration moyenne de 50 % a pu être apportée par rapport aux méthodes classiques grâce aux mélanges de processus de Dirichlet (DPM).

La solution reposant sur les DPM n'a pas encore été éprouvée sur d'autres trajectoires et d'autres bases de données expérimentales mais c'est un objectif à court terme. Son implantation en temps réel n'a pas encore été envisagée ; elle reste complexe mais ne doit pas être abandonnée. Un travail sur la complexité calculatoire de l'algorithme reste à mener ainsi que sur le choix de ses paramètres.

Une perspective déjà évoquée dans les perspectives de thèse de Nicolas Viandier reste une perspective majeure et sera abordée dans la dernière section de ce document : l'utilisation de l'estimation en ligne des modèles de bruits pour un calcul de l'intégrité de la position.

5 Evaluer la confiance dans la position, l'intégrité : connaître et quantifier les erreurs, utiliser les méthodes de SdF

Ces travaux sur l'intégrité et la sûreté de fonctionnement ont démarré en 2005 avec les recrutements successifs de Vincent Bénard, puis de Julie Beugin au sein du LEOST. Depuis le recrutement de Julie Beugin à ESTAS, tous les travaux décrits ci-dessous et liés à l'évaluation de la confiance en termes de sûreté de fonctionnement sont réalisés en collaboration avec Julie Beugin et souvent portés maintenant par Julie. Je ne les décrirais que dans les grandes lignes.

Les travaux liés au développement d'un calcul d'intégrité GNSS prenant en compte le canal de propagation sont des travaux que je porte et sont développés ici comme des perspectives à court terme, menés notamment dans le cadre de la thèse de Ni Zhu, en co-encadrement avec David Bétaille et Marion Berbineau (directeurs de la thèse).

Si la plupart de mes travaux passés ont porté sur l'amélioration de la précision de localisation, la notion de confiance accordée à la position estimée est cruciale. Nous avons exprimé ce besoin pour des applications ferroviaires d'abord, en 2007, avec l'étude des performances de Galileo pour des applications ferroviaires, notamment à caractère sécuritaire, réalisée pour le compte de la DGMT avec Julie Beugin [R15, R18].

Dans cette section, j'ai choisi de présenter d'abord le concept d'intégrité tel que défini dans le monde du GNSS. Ce concept, mis en œuvre essentiellement pour des applications aéronautiques, ne peut pas se transposer tel quel au transport terrestre. Après en avoir expliqué les raisons, nous présenterons les verrous identifiés pour parvenir à la définition d'un concept adéquat et pour qu'il soit accepté en application.

Le travail à effectuer est important. Il débute et nous ne pourrions pas nous atteler à l'ensemble des verrous. Par contre, avec l'ensemble des travaux menés sur plusieurs axes et par notre participation à plusieurs projets européens (Locoprol, Galoroi), à des groupes de travail (UIC Galileo for rail) sur ces sujets et plus récemment au bureau de normalisation (BNF/BNAE) ainsi que dans le comité de pilotage SNCF GNSS, je contribue à cette vaste tâche.

Le séminaire que j'ai organisé le 15/12/2015 à Villeneuve d'Ascq sur ces sujets a montré que plusieurs de nos contributions passées ou de nos pistes actuelles de recherche ont directement leur place dans ce sujet et qu'elles sont en phase avec les visions des orateurs.

Ce chapitre est articulé comme suit : dans une première partie, je décrirai le concept d'intégrité tel que défini pour l'aéronautique et fourni par le système d'augmentation EGNOS. Ce concept est adapté aux conditions de réception d'un avion qui diffèrent des conditions rencontrées par les véhicules terrestres, ce qui rend son usage complexe et limité. C'est ce qui sera présenté dans le deuxième paragraphe et qui fait l'objet à la fois de l'article [J3] et du livrable [R1] du projet STARS. La thèse de Ni Zhu cherche à répondre à ce nouveau contexte.

Dans la troisième partie, je présenterai les travaux spécifiques liés au domaine d'application ferroviaire menés avec Julie Beugin et dans la thèse de Cyril Legrand (2016).

a. Le concept d'intégrité GNSS

Cette section s'inspire de [J2] et de [R1].

L'intégrité, telle que définie par l'aviation civile (ICAO 2006) est la mesure de la confiance qui peut être placée dans l'exactitude de l'information fournie par un système de navigation. Elle permet de définir, autour de la position estimée par le récepteur (imparfaite), un intervalle de confiance dont le but est de garantir un certain niveau de confiance dans la mesure.

Pour être mis en œuvre dans un système de navigation, un mécanisme de surveillance de l'intégrité doit être associé au calcul de position.

Il existe deux familles de mécanismes de surveillance de l'intégrité :

- La première consiste à identifier et rejeter une mesure défaillante. Elles sont appelées FDE (Fault Detection and Exclusion) ou MRA (Measurement Rejection Approach) lorsqu'elles considèrent des mesures aberrantes comme des défaillances (Cosmen-Schortmann 2008). C'est ce que font les algorithmes RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) utilisés dans l'aéronautique avec l'hypothèse qu'il ne peut y avoir plus d'une défaillance à la fois.
- La deuxième est appelée ECA (Error Characterization Approach). L'approche des ECA consiste à fournir une estimation réaliste des erreurs, incluant les erreurs importantes.

Ces deux familles peuvent être utilisées conjointement. La FDE, en excluant les mesures défaillantes, limite les imprécisions. L'ECA borne les erreurs résiduelles après exclusion.

Selon les standards de l'aviation civile, l'intégrité est caractérisée par (Faurie 2011) :

- Les bornes d'alertes (horizontale, HAL ou verticale, VAL) : erreurs de position maximales tolérables.
- Le temps d'alerte (TTA – Time to Alert) : temps maximal autorisé entre le début d'une défaillance (le système ne satisfait plus aux exigences opérationnelles) et l'annonce de cette défaillance.
- Le risque d'intégrité : probabilité qu'une erreur de position soit supérieure aux bornes d'alertes et soit non détectée par le système dans un temps d'alerte donné. En pratique, la position exacte n'est jamais connue par l'utilisateur. On connaît la position estimée, entachée d'erreurs. Par conséquent, le système va estimer des bornes d'erreur.
- Le niveau de protection (PL – Protection Level) : estimation des bornes d'erreur, calculée par le récepteur, dont l'objectif est de garantir que l'erreur vraie PE (Position Error) soit contenue dans le niveau de protection conformément au risque d'intégrité défini. En théorie, il ne faut pas que l'erreur vraie soit supérieure au niveau d'alerte. En pratique, PE étant inconnue, on utilisera PL.

Pour vérifier ces différentes exigences, un algorithme de contrôle d'intégrité doit être mis en œuvre. Il compare le niveau de protection PL aux bornes d'alerte AL. Même si l'erreur vraie PE est inconnue, sa position par rapport à PL et AL est fondamentale dans la détection des événements. Les relations entre PE, PL et AL sont résumées dans le diagramme de Stanford repris en figure 57.

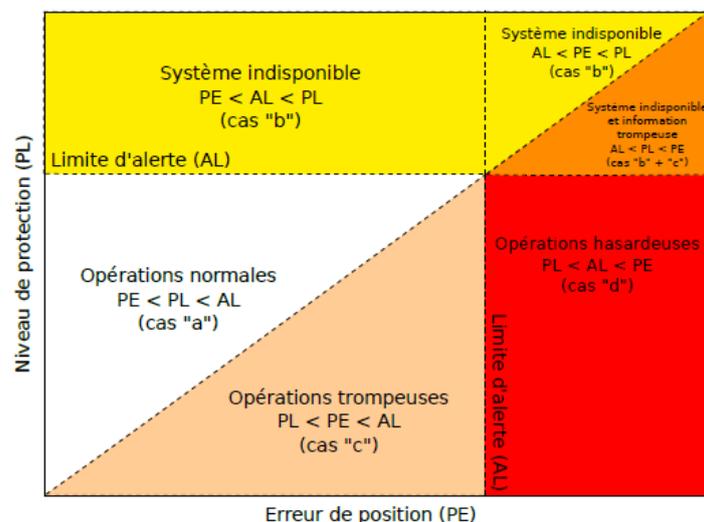


Figure 57. Diagramme de Stanford.

A partir du moment où le système détecte que $PL > AL$ (zones jaunes et orange), le système est déclaré indisponible. Le système n'est alors pas capable de garantir que le service est conforme aux exigences.

Lorsque $PL < AL$ plusieurs cas apparaissent :

- le calcul du niveau de protection est approprié et encadre correctement les erreurs (càd $PE < PL$) et le système fonctionne correctement (zone blanche),
- au contraire, il y a des biais non bornés par le calcul de PL ($PL < PE$). Si ces biais non détectés sont inférieurs au niveau d'alarme, il y a une alerte manquée mais sans gravité. Si ces biais sont supérieurs à AL, l'alerte est manquée et dangereuse. La situation est critique.

D'après (Faurie 2011), ce dernier cas, $PE > AL > PL$ appelé « Hazardous Misleading Information » est parfois confondu avec le risque d'intégrité.

La détection manquée engendre un risque d'intégrité. Le système n'est pas informé du mauvais fonctionnement de sa fonction localisation. La fausse alerte n'engendre pas de risque mais peut poser des problèmes d'exploitation du système par exemple si elle se produit trop souvent. Ces évènements sont illustrés sur la figure 58, dans le cas d'une application aéronautique. Le risque porte sur la composante verticale. On compare ainsi des niveaux d'erreur, de protection et d'alerte verticaux.

Dans l'aéronautique, les phases d'approches sont caractérisées par un niveau d'alerte limite (VAL). La comparaison de VPL est de VAL détermine la disponibilité de l'information (information intègre).

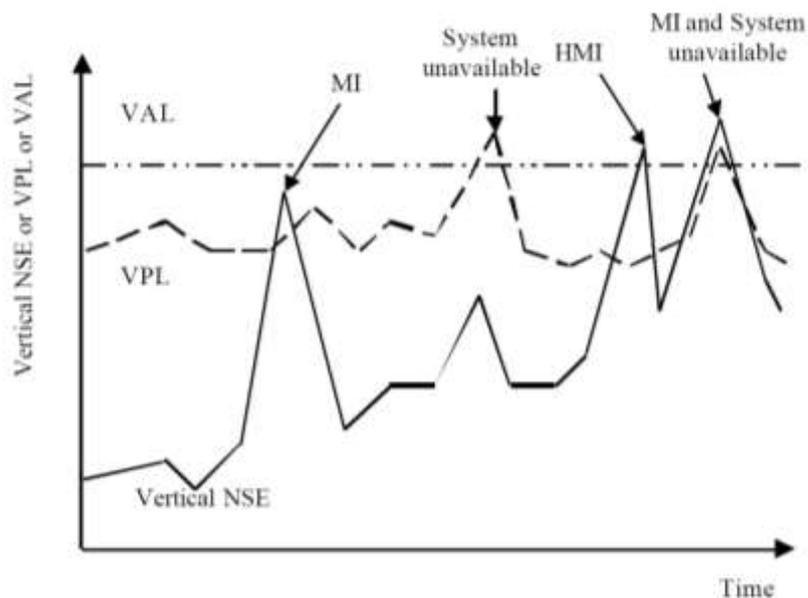


Figure 58. Exemples de situations caractérisées grâce à EGNOS dans l'aviation avec les niveaux de protections verticaux.

Dans le cas d'une application ayant des exigences d'intégrité, le système sera déclaré disponible si : la position est disponible, fournie avec un niveau de protection associé et que le PL est suffisamment petit pour répondre aux besoins de l'application. Citons par exemple le besoin pour un véhicule autonome d'être localisé pour être guidé : si le niveau de protection est largement supérieur à la largeur d'une rue, il sera peu utile.

Le calcul de la taille de l'intervalle de confiance, appelé PL, passe par le recours à des modèles d'erreurs de position. En conditions nominales, comme rappelé dans le chapitre 4, il est communément admis de représenter l'erreur de pseudo-distance par une loi normale. Si le PL est défini par les bornes $[-\hat{\epsilon}_{max}, \hat{\epsilon}_{max}]$ le risque d'intégrité est alors la probabilité $P_{RI} = P(|\epsilon| > \hat{\epsilon}_{max})$ représentée en jaune sur la figure 59.

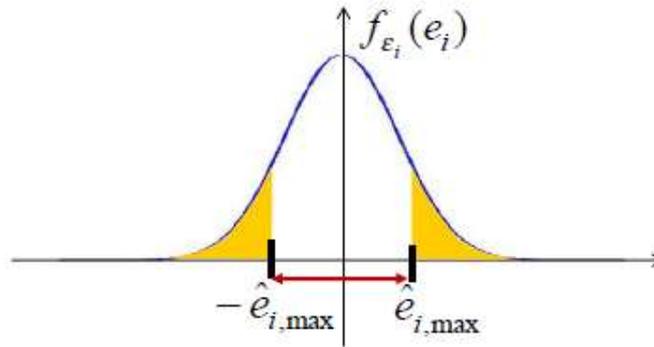


Figure 59. Densité de probabilité de l'erreur de pseudo-distance en condition nominale et risque d'intégrité (en jaune).

Le calcul du niveau de protection PL est ainsi très directement lié au risque d'intégrité. Une application pourra souhaiter l'estimation d'un PL très conservateur (donc très grand) pour limiter le risque d'intégrité quand d'autres auront besoin d'un PL beaucoup plus faible au risque d'avoir un risque d'intégrité important.

EGNOS

Les systèmes GNSS assurent un premier niveau de surveillance. En effet, le message de navigation prend en compte les anomalies détectées par le segment sol et liées au système et à son opération telles que les erreurs d'horloges satellite. Il peut cependant se passer plusieurs heures avant que le segment sol ne détecte la défaillance et ces informations ne sont pas temps réel.

EGNOS, comme les autres systèmes d'augmentation satellitaires SBAS (Satellite-Based Augmentation System), a été développé afin d'apporter un niveau supplémentaire de surveillance de cette intégrité. Son segment sol surveille en permanence les performances des signaux de la constellation GPS. Il détermine la distribution des erreurs et caractérise sa variance σ . D'après le standard RTCA, les SBAS transmettent deux valeurs de σ : notées σ_{UDRE} et σ_{GIVE} .

- σ_{UDRE} caractérise les erreurs résiduelles sur les pseudo-distances après application des erreurs d'horloge satellite et d'éphémérides pour chacun des satellites.
- σ_{GIVE} caractérise les erreurs résiduelles verticales en une grille de points prédéfinis pour l'application de corrections ionosphériques en ces points.

Le niveau de protection s'écrit (Pullen 2002) :

$$XPL = K_X \sigma_X \quad (\text{Eq. 26})$$

avec pour le PL vertical, $K_X = 5,33$ pour les systèmes d'augmentation large zone WAAS (Wide Area Augmentation System) ou SBAS, correspondant à un risque d'intégrité de 10^{-7} (Figure 60) et pour le PL horizontal, $K_H = 6,18$ lorsque le vol est en-route.

Notons que σ_X résulte du calcul de la matrice pseudo inverse S pondérée construite avec les vecteurs des satellites LOS et les écart-types sur les erreurs de corrections transmis pour chaque satellite (σ_{UDRE}).

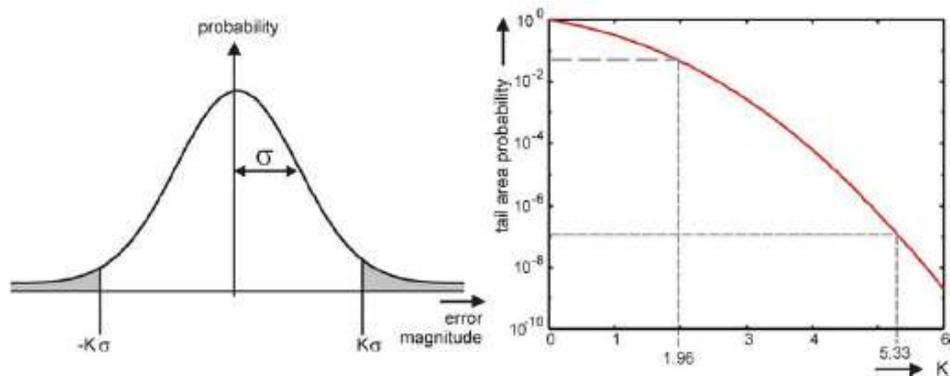


Figure 60. Choix du facteur K correspondant à un risque d'intégrité de 10^{-7} (Ober 2004).

Ces méthodes reposent donc sur une connaissance a priori d'un modèle d'erreurs de pseudo-distances.

Dans les cas non-aidés, les algorithmes de type RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) sont utilisés. Ces algorithmes effectuent un test statistique appliqué à l'ensemble des données (test global) afin de vérifier si un problème d'intégrité est présent. Ce test s'applique lorsqu'il y a redondance de mesures, et nécessite par conséquent la réception d'au moins 5 satellites simultanément. Ce test global fait **l'hypothèse d'un seul biais** (sur une mesure de pseudo-distance) et repose sur l'utilisation d'un test du χ^2 sur la somme pondérée des résidus au carré (Normalized Sum of the Squarred Errors ou NSSE) comme décrit dans (Kaplan, 2006) et (Le Marchand, 2010). Deux hypothèses sont formulées : soit la distribution des bruits induit que la NSSE suit une loi du χ^2 centrée (cas nominal) soit cette distribution suit une loi du χ^2 non centrée (cas non nominal), toutes deux avec un degré de liberté $ddl = m - n$ (n la taille du vecteur d'état et m la taille du vecteur de mesure).

$$NSSE \sim \begin{cases} \chi_{ddl}^2, & \text{si } E \sim N(0, I) \\ \chi_{ddl, \lambda}^2, & \text{si } E \sim N(B, I) \end{cases} \quad (\text{Eq. 27})$$

où E est le vecteur des erreurs de pseudo-distances, B est le vecteur de biais (tous les coefficients b_i de B sont nuls dans le cas nominal, sans faute ; un des coefficients est non nul dans le cas d'une défaillance), λ est la différence entre les seuils des deux distributions, correspondant au coefficient de non centralité. Ces deux lois sont représentées sur la figure 61.

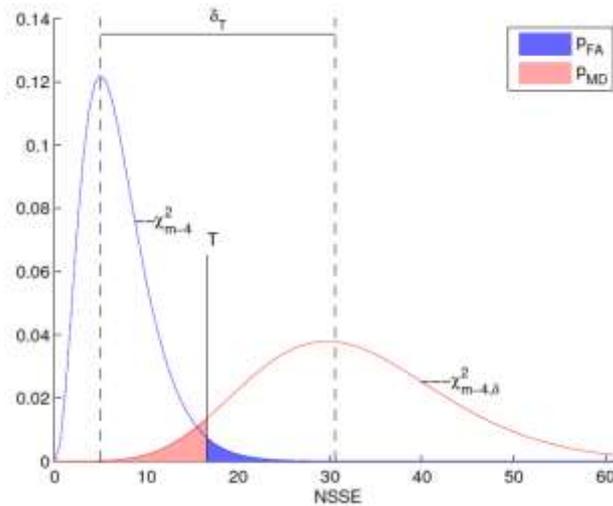


Figure 61. Densités de probabilités relatives aux hypothèses H_0 (Pas de faute – loi du χ^2 - en bleu) et H_1 (Comportement avec faute – loi du χ^2 non centrée – en rouge) (Drevelle 2011).

L'algorithme RAIM utilise le test statistique pour déterminer si l'hypothèse H_0 est vérifiée à partir de la comparaison entre une variable de décision et un seuil T . Ce seuil est choisi en fonction de la probabilité de fausse alarme acceptée p_{fa} par l'utilisateur.

$$p_{fa} = P(NSSE > T | H_0) \quad (\text{Eq. 28})$$

L'autre paramètre important est la probabilité de détection manquée (p_{md}).

$$p_{md} = P(NSSE < T | H_1) \quad (\text{Eq. 29})$$

La valeur de la probabilité de détection manquée p_{md} va permettre de fixer le paramètre de non-centralité δ .

La phase de détection de défaut peut être suivie d'une identification du défaut dans le but de l'exclure. Elle nécessite alors la réception d'au moins 6 satellites. Un nouveau test global est réalisé après chaque exclusion. La solution fournie est la position calculée après la ou les exclusion(s). L'algorithme avec et sans exclusion est représenté sur la figure 62 (Drevelle 2011).

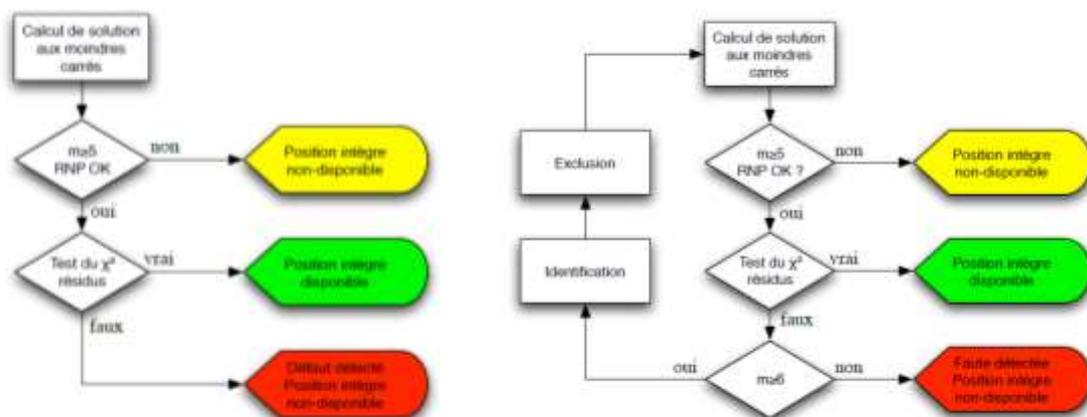


Figure 62. Algorithmes sans et avec exclusion (Drevelle 2011).

A l'issue du processus de surveillance de l'intégrité, le niveau de protection horizontal HPL doit borner les erreurs résiduelles ou non détectées. Il existe plusieurs déclinaisons du calcul de HPL. Elles

reposent toutes sur le biais d'amplitude minimal détectable, couramment nommé MDB (Minimum Detectable Bias). Dans l'hypothèse d'un seul biais d'amplitude b sur la $i^{\text{ème}}$ mesure (Le Marchand, 2010), on a

$$MDB = b = \frac{\sigma \cdot \sqrt{\delta}}{\sqrt{S_{(i,i)}}} \quad (\text{Eq. 30})$$

où le paramètre de non-centralité δ peut être choisi égal au NSSE (fonction des mesures actuelles) ou déterminé à partir d'une loi du χ^2 non centrée et d'une probabilité de fausse alarme p_{fa} .

Le calcul de HPL revient à borner l'erreur d'estimation $\|dX - d\hat{X}\|$. D'après (Le Marchand 2010), borner l'impact maximal d'une erreur dont le NSSE est connu revient à reporter l'ensemble de l'erreur sur la mesure qui a le plus grand impact sur l'estimation de l'état, soit :

$$\|dX - d\hat{X}\| < \max_i \sqrt{\sum_{j=1}^4 (H_{(j,i)}^+)^2} \times MDB \quad (\text{Eq. 31})$$

Avec H matrice d'observation du système et H^+ est la pseudo-inverse de la matrice H .

Le calcul de HPL défini en (Eq. 31) repose ainsi sur la prise en compte de l'erreur de mesure ayant le plus d'impact sur la solution de localisation

$$HPL = \max_i \left(\frac{\sqrt{A_{N,i}^2 + A_{E,i}^2}}{\sqrt{S_{ii}}} \right) \times \sigma \times \sqrt{\delta} \quad (\text{Eq. 32})$$

où σ est l'écart-type des erreurs de mesures de pseudo-distances.

$A = (H^T H)^{-1} H^T$ et S est une matrice qui lie les résidus à l'erreur de mesure $S = I - HH^+$.

b. Les limites du concept en environnement urbain et le besoin de nouvelles solutions

Cette section a fait l'objet du workshop organisé pour le GERI LIO le 15 décembre 2015 à Villeneuve d'Ascq et se rapporte à l'état de l'art réalisé par Ni Zhu pour sa thèse. L'état de l'art sur les systèmes de suivi de l'intégrité GNSS en urbain fait l'objet d'un article soumis à la revue IEEE ITS en mars 2017.

Comme largement développé dans les chapitres précédents, rappelons ici que l'environnement transport en général et urbain en particulier ne correspond plus aux conditions nominales exposées ici. La densité de probabilité $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$ n'est pas applicable aux réceptions après réflexion en particulier et l'application du calcul d'un niveau de protection tel que réalisé dans l'aéronautique ne borne plus les erreurs vraies.

La figure 63 (Source Ni Zhu) montre l'évolution d'un HPL et du HPE, sur des données acquises par le laboratoire Geoloc à Nantes. La courbe verte représente la largeur de la rue sur laquelle circule le véhicule. Le HPL est calculé grâce à l'équation 32. La valeur de σ est estimée par les algorithmes DPM de Nicolas Viandier (avec, à chaque instant t , $\sigma = \max_i \sigma_i$, où σ_i est l'écart-type de l'erreur estimée pour le satellite i à l'instant t).

On notera que la première partie du trajet (temps compris entre 0 et 5000 s) est dans une rue très large, ce qui favorise une bonne visibilité alors que la deuxième partie est beaucoup plus contrainte.

On remarque que :

- Le HPL est utilisable dans la première partie, car il a une valeur inférieure à la largeur de la rue. Dans la zone dense, par contre, il atteint des valeurs très grandes qui rendent son usage inexploitable (le système n'est pas capable de distinguer dans quelle rue circule le véhicule). Seuls 31% des HPL sont inférieurs à la largeur de la rue.

- Toutes les erreurs ne sont pas bornées. Le système est intègre pendant 92% du trajet. On voit dans la zone $t=[400-500s]$ que HPE est supérieur à HPL.

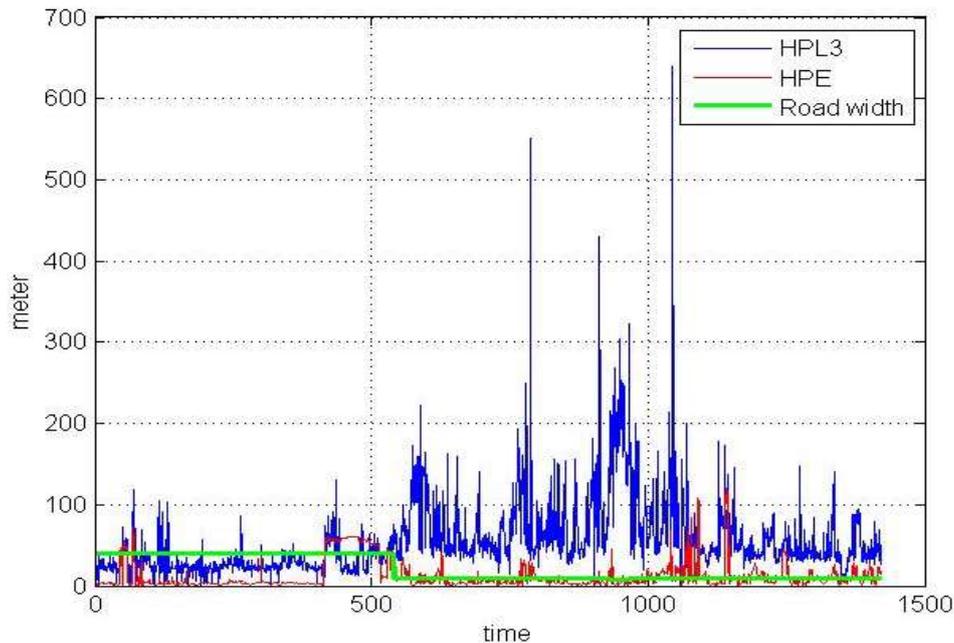


Figure 63. Exemple de calculs de HPL le long d'un trajet urbain routier (Ni Zhu), comparés à HPE et à la largeur de la rue.

Cette notion d'intégrité est utile tant au ferroviaire qu'au monde routier des ITS. Les applications routières ont en effet besoin aujourd'hui de confiance pour les applications de sécurité comme les ADAS (Advanced Driver Assistance System) mais également pour tout le volet d'applications critiques d'un point de vue légal comme le péage électronique. Dans le domaine ferroviaire, cette notion est liée aux besoins de démontrer la sécurité avec les méthodes FDMS (Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité – cf. paragraphe c). Aujourd'hui, les projets européens ayant appliqué le concept d'intégrité l'ont appliqué tel que défini dans l'aéronautique et sans évaluer la pertinence des bornes d'erreurs par rapport à l'erreur vraie. Nous avons fait l'état de ces travaux dans [R1] pour le domaine ferroviaire et conclu qu'il était nécessaire à court terme : 1/ d'analyser ces résultats et 2/ de proposer un niveau de protection plus adéquat.

Un niveau de protection idéal serait un niveau de protection juste supérieur à l'erreur vraie, et partout (Figure 64). Le HPL borne ainsi les erreurs sans dégrader les performances de l'application en s'assurant un niveau de protection trop grand.

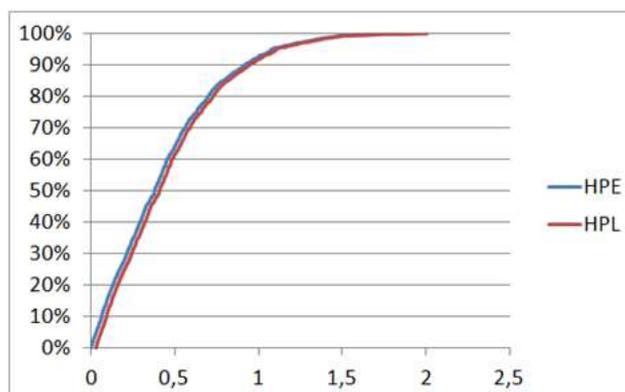


Figure 64. HPL idéal bornant le HPE sans surestimer le niveau de protection (Source J. Cosmen).

L'une des méthodes classiques utilisées pour garantir que le HPL couvre bien les erreurs vraies consiste à surestimer les erreurs. Ces méthodes s'appellent « overbounding techniques ». Elles sont décrites dans (Lee 2009). Elles sont en particulier utilisées dans les systèmes d'augmentations locaux (LAAS) destinés à l'aviation. Dans ces applications, une antenne de référence, placée en zone dégagée de tout obstacle, est utilisée pour estimer la distribution des erreurs de mesure de pseudo-distances. Pour assurer la couverture des erreurs mesurées par l'avion à l'approche, même lorsque la distribution se trouve être non Gaussienne et de moyenne non nulle, la distribution est « gonflée » en multipliant la variance nominale par une constante k à définir, soit :

$$\sigma_{overbounding} = k \times \sigma_{nominal} \quad (\text{Eq. 33})$$

Cette approche est très conservatrice, au sens où la taille du PL est surdimensionnée pour limiter le risque d'intégrité, comme illustré par (Pullen 2002) dans le cas d'un PL vertical pour l'aéronautique. De plus ces approches sont destinées à modéliser les erreurs en mode nominal mais ne bornent pas les erreurs locales et ne sont donc pas appropriées en urbain, comme le montre (Ali, 2012) sur des mesures expérimentales réalisées à Munich.

Enfin, (Ober 2001) pose la question de la modélisation des queues de distribution (figure 65). Ces queues représentent des événements de grandes amplitudes mais très peu fréquents et sont importantes dans le calcul de l'intégrité et méritent d'être connues et correctement modélisées dans l'objectif de la certification.

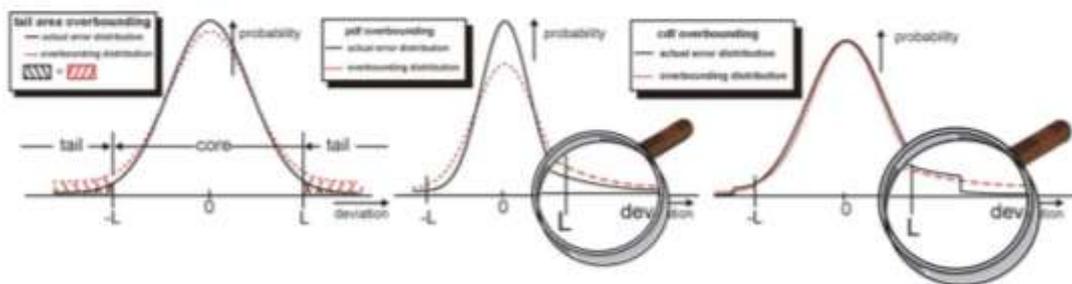


Figure 65. Trois façons différentes de gonfler une distribution d'erreur non gaussienne par une distribution gaussienne gonflée (Ober 2001).

Dans le cas d'une réception en environnement urbain, les hypothèses et les modèles de l'aviation sont donc à remettre en cause tant les conditions de réception des signaux diffèrent.

Dans les environnements contraints, il est fréquent que plusieurs mesures, si ce n'est toutes, subissent des phénomènes de propagation conduisant à des erreurs importantes de mesure. Par conséquent, l'hypothèse d'une défaillance unique appliquée dans les méthodes classiques de calcul du HPL telle qu'utilisée dans le RAIM n'est plus vérifiée. De plus, l'exclusion de tous les signaux concernés, en plus d'une disponibilité déjà réduite par le masquage environnant ne permet plus un niveau de disponibilité du système suffisant pour être intéressant. Les techniques de type MRA sont donc mal adaptées. Des adaptations du RAIM ont été proposées ajoutant un processus de détection itératif pour prendre en compte l'identification et l'exclusion de plusieurs observations (Kuusniemi 2005) tels que le processus Forward-Backward. (Borio 2016) adapte ce concept dans le cas d'une solution multi constellations (GPS/Galileo) en ajoutant une vérification préliminaire de la robustesse de la géométrie des satellites reçus. Pour comparer les différents FDE, il convient de considérer autant la précision obtenue après exclusion, que le temps de calcul ou encore la largeur des PL. Ce travail de comparaison est publié dans [CI2] que nous présentons plus loin.

Dans la littérature, le seul concept spécifique au domaine routier est l'algorithme IBPL (Isotropic-Based Protection Level) développé par GMV (Azaola-Saenz 2009). L'approche IBPL est une approche

de type ECA. Le calcul de PL proposé repose sur le vecteur de résidus estimé par la méthode des moindres carrés. Ce vecteur est utilisé pour caractériser les erreurs de position.

L'hypothèse de départ est que le vecteur des erreurs de mesure a une distribution isotropique, c'est-à-dire, que le vecteur des erreurs peut pointer dans toutes les directions de l'espace de mesure avec la même probabilité.

Pour prendre en compte à la fois ces résidus et la géométrie des satellites, le calcul de PL devient :

$$HPL = k ||r|| HDOP \quad (\text{Eq. 34})$$

où r est le vecteur de résidus des moindres carrés et k est une constante reliant la taille des résidus à l'erreur d'estimation de l'état.

k dépend du niveau de protection visé $1 - \alpha$ (α est le risque d'intégrité) ainsi que du nombre de mesures N utilisé pour l'estimation et est appelé le ratio de confiance isotropique (ICR – Isotropic confidence ratio). Des tables pré-calculées de valeurs de k en fonction de α et de N sont fournies dans (Azaola-Saenz 2009).

L'IBPL est très sensible au nombre de mesures. Lorsque les redondances de mesures sont faibles, les résidus sont moins fiables pour représenter les erreurs. Par conséquent, dans les zones de faible visibilité comme les zones urbaines, les niveaux de protection calculés sont encore trop grands pour être pleinement satisfaisants. L'IBPL est par contre favorisé par l'utilisation de solutions multi constellations. La version applicable aux solutions basées sur le filtrage de Kalman plutôt que sur les moindres carrés est en cours de brevet par GMV (KIPL – Kalman Integrated Protection Level) et quelques résultats ont été présentés dans (Navarro Madrid 2015). Elle fait partie des solutions évaluées dans différents environnements et présentés par (Moriani 2015). En urbain, la moitié des mesures de HPL sont supérieures à 41,47 m. L'avantage de cette proposition est son application aux systèmes faibles coûts reposant sur un filtre de Kalman et des performances accrues. Mais le niveau de protection de 40 m reste important pour nombre d'applications. Pour exemple, le groupe d'experts de la SNCF réunis depuis 2014 pour affiner le besoin en matière de localisation GNSS considère qu'une valeur maximale de 20 m serait souhaitable.

En pratique, un calcul de niveau de protection capable de couvrir l'ensemble des erreurs sera difficilement compatible avec des besoins applicatifs parce que les PL seront très grands (Cosmen-Schortmann 2008). Une solution consiste à trouver un équilibre entre ces deux approches : l'application d'un MRA ou de techniques de réduction des bruits (Shytermeja 2014) avant la mise en œuvre d'un ECA. Nous reviendrons sur cette piste et sur cet article, qui fait écho aux travaux réalisés dans CAPLOC, dans les perspectives de travail.

Vers un concept d'intégrité d'un système GNSS pour l'environnement urbain – Thèse de Ni ZHU.

Afin de répondre aux problématiques développées ci-dessus, la thèse de Ni Zhu, en collaboration avec David Bétaille, IFSTTAR/GEOLOC et Marion Berbineau, IFSTTAR/Cosys vise à proposer de nouveaux concepts pour la surveillance de l'intégrité de localisation en urbain. Le stage de Tongsu Xue (2016) y est associé.

Les travaux réalisés dans le cadre des thèses de Nicolas Viandier, Fleury Nahimana et dans le projet CAPLOC ont apporté un certain nombre de techniques de détection, d'exclusion ou de réduction des effets des satellites NLOS. Ils ont permis de rendre la position plus précise en environnement urbain mais pas de quantifier la confiance dans la position. Si l'on se réfère au schéma proposé par (Shytermeja 2014), figure 66, nous avons contribué à l'étape d'amélioration de la précision et il s'agit aujourd'hui d'ajouter un étage de calcul de l'intégrité de la solution proposée pour obtenir une position plus précise et sûre.

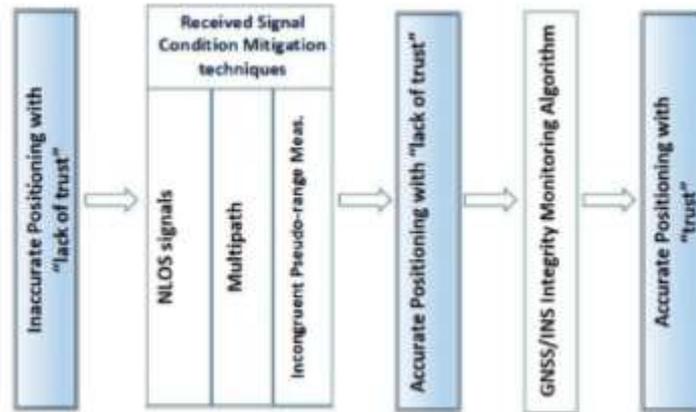


Figure 66. Structure de technique de surveillance de l'intégrité proposée par (Shytermeja 2014)

Nous avons mentionné ci-dessus différents concepts. Les principales propositions de la littérature sont les solutions RAIM et l'IBPL (Isotropy Based Protection Level). Le concept d'IBPL présenté par (Cosmen-Schortmann 2008) ne réalise pas de rejet de mesure. Elle permet une plus grande disponibilité en environnement transport puisque qu'elle ne nécessite, de fait, que 4 mesures contre 6 pour le RAIM mais surestime les bornes du niveau de protection. La proposition de (Shytermeja 2014) reprend exactement le processus de rejets des satellites NLOS que nous proposons dans CAPLOC (2009), associé à l'implantation d'un algorithme de poursuite de type VDFLL (Vector Delay/Frequency Lock Loop) pour atténuer les effets des multitrajets (réception d'échos en présence de LOS) pour améliorer la précision de localisation. L'article discute ensuite l'intérêt des deux solutions RAIM et IBPL.

A partir de cet état de l'art, le travail de thèse de Ni Zhu consiste à proposer de nouvelles solutions adaptées à l'environnement urbain.

Dans la première partie de sa thèse, Ni Zhu a implémenté un algorithme IBPL pondéré. Le poids retenu est le poids proposé dans le projet CAPLOC, fonction du C/N0 et de l'élévation et de l'état de réception. L'état de réception est issu des détections des zones ciel et non ciel du projet CAPLOC. Les valeurs de probabilité de fausse alarme et de détection manquée p_{fa} et p_{md} ont été fixées à $p_{fa} = 1.10^{-5}$ et $p_{md} = 1.10^{-3}$. Les résultats montrent que la pondération permet de réduire la taille des HPL tout en restant supérieure à l'erreur vraie. Les deux figures 67 présentent ainsi des résultats de HPL pour trois risques d'intégrité fixés calculés sur la trajectoire de Belfort utilisée dans CAPLOC sans pondération à gauche et avec pondération à droite.

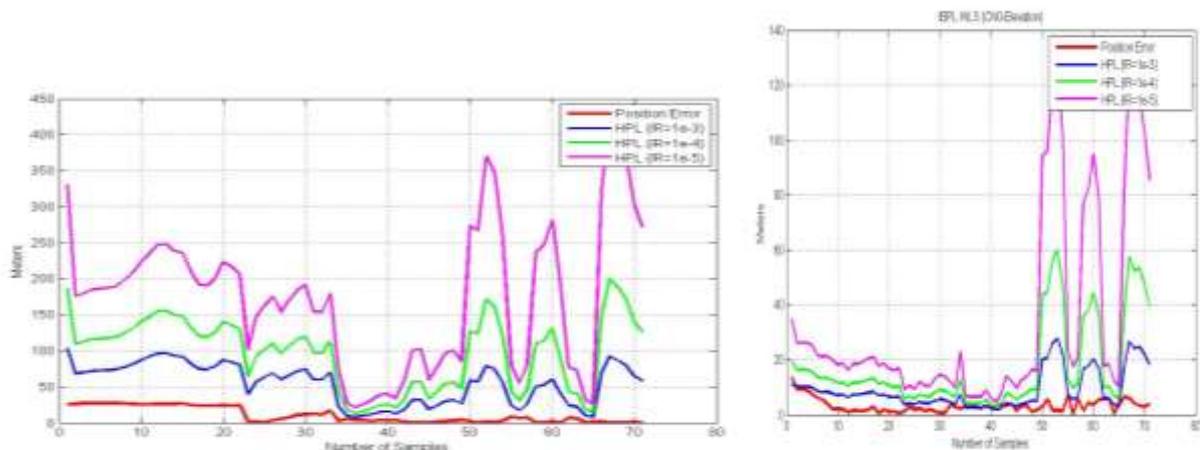


Figure 67. HPL obtenus par IBPL à gauche et IBPL pondéré à droite, à partir de données réelles acquises à Belfort dans le projet CAPLOC.

Si la plupart des solutions, comme le RAIM ou l'IBPL, caractérisent l'erreur sur la pseudo-distance pour le calcul du PL, d'autres auteurs, comme (Bin Ahmad 2014) ont choisi, pour s'affranchir de la caractérisation des effets des NLOS sur les mesures, de caractériser l'erreur dans le domaine des positions.

(Bin Ahmad 2014) s'appuie sur une campagne expérimentale pour montrer qu'une distribution des HPE de type Rayleigh en environnement ouvert et Pareto en environnement urbain ou suburbain s'approchent davantage des erreurs réellement observées. Le travail sur la position ne permet cependant pas la détection isolée d'une défaillance sur un signal et les perspectives suggèrent le travail sur les deux domaines : pseudo-distances et position.

D'autres travaux portent ou ont porté sur la caractérisation des erreurs de pseudo-distance dans le but de contribuer à un calcul de PL plus proche de la réalité, et qui, en particulier, tienne compte des erreurs liées aux multitrajets et aux réceptions NLOS.

Dans la section 4 de ce document, nous avons présenté les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Nicolas Viandier, qui nous ont conduit à modéliser les erreurs de pseudo-distances en urbain dans un objectif d'amélioration de la précision de localisation. Dans une deuxième partie de ses travaux, Ni Zhu étudie comment ces modèles d'erreurs, dynamiques et réalistes, peuvent être utilisés pour un calcul de HPL. Le stage de Tongsu Xue s'est inscrit dans cet axe. Pour [CI2], Ni Zhu a implémenté et comparé plusieurs solutions conjuguant estimation par moindres carrés pondérés et techniques de FDE cités dans la figure 68.

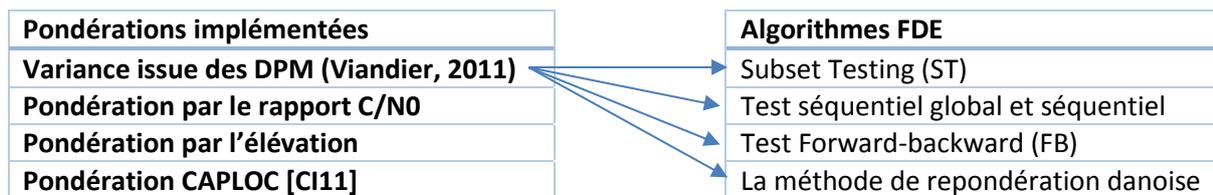


Figure 68. Méthodes implémentées et comparées de pondération et FDE [CI2].

Dans la solution CAPLOC, la détection des satellites LOS et NLOS est réalisée grâce à la connaissance préalable de l'environnement (données du projet INTURB) et permet de différencier les poids des satellites LOS et NLOS. Après évaluation des pondérations seules, c'est la méthode CAPLOC qui a montré les performances les plus intéressantes avec une précision au 95^{ème} percentile de 12,91 m alors que l'absence de pondération donne 59,75 m et la pondération par DPM 24,70 m. L'algorithme utilisé pour les DPM est l'algorithme tel que paramétré par Nicolas Viandier pour des données acquises à Belfort. Nous allons ajuster ces paramètres pour obtenir des performances plus intéressantes avec cette méthode à l'avenir.

Cette solution a été choisie pour évaluer l'apport des solutions de FDE en plus de la pondération. Les précisions moyennes obtenues sont assez proches quelles que soient les méthodes : de l'ordre de 3,2 m à 3,7 m. La méthode ST est la plus performante en matière de précision mais souffre d'un temps de calcul trop important. La méthode FB est précise mais moins disponible en raison d'un nombre d'exclusions important.

Les prochaines étapes de travail consisteront à évaluer l'apport de ces méthodes sur les calculs de HPL.

c. L'application ferroviaire et ses problématiques de sûreté de fonctionnement.

Problématique [R18][J3]

La localisation joue un rôle important dans les transports ferroviaires. En effet, cette information est utilisée par de nombreux systèmes ferroviaires comme le système de signalisation dédié au contrôle,

à la commande et à la protection de l'exploitation des trains ou les passages à niveaux déclenchant la fermeture de barrières à l'approche d'un train. Elle est également utilisée lors de différentes opérations telles que les opérations de maintenance pour localiser précisément les défauts de voie ou de rail. Toutes les applications ne requièrent cependant pas les mêmes performances de localisation en précision, disponibilité ou intégrité. Ce qui va en particulier distinguer le ferroviaire des autres modes de transport est lié à la gestion de la sécurité ferroviaire.

Dans le cadre du projet LOCOPROL, la nécessité d'explorer les méthodes d'analyses des risques liés à un système GNSS et de quantification des probabilités de défaillance s'est révélée. Des discussions ont été amorcées alors avec des spécialistes de sûreté de fonctionnement (SdF) de l'UTT (Université Technologique de Troyes) et le laboratoire ESTAS de l'INRETS qui ont conduit aux collaborations avec Vincent Bénard puis Julie Beugin, tous deux spécialistes SdF. Ce thème de recherche sur lequel nous nous sommes positionnés ensemble, pour conjuguer les compétences sûreté de fonctionnement (SdF) et la connaissance du système GNSS et de ses performances, ont constitué une approche nouvelle dès 2007, encore peu explorée par d'autres aujourd'hui.

Pour intégrer, dans un système ferroviaire, un nouvel équipement/fonction/système contribuant à la sécurité des opérations, les normes de sécurité ferroviaire préconisent d'analyser la sûreté de fonctionnement de cet équipement. Une analyse de SdF est une démarche qui permet de quantifier la confiance que l'utilisateur peut avoir en un système selon des grandeurs probabilistes FDMS (Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité). Elle s'appuie sur des méthodes qui identifient les défaillances existant au sein du système et leurs conséquences sur la défaillance ou non du système dans son ensemble. Il s'agit d'une démarche démontrant, de manière générale, la qualité du nouvel équipement. Pour vérifier le respect des directives ferroviaires européennes, il s'agit de quantifier le niveau d'intégrité de sécurité (Safety Integrity Levels - SIL) du nouveau système. Le SIL est fonction de deux paramètres de sûreté de fonctionnement : la probabilité moyenne de défaillance à la demande PFD_{avg} (Average Probability of Failure on Demand) et la probabilité de défaillance dangereuse par heure PFH (Probability of a dangerous Failure per Hour).

Une grande partie de la difficulté réside dans la démonstration de l'aptitude du service GNSS à remplir ses fonctions requises selon les concepts définis dans le domaine ferroviaire. En effet, les GNSS sont conçus à l'origine pour répondre aux besoins aéronautiques, domaine dans lequel la sécurité n'est pas appréhendée de la même manière que dans le ferroviaire. Ainsi les performances des systèmes de navigation par satellites ne sont pas définies en termes FDMS mais selon les concepts de précision, intégrité, continuité et disponibilité définis par rapport au concept de RNP (Required Navigation Performances) introduits par l'organisation de l'aviation civile internationale pour spécifier les besoins opérationnels dans le domaine aéronautique.

Les travaux menés sur cette thématique concernent plusieurs sous-axes :

- Le lien entre performances GNSS et FDMS, en particulier la formalisation de concepts d'intégrité adaptés aux systèmes de localisation multi capteurs
- Les méthodes d'évaluations de la SdF de solutions GNSS :
 - o Démarche fondée sur des données de retour d'expérience
 - o Développement de nouveaux outils de modélisation et de simulation

Ces travaux ont fait l'objet de 5 rapports de recherche [R11, 14, 15, 17, 18], de 4 revues [J5, 9-11] et de 12 conférences internationales, tous avec Julie Beugin.

Lien entre les performances GNSS et les FDMS

Les travaux que nous avons menés avec Julie Beugin, et pendant quelques mois avec Ales Filip, chercheur de l'université de Pardubice, République Tchèque, ont donc porté, dans un premier temps, sur la compréhension et l'interprétation des performances GNSS selon les concepts ferroviaires.

Nous avons par exemple montré [A3][CI46-47] qu'il existe une analogie entre les attributs de SdF et les paramètres de performances des systèmes de navigation (Figure 69).

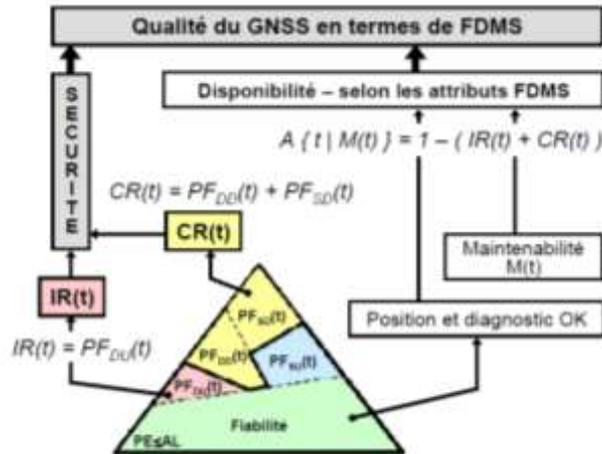


Figure 69. Analogie entre les performances GNSS et les paramètres FDMS [R12].

Ces différentes définitions de performances et leurs liens ont été intégrées au catalogue *Iglos* de l'université de Braunschweig dans le cadre du projet QualiSaR et du travail d'Olimpia Hoinaru [CI14][R14].

Méthodes d'évaluations de la SdF de solutions GNSS :

Si Marion Berbineau et moi avons été à l'origine de cette thématique, en identifiant notamment ces problématiques comme particulièrement importantes, c'est aujourd'hui Julie Beugin qui mène l'essentiel de ces travaux avec ses compétences en sûreté de fonctionnement. Ces travaux ont leur place dans ma démarche globale mais n'étant pas l'actrice principale de ces résultats, j'ai choisi de mentionner ces travaux sans les développer dans ce mémoire.

Différentes méthodes peuvent mener aux évaluations probabilistes FDMS (Villemeur 1988). Les méthodes dites prévisionnelles s'appuient sur les combinaisons logiques de défaillances menant à la défaillance du système et sur les caractéristiques probabilistes de chaque élément du système ou composant (comme leur taux de défaillance). Les méthodes d'évaluation de SdF dites opérationnelles s'appuient sur la collecte de données de retour d'expérience.

Dans l'étude GARA réalisée pour la DGMT, nous avons mené des études de type opérationnelles à partir de données de simulation [CI36][J9] et de données expérimentales [R15]. Les données de mesure utilisées dans GARA ont été fournies par Alstom et acquises à l'aide d'un récepteur Septentrio de type PolarX2 sur la ligne ferroviaire régionale 132 belge dédiée au trafic de voyageurs. Les jeux de données expérimentaux permettent de calculer un certain nombre d'indicateurs de SdF tels que la disponibilité de l'information de position, les indicateurs MUT (durée moyenne de fonctionnement ininterrompu) et MDT (durée moyenne de non fonctionnement) ainsi qu'un indicateur de continuité de service (durée de fonctionnement sans interruption).

Dans le projet PREDIT Tr@in-MD [CI42, 44], puis dans le projet européen GaloROI [CI12], c'est le comportement probabiliste du système qui a été étudié. Dans Tr@in-MD c'est un modèle de type réseaux de Pétri (RdP) qui a été développé. Les réseaux de Pétri permettent de modéliser les différents états de fonctionnement et de dysfonctionnement du système [A2] dans le temps. Le modèle de Pétri utilisé est composé d'une partie déterministe et d'une partie stochastique. La partie déterministe modélise le comportement en prenant en compte des délais et des instants d'occurrence d'évènements. Le comportement déterministe est associé aux états de réception des

signaux et au critère de DOP (Dilution Of Precision – critère caractérisant la géométrie des satellites reçus). Le système est considéré comme défaillant lorsque les signaux sont indisponibles ou lorsque leurs conditions de propagation dégradent la mesure (typiquement NLOS). Le comportement probabiliste se réfère à la réponse du système lors d’une requête de l’utilisateur. Si le système n’est pas capable de fournir une position (parce que le nombre de signaux reçus est insuffisant ou parce que l’étape d’acquisition des signaux n’est pas encore achevée), le système est déclaré non opérationnel. La figure 70 représente le traitement de données issues de simulation par lancer de rayons (Visibilité satellitaire, SNR – rapport signal sur bruit, DOP – critère de géométrie des satellites reçus).

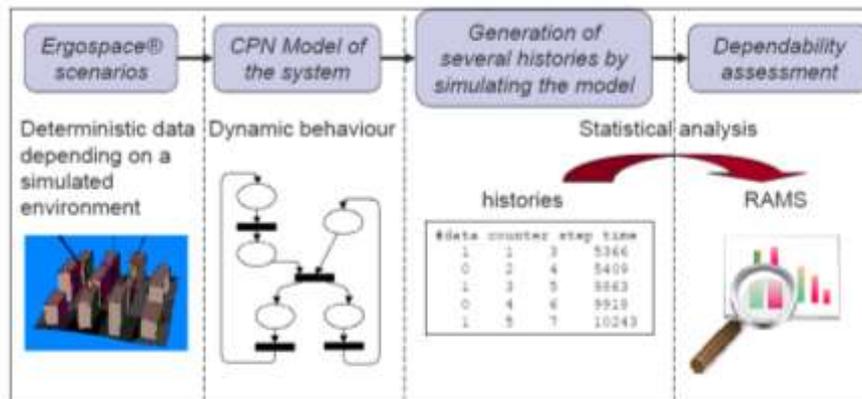


Figure 70. Scénarios simulés pour l’étude probabiliste des défaillances dans Tr@in-MD [CI42].

Dans GaloROI, deux approches ont été menées. Une approche qualitative utilisant les arbres de défaillances [CI8] puis des arbres de défaillances étendus (eFT – extended Fault Tree) détaillés dans [J3] ont été mis en œuvre pour identifier les causes de défaillances. Les approches développées avec l’arbre de défaillances étendu ont permis de prendre en compte le caractère multi-états du système et leur « réparabilité » (un état défaillant n’est pas définitif). L’approche quantitative par réseaux de Pétri est utile pour calculer les probabilités d’évènements identifiés dans l’arbre. Le système étudié a comporté non seulement un récepteur GNSS mais également un capteur à courant de Foucault intégré dans le projet.

Ces méthodes d’évaluation FDMS de systèmes de localisation par satellites sont innovantes et devront permettre à l’avenir d’évaluer les performances de systèmes qui s’appuient sur l’utilisation de signaux GNSS en les comparant aux besoins. Un travail important reste cependant l’expression des besoins. Il a été amorcé dans le cadre d’un groupe de travail SNCF auquel j’ai participé au printemps 2016.

Contrôle d’intégrité d’un système hybride GNSS/INS pour le ferroviaire

Cette partie est rédigée à partir de la thèse de Cyril Legrand, financé par Railenium, et a fait l’objet d’une revue [J4], et de 3 articles en conférences internationales [CI4, 10, 13].

Avec la thèse de Cyril Legrand, nous avons choisi d’étendre le système à un système multi-capteurs classique c’est-à-dire composé d’un système INS (Inertial Navigation System) et d’un récepteur GNSS tel que réalisé dans certains des projets européens passés tels que Apollo, Gaderos ou Integrail. La thèse vise à contribuer à l’évaluation de la sécurité de ces systèmes. Elle est composée de deux principales contributions :

- La première est une analyse de sensibilité [CI13] et une analyse causale [CI10]. Ces analyses ont été proposées afin de déterminer l’influence des erreurs sur chacun des capteurs d’un système de localisation hybride sur la solution proposée et d’identifier les combinaisons de défaillances critiques, comme une aide à proposer pour le choix de l’architecture.

- Pour la deuxième contribution, nous avons établi un lien entre l'intégrité GNSS et le concept de sécurité ferroviaire avec une relation entre la probabilité de risque sur l'intégrité (GNSS) et la probabilité de défaillance liée à la sécurité (ferroviaire).

Dans sa thèse, Cyril Legrand a quantifié, sur un système hybride classique GNSS/INS, le risque d'intégrité lié à l'évènement « l'erreur de position dépasse une limite d'alerte sans être détectée dans un temps donné ». Il s'agit ainsi de fournir un lien entre le THR (Tolerable Hazard Rate) classiquement quantifié dans le domaine ferroviaire et la probabilité du risque sur l'intégrité $p(IR)$.

Une hybridation serrée GNSS/INS a été simulée à partir de données GNSS réelles et de données INS simulées. Un algorithme de contrôle de l'intégrité a été mis en œuvre. Il détecte des pannes de type biais instantanés et erreurs à croissance lente.

- Les biais instantanés sont typiquement des erreurs causées par les phénomènes de multitrajets GNSS. La méthode repose sur la différence entre deux variables. Elle a été appliquée aux GNSS seuls par Feng (Feng 2007) et a été reprise par Cyril Legrand pour caractériser la pente de la rampe de l'erreur. La variable de test que nous avons retenue pour caractériser l'erreur est le *NSSE* (Normalised Sum of the Squared Errors – Somme des résidus au carré), qui permet la prise en compte de plusieurs erreurs simultanées sur les pseudo-distances.
- Les erreurs à croissance lente sont caractéristiques de l'accumulation des biais d'un système inertiel et de sa dérive.

La phase d'exclusion de la source défaillante souvent appliquée ensuite n'a pas été mise en œuvre dans cette étude. Un risque est identifié lorsque l'un des deux systèmes de détection est activé.

Le niveau de protection PL du système global a été calculé comme la valeur maximale de PL_{GNSS} , niveau de protection fourni par le mécanisme de détection des biais instantanés et de PL_{INS} , niveau de protection fourni par le mécanisme de détection des erreurs à croissance lente [J4]. Ce PL est représenté sur la figure 71 avec l'erreur de position vraie obtenue afin d'évaluer la capacité du système à borner l'erreur et de quantifier le taux de défaillances.

$$PL = \max(PL_{GNSS}, PL_{INS}) \quad (\text{Eq. 35})$$

avec
$$PL_{GNSS} = \max_j SLOPE_j \times P_{biais} \quad (\text{Eq. 36})$$

et
$$PL_{INS} = \max_j SLOPE_j \times P_{rampe} \cdot \max \Delta t \quad (\text{Eq. 37})$$

où P_{biais} et P_{rampe} sont respectivement l'erreur minimale détectable pour les biais instantanés et pour les erreurs à croissance lente ; $\max \Delta t$ est le plus grand des intervalles de temps utilisés lors de la détection des erreurs à croissance lente. Le détail des expressions de ces niveaux de protection est fourni dans la thèse de C. Legrand et est inspiré des travaux de (Le Marchand 2010).

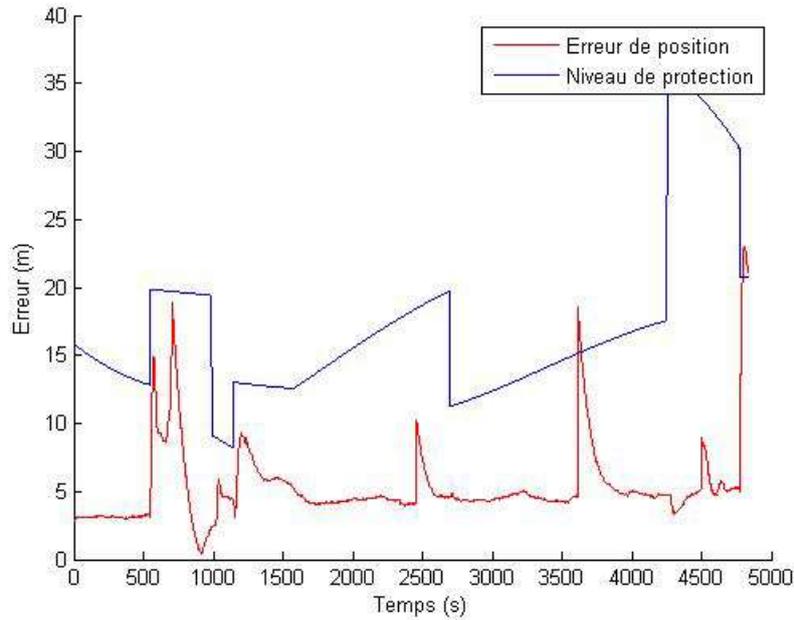


Figure 71. Evolutions des PE et PL pour un trajet aux alentours de Nantes avec le système hybride (GNSS données réelles et INS simulées).

Dans une application ferroviaire, le risque d'intégrité apparaît lorsque le risque n'est pas maîtrisé, c'est à dire quand l'erreur est mal bornée. Le contrôle de l'intégrité est défaillant et aucun des tests de détection de défaillance n'a émis d'alerte. Dans tous les autres cas, le contrôle fonctionne correctement et la sécurité n'est pas mise en jeu. Lorsque $PL > AL$, le système sera indisponible parce que le contrôle d'intégrité aura détecté une position potentiellement défaillante (peut-être parfois à tort – fausse alarme). Le train sera mis en sécurité, et donc vraisemblablement arrêté. Mathématiquement, la probabilité de défaillance dangereuse $f_s(t)$ est la somme des probabilités de défaillances dangereuses non-détectées $PF_{DU}(t)$ et de défaillances sécuritaires non-détectées $PF_{SU}(t)$.

$$f_s(t) = PF_{DU}(t) + PF_{SU}(t) \quad (\text{Eq. 38})$$

où $PF_{DU}(t) = P("PE > AL" \text{ ET } "PL < AL" \text{ ET } "test_{biais} \text{ négatif}" \text{ ET } "test_{rampe} \text{ négatif}"))$ Et $PF_{SU}(t) = P("PE < AL" \text{ ET } "PL < PE" \text{ ET } "test_{biais} \text{ négatif}" \text{ ET } "test_{rampe} \text{ négatif}"))$

Le dernier résultat de la thèse est la définition d'un concept d'intégrité étendue $IR_{étendu}(t_i)$, qui exprime le risque sur l'intégrité à l'instant t_i et qui tient compte des conditions menant aux états DU ou SU sur une période t_{marge_secur} . t_{marge_secur} est le temps de réaction maximal qui permet d'assurer un repli en sécurité. Le terme étendu désigne le fait que ces conditions à t_i sont étendues jusqu'à $t_i + t_{marge_secur}$.

Appliqué à plusieurs trajets longs (soit un peu plus de 11h toutes trajectoires cumulées), une probabilité de risque d'intégrité $p(IR)$ a été calculée. Cette probabilité est calculée à partir du nombre d'occurrences de détection manquées des biais instantanés et des erreurs à croissance lente.

Cyril Legrand a déduit les probabilités liées à la sécurité de ces données et de $p(IR)$ et la probabilité de défaillance dangereuse PFH de l'ordre de $9.87 \cdot 10^{-6}$ défaillances/heure. La comparaison avec les normes ferroviaires permet ainsi de quantifier le niveau SIL obtenu (ici SIL1) et de démontrer que le système ainsi évalué ne remplit pas les objectifs de risque sur l'intégrité nécessaires. Ces résultats ont été publiés dans [J4] et [CI4].

Les travaux réalisés dans cette thèse ont permis d'amorcer les travaux sur les méthodes de quantification du niveau d'intégrité d'une solution de localisation en termes ferroviaires. Le système hybride utilisé n'est pas adéquat ni optimal mais il a permis de démontrer la faisabilité du concept. Ces travaux sont clairement en phase avec les discussions en cours au niveau national et européen sur l'usage des GNSS dans les applications de signalisation et ouvrent de nombreuses perspectives quant à la pertinence des hypothèses choisies (choix du test sur les résidus, qualité de détection des biais, méthode de calcul des niveaux de protection...). Dans le projet STARS par exemple, la question de l'adéquation des solutions utilisant EGNOS est abordée. Il s'agira dans un futur proche d'étudier comment les spécifications d'EGNOS et son usage dans l'environnement de réception ferroviaire pourront être transposés en valeurs de SIL et si ces systèmes permettent d'atteindre un niveau de sécurité suffisant.

6 Conclusions

Les travaux de recherche que je mène en tant que chargée de recherche depuis 2002 ont été impulsés par ma thèse et ses perspectives. Les travaux que j'ai présentés dans ce mémoire ont montré l'évolution et la cohérence de mes axes de recherche depuis le développement de l'outil de prédiction de la disponibilité des satellites GNSS le long d'une trajectoire jusqu'aux recherches sur les possibilités de délivrer une information de localisation précise et sûre.

Le fil conducteur de l'ensemble de mes travaux est la connaissance et la modélisation des impacts du canal de propagation GNSS sur les performances GNSS. C'est le titre que j'ai choisi pour ce mémoire. Ce canal de propagation est ce qui rend les performances des systèmes de transport terrestres différentes des systèmes aéronautiques. Sa complexité est une contrainte pour le déploiement de nouvelles applications mais elle mérite d'être traitée tant le potentiel d'applications est grand pour les transports terrestres.

Dans le chapitre 2 de ce mémoire, j'ai rappelé le fonctionnement des systèmes GNSS et les problématiques spécifiques rencontrées en environnement urbain. Ce chapitre sert d'introduction à la suite du mémoire.

Dans le chapitre 3, j'ai résumé l'intérêt de connaître l'environnement de réception pour appréhender les performances GNSS. Ce chapitre décrit les bases de l'outil PREDISSAT, son concept, comment il a évolué au fil des années, s'est enrichi des compétences en traitement d'images et les résultats obtenus dans divers projets. Ces techniques ont montré leur impact sur les performances de l'outil dans les travaux présentés au chapitre 4.

Dans le chapitre 4, nous avons quitté l'analyse de l'environnement pour présenter l'apport de la connaissance de l'environnement dans l'amélioration de la précision de localisation. Dans le projet CAPLOC, nous avons montré que la connaissance déterministe de l'état de réception des satellites reçus permet de pondérer l'usage des signaux disponibles pour tirer au mieux profit des satellites LOS sans dégrader la disponibilité en excluant les satellites NLOS.

Dans les thèses de Fleury Nahimana et Nicolas Viandier, nous avons démontré que le modèle d'erreur en bruit blanc de moyenne nulle n'est pas réaliste en présence de signaux réfléchis. A partir d'une estimation statistique de l'état de réception, des techniques de filtrage ont été proposées. Elles associent à chacun des satellites reçus, directement ou non, son modèle d'erreur. Si la solution la plus avancée (DPM) proposée par Nicolas Viandier reste complexe à mettre en œuvre en temps réel, les résultats obtenus en précision sont enthousiasmants et ouvrent encore de nombreuses perspectives pour nos travaux sur l'intégrité.

Après avoir traité les questions de disponibilité et de précision, j'aborde dans le chapitre 5 la notion d'intégrité. La problématique liée à l'intégrité est la plus récente et constitue mon axe de recherche principal aujourd'hui. Le mode ferroviaire a été le premier à me conduire vers ces problématiques, puisque la question du potentiel des GNSS pour la sécurité a été très vite au cœur des débats relatifs à leur introduction ou non. Avec Julie Beugin, nous avons étudié ce critère de performance dans la culture ferroviaire.

Avec l'arrivée de véhicules autonomes, la question de l'intégrité de la localisation de véhicules urbains est plus que jamais d'actualité. L'application des concepts aéronautiques n'est pas pleinement satisfaisante dans les environnements urbains, nous nous attachons, avec la thèse de Ni Zhu, à participer aux travaux destinés à étendre ce concept aux erreurs typiques observées en urbain. Dans un deuxième temps, puisque la plupart des systèmes de localisation routiers l'appliquent, il s'agira également d'étudier l'impact du map-matching sur ce critère d'intégrité.

Depuis le début, ces axes sont guidés par les besoins des applications de transport terrestres, et en particulier par les applications à caractère sécuritaire, fortement contraignantes.

Au fil des projets et des thèses encadrées, je me suis efforcée de dresser des ponts entre différentes compétences et disciplines pour répondre au mieux au besoin et aux objectifs. Les collaborations avec Marion Berbineau, Emmanuel Duflos ou Julie Beugin ont permis d'enrichir mes idées avec des compétences en propagation des signaux, traitement du signal ou sûreté de fonctionnement. Ainsi, j'ai pu proposer plusieurs axes de travail sur la chaîne de traitement des signaux GNSS, couvrant les phénomènes amont au récepteur (canal de propagation) aux effets aval (modélisation des erreurs de pseudo-distances et leur traitement).

Les projets passés m'ont fortement orientée vers le domaine des applications ferroviaires. Les verrous y sont nombreux et constituent des défis importants. Mon expérience et la continuité de mon action dans ce domaine me confèrent aujourd'hui une expertise reconnue par les acteurs du domaine et une activité dans divers groupes de décision (Copil SCF, BNF/BNAE) particulièrement intéressants.

L'impact du canal de propagation n'est pas propre à ce mode de transport. Dans le domaine routier, les besoins et les perspectives sont nombreux. La plupart des travaux scientifiques présentés dans mon mémoire ne sont pas dépendants du mode de transport et la majorité des expérimentations ont été réalisés sur route. Les perspectives présentées dans la dernière partie de ce mémoire s'inscrivent dans cette même idée : l'amélioration des performances en environnement terrestre contraint, quel que soit le mode de transport

7 Perspectives

Ce mémoire est rédigé après 11 années passées en tant que chargée de recherche au sein de l'INRETS puis de l'IFSTTAR. La plupart des axes développés dans ce mémoire sont toujours riches de perspectives autant pour moi que pour les collègues avec qui ils ont été menés (propagation, traitement d'images, sûreté de fonctionnement...). Les perspectives directes ont été mentionnées au fil des chapitres, parmi lesquelles :

- L'apport des antennes polarisées pour la discrimination des états de réception des satellites LOS/NLOS (p40),
- La classification des états de réception des satellites affinée par traitement d'images, avec l'apport d'une classification des objets de l'image par types (bâti, végétation) (p51),
- La prise en compte de la direction du véhicule pour affiner le poids d'une méthode par moindres carrés (p61),
- L'utilisation conjointe de la vidéo et d'un modèle 3D pour la prise en compte des multitrajets (p63),
- L'utilisation de l'estimation en ligne des modèles de bruits pour un calcul d'intégrité de la position (p75),
- L'utilisation de techniques de réduction des multitrajets associées à un contrôle d'intégrité capable de réduire la probabilité de détection manquée, même en environnement contraint (p87).

Le contexte applicatif – vers les véhicules autonomes

Les deux dernières années ont vu l'explosion des développements autour du véhicule autonome notamment avec les véhicules routiers. Des navettes sur sites propres aux voitures autonomes et intégrées à la circulation, les démonstrations sont nombreuses et les acteurs se multiplient. Cet intérêt est guidé d'une part par le développement de technologies avancées, d'autre part par la médiatisation des démonstrations. Ces systèmes doivent améliorer le confort de conduite, la fluidité du trafic, la consommation d'énergie et réduire le nombre d'accidents (notamment liés aux erreurs humaines) ou encore la pollution (Litman 2013). De nombreux acteurs industriels de l'automobile ont récemment annoncé leur positionnement sur ce sujet. La localisation est l'un des éléments de leur développement. Dans ces applications, la position absolue doit être connue pour positionner le véhicule sur la carte ou encore pour le calcul d'itinéraire. Mais des performances plus exigeantes sont nécessaires pour la détection de la voie de circulation et la position du véhicule sur sa voie. Ces performances nécessitent la fusion du récepteur GNSS avec d'autres capteurs (odomètre, gyromètre, centrale inertielle) ainsi qu'une intégration des cartes (Zinoune 2014). Les capteurs de perception (radar, lidar, caméra)(Tao 2016) permettent de repérer les marquages au sol et de positionner le véhicule relativement à la voie mais aussi aux obstacles.

L'utilisation des cartes pour la navigation est un sujet de recherche à part entière, que je ne souhaite pas investir en profondeur mais qui sera envisagé en collaboration avec David Bétaille et Philippe Bonnifait de l'Université Technologique de Compiègne. Dans sa thèse, Ni Zhu va étudier l'apport du map-matching au contrôle de l'intégrité en environnement urbain.

Si l'on considère, par contre, comme (Zinoune 2014) la carte comme un outil d'information a priori de l'environnement, la carte sera un élément incontournable dans l'idée du récepteur dépendant de son contexte présenté ci-dessous. Et l'un des enjeux sera de garantir que la solution aidée par la carte ou la BDD est intègre. La question de l'intégrité de la carte sera un élément important. Je participe actuellement au montage d'un projet visant à définir ces besoins pour les applications de transport terrestre avec Thales, l'IGN et David Bétaille.

De la même façon, je ne souhaite pas investir le terrain des systèmes multi-capteurs largement traités par d'autres équipes, mais je souhaite plutôt que les travaux menés sur le récepteur GNSS et

sa solution puissent enrichir des solutions multi-capteurs et à ce titre collaborer avec ces équipes en considérant pour le récepteur de nouveaux types d'algorithmes de positionnement.

Dans le ferroviaire, la réflexion sur l'autonomisation du train est également en cours. Elle est décrite en 5 étapes ou « grades of automation » :

Grade of Automation	Train operation	Description
GoA 0	On sight	Driving on sight (e.g. operation of tramways, shunting)
GoA 1	Train drive with /without ATP	Driving under the full responsibility of the driver mostly with automatic train protection (ATP)
GoA 2	Automatic Train Operation (ATO) Semi Automatic Train Operation (STO)	Automatic train operation but driver supervises the driving (incl. the change of passengers within the stations)
GoA 3	Driverless Train Operation (DTO)	Driverless train operation but staff onboard of the train for emergency situations
GoA 4	Unattended Train Operation (UTO)	Fully automatic driving without any staff onboard

La réflexion est conduite au niveau européen dans le cadre de Shift2Rail comme au niveau national. La place de la localisation dans ces applications va devoir être définie, les performances attendues quantifiées et les solutions développées dès aujourd'hui pour des applications ERTMS doivent intégrer ces besoins futurs pour prévoir leur compatibilité ou leurs évolutions nécessaires à ces stades. Nul doute que ces solutions devront être sûres et fiables (Meyer zu Hörste 2017). Je ferai en sorte que les travaux que j'ai mis en œuvre et les perspectives évoquées plus hauts s'inscrivent dans ces futures applications.

On pourra enfin citer le drone, comme véhicule aérien potentiellement autonome également (Nieuwenhuisen 2015) et pouvant faire face aux contraintes environnementales comme les véhicules terrestres lors de phases de navigation à basse altitude.

Ces futures applications ne modifient pas le fil conducteur de mes travaux. Ils poussent au contraire à apporter davantage de précision et d'intégrité et renforcent l'intérêt et le besoin de systèmes de localisation.

En tenant compte du contexte que je viens de rappeler, mes perspectives sont structurées en quatre sujets. Le premier vise l'usage du potentiel des nouvelles technologies GNSS (RAIM et déclinaisons, multi-fréquences, multi-constellations...). Il vise avant tout à consolider mes compétences sur ces sujets mais aussi à en extraire les potentiels de recherches. Le deuxième sujet s'inscrit dans la suite de mes travaux. Il porte sur le développement d'un concept de solutions dépendantes du contexte environnemental. Le troisième cible plus spécifiquement les applications ferroviaires dans lesquels je souhaite poursuivre mon rôle fédérateur et d'expertise que j'ai acquis aujourd'hui. Dans un dernier point, j'ouvrirai une nouvelle voie de recherche sur l'apport des technologies de communication de 5^{ème} génération à la localisation.

a. Techniques avancées de localisation

L'amélioration de la précision GNSS présentée dans ce mémoire repose essentiellement sur l'usage des solutions bas coûts les plus simples. Les solutions GNSSs sont cependant aujourd'hui plus vastes et méritent d'être étudiées et testées. Le panorama de ces nouvelles technologies doit être étudié et

comparé : récepteurs multifréquences, multi-constellations, techniques de FDE et RAIM (abordées avec la thèse de Ni Zhu), apports d'EGNOS et de sa capacité à répondre au besoin dans les environnements contraints... **Ces travaux permettront d'accroître notre maîtrise de ces technologies et de proposer des voies de recherches pour pallier les faiblesses de ces solutions dans les applications transport.** Dans le cas du ferroviaire, il paraît nécessaire d'envisager la contrainte imposée par la voie et de réduire le calcul de la position à 1D (Neri 2016) et de mettre en œuvre des techniques de détection et d'exclusion adaptées (Grosch 2017).

Ces sujets feront partie des nouvelles techniques étudiées dans les projets et thèses à venir (sujet de thèse rédigé avec SNCF Réseau et Railenium ou projets Shift2Rail à court terme). La combinaison de ces technologies est envisagée comme réponse au besoin de précision mais aussi pour son utilisation à des fins sécuritaires. Les applications sont nombreuses et attendues en particulier pour : le routage de systèmes de télécommunications, le développement du train autonome ou encore la conception d'un EVC portable (European Vital Computer - l'ordinateur embarqué) permettant aux trains non équipés du système ERTMS de circuler sur des voies ERTMS.

b. Vers des solutions dépendant du contexte

Les pistes de travail issues de PREDISSAT et évoquées dans [CI63] [CI60] ou [ST33] proposant la mise en œuvre d'une base de données embarquée contenant des informations liées à l'environnement de réception n'ont pas été suivies ces dernières années, faute de temps et de ressources. Les échanges récents autour du ferroviaire, de ses besoins d'intégrité (projet Rhinos) et la lecture de (Niehoefer 2016) remettent cet axe de travail dans les perspectives prioritaires de travail pour les prochaines années.

La plupart des travaux réalisés depuis le développement de PREDISSAT contribuent à une meilleure connaissance des impacts de l'environnement sur les performances de navigation et pourraient enrichir cette base de données. La figure 72 représente ces données :

- La détection ciel/non-ciel,
- Le pourcentage de ciel visible issu de cette segmentation, comme critère de visibilité,
- L'état de réception des satellites reçus (LOS/NLOS) issu de l'image ou de seuil sur le SNR,
- Les erreurs de mesures de pseudo-distances prédites de façon déterministe,
- Des modèles d'erreurs ou bornes d'erreurs liées à l'environnement local.

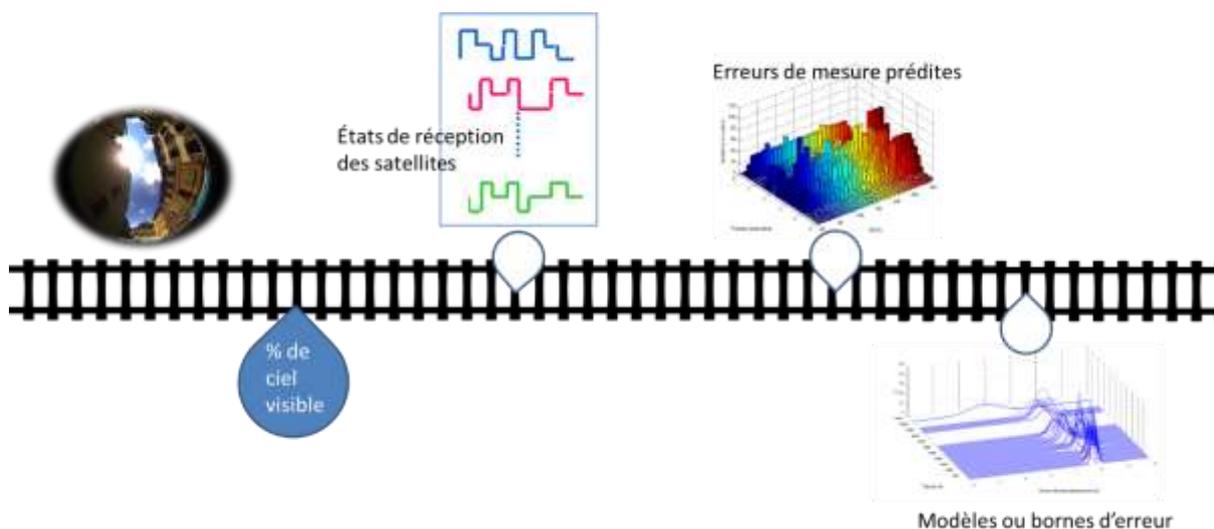


Figure 72. Données environnementales pouvant enrichir une base de données embarquée.

On retrouve, en 2016, ce type d'approche dans l'article de (Niehoefer 2016) avec le dispositif LOCATe « Predict, Quantify, Compensate » qui repose sur un outil de lancer de rayons pour l'estimation des différentes perturbations des signaux, représenté figure 73. Dans ce dispositif, l'estimation des erreurs et leur compensation des erreurs sont déportées. Ce type de solution pourrait permettre d'exploiter le modèle 3D CAPLOC (Moreau 2017).

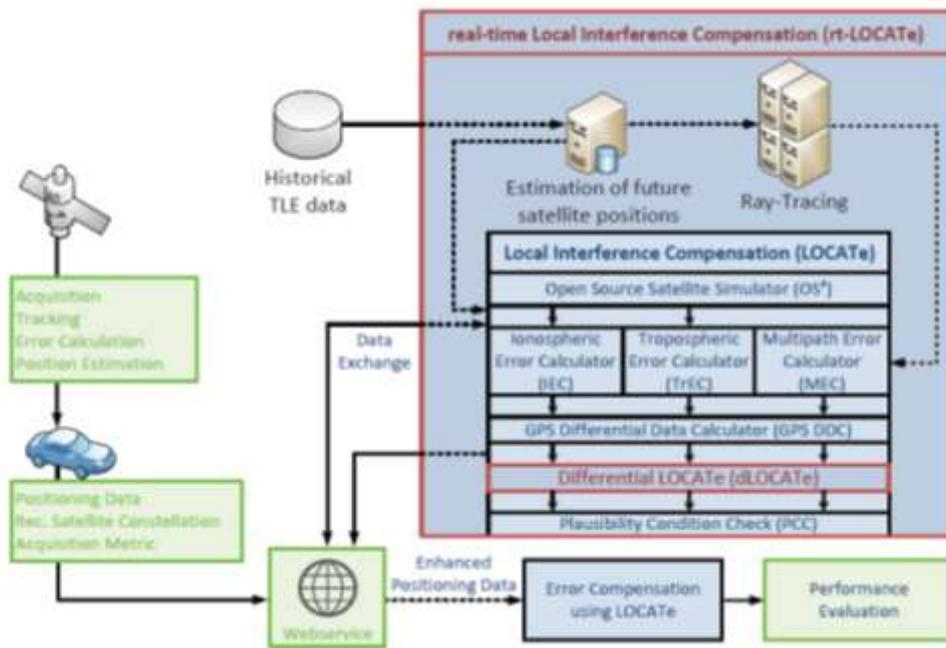


Figure 73. Système LOCATe de prédiction des performances GNSS à partir de lancer de rayon (Niehoefer 2016).

Dans le projet européen Rhinos, deux axes de travail sont poursuivis afin d'améliorer précision et intégrité d'une solution GNSS pour le ferroviaire : la prise en compte des phénomènes globaux comme locaux par deux canaux différents (figure 74). Les phénomènes globaux sont traités par les systèmes d'augmentation globaux (de type SBAS). **Les phénomènes locaux, par contre, doivent être traités localement. Avec le développement des cartes numériques et des SIGs, et à plus forte raison dans les systèmes de transport guidés, dont la répétabilité des trajectoires est forte, l'utilisation d'une BDD embarquée avec la connaissance de ces phénomènes locaux est une piste à envisager.**

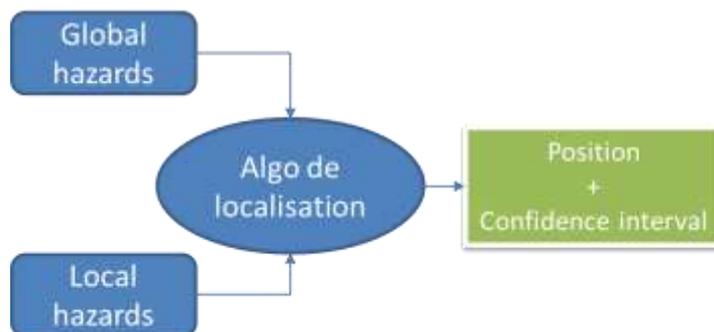


Figure 74. Prise en compte des phénomènes locaux et globaux (inspiré de Rhinos).

La connaissance prédictive ou l'estimation dynamique du contexte de réception doit permettre de proposer différents niveaux de service :

- Caractériser les performances et en particulier l'intégrité d'une solution de localisation en fonction de son environnement local.

Dans le projet ERSAT GGC, nos propositions doivent permettre de caractériser la voie ferroviaire afin de choisir les emplacements les plus opportuns pour la balise virtuelle en fonction notamment des conditions de réception. De la même manière, une BDD correctement informée doit permettre en chaque point de caractériser le potentiel de la solution GNSS (la zone de réception est bien dégagée, par exemple, avec une forte probabilité de LOS).

- Améliorer la précision de la localisation.

Une BDD qui embarquerait des modèles d'erreurs préalablement appris peut permettre d'appliquer les techniques d'estimation proposées par Nicolas Viandier dans sa thèse à partir d'estimation de bruits réels.

- Assurer l'intégrité de la solution GNSS.

La connaissance des bornes d'erreurs réellement rencontrées dans l'environnement local spécifique doit permettre de calculer un niveau de protection au plus près de l'erreur réellement rencontrée. De plus, la connaissance des états de réception des signaux dans cet environnement doit permettre un processus de détection et de réduction de faute optimal.

L'ensemble de ces pistes concerne deux couches de traitement tels que représentés sur la figure 75. Nous avons en effet développé des solutions amont de détection pour un traitement des données dans le domaine des mesures (utilisation des pseudo-distances extraites des corrélations).

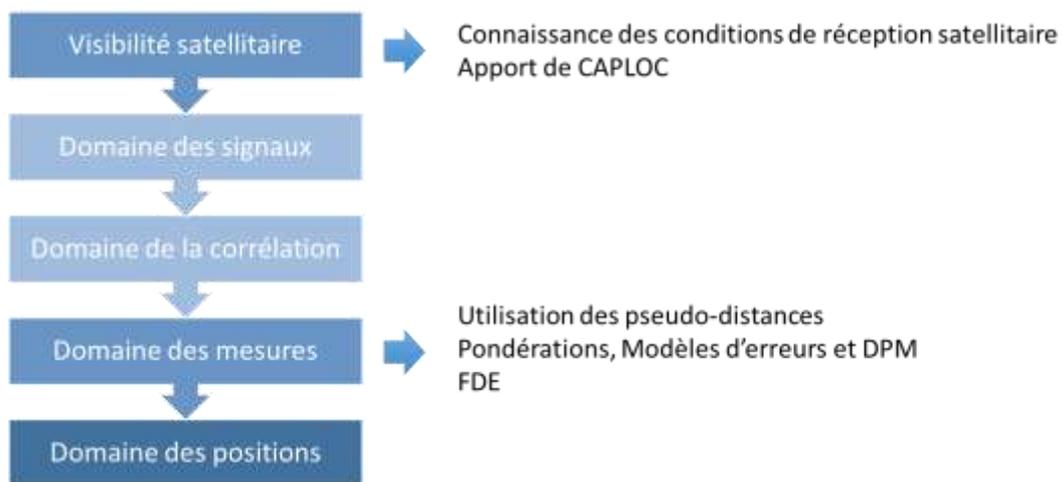


Figure 75. Les différents niveaux de traitement des phénomènes locaux (inspiré de la présentation de Per Enge, workshop Rhinos de mars 2017)

Une des pistes de travail non explorée consiste à travailler dans les domaines des signaux et des corrélateurs.

En collaboration avec Sabrina Ugazio et Letizia Lo Presti, Politecnico di Torino

Les conclusions du workshop organisé le 15 décembre 2015 sur les concepts d'intégrité utilisables en environnements urbains ont été développées dans le chapitre 5 de ce document. Elles poussent notamment à une caractérisation plus fine des modèles d'erreurs de pseudo-distances et de positions dans ces environnements. Cette tâche est traitée dans la thèse de Ni Zhu, dans le projet H2020 STARS pour l'environnement ferroviaire et pourrait faire l'objet d'une collaboration avec Politecnico di Torino en particulier pour **prendre en compte un modèle de canal de propagation et son impact sur le traitement du signal (au niveau des corrélateurs en particulier)** (Berardo 2015).

Ces travaux nécessiteront l'utilisation ou le développement d'un récepteur GNSS software. Ils ont été amorcés dans la thèse de Wilfried Renier mais laissé en l'état depuis sa démission en cours de thèse.

Apport de la coopération X2X pour la localisation

Les applications de localisation sont aujourd’hui toujours associées à des fonctions de communications véhicule-infrastructure (V2I), véhicule-véhicule (V2V) et intra-véhicule et ce, dans tous les domaines des transports terrestres (route, rail, maritime et ferroviaire). En particulier, les systèmes d’aide à la conduite dans le domaine automobile, qui permettent de réduire le risque routier, s’appuient sur des fonctions de communication, localisation et perception optimisées.

Le développement des véhicules communicants et la capacité des véhicules à échanger des informations entre eux ouvrent également d’autres voies pour l’amélioration des performances de localisation : (Lassoued 2016) propose par exemple une solution de partage de modèles d’erreurs de pseudo-distances au sein d’un réseau de véhicules. (Bento 2017) avec l’algorithme LB-CASGP garantit l’intégrité de la solution issue de la coopération en ajoutant une contrainte liée aux frontières de la voie (le véhicule doit être en mesure d’estimer sa distance au bord de la voie).

La communication entre véhicules offre un potentiel encore peu exploité de partage d’information pour la localisation et, en particulier, des perspectives sur le concept d’intégrité. (Margaria 2015) propose un concept d’intégrité locale qui exploite des données agrégées en un point pour caractériser l’environnement local en conditions nominales et que le véhicule reçoit via une infrastructure VANET (figure 76). La prédiction des performances attendues rappelle le concept de « look-up-table » prédite grâce à PREDISSAT que nous avons proposé dans [CI59] et que nous avons redéveloppé ci-dessus.

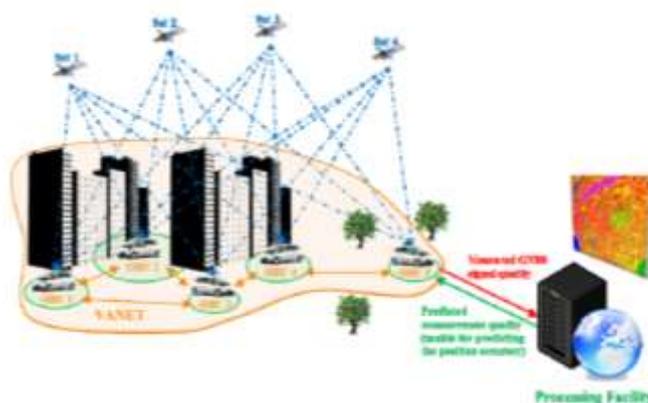


Figure 76. Concept d’intégrité locale dans un réseau VANET (Margaria 2015).

c. Conséquences de l’introduction des GNSS dans le rail

Utiliser les GNSS en sécurité

Les systèmes actuels de localisation de trains reposent en général sur l’association de systèmes installés sur l’infrastructure et de capteurs odométriques embarqués et sont principalement utilisées pour des applications de signalisation (Schön 2013). Ces systèmes sont d’abord des systèmes de détection : le circuit de voie détecte la présence d’un train sur un canton ; le compteur d’essieu détecte l’entrée et la sortie d’un canton. Dans les systèmes européens de signalisation (ETCS), le passage du train au-dessus d’une balise placée sur la voie permet une localisation absolue, propagée ensuite par l’usage de l’odomètre, qui calcule la distance parcourue depuis la dernière balise. Dans ces applications et pour tendre vers la minimisation du nombre d’équipement sur l’infrastructure, les systèmes de positionnement par satellites (GNSS) sont étudiés pour remplacer les balises par un concept de balise virtuelle (Facchinetti 2015). L’ensemble des travaux passés sur ce sujet ont fait

l'objet d'une « survey » dans IEEE Trans. on ITS [J3] dans laquelle certains verrous ont été identifiés. Je participe aux travaux liés à plusieurs de ces verrous, parmi lesquels :

- Aux côtés de la SNCF, je contribue à la compréhension des services offerts par la GNSS au monde ferroviaire, à l'identification des besoins utilisateurs en matière de localisation, à l'insertion des équipes SNCF dans le contexte européen sur ce sujet. Ce soutien se fait également au travers de temps de mise à disposition pour Railenium.
- Sur le plan scientifique, les thèmes que je retiens sont :
 - o La **caractérisation** des voies ferroviaires pour la réception GNSS. Dans le projet STARS, nous avons étudié l'état de l'art des utilisations d'EGNOS dans le ferroviaire et des performances liées à l'environnement local. Dans le projet ERSAT GGC à venir, nous proposerons, en collaboration avec le DLR, une méthode de caractérisation des conditions de réception GNSS afin de fournir un guide d'aide au choix des positions des balises virtuelles, pour une exploitation ERTMS sans balise au sol.
 - o Comme développé dans les sous-sections b et c de ce chapitre de perspectives, je souhaite proposer des **solutions** de localisation satisfaisant les besoins ferroviaires en **précision** et **intégrité**. Ces solutions intégreront les technologies GNSS avancées et l'usage de la cartographie ferroviaire. Cette contribution prendra la forme d'une thèse avec la SNCF et du projet Loc4Me. Les travaux menés sur les concepts d'intégrité et leur adaptation avec la thèse de Ni Zhu s'intègrent également dans cet axe.
Les questions relatives à l'**intégrité GNSS adaptée aux opérations ferroviaires** sont parmi les questions centrales de la communauté GNSS&Rail.
- Dans ERSAT GGC toujours et X2Rail-2, je continuerai à étudier, avec Julie Beugin, les méthodes d'évaluation de la SdF et les méthodes de certification.

Au-delà du développement d'une solution de localisation, il devient nécessaire d'étudier comment cette technologie s'intègre dans l'exploitation d'une ligne ERTMS.

Impact des performances GNSS et des systèmes de localisation ferroviaires hybrides sur les performances opérationnelles d'une ligne ERTMS régionale

En collaboration avec Simon Collart-Dutilleul et Khaled Mesgouni (Ecole Centrale)

Sur les lignes à faible trafic, la position est gérée en incluant des marges importantes qui grèvent les capacités d'exploitation de la ligne. De plus, des procédures assez lourdes doivent être mises en œuvre pour permettre de gérer la position du train. Le remplacement des systèmes sols actuels par des solutions de localisation satellitaire embarquées va nécessairement modifier des paramètres de gestion du trafic dans la mesure pour il faudra qu'il s'adapte à des critères de performances non pris en compte jusque-là à savoir la précision, l'intégrité, la disponibilité de l'information.

L'équipe ESTAS possède un savoir-faire et des outils pour la modélisation d'une ligne ferroviaire et de ses composants et pourrait mettre en œuvre une modélisation mathématique à base de réseaux de Pétri pour comparer les performances sur une ligne, pour deux solutions avec et sans balises et d'identifier les scénarios potentiellement critiques. Ces scénarios seront ensuite testés sur une même ligne grâce à un simulateur de trafic ERTMS comprenant un RBC (Radio Block Center), un système d'enclenchement et des trains.

Les travaux réalisés permettront ainsi de valider le comportement global de la solution fondée sur l'utilisation du GNSS (comportement humain compris) et de proposer des préconisations si besoin sur la capacité de la solution à répondre aux besoins sur toute la ligne sélectionnée. Ce dernier maillon permettrait d'aller du signal GNSS émis jusqu'au besoin final de l'utilisateur ferroviaire.

d. Géolocalisation et systèmes de communications (4 ou 5G)

Les systèmes de localisation fondés sur l'usage des technologies de communication ont été largement étudiés. En raison de leurs performances souvent inférieures aux systèmes satellitaires (figure 77), elles ont peu intégré le panorama des solutions généralement utilisées en outdoor.

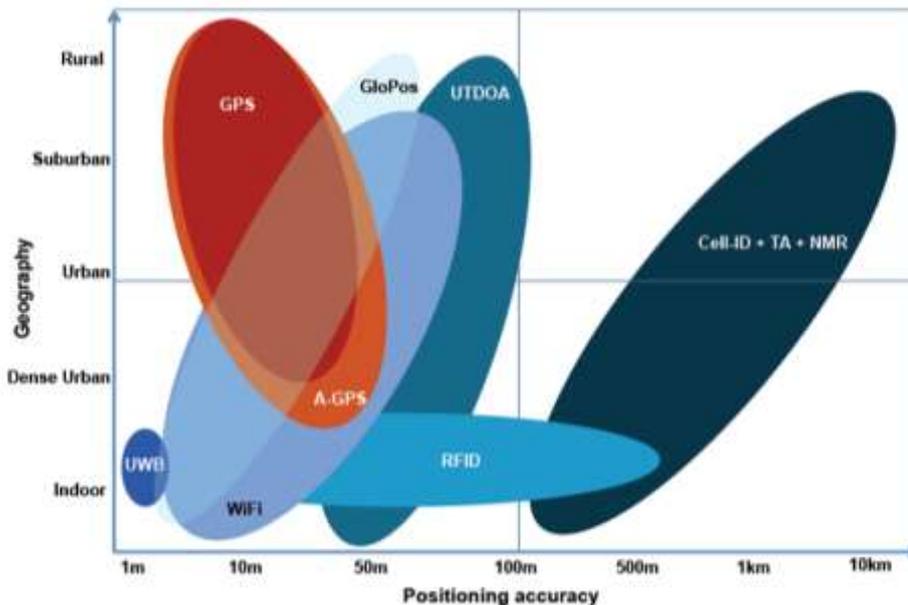


Figure 77. Comparaison des performances de localisation en fonction des technologies employées (Source : Ptolemus).

On retrouve cependant une activité sur ce sujet avec le développement de la technologie 5G (réseaux mobiles de 5^{ème} génération) dans lequel figurent le concept de « context awareness » et la notion d'informations contextuelles pour un service personnalisé (NGMN, 2015). Le livre blanc Next Generation Mobile Network 5G (NGMN, 2015) stipule que le système doit pouvoir coopérer avec d'autres techniques pour une meilleure précision. On trouve ainsi des solutions hybrides dans le routier (del Peral-Rosado 2016) autant que dans le ferroviaire (Arrizabalaga 2014). Ce même groupe indique que le terminal utilisateur sera localisé en outdoor avec une précision de moins d'un mètre. (del Peral-Rosado 2016) montre par exemple qu'il est possible d'atteindre une précision inférieure à 25 et 20 cm pour des systèmes à 50 et 100 MHz dans 99% des cas. Dans ces solutions, la position est calculée par le réseau et non plus par le mobile lui-même.

Si ces nouvelles solutions ont vocation à se répandre dans les applications à fort besoin d'intégrité, les méthodes de contrôle de l'intégrité que nous étudions pour les systèmes avec GNSS pourront être déclinées à ces nouvelles technologies et à leurs spécificités.

Mise en œuvre des perspectives

Dans un contexte de raréfaction des ressources humaines permanentes à l'Ifsttar mais d'attentes et de sujets de recherches nombreux, je constitue une stratégie de collaborations à plusieurs niveaux.

- Au niveau de l'Ifsttar, les collaborations avec David Bétaille s'intensifient avec l'encadrement commun de la thèse de Ni, des réponses conjointes plus fréquentes en montage de projet et des publications communes comme dans l'action Cost SaPPART.
J'ai demandé le soutien du département Cosys pour renforcer les ressources de l'équipe et recruter Rihab Hmida en tant qu'ingénieur de recherche pour accélérer et optimiser le développement d'un prototype CAPLOC. Je souhaite, à terme, pouvoir répondre

favorablement et sans redéploiement de ressources à chaque fois, lorsque des collègues (DLR, CNES...) proposent la mise en œuvre du dispositif dans une campagne de mesure.

- Au niveau **Régional**, je suis impliquée dans le programme ELSAT 2020 pour les transports (Ecomobilité Sécurité Adaptabilité dans les Transports) du contrat de plan état-Région. Le projet Smarties est l'un des projets de ce programme, dans lequel est inscrite la thématique de la localisation précise et sûre, en collaboration notamment avec l'équipe de Maan El Badaoui, CRISTaL. Son approche de fusion multi capteurs tolérante aux fautes repose sur l'utilisation de filtre informationnel d'une part, et d'outils de la théorie de l'information d'autre part et s'inspire des mêmes méthodes de détection et d'exclusion de fautes que celles que nous avons utilisé avec Ni Zhu.

Je participe activement au développement de la thématique au sein de l'IRT Railenium également. J'en suis la responsable scientifique. Railenium est présent dans l'IP2 de Shift2Rail visant le développement de solutions de localisation sûre, dans le projet ERSAT GGC déposé en mars 2017 (avec l'Ifsttar) et nous préparons un projet avec la SNCF. L'objectif à moyen terme est de générer une activité suffisamment conséquente pour entraîner le recrutement de chercheurs par Railenium sur ce sujet.

- Au niveau **national**, j'entretiens des contacts académiques et industriels.
 - J'enseigne à l'ISEN (Lille), l'ENSTA (Palaiseau) et en mastère ferroviaire (Compiègne) ; Je m'efforce de fédérer les partenaires membres de Railenium autour des applications ferroviaires (UTC, Cristal essentiellement) ; J'échange régulièrement avec ces équipes ainsi que celles de l'ENAC ou encore de l'ISAE avec lesquelles les sujets convergent et devraient nous permettre de collaborer à court terme.
 - Pour la partie industrielle, j'assume un rôle d'expert auprès de la SNCF en lien avec Railenium, qui doit se concrétiser par des actions de recherche (citées ci-dessus) ; J'entretiens des liens étroits avec le CNES, des PME telles que M3Systems (que j'ai sollicité pour le projet Loc4Me) ou de grandes entreprises telles qu'ANSALDO STS (j'encadre une thèse professionnelle Ansaldo) ou Thales. Thales Alenia Space est notre principal partenaire dans STARS. Avec Thales Avionics, nous structurons des montages de projet et des collaborations plus longs termes. Un projet en cours de préparation concerne notamment le besoin de cartes intègres pour la localisation terrestre.
- Au niveau **Européen**, mon implication est assez constante dans les projets européens liés au ferroviaire depuis le début des années 2000. Ma connaissance de l'ensemble des projets est en particulier reconnue aujourd'hui. Je participe à plusieurs réseaux d'experts comme le Cost SaPPART visant les applications routières aux côtés de Geoloc (Ifsttar) et celui de l'International Association of Geodesy. En plus des relations établies avec CEIT (Espagne) ou encore l'Université TU de Braunschweig (Allemagne), je souhaite vivement consolider et concrétiser les liens avec le DLR (Allemagne) autour des questions d'intégrité et avec Radiolabs (Italie) sur les solutions GNSS ferroviaires.
- A l'**international (hors Europe)**, deux collaborations sont en construction, avec l'université Beijing Jiaotong (Chine) et l'université d'Arizona (USA). Ces deux équipes ont des compétences reconnues sur les systèmes de contrôle de l'intégrité, en particulier pour le ferroviaire en Chine et pour l'aéronautique aux Etats-Unis. L'accueil de chercheurs étrangers et/ou de doctorants est visé. Des discussions scientifiques sont en cours sur l'analyse de l'intégrité GNSS de données ferroviaires avec Debiao Lu de Beijing Jiatong.

8 Références

Acil Allen Consulting, Precise positioning services in the rail sector, Report, June 2013.

Ali, K., DAVIS, F., & Pini, M. (2012, December). Characterizing Local Effects on Protection Level Concept in Urban Environments. In Proceedings of the 2012 International Technical Meeting of the Institute of Navigation (pp. 408-441).

- Arrizabalaga, S., Mendizabal, J., Pinte, S., Sánchez, J. M., Bauer, J., Themistokleous, M., & Lowe, D. (2014, April). Development of an advanced testing system and smart train positioning system for ETCS applications. In Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment.
- Azaola-Saenz M., Cosmen-Schortmann J., An error isotropy-based approach for multiple fault conditions, *Inside GNSS*, Jan/Feb 2009, pp28-36.
- Bento, L. C., Bonnifait, P., & Nunes, U. J. (2017). Cooperative GNSS positioning aided by road-features measurements. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, 42-57.
- Berardo, M., Lo Presti, L. (2015). GNSS Multipath Detector Based on Linear Adaptive Filter," *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*, Tampa, Florida, September 2015, pp. 3077-3083.
- Betaille, D., Peyret, F., Ortiz, M., Miquel, S., & Fontenay, L. (2013). A new modeling based on urban trenches to improve GNSS positioning quality of service in cities. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, 5(3), 59-70.
- Betaille, D., Miquel, S., Godan, F., & Peyret, F. (2015, April). 3D-city-model-aided GNSS accurate positioning with integrity provision using simplified geometry of buildings. In *European Navigation Conference 2015* (p. 6p).
- Betts, K. M., Mitchell, T. J., Reed, D. L., Sloat, S., Stranghoener, D. P., & Wetherbee, J. D. (2014, May). Development and operational testing of a sub-meter Positive Train Location system. In *Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014*, 2014 IEEE/ION (pp. 452-461).
- Bhuiyan, M. Z. H., Zhang, J., Lohan, E. S., Wang, W., Sand, S.; Analysis of multipath mitigation techniques with land mobile satellite channel model. *Radioengineering*, 21(4), pp. 1067-1076, 2012.
- Bhuiyan, M., Zahidul, H., & Lohan, E. S. (2012). Multipath mitigation techniques for satellite-based positioning applications. *Global Navigation Satellite Systems-Signal, Theory and Applications*.
- Bin Ahmad, K.A., Sahmoudi, M., Macabiau, C. (2014) Characterization of GNSS Receiver Position Errors for User Integrity Monitoring in Urban Environments, *European Navigation Conference, ENC-GNSS 2014*, 15-17 April 2014, Rotterdam, The Netherlands
- Borio, D., & Gioia, C. (2016). Galileo: The Added Value for Integrity in Harsh Environments. *Sensors*, 16(1), 111. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC98446>
- Bourdeau, A., Sahmoudi, M., & Tournet, J. Y. (2012, September). Tight integration of GNSS and a 3D city model for robust positioning in urban canyons. In *ION GNSS*.
- Breßler, J., Reisdorf, P., Obst, M., & Wanielik, G. (2016). GNSS Positioning in Non-line-of-Sight Context—a Survey. *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, Brazil, November 1-4, 2016.
- Cappelle, C., Localisation de véhicules et détection d'obstacles : apport d'un modèle virtuel 3D urbain. Thèse de doctorat, Lille 1, 2008.
- Caron, F., Inférence bayésienne pour la détermination et la sélection de modèles stochastiques, Ph.D. dissertation, Ecole Centrale de Lille, Lille, 2006.
- Closas, P., & Fernández-Prades, C. (2011). A statistical multipath detector for antenna array based GNSS receivers. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 10(3), 916-929.
- Cosmen-Schortmann, J., Azaola-Saenz, M., Martinez-Olague, M. A., & Toledo-Lopez, M. (2008, May). Integrity in urban and road environments and its use in liability critical applications. In *Position, Location and Navigation Symposium*, 2008 IEEE/ION (pp. 972-983).

- Damy, S., Majumdar, A., Ochieng, W. (2016). GNSS-based High Accuracy Positioning for railway applications, ION GNSS sept. 2016.
- del Peral-Rosado, J. A., López-Salcedo, J. A., Kim, S., & Seco-Granados, G. (2016, June). Feasibility study of 5G-based localization for assisted driving. In Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2016 International Conference on (pp. 1-6).
- Drevelle, V. (2011). Étude de méthodes ensemblistes robustes pour une localisation multisensorielle intégrée. Application à la navigation des véhicules en milieu urbain (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Compiègne).
- Facchinetti, C., Ansalone, L., & Tuozi, A. (2015, October). Trends in GNSS Italian application scenarios in transportation. In Navigation World Congress (IAIN), 2015 International Association of Institutes of (pp. 1-8).
- Faurie F., Algorithmes de contrôle d'intégrité pour la navigation hybride GNSS et systèmes de navigation inertielle en présence de multiples mesures satellitaires défaillantes. Thèse de l'université de Bordeaux, 14/12/2011.
- Feng, S., & Ochieng, W. (2007). A difference test method for early detection of slowly growing errors in GNSS positioning. *Journal of Navigation*, 60(03), 427-442.
- Gakne, P. V., & Petovello, M. (2015, October). Assessing image segmentation algorithms for sky identification in GNSS. In Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2015 International Conference on (pp. 1-7). IEEE.
- Garin, L. and Rousseau, J. M. (1997). "Enhanced strobe correlator multipath mitigation for carrier code," in Proc. ION Int. Technical Meeting, vol. 1, Sep. 1997, pp. 559-568.
- Gebre-Egziabher, D., Lachapelle, G., & Petovello, M. (2007). Weighting GNSS Observations and Variations of GNSS/INS Integration. *Inside GNSS*, 26-33.
- Giremus, A., Tourneret, J. Y., & Calmettes, V. (2007). A particle filtering approach for joint detection/estimation of multipath effects on GPS measurements. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 55(4), 1275-1285.
- Grosch, A., Garcia Crespillo, O., Martini, I., Günther, C. (2017). Snapshot Residual and Kalman Filter based Fault Detection and Exclusion Schemes for Robust Railway Navigation, European Navigation Conference 2017, May 9-12, SwissTech Convention Center.
- Groves, P. D., Shadow matching: a new GNSS positioning technique for urban canyons, *The journal of Navigation* (2011), 64, pp417-430
- Groves, P. D., Jiang, Z., Rudi, M., & Strode, P. (2013). A portfolio approach to NLOS and multipath mitigation in dense urban areas, Institute of Navigation GNSS+ 2013, 16-20 September 2013, Nashville, TN, USA
- Groves, P. D., & Jiang, Z. (2013). Height aiding, C/N 0 weighting and consistency checking for GNSS NLOS and multipath mitigation in urban areas. *Journal of Navigation*, 66(05), 653-669.
- Heddebaut, M., Mili, S., Sodoyer, D., Jacob, E., Aguado, M., Zamalloa, C. P., ... & Deniau, V. (2014, January). Towards a resilient railway communication network against electromagnetic attacks. In TRA-Transport Research Arena (p. 10p).
- Hsu, L-T., Jan S-S., Groves, PD, Kubo, N., (2014), Multipath mitigation and NLOS detection using vector tracking in urban environments, *GPS Solutions*, Pub. Online 04 June 2014.
- ICAO, International Standards and Recommended Practices, volume 1, sixth ed., Annex 10 to Convention on International Civil aviation, July 2006, radio Navigation Aids.

- Irish, A. T., Isaacs, J. T., Quitin, F., Hespanha, J. P., Madhow, U.; Belief propagation based localization and mapping using sparsely sampled GNSS SNR measurements. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, May 31 – June 7, 2014
- Irish, A., Iland, D., Madhow U. (2015, sept). Urban localization and 3D mapping using GNSS shadows. InsideGNSS, September/October 2015, p60-66.
- Isaacs, J. T., Irish, A. T., Quitin, F., Madhow, U., Hespanha, J. P.; Bayesian localization and mapping using GNSS SNR measurements. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, California, May 5 – 8, 2014.
- Jiang, Z., & Groves, P. D. (2014). NLOS GPS signal detection using a dual-polarisation antenna. GPS solutions, 18(1), 15-26.
- Kaplan, E., & Hegarty, C. (2006). Understanding GPS: principles and applications. Artech house. 2nd Edition.
- Kuusniemi, H. (2005). User-level reliability and quality monitoring in satellite-based personal navigation, Thèse de l'université technologique de Tampere, Finlande.
- Kuusniemi, H., Airos, E., Bhuiyan, M. Z. H., & Kröger, T. (2012). GNSS jammers: how vulnerable are consumer grade satellite navigation receivers?. European Journal of Navigation, 10(2), 14-21.
- Lassoued, K., Bonnifait, P., & Fantoni, I. (2016, June). Cooperative localization of vehicles sharing GNSS pseudorange corrections with no base station using set inversion. In Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2016 IEEE (pp. 496-501). IEEE.
- Litman, T. (2013). Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning.
- Lee, J., Pullen, S., & Enge, P. (2009). Sigma Overbounding using a Position Domain Method for the Local Area Augmentation of GPS. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 45(4), 1262-1274.
- Lentmaier, M., Krach, B., & Robertson, P. (2008). Bayesian time delay estimation of GNSS signals in dynamic multipath environments. International Journal of Navigation and Observation, 2008.
- Li, X. (2010). Un modèle hybride statistique-déterministe du canal LMS (Land Mobile Satellite) en environnements complexes. Thèse de doctorat., Université de Poitiers.
- Li, J., & Wu, M. (2009, September). The improvement of positioning accuracy with weighted least square based on SNR. In 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (pp. 1-4). IEEE.
- Lutz, E., Cygan, D., Dippold, M., Dolainsky, F., Papke, W.. (1991). The land mobile satellite communication channel-recording, statistics, and channel model. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 40(2), pp. 375-386.
- Margaria, D., & Falletti, E. (2015, June). Proof-of-concept of the local integrity approach: Prototype implementation and performance assessment in an urban context. In Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2015 International Conference on (pp. 1-6).
- Masson, E. (2010). Etude de la propagation des ondes électromagnétiques dans les tunnels courbes de section non droite pour des applications métro et ferroviaire. Thèse de doctorat., Université de Poitiers.
- Meguro, J., Murata, T., Tsiguchi, J., Amano, Y., Hashizume, T. (2008). GPS accuracy improvement by satellite selection using omnidirectional infrared camera, 2008 IEEE/RJS International conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center, Nice, France, Sept. 22-26, 2008.

- Meyer zu Hörste, M. (2017). Fully automatic railway operation: technical, operational and legal requirements, RailLille 2017, Lille, France, April 5, 2017.
- Moreau, J., Ambellouis, S., & Ruichek, Y. (2017). Fisheye-Based Method for GPS Localization Improvement in Unknown Semi-Obstructed Areas. *Sensors*, 17(1), 119.
- Moreau, J. (2016). Construction de modèles 3D à partir de données vidéo fisheye. Application à la localisation en milieu urbain. Thèse de l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard.
- Moriana, C., Bonardi, L., Aguado, L. E. & al. (2015). Vehicular and Pedestrian GNSS Integrity Algorithms and Results for Urban and Road environments developed after an Extensive Real Data Collection Campaign, 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), Tampa, FL, pp. 553-568.
- Navarro Madrid, P., Azaola Sáenz, M., Moriana Varo, C., Cosmen Schortmann, J. (2015). Computing Meaningful Integrity Bounds of a Low-cost Kalman-filtered Navigation Solution in Urban Environments. *Proceedings of ION GNSS+*, Tampa, Florida, September 2015.
- Neri, Alessandro, Sabina, Salvatore, Capua, Roberto, Salvatori, Pietro, "Track Constrained RTK for Railway Applications," *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*, Portland, Oregon, September 2016, pp. 2123-2135.
- NGMN Alliance, "NGMN 5G white paper," 2015. [Online]. Available: https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf (téléchargé le 12/04/2017)
- Niehoefer, B., Schweikowski, F., & Wietfeld, C. (2016, May). Local interference compensation (LOCATE) for GNSS-Based Lane-Specific Positioning of Vehicles. In *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-5). IEEE.
- Nieuwenhuisen, M., Droschel, D., Beul, M., & Behnke, S. (2015). Autonomous navigation for micro aerial vehicles in complex GNSS-denied environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1, 1-18.
- Ning, B., Tang, T., Qiu, K., Gao, C., & Wang, Q. (2004). CTCs-Chinese train control system. *Advanced Train Control Systems*, 1.
- Nogueira, S., Ruichek, Y., & Charpillat, F. (2008). A Self Navigation Technique using Stereovision Analysis. *Stereo Vision*, 287-298.
- Ober, P. B., Breeuwer, E., Farnforth, R., & van Willigen, D. (2011). Overbounding the SBAS Integrity Equation. *Proceedings of GNSS 2001*, Sevilla, Spain, May 2001.
- Obst, M., Bauer, S., & Wanielik, G. (2012, April). Urban multipath detection and mitigation with dynamic 3D maps for reliable land vehicle localization. In *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION* (pp. 685-691).
- Obst, M. (2014). Bayesian Approach for Reliable GNSS-based Vehicle Localization in Urban Areas. Thèse de l'université de technique de Chemnitz, 18 juin 2014.
- Perez-Fontán, F., Martínez, S., Sanmartín, B., Enjamio, C., Mariño, P., Machado, F.; An enhanced Markov chain based model for the narrowband LMS channel in built-up areas. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 23(2), pp. 111-128, 2005.
- Peters, J., Frittelli, J., (2012). Positive train control (PTC): overview and policy issues, CRS Report for Congress, July 30, 2012.
- Pullen, S., Walter, T., Enge, P., System overview, recent developments, and future outlook for WAAS and LAAS, in *Proc. Tokyo Univ. Mercantile Marine GPS Symp.*, 2002, pp. 45-56.

- Rispoli, F., Filip, A., Castorina, M., Di Mambro, G., Neri, A., & Senesi, F. (2013, April). Recent progress in application of GNSS and advanced communications for railway signaling. In *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2013 23rd International Conference (pp. 13-22). IEEE.
- Roberts, S., (2016). Railway environment modelling. RHINOS project workshop, Stanford, November 29th-December 1st 2016.
- Roturier, B., Chatre, E., & Ventura-Traveset, J. (2001). The SBAS integrity concept standardised by ICAO-application to EGNOS. *NAVIGATION-PARIS-*, 49, 65-77.
- Roudier, M., Analysis and Improvement of GNSS Navigation Message Demodulation Performance in Urban Environments. Thèse de l'INP Toulouse, 2015.
- Rougerie, S., Carrié, G., Vincent, F., Ries, L., & Monnerat, M. (2012). A new multipath mitigation method for GNSS receivers based on an antenna array. *International Journal of Navigation and Observation*, 2012.
- Royer, E., Lhuillier, M., Dhome, M., & Chateau, T. (2004). Towards an alternative GPS sensor in dense urban environment from visual memory. In the 15th British Machine Vision Conference (p. CDR0M). BMVA association.
- Rubio, L., Reig, J., Cardona, N.; Evaluation of Nakagami fading behaviour based on measurements in urban scenarios. *AEU International Journal of Electronics and Communications*, 61(2), pp. 135-138, 2007.
- Sanromà Sánchez, J., Gerhmann, A., Thevenon, P., Brocard, P., Ben Afia, A., Julien, O., (2016). Use of a FishEye Camera for GNSS NLOS Exclusion and Characterization in Urban Environments. ION International Technical Meeting, January 25-28, 2016, Monterey, California.
- Saunders, S.R., *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Ed. Wiley, 1999.
- Schön, W., Larraufie, G., Moëns, G., & Poré, J. (2013). *Signalisation et automatismes ferroviaires. Ouvrage en trois tomes. La Vie du Rail.*
- Schubert, F., Prieto-Cerdeira, R., Steingass, A.; GNSS software simulation system for realistic high-multipath environments. 4th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (NAVITEC) and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Noordwijk, Netherlands, Dec. 10 – 12, 2008.
- Shytermeja, E., Garcia-Pena, A., & Julien, O. (2014, June). Proposed architecture for integrity monitoring of a GNSS/MEMS system with a Fisheye camera in urban environment. In *Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, 2014 International Conference on (pp. 1-6).
- Spangenberg, M. (2009). *Safe Navigation For Vehicles*. Ph.D. dissertation, Université de Toulouse, Toulouse, 2009.
- Spirent (2016), « how to construct a GNSS test plan », downloaded from http://www.spirent.com/Assets/EB/EB_How-to-Construct-GPS-GNSS-Test-Plan en juillet 2016.
- Stenborg, E., & Hammarstrand, L. (2016, June). Using a single band GNSS receiver to improve relative positioning in autonomous cars. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2016 IEEE (pp. 921-926). IEEE.
- Strode, P. R., & Groves, P. D. (2015). GNSS multipath detection using three-frequency signal-to-noise measurements. *GPS Solutions*, 1-14.
- Suzuki, T., Kubo, N. (2015). Simulation of GNSS Satellite Availability in Urban Environments Using Google Earth, Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, April 2015, pp. 1069-1079.

- Suzuki, T., & Kubo, N. (2014). N-LOS GNSS signal detection using fish-eye camera for vehicle navigation in urban environments. In Institute of Navigation, the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014).
- Syed Mohd Dardin, S., (2015), New adaptive tracking loop algorithm for reliable positioning in harsh environment, Thèse de l'université de Toulouse délivrée par l'ISAE le 19/06/2015.
- Tao, Z. (2016). Autonomous road vehicles localization using satellites, lane markings and vision. Thèse de l'UTC.
- Tesserault, G. (2008). Modélisation multi-fréquences du canal de propagation. Thèse de Université de Poitiers.
- Van Dierendonck, A., Fenton, P., & Ford, T. (1992). Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver. *Navigation*, 39(3), 265-283.
- Van Dierendonck, A. J. (2014). New GNSS Signals Will Modern Also Be Better. *InsideGNSS*, March/April 2014, pp42-43.
- Viandier, N., Méthodes de validation des modèles d'erreurs de pseudodistances en fonction de l'environnement de propagation, Journée des doctorants SPI-STIC de l'INRETS 2009, Actes INRETS n°124, pp149-167
- Villemeur, A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, collection de la Direction des Études et Recherche d'Électricité de France. Eyrolles, ISBN-10, 2(615.8).
- Wang, L., Groves, P. D., & Ziebart, M. K. (2013). GNSS shadow matching: Improving urban positioning accuracy using a 3D city model with optimized visibility scoring scheme. *Navigation*, 60(3), 195-207.
- Wang, G., Performance GNSS en environnement transport. Etude d'un lien entre des modèles d'environnements et des modèles d'erreurs (de position ou de pseudo-distances). Rapport de stage ENAC effectué à l'Ifsttar, 2015.
- Wieser, A., Gaggi, M., & Hartinger, H. (2005, September). Improved positioning accuracy with high sensitivity GNSS receivers and SNR aided integrity monitoring of pseudo-range observations. In Proc ION GNSS (pp. 13-16).
- Zinoune, C. (2014). Autonomous Integrity Monitoring of Navigation Maps on board Intelligent Vehicles. Thèse de l'UTC.
-

Annexe : Liste des publications

A1. Thèse

[T1] Juliette 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 de service offert. Thèse de l'Université de Lille 1, soutenue le 4 juillet 2002.

A2. Chapitres de livres

[C1] Contribution au livre blanc : COST Action TU1302. SaPPART White paper: Better use of Global Navigation Satellite Systems for safer and greener transport. Ifsttar, 2015. Techniques et méthodes, TMI 1. 58p. ISBN 978-2-85782-707-8.

[C2] Marion Berbineau, Mohamed Kassab, Christophe Gransart, Martine Wahl, [Juliette Marais](#) and Divitha Seetharamdoo, Clean Mobility and Intelligent Transport Systems – Chap. 3, IET book, 2015, Editors Michele Fiorini and Jia-Chin Lin. ISBN: 978-1-84919-895-0

[C3] F. Boukour, S. Coutel, D. Gruyer, [J. Marais](#), « Localisation », dans Soulas, C (ED), Wahl, M (ED), INRETS, 2010, Innovation dans les transports guidés urbains et régionaux, IC2 Traité systèmes automatisés, Hermes Science publication, Lavoisier, 317p, « Chapitre 3 Communication, localisation et nouveaux matériaux », § 3.2 ou 3.3.

[C4] Contribution à l'ouvrage « Sur nos territoires... L'éco-mobilité (Paroles de chercheurs. Volume 2) », Chap. 2.14, « Galileo et les transports européens ». Les collections de l'INRETS. Déc. 2009, 242p.

[C5] Chapitre « La localisation par satellites » de « L'autobus Communicant - "communiquer, Naviguer et Surveiller" pour contribuer à l'attractivité des transports en commun » Coordination scientifique : Sébastien Ambellouis. Rapport de recherche INRETS (R270), pp63-79, Sept. 2010.

A3. Direction d'ouvrages publiés par l'INRETS

[D1] Dossier « les systèmes coopératifs dans les transports : une approche coordonnée qui nécessite une affirmation des champs de compétence » dans RTS (Recherche Transports Sécurité) n°113, vol 29, Juin 2013. Introduction. P-Y. Gilliéron, [J. Marais](#), F. Peyret, I. Kaparias

[D2] David Bétaille, Philippe Bonnifait, Roland Chapuis, Emmanuel Duflos, [Juliette Marais](#), François Peyret, « Accurate Localization for land transportation », Paris, June 16th 2009, Workshop proceedings. Collections Actes INRETS n°125, Décembre 2009, 92p.

[D3] [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, éditions des actes des rencontres doctorants. Actes INRETS N°112 (Avril 2007).

[D4] [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, éditions des actes des rencontres doctorants. Actes INRETS N°98 (Novembre 2005).

[D5] [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, éditions des actes des rencontres doctorants. Actes INRETS N° 96 (Février 2005).

[D6] [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, éditions des actes des rencontres doctorants. Actes INRETS N° 94 (Juin 2004).

A4. Brevet d'invention

- [B1] **Juliette Marais**, Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart, Marion Berbineau, Dispositif de localisation. Demande de brevet français déposée le 29/09/2006 n°06 54018. N° de publication : WO/2008/040896, Date de publication internationale : 10.04.2008

A5. Articles de journaux nationaux ou internationaux à comité de lecture

- [J1] David Bétaille, **Juliette Marais**, François Peyret, Miguel Ortiz, Jonathan Monsifrot, Carlos Moriana Varo, Svend-Peder Oseth, Thierry Chapuis, Gregory Moura, A review of GNSS error models applying to signals, observables and positioning solutions, *En préparation comme chapitre de 'Advances in Sensors: Reviews' Book Series, Vol. 5, Oct 2017*
- [J2] Ni Zhu, **Juliette Marais**, David Bétaille, Marion Berbineau, Integrity in Urban Environment: A Review of Literature, **accepté pour publication** dans *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, le 14/10/2017 (IF : 3.724).
- [J3] **Juliette Marais**, Julie Beugin, Marion Berbineau, A survey of GNSS-based Research and Developments for the European railway signaling, *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, octobre 2017, vol. 18, Issue 10, pp 2602-2618. (IF: 2.534).
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7857080/>
- [J4] Cyril Legrand, Julie Beugin, Blaise Conrard, **Juliette Marais**, Marion Berbineau, El-Miloudi El-Koursi, From extended integrity monitoring to the safety evaluation of satellite-based localisation system, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 155, November 2016, Pages 105–114. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016300254> (IF: 2.498)
- [J5] T.P. Khanh Nguyen, Julie Beugin, **Juliette Marais**, Method for evaluating an extended Fault Tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a satellite-based railway system, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 133, January 2015, Pages 300-313, ISSN 0951-8320, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2014.09.019>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183201400235X> (IF: 2.498)
- [J6] **Juliette Marais**, Cyril Meurie, Dhouha Attia, Yassine Ruichek, Amaury Flancquart, Toward accurate localization in guided transport: Combining GNSS data and imaging information, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 43, Part 2, June 2014, Pages 188-197, ISSN 0968-090X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.11.008>.
<http://authors.elsevier.com/sd/article/S0968090X13002350> (IF: 3.075)
- [J7] **J. Marais**, D.-F. Nahimana, N. Viandier, E. Duflos, GNSS Accuracy enhancement based on pseudorange error estimation in an urban propagation environment, Available online 14 May 2013, *Expert Systems with Applications*,
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417413003126> (IF: 2.203)
- [J8] Asma Rabaoui, Nicolas Viandier, Emmanuel Duflos, **Juliette Marais**, Philippe Vanheeghe, DPMs for the Density Estimation in a Dynamic Nonlinear Modeling: Application to GPS Positioning in Urban Canyons. *IEEE Transactions on Signal Processing*. April 2012, Vol 60, Number 4, pp1638-1655 (IF: 2.628)
- [J9] Julie Beugin, **Juliette Marais**, Simulation-based evaluation of dependability and safety properties of satellite technologies for railway localization, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 22, June 2012, Pages 42-57, ISSN 0968-090X, 10.1016/j.trc.2011.12.002.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X11001677> (IF: 3.075)
- [J10] Julie Beugin, Aleš Filip, **Juliette Marais**, Marion Berbineau, Galileo for improving railway operations: question about the positioning performances analogy with the RAMS

requirements allocated to safety applications, European Transport Research Review (ETRR) Volume 2, Number 2 / June 2010, pp93-102.

- [J11] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Application des principes de la sûreté de fonctionnement à l'évaluation du service de localisation par satellites dans le domaine ferroviaire, Revue Transport et Sécurité (RTS) n°99, Avril-Juin 2008.
- [J12] [Juliette Marais](#), PREDISSAT - Comment évaluer la disponibilité satellitaire en environnement transport ?, Revue Transport et Sécurité (RTS), n°88 Oct-Déc. 05.
- [J13] [Juliette Marais](#), Dr. Marion Berbineau, Dr. Marc Heddebaut, Land Mobile GNSS, Availability and Multipath Evaluation Tool, IEEE Trans. On Vehicular Technology, Sept. 05, Vol. 54, Issue 5, pp 1697-1704. (IF: 2.243)
- [J14] [Juliette Marais](#), Dr. Marion Berbineau, Jean-Pierre Ghys, Outil d'analyse de la disponibilité de systèmes de localisation par satellites. Dans « Capteurs et traitement du signal pour les transports guidés », Revue I2M Instrumentation Mesure Métrologie, Vol 2, n°1-2/2002, Ed. Hermès, 2002.

A6. Articles de journaux non répertoriés dans les BDI

- [A1] [Juliette Marais](#), Cyril Meurie, Sébastien Ambellouis, Yassine Ruichek, Projet CAPLOC – Combinaison de l'Analyse d'images et la connaissance de la Propagation des signaux pour la Localisation, Retenu suite à ATEXPO 2013 pour publication dans la revue TEC n°218 – juin 2013.
- [A2] Julie Beugin, Nicolas Viandier, Juliette Marais, Marion Berbineau, GNSS pour la localisation sûre des transports terrestres guidés ou publics de type bus en site propre ou tramways, Revue Navigation, Vol. 57, n°225, Janvier 2009, pp5-24.
- [A3] Ales Filip, Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Hynec Mocek, Interpretation of the Galileo Safety-Of-Life Service by Means of Railway RAMS Terminology. International scientific journal Transactions on Transport Sciences, Ministère des transports Tchèques, Vol 1, n°2, p61-68, 2008.
- [A4] Thomas Tirtaine, Juliette Marais, Validation expérimentale du logiciel de lancer de rayons Ergospace et estimation de la précision du MNE requise pour son utilisation, Revue XYZ, n°102, 1er trimestre 2005.
- [A5] [Juliette Marais](#), L'apport de PREDISSAT pour les transports terrestres, Revue R&E n°3 éditée par la DRAST, Juillet 2004
- [A6] George Raymond, [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, Innovations Bring Satellite Control within Reach, Railway Gazette International, Déc. 2004, p835-837
- [A7] [Juliette Marais](#), B. Meunier, Dr. M. Berbineau, Utilisation du traitement d'images pour l'évaluation de la disponibilité des satellites GPS le long d'une voie de chemin de fer. Revue Générale des Chemins de Fer, Numéro spécial « Recherche », n°6 - juin 1999.

A7. Conférences internationales avec actes à comité de lecture

2018(2)

- [CI1] Juliette Marais, Salvatore Sabina, Massimiliano Ciaffi, Video-based classification of railway track areas for GNSS-based virtual balise solutions in the ERSAT GGC project, ION-ITM, Reston, Virginia, jan 2018.

2017 (2)

[CI2] Ni Zhu, Juliette Marais, David Bétaille, Marion Berbineau, Evaluation and Comparison of GNSS Navigation Integrity Monitoring Algorithms for Urban Transport Applications, Young Researchers Seminar 2017, Berlin, May 16 – 18, 2017

[CI3] Ni Zhu, Juliette Marais David Bétaille, Marion Berbineau, Evaluation and Comparison of GNSS Navigation Integrity Monitoring Algorithms for Urban Transport Applications, ION-ITM, January 30-February 2, 2017, Monterey, California

2015 (4)

[CI4] [Juliette Marais](#), Sébastien Ambellouis, Cyril Meurie, Yassine Ruichek, Image processing for a more accurate GNSS-based positioning in urban environment, ITS World 2015, Bordeaux, 7 oct. 2015

[CI5] Cyril Legrand, Julie Beugin, Blaise Conrard, [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, El-Miloudi El-Koursi, Approach for evaluating the safety of a satellite-based train localization system through the extended integrity concept, European Safety and Reliability Conference ESREL 2015, 7-10 sept. Zurich, Suisse.

[CI6] [Juliette Marais](#), Sarab Tay, Amaury Flancquart, Cyril Meurie, Weighting with the pre-knowledge of GNSS signal state of reception in urban areas, ENC GNSS 2015, 9 avril 2015, Bordeaux.

[CI7] Hansjörg Manz, Ekehard Schnieder, Denis Stein, Max Spindler, Martin Lauer, Carsten Seedorff, Arne Baudis, Uwe Becker, Julie Beugin, T.P. Khanh Nguyen, [Juliette Marais](#), GaLoROI: Satellite based localization in railways, International congress on advanced railway engineering, Istanbul, March 2-5 2015

2014 (3)

[CI8] [Juliette Marais](#), Cyril Meurie, Amaury Flancquart, Simon Lithgow, George Barbu, Innovative simulations of GNSS performances in a realistic railway environment, CERGAL, Dresde, 7-9 juillet 2014.

[CI9] T.P. Khanh Nguyen, Julie Beugin, [Juliette Marais](#) (2014, April). RAMS analysis of GNSS based localisation system for the train control application. In Computing, Management and Telecommunications (ComManTel), 2014 International Conference on (pp. 101-106). IEEE.

[CI10] G. Barbu, [J. Marais](#), The SATLOC project, TRA (Transport Research Arena) 2014, Paris.

[CI11] C. Legrand, J. Beugin, B. Conrard, [J. Marais](#), M. Berbineau, E.-M. El-Koursi, Causal analysis methodology of multisensor systems based on GNSS, The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Railways 2014, Ajaccio, France, 3-11 Avril 2014

2013 (6)

[CI12] Sarab Tay, [Juliette Marais](#), Weighting models for GPS Pseudorange observations for land transportation in urban canyons, 6th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, December 5-6, 2013, Munich

[CI13] Thi Phuong Khanh Nguyen, Julie beugin, [Juliette Marais](#), Dependability evaluation of a GNSS and ECS based localisation unit for railway vehicles, ITST 2013, 5-7 nov, Tampere, Finlande.

[CI14] Cyril Legrand, Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Blaise Conrard, Sensitivity Assessment for Analysing Dependability of a Multisensor Localisation System based on GNSS, ITST 2013, 5-7 nov, Tampere, Finlande.

[CI15] Olimpia Hoinaru, Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Contribution to a terminology related to dependability for the qualification of an on-board satellite-based system, 2nd International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Wuhan, Chine, 28 june – 1 July 2013.

[CI16] Jakob Jakobsen, Anna B.O. Jensen, [Juliette Marais](#), Simulating GNSS Position Accuracy using Non-line of Sight Reflected Signals, ENC-GNSS 2013, Vienna, April 23rd – 25th 2013.

[CI17] [Juliette Marais](#), Cyril Meurie, Quantify and improve GNSS quality of service in land transportation by using image processing, First CNES-ONERA Workshop on Earth-Space Propagation, ONERA, Toulouse, France, 21-23 January 2013

2012 (2)

[CI18] [Juliette Marais](#), Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart, Sébastien Lefebvre, Cyril Meurie, Yassine Ruichek, Accurate Localisation Based on GNSS and Propagation Knowledge for Safe Applications in Guided Transport, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 48, 2012, Pages 796-805, ISSN 1877-0428, 10.1016/j.sbspro.2012.06.1057. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812027930>) Actes de la conférence TRA 2012, Athènes.

[CI19] [Juliette Marais](#), Julie Beugin, Evaluation Method of GNSS-based Positioning Functions for Safety Applications in Operational Conditions, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 48, 2012, Pages 806-815, ISSN 1877-0428, 10.1016/j.sbspro.2012.06.1058. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812027942>) Actes de la conférence TRA 2012, Athènes.

2011 (5)

[CI20] Dhouha ATTIA, Cyril MEURIE, Yassine Ruichek, [Juliette Marais](#), Counting of satellites with direct GNSS signals using Fisheye camera : A comparison of clustering algorithms, ITSC 2011, Washington DC, USA - October 5-7, 2011

[CI21] Emmanuel Duflos, Philippe Vanheeghe, Nicolas Viandier, [Juliette Marais](#), Asma Rabaoui, GNSS Urban Localization Enhancement using Dirichlet Process Mixture Modelling, NIPS 2011 Workshop, Bayesian Nonparametrics: Hope or Hype?, 17 dec. 2011, Sierra Nevada, Spain

[CI22] Asma Rabaoui, Nicolas Viandier, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, On selecting the hyperparameters of the DPM models for the density estimation of observation errors. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing - International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), (2011), May 22-27, 2011, Prague, République Tchèque. (IF 4,63)

[CI23] Andrea Cohen, Cyril Meurie, Yassine Ruichek, [Juliette Marais](#), A robust segmentation and tracking method for characterizing GNSS signals reception environment, SPIE 2011, Image Processing: Machine Vision Applications IV, San Francisco, 23-27 jan. 2011.

[CI24] Dhouha ATTIA, Cyril MEURIE, Yassine RUICHEK, [Juliette MARAIS](#), Analyse de l'environnement de réception des signaux GNSS par segmentation et classification d'images FishEye, Colloque International TELECOM'2011 & 7èmes JFMMA. 01/2011.

2010 (8)

- [CI25] [Juliette Marais](#), N. Viandier, A. Rabaoui Emmanuel Duflos, GNSS multipath bias models for accurate positioning in urban environments, ITST 2010, 9-11 nov. 2010, Kyoto, Japon.
- [CI26] [Juliette Marais](#), Julie Beugin, Integrity in safe railway GNSS-based applications, ITST 2010, 9-11 nov. 2010, Kyoto, Japon.
- [CI27] [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, N. Viandier, D.F. Nahimana, A. Rabaoui, Advanced signal processing techniques for multipath mitigation in land transportation environment, ITSC 2010, session spéciale "Advances in Positioning and Map-Matching and Applications", Sept. Madère, 2010. (IF 0.25)
- [CI28] D. Attia, C. Meurie, Y. Ruichek, [J. Marais](#), A. Flancquart, Image analysis based real time detection of satellites reception state, ITSC 2010, Sept. Madère, 2010.
- [CI29] Nicolas Viandier, Asma Rabaoui, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, GNSS pseudorange error density tracking using Dirichlet Process Mixture, Fusion 2010, 26-29 Juillet, Edinburgh, UK.
- [CI30] Andrea Cohen, Cyril Meurie, Yassine Ruichek, [Juliette Marais](#), Characterization of the reception environment of GNSS signals using a texture and color based adaptive segmentation technique, IV 2010, San Diego, CA, 21-24 Juin 2010.
- [CI31] Nicolas Viandier, Asma Rabaoui, [Juliette Marais](#) and Emmanuel Duflos, Studies on DPM for the density estimation of pseudorange noises and evaluations on real data, IEEE PLANS, Palm Springs, -6-9 May, 2010.
- [CI32] Cyril Meurie, Yassine Ruichek, Andréa Cohen, [Juliette Marais](#), A hybrid and adaptive segmentation method using color and textural information IS&T/SPIE Electronic Imaging 2010 - Image Processing: Machine Vision Applications III, California USA, January 2010, 11p. Vol. 7538

[2009 \(5\)](#)

- [CI33] Andréa Cohen, Cyril Meurie, Yassine Ruichek, [Juliette Marais](#) Amaury Flancquart, Quantification of GNSS signals accuracy: an image segmentation method for estimating the percentage of sky, Proceedings of the IEEE International Conference in Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Nov 10-12, 2009, Pune, Inde, 6p.
- [CI34] Nicolas Viandier, Asma Rabaoui, [Juliette Marais](#) and Emmanuel Duflos Enhancement of Galileo and multi-constellation accuracy by modeling pseudorange noises, The 9th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Lille, 20-22 oct. 2009, pp 459-464.
- [CI35] Asma Rabaoui, Nicolas Viandier, [Juliette Marais](#) and Emmanuel Duflos On the use of Dirichlet Process Mixtures for the modelling of pseudorange errors in multi-constellation based localization, The 9th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Lille, 20-22 oct. 2009, pp 465-470.
- [CI36] Asma Rabaoui, Nicolas Viandier, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, Using Dirichlet Process Mixtures for the Modelling of GNSS Pseudorange Errors in Urban Canyon, ION-GNSS 2009, Savannah, Georgia, September 22-25, 2009, 9p. (conf. citée par l'institut de Navigation Suisse comme équivalent à publication en journal)
- [CI37] Julie Beugin, Ales Filip, [Juliette Marais](#), Simulation approaches to evaluate dependability of satellite-based positioning services in railway transportation applications, ESREL 2009, Prague, 7-10 sept. 2009, 7p.

[2008 \(11\)](#)

- [CI38] Nicolas Viandier, [Juliette Marais](#), Andy Prestail, Emmanuel De Verdalle, Positioning Urban Buses: GNSS Performances, The 8th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), oct. 2008, 5p
- [CI39] Ales Filip, Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Hynec Mocek, Safety Concept of Railway Signalling Based on Galileo Safety of Life Service. COMPRAIL-11th international conference on Computer System Design and Operations in the Railway and Other Transit Systems, Toledo, Espagne, septembre 2008.
- [CI40] Donnay Fleury Nahimana, Emmanuel Duflos, [Juliette Marais](#), Reception State Estimation of GNSS satellites in urban environment using particle filtering, 11th International Conference on Information Fusion (Fusion 2008). 5p. 30 Juin-03 Juillet, 2008. Cologne, Allemagne.
- [CI41] Ales Filip, Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Hynec Mocek, Galileo Safety-of-Life Service and railway RAMS. Workshop EURNEX-ZEL-GNSS 2008, GNSS-Based Train Position Detection Device, 6th June, Stary Smokovec, Slovakia.
- [CI42] Jan Poliak, [Juliette Marais](#), Frank Hänsel, Uwe Becker, Eckerhard Schnieder, Methods and Tools for the Certification of GALILEO for Railway Applications, WCRR 2008, Mai 2008, Seoul.
- [CI43] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), An Approach to Quantify the Satellite-Based Train Location Service Using a Petri-Nets Model, WCRR 2008, Mai 2008, Seoul.
- [CI44] Nicolas Viandier, Fleury Nahimana, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, GNSS performance enhancement in urban environment based on pseudo-range error model, Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) IEEE/ION 2008. Page(s):377 - 382. 6-8 Mai 2008. Monterey, Californie. (conf. citée par l'institut de Navigation Suisse comme équivalent à publication en journal)
- [CI45] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Jean-Philippe Lozac'h, A dependability analysis for integrating a satellite positioning system in a rail freight application, ENC-GNSS 2008, Avril 2008, Toulouse.
- [CI46] Nicolas VIANDIER, [Juliette MARAIS](#), Andy PRESTAIL, Emmanuel DE VERDALLE, GNSS accuracy analysis along an urban bus line for ADAS application, ENC-GNSS 2008, Avril 2008, Toulouse.
- [CI47] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Aleš Filip, Analysis of the Galileo satellite-based location function in terms of railway safety requirements, CERGAL 2008, Braunschweig, Avril 2008.
- [CI48] Aleš FILIP, Julie BEUGIN, [Juliette MARAIS](#), Hynek MOCEK, A relation among GNSS quality measures and railway RAMS attributes, CERGAL 2008, Braunschweig, Avril 2008.

2007 (6)

- [CI49] Donnay Fleury Nahimana, Dr. [Juliette Marais](#), Prof. Emmanuel Duflos, A Jump Markov System for modelling a realistic error model depending on satellite reception state in urban environment, ION GNSS, Oct 2007, Fort Worth, Texas.
- [CI50] [Juliette Marais](#), Vincent Pouyet, Lateral guidance and longitudinal control for bus rapid transit- Focus on the positioning system based on GPS and RFID technology, ITS World Congress, Oct 2007, Beijing.
- [CI51] Fleury Nahimana, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, Pseudodistance error modelling in urban environment, ENC-GNSS, Genève, Mai 2007.

[CI52] Jan Poliak (iVA), [Juliette Marais](#) (INRETS), Frank Hänsel (iVA) Validation process for usage GALILEO in railways ZEL, Zilina (Slovaquie), Mai 2007.

[CI53] [Juliette Marais](#) (INRETS), Jan Poliak (iVA), Frank Hänsel (iVA) Tools for validation and acceptance of GNSS solutions in rail, ENC-GNSS, Genève, Mai 2007.

[CI54] [Juliette Marais](#), Pierre-Louis Girard, Andy Prestail, Jean-Laurent Franchineau, Emmanuel de Verdalle, Galileo availability for urban buses, ITS-T, Juin 2007, Sophia Antipolis.

2006 (4)

[CI55] [Juliette Marais](#), Baptiste Godefroy, Analysis and optimal use of pseudo-range delays in an urban environment, IEEE Computational Engineering in Systems Applications (CESA), Pékin, Oct. 2006.

[CI56] [Juliette Marais](#), Amaury Flancquart, Sébastien Lefebvre, Satellite availability in a railway mountainous environment: can we use satellite positioning for safety applications? World Congress on Railway Research (WCRR), Montréal, 2006.

[CI57] Marion Berbineau, Emilie Masson, Maria Chennaoui, [Juliette Marais](#), Satellite channel modelling using a Ray-tracing Tool for train communication, The 6th international Conference on ITS Telecommunications, 21-23 June 2006 – Chengdu, Chine

[CI58] Donnay Fleury Nahimana, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, The best use of available satellites for the best GNSS localisation in an urban environment, Proceedings of ENC 2006, Manchester, 8-10 May.

2005 (2)

[CI59] Gaël Scott, Céline Loisel, [Juliette Marais](#), Stéphane May, Marc Jeannot, Mobile satellite availability for non-critical telecommunication and navigation services in urban environment, International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC) 2005, Rome, Sept. 2005

[CI60] [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, Donnay Fleury. Nahimana, Effect of alternate path on satellite positioning accuracy in an urban environment International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC) 2005, Rome, Sept. 2005

2004 (2)

[CI61] Dr. [Juliette Marais](#), Sébastien Lefebvre, Dr. Marion Berbineau, Satellite Propagation Path Model along a Railway Track for GNSS Applications, IEEE Vehicular Technology Conference, (VTC 2004), Los Angeles, Sept. 2004.

[CI62] [Juliette Marais](#), Amaury Flancquart, Sébastien Ambellouis, Analysis of GNSS availability for Communication, Navigation and surveillance applications in urban buses, 10th World Conference on Transport Research (WCTR) 2004, Istanbul, juillet 2004.

2003 (2)

[CI63] [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, Olivier Frimat, Jean-Pierre Franckart, A new satellite-based fail-safe train control and command for low density railway lines, Technological Innovation for Land Transportation (TILT 2003), Lille, Déc. 2003.

[CI64] [Juliette Marais](#), Amaury Flancquart, Marion Berbineau, Prediction of GNSS availability in railway environments, World Congress on Railway Research (WCRR 2003), Edinburgh, Septembre 2003.

2002 (1)

[CI65] [Juliette Marais](#), Dr. Marion Berbineau, Jean-Pierre Ghys, Dr. Marc Heddebaut, Effect of multipath on availability of GPS satellites, International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2002), Montréal, Mai 2002.

2000 (1)

[CI66] [Juliette Marais](#), Bruno Meunier, Dr. Marion Berbineau, Evaluation of GPS Availability for Train Positioning along a Railway Line, Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference Symposium (VTC-2000), Boston, USA, Sept. 2000.

A8. Conférences nationales avec actes à comité de lecture

[CN1] [Juliette Marais](#), Sarab Tay, Estimation des états de réception des satellites GNSS pour une position plus précise, Journées Nationales des Communications dans les Transports, 29 et 30 Mai 2013, Nevers, France.

[CN2] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Propriétés de sûreté de fonctionnement d'un système embarqué de localisation par satellites dédié à la sécurité ferroviaire, Congrès Lambda mu, 16-18 octobre 2012, Tours.

[CN3] Dhouha ATTIA, Cyril MEURIE, Yassine RUICHEK, [Juliette MARAIS](#), Classification pixellaire pour la caractérisation de l'état de réception des signaux GNSS dans des images fisheye, GretsI 2011, Bordeaux, 5-8 sept. 2011.

[CN4] Nicolas Viandier, Donnay Fleury Nahimana, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, Modélisation des erreurs de pseudodistances pour l'amélioration des performances de localisation, COGIST 2009, St Quai Portrieux, 29 juin- 1er juil. 2009, 9p.

[CN5] Nicolas Viandier, Fleury Nahimana, [Juliette Marais](#), Emmanuel Duflos, GNSS Accuracy enhancement in urban environments based on error modeling and sequential Monte Carlo, Workshop Localisation précise et sure, Paris, le 16 juin 2009, 6p.

[CN6] [Juliette Marais](#), B. Meunier, Dr. Marion Berbineau, Evaluation de la disponibilité d'une constellation de satellites le long d'une trajectoire. Journées GPS, Nantes - juin 2000.

A9. Séminaires et tutoriaux, communications sans actes

2016 (3)

[ST1] [Juliette Marais](#), GNSS Reception in Rail Environment : the STARS project, GNSS in Railway Applications Workshop 2016 (GRA2016), Beijing, 18/07/2016

[ST2] [Juliette Marais](#), Etat des lieux des initiatives GNSS-Rail, Séminaire Ferroviaire Applications GNSS, Toulouse, 24/03/2016.

[ST3] [Juliette Marais](#), GNSS et rail : où en est-on ? Rail Industry Meetings, Lille, 16/03/2016.

2015 (1)

[ST4] [Juliette Marais](#), Projets européens - Notes de retour d'expérience, Journée d'information sur les appels Transports intelligents du PCN Transport le 28/09/2015.

2014 (6)

[ST5] [Juliette Marais](#), ERTMS, applications sécuritaires et applications satellitaires, quelles avancées de la recherche ?, Séminaire Recherche et innovation ferroviaires – Les bénéfices de la navigation par satellite européenne, 20 Novembre 2014, Lille.

[ST6] [Juliette Marais](#), Cyril Meurie, CAPLOC, Séminaire PREDIT "Connaissance de la mobilité", 13 novembre 2014, Paris.

[ST7] [Juliette Marais](#), GNSS enhanced accuracy in constricted environment based on the knowledge of satellite states of reception, SaPPART workshop, 24 septembre 2014, Londres.

[ST8] [Juliette Marais](#), Julien Moreau, Sébastien Ambellouis, Yassine Ruichek, GNSS reflection mitigation by 3D urban structure estimation, Workshop Hybridization GNSS and Video, 3 July 2014, Toulouse.

[ST9] [Juliette Marais](#), Applications GNSS dans le ferroviaire. Le projet GALOROI. Réunion du réseau national des adjoints aux délégués de zone de défense chargés de sécurité et de défense, 11 mars 2014, Marne la Vallée.

[ST10] [Juliette Marais](#), Sébastien Ambellouis, Cyril Meurie, Yassine Ruichek, Caractérisation et Structure 3D de l'environnement urbain pour une position GNSS plus précise. 41ème Congrès ATEC ITS, janvier 2014, Paris.

2013 (1)

[ST11] [Juliette Marais](#), Sébastien Ambellouis, Cyril Meurie, Yassine Ruichek, Combinaison de l'Analyse d'images et la connaissance de la Propagation des signaux pour la LOCALisation. 40ème Congrès ATEC ITS, janvier 2013, Paris.

2012 (2)

[ST12] [Juliette Marais](#), Combinaison de l'Analyse d'images et de la connaissance de la Propagation des signaux pour la LOCALisation, Séminaire interne du GIS ITS, Nantes, 4 avril 2012

[ST13] Cyril Meurie, [Juliette Marais](#), Combinaison de l'Analyse d'images et de la connaissance de la Propagation des signaux pour la LOCALisation, Séminaire de valorisation GO 2 Gestion de trafic, Paris, 28 mars 2012

2011 (1)

[ST14] [Juliette Marais](#), David Bétaille, François Peyret, Localisation GNSS en environnement urbain : précision et intégrité, Club « Télécommunications » du RST, Paris, 06/12/20112010 (5)

2010 (5)

[ST15] [Juliette Marais](#), CAPLOC - Combinaison de l'Analyse d'images et la connaissance de la Propagation des signaux pour la LOCALisation, Séminaire PREDIT GO2, 16 juin 2010.

[ST16] Marion Berbineau, [Juliette Marais](#), GNSS For ITS Applications in the Railway Domain, Keynote speech, ITST 2010, 9 nov. 2010, Kyoto.

- [ST17] [Juliette Marais](#), GNSS and integrity positioning for railway applications, NAVIGARE 2010, organise par l'Institut Suisse de Navigation, 30 juin 2010, Lausanne.
- [ST18] [Juliette Marais](#), Localiser par satellites : potentiel des GNSS et axes de recherche, Journée ATEC ITS, Recueil de données hors sol, 26 Mai 2010, Paris
- [ST19] [Juliette Marais](#), GNSS et Transports : quelles applications ? Les recherches en cours, Atelier ITS et GNSS organisé avec Team Côte d'Azur et la Fondation Sophia Antipolis, Nice, 29 avril 2010.

2009 (3)

- [ST20] [Juliette Marais](#), GNSS-based localisation systems: existing performances and works in progress, Network of Excellence for Advanced Road Cooperative Traffic management in the Information Society (NEARCTIS), 2nd Workshop Programme, 13 November 2009, Londres.
- [ST21] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, Approche de sûreté de fonctionnement pour des systèmes sans fil : le cas de Galileo, Journée ConecsSdF, Co-design de systèmes commandés en réseaux Sûrs de Fonctionnement, Septembre 2009, Paris, France.
- [ST22] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), INRETS activities on Galileo, session panel « GNSS ON TRACKS: RAILROAD », Munich Satellite Navigation Summit 2009, 3-5 March, 2009.

2008 (2)

- [ST23] Nicolas Viandier, [Juliette Marais](#) (INRETS) "Prise en compte de l'environnement de réception des signaux GNSS pour la localisation en environnement urbain", Robotique et Systèmes d'Information Géographiques, RFIA 2008, Amiens, 22 Janvier 2008.
- [ST24] [Juliette Marais](#), Systèmes de gestion des transports : combiner les technologies pour plus de services, intervention dans le cadre d'une session de sensibilisation des élus du Conseil Général des Côtes d'Armor organisée par l'association ITS Bretagne en collaboration avec TEMA, 21 janvier 2008.

2007 (2)

- [ST25] [Juliette Marais](#), Impact du canal de propagation sur les techniques GNSS, Séminaire SPC du laboratoire Heudiasyc, Université Technologique de Compiègne, Juin 2007.
- [ST26] [Juliette Marais](#) (INRETS), Jan Poliak (iVA), Frank Hänsel (iVA), First steps towards GALILEO validation for railways Validation process for usage GALILEO in railways, CERGAL, Braunschweig, April 2007.
- [ST27] [Juliette Marais](#), Comment évaluer la réception GPS en environnement réel (ex: milieu urbain) ? Club Pionnier, Mars 2007.

2006 (3)

- [ST28] Journées du Réseau Scientifique et Technique de l'Équipement : « Utilisation du GNSS dans les applications ferroviaires : quels challenges ? ». 5 et 6 Déc. 2006
- [ST29] Galileo in land transportation applications, Journées Internationales d'études ITCT 2006, 22 nov. 2006, Paris.
- [ST30] [Juliette Marais](#) (INRETS), Jan Poliak (iVA), George Barbu (UIC), Galileo for railways, Session spéciale Galileo, Conférence ITS-T, Sophia Antipolis, Juin 2006.

[ST31] [Juliette Marais](#), Use of Video Record to predict Satellite Availability and their Performance along a Railway Line, CERGAL, Braunschweig, 4-6 Avril 2006.

2005 (4)

[ST32] [Juliette Marais](#), Positioning with satellites in a transport environment, 11 & 12 Octobre 2005, Workshop EURNEX – POLE 5, Villeneuve d’Ascq

[ST33] [Juliette Marais](#), Satellite propagation analysis in a masking environment for GNSS applications, European Transport Conference (ETC), Strasbourg, Oct. 2005.
Conférence invitée suite au séminaire jeunes chercheurs

[ST34] [Juliette Marais](#), Satellite propagation analysis in a masking environment for GNSS applications, Séminaire Jeunes chercheurs, La Haye, Mai 2005.
Prix du 3ème meilleur article.

[ST35] [Juliette Marais](#), Gaël Scott (CNES), Performances de la localisation par satellite en zone urbaine et péri-urbaine, Journée spécialisée PEPSAT – 22 mars 2005, Lille, Projet « Transport Espace et Société »

2004 (3)

[ST36] [Juliette Marais](#), Satellite visibility analysis: Tool and Results. Présentation de PREDISSAT et de son utilisation dans le cadre du projet LOCOPROL, Conférence LOCOPROL, Pékin, 23 Novembre 2004.

[ST37] [Juliette Marais](#), Sébastien Ambellouis, Présentation du projet TESS, Séminaire PREDIT, 11 mai 2004.

[ST38] [Juliette Marais](#), Marion Berbineau, Analysis of satellite availability for satellite-based train control-command – Application to the LOCOPROL project, Journée organisée par l’ERRI « Satellite-based applications for railways », Paris, 20 & 21 jan. 2004.

2002 (1)

[ST39] La localisation par satellite dans l’environnement ferroviaire - Le projet LOCOPROL, Groupe de Travail Permanent de la CNIG « Positionnement Statique et Dynamique », 10/10/2002

A10. Rapports techniques

2016 (4)

[R1][Juliette Marais](#), Julie Beugin & al, STARS deliverable 5.1. State of the art on EGNSS projects for rail application, sept 2016.

[R2][Juliette Marais](#), Etat de l’art des solutions de localisation hybrides développées dans les projets ferroviaires, Etude Railenium pour la SNCF, Juillet 2016.

[R3][Juliette Marais](#) et David Bétaille & al, Review and enhancement of degradation models, SaPPART Task 2.3, june 2016

2015 (6)

- [R4] [Juliette Marais](#), David Bétaille & al, Algorithmes embarqués de localisation outdoor pour les véhicules en milieu urbain et algorithme embarqué de fusion GNSS et carte numérique, Livrable du COP, décembre 2015.
- [R5] [Juliette Marais](#), Sébastien Ambellouis, Sarab Tay, Julien Moreau, Projet CAPLOC. Livrable 3.2. Rapport final de la tâche 3, Janvier 2015.
- [R6] [Juliette Marais](#), Sébastien Ambellouis, Christophe Coniglio, Amaury Flancquart, Cyril Meurie, Sarab Tay, Yassine Ruichek, Dhouha Attia, Julien Moreau Projet CAPLOC. Rapport scientifique final. Janvier 2015.
- [R7] [Juliette Marais](#), Cyril Meurie, Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart, Julien Moreau, Dhouha Attia, Yassine Ruichek, Projet CAPLOC. Livrable L4.2 Bilan des publications, Janvier 2015.
- [R8] [Juliette Marais](#), Cyril Meurie, Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart, Julien Moreau, Dhouha Attia, Yassine Ruichek, Projet CAPLOC. Livrable L4.3 Bilan des résultats et recommandations, Janvier 2015.

2014 (3)

- [R9] [Juliette Marais](#), Cyril Meurie, Amaury Flancquart, Simon Lithgow, George Barbu, Demonstration of an innovative concept specification and results of simulation tools applied on photographed geo-referenced particular route environment. Livrable SATLOC. D4.2, May 2014.
- [R10] Sarab Tay, [Juliette Marais](#), Projet QualiSaR. D6.1. Report about the correlation analysis and the influence of the relevant environmental conditions on the localisation quality. Janvier 2014
- [R11] Thi Phuong Khanh Nguyen, Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Projet GALOROI. WP 6, D6.1 RAMS parameter analysis, 08/2014.

2013 (1)

- [R12] [Juliette Marais](#), Projet CAPLOC. Livrable d'avancement de la tâche 3. Utilisation de l'image pour la caractérisation des signaux reçus et de la disponibilité globale de la constellation. 31 oct. 2013

2012 (2)

- [R13] [Juliette Marais](#), Rapport à mi-parcours CAPLOC, CGDD/DRI, 18/10/2012.
- [R14] Julie Beugin, Olimpia Hoinaru, [Juliette Marais](#), Dieter Schnäpp, Marco Wegener, Structuring of terms describing the quality of GNSS, Livrable 1.1, Projet QualiSaR, GSA/7ème PCRD, sept. 2012, 31p.

2010 (2)

- [R15] Julie Beugin, [Juliette Marais](#), Projet GARA : application de Galileo à la localisation ferroviaire, Rapport rédigé pour le MEEDDM-DGITM, 2010.
- [R16] Fabrice Reclus, Kristen Reed-Drouard, [Juliette Marais](#), Surveillance télématique des transports de matières dangereuses suivis par satellite. Performances des GNSS et applications de Geofencing, Rapport rédigé pour la Mission Transports Intelligents (DGITM/SAGS) du MEEDEM, remis le 08/01/2010, 92p.

2009 (2)

- [R17] Julie Beugin, Djily Diaw, [Juliette Marais](#), L2.2.2 Étude de SdF de la fonction de localisation par satellites, Rapport rédigé pour le projet Tr@in-MD, Juillet 2009, 54p.
- [R18] [J. Marais](#), J. Beugin 2009, Etude des performances de Galileo pour des applications ferroviaires, notamment à caractère sécuritaire, MEDDAT, Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer, 43p.

2007 (2)

- [R19] Andrea Urlberger, Liliane Terrier, [Juliette Marais](#), Françoise Agez, Paysage technologique – Théories et pratiques autour du Global Positioning System, Rapport de projet réalisé dans le cadre de l'appel « Art, architecture et paysages, session 3 » du ministère de la culture et de la communication, Sept. 2007.
- [R20] Laurent Facon, Nicolas Viandier, [Juliette Marais](#), Développement d'une base de données de la disponibilité GPS le long de la ligne T1, Rapport interne au projet ANGO, Oct. 2007.
- [R21] Pierre-Louis Girard, [Juliette Marais](#), Disponibilité GPS sur la ligne T1 de Rouen, Résultats issus de PREDISSAT, Rapport interne au projet ANGO, Juil. 2007.

2006 (3)

- [R22] Pierre-Louis Girard, [Juliette Marais](#), Disponibilité GPS sur la ligne T1 de Rouen, Rapport interne au projet ANGO, Oct. 2006.
- [R23] Pierre-Louis Girard, [Juliette Marais](#), Mesures GPS sur le circuit du LIER à Lyon, Rapport interne au projet ANGO, Oct. 2006.
- [R24] GALILEO APPLICATIONS FOR RAIL, Integration of technologies for maximisation of effects, prepared by the UIC Working Group 'GALILEO Applications for rail' - 05 May 2006

2005 (3)

- [R25] GALILEO APPLICATIONS FOR RAIL, Economic estimates of GNSS / GALILEO applications, Prepared by the UIC Working Group 'GALILEO Applications for rail' - 22 dec. 2005
- [R26] Sébastien Ambellouis, Henri Basson, Aziz Benlarbi, Mohammed Benjelloun, Mourad Bouneffa, Jean-Bernard Choquel, Thierry Delot, Emmanuel Duflos, Jacques Dereux, Cyril Fonlupt, Christophe Gransart, Marc Heddebaut, [Juliette Marais](#), Denis Pomorski, Serge Reboul, Denis Robilliard, Paul-Alain Rolland, Frédéric Semet, Programme scientifique PEPSAT 2005-2007, Juillet 2005.
- [R27] Rapport final projet TESS, Mars 2005.

2004 (1)

- [R28] P.Lieutenant, F. Willms, [J. Marais](#), A. Droste, A. Napolitano, J. Willenkens, H. Ryckebosch, Deliverable D4.2.1 LOCOPROL, Site 1 Test Report, July 2004. Rapport Interne.

2003 (1)

- [R29] S. Ambellouis, M. Benjelloun, A. Benlarbi-Delaï, J-B. Choquel, M. Heddebaut, J. Marais, D. Pomorski, P-A. Rolland, F. Semet, G. Uster, P. Vanheeghe, Programme 2004-2006 dans le cadre de la création en région Nord-Pas de Calais d'un Pôle de compétences Européen sur le Positionnement Satellitaire Appliqué à la mobilité terrestre PEPSAT, Août 2003.

2002 et avant (3)

- [R30] M. Berbineau, J. Marais, C. Tatkeu, S. Delcourt, LOCOPROL internal report, WP3, Prediction of GNSS availability in the field of transport, Annexe du Deliverable LOCOPROL D3.1, 5 Août 2002, Diffusion restreinte.
- [R31] Dr. Marion Berbineau, Juliette Marais, Emmanuel Debrauwer, Radio Transmission tests along the MORANE French Trial site, measurements results, May, June 99
- [R32] Juliette Marais, Bruno Meunier, Jean Rioult, Dr. Marion Berbineau, Final Report DEUFRAKO-P - Evaluation of GPS availability along a railway line. WP3, rapport de contrat INRETS SNCF, diffusion restreinte, 28 pages, septembre 1998.

A11. Autres

Corédactrice d'un numéro spécial RTS « Les systèmes coopératifs en transport » avec Pierre-Yves Gilliéron, François Peyret et Ioannis Kaparias, Vol 29, n°113, juin 2013.

Mentions dans des revues para-scientifiques et technico-professionnelles, Articles de vulgarisation :

2017	Highlights from the 15th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST 2017) , by Jacek Rak, Poland, Marion Berbineau, France, Juliette Marais, France, and Mirosław Stando, Poland Cherche GPS fiable pour train autonome, <i>Trajectoires</i> , Numéro 13, Juin 2017.
2016	« Où est donc passé ce train ? », présentation dans la <i>European Space Expo</i> Paris le 24/06/2016.
2014	Pourquoi Galileo sera plus précis que le système GPS américain, <i>Sciences et avenir</i> , n°808 (Juin 2014) Galileo dans vos moyens de transport, <i>Al Contact</i> , Dossier « les transports, nouvelles technologies », mai 2014, p12-13. Pourquoi Galileo sera plus précis que le système GPS américain, <i>Sciences et Avenir</i> , 22-08-2014, extrait de <i>Sciences et Avenir</i> n°808 (Juin 2014)
2012	Localisation par satellites pour les transports terrestres, <i>L'hippocampe</i> (revue de l'association des Centraliens de Nantes), n°75, sept. 2012, p.21. Interview radio pour <i>autoroute info</i> , Juin 2012.
2010	Dossier « Localisation par satellite pour les trains, tramways, et autres moyens de transport terrestre », <i>Axes</i> n°53, Février 2010, p5-8.
2009	Invest in cote d'azur Business News, dossier spécial « La Côte d'Azur récompense le champions des Galileo et GMES Masters », Article « GALILEO MASTERS : Un jury d'experts de haut niveau s'était réuni dans les locaux de Team Côte d'Azur », 29 oct. 2009
2008	Article Valorisation « Galileo : applications ferroviaires sécuritaires », <i>Axes</i> , octobre

- 2008, n°40.
- Article sur la PFI GNSS, *Axes*, février 2008, n°34.
- 2007 Journée thématique « techniques de localisation par satellites et utilisation » *Axes*, Mai 2007, n°27.
- 2005 Tess, l'autobus branché satellite, *Ville & Transports*, 20/04/2005, n°374
- De nouvelles solutions pour les lignes à faible densité de trafic, *Rail et Transports*, 23/02/2005
- 2004 Galileo, un œil européen sur la planète, *Axes*, Décembre 2004, n°2.
- Prédire la couverture, *Rail et Transports* 27/10/2004
- Géolocalisation, de nouvelles applications se profilent, *Route Actualité*, Septembre 2004, n°137.