



Réseau de capteurs sans fil : étude en vue de la réalisation d'un récepteur GPS différentiel à faible coût

Messaoud Kara

► To cite this version:

Messaoud Kara. Réseau de capteurs sans fil : étude en vue de la réalisation d'un récepteur GPS différentiel à faible coût. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2009. Français. <NNT : 2009CLF21979>. <tel-00724810>

HAL Id: tel-00724810

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00724810>

Submitted on 22 Aug 2012

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.

N° d'ordre D.U : 1979
EDSPIC : 457

Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée Par

Messaoud KARA

Ingénieur en Informatique

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR D'UNIVERSITÉ
Spécialité : INFORMATIQUE

Réseau de capteurs sans fil : Etude en vue de la réalisation d'un récepteur GPS différentiel à faible coût

Soutenue publiquement le 25 novembre 2009 devant le jury :

M. Farouk Toumani	Président (Université Blaise Pascal)
M. Mahmoud Meribout	Rapporteur (The Petroleum Institute, Abu Dhabi, United Arab Emirates)
Mme. Edwige Pissaloux	Rapporteur (Université Pierre et Marie Curie)
M. Jean-Pierre Chanet	Invité (CEMAGREF de Clermont-Ferrand)
M. Kun Mean Hou	Directeur de thèse (Université Blaise Pascal)



A ma famille.

Remerciements

Mes travaux de thèse se sont déroulés au sein du laboratoire LIMOS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes, UMR 6158 CNRS), et, en partie, en collaboration avec le SMTC (Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'agglomération clermontoise) et deux sociétés privées GT Aquitaine (Garczynski Traploir Aquitaine, filiale du groupe VINCI) et i2S.

Je tiens à remercier ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de mes travaux.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Monsieur Kun Mean HOU, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe (SMIR, Systèmes Multi-sensoriels Intégrés Intelligents Répartis). Son expertise, sa disponibilité, sa confiance, son soutien et ses conseils m'ont été précieux.

Mes remerciements vont, tout naturellement, aussi à Monsieur Alain Quilliot Directeur du laboratoire LIMOS. Il n'a jamais épargné ses efforts pour encourager les partenariats avec des acteurs industriels et pour fournir des moyens d'encadrement de bonnes qualités.

Je témoigne énormément de gratitude envers tous les membres du jury et je remercie vivement Monsieur Mahmoud Meribout et Madame Edwige Pissaloux d'avoir accepté d'être rapporteur de mes travaux, et Monsieur Farouk Toumani d'avoir présidé mon jury de thèse. Je remercie également Monsieur Jean-Pierre Chanet pour sa participation à ce jury et son engagement très fort dans de nombreuses collaborations entre le Cemagref de Clermont-Ferrand (UR TSCF équipe COPAIN) et l'équipe SMIR du laboratoire LIMOS. Ce fut un vrai plaisir de collaborer avec son équipe.

Je remercie le SMTC d'avoir financé en partie mes travaux dans le cadre de deux projets de recherche et développement (Projets SUAB et MobiPlus). Je remercie aussi les entreprises et les organismes avec lesquels j'ai collaboré lors de mes travaux de recherche dont GT Aquitaine, i2S, TMS et le laboratoire LASMEA. Dans ce cadre là, je remercie Messieurs Serge Godard (Président du SMTC) et Patrice Charlat (Chef de projet du tramway clermontois), Jean-Rémy Gad et Jean Dumesnil (respectivement chef d'entreprise et chargé d'affaires de l'entreprise GT Aquitaine à Talence), et Jean-Louis Blouin et Christophe Geindre (respectivement directeur général et responsable de la division Solutions de la société i2S à Pessac).

Mes remerciements vont également à tous les membres de l'équipe SMIR qui sont devenus plus que des collègues ; pour leur accueil, leur aide et pour les moments que nous avons partagés et les discussions enrichissantes que nous avons eues. Je remercie particulièrement Messieurs Hai-Ying ZHOU et Christophe de Vaulx dont leur aide m'a été très précieuse lors de mon arrivée dans l'équipe. Je remercie également M. Mohamad Badra et Mme Jian-Jin LI ainsi que mes autres collègues : Abdelaziz Amamra, Gil De Sousa, Aurélien Jacquot, Xunxing Diao et Hao Ding. Je suis donc très reconnaissant envers eux tous. Sans eux, la réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible.

Je veux bien évidemment remercier toutes les personnes que j'ai côtoyées de près ou de loin - simplement avec un bonjour un matin - durant ces années de thèse, au laboratoire LIMOS, au SMTC, chez i2S et GT Aquitaine. Merci à eux tous.

Je suis également reconnaissant envers Alexandre Guitton avec qui j'ai travaillé le plus pendant mes deux années d'ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche).

Merci à ceux qui ont contribué à ce que cette thèse se passe bien : collaborateurs, personnes administratives, aides techniques, ... Merci donc à Béatrice Bourdieu, Daniel Breugnot, Martine Closset, Nathalie Fonty, Frédéric Meignan et Rose Seguy.

J'ai une énorme pensée pour tous les membres de ma famille, même éloignés, pour leurs encouragements incessants et, en particulier, pour mon épouse pour son soutien indéfectible et sa patience inépuisable.

Enfin, je remercie tous mes amis, dont la liste serait trop longue à énumérer. Si j'en cite quelques uns, je risque d'en oublier, Je les remercie donc pour leur soutien tout au long de ces années de thèse et pour leurs encouragements et conseils notamment dans les moments difficiles.

Résumé

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est composé d'un ensemble de capteurs/nœuds dont le nombre peut être très grand. Le RCSF est utilisé pour réaliser une tâche spécifique d'une application. Les RCSF sont devenus de plus en plus populaires grâce à leur large champ d'applications civiles et militaires : environnement, agriculture, météorologie, santé, domotique...

Le but final d'un RCSF est de surveiller une zone d'intérêt, mais pour y parvenir plusieurs sous objectifs (services) doivent être réalisés. Parmi ces services : la synchronisation entre nœuds, la localisation, la gestion de la topologie, l'agrégation des données, le stockage de données, etc.

La localisation des nœuds est l'un des services les plus importants. Elle consiste à associer à chaque nœud les coordonnées de sa position. Plusieurs méthodes sont utilisées pour réaliser cette fonctionnalité. Un ensemble de systèmes (technologies) ont été développés pour assurer ce service.

Le système le plus utilisé à l'extérieur, à l'échelle mondiale, est de loin le GPS (Global Positioning System). Il a l'avantage de fournir la position (ainsi que l'heure) en continu et dans toutes les conditions météorologiques.

Cependant, la précision du GPS n'est pas suffisante pour toutes les applications, d'où la nécessité de l'améliorer. Pour cela, le mode différentiel (DGPS, Differential GPS) est introduit. Il consiste à utiliser une station de base qui surveille les erreurs du GPS, calcule des corrections et les transmet via un médium d'accès sans fil. Mais l'installation d'une station différentielle (RTK, Real-Time Kinematic) est difficile et surtout très onéreuse.

Le mode différentiel inspire les travaux de cette thèse mais à l'inverse de la solution RTK qui utilise une grande station de base, la solution originale proposée dans cette thèse (LCD-GPS, Low Cost Differential GPS, Local Cooperative DGPS) est basée sur l'utilisation d'un RCSF équipés de récepteurs GPS standards à faible coût.

Les travaux menés pour améliorer la précision du GPS incluent l'utilisation de carte numérique (Map Matching), la différence simple, la différence intelligente, le filtrage, la correction globale, ...

Afin d'évaluer cette solution, une plateforme matérielle et logicielle a été développée, elle consiste en un réseau de capteurs appelés LiveNodes (LIMOS Versatile Embedded Node). La partie logicielle est composée notamment d'un système d'exploitation embarqué appelé LIMOS (Lightweight Multi-threading Operating System) et d'un protocole de communication sans fil appelé CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative) et enfin les traitements propres à la solution LCD-GPS.

Les résultats obtenus montrent que le LCD-GPS peut être utilisé pour diverses applications mais qu'il est très sensible à l'environnement (multi-trajet). Cependant, il est à noter que, le RCSF permet en général la réalisation d'un capteur robuste et sûr.

Mots-clés : Localisation, Réseaux de Capteurs Sans Fil, RCSF, GPS, DGPS, GPS Différentiel, Map Matching

Wireless Sensor Networks: Study for developing a Low Cost Differential GPS receiver.

Abstract

A Wireless Sensor Network (WSN) consists of a set of wireless nodes where their number can be very large. The WSN is used to perform a specific task for an application. The WSN has become increasingly popular due to their wide range of civil and military applications: smart planet, smart home, smart care, M2M (Machine to Machine)...

The ultimate goal of a WSN is to monitor an area of interest, but to achieve that, several objectives (services) must be implemented. These services include: synchronization between nodes, localization, topology management, data aggregation, data storage, etc.

The node's localization is one of the most important services. It associates to each node the coordinates of its position. Several methods are used to achieve this function. A set of systems (technologies) have been developed to provide this service.

The most commonly used outdoors, worldwide, by far is the GPS (Global Positioning System). It has the advantage of providing the position (and time) continuously and in all weather conditions.

However, the accuracy of GPS does not meet the requirements of all applications, thus it is necessary to improve GPS accuracy. For this, the differential mode (DGPS, Differential GPS) is introduced. It uses a base station that monitors the GPS errors, calculates corrections and transmits them through a wireless access medium; but the installation of a differential station (RTK, Real-Time Kinematic) is difficult and very expensive.

The differential mode inspires this thesis, but in contrast to the RTK solution that uses a large base station, the original solution proposed in this thesis (LCD-GPS, Low Cost Differential GPS, Local Cooperative DGPS) is based on using a WSN equipped with low cost standard GPS receivers.

Works conducted to improve the GPS accuracy include the use of a digital map (Map Matching), the simple difference, the intelligent difference, the filtering and a global correction.

To evaluate this solution, a hardware and software platform has been developed; it consists of a network of wireless nodes called LiveNodes (LIMOS Versatile Embedded Node). The software part is composed particularly of an embedded operating system called LIMOS (Lightweight Multi-Threaded Operating System) and a wireless communication protocol called CIVIC (Inter Vehicle Communication and Intelligent Cooperative) and finally the specific processing of LCD-GPS solution.

The results show that the LCD-GPS can be used for various applications but it is very sensitive to the environment (multipath). However, it is noted that the WSN can generally achieve a robust and reliable location sensor.

Keywords: Localization, Wireless Sensor Networks, WSN, GPS, DGPS, Differential GPS, Map Matching

Table des matières

Remerciements	v
Résumé	vii
Abstract	ix
Table des figures	xv
Liste des tableaux	xix
Liste des acronymes	xxi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Organisation du mémoire	2
I SYSTEMES DE LOCALISATION	5
1 Introduction	5
1.1 Importance des systèmes de localisation	5
1.2 Contraintes pour un système de localisation	6
1.3 Propriétés d'un système de localisation	7
1.4 Composition d'un système de localisation.....	9
2 Estimation de distance/angle	10
2.1 Indicateur de puissance du signal reçu – RSSI.....	11
2.2 Le nombre de sauts – RHC (<i>Radio Hop Count</i>)	11
2.3 Le temps de parcours – ToA/ToF	12
2.4 La différence du temps d'arrivée – TDoA.....	12
2.5 L'angle d'arrivée – AoA/DoA	13
2.6 La reconnaissance de motifs	14
2.7 Autres approches	14
2.8 Commentaires sur l'estimation de distance/angle	18
3 Calcul de la position (auto-localisation)	18
3.1 Trilatération et multilatération	19
3.2 Triangulation	20
3.3 Approche probabiliste.....	21
3.4 Cadre englobant – BB.....	22
3.5 Position centrale	23
3.6 Bilan et synthèse sur les techniques de calcul de la position.....	23
4 Algorithme de localisation	24
4.1 Le système GPS	25
4.2 Système de localisation ad hoc (APS).....	27
4.3 Estimation récursive de la position (RPE).....	29
4.4 Estimation dirigée/orientée de la position (DPE).....	29
4.5 Localisation avec balise mobile (LMB)	30
5 Exemples de systèmes de localisation (technologies)	31
5.1 Active Badge.....	31
5.2 Active Bat	32
5.3 Cricket	33
5.4 RADAR	34
6 Amélioration de la précision	35

6.1	Le lissage (filtre passe bas)	35
6.2	La limitation (SNAPPING)	36
6.3	La fusion et le suivi (fusion and tracking).....	36
7	Conclusion	36
II	POSITIONNEMENT PAR SATELLITES.....	39
1	Introduction.....	39
2	Le système GPS	40
2.1	La composition du système.....	40
2.2	L'historique du GPS	44
2.3	Services offerts par le GPS	45
2.4	Le principe du positionnement	46
3	Les sources d'erreurs.....	52
3.1	Introduction	52
3.2	Quantification des erreurs	53
3.3	Erreurs du secteur de contrôle.....	54
3.4	Erreurs atmosphériques (propagation).....	56
3.5	Erreurs dues au récepteur.....	58
3.6	Performances du GPS.....	59
4	Le GPS différentiel (DGPS)	60
4.1	Principe du DGPS.....	60
4.2	Analyse des erreurs du DGPS	61
4.3	Performance du DGPS.....	62
4.4	Techniques du GPS Différentiel.....	63
5	Systèmes d'augmentation de la précision par satellites.....	65
5.1	WAAS.....	65
5.2	EGNOS	66
5.3	MSAS	66
5.4	GAGAN	66
6	Modernisation du système GPS	67
7	Les autres systèmes de localisation par satellites	67
7.1	GLONASS	68
7.2	GALILEO	69
7.3	BEIDOU (BEIDOU -2, COMPASS).....	72
8	La transformation des coordonnées WGS-84 vers Lambert II	73
8.1	Définition.....	73
8.2	Géométrie de l'ellipsoïde	73
8.3	Transformation des coordonnées géographiques vers cartésiennes	74
8.4	Paramètres de la similitude entre WGS-84 et NTF	74
8.5	Transformation des coordonnées cartésiennes vers géographiques	74
8.6	Transformation des coordonnées géographiques vers planes	75
9	Conclusion	77
III	LCD-GPS (LOW-COST DIFFERENTIAL GPS).....	79
1	Introduction.....	79
2	Principe du LCD-GPS	79
3	Analyse de la solution.....	80
	Correction et fonction de transfert.....	81
4	Caractérisation des positions d'un point	82

5	Corrections différentielles en étapes	86
5.1	Utilisation d'une carte numérique (Map Matching)	86
5.2	Une correction locale	89
5.3	Une correction globale.....	96
6	Expérimentations à L'ISIMA :	96
6.1	Scénario I : Espace ouvert	97
6.2	Scénario 2 : Effet du multi-trajet sur la précision.....	105
7	La correction globale	110
8	Expérimentations sur la plateforme PAVIN	116
8.1	Présentation de la plateforme PAVIN	116
8.2	Scénario I : Correction globale	117
8.3	Scénario II : La moyenne de plusieurs récepteurs GPS	121
9	Conclusion	122
IV	La plateforme matérielle et logicielle et ses applications	123
1	Introduction	123
2	Architecture Matérielle	123
2.1	Les plateformes existantes.....	124
2.2	Le LiveNode.....	125
2.3	La station de base (ZigBee/Wi-Fi).....	128
3	Architecture Logicielle	128
3.1	Les systèmes d'exploitation embarqués dédiés aux RCSF	128
3.2	Le système LIMOS	129
3.3	Les algorithmes de routages existants (MANET).....	130
3.4	Le protocole CIVIC.....	131
3.5	Le LCD-GPS – Traitements GPS.....	136
4	Cas d'utilisation du capteur LiveNode	139
4.1	Projet Net-ADDED	139
4.2	Projet MobiPlus.....	141
4.3	Autre projets et collaborations	143
5	Conclusion	145
	CONCLUSION GENERALE	147
	Bibliographie	151
	ANNEXE I – ALMANACH	159
1	Paramètres d'une orbite de satellite	159
2	Extrait d'un almanach	159
3	Logiciel « Planning de Trimble ».....	161
	ANNEXE II – MESSAGE DE NAVIGATION	163
1	Format du message de navigation.....	163
2	Contenu du message de navigation.....	163
	ANNEXE III – Calcul des valeurs DOP	165
	ANNEXE IV – Description du protocole NMEA – 0183	167
1	Message GGA - Global positioning system fixed data.....	168

2	Message GGL - Geographic position – Latitude/Longitude	169
3	Message GSA - GNSS DOP and active satellites	169
4	Message GSV - GNSS satellites in view	169
5	Message RMC - Recommended minimum specific GNSS data	170
6	Message VTG - Course over ground and ground speed	170

Table des figures

Figure I-1 Composition d'un système de localisation [1].....	10
Figure I-2 Principe du TDoA.....	13
Figure I-3 Principe de la trilatération	19
Figure I-4 Principe de la triangulation [1].....	21
Figure I-5 Principe de la triangulation [7].....	21
Figure I-6 Exemple approche probabiliste [1].....	22
Figure I-7 Principe du cadre englobant	23
Figure I-8 Principe du DPE – <i>Directed Position Estimation</i>	30
Figure I-9 'Active Badge'	32
Figure I-10 principe du 'Active Bat'	33
Figure I-11 Emetteur/Récepteur Cricket.....	34
Figure II- 1 Segments du système GPS [60].....	40
Figure II- 2 La constellation GPS	41
Figure II- 3 Des satellites GPS des blocs II/IIA, IIR-M, IIF et III	41
Figure II- 4 Carte des stations du segment de contrôle	43
Figure II- 5 Positionnement 3D avec une seule mesure connue (R)	46
Figure II- 6 Positionnement 3D avec deux mesures connues.....	47
Figure II- 7 Positionnement 3D avec trois mesures connues.....	47
Figure II- 8 Référentiel ECEF	48
Figure II- 9 Mesure du temps par un récepteur GPS	50
Figure II- 10 Construction des signaux GPS transmis sur L1 et L2 [49].....	52
Figure II- 11 Erreurs de position du satellite [49]	54
Figure II- 12 DOP - Mauvaise géométrie des satellites [50].....	56
Figure II- 13 DOP - Bonne géométrie des satellites [50].....	56
Figure II- 14 Traversée des couches atmosphériques	56
Figure II- 15 Le multi-trajet	58
Figure II- 16 Architecture d'un système GPS différentiel	61
Figure II- 17 Principe d'augmentation de la précision par satellites – WAAS	65
Figure II- 18 Précision GPS avec la correction WAAS.....	66
Figure II- 19 La constellation GLONASS.....	68
Figure II- 20 La constellation GALILEO.....	70
Figure II- 21 Un satellite GALILEO (GIOVE-A, vue d'artiste).....	72
Figure II- 22 Processus de changement de système géodésique [47]	74
Figure II- 23 Zones de projection Lambert	76
Figure III- 1 Principe du LCD-GPS	80
Figure III- 2 Schéma de principe de la correction différentielle	82
Figure III- 3 Relevés GPS d'un point sur le toit de l'ISIMA pendant 7 heures le 24/07/2008	83
Figure III- 4 Satellites utilisés pour le positionnement d'un point sur le toit de l'ISIMA.....	84
Figure III- 5 Variations des écarts en X, Y et Z pour un même point (7 Heures)	84
Figure III- 6 Variations des écarts en X, Y et Z pour un même point (5 minutes)	85
Figure III- 7 Histogramme des erreurs en X, Y et Z respectivement.....	86
Figure III- 8 Correction à l'aide d'une carte numérique (MAP MATCHING)	87
Figure III- 9 Trois trajectoires de trois récepteurs GPS	87
Figure III- 10 Projection d'une trajectoire sur les bords de la route (Map Matching)	88
Figure III- 11 Carte du campus des Cézeaux (Université Blaise Pascal)	89

Figure III- 12 Principe de la différence simple (une seule station)	90
Figure III- 13 Le placement des 3 capteurs.....	90
Figure III- 14 Format des données GPS au format NMEA.....	91
Figure III- 15 Format des données GPS après conversion en LAMBER II	91
Figure III- 16 Les positions instantanées des 3 capteurs (expérimentation du 04/01/2007)	92
Figure III- 17 Les positions instantanées du 2 ^{ème} capteur (expérimentation du 04/01/2007)	92
Figure III- 18 Facteurs de corrélation entre les coordonnées des 3 capteurs.....	93
Figure III- 19 Les positions corrigées du 3 ^{ème} capteur	94
Figure III- 20 Les positions estimées des 3 capteurs	95
Figure III- 21 Un relevé GPS pour les mêmes 3 points fixes	95
Figure III- 22 Le placement des 3 capteurs (Expérimentation 22-23-24/07/2008).....	97
Figure III- 23 Les positions instantanées des 3 capteurs	98
Figure III- 24 Variations des écarts en X, Y et Z pour le 1 ^{er} capteur – 22/08/2008	99
Figure III- 25 Extrait des variations dX, dY et dZ.....	99
Figure III- 26 Erreurs simultanées des 3 capteurs, variations en X	100
Figure III- 27 Erreurs simultanées des 3 capteurs, variations en Y	100
Figure III- 28 Erreurs simultanées des 3 capteurs, variations en Z.....	101
Figure III- 29 Nuages de points des 3 capteurs – 22/07/2008	102
Figure III- 30 Traitements sur les données du 1 ^{er} capteur	103
Figure III- 31 Traitements sur les données du 2 ^{ème} capteur	103
Figure III- 32 Traitements sur les données du 3 ^{ème} capteur.....	104
Figure III- 33 Lieu des expérimentations (parking ISIMA).....	105
Figure III- 34 La disposition des 5 capteurs	106
Figure III- 35 Les nuages de points des 5 capteurs	107
Figure III- 36 Comparaison des précisions des 5 capteurs.....	107
Figure III- 37 Un Cycab avec un LiveNode	117
Figure III- 38 La plateforme PAVIN – Circuit urbain.....	117
Figure III- 39 PAVIN- Positions des capteurs fixes (rouge) et mobile (cyan)	118
Figure III- 40 Pavin - Correction pour un mobile avec 6 stations de référence.....	119
Figure III- 41 Pavin - Correction pour un mobile avec 5 stations de référence.....	120
Figure III- 42 Pavin - Correction pour un mobile avec 4 stations de référence.....	120
Figure III- 43 PAVIN- trace d'un mobile avec 3 récepteur GPS	121
Figure IV- 1 Architecture matérielle et logicielle d'un LiveNode dédié au LCD-GPS.....	123
Figure IV- 2 Le LiveNode (deux générations)	125
Figure IV- 3 Un ensemble de LiveNodes	126
Figure IV- 4 Le multi-support WiFi-ZigBee (2 LiveNodes connectés ensemble)	127
Figure IV- 5 La station ZigBee.....	128
Figure IV- 6 L'architecture de LIMOS.....	130
Figure IV- 7 CIVIC - Architecture mixte Ad-hoc et infrastructure	132
Figure IV- 8 Le concept de DANKAB	133
Figure IV- 9 La structure du protocole CIVIC avec LCD-GPS	134
Figure IV- 10 La topologie du routage avec le SF.....	134
Figure IV- 11 La topologie du routage avec DANKAB	135
Figure IV- 12 Test de CIVIC sur PAVIN (disposition des nœuds).....	136
Figure IV- 13 Test de CIVIC sur PAVIN avec un mobile (véhicule cycab).....	136
Figure IV- 14 LCD-GPS pour une station de référence – Phase I	137
Figure IV- 15 LCD-GPS pour une station de référence – Phase II	138
Figure IV- 16 LCD-GPS Utilisation d'une carte numérique	138
Figure IV- 17 LCD-GPS Correction différentielle.....	139
Figure IV- 18 Net-ADDED – Utilisation du LiveNode dans l'agriculture	140

Figure IV- 19 Net-ADDED – LiveNode utilisé pour la collecte de l’humidité au sol.	141
Figure IV- 20 MobiPlus – Le sous-système quai (SSQ).....	142
Figure IV- 21 MobiPlus – Le sous-système bus (SSB)	143
Figure IV- 22 MobiPlus – La plateforme expérimentale à Aubière	143
Figure IV- 23 Projet STAR – Capteur biomédical	144
Figure IV- 24 Projet STAR – Principe général.....	144
Figure i1- 1 Les différents paramètres d’une orbite de satellite	159
Figure i1- 2 Visibilité des satellites GPS sur Clermont-Ferrand	161
Figure i1- 3 Nombre de satellites visibles.....	162
Figure i1- 4 Carte du ciel : Azimut & Elévation durant 24 heures	162
Figure i1- 5 Les différentes valeurs de DOP	162
Figure i2- 1 Structure du message de navigation	163
Figure i2- 2 Contenu du message de navigation	164

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles	18
Tableau I-2 : Comparaison des méthodes de calcul de la position [1]	24
Tableau II-1 Bilan des erreurs du GPS [49]	60
Tableau II-2 Bilan des erreurs du DGPS	62
Tableau II-3 Performances prévues des différents services de GALILEO [41][45]	72
Tableau II-4 Constantes de la projection Lambert pour la France [47]	75
Tableau III—1 Statistique sur les positions instantanées d'un point sur le toit de l'ISIMA	83
Tableau III—2 Statistique sur les changements des positions GPS - Temps	85
Tableau III—3 Statistique sur les changements des positions GPS - Distance	85
Tableau III—4 Résumé des résultats de deux expérimentations	96
Tableau III—5 Différence simple appliquée aux données du 1 ^{ier} jour (22/07/2008)	101
Tableau III—6 Différence intelligente appliquée aux données du 1 ^{ier} jour (22/07/2008)	102
Tableau III—7 Résumé des écarts types des 5 capteurs (25/11/2008)	107
Tableau III—8 Résultats de la différence simple	108
Tableau III—9 Résultats de la différence simple avec les données filtrées	109
Tableau III—10 Résultats de la différence intelligente	109
Tableau III—11 Résultats de la différence intelligente avec les données filtrées	110
Tableau III—12 Résultats de la différence simple globale (2 stations)	111
Tableau III—13 Résultats de la différence simple globale (3 stations)	111
Tableau III—14 Résultats de la différence simple globale (4 stations)	112
Tableau III—15 Résultats du filtrage+la différence simple globale (2 stations)	112
Tableau III—16 Résultats du filtrage+la différence simple globale (3 stations)	113
Tableau III—17 Résultats du filtrage+la différence simple globale (4 stations)	113
Tableau III—18 Résultats de la différence intelligente globale (2 stations)	114
Tableau III—19 Résultats de la différence intelligente globale (3 stations)	114
Tableau III—20 Résultats de la différence intelligente globale (4 stations)	115
Tableau III—21 Résultats du filtrage+la différence intelligente globale (2 stations)	115
Tableau III—22 Résultats du filtrage+la différence intelligente globale (3 stations)	116
Tableau III—23 Résultats du filtrage+la différence intelligente globale (4 stations)	116
Tableau IV—1 Comparaison entre les CSF existants [65]	124

Liste des acronymes

AS	AntiSpoofing
CEP	Circular Error Probable
CDMA	Code Division Multiple Access
DOP	Dilution Of Precision
GDOP	Geometric DOP
HDOP	Horizontal DOP
PDOP	Position DOP
VDOP	Vertical DOP
DGPS	Differential GPS
ECEF	Earth Centered, Earth Fixed
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
INS	Inertial Navigation System
LAN	Local Area Network
MSAS	MTSAT Based Augmentation System
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudo Random Noise or Pseudo Random Number
RHC	Radio Hop Count
RMS	Root Mean Square
HRMS	Horizontal Root Mean Square
RSSI	Received Signal-Strength Indicator
RTLS	Real Time Locating System
SA	Selective Availability
SEP	Spherical Error Probable
SBAS	Satellite-Based Augmentation System

SPS	Standard Positioning Service
SV	Space Vehicle (Satellite)
SVN	Space Vehicle Number
ToA	Time of Arrival
TDoA	Time Difference of Arrival
USERE	User Equivalent Range Error
UTC	Universal Coordinated Time
UTM	Universal Transverse Mercator
WLAN	Wireless Local Area Network
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS	World Geodetic System

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ces dernières années ont vu naître un nouveau type de réseaux appelés Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF), grâce notamment aux progrès récents dans la microélectronique et les technologies de transmission sans fil.

Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds/capteurs dont le nombre peut être très grand. Le RCSF est utilisé pour réaliser une tâche spécifique d'une application. Chaque nœud intègre une sonde (capteur) qui mesure une grandeur physique (température, humidité, luminosité, ...), un module de communication sans fil et un microcontrôleur pour traiter les informations et éventuellement les stocker dans une unité de mémoire.

Les RCSF sont devenus de plus en plus populaires en raison de leur large champ d'applications civiles et militaires : environnement, agriculture, météorologie, santé, domotique ...

Afin que le RCSF parvienne à réaliser son objectif principal, il est nécessaire que plusieurs sous-objectifs soient atteints. Parmi ces sous-objectifs : la synchronisation entre nœuds, la localisation, la gestion de la topologie du réseau, l'agrégation des données collectées, le stockage de données, etc.

La localisation des nœuds est l'un des services les plus importants. Elle consiste à déterminer la position physique (par exemple latitude, longitude et altitude pour le GPS) de chaque nœud.

Les systèmes de localisation sont identifiés comme une technologie clé pour le développement et l'utilisation des RCSF. Cependant, leur utilisation n'est pas réservée aux RCSF. Ils sont utilisés dans plusieurs autres domaines : la robotique, les réseaux ad hoc, la téléphonie mobile, ...

Le système GPS est le système de localisation le plus utilisé au monde. Il présente un certain nombre d'avantages : Il est disponible dans le monde entier, il fonctionne jour et nuit (24h/24 et 7j/7) et dans toutes les conditions météorologiques (avec dégradation de ses performances dans les cas extrêmes).

Cependant, il n'est pas utilisable partout. En effet, il n'est utilisable qu'à l'extérieur et lorsqu'il n'y a pas d'obstacle. De plus, sa précision n'est pas suffisante pour toutes les applications du fait que les signaux GPS sont perturbés par plusieurs phénomènes liés notamment à la traversée des couches atmosphériques (ionosphère et troposphère) et à l'endroit où se trouve le récepteur GPS.

Pour améliorer la précision du GPS, le mode différentiel est adopté. Il consiste à utiliser une station de base (fixe) équipée d'un récepteur GPS et d'un dispositif de communication radio. Cette station surveille en permanence les erreurs du GPS, calcule des corrections et les transmet par radio. Un récepteur GPS (doté de la fonction différentielle) qui reçoit ces corrections, les applique à ses mesures de distances (Récepteur-Satellites) puis calcule sa position corrigée. Cette position est plus précise que la position calculée par le récepteur GPS sans correction (mode absolu).

Nos travaux de thèse s'inspirent du mode différentiel du GPS, mais à l'inverse des solutions différentielles existantes (très onéreuses, taille imposante, installation compliquée), la solution que nous proposons est basée sur l'utilisation d'un RCSF composé de nœuds équipés de récepteurs GPS

standard (civil) à faible coût. Ils coopèrent pour fournir un service de positionnement GPS différentiel améliorant ainsi la précision du positionnement sans pour autant augmenter les coûts d'une manière significative.

Notre travail au départ était de concevoir et mettre en œuvre la localisation par GPS au sein du protocole de communication CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative) qui était en cours de développement. La localisation par GPS permettra alors d'utiliser des antennes directives (asservies), d'effectuer du routage géographique, de synchroniser les nœuds pour la datation des données.

Ces travaux se sont étendus par la suite pour proposer une solution GPS différentielle basée sur un RCSF appelée LCD-GPS (Low Cost Differential GPS, Local Cooperative DGPS) qui vise à améliorer la précision du GPS.

Afin d'évaluer cette solution, une plateforme matérielle et logicielle a été développée, elle consiste en un réseau de capteurs appelés LiveNodes (LIMOS Versatile Embedded Node). La partie logicielle est composée notamment d'un système embarqué appelé LIMOS (Lightweight Multi-threading Operating System), d'un protocole de communication appelé CIVIC et des traitements liés à la solution LCD-GPS.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est composé de quatre chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art de la localisation en général et plus particulièrement dans les réseaux de capteurs sans fil. Il commence par montrer l'importance de la localisation, ses contraintes ainsi que les caractéristiques d'un système de localisation. Ce dernier est considéré comme composé de trois sous systèmes : un système d'estimation des distances/angles entre les nœuds, un système pour calculer la position relative des noeuds et un algorithme de localisation qui définit la façon dont les informations de localisation sont manipulées dans le réseau afin que la grande partie des nœuds puisse se localiser. Ces trois sous systèmes sont étudiés et analysés séparément. Par la suite un ensemble de systèmes (technologies) de localisation réalisés sont présentés. Le chapitre se termine par la présentation des méthodes utilisées pour améliorer la précision car les positions fournies par un système de localisation sont toujours exposées à des imprécisions.

Le système de localisation le plus utilisé au monde est le GPS en raison de ses multiples potentialités : localisation mondiale, disponible 24h/24 et 7j/7, position et l'heure fournies, ...

Nos travaux de thèse sont basés sur l'utilisation du système GPS civil standard, pour cela le deuxième chapitre est consacré aux systèmes de positionnement par satellites notamment le système GPS (américain). Il présente entre autres la composition du système, le principe de positionnement, les services offerts, les sources d'erreurs et d'imprécisions, les méthodes de correction pour y remédier : le mode différentiel (DGPS, Differential GPS), les systèmes d'augmentation de la précision par satellites et la modernisation du système GPS. Le chapitre se termine par la présentation des

systèmes (déjà réalisés ou en cours de réalisation) similaires au système GPS : GLONASS (russe), GALILEO (européen) et BEIDOU (chinois).

Le but de notre travail de thèse est d'explorer une solution GPS différentielle de faible coût visant à améliorer sa précision notamment en ville. Cette solution est présentée dans le troisième chapitre. Elle est basée sur l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil équipés de récepteurs GPS civils à faible coût. Le troisième chapitre présente les fondements théoriques de notre technique appelée LCD-GPS (Low-Cost Differential GPS, Local Cooperatif DGPS). Il expose le principe de la méthode, les étapes de sa mise en œuvre, les expérimentations menées et les résultats obtenus.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de la plateforme matérielle et logicielle utilisées dans nos travaux de thèse pour évaluer les méthodes étudiées. Cette plateforme utilise un réseau de capteurs appelés LiveNodes (LIMOS Versatile Embedded Node) réalisés localement par notre équipe de recherche. La partie logicielle est composée notamment d'un système embarqué appelé LIMOS (Lightweight Multi-threading Operating System) et d'un protocole de communication appelé CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative). Les traitements propres à la solution LCD-GPS présentés dans le troisième chapitre sont intégrés au sein du protocole CIVIC.

Par la suite, les projets qui ont été réalisés en se basant sur cette plateforme sont présentés.

Le mémoire se termine par une conclusion et des perspectives sur les travaux réalisés au cours de cette thèse.

I SYSTEMES DE LOCALISATION

Ce premier chapitre est consacré aux méthodes et technologies de localisations d'une manière générale et plus particulièrement à la localisation de nœuds dans les réseaux ad hoc et les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Il aborde la localisation à l'extérieur ainsi qu'à l'intérieur.

1 Introduction

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est composé d'un ensemble de capteurs/nœuds dont le nombre peut être très grand. Le RCSF est utilisé pour réaliser une tâche spécifique d'une application. Les RCSF sont devenus de plus en plus populaires grâce à leur large champ d'applications civiles et militaires : environnement, agriculture, météorologie, santé, domotique...

Le but final d'un RCSF est de surveiller ou contrôler une zone d'intérêt, mais pour y parvenir plusieurs sous objectifs (services) doivent être réalisés. Parmi ces services : la synchronisation entre nœuds, la localisation, la gestion de la topologie, l'agrégation des données, le stockage de données, etc.

La localisation des nœuds est l'un des services les plus importants. Elle consiste à déterminer la position physique (par exemple latitude, longitude et altitude pour le GPS) pour chaque capteur.

Plusieurs domaines ont besoin de la localisation : la robotique, les réseaux ad hoc, les RCSF, téléphonie mobile, applications militaires, aviation et astronomie.

Ce chapitre présente les techniques utilisées pour la localisation en général. Il commence par montrer l'importance de la localisation, ses contraintes, ses propriétés et passe ensuite aux algorithmes utilisés et se termine par donner des exemples de systèmes déjà réalisés.

1.1 Importance des systèmes de localisation

Les positions des capteurs peuvent être prédéterminées et préconfigurées. Mais, en général, les capteurs ont un déploiement aléatoire, car ils sont utilisés sur des terrains inaccessibles, embarqués sur des engins mobiles ou sur le lieu d'un désastre ou leur nombre (très grand) ne permet pas de préconfigurer la position. Pour cela, un système de localisation est nécessaire afin de fournir aux nœuds leurs positions.

Les systèmes de localisation sont identifiés comme une clé technologique pour le développement et l'utilisation des RCSF. Cependant, leur utilisation n'est pas exclusive aux RCSF.

La localisation est importante pour plusieurs aspects, parmi lesquels :

1. L'identification des données collectées :

Cela consiste à projeter les données/événements sur la position de collecte/occurrence. L'un des objectifs majeurs des RCSF est de surveiller une zone d'intérêt. Cependant, après que les données soient collectées, il est important d'identifier la région d'où viennent ces données.

2. **L'agrégation des données collectées :**

Cela permet aux nœuds intermédiaires de corrélérer et de fusionner les données qui proviennent de la même région quand ces données sont transmises via le réseau.

3. **L'adressage des nœuds :**

Cela permet d'utiliser la position des nœuds comme identifiant unique dans le réseau.

4. **L'administration du réseau :**

Cela permet d'administrer et d'interroger les nœuds localisés dans une région, évaluer la couverture des nœuds, et de générer une carte d'énergie disponible dans chaque nœud [33].

5. **Les algorithmes géographiques :**

Ce sont des algorithmes qui utilisent l'information de localisation des nœuds pour optimiser l'utilisation des ressources du RCSF. Parmi ces algorithmes : le routage, le contrôle de la topologie, le contrôle de la densité des nœuds et le suivi d'objets mobiles (*object tracking*).

1.2 Contraintes pour un système de localisation

Un système de localisation doit respecter un ensemble de contraintes imposées par les spécificités des RCSF dû à leurs limitations (ressources matérielles : puissance du processeur, mémoire, énergie) et applications. Parmi ces contraintes :

1. **Auto-organisation :**

Les RCSF sont utilisés dans des applications diverses. Dans plusieurs applications (si ce n'est pas la majorité des cas) le RCSF est indépendant de toute infrastructure ce qui implique que l'algorithme de localisation doit être distribué. Dans le reste des cas, l'algorithme de localisation peut être centralisé.

2. **Evolutivité (extensibilité, échelle) :**

L'algorithme de localisation peut être appliqué aussi bien à un RCSF dense qu'à un RCSF avec un nombre réduit de nœuds. La plupart des algorithmes de localisation sont sensibles à la densité des nœuds ; s'il n'y a pas assez de nœuds l'algorithme donne des résultats imprécis [5].

3. **Robustesse :**

L'algorithme de localisation doit être tolérant aux problèmes de communication ainsi qu'aux imprécisions des distances et des positions (des amers¹) dues notamment aux faits suivants :

- Les liens de communications entre deux nœuds sont asymétriques. En effet, la communication entre deux nœuds peut passer dans un sens, sans pour autant passer dans l'autre sens.
- Les ondes radio ne se propagent pas de la même façon dans tous les milieux. Elles se propagent différemment sur l'herbe (gazon), sable ou sur l'asphalte (réflexion et absorption).
- Les obstacles (environnants) et les irrégularités du terrain : Les obstacles peuvent cacher les nœuds ce qui donne de mauvaises mesures et par conséquent une mauvaise localisation.

¹ Dans la suite, Les mots balise, ancre, amer, station de base et station de référence sont utilisés indifféremment.

- Topologie non convexe : Les coordonnées des nœuds qui se trouvent dans les extrémités d'un RCSF sont souvent moins précises à cause du manque de mesure de distances. En effet, il n'y a pas assez de nœuds dans le voisinage et de plus tous les nœuds accessibles sont dans le même côté [5]. Exemple : Si les capteurs sont distribués sur un champ rectangulaire, les capteurs qui se trouvent près des quatre coins (angles) du rectangle seront mal localisés.

4. **Efficacité dans l'utilisation des ressources du RCSF :**

Même si le système de localisation est indispensable pour le bon fonctionnement du RCSF, il n'est pas le but principal du réseau. Il doit utiliser les ressources du capteur d'une manière efficace pour ne pas les épuiser. Les concepteurs des algorithmes de localisation doivent minimiser les coûts en termes d'énergie, matériel et déploiement de leurs algorithmes de localisation.

1.3 Propriétés d'un système de localisation

Un ensemble de caractéristiques (critères) permettent de comparer les systèmes de localisation [1][5][6][27]. Les caractéristiques plus importantes sont les suivantes :

1. **Position physique et/ou symbolique**

Cette propriété définit le fait que le système de localisation fournit aux nœuds des positions physiques (valeurs numériques) par exemple 5m ou des positions symboliques comme une personne se trouve dans la cuisine, au salon,...

Il est possible aussi de combiner des positions physiques avec des positions symboliques.

2. **Coordonnées absolues ou relatives**

Dans un système de coordonnées absolues, les positions sont définies dans le cadre d'une référence globale et commune à toutes les positions. Par exemple le système GPS utilise le système de coordonnées WGS84² qui associe à chaque position sur terre des coordonnées absolues en termes de longitude, latitude et altitude.

Les coordonnées relatives sont définies par rapport à une référence commune, mais cette référence n'est pas la même pour tous les nœuds ; elle n'est donc pas globale. Par exemple, en France, les positions des villes sont définies par rapport à Paris et aux Etats-Unis elles sont définies par rapport à Washington.

Pour passer des coordonnées relatives aux coordonnées absolues, un ensemble d'amers est nécessaires (au moins trois en 2D). Ces amers doivent connaître leurs coordonnées absolues dans un repère global. Un ensemble de transformations géométriques (rotation, translation et éventuellement homothétie) sont nécessaires pour obtenir les coordonnées absolues de tous les nœuds.

² World Geodetic System 1984

3. Calcul centralisé ou distribué

Cette caractéristique fait référence à l'endroit où les positions sont calculées. Est-ce que le calcul de la position se fait localement par un participant (nœud) en se basant sur des mesures effectuées localement ou au contraire les mesures sont envoyées vers une station centrale qui calcule les positions et les renvoie vers les nœuds concernés.

En outre les aspects de mise à l'échelle (extensibilité) et d'efficacité (coût de communication et de calcul), le respect de la vie privée (l'éthique) est très important, il n'est pas toujours souhaitable qu'un nœud révèle sa position à un serveur central.

4. Exactitude et précision

Les deux propriétés les plus importantes d'un système de localisation sont l'exactitude et la précision de ses positions.

L'exactitude est définie comme la distance maximale entre la position estimée et la position réelle d'un objet (un nœud). Une grande exactitude indique un écart maximal réduit.

La précision est définie comme le pourcentage avec lequel l'exactitude est obtenue, moyennée sur un ensemble d'expériences pour déterminer la position.

Les valeurs de l'exactitude et de la précision n'ont un sens que si elles sont données ensemble formant ainsi la caractéristique exactitude/précision du système de localisation³.

Par exemple, le Service Standard du GPS a une exactitude de 13m en horizontale (précision à 95%) et 22m en vertical (précision à 95%) [32].

5. Echelle

Un système de localisation peut être utilisé sur différentes échelles. Par exemple pour un déploiement intérieur l'échelle peut être une pièce ou d'un immeuble. Pour le déploiement extérieur, l'échelle peut être un parking ou une couverture mondiale.

Deux métriques importantes sont :

- 1- La zone couverte par le système par unité d'infrastructure. Par exemple, le système couvre deux pièces.
- 2- Nombre d'objets localisables par unité d'infrastructure et par unité de temps. Par exemple, le nombre de badges localisés dans une pièce chaque seconde.

6. Limites

Certains systèmes ont des limites (inhérentes) de déploiement. Par exemple, ils ne fonctionnent qu'à l'extérieur (GPS) ou à l'intérieur (système Active Badge [28][29]). D'autres systèmes ont des portées limitées de quelques mètres pour fonctionner correctement (système MotionStar [3]).

³ Par abus de langage, le mot précision est utilisé à la place de l'exactitude, ce qui signifie que la précision est à 100% et la mesure donnée est l'exactitude.

7. Coût

Les coûts d'un système de localisations peuvent être exprimés en termes de :

- 1- Temps : installation de l'infrastructure, administration et maintenance.
- 2- Espace : la taille de chaque capteur de localisation ainsi que la taille de l'infrastructure.
- 3- Energie : consommation électrique pour chaque capteur et pour l'infrastructure.
- 4- Budget : coût de chaque capteur, frais d'installation et de maintenance.

En outre des propriétés précédentes, un système de localisation peut être utilisé pour des fins d'identification ou de classification d'objets (ou de personnes). Cette information est moins importante dans le cadre des RCSF ou, si elle est utilisée, elle n'est pas considérée habituellement comme partie du système de localisation.

1.4 Composition d'un système de localisation

Un système de localisation peut être décomposé en trois parties distinctes. Chaque partie a son propre objectif et méthodes de résolution. Elles seront étudiées séparément. Ces trois parties (sous-systèmes) sont :

1. **L'estimation de distance/angle** : Cette partie permet d'estimer la distance et/ou l'angle entre deux nœuds. Cette information est utilisée par la suite par les deux autres parties (estimation locale).
2. **Le calcul de la position** : Cette partie permet d'estimer la position d'un nœud en se basant sur les mesures de distances et/ou d'angles disponibles et sur les positions des nœuds de références (ancres, amers) en utilisant la triangulation par exemple.
3. **Algorithme de localisation** : C'est la partie la plus importante du système de localisation. Elle définit la manière avec laquelle les informations disponibles (distances, angles, positions des nœuds déjà localisés) sont manipulées afin que la grande partie ou la totalité des nœuds puissent estimer leurs positions.

Les performances du système de localisation sont directement liées aux performances de chaque partie. La Figure I-1 illustre la décomposition du système de localisation en sous systèmes. Les nœuds représentés par des cercles gris sont des amers, les autres nœuds (en blanc) sont des nœuds qui ne sont pas encore localisés. Cette convention restera valable tout au long de ce chapitre.

La suite de ce chapitre traite chacune des trois composantes du système de localisation en présentant, analysant et comparant les méthodes utilisées.

La première partie est consacrée à l'estimation des distances/angles. La deuxième partie présente les méthodes de calcul de la position. La dernière partie est consacrée aux algorithmes de localisation. Le chapitre se termine par une discussion générale.

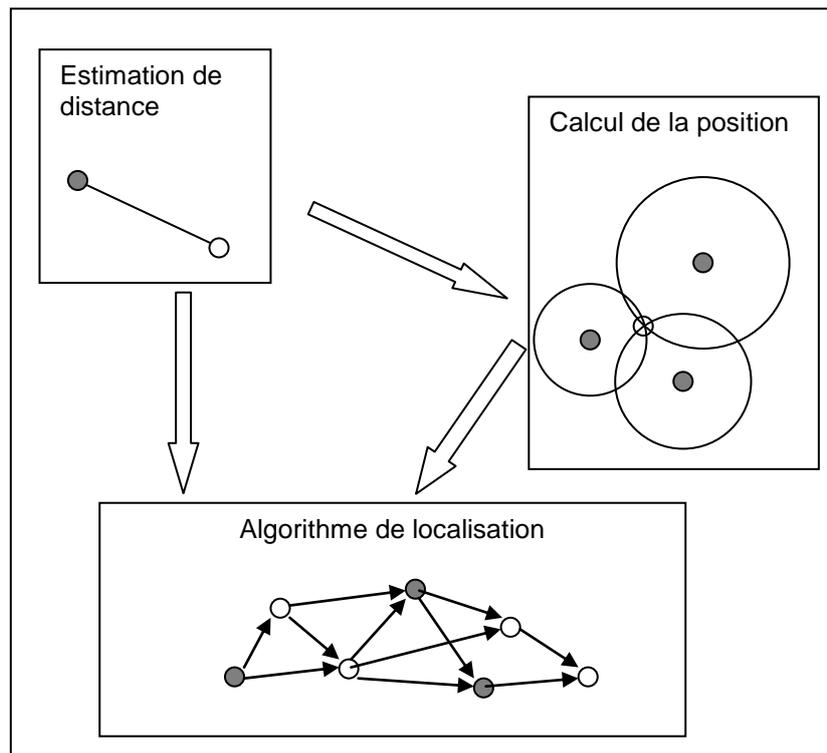


Figure I-1 Composition d'un système de localisation [1]

2 Estimation de distance/angle

L'estimation de la distance/angle consiste à mesurer la distance/angle entre deux nœuds. Cette estimation est très importante car elle sera utilisée pour le calcul de la position et par l'algorithme de localisation.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour estimer la distance/angle. Certaines méthodes sont précises, mais coûteuses (matériel supplémentaire, énergie, ressources processeur). D'autres sont imprécises mais elles sont déjà disponibles sur la plupart des capteurs (nœuds) et qui ne nécessitent aucun matériel supplémentaire.

Dans les paragraphes qui suivent, nous étudions les principales méthodes utilisées par les systèmes de localisation pour estimer les distances/angles entre nœuds. Parmi ces méthodes RSSI (*Received Signal Strength Indicator* : indicateur de puissance du signal reçu), ToA/TDoA (temps de parcours), AoA (angle d'arrivée) et la portée de communication (nombres de sauts entre nœuds).

Un système de localisation peut utiliser une approche basée sur les mesures de distance/angle ou sur la connectivité (ou l'information de proximité) afin d'estimer la position d'un nœud non encore localisé.

Les méthodes RSSI et RHC (*Radio Hop Count*) exploitent le fait que dans les RCSF, chaque nœud est équipé d'un dispositif de communication sans fil.

2.1 Indicateur de puissance du signal reçu – RSSI

La technique de localisation basée sur le RSSI utilise la puissance du signal reçu pour estimer la distance entre un nœud émetteur et un nœud récepteur. La distance est estimée en utilisant un modèle de propagation des ondes radio. Plusieurs modèles existent ; le plus simple [6] utilise la

formule suivante : $P_{\text{rcvd}} = c \frac{P_{\text{tx}}}{d^\alpha} \leftrightarrow d = \sqrt[\alpha]{\frac{cP_{\text{tx}}}{P_{\text{rcvd}}}}$

d : la distance entre les deux nœuds.

$P_{\text{tx}}, P_{\text{rcvd}}$: la puissance du signal transmis et reçu respectivement.

c, α : deux constantes connues du modèle.

α : Le coefficient d'affaiblissement du signal radio ($\alpha = 2$ par exemple).

c : Le rapport entre la puissance du signal reçu à une distance d'un mètre de l'émetteur et la puissance du signal émis.

D'autres modèles plus complexes existent [2]. En général, chaque modèle est conçu pour un environnement et un scénario bien défini.

En pratique, les mesures RSSI sont bruitées (de l'ordre de plusieurs mètres). Ce bruit est dû à la propagation d'onde radio qui n'est pas uniforme en environnement réel. Par exemple, les ondes radio ne se propagent pas de la même façon dans toutes les directions, ni de la même façon sur l'herbe que sur l'asphalte ou sur d'autres matériaux. Les obstacles comme les murs, les meubles et autres reflètent et absorbent les ondes radio. Par conséquent, les mesures de distance avec RSSI n'ont pas démontré une bonne précision par rapport aux autres méthodes de localisation.

Le grand avantage de la méthode est son faible coût car tous les nœuds sont déjà équipés de dispositif de communication sans fil ; de plus elle ne rajoute aucun surcoût de communication. Son inconvénient est sa sensibilité aux bruits, interférences, asymétrie du lien de communication (RSSI non uniforme), obstacles et types d'antenne.

Cette méthode peut avoir des erreurs de mesure dépassant 50% de la portée du dispositif de communication [7]. Plusieurs travaux ont été menés pour améliorer la précision du RSSI en utilisant notamment le filtrage pour minimiser les fluctuations des valeurs du RSSI [11][14].

2.2 Le nombre de sauts – RHC (*Radio Hop Count*)

La méthode RHC est basée sur le constat suivant : si deux nœuds peuvent se communiquer, alors la distance entre eux est inférieure à la portée maximale du dispositif de communication (R , *Range*) avec une grande probabilité [5]. Pour la localisation, seulement l'information de connectivité est utilisée, l'indicateur de puissance du signal reçu n'est pas pris en compte.

L'information de connectivité définit un graphe non orienté dont les sommets sont les nœuds du réseau et les arêtes représentent les liens directs de communication. Le nombre de sauts h_{ij} entre deux nœuds S_i et S_j est défini comme la longueur du plus court chemin entre ces deux nœuds.

Si d_{ij} est la distance entre S_i et S_j alors : $0 < d_{ij} < R \cdot h_{ij}$

Si le nombre de voisins est connu, la longueur d'un saut peut être estimée (d_{hop}). La distance entre les nœuds i et j devient :

$$d_{ij} \approx d_{hop} \cdot h_{ij}$$

La précision de la méthode est la moitié de la portée du dispositif de communication ($\frac{1}{2} R$). Nagbal *et al* [20] démontrent par simulation qu'une précision de $0.2 \times R$ peut être obtenue si le nombre de voisins est supérieur ou égal à 15.

Dans le cas d'existence d'obstructions la méthode donne des résultats encore moins précises. En effet, le nombre de sauts entre deux nœuds peut être grand, même s'ils sont proches l'un de l'autre mais un obstacle les sépare et qui ne leur permet pas de communiquer directement [5].

2.3 Le temps de parcours – ToA/ToF

La technique ToA (*Time of Arrival, ToF Time of Flight*) exploite la relation entre la distance parcourue par un signal et le temps de parcours. En effet, la distance entre l'émetteur et le récepteur est la multiplication du temps pris par le signal avec la vitesse des ondes radio

$$Distance = Temps * Vitesse$$

La vitesse de propagation du signal radio est $\cong 3 \times 10^8$ m/s.

La technique ToA nécessite la synchronisation parfaite entre l'émetteur et le récepteur [1]. Si le récepteur connaît l'heure d'émission du signal, il peut alors calculer la distance le séparant de l'émetteur en déterminant le temps pris par le signal pour arriver au niveau du récepteur.

Selon le type du signal utilisé, la méthode ToA nécessite, en général, des horloges à très grande résolution du temps pour obtenir des précisions acceptables.

Pour les ondes radio, la résolution du temps doit être très élevée. Cependant, pour les ondes sonores, les besoins en résolution du temps sont modestes, mais leur inconvénient est que leur vitesse de propagation dépende des conditions extérieures comme la température et l'humidité. Un étalonnage rigoureux est donc nécessaire [6].

2.4 La différence du temps d'arrivée – TDoA

La méthode TDoA (*Time Difference of Arrival*) a deux variantes :

1. La différence du temps pris par un signal envoyé par un nœud pour arriver au niveau de trois nœuds ou plus. Cette variante est bien connue dans les réseaux cellulaires. Elle nécessite une synchronisation parfaite des stations de base [1].
2. La différence de temps pris par deux signaux envoyés par un même nœud pour arriver au niveau d'un autre nœud. Chaque nœud doit être équipé de deux dispositifs émission/réception. En général, le premier dispositif utilise les ondes radio (vitesse $\cong 3 \times 10^8$ m/s) et le deuxième

utilise les ondes sonores (vitesse $\cong 340$ m/s à la température de l'air de 15°C) ou ultrasonores. Le premier nœud émet les deux signaux simultanément. Pour chaque signal reçu, le deuxième nœud note son temps d'arrivée et ainsi il peut calculer la différence. En général, le premier signal est utilisé pour déclencher un compteur et dès l'arrivée du deuxième signal, le nœud aura directement la différence de temps d'arrivée. En connaissant les vitesses de propagation des deux signaux et l'écart de temps entre les deux réceptions, le nœud récepteur peut facilement calculer sa distance par rapport à l'émetteur.

Pour que la technique soit précise, les deux nœuds doivent être en visibilité directe. De plus, l'environnement ne doit pas favoriser l'écho. La Figure I-2 illustre le principe du TDoA.

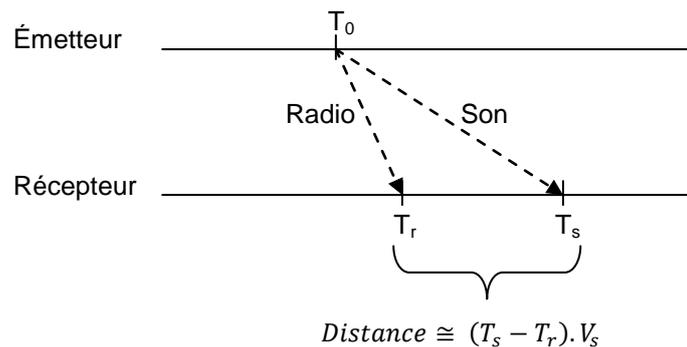


Figure I-2 Principe du TDoA

T_r est le temps d'arrivée du signal radio.

T_s est le temps d'arrivée du signal sonore (ou ultrasonore).

V_s est la vitesse du signal sonore (ou ultrasonore).

Cette technique est limitée par la distance à mesurer (inférieure à une centaine de mètres), car on suppose que le temps de propagation du signal radio est quasiment nul par rapport au temps de propagation du signal ultrasonore.

2.5 L'angle d'arrivée – AoA/DoA

A la place des distances, il est possible de localiser un nœud en utilisant des angles.

La méthode AoA (*Angle of Arrival*, *DoA Direction of Arrival*) permet de mesurer l'angle d'arrivée d'un signal. Pour cela le nœud qui mesure l'angle doit être équipé soit par un ensemble de petites d'antennes ou plusieurs récepteurs à ultrason [19]. Lorsque un nœud reçoit un signal, il utilise la phase ou le temps d'arrivée du signal au niveau de chaque antenne (ou récepteur ultrason) pour déduire l'angle d'arrivée du signal.

La nécessité d'avoir du matériel supplémentaire ainsi que des distances minimales entre les différents récepteurs (à ultrason) représentent les inconvénients de la méthode en termes de coût et d'encombrement (taille).

La précision de la méthode est de quelques degrés (environ 5° [20][19]).

2.6 La reconnaissance de motifs

Une alternative aux mesures de distances et d'angles est l'utilisation d'une carte préétablie (base de données) de la couverture d'un signal aux différentes positions de l'environnement et d'utiliser cette carte pour déterminer la position d'un nœud particulier en effectuant une reconnaissance de motif (*pattern matching*, *Location Fingerprinting*) sur ses mesures.

Cette méthode nécessite la collecte de mesures empiriques (ou un modèle de simulation très fidèle) de la puissance du signal (moyenne, écart-type, médiane) des différentes stations de référence aux divers endroits où les autres nœuds seront par la suite localisés. Il est important aussi de prendre en compte l'orientation des nœuds car cette dernière peut entraîner des variations significatives. Une fois ces informations collectées, chaque nœud dans la zone d'intérêt est localisé (positionné) en comparant le motif résultant des signaux reçus avec celui qui correspond le mieux sur la carte préétablie. Cette méthode est très connue, notamment dans le domaine du traitement d'image.

Pour les signaux radio, cette méthode donne des résultats meilleurs que les méthodes RSSI et AoA [4].

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle est dépendante de l'endroit où elle est utilisée et elle nécessite une collecte intensive d'informations avant qu'elle soit utilisable. De plus elle ne peut pas être utilisée si les caractéristiques radios de l'environnement sont très dynamiques. La nécessité de construire la base de données des signatures rend la méthode difficilement réalisable pour la plupart des scénarios des RCSF.

Le system RADAR [21], développé par un groupe de recherche de Microsoft, utilise cette méthode de localisation pour l'une de ses deux réalisations.

2.7 Autres approches

Certains systèmes localisent les personnes (ou les objets) indirectement, sans avoir besoin qu'ils portent un dispositif de localisation (amers ou récepteur). Ils utilisent à la place l'image (apparence d'une personne, véhicule,...), profile de bruit, plateforme de force pour localiser des personnes et/ou des objets dans leur environnement. Parmi ces systèmes on trouve les surfaces instrumentées, la vision, LIDAR, ...

2.7.1 Les surfaces instrumentées

L'inconvénient majeur des méthodes présentées jusqu'ici est qu'elles ne localisent que les nœuds (objet, personne équipé) qui participe au protocole du système de localisation et que le système ne peut pas localiser d'autre objets externes au système.

Une alternative est d'équiper le sol de capteurs (instrumenter la surface) pour localiser des personnes à partir de leurs poids, par exemple.

Schmidt *et al* [22] utilisent une plateforme de test (240x180 cm) équipée de quatre capteurs de force installés aux quatre coins de la surface. Ils montrent qu'en comparant les changements des forces au niveau des quatre capteurs, ils peuvent estimer la position d'un objet avec 10cm de précision. Même si le système est précis et ne nécessite pas d'équiper les usagers de dispositifs de

localisation, il a deux inconvénients : il ne peut localiser qu'une seule personne à la fois et que la localisation est anonyme, i.e. le système peut localiser une personne mais il ne peut pas déterminer son identité.

Pour pallier ces deux inconvénient le système *SmartFloor* [23] utilise des segments de (50x50 cm) afin d'éviter que deux personnes soient sur le même segment. Le système permet aussi d'identifier une personne selon sa façon de poser les pieds. Des profils de « pose de pied » sont réalisés pour chaque personne pour les deux pieds droit et gauche avec plusieurs modèles de chaussures. Des expérimentations effectuées sur un groupe de 15 personnes, montrent que le système est capable de les identifier avec un taux de reconnaissance de 93%. Les auteurs affirment que les chaussures portées par les personnes ne représentent pas un facteur déterminant du système [23].

Un autre système est « *The Magic Carpet system* » (Tapis magique). Il utilise une grille de capteurs de pressions (polymères piézoélectrique) pour déterminer la position des personnes en mesurant l'électricité induite sur chaque ligne et chaque colonne de la grille [24].

Le système le plus inhabituel est *CarpetLAN* qui exploite la conductivité du corps humain pour servir comme un réseau filaire entre un dispositif portatif et le carrelage (LAN-enabled). Comme chaque carreau a un identifiant unique, les utilisateurs sont localisés sur le segment par lequel leurs données sont acheminées. Cette technique offre une précision de 1m [25].

Les systèmes basés sur les capteurs de charge installés dans le sol, rendent cette approche appropriée seulement pour des nouvelles constructions ou des espaces avec des structures modelables [3].

2.7.2 La vision

La vision est l'une des approches qui ne nécessite pas d'instrumenter les personnes (ou les objets) à détecter. La caméra est un capteur optique passif, elle n'envoie aucun signal à l'inverse des systèmes de télécommunications. Les images sont capturées et traitées pour reconnaître et localiser des formes spécifiques. Ces objets détectés peuvent être des marques visuelles (*markers*) ou des objets naturels comme des bâtiments, des routes, des véhicules ou des personnes.

La caméra peut être fixe pour surveiller une zone déterminée et détecter les personnes, les véhicules ou autres objets qui pénètrent dans la zone surveillée. Elle peut être mobile, notamment pour des utilisations en robotique comme le suivie de route, la détection de sortie de route, ...

2.7.3 Mesure sur IP (Internet Protocol)

Des techniques sont développées pour localiser un ordinateur (utilisateur) à partir de son adresse IP en cas où aucune autre méthode de localisation n'est possible. En pratique, ces estimations sont peu précises, typiquement, à l'échelle d'un pays ou d'une ville (métropolitain) [3].

2.7.4 Puissance du champ magnétique

Les systèmes de localisation basés sur la puissance du champ magnétique fournissent un nombre d'extrêmes du fait qu'ils offrent la plus grande précision, mais la couverture la plus courte et le coût le

plus élevé. Ces systèmes utilisent un émetteur fixe qui envoie des impulsions magnétiques et de plusieurs petits récepteurs (portés par une personne) qui envoient par radio leurs observations. A partir de ces observations une position 3D et une orientation (le tangage, le lacet et le roulis) sont estimées avec une grande précision et une fréquence de mise-à-jour allant jusqu'à 120 Hz. Le système MotionStar⁴ par exemple estime les positions en 3D avec une précision de 7.6 mm et de 0.5° pour l'orientation.

En installant plusieurs récepteurs (vingt par exemple) sur les différents membres et articulations d'une personne, ces systèmes permettent de capturer les mouvements en temps réel et avec une fréquence de mise-à-jour très élevée. Ces systèmes sont les plus utilisés pour capturer les mouvements des personnages (une réplique d'une personne réelle) utilisés en dessins animés et dans les jeux vidéo.

Les inconvénients de ce type de systèmes sont les suivants : la limitation de la couverture et le coût très élevé. En effet, ces systèmes fonctionnent seulement quand les récepteurs sont dans un rayon de 3 mètres de l'émetteur ; leurs prix minimal est de 50 000\$ [3].

2.7.5 LIDAR

Le LIDAR (*Light Detection And Ranging, Détection et télémétrie par la lumière*) est un instrument de mesure relativement récent qui a révolutionné la navigation robotisée ces dernières années [3]. Le Lidar représente une technique de télédétection ou de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur.

Le LIDAR utilise un système de balayage avec un laser infrarouge. Le résultat est une image 2D précise sur 180° des distances des objets (obstacles) les plus proches au capteur LIDAR. Parce que le système est précis et qu'il est indépendant des conditions d'éclairage, les systèmes LIDARs permettent à des robots de se localiser avec une précision centimétrique dans des environnements typiquement intérieures.

A cause du prix, de la taille, du poids et du mode de fonctionnement du système, il n'y a pas eu de systèmes personnels portatifs utilisant un LIDAR pour se localiser.

2.7.6 Identification par radio fréquence – RFID

La radio-identification⁵ (*Radio Frequency IDentification*) est une technique qui permet d'identifier des objets, des véhicules, des animaux ou des personnes au moyen d'un dispositif électronique (Une étiquette radio (*RFID Tag*)) transmettant par radiofréquence des informations préenregistrées à un lecteur qui l'interroge à faible distance.

Les étiquettes RFID sont très variées mais, généralement, elles sont conçues pour deux utilisations différentes [3] :

1. Sur une courte distance avec un champ d'utilisation de quelques centimètres, elles fonctionnent avec le courant d'induction généré par le passage devant un lecteur RFID.

⁴ Site web : www.ascension-tech.com

⁵ Définition donnée par le site www.franceterme.culture.fr

2. Sur une longue distance, elles fonctionnent habituellement à distance supérieure à six mètres.

Les deux types d'étiquettes sont de petite taille, de faible coût, durables, et comme elles n'ont pas de batterie (à changer ou à recharger), elles peuvent être embarquées ou même enfouies dans un objet.

2.7.7 Ultralarge bande – UWB

UWB⁶ (*UltraWide Band*) est un mode de transmission consistant à émettre et recevoir des impulsions extrêmement courtes de radiofréquences qui constituent des signaux dont le rapport de la largeur de bande à la fréquence centrale est beaucoup plus grand que dans les modulations employées habituellement.

UWB (*IEEE 802.15.4a*) est la technologie la plus prometteuse pour la localisation d'intérieur. Les impulsions émises permettent de mesurer le temps de parcours entre l'émetteur et le récepteur et par conséquent pouvoir localiser un badge par exemple.

Les transmetteurs UWB peuvent coexister avec les autres dispositifs sans-fil.

Avec leur coût et consommation faibles, ils représentent un bon candidat pour la localisation à courte et moyenne distance. La technologie UWB promet de s'affranchir des contraintes énergétique (consommation électrique) et les limites de précision du GPS et de réseaux locaux sans fil (WLAN).

Plusieurs systèmes utilisant la technologie UWB existent sur le marché :

1. Le système Sapphire DART de Multispectral Solutions Inc.

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- (a) Portée : 200 m
- (b) Précision : 30 cm (10 cm avec la moyenne)
- (c) Durée de batterie : 10 ans même si le 'tag' transmet ses informations à 1Hz.
- (d) Taille des tags : 0.5x1.0x0.25 pouce (12.7x25.4x6.35 mm)
- (e) Poids : 10 g

2. Le système de 'Ubisense'

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- (a) Portée : supérieure à 50 m
- (b) Précision : 30 cm (en 3D)
- (c) Fréquence de mise-à-jour peut être supérieure à 1 Hz avec une gestion dynamique des mises-à-jour (possibilité de changer la fréquence de mise-à-jour).
- (d) Le système peut être installé à l'échelle de 300 000 mètres avec un suivi d'une dizaine de milliers de tags en temps réel.

3. Le système PLUS RTLS (Real-Time Location System) de Time Domain Corporation⁷.

Le système a une précision submétrique (inférieure à 1 m). Le PLUSBadgeTag a des dimensions de 37x75x6.8 mm et un poids de 18 g. La durée de la batterie est de 4 ans avec une fréquence de mise-à-jour de 2 Hz et d'un an et demi avec une fréquence de 4 Hz. Il est possible de traquer des milliers de tags.

⁶ Définition donnée par le site www.franceterme.culture.fr

⁷ www.timedomain.com

4. Le PAL650 (version 3.0) de ‘Multispectral Solutions Incorporation’.

Le système a une précision submétrique et une identification à distance des tags, même en présence de multitrajets, comme ceux rencontrés dans un hôpital ou dans une installation industrielle. La version 3.0 du système inclus une interface graphique améliorée pour programmer le système et un large champ (distance) pour s’adapter à l’utilisation des tags dans un espace spacieux.

D’autres systèmes UWB existent. ‘Thales Research and Technology’ annonce un système avec une précision inférieure à 30 cm ; ‘Aetherwire Inc.’ revendique pour son système une précision centimétrique avec une distance jusqu’à un kilomètre mais avec une distance entre nœuds de 30 mètres maximum [8].

2.8 Commentaires sur l’estimation de distance/angle

Le choix de la méthode d’estimation de distance/angle entre les nœuds est un facteur important qui influe sur les performances finales du système de localisation. Généralement, pour calculer une position, un nœud a besoin de trois distances (angles) estimées et chacune d’elle avec une erreur associée. Si seulement la précision est importante, la méthode TDoA est la plus précise. Mais d’autres facteurs comme la taille et le coût (en termes de matériel supplémentaire, ressources processeur, énergie) du nœud sont à prendre en considération. Pour cela, la méthode choisie pour estimer les distances/angles dépend des besoins de l’application ainsi que des ressources disponibles.

Le Tableau I-1 liste les caractéristiques essentielles des méthodes décrites dans les paragraphes précédents.

Méthode	Précision	Distance Maximale	Matériel supplémentaire	Défis (challenges)
RSSI	2-4 m	La portée	Rien	Variations du RSSI, Interférences
ToA	2-3 cm	La portée	Rien	Synchronisation des nœuds
TDoA	2-3 cm	Quelques mètres (2-10 m)	Capteur à ultrason	La distance maximale
AoA	Quelques degrés (5°)	La portée	Un ensemble de récepteurs	Travailler avec des nœuds de petite taille
Portée de la communication	½ la portée	La portée	Rien	---

Tableau I-1 : Comparaison des méthodes d’estimation des distances/angles

3 Calcul de la position (auto-localisation)

Quand un nœud a suffisamment d’information de distances/angles et de positions (des amers), il peut calculer sa position. Pour cela, plusieurs méthodes sont utilisées. Parmi ces méthodes : la trilatération, la multilatération, la triangulation, les approches probabilistes, le cadre englobant et la position centrale.

Le choix de la méthode de calcul de la position influe sur les performances finales du système de localisation. Ce choix dépend des informations disponibles et des ressources du processeur (CPU, mémoire, etc.).

Les paragraphes suivants présentent les méthodes de calcul de la position, suivies par un ensemble de commentaires et de remarques.

3.1 Trilatération et multilatération

La trilatération est la méthode la plus basique et intuitive. Cette méthode calcule la position d'un nœud par l'intersection de trois cercles, comme le montre la Figure I-3.

Pour estimer sa position (en 2D), un nœud a besoin de connaître la position de trois amers ainsi que sa distance par rapport à ces amers. La distance peut être estimée en utilisant l'une des méthodes décrites dans la première partie « Estimation de distance/angle ».

Un amer est un nœud qui a ses coordonnées globales connues a priori. Ces coordonnées peuvent être préenregistrées ou obtenues à l'aide d'un dispositif externe comme le GPS.

Les équations des cercles centrés aux positions des amers et qui ont comme diamètres d_1 , d_2 et d_3 respectivement sont définies comme suit :

$$(\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 = d_1^2 \Leftrightarrow \hat{x}^2 + \hat{y}^2 - 2(\hat{x}x_1 + \hat{y}y_1) + x_1^2 + y_1^2 - d_1^2 = 0 \quad (1)$$

$$(\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2 = d_2^2 \Leftrightarrow \hat{x}^2 + \hat{y}^2 - 2(\hat{x}x_2 + \hat{y}y_2) + x_2^2 + y_2^2 - d_2^2 = 0 \quad (2)$$

$$(\hat{x} - x_3)^2 + (\hat{y} - y_3)^2 = d_3^2 \Leftrightarrow \hat{x}^2 + \hat{y}^2 - 2(\hat{x}x_3 + \hat{y}y_3) + x_3^2 + y_3^2 - d_3^2 = 0 \quad (3)$$

(\hat{x}, \hat{y}) : La position du nœud à localiser.

(x_i, y_i) : La position du $i^{\text{ème}}$ amer.

d_i : La distance entre le nœud à localiser et le $i^{\text{ème}}$ amer.

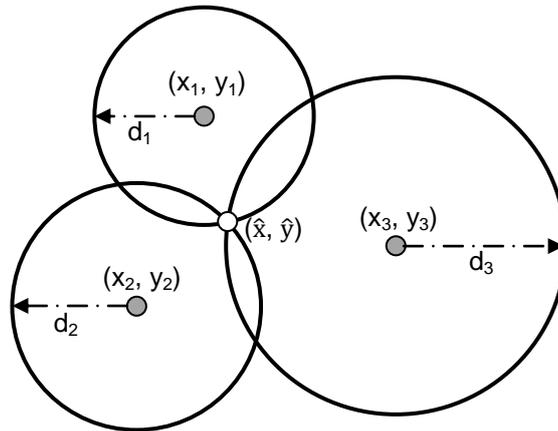


Figure I-3 Principe de la trilatération

En soustrayant l'équation (3) des deux premières équations, on obtient un système linéaire avec deux équations à deux inconnus (\hat{x}, \hat{y}) qui peut donner une seule solution :

$$\hat{x}(x_3 - x_1) + \hat{y}(y_3 - y_1) = \frac{1}{2}(x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 + d_1^2 - d_3^2) \quad (4)$$

$$\hat{x}(x_3 - x_2) + \hat{y}(y_3 - y_2) = \frac{1}{2}(x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_3^2) \quad (5)$$

Dans les cas réels, les imprécisions des distances mesurées et des positions des amers rendent la résolution des équations précédentes très difficile, voire impossible. Une solution du problème consiste à définir un système surdéterminé (le nombre d'équation est plus grand que le nombre d'inconnus) en utilisant un nombre supplémentaire d'amers, c'est ce qui est appelé la multilatération.

Le système peut être défini par le système d'équations (6) :

$$\left. \begin{aligned} (\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 &= d_1^2 - \varepsilon \\ &\vdots \\ (\hat{x} - x_n)^2 + (\hat{y} - y_n)^2 &= d_n^2 - \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ε est une variable aléatoire qui suit la loi Normale et de moyenne zéro.

Ce système peut être rendu linéaire en soustrayant la dernière équation des autres équations de (1) à (n-1). Le système linéaire est donné par l'équation (7) :

$$\begin{bmatrix} (x_n - x_1) & (y_n - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ (x_n - x_{n-1}) & (y_n - y_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \approx \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_n^2 - x_1^2 + y_n^2 - y_1^2 + d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_n^2 - x_{n-1}^2 + y_n^2 - y_{n-1}^2 + d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ce système peut être résolu avec une méthode standard comme la minimisation de la somme des erreurs quadratiques, dont la solution optimale est donnée par la formule (8) :

$$x = (A^T A)^{-1} (A^T b) \quad (8)$$

Où :

A^T est la transposée de la matrice A.

M^{-1} est la matrice inverse de la matrice M.

3.2 Triangulation

La triangulation ressemble à la trilatération, mais elle utilise les angles à la place des distances. La position peut être calculée à distance (centralisée au niveau des stations de base) ou par les nœuds eux-mêmes (auto-localisation). Dans les deux cas, la position est calculée en utilisant les lois de la trigonométrie (cosinus et sinus). Dans la localisation à distance, au moins deux stations de base estiment l'angle d'arrivée des signaux du nœud à localiser, et elles calculent la position du nœud qui n'est que l'intersection des deux droites qui partent des deux stations de base avec les deux angles mesurés respectivement. La Figure I-4 (a) illustre le principe de la localisation à distance. Ce type de triangulation est surtout utilisé dans les réseaux de téléphonie mobile.

Pendant dans les RCSF, le plus important est que chaque nœud calcule sa position lui-même (auto-localisation). Dans ce cas, au moins trois amers sont nécessaires. Le nœud non localisé estime ses angles avec chaque amer. En se basant sur les angles estimés et les positions des amers (qui forment un triangle), le nœud calcule sa position en utilisant les lois de la trigonométrie. La Figure I-4 (b) illustre le principe de l'auto-localisation en utilisant la triangulation.

Cette technique est similaire à la trilatération. En effet, en se basant sur les angles d'arrivée, il est possible de déduire les distances vers les divers amers [17].

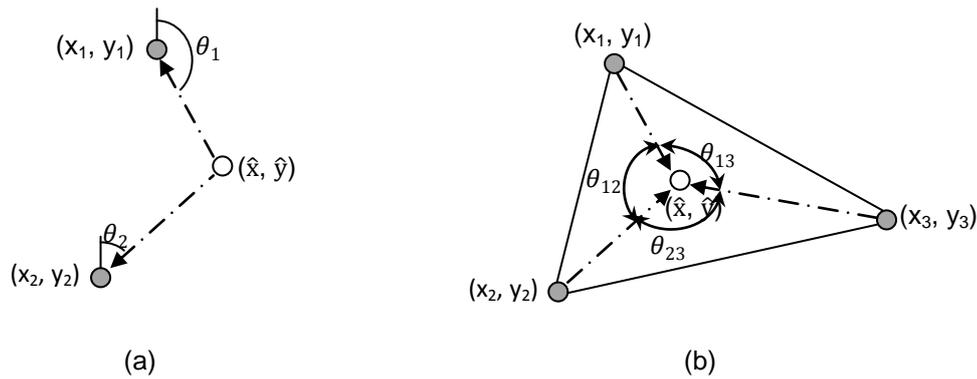


Figure I-4 Principe de la triangulation [1]
(a) Localisation à distance (b) auto-localisation

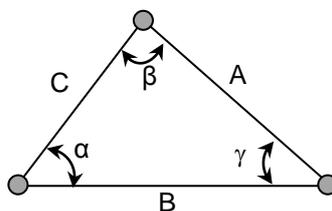


Figure I-5 Principe de la triangulation [7]

Les formules du sinus :

$$\frac{A}{\sin \alpha} = \frac{B}{\sin \beta} = \frac{C}{\sin \gamma}$$

Les formules du cosinus :

$$\begin{aligned} C^2 &= A^2 + B^2 - 2AB\cos(\gamma) \\ B^2 &= A^2 + C^2 - 2AC\cos(\beta) \\ A^2 &= B^2 + C^2 - 2BC\cos(\alpha) \end{aligned}$$

3.3 Approche probabiliste

Les incertitudes dans les estimations de distance motivent l'apparition des approches probabilistes. Dans ces approches, le résultat de calcul de la position n'est pas un seul point, mais un ensemble de points avec leurs probabilités d'être la position réelle du nœud à localiser.

Un exemple d'une approche probabiliste est proposé dans [26]. Dans ce travail, l'erreur de distance est modélisée comme une variable aléatoire normale. Quand un nœud reçoit un paquet en provenance d'un amer, il peut être localisé autour de l'amer, comme le montre la Figure I-6.a. La distance est estimée en utilisant l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI). Quand un deuxième paquet arrive en provenance d'un deuxième amer, le nœud calcule sa position comme le montre la Figure I-6.b. Quand une nouvelle information arrive d'un troisième amer, alors il est possible d'estimer la position du nœud comme le montre la Figure I-6.c.

Si une application a besoin d'une seule position (pas toutes les positions possibles), la position avec une grande probabilité est utilisée.

L'inconvénient majeur de cette approche est qu'elle est coûteuse en puissance de calcul ainsi qu'en espace mémoire nécessaire pour stocker les informations. Dans l'article [26], il est démontré que si l'espace d'intérêt est une grille de $d \times d$, alors la complexité de la méthode est de $O(3d^2)$.

Une application possible de cette approche est d'envoyer toutes les informations collectées à partir de tous les nœuds vers un nœud central (avec plus de puissance et de mémoire) pour calculer les positions de tous les nœuds du réseau [1].

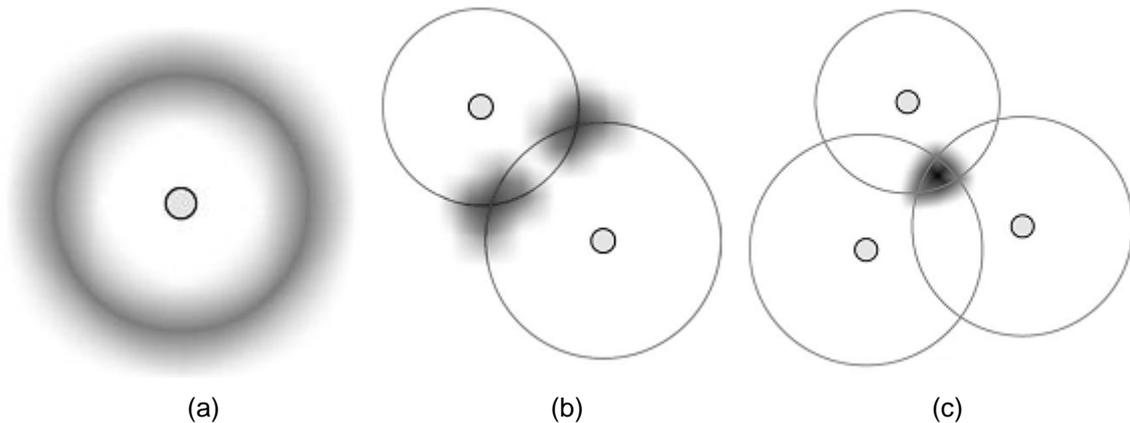


Figure I-6 Exemple approche probabiliste [1]

3.4 Cadre englobant – BB

La méthode du cadre englobant (*Bounding Box*) [15] utilise des carrés à la place des cercles pour déterminer les positions possibles d'un nœud.

Pour chaque amer i , un cadre (ou rectangle) englobant est défini comme le carré centré à la position de l'amer $P_i = (x_i, y_i)$ et qui a $2d_i$, comme longueur de côté (d_i est la distance estimée par rapport à un nœud non encore localisé) et avec comme coordonnées $(x_i - d_i, y_i - d_i)$ et $(x_i + d_i, y_i + d_i)$ pour les coins inférieur gauche et supérieur droit respectivement. L'intersection de tous les cadres englobant donne les positions possibles du nœud à localiser. Cette intersection peut être calculée facilement en prenant le maximum des coordonnées inférieures et le minimum des coordonnées supérieures [1].

$$(\max(x_i - d_i), \max(y_i - d_i)) \text{ et } (\min(x_i + d_i), \min(y_i + d_i))$$

La position finale du nœud est le centre du rectangle obtenu, et elle est calculée comme suit :

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\frac{\max(x_i - d_i) + \min(x_i + d_i)}{2}, \frac{\max(y_i - d_i) + \min(y_i + d_i)}{2} \right)$$

La Figure I-7 illustre le principe du rectangle englobant.

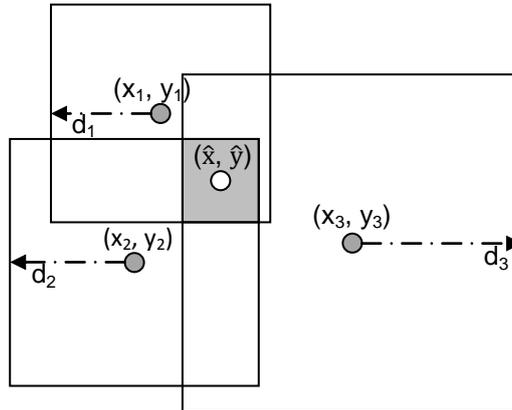


Figure I-7 Principe du cadre englobant

3.5 Position centrale

En supposant que la position la plus probable pour un nœud (non encore localisé) est le point central de tous les amers, le calcul de la position du nœud peut être fait sans avoir besoin d'estimer les distances entre le nœud et les amers. Dans ce cas là, la position du nœud est calculée en utilisant la formule suivante [15][16] :

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)$$

n étant le nombre d'amers.

Cette méthode est la plus simple en termes de ressources de calcul et d'informations nécessaires : seulement 2n opérations flottantes sont nécessaires pour calculer la position du nœud. Cependant les solutions obtenues sont imprécises, notamment lorsque le nombre d'amers est réduit [1].

3.6 Bilan et synthèse sur les techniques de calcul de la position

Un ensemble de méthodes qui peuvent être utilisées pour le calcul de la position a été exposé. Il est à noter que cette présentation n'est pas exhaustive. Le choix de la méthode de calcul de la position influe sur les performances finales du système de localisation.

Il n'y a pas de solution générale et idéale qui fonctionne pour tous les scénarios. Le choix de la méthode dépend des informations collectées et des ressources du processeur.

Le Tableau I-2 compare les principales caractéristiques des méthodes de calcul de la position présentées dans les paragraphes précédents.

Méthode	Nombre de références	Distance	Angle	Complexité temporelle	Défis
Trilatération	3	Oui	Non	$O(1)$	Sensible aux imprécisions des distances
Multilatération	$n \geq 3$	Oui	Non	$O(n^3)$	Complexité du calcul
Triangulation	3	Non	Oui	$O(1)$	Besoin de matériel supplémentaire
Probabiliste	$n \geq 3$	Oui	Non	$O(3d^2)$ (taille de la grille)	Complexité du calcul et le volume mémoire nécessaire
Cadre englobant	$n \geq 2$	Oui	Non	$O(n)$	Erreur de la position finale
Position centrale	$n \geq 1$			$O(n)$	Erreur de la position finale

Tableau I-2 : Comparaison des méthodes de calcul de la position [1]

4 Algorithme de localisation

L'algorithme de localisation est la partie principale du système de localisation. Il définit la méthode avec laquelle les informations disponibles sont manipulées afin que la grande partie, ou la totalité, des nœuds du RSCF estiment leurs positions.

Les algorithmes de localisation peuvent être classés en plusieurs catégories :

1. **Distribué ou centralisé** : Les positions des nœuds sont calculées d'une manière distribuée par chaque nœud ou d'une manière centralisée par un seul nœud central.
2. **Avec ou sans infrastructure** : S'il y a besoin ou pas d'une infrastructure (par exemple le positionnement manuel des amers).
3. **Positionnement absolu ou relatif** : Les positions calculées sont définies dans un repère global (exemple : latitude, longitude) ou relatif (par rapport à un nœud du réseau). On parle aussi de position physique et symbolique (dans tel ou tel bureau, à côté d'un objet).
4. **Positionnement intérieur ou extérieur** : Si le système est mieux adapté aux applications à l'intérieur (*indoor*) ou plutôt à l'extérieur (*outdoor*).
5. **A un saut ou multi-saut** : Si tous les nœuds ont un lien de communication direct avec les amers ou une communication multi-saut est nécessaire.

Plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour évaluer les performances d'un algorithme de localisation :

1. **L'erreur moyenne et sa consistance** : Cela permet de calculer l'erreur moyenne et de savoir si cette erreur moyenne est toujours la même ou pas si on change de scénario (voir exactitude et précision).
2. **Le coût de communication** : Cela permet de déterminer la complexité de l'algorithme de localisation en termes du nombre de paquets échangés. Il détermine aussi le coût de l'algorithme de localisation sur les nœuds du réseau.

3. **Nombres de nœuds localisés (fixés)** : Détermine le pourcentage des nœuds du réseau qui ont réussi à calculer leur positions à la fin de l'algorithme de localisation. L'idéal est que chaque nœud calcule sa position, mais malheureusement ce n'est pas toujours le cas.
4. **Nombres d'amers** : Définit le nombre d'amers nécessaires pour que l'algorithme de localisation marche. En général, les (nœuds) amers sont plus chers que les nœuds normaux et donc leur utilisation doit être minimisée.

Plusieurs caractéristiques affectent les performances d'un système de localisation. Pour chaque système de localisation, il est important de faire plusieurs expérimentations (obtenir des données statistiques) afin d'évaluer son comportement lorsque les paramètres suivant changent :

1. **La densité des nœuds** : Elle détermine le nombre de nœuds par unité de surface. Dans les réseaux à forte densité, les distances entre les nœuds sont courtes ce qui implique des erreurs limitées lors de l'estimation des distances, et par conséquent sur les erreurs du système de localisation. De plus, le grand nombre de nœuds voisins offre plus d'informations à utiliser par les nœuds non-localisés ce que leur permet de mieux estimer leurs positions.
2. **La taille du réseau** : En augmentant le nombre de nœuds (et en gardant la même densité ce qui revient à élargir la surface du réseau), le nombre de sauts augmente. En général, l'augmentation du nombre de sauts s'accompagne par l'augmentation de l'imprécision [1] due à l'accumulation des erreurs.
3. **Nombre d'amers** : En déployant un grand nombre d'amers dans le réseau, l'erreur moyenne du système de localisation tend à diminuer et le nombre de nœuds localisés tend à augmenter.
4. **Précision GPS** : Plusieurs travaux utilisent le GPS pour localiser les amers. Le système GPS n'est pas parfait et sa précision va influencer les performances du système de localisation.

Dans la suite quelques algorithmes de localisation seront étudiés. Parmi ces algorithmes, on trouve : APS (Système de localisation Ad hoc, Ad Hoc Positioning System), RPE (Estimation récursive de la position, Recursive Position Estimation), LMB (Localisation par un amer mobile, Localization with a Mobile Beacon), GPS (Global Positioning System) et le système de localisation Cricket. A la fin une discussion sera consacrée aux algorithmes de localisation.

4.1 Le système GPS

Le système GPS (*NAVSTAR GPS, Navigation System with Time And Ranging, Global Positioning System*) est de loin le système de localisation le plus utilisé au monde [3]. Il est conçu, développé et géré par le Ministère des Armées (DoD, Department of Defense) des Etats-Unis. La constellation de base est composée de 24 satellites (actuellement, février 2009, il y'a 31 satellites opérationnels) qui tournent autour de la terre à une altitude de 20 200 km. Ces satellites sont organisés dans six orbites (quatre satellites opérationnels et un cinquième de secours) inclinés de 30°. Ils font deux rotations autour de la Terre par jour. La constellation des satellites a été conçue, de telle façon que n'importe quel point sur Terre peut être localisé avec au moins quatre satellites dans le ciel grâce à un récepteur GPS. Les

satellites envoient en permanence les informations nécessaires à la localisation (signaux radio codés et synchronisés).

Un récepteur GPS est capable de recevoir les informations envoyées par les satellites, d'estimer sa distance par rapport au moins quatre satellites en utilisant la méthode ToA (cf I2.3) et enfin calculer sa position en utilisant la trilatération (multilatération). Une fois la position calculée il fournit la position en termes de latitude, longitude, altitude (ainsi que l'heure).

Le système fournit deux services : le service standard (*SPS, Standard Positioning System*) et le service précis (*PPS, Precise Positioning System*). Le PPS est réservé à l'armée américaine, les agences fédérales et les alliés des Etats-Unis. Le SPS est ouvert à tous les utilisateurs civils autour du monde.

Le système GPS est utilisé dans de nombreuses applications civiles et militaires : navigation (maritime, terrestre et aérienne), suivi de flotte, activités de plaisance (la randonnée, la pêche, ...), en agriculture (calcul de superficie, cartographie du rendement, guidage d'engin agricoles, ...), en recherche (géodésie, photogrammétrie, SIG–Système d'Information Géographique), applications environnementales (suivi d'animaux, suivi de pollutions), etc.

Le système GPS est conçu de telle manière que les récepteurs GPS soient passifs (ils ne transmettent aucune information vers les satellites) et qu'ils calculent leurs positions eux-mêmes. Cette conception a permis au système GPS d'avoir une couverture mondiale et un nombre illimité d'utilisateurs et au même temps de préserver l'anonymat (vie privée) des utilisateurs [3].

Le GPS a une précision qui varie de plusieurs mètres à quelques millimètres. Réciproquement, les prix des récepteurs varient de quelques dizaines d'euros à des dizaines de milliers d'euros [3].

Même si le GPS a de bonnes potentialités, il n'est pas parfait. Pour que les positions soient précises, il faut que les récepteurs aient une vue dégagée du ciel et au moins quatre satellites soient en vue. La géométrie formée par les satellites présents joue aussi un rôle important. Les signaux GPS ne traversent pas bien les murs, le sol, et l'eau, ce qui implique que le système GPS ne peut pas être utilisé à l'intérieur des bâtiments, pour des applications souterraines (dans des mines ou des tunnels), ou sous-marines. Les signaux GPS peuvent être obstrués par les immeubles en zones urbaines ou les feuillages des arbres.

L'utilisation du GPS en RCSF a plusieurs inconvénients :

- L'augmentation du coût, de la taille et de la consommation énergétique du capteur ;
- L'inutilité en cas de visibilité limitée des satellites (applications à l'intérieur, dans les villes, sous les arbres, sous l'eau, dans des conditions atmosphériques extrêmes, exploration de Mars).

Pour ces inconvénients, l'utilisation du GPS dans les RCSF est, généralement, limitée à une partie du réseau (les amers).

Cependant, le système GPS a des potentialités non négligeables :

- Il fournit la position, l'heure et la vitesse,

- Il est disponible 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7,
- Il est disponible dans le monde entier,
- Il est disponible même dans les conditions climatiques extrêmes (avec performances dégradées),
- Le coût des récepteurs GPS est en diminution constante et ses performances s'améliorent constamment.

Pour améliorer la précision du GPS, le mode différentiel a été introduit. Ce mode consiste à améliorer les erreurs du GPS par une station de base qui calcule des corrections et les diffuse au bénéfice des autres utilisateurs. Des corrections différentielles du GPS sont accessibles gratuitement, d'autres sont payantes et disponibles via des abonnements.

Une autre solution est de combiner le GPS avec d'autres capteurs comme l'altimètre, l'accéléromètre, l'odomètre, la centrale inertielle, ou de le combiner avec les réseaux cellulaires (AGPS, *Assisted GPS*).

Une autre piste pour améliorer la précision de GPS passe par sa modernisation. Les autorités américaines travaillent sur cette piste, elle consiste notamment pour le service SPS de diffuser une deuxième fréquence L5 qui permet de calculer une correction des délais ionosphériques, ce qui permet de réduire les erreurs du GPS et donc d'améliorer sa précision.

Le chapitre 2 sera consacré entièrement aux systèmes de navigation par satellites : Le GPS et les systèmes similaires (GLONASS, GALILEO, BEIDO – COMPASS2) ainsi que les systèmes d'amélioration de leurs précisions.

En résumé, le système GPS (service standard) est le système de localisation qui ne diffuse aucune information entre les récepteurs (à part, le fait que les satellites peuvent être considérés comme des amers mobiles). Chaque récepteur calcule sa position en se basant sur ses propres mesures.

Dans le mode différentiel, (en général) une seule station de base diffuse les corrections différentielles et chaque récepteur doté de cette possibilité de correction peut les appliquer sur sa position afin d'améliorer sa précision. Là aussi, il n'y a aucun échange d'information entre capteurs GPS (à part la station de base).

4.2 Système de localisation ad hoc (APS)

L'algorithme de localisation APS (*Ad Hoc Positioning System*) [10][9] utilise un nombre réduit d'amers (par exemple trois) et chaque nœud estime ses distances par rapport à ces amers en multi-saut. Une fois ces distances estimées, le nœud peut calculer sa position en utilisant la trilatération (multi-latération). Trois méthodes de propagation des distances (saut par saut) sont proposées : DV-Hop, DV-Distance et Euclidienne.

Dans la méthode **DV-Hop**, les amers commencent par diffuser leurs positions saut par saut. Les nœuds échangent des vecteurs de distance en nombre de sauts par rapport aux amers. Chaque nœud, lorsqu'il reçoit la distance d'un amer via ses voisins, augmente le nombre de sauts et le

diffusera à son tour à ses voisins. Chaque nœud garde une table de $\{X_i, Y_i, h_i\}$. (X_i, Y_i) représente la position de l'amer i et h_i représente le nombre de sauts entre le nœud concerné et l'amer i . Donc, chaque nœud aura sa distance par rapport à tous les amers en termes de sauts. Quand un amer reçoit ses distances par rapport aux autres amers, il calcule sa correction qui correspond à la longueur d'un saut. Le nœud divise la somme des distances qui le séparent des autres amers par la somme des sauts.

$$C_i = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum h_{ij}} \text{ pour chaque } i \neq j$$

(x_i, y_i) : la position de l'amer i .

(x_j, y_j) : la position de l'amer j .

h_{ij} : le nombre de sauts entre l'amer i et les autres amers.

C_i : la longueur estimée d'un saut par rapport à l'amer i .

Après l'estimation de la longueur de saut, chaque amer diffuse sa correction afin que chaque nœud l'utilise pour estimer sa position par rapport aux amers disponibles.

Les avantages de cette méthode sont la simplicité de la propagation et l'indépendance des mesures de distances. En effet, elle n'utilise que le nombre de sauts sans avoir besoin de mesurer les distances entre nœuds [9][10].

Cependant cette méthode ne peut être utilisée que pour les réseaux isotropes ; i.e. les réseaux dans lesquels la propagation des ondes radio est la même dans toutes les directions.

La deuxième méthode est appelée DV-Distance. Elle fonctionne comme DV-Hop. La différence est l'utilisation des distances cumulées à la place du nombre de sauts. Chaque nœud avant qu'il transfère les informations de localisation, il doit estimer sa distance (en mètre) par rapport au nœud qui le précède en utilisant l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI). Cette distance est ajoutée à la distance reçue et le message de localisation est envoyé aux autres voisins. Les amers ne transmettent pas de corrections en termes de longueur de saut, car les distances échangées entre nœuds sont déjà en mètre.

La méthode est plus fine car la correction s'applique pour chaque saut indépendamment des autres (pas globalement comme dans DV-Hop). Cependant, elle est sensible aux erreurs de mesure. En effet, les erreurs de mesure s'accumulent pour chaque nouveau saut.

La troisième méthode est appelée Euclidienne par les auteurs (même si toutes les approches utilisent un repère Euclidien). Cette méthode propage la distance Euclidienne (réelle) d'un amer (soit L) par rapport aux autres nœuds. Un nœud non encore localisé (soit A) a besoin de deux autres nœuds (soient B et C) qui connaissent les distances suivantes : BL , CL et BC . Le nœud A connaît les distances AB et AC . Il calcule par la suite sa distance réelle par rapport à l'amer L en utilisant le théorème de Pythagore sur les triangles formés par les lignes reliant les nœuds A , B , C et l'amer L . Le

nœud A diffuse à son tour sa distance par rapport à l'amer L pour que d'autres nœuds puissent calculer leurs distance par rapport à l'amer L.

Ces trois méthodes sont évaluées seulement par simulation et elles n'ont donné lieu à aucune réalisation.

4.3 Estimation récursive de la position (RPE)

Dans l'algorithme RPE [12] (*Recursive Position Estimation*), les nœuds estiment leurs positions en se basant sur un ensemble d'amers (exemple 5% des nœuds) en utilisant uniquement les informations disponibles localement. Les informations de localisation augmentent à chaque itération de l'algorithme du fait que de nouveaux nœuds se localisent et deviennent à leur tour de nouveaux amers qui servent par la suite pour localiser les autres nœuds qui ne sont pas encore localisés.

L'algorithme peut être subdivisé en quatre phases :

- Phase 1 : Un nœud détermine ses amers. S'il a plus de deux amers, il peut calculer sa position (phase 3).
- Phase 2 : Le nœud estime ses distances par rapport à ses amers, en utilisant par exemple la méthode RSSI.
- Phase 3 : Le nœud calcule sa position en utilisant la trilatération et devient ainsi un nœud localisé (fixé).
- Phase 4 : Le nœud devient à son tour un amer en diffusant sa position estimée à ses voisins.

Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que la plupart des nœuds calculent leurs positions.

La complexité de l'algorithme RPE est la même que l'algorithme d'inondation (*flooding*) [1].

L'avantage de l'algorithme est que le nombre des amers augmente rapidement de telle manière que la plupart des nœuds puissent calculer leurs positions. Mais cette solution a l'inconvénient de propager les erreurs de localisation. En effet les imprécisions sur le positionnement d'un nœud utilisé comme amer, augmente les imprécisions de positionnement du nouveau nœud localisé.

Si les amers sont positionnés du même côté par rapport au nœud à localiser, même en supposant que les positions des amers sont précises, la position du nœud sera imprécise (voir "Dilution Of Precision-DOP" pour le GPS, chapitre 2).

4.4 Estimation dirigée/orientée de la position (DPE)

En rajoutant quelques restrictions à un système de localisation récursive (comme RPE), on peut commencer la récursion de localisation à partir d'un nœud (l'origine de la récursion) et suivre une direction déterminée. Une fois ce procédé est garanti, il est possible d'estimer la position d'un nœud avec seulement deux amers voisins.

Quand un nœud dispose des positions de deux amers voisins, qui sont suffisants pour résoudre le système d'équations ; la résolution du système d'équations donne deux estimations. Une estimation

est la bonne position et l'autre estimation est impossible du fait que la direction de la récursion est connue. Il est facile de choisir laquelle des deux solutions est la bonne : la position la plus distante de l'origine de récursion est la bonne position du nœud à localiser.

L'algorithme DPE [1] (*Directed Position Estimation*) est subdivisé en quatre phases. Dans la première phase, la récursion est commencée à partir du nœud d'origine de la récursion. Dans la deuxième phase, un nœud détermine ses amers voisins (au moins deux) et estime ses distances par rapport à ces deux amers. Dans la troisième phase, le nœud calcule sa position. Dans la quatrième phase, le nœud devient à son tour un amer en diffusant ses coordonnées à ces voisins. De cette façon, la récursion part du centre (nœud d'origine de la récursion) et va vers l'extérieur.

La complexité de communication de cette méthode est la même que l'algorithme d'inondation (*flooding*).

Cette approche convient à un système de localisation dans un réseau à faible densité. De plus, avec la direction contrôlée de la récursion, elle convient aussi à un système de localisation avec des erreurs réduites et prédictibles. Cependant, comme la méthode RPE, cette technique a l'inconvénient de propager les erreurs de localisation.

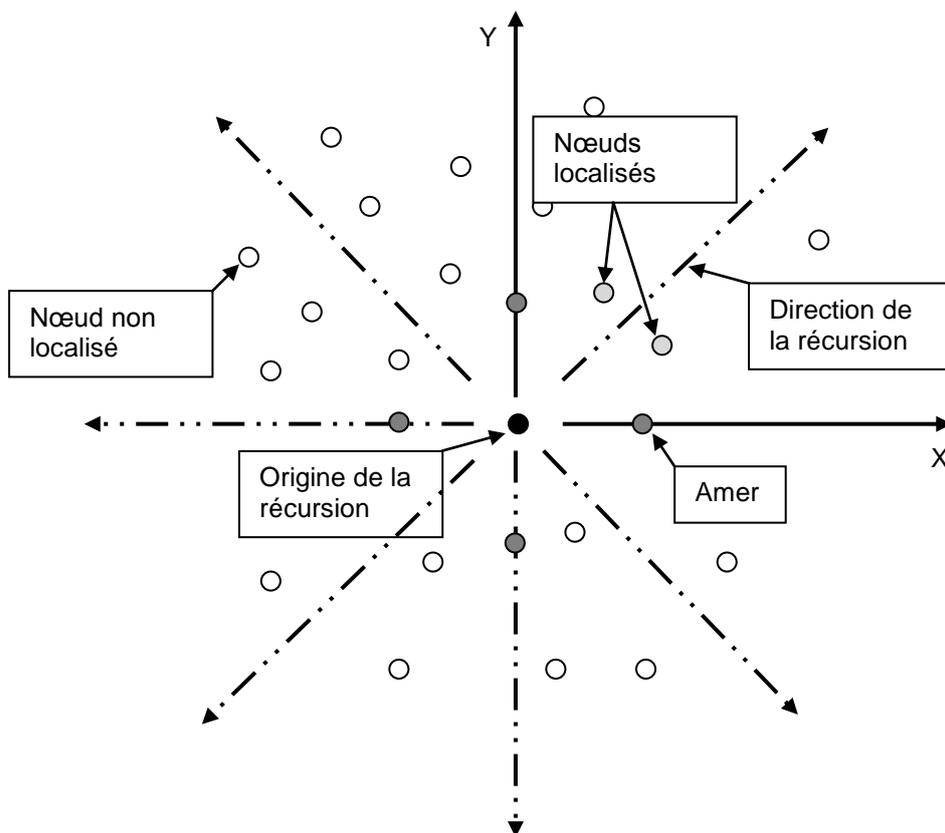


Figure I-8 Principe du DPE – *Directed Position Estimation*

4.5 Localisation avec balise mobile (LMB)

De récents travaux cités dans [1], proposent d'utiliser une balise mobile (*Localization with a Mobile Beacon*) pour assister les capteurs d'un réseau à estimer leur positions.

Une balise mobile est un nœud qui connaît sa position (équipé d'un GPS, par exemple) et qui a la capacité de se déplacer dans le champ où sont implantés les autres capteurs. Cette balise peut être un opérateur humain, un véhicule autonome, un avion, un robot.

Deux algorithmes de localisation sont proposés. Le premier algorithme utilise une balise mobile pour permettre aux autres capteurs de calculer leurs positions, tandis que dans le deuxième algorithme, c'est le nœud mobile qui calcule les positions des autres nœuds.

Dans le premier cas et une fois les capteurs déployés, la balise mobile se déplace entre les capteurs (champ de déploiement) en diffusant ses coordonnées actuelles. Si un capteur reçoit plus de trois messages à partir de la balise mobile, il peut calculer sa position en utilisant une approche probabiliste, basée sur les coordonnées reçues et les estimations de distances basées sur le RSSI. Le coût de communication est nul pour le RCSF (à part la balise mobile) du fait que les nœuds n'envoient aucun message.

Un avantage de cette méthode est que les estimations des positions sont basées sur le même nœud, ce qui permet que l'erreur moyenne reste réduite en évitant la dégradation de la précision à cause de la propagation des erreurs. De plus cette méthode évite d'équiper les autres nœuds d'un récepteur GPS (par exemple). Seule la balise mobile dispose d'un récepteur GPS.

De plus, dans cette technique, un capteur ne peut estimer sa position que lorsque la balise soit proche de lui, ce qui peut prendre beaucoup de temps, ça dépend de la taille du champ de capteur, les possibilités de mobilité de la balise et de sa trajectoire. La balise mobile, peut ne pas passer à côté de quelques nœuds.

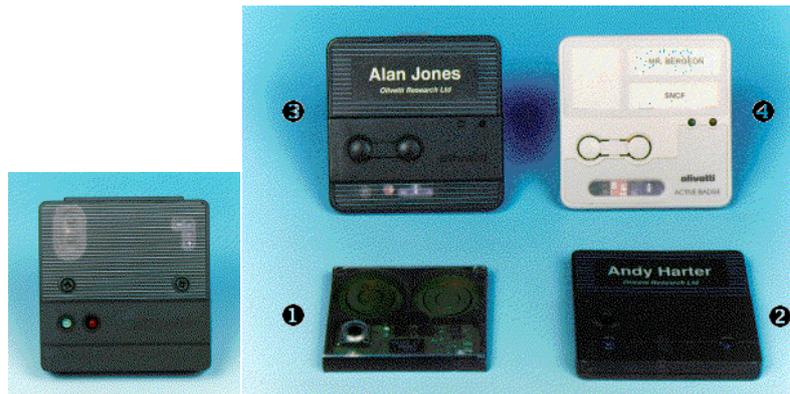
Un facteur important qui influe directement sur la qualité de la localisation est la trajectoire de la balise mobile. La précision est plus grande si la trajectoire est différente d'une droite. La raison est la colinéarité des positions de référence. Plus les positions ne sont pas colinéaires, plus la précision est meilleure. Une trajectoire linéaire est donc à éviter.

5 Exemples de systèmes de localisation (technologies)

Cette partie est consacrée à quelques systèmes très connus des chercheurs du monde entier. Parmi ces systèmes : Active Badge, Active Bat, Cricket, Radar et Smart Floor.

5.1 Active Badge

Le système 'Active Badge' [27][28][29] a été développé au départ par les laboratoires de recherche Olivetti et repris par la suite par AT&T Cambridge. C'est un système de localisation à l'intérieur d'un bâtiment, qui utilise des cellules de proximité basées sur la technologie des signaux infrarouges diffus. Chaque personne à localiser porte un badge à infrarouge comme ceux présentés sur la figure ci-dessous :



A gauche une station de base, à droite 4 générations de badges

Figure I-9 'Active Badge'

Chaque badge a un identifiant global et unique. Le badge diffuse son identité chaque 15s ou sur demande. Un serveur central collecte cette information à partir des capteurs infrarouges fixés à l'intérieur du bâtiment, il les fusionne, et fournit une API (Application Programming Interface) pour l'utilisation des données.

Le système Active Badge, fournit une localisation absolue (dans un repère global). Une localisation des badges est symboliques, représentant par exemple la pièce où le badge a été localisé.

Le groupe de Cambridge a conçu la première grande architecture logicielle, pour traiter ce type de données de localisation symbolique.

Comme tous les systèmes qui utilisent les signaux infrarouges diffus, Active Badge rencontre des problèmes avec l'illumination fluorescente ou la lumière directe du soleil à cause des émissions infrarouges que ce type de sources lumineuses génère.

Les signaux infrarouges diffus ont une distance effective (efficace de travail) de quelques mètres (six mètres [28]), ce qui limite la taille des cellules aux pièces de petite et moyenne taille. Pour des pièces plus grandes, le système peut utiliser plusieurs cellules fixes.

5.2 Active Bat

Dans un travail plus récent, les chercheurs des laboratoires AT&T de Cambridge ont développé le système de localisation 'Active Bat' [29][30], qui utilise la technique de trilatération basée sur le temps de parcours d'un signal ultrason afin de fournir une localisation plus fine (position en 3D) et plus précise par rapport au système Active Badge. Les utilisateurs (ou les objets) à localiser doivent porter des tags Active Bat.

Chaque 'Active Bat' a un identifiant unique et globalement défini (*GUID, Globally Unique Identifier*) de 48 bits.

En réponse à une requête envoyée via une onde radio à courte-distance par un contrôleur, un badge (bat) envoie une pulse ultrason vers une grille de récepteurs fixée au plafond du bâtiment.

Au même moment, le contrôleur envoie un signal de synchronisation aux récepteurs via un réseau câblé (par liaison série). Chaque récepteur calcule l'intervalle de temps entre le signal de synchronisation et le temps d'arrivée du signal ultrason et calcule ainsi sa distance par rapport au badge.

Un contrôleur local transfère les distances calculées vers un contrôleur central qui effectue les calculs de latération nécessaires afin d'obtenir la position du badge. Des outils statistiques permettent d'éliminer les mesures erronées des capteurs causées par la réception de signaux ultrasonores réfléchies à la place des signaux directs.

Le système peut localiser 75 badges par seconde avec une précision de 3 cm en 3D. De plus, il peut calculer l'orientation d'un objet en utilisant plusieurs Bats en connaissant l'emplacement du Bat sur l'objet (à localiser) et selon l'obstruction des signaux ultrasonores reçus par les récepteurs (RSSI).

En utilisant le temps de parcours des signaux ultrason, cette méthode nécessite un grand nombre de cellules réceptrices fixes pour la partie infrastructure, et elle est sensible aux positions de ces cellules réceptrices. Ainsi l'extensibilité, la simplicité de déploiement et le coût représentent les inconvénients de cette approche [27].

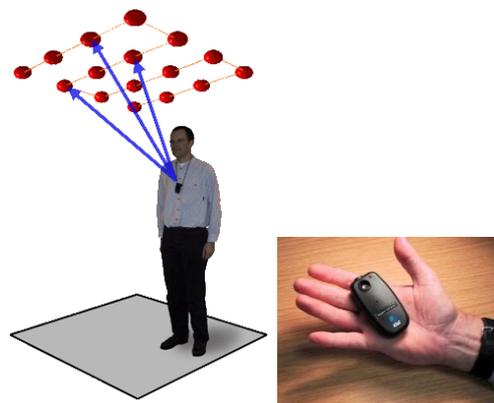


Figure I-10 principe du 'Active Bat'

5.3 Cricket

Le système Cricket a été développé dans le cadre du projet Oxygen du MIT [3].

A l'inverse du système Active Bat, le système Cricket [18] utilise les émetteurs ultrasons pour créer l'infrastructure et embarque le récepteur à l'objet à localiser. Cette approche permet à chaque capteur de calculer sa position. Cette solution permet aussi de préserver l'anonymat en évitant la centralisation des calculs. Cricket utilise le signal radio non seulement pour la synchronisation, mais aussi pour délimiter le temps de prise en comptes des signaux ultrasons reçus. Dès la fin du signal radio, tout signal ultrason est considéré comme un écho et doit être ignoré. Un algorithme aléatoire, permet aux multiples amers (non coordonnés) de coexister dans la même zone. Chaque amer transmet une chaîne de caractères qui décrit la sémantique de la zone couverte en utilisant des ondes radio à courte distance.

Comme le système Active Bat, le système Cricket utilise la technique du temps de parcours d'un signal ultrason ainsi qu'un signal radio de contrôle, mais ce système ne nécessite pas une grille de récepteurs installés dans le plafond car chaque capteur mobile de Cricket calcule lui-même sa position. Le système Cricket est approprié aux applications intérieures et il a une précision entre 1 et 3 cm⁸. Cricket fournit aussi une orientation à l'aide du compas Cricket [19] avec une précision de 3°.

La Figure I-11 montre un émetteur/récepteur du système Cricket.



Figure I-11 Emetteur/Récepteur Cricket

5.4 RADAR

Un groupe de recherche de Microsoft a développé le système RADAR. Un système de localisation à l'intérieur d'un bâtiment basé sur l'utilisation des technologies de réseaux sans fil 802.11 [21].

RADAR mesure au niveau de la station de base, la puissance du signal ainsi que le rapport signal/bruit des signaux que le dispositif sans fil envoie, et utilise par la suite cette information pour calculer la position 2D à l'intérieur du bâtiment. Microsoft a développé deux variantes (versions) du système RADAR, l'une basée sur l'analyse de scène (*signal strength fingerprinting*) et l'autre basée sur la latération.

L'approche suivie par RADAR a deux avantages :

- Seulement un nombre réduit de stations de base est nécessaire,
- Utilisation de la même infrastructure (réseau local sans fil) existante dans le(s) bâtiment(s).

Le système RADAR souffre de deux inconvénients :

- L'objet suivi doit supporter un réseau sans fil, ce qui n'est pas réalisable pour des capteurs de petite taille ou qui ont des contraintes énergétiques très fortes.
- La généralisation (extensibilité) de la solution RADAR au bâtiment à plusieurs étages ou au 3D représente un problème non-trivial.

Le système RADAR qui utilise la méthode d'analyse de scène localise les objets avec une précision de 3 m avec 50 % de probabilité tandis que la variante utilisant la latération et basée sur la puissance du signal localise les objets avec 4.3 m de précision avec le même taux de probabilité (50 %). Même si l'analyse de scène offre plus de précision, elle nécessite une reconstruction de la base de données de la carte de la puissance du signal en cas d'un grand changement de

⁸ Site web du projet Cricket <http://cricket.csail.mit.edu>

l'environnement comme le rajout/enlèvement d'armoires en métal ou plusieurs personnes se réunissent dans des pièces ou les couloirs du bâtiment.

Plusieurs sociétés commercialisent des systèmes semblables au système RADAR, comme WhereNet⁹, Pinpoint¹⁰ et Ekahau¹¹. Les tags WhereTag III et WhereTag IV par exemple offrent une précision jusqu'à moins de 2 m (mais typiquement 3 m).

6 Amélioration de la précision

Plusieurs systèmes présentés dans les sections précédentes sont basés sur une mesure de localisation unique. Leurs précisions peuvent être améliorées si plusieurs mesures de localisation sont effectuées.

En effet, les dispositifs de localisation (les personnes, les objets) sont souvent statiques ou en mouvement, mais avec des vitesses réduites. Ça veut dire que le système a l'occasion d'effectuer des dizaines voir des centaines de mesures de localisation et ces mesures peuvent être combinées pour avoir une précision meilleure.

Dans cette partie, des techniques d'amélioration de la précision sont présentées. Parmi ces méthodes : le lissage (pour amortir/réduire les erreurs), le filtrage (filtre de Kalman, filtre particulaire) (pour contraindre les valeurs possibles des positions sur un trajet, dans une salle ou dans un environnement bien déterminé), des approches probabilistes qui modélisent le mouvement du capteur de localisation ou la personne à traquer et qui peuvent utiliser des observations de l'environnement produites par différents capteurs au même moment (exemple : GPS, WiFi, Balise GSM).

6.1 Le lissage (filtre passe bas)

Les estimations de la position sont bruitées et sujettes aux erreurs.

Plusieurs systèmes utilisent une moyenne mobile (lissage temporel) où les estimations de localisation sur une fenêtre glissante (avec une taille fixe) sont utilisées ; cela permet de fournir des valeurs lissées.

Le choix de la taille de la fenêtre glissante pour le lissage temporel est très important car un mauvais choix peut détériorer encore plus les performances du système. Si la taille de la fenêtre glissante est trop petite, le système fluctue et les estimations oscillent d'un instant à l'autre (le système n'est pas stable). Inversement, si la taille de la fenêtre glissante est trop grande, le système ne réagit pas vite aux changements notamment pour les utilisateurs mobiles. Le bon choix de la taille de la fenêtre glissante est étroitement lié aux caractéristiques de la technologie (la méthode) utilisée.

Une approche connue pour sélectionner la taille de la fenêtre glissante est la validation croisée où un nombre de valeurs différentes sont testées sur des données de simulation et la valeur qui donne le meilleur résultat est sélectionnée.

⁹ Site web de la société WhereNet <http://www.wherenet.com>

¹⁰ Site web de la société Pinpoint <http://www.pinpointco.com>

¹¹ Site web de la société Ekahau <http://www.ekahau.com>

Une autre méthode est l'utilisation du modèle de Markov caché (HMM, Hidden Markov Model). Cette méthode permet de lisser les positions pour les systèmes de positionnement discrets ou symboliques. Les HMM sont une variante des automates à états finis avec des états et des probabilités pour chaque transition et dans lesquels les états sont inconnus et peuvent être estimés en se basant sur des observations [3].

6.2 La limitation (SNAPPING)

Une autre technique d'amélioration de la précision consiste à contraindre les valeurs possibles pour la localisation aux frontières naturelles de l'environnement. Le meilleur exemple est le système de navigation basé sur le GPS et embarqué dans une voiture. Parce qu'il est très probable que les voitures soient sur les routes, le système de navigation projette alors les positions du GPS sur le segment de la route le plus proche. En supposant que la voiture est toujours sur la route, il est possible d'éliminer la composante de l'erreur du GPS perpendiculaire sur la route ce qui réduit l'erreur du GPS de moitié [3].

Cette technique a été aussi appliquée à un système de localisation intérieure [34] où les positions possibles sont représentées par un graphe qui les limite aux espaces communs et aux couloirs des bureaux.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est inadaptée aux environnements ouverts [3].

6.3 La fusion et le suivi (fusion and tracking)

La fusion et le suivi sont deux autres méthodes d'amélioration de la précision. La fusion consiste à utiliser deux (ou plus) capteurs différents pour déterminer la position d'une seule personne ou d'un objet.

Le suivi améliore la précision par la modélisation du mouvement de la personne (ou de l'objet) et continue à fournir des positions à jour, même si la position fournie par un capteur est indisponible.

Pour les méthodes probabilistes, les plus utilisées sont le filtre de Kalman et le filtre particulaire [3].

7 Conclusion

Les systèmes de localisation sont de plus en plus utilisés, leurs champs d'application ne cessent de s'élargir.

Dans ce chapitre, les systèmes de localisation ont été introduits d'une manière didactique. Ils peuvent être vus comme la combinaison de trois sous systèmes : l'estimation des distances/angles, le calcul de la position et enfin un algorithme de localisation.

Les performances globales du système de localisation dépendent étroitement aux choix pris pour chaque sous systèmes.

Les méthodes présentées sont à usage général pour localiser des appareils, objets ou des usagers mobiles. Un ensemble de méthodes d'amélioration de la précision ont été abordées également.

Les technologies citées varient d'une façon importante en termes de coût, de couverture et de précision. La plupart des techniques présentées sont intégrées dans des systèmes déjà commercialisés à grande échelle. Cependant, d'autres ne sont pas sortis des laboratoires de recherche et n'ont pas dépassé le stade de prototypes. Il y en a d'autres, qui sont très perfectionnées mais à cause de leur portée limitée ou leur prix excessif, elles ne sont utilisées que dans quelques domaines très spécifiques.

Le système de localisation à l'extérieur le plus utilisé au monde est de loin le système GPS. Il présente un ensemble intéressant de potentialités :

- Il fournit la position, l'heure et la vitesse,
- Il est disponible dans le monde entier,
- Il est disponible 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7,
- Il est disponible même dans les conditions climatiques extrêmes (avec une dégradation des performances),
- Le coût des récepteurs GPS est en diminution constantes et ses performances s'améliorent constamment.

Même si le système GPS est très intéressant pour les applications extérieures, il n'est pas parfait. Il souffre d'un ensemble de problèmes qui dégrade sa précision notamment en ville (visibilité limitée des satellites, retards dus à l'ionosphère et la troposphère et le multi-trajet).

Le chapitre 2 sera consacré entièrement aux systèmes de navigation par satellites : Le GPS et les systèmes similaires (GLONASS, GALILEO, BEIDO – COMPASS2) ainsi que les systèmes d'amélioration de leurs précisions.

II POSITIONNEMENT PAR SATELLITES

Ce chapitre est consacré aux systèmes de positionnement par satellites et plus particulièrement au système GPS. Il expose notamment le principe de positionnement, les sources d'erreurs et les méthodes d'amélioration de la précision. Il présente également le processus de modernisation du système GPS. La dernière partie est consacrée aux transformations des coordonnées géographiques (GPS WGS-84) vers des coordonnées planes (Lambert II pour le centre de la France).

1 Introduction

Les systèmes de navigation par satellites présentent un ensemble de caractéristiques intéressantes parmi lesquelles on peut citer :

- Un positionnement en 3D (Longitude, Latitude, Altitude),
- Un suivi (Tracking : La vitesse de déplacement est fournie),
- Un transfert de temps (La synchronisation : l'heure est fournie),
- Une couverture mondiale,
- Une disponibilité 24h/24h dans toutes les conditions météorologiques mais avec une dégradation des performances dans les situations extrêmes,
- Les prix des récepteurs (GPS) ne cessent de baisser et les performances ne cessent de s'améliorer.

Ces caractéristiques ouvrent le champ d'utilisation des systèmes de positionnement par satellites à un large éventail d'applications qui varient entre des activités ludiques jusqu'aux activités les plus sérieuses. Parmi ces applications nous citons :

- La navigation et le suivi de véhicule (terre/mer/air/espace),
- Les services de secours d'urgence (en mer et en montagne),
- La randonnée,
- La photogrammétrie,
- Les SIG (Système d'Information Géographique),
- Le positionnement précis (guidage d'engin agricoles),
- La géodésie,
- Le suivi des plaques tectoniques.

La liste n'est pas exhaustive, elle ne sera limitée en effet qu'avec notre imagination.

Les utilisateurs disposent d'un moyen unique pour leurs applications de localisation, de navigation, de référence temporelle, de géodésie voire de détermination d'altitude. Ces diverses applications ont conduit à développer différents types de récepteurs, chacun pouvant inclure différentes fonctions adaptées au besoin.

Cependant les systèmes de positionnement par satellites ne sont pas parfaits, ils présentent aussi un ensemble d'inconvénients, parmi lesquels :

- L'utilisation est, en général, réservée à l'extérieur,
- L'antenne du récepteur doit être orientée vers le ciel,
- Les capteurs peuvent être brouillés par les grands immeubles ou d'autres obstacles présents dans leurs environnements,
- Les capteurs (utilisés en continu) consomment beaucoup d'énergie ce qui peut poser des problèmes pour les nœuds ayant une source d'énergie limitée.

Le GPS est de loin le système de positionnement par satellites le plus utilisé au monde [3]. Pour cette raison, nos travaux de thèse ont été menés avec le GPS. La première partie de ce chapitre est consacrée entièrement à ce système. Les constellations, le principe de positionnement, les erreurs rencontrées pour les autres systèmes de positionnement par satellites présentent beaucoup de similitudes avec le système GPS. Une brève présentation des autres systèmes est fournie à la fin de ce chapitre.

2 Le système GPS

Le système NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System*) a été conçu, développé et mis en place par le Ministère des Armées (*DoD, Department of Defense*) des Etats Unis pour remplacer les autres systèmes de positionnement existants au début des années 70.

Le système GPS est un système de radionavigation tout temps, toute condition météorologique et tout lieu. Un utilisateur, muni d'un récepteur GPS, peut déterminer sa position qu'il soit sur terre, en mer, dans les airs, voire dans l'espace, à partir des positions connues de plusieurs satellites.

2.1 La composition du système

Le système GPS est composé de trois segments (ou secteurs) : le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur. La Figure II- 1 illustre cette décomposition.

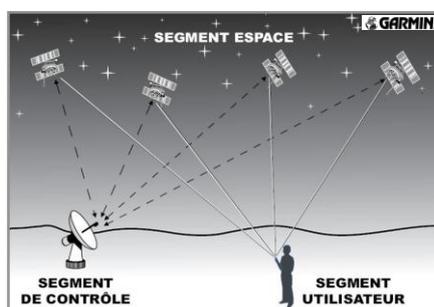


Figure II- 1 Segments du système GPS [60]

2.1.1 Le segment spatial

Le segment spatial est constitué d'une constellation¹² de satellites diffusant des signaux radios. La constellation de base est constituée de 24 satellites. La constellation actuelle (juillet 2009) compte 31 satellites actifs (utilisables). Ils font partie de la deuxième génération : BLOC IIA (Advanced), IIR (Replenishment) et IIR-M (Modernized). Ils ont été lancés entre 1990 et 2009 et ils seront suivis par les satellites IIF (Follow on) et les satellites d'une nouvelle génération (BLOC III). La Figure II- 3 montre des images de satellites GPS de différentes générations. Des images supplémentaires sont accessibles à partir du site suivant : <http://pnt.gov/public/images/>

Les orbites des satellites sont :

- Quasi-circulaires de 26 500 km de rayon (soit à une altitude d'environ 20 200 km). Le temps de propagation des signaux radios est au minimum de 67 ms et au maximum de 86 ms.
- De période égale à environ 11 heures et 58 minutes.
- Inclinaées de 55° par rapport à l'équateur. Cette inclinaison a été choisie afin d'optimiser la qualité de la constellation au-dessus des Etats-Unis. Par contre dans les zones polaires les satellites sont très bas par rapport à l'horizon, ce qui rend la localisation plus difficile.
- Au nombre de six également espacées autour de l'équateur,
- Chaque orbite contient, en général, 4 satellites actifs et un de réserve. L'intérêt de satellites complémentaires est de renforcer la fiabilité, la disponibilité et l'intégrité de la navigation.

La constellation GPS a été choisie de la sorte qu'au moins 4 satellites soient visibles en tout point du globe. La Figure II- 2 illustre la constellation du système GPS.

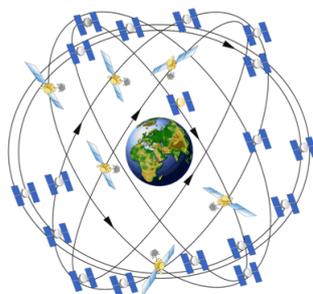


Figure II- 2 La constellation GPS

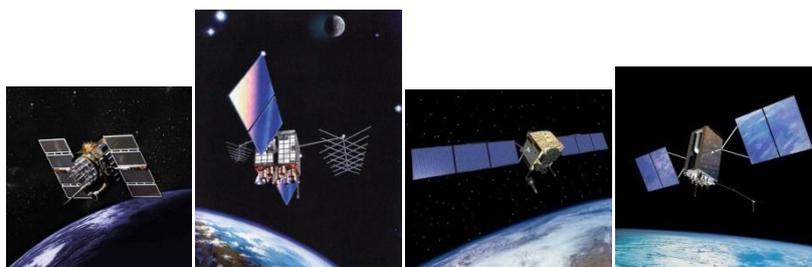


Figure II- 3 Des satellites GPS des blocs II/IIA, IIR-M, IIF et III

¹² Etat de la constellation GPS : <http://www.navcen.uscg.gov/navinfo/Gps/ActiveNanu.aspx>

Pour le public, l'état de la constellation est consultable sur le site des gardes-de-côtes américains¹³ (*Navigation Center, US. Coast Guard*). On y trouve notamment l'état de la constellation, les indisponibilités programmées, l'almanach, les modifications planifiées de la constellation.

L'identification des satellites

Plusieurs numérotations des satellites GPS cohabitent. La plus utilisée est la numérotation PRN (*Pseudo Random Noise*) car elle est fournie aux utilisateurs par le message de navigation envoyé par les satellites ; pour cette raison elle est très souvent utilisée par les récepteurs et les logiciels de calculs.

Les autres types numérotation sont :

- La numérotation du type Space Vehicule (SV) qui correspond à l'ordre de lancement des satellites. SVN1 pour le premier satellite GPS lancé, ainsi de suite ;
- La numérotation dans le catalogue de la NASA ;
- La numérotation internationale.

L'almanach et les éphémérides

Chaque satellite transmet l'almanach de tous les satellites en position. Les coefficients de dérive de l'horloge et de l'état de fonctionnement des satellites se rajoutent aux paramètres définissant l'orbite du satellite. L'almanach est réactualisé (généralement) une fois par semaine.

La précision de position d'un satellite obtenue à partir de l'almanach est kilométrique. L'almanach est principalement utilisé pour prévoir la visibilité des satellites en vue de capter leurs signaux.

Les éphémérides permettent de déterminer les positions des satellites avec une plus grande précision. Elles ne sont valides normalement que pendant six heures. L'ordre de grandeur de la précision de position d'un satellite calculée à partir des éphémérides est de 1 m sur le rayon de son orbite, de plusieurs mètres sur sa trajectoire et de quelques mètres dans la direction perpendiculaire aux deux directions précitées.

Un extrait d'almanach ainsi que la description des paramètres des orbites donnés par le format YUMA et 3a sont présentés dans l'annexe I.

2.1.2 Le segment de contrôle

Le segment de contrôle dépend de l'armée américaine. Son rôle est de maintenir en permanence le système GPS opérationnel. Ses fonctions principales sont les suivantes : suivre les satellites pour estimer leurs orbites, ajuster leurs éphémérides, modéliser les dérives des horloges et mettre à jour les paramètres du message de navigation que les satellites diffusent.

Actuellement les stations de contrôle sont entièrement terrestres. Dans le futur, l'évolution du GPS III programmée pour 2013 inclura une version spatiale des stations de contrôle [9].

¹³ www.navcen.uscg.gov

Il y a 5 stations qui se trouvent à Colorado Spring (la station principale), Ascension, Diego Garcia, Kwajalein et Hawaii. Seulement les trois stations (Ascension, Diego Garcia, Kwajalein) assurent le chargement des informations vers les satellites.

En 2005, 6 stations du NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) ont été rajoutées au réseau des stations de contrôle (de couleur magenta sur la carte¹⁴ de la Figure II- 4).

Le rôle des stations de contrôle est de poursuivre passivement les satellites en code et en phase (porteuse) quelque soient leurs positions et d'acquérir le message de navigation. Le niveau des signaux GPS est également surveillé.

Ces informations sont transmises à la station principale lui permettant de calculer les éphémérides et d'estimer la dérive d'horloge de chaque satellites. Par ailleurs la station principale estime le retard ionosphérique et calcule les paramètres du modèle de correction.

La station principale contrôle, asservit la position des satellites et gère la constellation spatiale. Elle doit rapidement détecter toute défaillance d'un satellite et, le cas échéant, le mettre en mode dégradé ou interdire son usage tout en informant les utilisateurs par l'intermédiaire du message de navigation. L'actualisation de l'almanach à chaque modification de la constellation spatiale, du lancement ou à la fin de vie d'un satellite, est également de son ressort.

Le segment de contrôle est transparent pour l'utilisateur final du GPS.



Figure II- 4 Carte des stations du segment de contrôle

2.1.3 Le segment utilisateur

Le segment utilisateur est formé par toute personne possédant un récepteur GPS dans le monde entier. Les utilisateurs sont des militaires ou des civils et leurs applications sont diverses : terrestres, maritimes ou aéronautiques, voire spatiales.

Un récepteur GPS est conçu pour recevoir, décoder et traiter les signaux émis par les satellites GPS. Les récepteurs intégrés dans d'autres systèmes (téléphone portable, appareil photo, ...) sont également inclus dans le segment utilisateur.

¹⁴ Carte accessible à partir du lien http://www.kowoma.de/en/gps/control_segment.htm

2.2 L'historique du GPS

Ci-dessous une brève chronologie du développement du système GPS, citant notamment des dates symboliques :

1973 : Prise de la décision pour la réalisation d'un système de navigation par satellites.

1974-1979 : Des tests du système sont entreprises.

1977 : Les premiers tests de récepteurs sont effectués avant même que les premiers satellites soient mis en orbite. Les tests utilisaient des transmetteurs installés sur terre appelé des pseudolites (pseudo-satellites).

22/02/1978 : Lancement du 1^{ier} satellite GPS du bloc 1.

1978-1985 : 11 satellites du bloc 1 sont déjà mis en orbite dans cette période. Les satellites du bloc 1 sont développés pour valider le concept du GPS. Aucun satellite de cette génération n'est encore en usage.

1980-1982 : La situation financière du projet est critique, son utilité est mise en cause par les financeurs (sponsors).

1983 : Après qu'un avion civil de la compagnie 'Korean Airline' vol n° 007 soit abattu au-dessus de l'Union Soviétique, après avoir s'être égaré, le Président américain, Ronald Reagan, proposa l'ouverture du système GPS pour les utilisateurs civils dans le monde entier.

1986 : L'accident de la navette spatial "Challenger" a posé un problème pour le système GPS. Les navettes étaient prévues pour transporter les satellites GPS du Bloc 2 vers leurs orbites. Finalement les responsables du programme se sont retournés vers les fusées Delta pour lancer les satellites GPS.

10/01/1987 : Le système géodésique WGS-84 (*World Geodetic System 1984*) est adopté pour tous les calculs de position avec le GPS.

14/02/1989 : Le 1^{ier} satellite du Bloc 2 est installé est mis en service. Ce type de satellite est beaucoup plus précis et peut rester 14 jours sans contact avec les stations de contrôle tout en gardant une précision suffisante [37].

1990-1991 : Désactivation temporaire de la disponibilité sélective (SA) pendant la première guerre du Golf. Le nombre de récepteurs GPS militaires disponibles étant insuffisant, les récepteurs GPS civil sont alors utilisés. En 01/07/1991 la disponibilité sélective est réactivée de nouveau.

08/12/1993 : La capacité opérationnelle initiale est annoncée (*IOC, The Initial Operational Capability*). Dans la même année, il a été décidé d'autoriser l'utilisation civile du GPS gratuitement, dans le monde entier.

Mars 1994 : La constellation est devenue complète avec les satellites du BLOC 2.

17/07/1995 : La capacité opérationnelle totale est annoncée (*FOC, Full Operational Capability*).

01/05/2000 : Désactivation définitive de la disponibilité sélective et par conséquent l'amélioration de la précision pour les utilisateurs civils, passant d'environ 100 m à 20 m.

26/09/2005 : Lancement du 1^{er} satellite GPS-2R-M. Ces nouveaux satellites supportent le nouveau signal militaire M et le second signal civil L2C.

24/03/2009 : Lancement du 20^{ième} satellite du bloc 2R-M. Il fait parti des satellites de modernisation du système GPS. Il diffuse le nouveau signal civil sur la fréquence L5. L'intégration du signal L5 sur ce satellite vise à :

1. Placer un émetteur du signal L5 en orbite pour prouver qu'il n'interfère pas avec les autres signaux GPS déjà diffusés.
2. Permettre aux fabricants de récepteurs GPS d'avoir le signal L5 diffusé à partir de l'espace pour qu'ils puissent développer et tester leurs récepteurs qui supportent le signal L5.
3. Réserver la fréquence L5 au système GPS en respect des spécifications de l'ITU (International Telecommunications Union). En effet le signal L5 devait être diffusé avant le 26/08/2009, sinon la fréquence peut être réclamée par un autre pays. Le satellite a commencé d'émettre le signal L5 le 10/04/2009 à 11:58 UTC [35].

2.3 Services offerts par le GPS

Le système GPS fournit deux services de positionnement : le service standard (*SPS, Standard Positioning Service*) et le service précis (*PPS, Precise Positioning Service*).

2.3.1 Le service standard (SPS)

Ce service est ouvert à tous les utilisateurs civils dans le monde entier. Ce mode est gratuit et anonyme. Par contre les utilisateurs sont soumis aux dégradations volontaires imposées par l'armée américaine.

Deux types de dégradations existent :

- L'accessibilité sélective (*SA, Selective Availability*), qui consiste à dégrader les performances nominales du système en modulant le signal C/A (*Coarse/Acquisition*) permettant le calcul des pseudo-distances avec un code pseudo-aléatoire inconnu par les utilisateurs civils. La SA a été désactivée à partir du 2 mai 2000. Néanmoins l'armée américaine a la possibilité de la réactiver à n'importe quel moment et notamment en temps de crise ou de guerre ou dans une zone de couverture bien précise.
- L'anti-leurre (*AS¹⁵, AntiSpoofing*), qui consiste à rendre inconnue une partie des informations transmises afin qu'elles ne puissent être reproduites. Concrètement le code P (*Precise*), qui permet d'avoir une grande précision, est crypté. Le code P original est donc remplacé par le code Y qui est inconnu (voir section 2.4.3).

Les spécifications [32] du service SPS (avec la SA active) donnent les précisions suivantes : 100 m (à 95% du temps) en horizontal (Position 2D) et 156 m en vertical et 340 nanoseconde en précision

¹⁵ Etat d'activation de la protection AS consultable sur : <http://gps.afspc.af.mil/gps/Current/as.txt>

de l'heure. Après la désactivation de la SA, les performances du GPS se sont nettement améliorées. Sa précision en horizontal est de quelques mètres (1-3) [3][9].

2.3.2 Le service précis (PPS)

Ce service est réservé aux militaires américains et leurs alliés, et nécessite l'utilisation d'une clé de décryptage permettant d'éliminer les dégradations volontaires (SA et AS). Le service PPS a une précision de 21 m en horizontal, 27.7 m en vertical et de 200 nanoseconde en précision de l'heure.

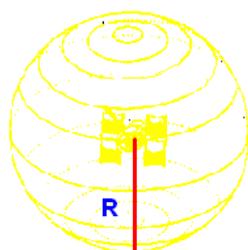
2.4 Le principe du positionnement

Le positionnement par satellite est basé en général sur la méthode du ToA (temps de parcours, cf Chapitre I-2.3) et TDoA (différence du temps d'arrivée, cf Chapitre I-2.4). Un récepteur détermine sa position en connaissant les distances qui le séparent de plusieurs satellites. Les positions des satellites sont connues (ou calculées).

Chaque satellite émet en permanence un signal daté. Un récepteur synchronisé peut alors mesurer le temps de propagation de ce signal et en déduire la distance le séparant du satellite étant donné que la vitesse de propagation des ondes radio est connue ($\approx 3 \times 10^8$ m/s).

A partir de trois satellites, un tel récepteur est capable d'effectuer une triangulation pour déterminer sa position (2D). Cette position est obtenue instantanément permettant ainsi la navigation.

Chaque mesure représente le rayon R d'une sphère centrée sur un satellite particulier. Le récepteur GPS est alors sur cette sphère :



Le récepteur sait qu'il est quelque part sur cette sphère

Figure II- 5 Positionnement 3D avec une seule mesure connue (R)

Avec deux mesures, la position du récepteur est sur le cercle formé par l'intersection des deux sphères (ellipse rouge sur la figure ci-dessous) :

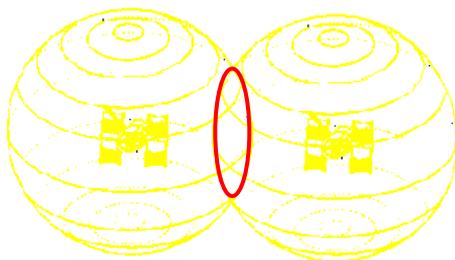


Figure II- 6 Positionnement 3D avec deux mesures connues

Une troisième mesure simultanée réduit l'intersection à deux points, dont un point est très éloigné dans l'espace et il est aisément écarté. Il reste ainsi qu'une seule position sur la surface de la terre.

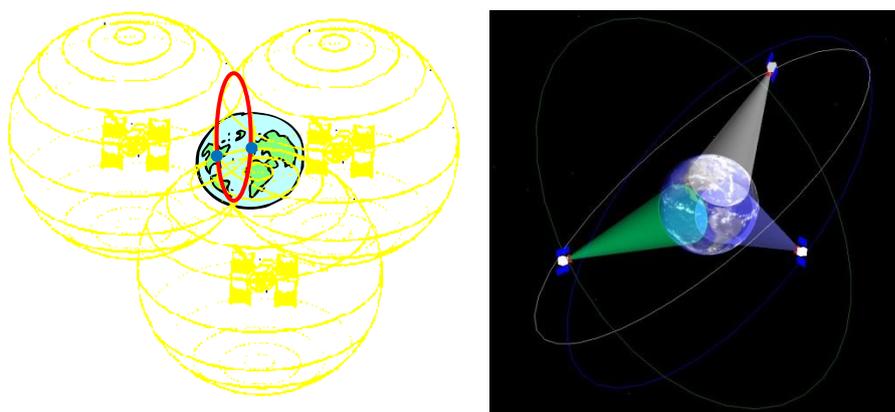


Figure II- 7 Positionnement 3D avec trois mesures connues

Malheureusement, l'horloge du récepteur est affectée d'un biais car elle n'est pas synchrone à l'horloge du système GPS. Ce biais est le décalage du temps entre l'horloge du récepteur et l'horloge GPS. Il n'est pas concevable d'avoir une horloge du récepteur synchrone à l'horloge du système GPS pour des raisons pratiques et économiques. En effet, une horloge très précise est volumineuse et très coûteuse.

Ce biais d'horloge ΔT se traduit par une erreur de mesure du temps de propagation des signaux GPS et par conséquent une erreur sur les distances satellites-récepteur. Cette erreur se retrouve sur toutes les distances mesurées par le récepteur.

Comme les distances mesurées ne sont pas parfaites (ne représentent pas les distances géométriques), car principalement entachées d'un biais de temps, elles sont appelées pseudo-distances. Ce biais de temps a priori inconnu doit être déterminé.

Il faut donc rajouter une quatrième inconnue pour calculer la position en trois dimensions. Il est nécessaire de mesurer une distance supplémentaire, donc de disposer de quatre mesures effectuées sur quatre satellites, pour résoudre un système de quatre équations à quatre inconnues.

Les paramètres à déterminer sont, suivant un repère géographique : la longitude, la latitude, l'altitude et le biais d'horloge ΔT . Les calculs s'effectuent dans un repère Cartésien dans lequel les inconnues sont X, Y, Z et ΔT . Le changement vers un repère exploitable par l'utilisateur (projection

Lambert, UTM-Universal Transverse Mercator, ...) s'effectue seulement avant de présenter les résultats.

2.4.1 Equations de navigation

Pour quatre mesures, les équations de navigation du système GPS sont définies dans un repère Cartésien ECEF (*Earth Centred, Earth Fixed*) qui a comme origine le centre de masse de la Terre. Ce n'est qu'après le calcul de la solution dans le repère Cartésien que cette solution est convertie en coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude). La Figure II- 8 illustre ce repère ECEF :

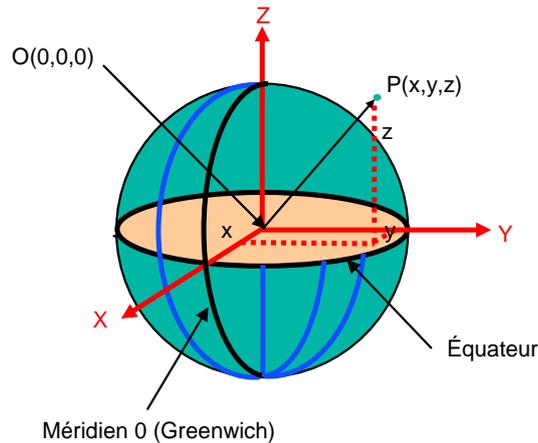


Figure II- 8 Référentiel ECEF

Le calcul de la position du récepteur est basé sur la résolution du système d'équations ci-dessous :

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2} + c.\Delta T \\ D_2 &= \sqrt{(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2} + c.\Delta T \\ D_3 &= \sqrt{(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2} + c.\Delta T \\ D_4 &= \sqrt{(X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2} + c.\Delta T \end{aligned} \right\} (1)$$

X, Y, Z représentent les coordonnées inconnues du récepteur

X_i , Y_i et Z_i sont les coordonnées connues des satellites. Chaque satellite émet des informations permettant de calculer sa position à chaque instant. Les informations transmises constituent l'almanach ou les éphémérides.

ΔT est le biais de l'horloge récepteur. Le coefficient c est la vitesse de la lumière (ondes radios).

Si l'utilisateur dispose d'informations complémentaires, le nombre d'équations pour résoudre ce système peut être réduit, on peut citer par exemple :

- L'altitude qui est une constante pour les applications marines.
- Le biais d'horloge ΔT . Cette information est disponible après une première estimation, mais elle dérive au-delà d'un temps dépendant des paramètres de qualité de l'horloge du récepteur. Ce biais d'horloge n'est plus utilisable et quatre mesures sont à nouveau nécessaires pour maintenir un niveau de précision acceptable.

Résolution des équations de navigation

Le système (1) peut être défini par le système d'équations équivalent ci-dessous :

$$\left. \begin{aligned} D_1^2 &= (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 + (c \cdot \Delta T)^2 & (2.1) \\ D_2^2 &= (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 + (c \cdot \Delta T)^2 & (2.2) \\ D_3^2 &= (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 + (c \cdot \Delta T)^2 & (2.3) \\ D_4^2 &= (X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2 + (c \cdot \Delta T)^2 & (2.4) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Les équations du système (2) sont quadratiques ce qui complique la résolution. On peut cependant remarquer que si on soustrait à une des équations du système (2) une deuxième équation, on obtient une équation linéaire car les termes en X^2 , Y^2 et Z^2 s'annulent. On remplace donc le système (2) par un système équivalent obtenu en gardant la 4^{ème} équation (2.4) et en remplaçant, respectivement, la 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} équation par (2.1)-(2.4), (2.2)-(2.4) et (2.3)-(2.4).

La résolution du système passe par la résolution de l'équation quadratique (2.4) et puis remplacement des deux valeurs trouvées dans les autres équations pour trouver les deux solutions.

L'une des deux solutions est aberrante et se trouve éloignée de la Terre, elle est rejetée et on ne garde que la solution possible qui sera convertie en coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude).

La méthode directe est loin d'être la méthode la plus utilisée pour la résolution des équations de navigation. La méthode la plus utilisée est celle qui linéarise la fonction "racine carré" en utilisant le développement de Taylor autour d'un point initial (X_0, Y_0, Z_0) . Dans ce cas les équations deviennent linéaires et la résolution se fait sur une seule fois contrairement à la méthode exposée ci-dessus. Si le nombre de satellites présents est supérieur à quatre, le système est surdéterminé et il est résolu en utilisant la méthode des moindres carrés [38].

2.4.2 Définition et calcul des pseudo-distances

La mesure de pseudo-distance est basée sur une différence de temps entre plusieurs instants. Ces différents instants sont pris dans des référentiels ayant chacun leur propre échelle de temps.

Echelles de temps

Trois échelles de temps coexistent dans le cas du GPS :

1. t : le temps GPS, c'est le temps continu utilisé pour dater les événements GPS en absolu. C'est un temps mesuré par une horloge atomique parfaite du point de vue d'un utilisateur immobile sur le géoïde terrestre. Ce temps GPS est relié au temps UTC (temps universel coordonné) qui est un temps discret qui contient des sauts de seconde rajoutés de temps en temps du fait du ralentissement de la rotation de la terre. Le temps GPS est en avance par rapport au temps UTC de 14 secondes (la 14^{ème} seconde a été rajoutée la nuit du 1 janvier 2006). Le temps GPS est exprimé en nombre de semaines et au nombre de secondes depuis le début de la semaine. Après la semaine numéro 1023, la numérotation recommence de

zéro. La semaine numéro zéro du GPS commence le dimanche 6 janvier 1980 à 00h. Le retour du compteur de la semaine à zéro s'est produit le 22 août 1999.

2. t_s : le temps exprimé dans l'échelle du temps du satellite, c'est le temps mesuré par l'horloge satellite. Le temps satellite t_s est relié à t (temps GPS) par la relation suivante :

$$t_s = t + \Delta t_s$$

Δt_s est le décalage de l'horloge du satellite par rapport au temps GPS, il est calculé à partir des données envoyées par le message de navigation.

3. t_r : le temps exprimé dans l'échelle du temps du récepteur, c'est le temps mesuré par l'horloge récepteur. Le temps récepteur t_r est relié à t (temps GPS) par la relation suivante :

$$t_r = t + \Delta t_r$$

Δt_r est estimé en résolvant les équations de navigation permettant de calculer la position du récepteur.

La pseudo-distance

Les distances calculées à partir des temps (estimés) de parcours des signaux entre les satellites et les récepteurs ne représentent pas les distances géométriques réelles du fait que les horloges satellites et récepteur ne sont pas synchronisées. Les couches atmosphériques (ionosphère et troposphère) introduisent des délais supplémentaires. Pour cela ces distances estimées sont appelées pseudo-distances.

La figure ci-dessous illustre le principe de mesure des pseudo-distances.

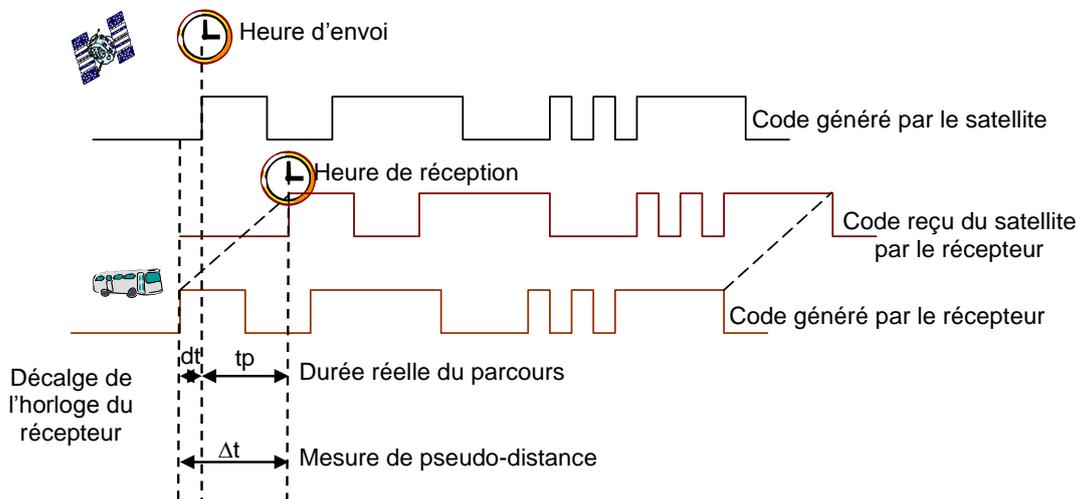


Figure II- 9 Mesure du temps par un récepteur GPS

Chaque satellite transmet un signal connu (associé à son numéro PRN). Le récepteur génère localement le même signal. Dès la réception du signal du satellite, le récepteur décale ce dernier afin de chercher la meilleure corrélation avec le signal généré localement. Cette opération permet au récepteur de déterminer le décalage temporel entre le signal généré et le signal reçu et par conséquent de déterminer la mesure de la pseudo-distance.

2.4.3 Le signal GPS

Généralités :

Le signal satellite est transmis sur deux ondes porteuses appelées L1 et L2. Les fréquences de ces porteuses sont respectivement 1575,42 MHz et 1227,60 MHz.

L'utilisation de deux porteuses permet notamment de calculer les délais introduits par l'ionosphère. L'utilisation de L2 est réservée aux personnes autorisées (militaires US et leurs alliés).

Les deux fréquences GPS sont cohérentes et sont multiples d'une horloge de référence (f_0) à 10,23 MHz :

$$L1 = 154 \times f_0 = 1575,42 \text{ MHz (19 cm de longueur d'onde)}$$

$$L2 = 120 \times f_0 = 1227,6 \text{ MHz (24,4 cm de longueur d'onde)}$$

Pour que tous les satellites aient la possibilité de transmettre sur les deux fréquences L1 et L2, la technique CDMA (*Code Division Multiple Access*) a été utilisée. Pour cela à chaque satellite est associé un code dont son émission en continu représente le signal PRN. Chaque code PRN est identifié par un numéro et correspond au numéro PRN du satellite.

La porteuse L1 est modulée par saut de phase ($\pm \pi$). Un signal numérique de fréquence 10,23 MHz inverse le signal de la composante en phase de la porteuse tandis qu'un signal numérique à cadence de 1,023 MHz inverse celui de la composante en quadrature à chaque changement de niveau logique.

Les signaux numériques rapides et lents sont respectivement constitués par un code P (*Precise, Protected*) et par un code C/A (*Coarse/Acquisition*) multipliés avec un message de navigation (m) utilisé par le récepteur pour résoudre les équations de navigation afin de calculer sa position (le format et le contenu du message de navigation sont indiqués dans l'annexe II). Le débit du message de navigation est de 50 bps et il est synchrone avec les codes C/A et P.

La porteuse L2 n'est modulée qu'avec le code P et le message de navigation (actuellement, avec la modernisation du système GPS, un signal civil L2C est diffusé aussi sur L2).

Le code C/A est un code de GOLD spécifique à chaque satellite de période égale à une milliseconde ou 1023 bits. Il est généré par une horloge de 1,023 MHz. Les codes de GOLD ont été choisis pour leur propriété d'inter-corrélation, ce qui autorise l'accès multiple sur une seule fréquence. De ce fait, chaque satellite émet sur les fréquences L1 et L2 et la sélection se fait uniquement par le code.

Le générateur du code P est identique quel que soit le satellite, mais une tranche temporelle différente de 7 jours est affectée à chacun d'entre eux.

Le code P est protégé par cryptage contre le leurre (*anti-spoofing*), c'est-à-dire contre les émissions délibérées d'un signal GPS erroné. Le code P crypté est appelé code Y.

La Figure II- 10 illustre la modulation de phase utilisée par les satellites GPS pour générer les signaux émis sur L1 et L2 :

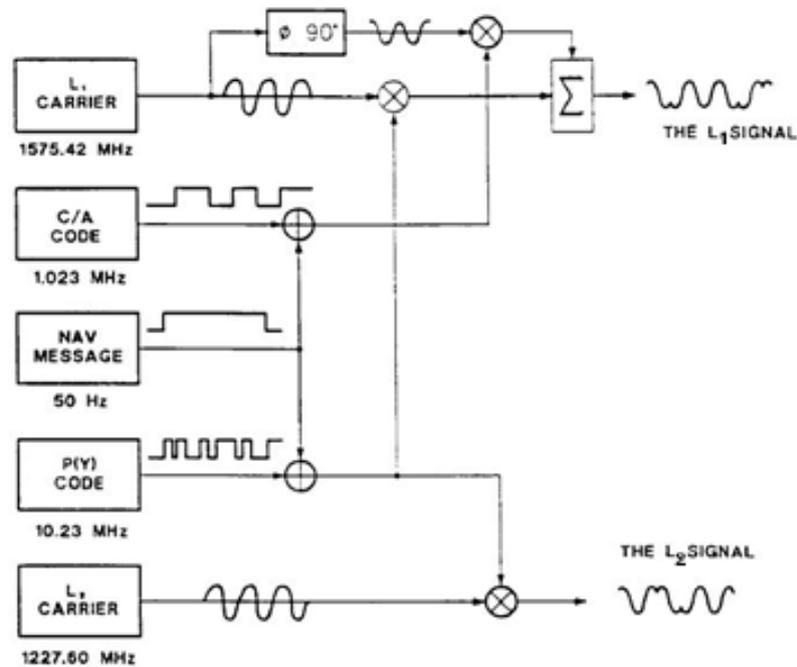


Figure II- 10 Construction des signaux GPS transmis sur L1 et L2 [49]

Les signaux L1 et L2 générés sont donnés par les deux formules suivantes [38] :

$$L_1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos 2\pi f_1 t + a_1 C/A(t) D(t) \sin 2\pi f_1 t$$

$$L_2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos 2\pi f_2 t$$

Où :

- a_1, a_2, f_1, f_2 sont les amplitudes et les fréquences de L_1 et L_2 .
- $P(t), C/A(t)$ et $D(t)$ sont des fonctions du temps ne prenant que les valeurs discrètes +1 et -1 et représentent respectivement le code P, le code C/A et les données du message de navigation.

3 Les sources d'erreurs

3.1 Introduction

Les mesures de distance effectuées par un récepteur GPS sont affectées par trois types d'erreurs :

- Les erreurs liées au segment spatial et au segment de contrôle : ce sont les erreurs d'éphémérides et les erreurs d'horloge ;
- Les erreurs de propagation : dans ce type d'erreurs sont inclus les effets de l'ionosphère et de la troposphère, les trajets indirects ou multi-trajets ;
- Les erreurs propres au récepteur : ce sont les erreurs dues au biais de son horloge, aux calculs et l'incontournable bruit thermique.

Lorsque l'on parle d'erreurs, on ne cite que les résidus d'erreurs. Le biais est souvent connu, il est alors modélisé ou il est directement estimé (cas de l'ionosphère). Par conséquent ces biais sont éliminés ou substantiellement réduits.

Globalement les résidus d'erreurs (un résidu d'erreur est la différence entre une mesure et un modèle) sont statistiquement connus. Les paramètres statistiques des erreurs permettent de déterminer l'UERE (*User Equivalent Range Error*). Ce terme combine les effets des incertitudes sur les éphémérides, les erreurs de propagation et l'horloge ainsi que les bruits du récepteur.

Avant d'examiner toutes les erreurs précitées, il est très utile de rappeler quelques formules mathématiques permettant de quantifier les erreurs du GPS.

3.2 Quantification des erreurs

Ci-dessous un ensemble de valeurs mathématiques calculées pour une variable aléatoire X.

La moyenne ou espérance (μ) : $E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)f(t)dt$

Déviatation standard (σ) : $\sigma = \sqrt{E[(X - \mu)^2]} = \sqrt{E(X^2) - [E(X)]^2}$

Variance (σ^2) : $Var(X) = \sigma^2$

Covariance (σ_{xy}) : $\sigma_{xy} = Cov(X,Y) = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)] = E(XY) - E(X)E(Y)$

3.2.1 RMS

$$RMS(X) = \sqrt{E(X^2)} = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$$

RMS (*Root Mean Square*) ou HRMS (*Horizontal RMS*) se réfèrent à l'erreur horizontale et peut être utilisée indifféremment. RMS représente approximativement 67% de la distribution des erreurs ($\mu + \sigma$).

3.2.2 CEP

CEP (*Circular Error Probable*) est une mesure de l'erreur 2D et elle représente la distance D telle que : $P(Erreur < D) = 0.5$. En d'autres termes c'est le rayon d'un cercle centré à la position réelle et qui contient 50% de la distribution des erreurs.

3.2.3 SEP

SEP (*Spherical Error Probable*) a la même définition que CEP mais en 3D, elle représente donc le rayon d'une sphère centrée à la vraie position et qui contient 50% de la distribution des erreurs.

3.2.4 2DRMS

2DRMS (2D RMS) représente 2 fois RMS et qui représente 95% de la distribution des erreurs ($\mu + 2\sigma$).

CEP (50%), SEP (50%), RMS (67%) et 2DRMS (95%) sont toutes des mesures de performances pour un récepteur GPS.

3.3 Erreurs du secteur de contrôle

3.3.1 Erreur d'éphémérides

C'est l'erreur de position d'un satellite car le satellite n'est pas là où les éphémérides le localisent.

L'écart de position est dû à une modélisation imprécise de la trajectoire du satellite par le segment de contrôle. Si les effets gravitationnels sont parfaitement connus, il n'en est pas de même avec la pression solaire s'exerçant sur le satellite. La force résultante est très sensible à l'angle d'incidence des rayons.

L'erreur d'éphémérides est vectorielle et se décompose suivant trois axes liés aux satellites. On trouve ainsi l'erreur radiale (RAD) qui est l'erreur d'altitude du satellite, l'erreur de position le long de son orbite (ALNG), le satellite est en avance ou en retard, et l'erreur de position orthogonale (XTK) à l'orbite et à la verticale.

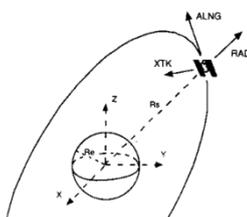


Figure II- 11 Erreurs de position du satellite [49]

Des relevés expérimentaux ont donné comme erreurs RMS typiques 0,9 m dans la direction radiale, 6,3 m le long de l'orbite et 3 m sur l'axe orthogonal [49].

3.3.2 Erreur d'horloge

Le segment de contrôle modélise en permanence par une approximation polynomiale la dérive d'horloge des satellites. Les coefficients du polynôme sont transmis dans le message de navigation. Le récepteur calcule le temps GPS à partir du temps satellite, de ces coefficients et de la position du satellite. Cette dernière permet de compenser les effets relativistes induits par une orbite non circulaire. Chaque satellite transmet les erreurs d'horloge de tous les satellites de manière indépendante, alors le récepteur a tout intérêt à utiliser les données les plus récentes.

Malgré tout, il subsiste une erreur d'horloge. Cela induit une erreur sur la position du satellite et sur les mesures de distances du fait des incertitudes sur le temps d'émission.

Si l'erreur de position est négligeable car centimétrique, l'erreur sur les distances mesurées ne l'est pas. La valeur RMS de l'erreur d'horloge est de 2,7 m. Elle est indépendante de la position relative du satellite par rapport à l'utilisateur. L'erreur d'horloge, comme l'erreur d'éphémérides, est propre à chaque satellite, il n'y a pas de corrélation entre eux sur cette erreur.

3.3.3 La SA (Selective Availability) et l'AS (Anti-Spoofing)

Le système GPS depuis l'origine est un programme militaire. Aussi, le bénéfice de la précision et de la disponibilité maximale est réservé aux militaires américains et leurs alliés.

Comme on l'a vu déjà auparavant (cf II-2.3.1), le secteur de contrôle dispose de deux techniques pour limiter volontairement les performances civiles du système GPS et de protéger son utilisation militaire : l'accessibilité sélective (SA) et l'anti-leurre(AS).

3.3.4 La géométrie des satellites

Une autre source d'erreur est la géométrie des satellites qui affecte la précision des calculs de la position. En effet, les satellites groupés génèrent une position avec une précision médiocre et au contraire, les satellites bien dispersés dans le ciel donnent une bonne précision.

Pour qualifier la qualité de la précision d'une position calculée, il existe plusieurs termes (des valeurs sans unité) qui donnent des estimations de cette précision. Ces valeurs sont regroupées sous le terme anglais de DOP (*Dilution Of Precision* ou diminution de la précision).

1. GDOP, *Gemetric DOP* : donne une idée sur la qualité de la position 3D et de l'heure.
2. PDOP, *Position DOP* : Qualité de la position 3D.
3. HDOP, *Horizontal DOP* : Qualité de la position 2D ou horizontale (Latitude et longitude).
4. VDOP, *Vertical DOP* : Qualité de la précision verticale ou de l'altitude.
5. TDOP, *Time DOP* : Qualité de l'heure (*Timing*).
6. RDOP, *Relative DOP* : Qualité de la correction différentielle.

Plus la valeur de DOP est importante, moins est la précision du positionnement GPS.

Pour donner une idée de l'effet de la géométrie des satellites sur la précision de la position calculée, sur les figures II- 9 et II- 10 sont représentées deux dispositions de satellites. La première est avec une valeur de DOP importante et une précision médiocre ; la deuxième a une petite valeur de DOP et une bonne précision de la position calculée.

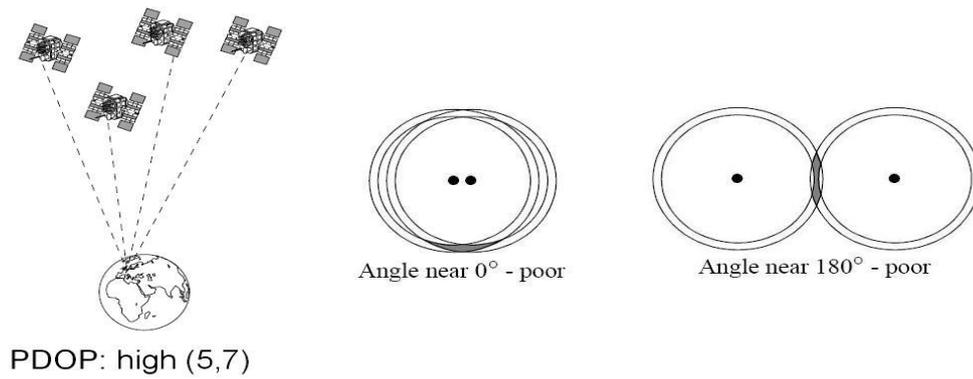


Figure II- 12 DOP - Mauvaise géométrie des satellites [50]

Les satellites sont regroupés dans la même région du ciel, ne donnent pas une bonne précision, par contre bien dispersés donnent une meilleure précision.

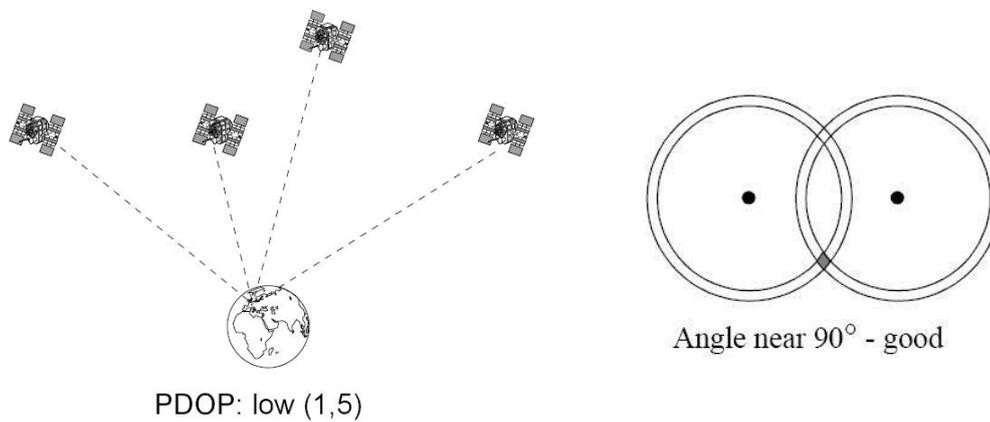


Figure II- 13 DOP - Bonne géométrie des satellites [50]

3.4 Erreurs atmosphériques (propagation)

L'atmosphère de la Terre est à 99,9% située sous une altitude de 50 km. L'air sec et la vapeur d'eau de l'atmosphère dévient la trajectoire des ondes. La variation d'indice de réfraction de l'atmosphère modifie également le temps de propagation des signaux surtout lorsqu'un satellite est bas sur l'horizon car l'épaisseur traversée est plus importante.

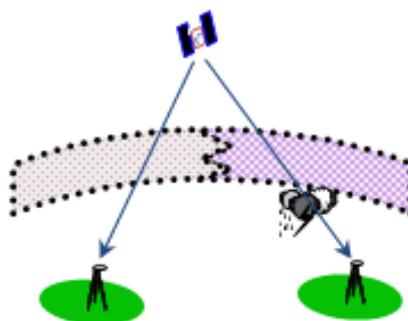


Figure II- 14 Traversée des couches atmosphériques

3.4.1 Erreur troposphérique

La troposphère est la couche basse de l'atmosphère qui est en contact avec le sol et dont l'épaisseur varie de 7 à 14 km selon le lieu. C'est un milieu non-dispersif pour des ondes de fréquence inférieure à 30 GHz, la réfraction est alors indépendante de la fréquence et de la mesure (code ou phase). L'erreur troposphérique (le résidu non modélisé) est d'environ 2 m si le satellite est au zénith et peut atteindre 30 m pour une élévation de 5°. Elle dépend de la température, de la pression, de l'humidité, ainsi que de l'élévation du satellite [38].

La corrélation spatiale de l'erreur troposphérique est de quelques kilomètres. Un court déplacement fait que cette erreur peut radicalement changer. Elle dépend surtout de l'humidité absolue, or celle-ci est tributaire des conditions météorologiques et de l'environnement : milieu sec (site urbain,...) ou milieu humide (étendue d'eau, forêts,...).

3.4.2 Erreur ionosphérique

L'ionosphère est la couche de l'atmosphère qui s'étend de 50 à 1000 km d'altitude. C'est un milieu dispersif (un milieu dispersif est un milieu dans lequel toutes les fréquences ne se propagent pas à la même vitesse), ionisé par l'action des radiations solaires.

L'agitation ionosphérique dépend de la latitude (plus agitée à l'équateur et aux pôles), de l'activité solaire dont le pseudo-cycle est d'environ 11 ans, de la période de l'année, du jour ou de la nuit. L'effet sur la mesure de distance en GPS varie de 0 à 15 m à la verticale et peut atteindre 45 m aux basses élévations [38].

L'erreur ionosphérique est l'erreur de mesure la plus importante.

La différence entre les mesures sur L1 et L2 (ou L5 diffusée récemment) permet de corriger le retard ionosphérique. L'erreur résiduelle tombe alors à 2 m.

Des expérimentations ont montré que la dé-corrélation spatiale complète de l'erreur ionosphérique se situe à 2000 km. La dé-corrélation temporelle varie entre 1 et 4 heures suivant l'heure locale, une valeur de 2 heures est un résultat moyen [49].

3.4.3 Le trajet multiple (multi-trajet)

Le phénomène du trajet multiple (multi-trajet) décrit le fait que le signal envoyé par le satellite arrive au récepteur après avoir suivi un autre chemin que le chemin direct en particulier après réflexion. L'élément réflecteur peut être le sol, une construction ou une partie du corps du porteur du récepteur GPS lui-même. Le multi-trajet se manifeste surtout dans des zones géographiques où le potentiel de réflecteurs est élevé, tel qu'à proximité d'un plan d'eau ou en milieu urbain (*voir* Figure II- 15).

Pour un récepteur GPS, lorsque le nombre de satellites est suffisant, on peut ne pas utiliser les satellites bas sur l'horizon car ils sont les plus exposés au multi-trajet (en fixant l'angle de coupure à 10° ou 15° au lieu de 5° habituellement utilisée).

L'erreur de mesure (sur le code) due au multi-trajet peut atteindre 10 à 20 m. L'effet n'ai pas le même si la source du multi-trajet est proche ou lointaine [38].

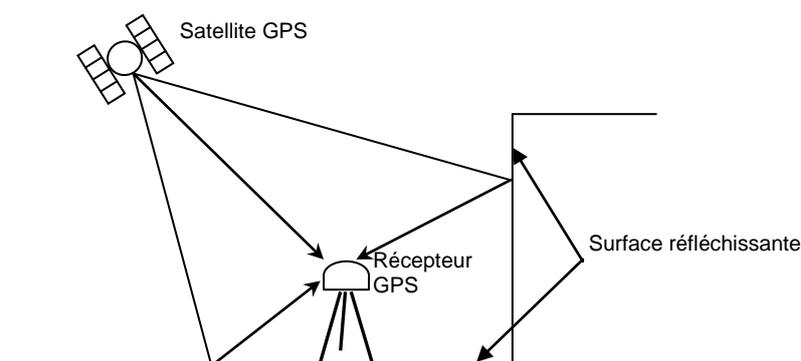


Figure II- 15 Le multi-trajet

3.5 Erreurs dues au récepteur

3.5.1 Le bruit thermique

Le niveau du bruit thermique après corrélation est du même ordre de grandeur que le niveau du signal GPS, c'est pourquoi ses effets ne peuvent pas être négligés. Le bruit thermique crée des erreurs sur les mesures de distances réalisées sur le code et sur les mesures de vitesses obtenues à partir de la porteuse.

3.5.2 L'horloge récepteur

Si le récepteur GPS disposait d'une horloge synchronisée à l'horloge du GPS, seuls trois satellites seraient nécessaires pour un positionnement en 3D. Cependant, équiper chaque récepteur d'une horloge suffisamment précise et synchronisée (horloge atomique) serait d'un coût prohibitif. Un oscillateur à quartz dont la stabilité est estimée à l'aide d'une quatrième mesure contourne le problème.

Les principales caractéristiques à spécifier pour cet oscillateur sont :

- Le temps de préchauffage,
- La stabilité à court terme et la dérive à long terme,
- La stabilité aux perturbations externes,
- La pureté spectrale.

Le temps de préchauffage conditionne la durée de la première acquisition et la durée d'obtention de la première position après la mise sous tension (TTFF, *Time To First Fix*).

La stabilité du pilote affecte le temps d'acquisition du signal en augmentant sa plage de recherche Doppler. La sensibilité de l'oscillateur aux perturbations externes, telles que les variations de température ou les vibrations, a des conséquences analogues à la stabilité ou à la pureté spectrale.

La pureté spectrale caractérisée par le bruit de phase du pilote n'affecte pratiquement que les mesures de phase ou de fréquence du signal, c'est-à-dire les pseudo-vitesses.

Le bruit de phase est amplifié par le standard de fréquence du récepteur générant les différents OL (Oscillateurs Locaux). En effet, chaque fois qu'une fréquence est doublée, le bruit de phase croît de 6 dB.

Les OL permettent la transposition des signaux reçus en hautes fréquences vers des fréquences plus basses en vue de leur traitement. Le bruit de phase se reporte intégralement sur le signal lors de cette transposition.

Les récepteurs GPS géodésiques disposent d'une entrée pour connecter un pilote externe à très haute stabilité comme une horloge atomique.

3.5.3 Les bruits de calculs

Les erreurs de calculs qui se répartissent entre les erreurs d'arrondi et les erreurs de troncature sont négligeables devant les erreurs introduites par un niveau normal de bruit thermique. Ces erreurs proviennent de la résolution limitée des processeurs de traitements de signal et des circuits spécifiques aux traitements des signaux GPS.

3.5.4 Le centre de phase de l'antenne

La mesure de distance se fait de l'antenne satellite à l'antenne du récepteur GPS. Or l'antenne du récepteur présente une phase qui évolue suivant la direction de la ligne de visée car elle ne peut pas, en toute rigueur, être considérée comme un point ou une sphère parfaite.

Une erreur de mesure existe et dépend de la direction de la ligne de visée.

3.6 Performances du GPS

Le bilan des erreurs du système GPS permet de calculer l'UERE (User Equivalent Range Error). On rappelle que l'UERE est l'erreur le long de la ligne de visée entre l'utilisateur et un satellite GPS.

L'UERE est le résultat de la projection de toutes les erreurs sur cette ligne de visée. Les erreurs proviennent d'une modélisation imprécise de la trajectoire ou du temps du satellite, d'une modélisation imparfaite des phénomènes de propagation, des imperfections du récepteur ou des lois de physique (bruit thermique).

Le bilan de l'UERE est donné dans le Tableau II-1 dans le mode PPS, c'est-à-dire sans tenir compte de la dégradation apportée par la SA.

Ce bilan est donné pour des conditions nominales de fonctionnement du segment de contrôle.

Lorsque la SA est activée, l'UERE est de 37 mètres. La SA crée de loin l'erreur la plus importante et son effet masque les autres erreurs de positionnement.

Sources	Code P PPS bi-fréquence 1 s (m)	Code C/A PPS mono-fréquence 1 s (m)
Segment spatial - Stabilité de l'horloge	3,0	3,0
Incertitude sur les accélérations	1,0	1,0
Autres	0,5	0,5
Segment de contrôle - Ephémérides	4,2	4,2
Autres	0,9	0,9
Segment utilisateur - Ionosphère	2,3	4,9 à 9,8
Troposphère	2,0	2,0
Récepteur	1,5	1,5
Multi-Trajet	1,2	1,2
Autres	0,5	0,5
UERE	6,6	8.0 à 11,8

Tableau II-1 Bilan des erreurs du GPS [49]

4 Le GPS différentiel (DGPS)

4.1 Principe du DGPS

Si la précision du GPS peut être considérée comme suffisante pour se situer sur une carte, il existe des cas où un guidage beaucoup plus précis est nécessaire comme la localisation de véhicules terrestres, l'aide à l'atterrissage des avions, les levés cartographiques, la trajectographie, l'aide au rendez-vous d'engins spatiaux, ... Pour ces cas particuliers, le GPS différentiel a été mis au point.

Le principe du GPS Différentiel (*DGPS, Differential GPS*) consiste à utiliser deux récepteurs, un fixe et un mobile. Le récepteur fixe sert de référence au mobile. Il est basé sur le fait que ces deux récepteurs GPS situés à proximité l'un de l'autre observent un satellite avec les mêmes erreurs. On considère en effet que la distance entre les deux récepteurs est négligeable par rapport à la distance qui les sépare des satellites. On peut donc dire que les signaux qui arrivent sur les deux appareils ont traversé les mêmes couches d'atmosphère. Le récepteur fixe est localisé sur un site dont les coordonnées sont connues avec une grande précision. Il calcule les distances qui le séparent des satellites en vue. Il soustrait à chaque distance calculée, la pseudo-distance correspondante mesurée pour obtenir une information de correction.

Les informations de correction, une par pseudo-distance, sont émises vers un second récepteur qui les applique à ses propres mesures. Comme les erreurs sont corrélées, les plus importantes sont atténuées ou disparaissent. Le gain apporté par le mode différentiel est fonction de la distance entre les deux récepteurs car la corrélation des erreurs décroît avec la distance. Cette corrélation est liée aux propriétés spatio-temporelles des erreurs. Cette technique est la plus simple et la plus utilisée.

La Figure II- 16 montre l'architecture typique d'un système GPS différentiel. Il est composé d'une station de référence (ou de base) et de l'équipement utilisateur. Il peut y avoir plusieurs équipements utilisateurs. Chaque terminal (station ou utilisateur) est équipé d'un récepteur GPS et d'un dispositif de radiocommunication.



Figure II- 16 Architecture d'un système GPS différentiel

La diffusion des informations différentielles en mode standard (SPS) est autorisée sans contrainte.

4.2 Analyse des erreurs du DGPS

Les paragraphes suivants exposent les possibilités ou non de supprimer des erreurs du système GPS en utilisant le mode différentiel.

4.2.1 L'erreur d'horloge du satellite

L'erreur d'horloge du satellite se traduisant par une erreur sur le temps d'émission est quasiment indépendante de l'angle de vue du satellite. Elle est identique pour tout récepteur observant ce satellite. Le mode différentiel permet donc de l'éliminer.

4.2.2 L'erreur d'éphémérides

L'erreur d'éphémérides sur la ligne de visée récepteur-satellite est une erreur vectorielle. Elle dépend de l'angle sous lequel le satellite est observé.

Seulement l'erreur radiale (RAD) est annulée. Les autres erreurs peuvent même être plus importantes en mode différentiel qu'en mode de positionnement absolu (un seul récepteur).

4.2.3 L'erreur due à l'ionosphère

L'ionosphère est la source d'erreur la plus importante. Cependant, la corrélation spatiale et temporelle fait que sur quelques minutes (5 minutes) et sur des distances importantes (200 km), on considère l'erreur comme invariable. Au-delà de ces valeurs, il est préférable d'utiliser un récepteur bi-fréquence (L1 et L2) [49].

4.2.4 L'erreur due à la troposphère

Il arrive que l'erreur due à la troposphère ne soit pas corrélée avec celle d'un second récepteur à quelques centaines de mètres, à cause des conditions météorologiques (front d'humidité local, ...). De même, une altitude différente ne donne pas les résultats attendus.

4.2.5 Erreurs diverses du récepteur

L'erreur d'horloge d'un récepteur n'est pas corrélée avec celle d'un autre récepteur. Elle affecte par un biais commun toutes les mesures d'un appareil et dérive dans le temps.

Les erreurs introduites par le bruit thermique, le multi-trajet sont propres à chaque récepteur.

4.3 Performance du DGPS

Dans le cas de la différence de mesures entre deux récepteurs, le bilan de l'UERE présenté dans le Tableau II-2 est effectué en code C/A et en service standard (SPS). Il est donné en mode absolu, différentiel pour un écart entre récepteurs de 10 m et 50 km. La précision en mode différentiel est encore améliorée en lissant les pseudo-distances par le Doppler intégré correspondant, ce qui élimine pratiquement le bruit thermique.

Sources	Absolu 1s (m)	Différentiel $\Delta=10\text{m}$ 1s (m)	Différentiel $\Delta=50\text{km}$ 1s (m)
Stabilité de l'horloge,...	3,6	0,0	0,0
Ephémérides et SA	36,0	0,01	0,5
Ionosphère	4,9 à 9,8	0,0	0,61
Troposphère	2,0	0,0	2,8
Récepteur (bruits)	1,5	2,1	2,1
Multi-trajet	1,2	1,2	1,2
Autres	0,5	0,7	0,7
UERE	37,0	2,5	3,8

Tableau II-2 Bilan des erreurs du DGPS

Un bilan DGPS est délicat à établir. Celui-ci est donné en supposant que tout est parfait par ailleurs. Les erreurs créées par chaque récepteur ont leur variance qui s'additionne.

On peut supposer que le récepteur de référence est fixe et que son site est correctement caractérisé ; cela permet de prendre les précautions nécessaires contre le multi-trajet.

Ce bilan n'inclut pas le retard de transmission ou les problèmes de datation entre deux récepteurs. Plus l'information de correction est ancienne, moins la technique différentielle est efficace.

Les erreurs du transfert de données d'un récepteur vers l'autre ne sont pas incluses. Il faut se souvenir qu'une liaison numérique n'a jamais un taux d'erreur nul.

Ce bilan donne une précision de position de quelques mètres (5 à 10 m) RMS à comparer avec les précisions garanties en mode absolu (100 m 2DRMS).

En combinant les mesures de Doppler intégré avec les mesures de distance, on réduit les effets de bruits. La précision peut alors atteindre le mètre.

La précision sur la vitesse est meilleure que 0.1 m/s.

« Il est possible d'utiliser une technique différentielle dans le domaine solution (*calcul de la position, dans la chapitre I*), c'est-à-dire sur la position (calculée) et la vitesse des récepteurs. Mais cela implique que les deux récepteurs observent le même jeu de satellites et avec des algorithmes de traitement identiques.

Dans le cas contraire, la différence des deux positions risque de dégrader la solution donnée en mode absolu.

De plus, il est nécessaire pour des récepteurs mobiles d'utiliser exactement le même traitement et les mêmes paramètres pour résoudre les équations de navigation.

Pour ces raisons, le DGPS dans le domaine de mesure (*Estimation distance/angle, chapitre I*) est toujours préféré.

Une station de référence équipée d'un récepteur et d'un système de radiocommunication peut diffuser les données différentielles sur un large secteur. Tout récepteur recevant ces données peut en tirer profit. La station peut aussi transmettre en temps réel des informations complémentaires comme l'intégrité des satellites » [49].

4.4 Techniques du GPS Différentiel

4.4.1 Présentation

Il existe principalement cinq techniques permettant d'appliquer les corrections différentielles.

Ce sont :

- La simple différence entre récepteurs,
- La simple différence entre satellites,
- La simple différence entre époques,
- La double différence satellites-récepteurs,
- La triple différence.

Dans un premier temps, formulons les expressions des pseudo-distances.

La distance mesurée par le code par un récepteur peut être définie comme suit :

$$p = \rho - c.(dt - dT) + d_{iono} + d_{tropo} + \varepsilon(p)$$

L'écart entre la position transmise du satellite et sa position réelle fait apparaître l'erreur d'éphémérides au moment de la résolution des équations de navigation. Ainsi la distance apparente entre le récepteur et le satellite GPS devient :

$$p = \rho + d_p - c.(dt - dT) + d_{iono} + d_{tropo} + \varepsilon(p)$$

Où :

ρ est la distance théorique (géométrique) récepteur-satellite,

d_p est l'erreur d'éphémérides,

dt est l'erreur sur l'horloge satellite après correction,

dT est l'erreur sur l'horloge récepteur,

d_{iono} est le retard ionosphérique,

d_{tropo} est le retard troposphérique,

$\varepsilon(p)$ représente les bruits divers.

Pour la distance calculée avec la phase, elle-même obtenue en intégrant le Doppler, nous avons d'une manière similaire avec les notations précédentes l'équation :

$$\phi_m = \rho + d_p + c.(dt - dT) - d_{iono} + d_{tropo} + \varepsilon(\phi) + \lambda.N$$

Où :

$\lambda.N$ avec N nombre de longueurs d'onde de la distance. N est inconnu et est appelé l'ambiguïté entière.

$\varepsilon(\phi)$ représente les bruits divers.

4.4.2 Les différentes techniques différentielles

La simple différence entre récepteurs

Cette technique réduit les erreurs d'orbite et ionosphérique obtenues sur les mesures d'un satellite. Le biais d'horloge satellite (dt) disparaît.

Cette technique est utilisée dans les applications temps réel et c'est de loin la technique la plus employée. Les corrections différentielles sont soit transmises au récepteur mobile, s'il en a l'utilité pour sa localisation, soit traitées au niveau du récepteur de référence (station centrale). Une application typique de cette technique est la gestion de flotte.

La simple différence entre satellites

Cette technique élimine les erreurs introduites par l'horloge du récepteur. Elle réduit les erreurs atmosphériques et les erreurs d'orbite communes à tous les satellites car causées par le segment de contrôle.

La simple différence entre époques

Cette technique atténue les erreurs d'orbite et atmosphériques. L'ambiguïté de phase est éliminée sous condition que le signal reste verrouillé en phase entre les deux instants.

La précision de mesure dépend de la déformation de la constellation spatiale entre les deux instants de mesure : plus celle-ci aura changée, plus les mesures seront précises. Cette technique est réservée à la localisation de récepteur fixe ou très peu dynamique.

La double différence satellites-récepteurs

Cette technique atténue les erreurs d'orbite et atmosphériques et élimine l'erreur d'horloge des satellites et des deux récepteurs. Il existe également la double différence récepteurs-époques.

La triple différence

Cette technique réduit les erreurs d'orbite et atmosphériques et élimine les erreurs d'horloge des satellites et des récepteurs. Les problèmes d'ambiguïté entière disparaissent.

Cette technique demande un traitement sophistiqué qui ne peut pas être réalisé dans un récepteur en temps réel. Elle est réservée au traitement en temps différé. La précision apportée est particulièrement intéressante pour la géodésie. Des précisions centimétriques ont été obtenues pour une ligne de base (distance entre deux points de mesure) de 30 km.

5 Systèmes d'augmentation de la précision par satellites

Les systèmes d'augmentation de la précision du positionnement par satellites (*SBAS, Satellite-Based Augmentation Systems*) sont basés sur l'utilisation du GPS en mode différentiel. Ils comportent, d'une part, des stations-relais et d'observations implantées sur des positions connues à travers le monde, et, d'autre part, des satellites géostationnaires en orbites fixes autour de la Terre. A partir de ces données de distance connues, et afin d'améliorer la précision des récepteurs dans des régions données, les SBAS corrigent les signaux des satellites GPS comportant des erreurs liées au retard atmosphérique, à l'inexactitude du positionnement des satellites et à leur mauvaise géométrie dues à leur alignement et leur trop grande proximité. Les corrections sont transmises par les satellites géostationnaires sur la même fréquence que celle des satellites GPS (la fréquence L1).

Les SBAS jouent un rôle déterminant dans le domaine des transports aériens et dans d'autres applications où la précision et la fiabilité des mesures sont essentielles.

En outre, les récepteurs qui peuvent fonctionner avec les SBAS sont compatibles entre eux, puisqu'ils utilisent les mêmes fréquences de signal que le positionnement par satellites et il n'y a aucun frais d'installation ou d'abonnement.

Quatre systèmes d'augmentation de la précision sont développés : en Amérique du Nord (WAAS), en Europe (EGNOS) et en Asie (MSAS au Japon et GAGAN en Inde).

5.1 WAAS

En Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada), le système WAAS (*Wide Area Augmentation System*), a été développé principalement pour les besoins de l'aviation civile et il est opérationnel depuis 2003. Il s'appuie sur un réseau de 25 stations au sol et deux satellites géostationnaires (l'un au-dessus du Pacifique est l'autre au-dessus de l'Atlantique Ouest).

La précision du système WAAS est typiquement de 1-2 m [9]. La Figure II- 17 illustre le principe du système WAAS et plus généralement des systèmes SBAS.

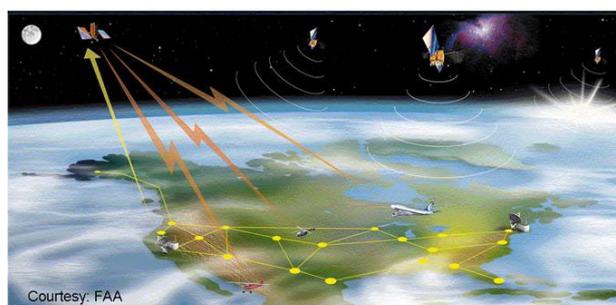


Figure II- 17 Principe d'augmentation de la précision par satellites – WAAS

La Figure II- 18 compare les précisions du système GPS avec SA, sans SA et avec correction WAAS.

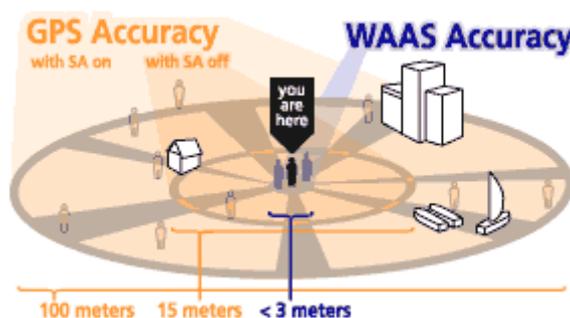


Figure II- 18 Précision GPS avec la correction WAAS

5.2 EGNOS

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) fournit en Europe des corrections et une validation des mesures de positionnement par satellites, portant la précision des récepteurs compatibles EGNOS à un niveau au moins trois fois plus élevé que celui des récepteurs standards. La précision d'EGNOS est de cinq mètres ou moins. EGNOS compte trois satellites géostationnaires et une quarantaine de stations au sol.

EGNOS peut être considéré comme la première étape du projet GALILEO, le prochain système de navigation par satellite européen. Ce dernier sera sous contrôle civil contrairement au GPS ou GLONASS qui sont à l'origine militaires.

Le système EGNOS a été testé lors du Tours de France 2005 durant l'étape de MONTARGIS le 6 juillet 2005 et a permis de localiser les cyclistes avec une précision de un à deux mètres¹⁶.

5.3 MSAS

MSAS (*Multifunctional Transport Satellite-based Augmentation System*) fournit en Asie des corrections et une validation des mesures de positionnement par satellites, portant la précision des récepteurs compatibles avec les SBAS à un niveau au moins trois fois plus élevé que celui des récepteurs GPS standards. Des stations-relais MSAS sont implantées sur des positions connues à travers l'Asie. MSAS utilise deux satellites géostationnaires lancés en février 2005 et février 2006. Le système est opérationnel depuis le 27 septembre 2007. MSAS permet d'accroître la sécurité et la capacité des transports aériens dans les régions d'Asie bordant le Pacifique.

5.4 GAGAN

Le projet pour d'implanter la technique SBAS au-dessus de l'Inde a été lancé par « Indian Space Research Organization (ISRO) » et « Airport Authority of India (AAI) ». Comme les autres systèmes SBAS qui sont développés notamment pour répondre aux besoins de l'aviation civile, d'autres usagers peuvent en bénéficier sans frais.

¹⁶ http://www.esa.int/esaCP/SEMOJ96DIAE_France_0.html

Le système GAGAN (*GPS Aided Geo (Geostationary Earth Orbit) Augmented Navigation*) utilise 15 stations de base dont une station de contrôle principale et une station de chargement. Il utilise un seul satellite géostationnaire (GSAT -4), et permet d'avoir une précision de 1.5 à 2.5 m [9].

6 Modernisation du système GPS

En janvier 1999, le gouvernement des États-Unis a entrepris une initiative de modernisation du système GPS. Elle consiste notamment à rajouter deux signaux civils (L2C et L5) et un signal militaire (M).

Le signal militaire est rajouté aux signaux déjà diffusés sur les deux fréquences L1 et L2. Il a comme caractéristiques la séparation spectrale et la puissance de signal augmentée, de façon à améliorer la capacité de protection, de prévention et de préservation du système GPS.

Le signal civil L2C est rajouté à la fréquence L2 qui était réservée que pour les militaires.

Le signal civil L5 est diffusé sur la fréquence 1 176.45 MHz. Cette fréquence est dans la bande de fréquence réservée à la navigation aéronautique (*ARNS, Aeronautical RadioNavigation Service*).

Ces deux nouveaux signaux permettent d'améliorer la précision, la disponibilité et la redondance du signal.

Les avantages civils incluraient une seconde fréquence civile pour la correction ionosphérique et la redondance, un troisième signal, plus robuste, pour les applications de secours et de sauvetage "safety-of-life" dans un spectre protégé, et qui fournirait également une haute précision et des avantages pour les applications temps-réel. Parmi ces améliorations, nous citons notamment le rajout d'une fréquence civile L5 (1176.45 MHz), un ajout d'un signal civil sur la porteuse L2 (augmentation de la puissance des signaux, augmentation du nombre de stations de surveillance au sol et le nombre de téléchargements des éphémérides et de l'almanach).

Le premier satellite (GPS 2R-M-1) diffusant le signal militaire (M) et le signal civil L2C est lancé le 26/09/2005.

A partir du 10 avril à 11h58 (UTC) [35], le satellite GPS SVN49 (GPS 2R-M-7) a commencé de transmettre le troisième signal civil (de démonstration) sur la fréquence L5. Ce signal permettra aux usagers civils de bénéficier de la correction ionosphérique et par conséquent d'une nette amélioration de la précision du GPS.

Un programme appelé GPS III, vise à moderniser le système GPS pour répondre aux besoins des utilisateurs militaires et civils en 2030. Ce système inclut une nouvelle génération de satellites (bloc III) qui ont plus de fonctionnalités. Il est prévu que le système fournira une précision submétrique [39].

7 Les autres systèmes de localisation par satellites

Vu l'importance grandissante des systèmes de positionnement par satellites, plusieurs systèmes (en plus du GPS) existent, ou sont en cours de développement, parmi lesquels on trouve le système

russe GLONASS, le futur système européen GALILEO et le système régional chinois BEIDOU (COMPASS).

7.1 GLONASS

Comme le système GPS, le système de navigation russe GLONASS (*GL*Obal *NA*avigation *S*atellite *S*ystem) géré par le Ministère de Défense de la Fédération de Russie permet également la navigation toute condition météorologique à toute heure et en tout lieu, ce qui le rend utile pour des applications aéronautiques, maritimes et terrestres.

La constellation de base comporte 24 satellites évoluant sur 3 plans orbitaux à une altitude de 19 100 kilomètres ce qui entraîne une période de 11 heures 15 minutes. L'inclinaison des plans orbitaux par rapport au plan de l'équateur est de 64,8 degrés.

Le lancement des satellites GLONASS a débuté en 1982 et le système a été déclaré, par les autorités russes, complètement opérationnel en 1993.

En mars 1995, le système a été déclaré ouvert pour les utilisateurs civils sur le long terme [9].

Les difficultés financières et la faible durée de vie des satellites (2 à 3 ans au lieu des 7 ans prévus) ont ensuite entraîné une lente dégradation de la constellation¹⁷. En 2002, la constellation ne comportait que 7 satellites. Actuellement (juillet 2009), elle contient 20 satellites dont 18 opérationnels. La reconstitution complète de la constellation devrait intervenir en 2012/2013 [9].



Figure II- 19 La constellation GLONASS

GPS et GLONASS ont le même nombre de satellites et des orbites similaires. Ces deux systèmes ont été développés en parallèle et ont de nombreuses caractéristiques communes. La différence porte sur des détails techniques transparents pour l'utilisateur.

Ainsi, contrairement au système GPS, l'accès à un satellite GLONASS est réalisé par la sélection de sa fréquence d'émission. En effet, tous les codes émis sont identiques, un seul code est utilisé par tous les satellites. Par contre, chaque satellite a sa propre fréquence d'émission.

¹⁷<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:20:14637162736231801312::NO::>

Chaque satellite GLONASS utilise deux porteuses en bande L. Les fréquences L1 sont comprises entre 1602,5625 MHz et 1615,50 MHz par pas de 0,5625 MHz. Les fréquences L2 s'étalent de 1246,4375 MHz à 1256,50 MHz par pas de 0,4375 MHz. Chaque porteuse est modulée en phase par un signal de 5,11 MHz. En plus la porteuse L1 est modulée par un signal à 0,511 MHz (utilisation de la technique FDMA, *Frequency Division, Multiple Access*).

Le débit du message de navigation GLONASS est de 50 bits par seconde et chaque bit est codé en bi-phase. Ainsi la structure des signaux GLONASS est proche de celle des signaux GPS. Le signal code P n'est pas crypté.

Le message de navigation GPS contient les éphémérides (paramètres de Kepler de l'orbite) des satellites tandis que le message de navigation GLONASS dispose de la position du satellite dans un repère ECEF (*Earth Centred Earth Fixed*).

L'almanach est constitué de 5 trames dont chaque trame est reçue en trente secondes ce qui implique que l'almanach est reçu dans 2,5 minutes au lieu de 12,5 minutes pour le GPS.

Deux autres aspects différencient également le système GLONASS du système GPS ; ce sont les systèmes de coordonnées et les référentiels de temps.

Le système GPS utilise le référentiel géodésique WGS-84, GLONASS, quant à lui, utilise depuis septembre 2007 le PZ-90.2 (*Parametri Zemli 1990* ou la traduction anglaise *Parameters of the Earth*). Les différences entre les deux systèmes peuvent créer des erreurs de navigation en les joignant.

Le temps GPS est référencé au temps UTC–USNO (*U.S. Naval Observatory*) tandis que le temps GLONASS est lié au temps UTC–SU (*Soviet Union, actuellement la Russie*). La différence entre ces temps doit être prise en compte dans un récepteur exploitant les deux systèmes.

Le système GLONASS est aussi précis que le système GPS en mode PPS (SA désactivée).

Actuellement le système GLONASS n'est pas compatible avec le système GPS. Par contre, il devrait l'être avec le système européen GALILEO.

7.2 GALILEO

Après une longue période d'incertitude, le programme GALILEO est en train de voir le jour. Il est mené conjointement par l'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA, *European Space Agency*). Son but est de doter l'Europe d'une alternative civile fiable au système de positionnement militaire américain, le GPS. De conception plus récente, GALILEO sera un peu plus perfectionné que le GPS, délivrant par exemple un message d'intégrité de l'information fournie.

GALILEO ne sera pas fondamentalement différent du GPS. Il utilisera une constellation de 30 satellites, disposés sur trois plans inclinés à 56° par rapport à l'équateur et gravitant à 23 500 km d'altitude. Chaque rotation durera 14 heures environ. La constellation sera gérée par un réseau mondial de stations terrestres. Les satellites émettront sur plusieurs fréquences allant de 1164 à 1591 MHz, y compris certaines fréquences utilisées par le système GPS, comme la fréquence L1. La

puissance d'émission sera de 50 Watts environ. Certains des signaux émis seront réservés aux services commerciaux et aux services publics.

Parmi les services proposés par GALILEO, il y aura un "service ouvert" gratuit à l'usage du grand public. Ce service permettra un positionnement plus précis que celui proposé actuellement par le GPS, sans fournir toutefois de message d'intégrité. Dans le cadre de ce service ouvert, deux types de récepteurs devraient voir le jour : des appareils mono-fréquence économiques et des appareils hybrides plus précis combinant la réception des signaux GALILEO et GPS. Le programme EGNOS sera intégré au service GALILEO, ce qui devrait permettre d'accroître les performances de ce dernier. La précision annoncée du service grand public de GALILEO est de "quelques mètres".

Le calendrier prévisionnel du programme GALILEO passe par une phase de développement et de validation qui s'étendra jusqu'en 2005 (c'était les prévisions) avec le lancement de deux à quatre satellites et la mise en place d'une infrastructure terrestre minimale (deux satellites GIOVE-A (*Galileo In-Orbit Validation Element*) et GIOVE-B ont été lancés respectivement en 28/12/2005 et 26/04/2008. Le premier satellite est construit en Grande Bretagne et le deuxième en France). Ensuite viendra la phase de déploiement qui devrait être assez rapide (deux ans) car il est prévu de mettre en orbite jusqu'à huit satellites à chaque lancement.

GALILEO devrait être opérationnel en 2012 [9] pour un coût de 3.2 milliards d'euros environ l'équivalent de 150 km d'autoroutes.

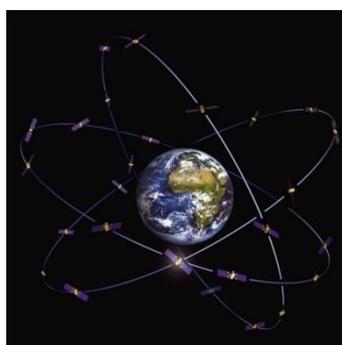


Figure II- 20 La constellation GALILEO

7.2.1 Les services offerts par le système GALILEO

Le système GALILEO offre plusieurs services, certains sont gratuits, d'autres sont payants.

Le service ouvert de GALILEO (OS, *Open Service*) est pour des applications de marché grand-public. Il fournira des signaux pour la synchronisation et le positionnement, gratuitement. Il sera accessible à n'importe quel utilisateur équipé d'un récepteur GALILEO et cela sans frais d'utilisation. Il permettra à des utilisateurs avec petits récepteurs peu coûteux de déterminer leur position avec une précision de quelques mètres. Il est prévu que la plupart des récepteurs utiliseront les signaux de GALILEO et de GPS afin d'augmenter les performances notamment en milieu urbain.

Le service de secours et de sauvetage (SoL, *Safety-of-Life Service*) sera employé pour la plupart des applications de transport où les vies pourraient être mises en danger si les performances du

Le système de navigation sont dégradées sans notification (préavis) en temps réel. Ce service fournira la même précision en positionnement et la synchronisation que le service ouvert. La différence principale est le niveau élevé du maintien de l'intégrité du système qui est essentiel pour des applications critiques (maritimes, de l'aviation et du transport ferroviaire) où la précision garantie est essentielle. Ce service mondial augmentera la sûreté, particulièrement là où il n'y a aucune infrastructure au sol assurant le service de sûreté. Ce service sera certifié et ses performances seront obtenues en utilisant des récepteurs à double fréquence.

Le service commercial (CS, *Commercial Service*) vise le marché des applications exigeant des performances élevées meilleures que celles offertes par le service ouvert. Il fournira des services à valeurs ajoutées via des abonnements. Le CS est basé sur l'ajout de deux signaux aux signaux à accès ouvert. Ces signaux seront protégés par cryptage commercial, qui sera contrôlé par les fournisseurs de service et la compagnie de gestion du système GALILEO. L'accès sera contrôlé au niveau du récepteur, en utilisant des clés d'accès (de protection).

Les services à valeur ajoutée typiques incluent la diffusion de données, garantie de service ; un service de synchronisation plus précis ; la fourniture des modèles de correction des retards de l'ionosphère ainsi que les signaux différentiels d'augmentation de la précision localement afin d'avoir un positionnement avec une extrême précision.

Le Service à accès réglementé (PRS, *Public Regulated Service*) : GALILEO est un système civil qui inclut un service robuste et un accès réglementé pour les applications gouvernementales. Le service à accès réglementé (PRS) sera utilisé par les services comme la police, la gendarmerie, Les institutions civiles contrôleront l'accès au service de clé de cryptage de PRS par région ou par groupe d'utilisateurs suivant les règles de la politique de sécurité applicable en Europe.

Le service PRS doit être opérationnel à tout moment et dans toutes les circonstances, notamment pendant des périodes de crise. Un aspect important de PRS est la robustesse de son signal, qui le protégera contre le blocage et le leurre.

Le Tableau II-3 résume les performances prévisionnelles des différents services offerts avec le système GALILEO :

	Service Ouvert (OS)	Service commercial (SC)		Service Publique réglementé (PRS)		Service de secours (SoL)
Couverture	Globale	Globale	Locale	Globale	Locale	Globale
Précision - horizontale (h) - verticale (v)	h = 4 m v = 8 m (bi-fréquence) h = 15 m v = 35 m (mono-fréquence)	< 1 m (bi-fréquence)	< 10 cm (Signaux augmentés localement)	h = 6.5 m v = 12 m	1 m (Signaux augmentés localement)	4 – 6 m (bi-fréquence)
Disponibilité	99.8%	99.8%		99 – 99.9%		99.8%
Intégrité	Non	Service à valeur ajoutée		Oui		Oui

Tableau II-3 Performances prévues des différents services de GALILEO [41][45]

On peut rappeler que le GIOVE-A a été réalisé par la société Surrey Satellite Technology en Grande Bretagne (GB) et le GIOVE-B a été construit par Galileo Industries, consortium européen comprenant Alcatel Alenia Space (France - Italie), Astrium GmbH (D), Astrium Ltd (GB) et Galileo Sistemas y Servicios (E).

Le lancement de ces deux premiers satellites visent notamment à réserver les fréquences allouées au système GALILIEO et d'effectuer tous les tests nécessaires pour le développement des satellites pour la phase opérationnelle du système.

La Figure II- 21 offre une vue d'artiste du satellite GIOVE-A, le premier satellite de la phase de validation du système Galileo :



Figure II- 21 Un satellite GALILEO (GIOVE-A, vue d'artiste)

7.3 BEIDOU (BEIDOU -2, COMPASS)

BEIDOU est un projet de système de navigation régional entrepris par la République Populaire de Chine. BEIDOU est le nom chinois de la constellation d'étoile "URSA MAJOR" (grand ours).

Au départ, le système est constitué de 5 satellites géostationnaires (le dernier lancé en avril 2009).

Comme les satellites lancés jusque là sont géostationnaires, le système n'a qu'une couverture régionale. Pour avoir une couverture mondiale, la Chine est associée au projet européen du système GALILEO (signature d'un accord politique en septembre 2003).

Actuellement, la Chine développe son propre système de navigation mondiale semblable au GPS, avec une constellation de 35 satellites : 5 satellites dans des orbites géostationnaires (GEO,

Geostationary Earth Orbit) et 30 satellites dans 5 orbites moyens (*MEO, Medium Earth Orbit*). Le système aura ainsi une couverture mondiale.

Deux services sont prévus, un service ouvert et un service réservé aux militaires. La précision prévue pour le système ouvert est de 10 m. Le service militaire, sera plus précis et peut être utilisé pour la communication. Il fournit également l'état du système aux utilisateurs.

Six satellites sont déjà lancés. 5 sont en service : 3 géostationnaires et 2 (lancés en avril 2007 et avril 2009) dans une orbite inclinée de 55° et une altitude de 21 500 km.

Le principe du positionnement du système BEIDOU (avec les satellites géostationnaires) est différent de celui du GPS, GLONASS et du futur GALILEO. En effet, la procédure de positionnement est comme suit :

- L'appareil utilisateur envoie un signal aux satellites géostationnaires,
- Chaque satellites recevant le signal utilisateur, enregistre son heure arrivée et transmet cette information vers une station au sol.
- La station au sol calcule la position de l'utilisateur et transmet l'information vers les satellites.
- Les satellites communiquent, enfin la position à l'utilisateur.

8 La transformation des coordonnées WGS-84 vers Lambert II

Cette partie est consacrée au changement de système géodésique. Cette opération est nécessaire pour projeter les coordonnées GPS définies dans le référentiel WGS-84 sur une carte de la France (Projection Lambert II pour le centre de la France).

8.1 Définition

Le changement de système géodésique est défini comme la transformation qui permet d'exprimer les coordonnées cartésiennes, géographique ou planes d'un point dans un autre système géodésique.

8.2 Géométrie de l'ellipsoïde

La Figure II- 8 montre le référentiel ECEF indépendamment des référentiels géodésiques existants : Entre autres le WGS-84 (utilisé par le système GPS) et NTF (Nouvelle Triangulation de la France).

Les deux ellipsoïdes associés aux WGS-84 et NTF sont définies comme suit :

	WGS-84	NTF
Demi-grand axe (m)	6 378 137.0	6 378 249.2
Demi-petit axe(m)	6 356 752.314	6 356 515.0

Ces paramètres peuvent être définis aussi avec l'aplatissement (f) ou l'excentricité (e) définis par les deux formules suivantes : $f = \frac{a-b}{a}$ et $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$ avec a et b sont les demi-grand axe et demi-petit axe respectivement. On peut en déduire que $f = 1 - \sqrt{1 - e^2}$.

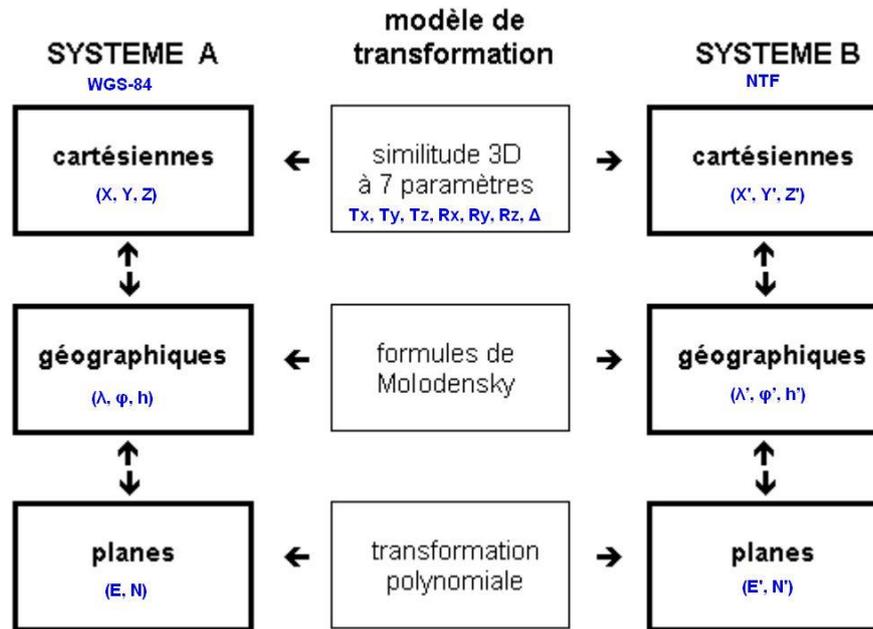


Figure II- 22 Processus de changement de système géodésique [47]

8.3 Transformation des coordonnées géographiques vers cartésiennes

Les coordonnées cartésiennes géocentriques (X, Y, Z) sont obtenues à partir des coordonnées géographiques (λ, φ, h) en utilisant les formules mathématiques suivantes :

$$X = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$Y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$Z = (N(1 - e^2) + h) \sin \varphi$$

$$\text{Avec } N = \frac{a}{w} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

8.4 Paramètres de la similitude entre WGS-84 et NTF

Pour obtenir les coordonnées cartésiennes définies dans le référentiel NTF il suffit de faire la translation suivante :

$$X' = X + 168$$

$$Y' = Y + 60$$

$$Z' = Z - 320$$

Les paramètres de rotations Rx, Ry, Rz et le facteur d'échelle (homothétie) sont nuls.

8.5 Transformation des coordonnées cartésiennes vers géographiques

Les entrées : X, Y, Z

Les sorties : λ , φ , h (Longitude, latitude, hauteur)

La longitude est obtenue directement avec la formule suivante :

$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$$

Cependant, l'obtention de la latitude nécessite un calcul itératif.

Avant de commencer il faut calculer la latitude isométrique (L) associée à la latitude φ :

$$L = \ln \left(\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \left(\frac{1 - e \cdot \sin \varphi}{1 + e \cdot \sin \varphi} \right)^{\frac{e}{2}} \right)$$

L'algorithme pour obtenir φ est le suivant :

$$\varphi_0 = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

1- $i = 0$

2- $i = i + 1$

3- $\varphi_i = 2 \cdot \arctan \left(\left(\frac{1 + e \cdot \sin \varphi_{i-1}}{1 - e \cdot \sin \varphi_{i-1}} \right)^{\frac{e}{2}} \cdot \exp(L) \right) - \frac{\pi}{2}$

4- Si $|\varphi_i - \varphi_{i-1}| > \varepsilon$ aller à 3 (tolérance de convergence)

5- $\varphi = \varphi_i$

La hauteur est définie par la formule suivante :

$$h = \left[\sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \cos \varphi \right] + [Z \cdot \sin \varphi] - \left[a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \right]$$

8.6 Transformation des coordonnées géographiques vers planes

Cette transformation dépend de formules spécifiques à chaque projection [47] (du pays). Ci-dessous le processus qui permet de transformer les coordonnées géographiques définies dans le référentiel NTF vers les coordonnées planes Lambert II pour le centre la France.

Pour calculer les coordonnées planes (E, N) dans un système de projection, on a besoins d'un ensemble de paramètres spécifiques à chaque projection.

Soient n, C, X_S , Y_S les constantes de la projection.

λ_0 est la longitude du méridien central qui n'est que le méridien de Paris (2° 20' 14,025" E Greenwich) pour notre projection.

e est l'excentricité de l'ellipsoïde (= 0.082 483 256 76).

λ et φ sont la longitude et la latitude.

Les paramètres de projection Lambert pour toute la France sont donnés dans le Tableau II-4.

	LAMBERT I	LAMBERT II	LAMBERT III	LAMBERT IV	LAMBERT 93
n	0,7604059656	0,7289686274	0,6959127966	0,6712679322	0,7256077650
C	11603796,98	11745793,39	11947992,52	12136281,99	11754255,426
X_S	600000,000	600000,000	600000,000	234,358	700000,000
Y_S	5657616,674	6199695,768	6791905,085	7239161,542	12655612,050

Tableau II-4 Constantes de la projection Lambert pour la France [47]

Les coordonnées (E, N) sont calculées en utilisant les formules ci-dessous [47][48] :

$$\xi = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - \frac{e}{2} \ln \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi}$$

$$R = C \exp(-n \xi)$$

$$\gamma = n (\lambda - \lambda_0)$$

$$X = X_S + R \sin \gamma$$

$$Y = Y_S - R \cos \gamma$$

La Figure II- 23 montre les zones pour lesquelles les paramètres du Tableau II-4 sont applicables.

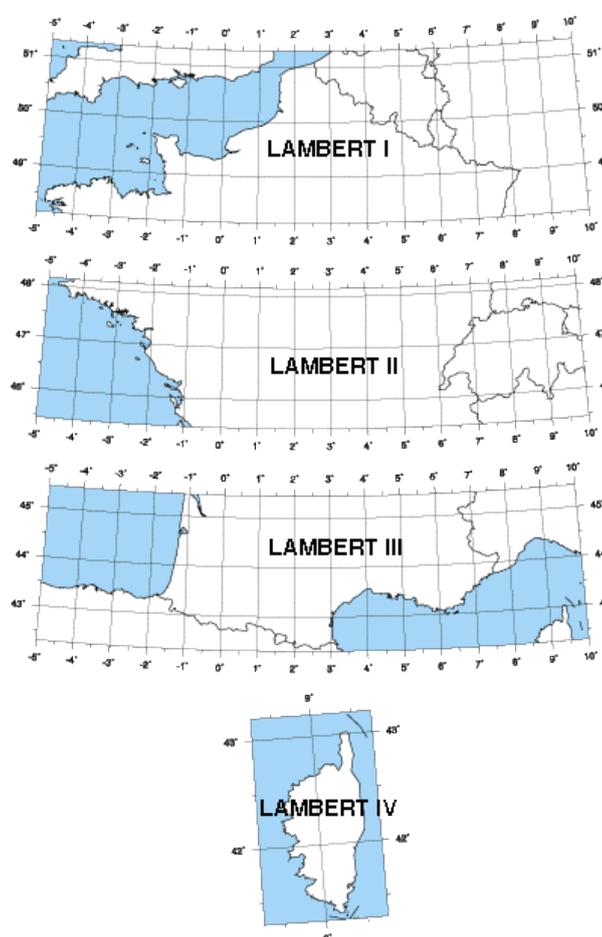


Figure II- 23 Zones de projection Lambert

La ville de Clermont-Ferrand se trouve dans la zone II, pour cela les paramètres de cette zone ont été utilisés pour la projection sur une carte.

Un logiciel de l'IGN (Institut Géographique National) qui s'appelle CIRCE2000¹⁸, permet d'effectuer les différentes transformations. Cependant, il n'est pas possible de l'intégrer dans d'autres programmes. Pour cette raison, on a développé notre programme qui réalise ces différentes transformations.

9 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter les principes de base des systèmes de navigation par satellites (notamment le système GPS), sans lesquels le but de la thèse ne soit pas clairement identifié. En effet, le but de la thèse est de réaliser une solution différentielle du GPS, en utilisant un réseau de capteurs sans fil équipés de récepteurs GPS civil à faible coût. Cette solution vise à réduire les erreurs du GPS et par conséquent améliorer sa précision. Les capteurs coopèrent pour réaliser la correction différentielle. Cette solution a l'avantage d'être tolérante aux pannes. En cas de défaillance d'un capteur, les autres continuent à délivrer leurs corrections.

D'autres solutions pour améliorer la précision du GPS existent. Elles visent à combiner le GPS avec une centrale d'inertie (*Inertial Navigation System*) ou d'utiliser des satellites provenant de systèmes différents comme l'utilisation des satellites GPS et GLONASS ensemble [40]. D'autres travaux combinent l'utilisation du GPS avec la technologie UWB pour avoir une localisation à l'extérieur ainsi qu'à l'intérieur [46].

La multiplication des systèmes de positionnement par satellites et donc le nombre de satellites et l'amélioration de la compatibilité (des signaux) entre eux permet d'avoir plus de satellites utilisables pour la localisation et donc une amélioration de la configuration des satellites visibles par un récepteur et ainsi augmenter la précision.

La disponibilité des systèmes d'augmentation de la précision par satellite permet d'avoir une meilleure précision, mais une correction plus localisée est toujours plus efficace.

¹⁸ Téléchargeable de <http://professionnels.ign.fr/14/la-gamme/ficheProduitCMS.do?idDoc=5352513>

III LCD-GPS (LOW-COST DIFFERENTIAL GPS)

1 Introduction

Le but de notre travail de thèse est d'explorer une solution différentielle du GPS visant à améliorer sa précision. Cette solution est basée sur l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil équipés de récepteurs GPS civils standard à faible coût. Ce chapitre présente les principes de notre technique appelée LCD-GPS (Low-Cost Differential GPS, Local Cooperatif DGPS). Il expose le principe de la méthode, les étapes de sa mise en œuvre, les expérimentations menées pour valider chaque étape et les résultats obtenus.

Comme la solution est basée sur l'utilisation du GPS, elle hérite de ses avantages et inconvénients.

Les avantages de l'utilisation du GPS sont les suivants :

- la disponibilité des informations position, vitesse et heure.
- la globalité de l'application de la méthode (utilisable partout dans le monde).

Les inconvénients de l'utilisation du GPS sont les suivants :

- la limitation à une utilisation extérieure : il n'est pas possible d'utiliser cette solution (plateforme matérielle et logicielle) pour une application intérieure.
- la consommation d'énergie : le récepteur GPS fonctionne en continu, ce qui implique une consommation d'énergie en continue. Il est à noter que la consommation énergétique est une contrainte forte dans le réseau de capteurs sans fil.

Même si la solution proposée est basée sur l'utilisation du GPS (car disponible pour notre plateforme d'expérimentation), elle reste valable pour les autres systèmes de positionnement par satellites comme GLONASS ou GALILEO. En effet, elle utilise une correction dans le domaine solution (Sous-système : calcul de la position) et non pas dans le domaine de mesure (sous-système : estimation distance/angle). Elle peut être donc considérée comme indépendante du système de localisation et du récepteur (matériel) utilisés.

Les données présentées sont enregistrées et puis traitées en différé (offline). Les programmes développés sont en C/C++ ou sous MATLAB.

Dans ce chapitre, les mots capteur et LiveNode sont utilisés indifféremment.

2 Principe du LCD-GPS

Le schéma de la Figure III- 1, illustre le principe de la solution GPS originale que nous avons explorée. Elle vise à réaliser un système de positionnement GPS différentiel (distribué) de précision en utilisant un RCSF. Chaque nœud du réseau est équipé d'un récepteur GPS à faible coût. L'intérêt de cette solution est d'avoir un système qui délivre une bonne correction DGPS et qui soit peu coûteux et robuste.

Le principe général de la solution, comme l'illustre la Figure III- 1, est le suivant :

- Plusieurs capteurs fixes sont utilisés comme des stations de base (stations de référence). Ces stations de base sont positionnées aux points $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2) \dots P_n(x_n, y_n, z_n)$. Les coordonnées de ces points sont connues avec une grande précision.
- Les stations de base reçoivent à chaque instant (seconde) une nouvelle position GPS (bien qu'elles soient fixes).
- Elles calculent, l'écart (dx, dy et dz) en X, Y et Z entre la position réelle (déjà connue) et les nouvelles coordonnées délivrées par le GPS.
- Ces écarts sont diffusés par un médium d'accès sans fil.
- Tout autre capteur peut appliquer ces écarts à sa position instantanée délivrée par son GPS afin de corriger sa position. La précision du positionnement se trouve ainsi améliorée.

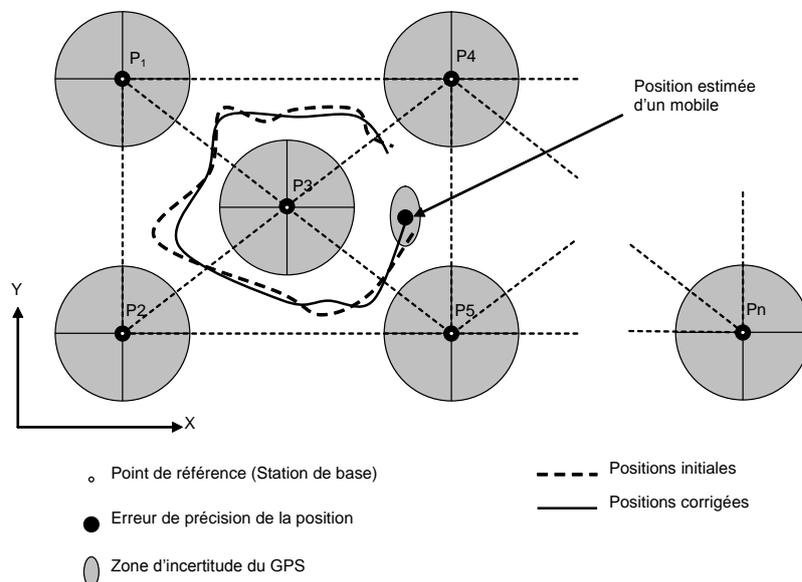


Figure III- 1 Principe du LCD-GPS

3 Analyse de la solution

- 1- La portée du dispositif de communication sans fil de chaque capteur (ou station de base) est d'une centaine de mètres (portée du Wi-Fi ou du ZigBee standard) ; cela implique que la distance entre capteurs sera d'une centaine de mètres. Cette distance est intéressante car elle est plus grande que l'imprécision du GPS (de l'ordre de 100 m en 2D selon les spécifications avec la SA [32]).
- 2- Les erreurs ionosphériques sont corrélées jusqu'à une distance de 200 km.
- 3- La corrélation temporelle des erreurs ionosphériques varie entre 1 et 4 heures ; 2 heures est la moyenne.
- 4- La corrélation spatiale de l'erreur troposphérique est de quelques kilomètres, car parfois un léger déplacement peut causer un changement radical de l'erreur. L'erreur troposphérique

est dépendante de l'humidité et elle est dépendante des conditions météorologiques et de l'environnement. Nous espérons que l'application de la correction différentielle permettra d'éliminer les deux erreurs ionosphériques et troposphériques.

- 5- L'analyse des erreurs de positionnement basée sur un réseau de récepteurs GPS, permettra d'isoler l'erreur liée au multi-trajet et par conséquent de la corriger.
- 6- Il y a de plus en plus de satellite (notamment avec l'arrivée de GALILIEO qui est compatible avec le GPS) et leur fiabilité est augmentée.
- 7- Le prix des récepteurs GPS diminue et leurs performances s'améliorent : le nombre de canaux est en augmentation (12, 16 et même 20 canaux), les possibilités de rechercher, capter et de suivre le signal d'un satellite, les algorithmes de traitement de signal sont plus performants.

Pour toutes ces raisons, nous espérons d'améliorer la précision du GPS pour atteindre une précision inférieure au mètre dans un premier temps et de l'améliorer par la suite pour atteindre une précision décimétrique. Un tel système permet d'augmenter significativement la robustesse de la localisation par rapport au système mono-récepteur.

Correction et fonction de transfert

Notre but est de considérer la correction différentielle comme une sortie d'un système linéaire qui prend en entrée les positions instantanées délivrées par un capteur GPS et qui donne en sortie les valeurs des corrections instantanées. Le système de fonctionnement d'une station de base est considéré alors comme une boîte noire avec les positions instantanées en entrée et les corrections différentielles en sortie.

Pour un autre capteur (fixe ou mobile), le système accepte les sorties des différentes stations de base et applique une fonction (f) lui permettant de déduire les positions corrigées.

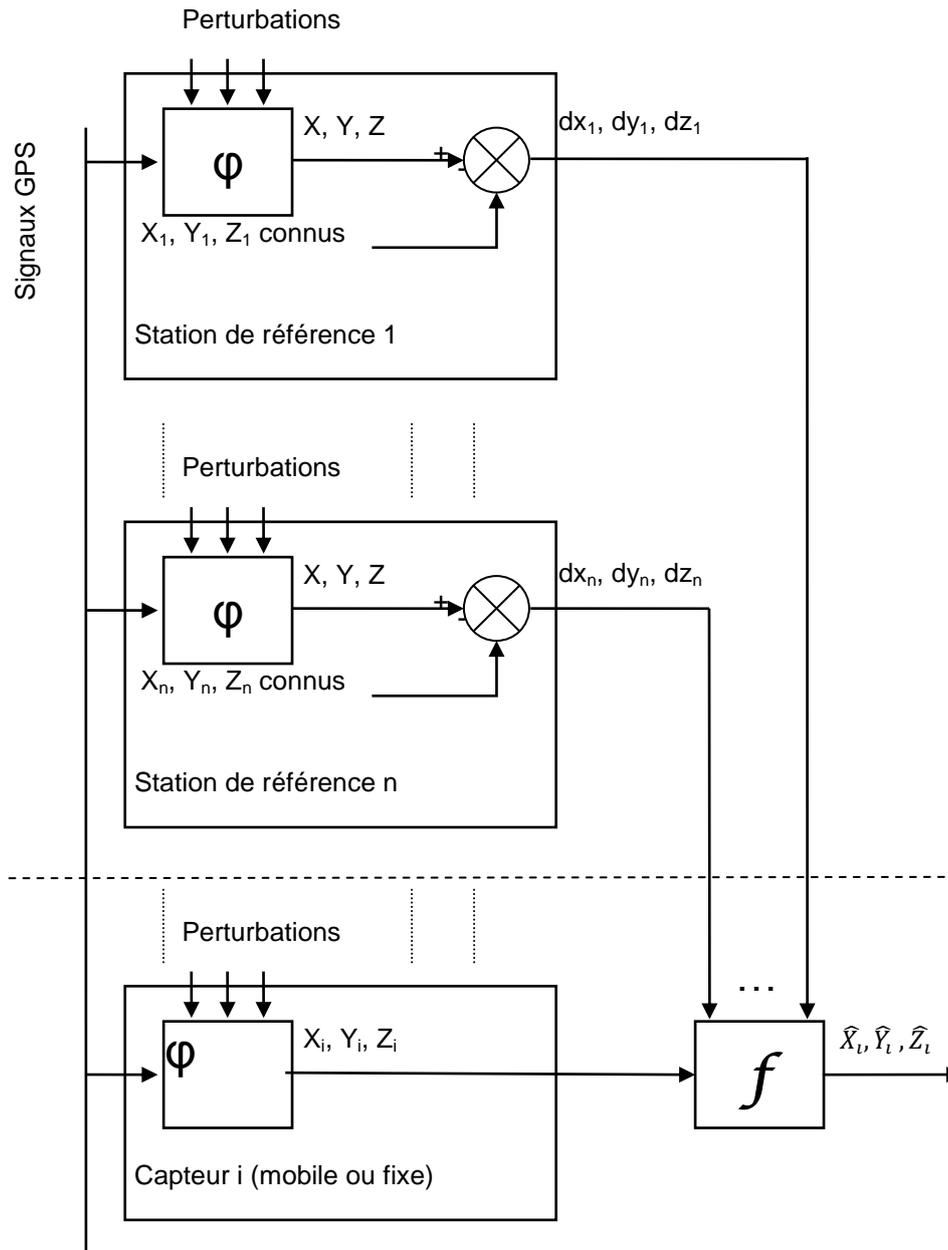


Figure III- 2 Schéma de principe de la correction différentielle

4 Caractérisation des positions d'un point

Les données issues d'un récepteur GPS sont dispersées aléatoirement autour de son antenne. La Figure III- 3 illustre un relevé des coordonnées (positions) instantanées d'un point se trouvant sur le toit du bâtiment B de l'ISIMA (Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation et de leurs Applications, dans laquelle se trouve notre laboratoire de recherche). Le récepteur GPS a été posé pendant plus de 7 heures (le 24/07/2008 entre 10:44:17 et 18:08:14). Les informations GPS (positions, heure, satellites, ...) sont enregistrées avec une fréquence de 1 Hz (une position par seconde).

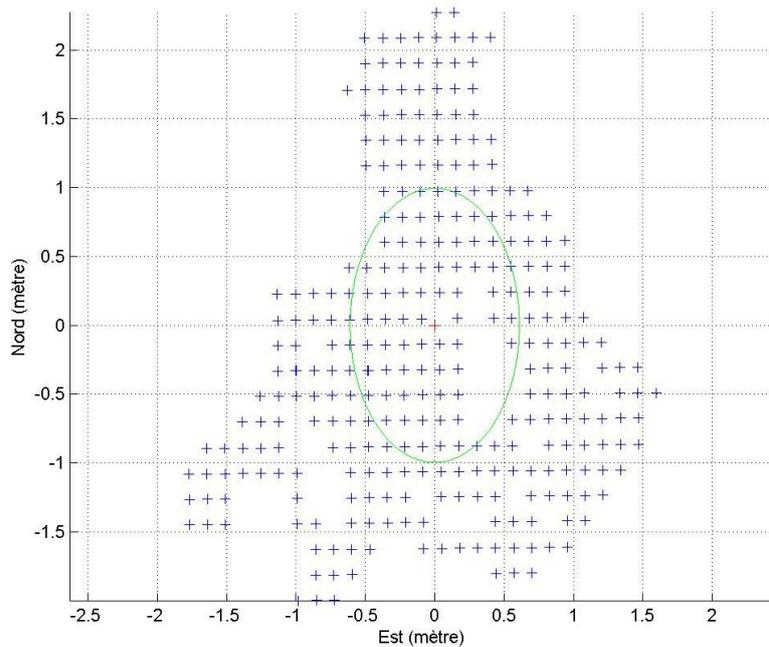


Figure III- 3 Relevés GPS d'un point sur le toit de l'ISIMA pendant 7 heures le 24/07/2008

Le tableau suivant résume les statistiques sur ces positions :

Composante	Moyenne (m)	Ecart-Type (m)	Min (m)	Max (m)	Médiane (m)
X (m)	660290.0039	0.6070	-1.7704	1.5950	-0.0867
Y (m)	84574.7537	0.9948	-1.9982	2.2744	-0.1430
Z (m)	372.2855	1.7572	-4.8105	3.4896	-0.1104

Tableau III—1 Statistique sur les positions instantanées d'un point sur le toit de l'ISIMA

A partir de la Figure III- 3 et du Tableau I-2, on remarque que les valeurs de X sont les plus centrées (les plus précises), suivies par les valeurs de Y et enfin les valeurs de Z (altitude). Ces imprécisions sont liées à la présence/absence des satellites dans chaque direction comme l'illustre la Figure III- 4. En effet, les satellites se trouvent à droite et à gauche du point à localiser (le centre de la figure), la répartition des satellites sur l'axe des X est donc homogène. Pour la composante Y, la plupart des satellites se trouvent du côté sud. Le côté nord est presque vide, ce qui explique l'imprécision de la composante Y. Pour l'altitude : comme les satellites sont tous au-dessus de l'horizon, il n'y a aucun satellite en-dessous de la position à localiser, pour cette raison, la composante hauteur (Altitude) est la moins précise.

La Figure III- 4 a été générée avec le logiciel "GPS ANALYZER version 3.5e". Elle montre les positions des satellites utilisés pour la localisation du point précédent. Les positions des satellites sont exprimées en termes d'azimut [0°-359°] et d'élévation [0°-90°] (hauteur angulaire du satellite). Les azimuts 0°, 90°, 180° et 270° représentent respectivement le nord géographique, l'est, le sud et l'ouest. L'élévation 0° correspond au niveau de l'horizon (cercle extérieur sur la figure). L'élévation 15° correspond à la position où l'angle entre le satellite est l'horizon est de 15° (deuxième cercle à partir de l'extérieur), etc. L'élévation 90° correspond à la position où le satellite est exactement à la verticale du point à localiser (le centre sur la figure).

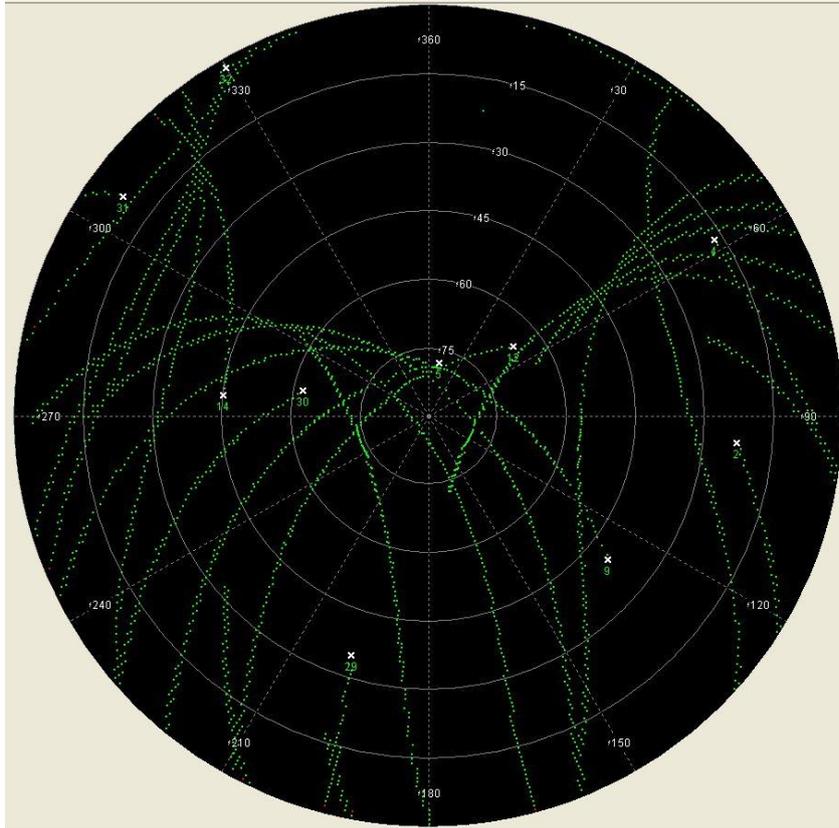


Figure III- 4 Satellites utilisés pour le positionnement d'un point sur le toit de l'ISIMA

Sur le graphe de la Figure III- 5 sont présentées les variations des écarts en X (rouge), Y (vert) et Z (bleu) des positions instantanées (délivrées par le récepteur GPS) par rapport à la moyenne. Les valeurs moyennes de X, Y, Z sont considérées comme les vraies coordonnées du point à localiser.

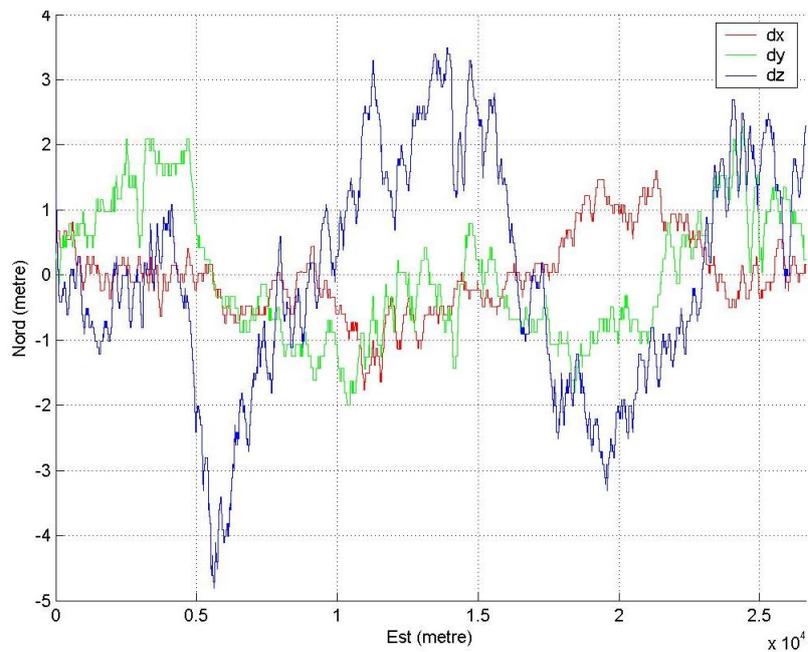


Figure III- 5 Variations des écarts en X, Y et Z pour un même point (7 Heures)

La Figure III- 6 présente les variations en X, Y et Z (en mètre) et sur 5 minutes (entre les secondes 1000 et 1300). La valeur de HDOP est 0.8 et le nombre de satellites est 12.

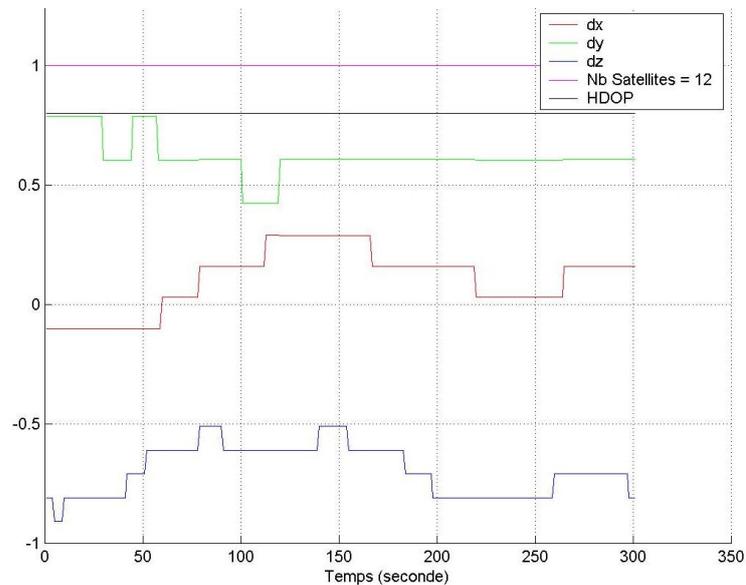


Figure III- 6 Variations des écarts en X, Y et Z pour un même point (5 minutes)

Les changements sur les valeurs de X, Y et Z peuvent être lents (3 minutes) comme ils peuvent être rapides (chaque seconde). Les statistiques sur les changements sont présentées dans les deux tableaux III–2 et III–3 : le premier présente les variations en termes de temps et le deuxième en termes de distance en mètre sur les trois composantes X, Y et Z (ces variations sont calculées entre deux instants successifs). La Figure III- 7 présente l’histogramme des écarts par rapport à la moyenne des coordonnées X, Y et Z.

Composante	Moyenne (s)	Ecart-Type (s)	Min (s)	Max (s)	Médiane (s)
X	23.4283	23.8243	1	183	17
Y	26.1413	25.6002	1	183	19
Z	15.5778	16.0431	1	175	11

Tableau III–2 Statistique sur les changements des positions GPS - Temps

Composante	Moyenne (m)	Ecart-Type (m)	Min (m)	Max (m)	Médiane (m)
X	0.0661	0.0639	0.0018	0.1317	0.1274
Y	0.0955	0.0920	0.0013	0.1921	0.1837
Z	0.1000	0.0000	0.1000	10.0000	0.1000

Tableau III–3 Statistique sur les changements des positions GPS - Distance

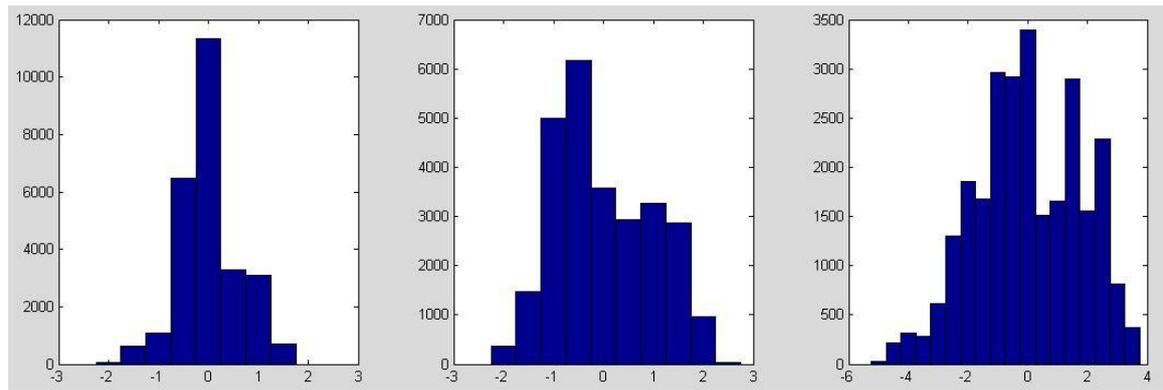


Figure III- 7 Histogramme des erreurs en X, Y et Z respectivement

5 Corrections différentielles en étapes

Pour tester la solution différentielle présentée dans le paragraphe III.2, nous avons procédé en plusieurs étapes :

1. Utilisation d'une carte numérique (Map Matching).
2. Utilisation d'une seule station de base.
3. Utilisation d'un réseau de stations de base.

Pour évaluer chaque méthode (étape), plusieurs expérimentations ont été menées. Elles seront présentées à la suite de la présentation du principe de chacune des étapes.

Nous avons procédé ainsi pour plusieurs raisons :

- Tester chaque méthode de correction séparément car chaque méthode est appropriée à une situation bien particulière. Cela permet d'adapter le choix de la méthode à l'application souhaitée. Si l'application consiste à suivre un bus sur une carte, il suffit d'utiliser la technique du 'Map Matching'. Si l'amélioration de la précision est nécessaire avec les moindres frais, on utilise une seule station de base. Si on veut avoir plus de visibilité et donc plus de confiance dans les corrections, un réseau de capteurs sera donc nécessaire.
- Respecter la limitation des ressources du capteur réalisé par notre équipe (LiveNode, présenté sur la Figure IV- 2) ; car malgré les ressources dont dispose le LiveNode, on ne peut pas y intégrer tous les traitements qui seront présentés ci-dessous.

5.1 Utilisation d'une carte numérique (Map Matching)

Cette solution permet de limiter (restreindre) les positions possibles du GPS aux routes traversées par un véhicule (ou un mobile) [59]. Si les positions données par le GPS, ne sont pas sur la route, elles seront corrigées en les ramenant sur la ligne centrale de la voie ou sur le bord de celle-ci. Deux paramètres sont pris en compte : la direction et la vitesse du déplacement du mobile.

Cette correction est adaptée aux véhicules qui ont des trajets bien définis comme les bus, par exemple.

Les lignes rouges représentent les bords de la route. La ligne noire représente le milieu de la route. Les trajectoires sont représentées avec les couleurs (vert, bleu et magenta).

Cette partie a été extraite d'une carte numérique du campus universitaire des Cégeaux (campus de l'université Blaise Pascal). Cette partie est encadrée en vert sur la Figure III- 11.

On remarque que les positions de la trajectoire en bleu (pour le 1^{er} capteur) sont approximativement à l'intérieur de la route. La trajectoire en magenta (2^{ième} capteur) a un léger écart vers la droite par rapport à la voie de circulation. La trajectoire en vert (3^{ième} capteur), a un grand écart par rapport à la route et elle est presque complètement à l'extérieur de la voie de circulation.

Pour illustrer le principe de l'utilisation d'une carte numérique, c'est cette dernière trajectoire qui est utilisée. La correction consiste, en se basant sur la carte, à projeter les positions données par le récepteur GPS sur la voie de circulation. Sur la Figure III- 10, la trajectoire corrigée et celle représentée par des lignes en cyan.

Cette correction est possible, car le trajet du véhicule était défini comme suit : le véhicule va jusqu'au rond-point et fait demi-tour. On a donc toujours une seule possibilité pour projeter les positions données par le GPS. On a une liste ordonnée des segments de la route et par conséquent on projette le point sur le segment le plus proche.

Selon l'application de l'utilisateur la projection des points peut être effectuée sur les bords de la route, sur le milieu de la route ou le milieu de la voie de circulation (en respectant le sens de circulation, bien sûr).

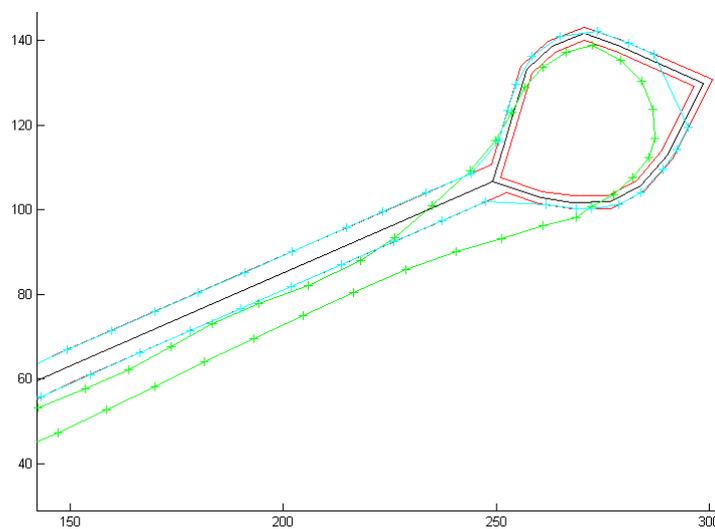


Figure III- 10 Projection d'une trajectoire sur les bords de la route (Map Matching)



Figure III- 11 Carte du campus des Cézeaux (Université Blaise Pascal)

5.2 Une correction locale

Cette étape consiste à utiliser une station de base qui surveille en permanence les erreurs du GPS et transmet les corrections locales à tous les autres récepteurs. Une fois les corrections reçues, le récepteur les applique pour améliorer sa précision.

5.2.1 Différence simple

Cette méthode consiste à utiliser les écarts instantanés entre les positions données par le GPS (1 position par seconde) et les coordonnées (X, Y, Z) déjà connues d'une station de référence. Ces écarts (déviations) instantanés sont appliqués aux positions instantanées d'un autre récepteur (fixe ou mobile). Cette correction utilise une seule station de base.

En d'autres termes, la différence simple consiste à soustraire les erreurs mesurées (estimées) au niveau de la station de base des positions instantanées (chaque secondes) des autres capteurs.

Le principe est présenté sur la figure ci-dessous :

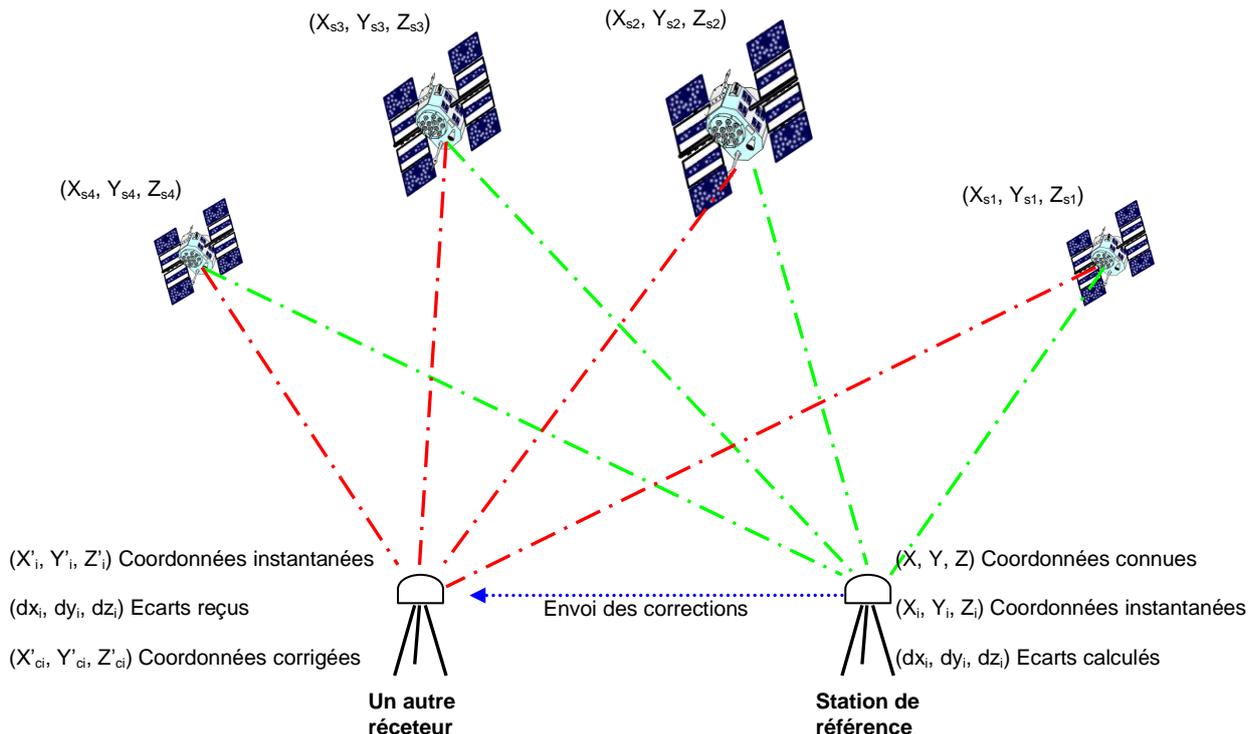


Figure III- 12 Principe de la différence simple (une seule station)

Afin d'évaluer cette méthode, 3 capteurs ont été installés sur le toit de l'ISIMA. Seulement les coordonnées de la position du 1^{er} capteur (rouge) sont connues car ce point a été déjà utilisé dans une précédente expérimentation.

La configuration spatiale des 3 capteurs est montrée sur la figure suivante :

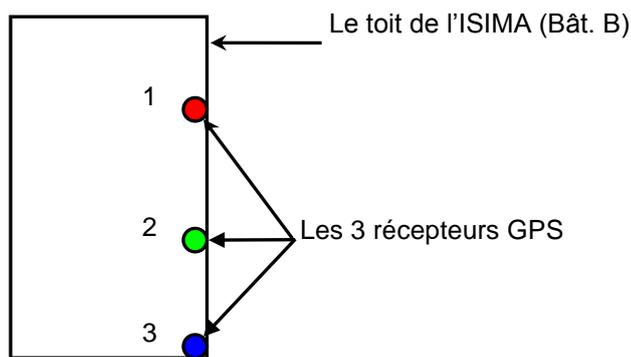


Figure III- 13 Le placement des 3 capteurs

Cette expérimentation a eu lieu le 04/01/2007 entre 15:09:29 et 15:31:02 GMT. La Figure III- 14 montre le format original des données GPS sauvegardées directement à partir du récepteur GPS. On y voit notamment les informations GPGL/GPGGA (le temps et la position), GPGSV (les satellites en vue) et GPVTG (la vitesse). Les détails de ces formats sont donnés dans l'ANNEXE IV – Description du protocole NMEA – 0183.

```

Synchronie_20070104_C1_MK_original.log - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
$GPGGA,150929.703,4545.2698,N,00306.7984,E,1,03,4.3,-48.7,M,48.7,M,,0000*45
$GPGLL,4545.2698,N,00306.7984,E,150929.703,A*34
$GPGSA,A,2,19,11,22,,,,,,,,,4.4,4.3,1.0*3D
$GPGSV,3,1,09,19,87,159,23,22,43,056,25,11,36,275,24,03,53,143,24*7C
$GPGSV,3,2,09,14,25,107,21,28,13,322,,01,06,149,,20,06,213,*72
$GPGSV,3,3,09,18,00,039,20*41
$GPRMC,150929.703,A,4545.2698,N,00306.7984,E,0.22,151.93,040107,,*0E
$GPVTG,151.93,T,,M,0.22,N,0.4,K*6B
$GPGGA,150930.703,4545.2743,N,00306.7969,E,1,03,4.3,-48.7,M,48.7,M,,0000*49
$GPGLL,4545.2743,N,00306.7969,E,150930.703,A*38
$GPGSA,A,2,19,11,22,,,,,,,,,4.4,4.3,1.0*3D
$GPGSV,3,1,09,19,87,159,23,22,43,056,25,11,36,275,24,03,53,143,24*7C
$GPGSV,3,2,09,14,25,107,21,28,13,322,,01,06,149,,20,06,213,*72
$GPGSV,3,3,09,18,00,039,20*41
$GPRMC,150930.703,A,4545.2743,N,00306.7969,E,3.45,166.92,040107,,*05
$GPVTG,166.92,T,,M,3.45,N,6.4,K*6A
$GPGGA,150931.703,4545.2878,N,00306.7923,E,1,03,4.3,-48.7,M,48.7,M,,0000*41
$GPGLL,4545.2878,N,00306.7923,E,150931.703,A*30
    
```

Figure III- 14 Format des données GPS au format NMEA

La Figure III- 15 montre le format des données GPS après conversion en coordonnées planes (projection Lamber II pour le centre de la France). On trouve l'heure, le nombre de satellites utilisés pour le calcul de la position, la valeur du HDOP et enfin les coordonnées en X, Y et Z.

Heure hhmmss	Nombre de satellites	HDOP	X	Y	Z
150929	3	4.3	660437.93408	84095.93086	-92.02403
150930	3	4.3	660435.90645	84104.25013	-92.02405
150931	3	4.3	660429.69503	84129.19961	-92.02409
150932	3	4.2	660432.66080	84117.74470	-92.02407
150933	3	4.2	660434.01418	84112.01243	-92.02406
150934	3	4.2	660431.58729	84121.43731	-92.02407
150935	3	4.2	660431.59643	84120.51160	-92.02407
150936	3	4.2	660433.22899	84112.74673	-92.02406
150937	3	4.2	660425.65084	84144.72164	-92.02411
150938	3	4.2	660434.04160	84109.23529	-92.02406
150939	3	4.2	660435.93024	84101.84045	-92.02405
150940	3	4.2	660432.68829	84114.96049	-92.02407
150941	3	4.2	660435.14141	84102.94221	-92.02405
150942	3	4.2	660428.12040	84131.03567	-92.02410

Figure III- 15 Format des données GPS après conversion en LAMBER II

Les résultats obtenus des positions instantanées (1 position par seconde) données par les récepteurs GPS sont présentés sur la Figure III- 16. La partie supérieure de la figure représente les bâtiments A et B de l'ISIMA ainsi que le nuage de points du 2^{ème} capteur (vert). La partie inférieure représente les nuages de points des capteurs 1(rouge) et 3 (bleu).

Les deux capteurs 1 et 3 n'ont reçu que les signaux de 3 satellites ; ils n'ont donc qu'un positionnement en 2D (longitude, latitude). Le capteur 2 a reçu les signaux de 5 satellites, il bénéficie donc d'un positionnement en 3D (longitude, latitude, altitude). Les positions données pour le capteur 2 sont plus centrées et donc plus précises par rapport aux positions données pour les deux autres capteurs.

La valeur HDOP moyenne pour le 2^{ème} capteur est de 1.46, tandis qu'elle est 3.22 pour le 1^{er} capteur et 5.28 pour le 3^{ème}. Plus la valeur HDOP est grande, plus la précision de la localisation est mauvaise.

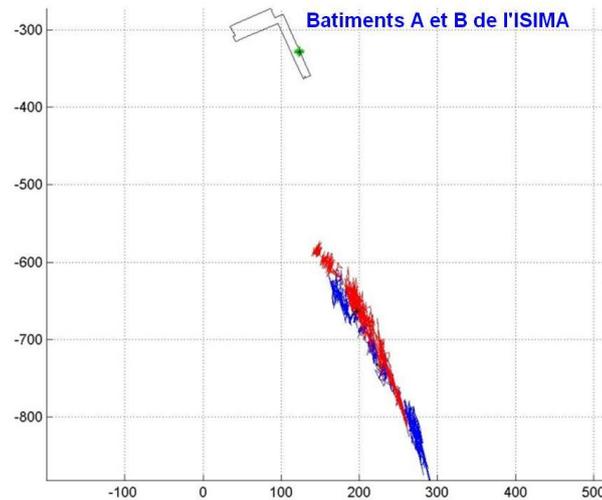


Figure III- 16 Les positions instantanées des 3 capteurs (expérimentation du 04/01/2007)

Le nuage de points du capteur 2 est présenté sur la figure suivante. Le point noir au milieu représente la valeur moyenne des coordonnées reçues. La ligne noire représente le bord du bâtiment.

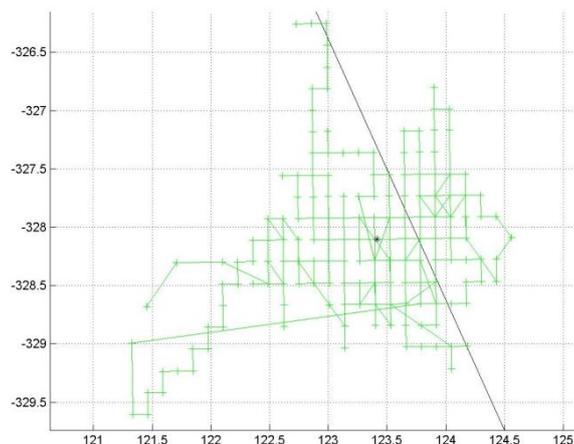


Figure III- 17 Les positions instantanées du 2^{ème} capteur (expérimentation du 04/01/2007)

Les nuages de points des capteurs 1 et 3 sont très loin des bâtiments de l'ISIMA, mais on remarque qu'ils ont le même sens d'évolution. Comme les coordonnées du 1^{er} capteur étaient connues, les écarts instantanés sont calculés en faisant la différence entre les positions instantanées et les coordonnées connues. Ces écarts sont par la suite soustraits des coordonnées instantanées du 3^{ème} capteur. Le nuage de points résultant est présenté sur la Figure III- 19. Ce nuage de points est plus centré et sa moyenne n'est pas trop loin de l'endroit où le capteur 3 était placé (une dizaine de mètres au lieu des 300 mètres initialement).

Cette soustraction est possible car les 3 composantes X, Y et Z des deux capteurs 1 et 3 sont très corrélées. La Figure III- 18 représente les facteurs de corrélation entre les composantes X, Y et Z des 3 capteurs. (X_1, Y_1, Z_1 pour le 1^{er} capteur, et ainsi de suite). On y voit clairement que X_1 et X_3 , Y_1 et Y_3 ,

et enfin Z_1 et Z_3 (les courbes en vert sur la figure) sont très corrélées et que la valeur du facteur de corrélation se rapproche même de la valeur 1. Ces graphes sont obtenus en calculant le facteur de corrélation pour des vecteurs glissants de 600 éléments (10 minutes).

Pour avoir le graphe de corrélation entre X_1 et X_2 (par exemple) on a procédé de la façon suivante :

- Soit X le vecteur contenant les 600 premiers éléments de X_1 ($X = X_1[1:600]$)
- Soit X' le vecteur contenant les 600 premiers éléments de X_2 ($X' = X_2[1:600]$)
- Calculer le facteur de corrélation entre X et X' et le sauvegarder
- $X = X_1[2:601]$
- $X' = X_2[2:601]$
- Calculer le nouveau facteur de corrélation entre X et X' et le sauvegarder

Ce processus est répété jusqu'à ce que il n'y a pas assez de données pour prendre les 600 données pour les vecteurs X et X'.

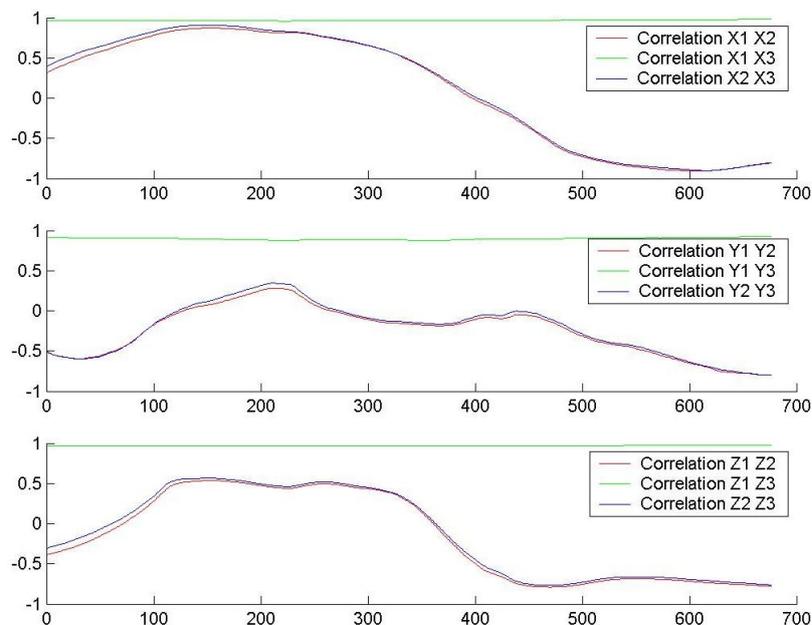


Figure III- 18 Facteurs de corrélation entre les coordonnées des 3 capteurs

La Figure III- 20 montre les positions estimées des 3 capteurs.

- Les coordonnées du 1^{er} capteur sont connues, car cette position a été déjà utilisée dans des expérimentations antérieures. Elles étaient estimées en calculant la moyenne des coordonnées instantanées données par le GPS.
- Les coordonnées du 2^{ème} capteur sont estimées en calculant la moyenne des coordonnées instantanées données par le GPS dans cette nouvelle expérimentation.
- Les coordonnées du 3^{ème} capteur sont calculées à partir des positions instantanées données par le GPS, corrigées par les écarts instantanées du 1^{er} capteur. On a appelé cette correction

'la différence simple'. Cette correction ne peut pas être appliquée sur le 2^{ème} capteur, car il n'a pas vu les mêmes satellites. En effet, le capteur 2 recevait les signaux de 5 satellites tandis que les capteurs 1 et 3 recevaient seulement les signaux de 3 satellites. Pour que la correction puisse être effectuée, il faut que les deux capteurs (1 et 3 en occurrence) utilisent le même récepteur GPS (la même puce électronique) et que les deux récepteurs utilisent les mêmes satellites, sinon en essayant de corriger des erreurs, on peut en rajouter d'autres et par conséquent dégrader la qualité de la localisation.

Formule du calcul du facteur de corrélation :

La formule du facteur de corrélation est la suivante :

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Si r vaut 0, les deux courbes ne sont pas corrélées. Les deux courbes sont d'autant mieux corrélées que r est proche de -1 ou 1.

Avec :

$\sigma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ est la covariance entre X et Y.

$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$ est l'écart-type de X.

$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$ est l'écart-type de Y.

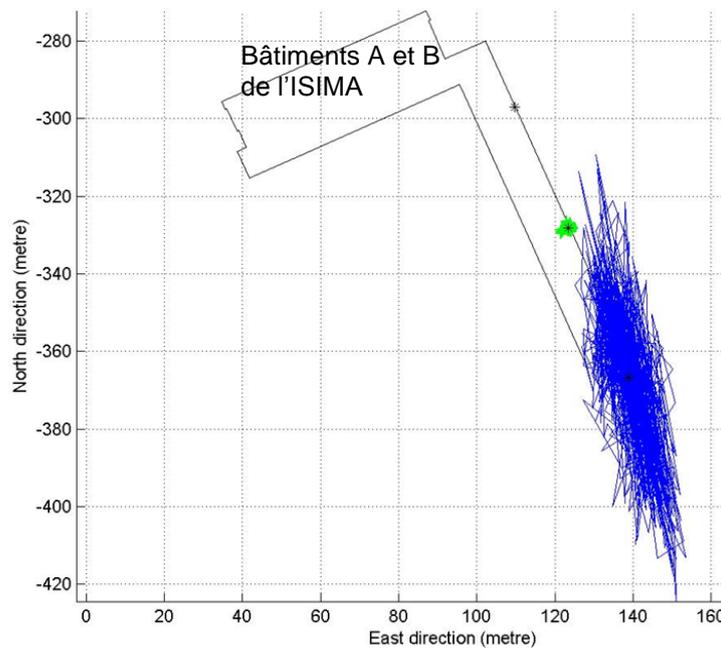


Figure III- 19 Les positions corrigées du 3^{ème} capteur

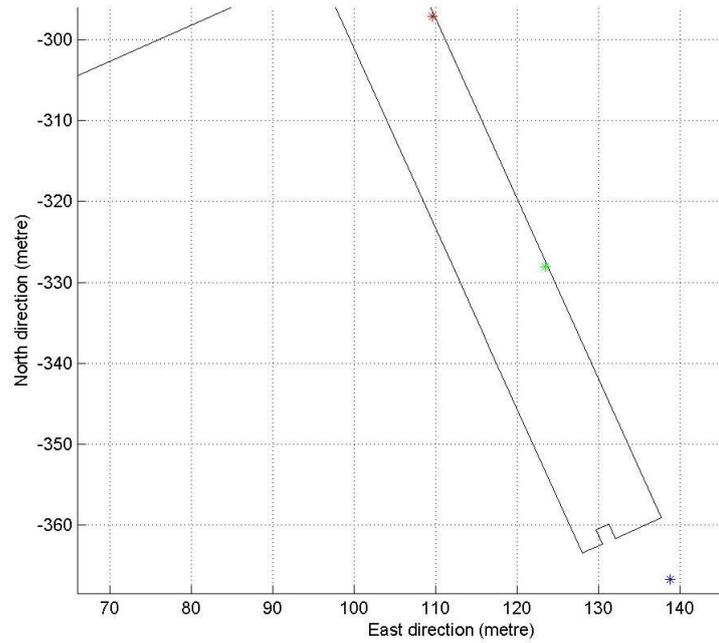


Figure III- 20 Les positions estimées des 3 capteurs

Une autre expérimentation a été menée en utilisant les mêmes trois points fixes utilisés auparavant. Elle a eu lieu le 09/01/2007 entre 11:30:53 et 12:47:46 GMT. Le résultat de cette expérimentation est illustré par la figure ci-dessous. Le Tableau III—4 résume les données de positionnement, il compare aussi les coordonnées obtenues dans la première expérimentation et la deuxième.

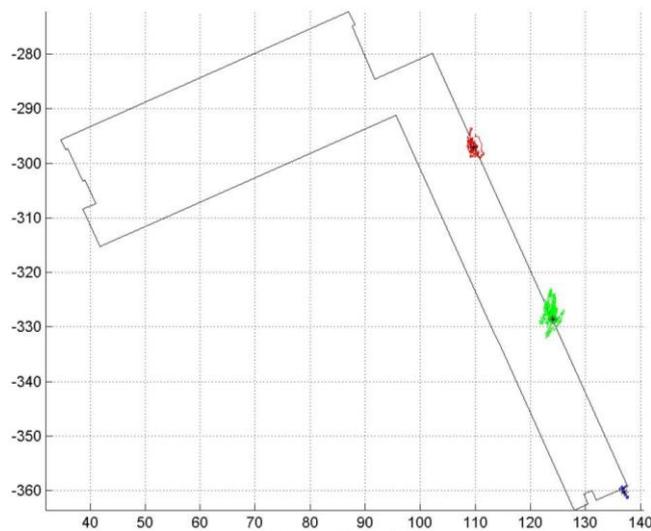


Figure III- 21 Un relevé GPS pour les mêmes 3 points fixes

Expérimentation	Composante	1 ^{er} capteur	2 ^{ème} capteur	3 ^{ème} capteur
1 ^{ère}	X	660285.9617	6.60299.7631	660315.0990
	Y	84607.9841	84576.9401	84538.2944
	Z	373.6616	370.6719	-92.0243
2 ^{ème}	X	660286.0812	660300.4705	660313.4432
	Y	84608.6080	84576.4406	84544.8855
	Z	372.7284	372.8927	371.6015

Tableau III—4 Résumé des résultats de deux expérimentations

La correction de la différence simple est un peu limitée. En effet, les erreurs de la station de base et celles des récepteurs avoisinants ne sont pas toujours corrélées (exemple : dans la 1^{ère} expérimentation, les erreurs du capteur 1 et du capteur 2 ne sont pas corrélées). Pour cela, il y a besoin d'avoir plus de stations (sortes de plusieurs observateurs) pour déduire une meilleure correction. Et c'est la correction globale que nous proposons.

Le facteur de corrélation n'est pas toujours avoisinant la valeur de 1. Dans nos tests, nous avons constaté qu'il avoisine la valeur de 0.75. Pour cela pour la correction 'différence simple', c'est cette valeur qui est utilisée par défaut au lieu de la valeur 1.

5.2.2 Différence Intelligente

La 'différence intelligente' est un traitement vectoriel, comme la 'différence simple'. La différence entre les deux est que les corrections instantanées dans la 'différence intelligente' sont calculées en utilisant deux stations de base et qu'elles sont calculées comme suit :

- Si les deux écarts instantanés des deux stations de base ont la même direction (+/+) ou (-/-), la correction considérée est le minimum des deux écarts. Soit e_1 , l'écart instantané de la station 1 et e_2 l'écart instantané de la station 2 alors la correction c est $c = \text{Min}(e_1, e_2)$.
- Si les deux écarts instantanés ont des directions différentes (+/-) ou (-/+), la correction considérée est la moyenne des deux $c = (e_1 + e_2)/2$.

5.3 Une correction globale

Dans cette étape, on utilise un ensemble de stations de base (qui peut être la totalité). La correction est calculée en fonctions des erreurs instantanées de ces stations. La Figure III- 1 représentant le principe du LCD-GPS présente aussi cette correction.

6 Expérimentations à L'ISIMA :

Afin de trouver un moyen pour corriger les erreurs instantanées du GPS, différentes expérimentations ont eu lieu. Les sections précédentes ont déjà présenté l'utilisation d'une carte numérique et la différence simple. Cette section permettra notamment d'exploiter la 'différence intelligente', le filtrage et de présenter quelques aspects de la correction globale.

6.1 Scénario I : Espace ouvert

Trois capteurs (LiveNodes) ont été placés sur le toit de l'ISIMA sur trois jours de suite. Les conditions météorologiques étaient bonnes. Les relevés GPS ont été enregistrés sur quelques heures (pour chaque jour).

On n'utilise que les données synchrones pour les 3 capteurs.

Les données sont considérées synchrones, si :

- pour le même jour, elles étaient enregistrées simultanément à chaque seconde.
- pour 2 jours successifs, si les données pour le 2^{ème} jour sont enregistrées avec 4 minutes d'avance par rapport au 1^{er} jour car les satellites se présentent chaque jour avec, approximativement, 4 minutes d'avance par rapport à la veille.

La disposition des capteurs est montrée sur la Figure III- 22.

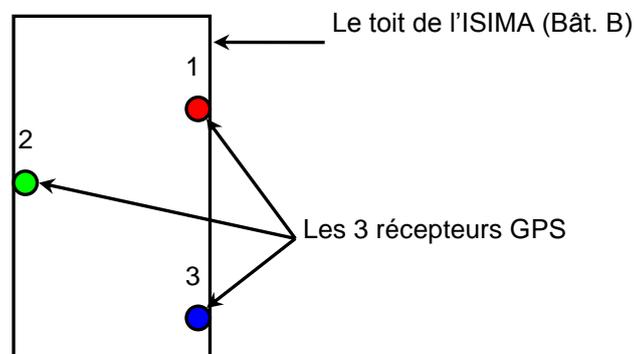


Figure III- 22 Le placement des 3 capteurs (Expérimentation 22-23-24/07/2008)

Les positions instantanées des 3 capteurs pour le 1^{er} jour (c'est pareil pour les 2 autres jours) sont montrées sur la Figure III- 23. Les moyennes des positions de chaque capteur sont présentées par une croix noire (+). Ces moyennes sont utilisées par la suite comme les coordonnées exactes des capteurs. En effet, dans les travaux du GPS, si les coordonnées d'un point ne sont pas connues, la moyenne des positions données par un récepteur GPS sur une période de temps est utilisée comme les coordonnées exactes du point.

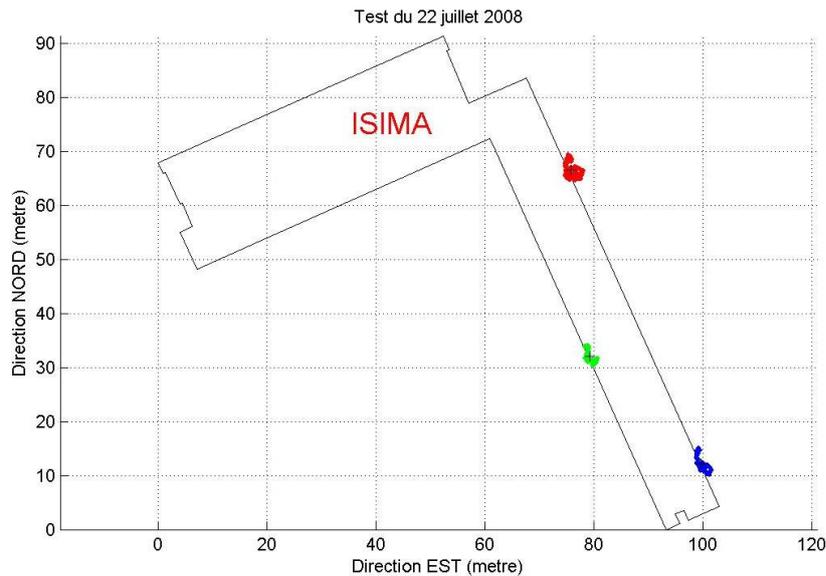


Figure III- 23 Les positions instantanées des 3 capteurs

Trois types de corrélation ont été testés :

- 1- Corrélation entre les erreurs instantanées du même capteur, c'est-à-dire entre les trois composantes X, Y et Z pour deux instants successifs.
- 2- Corrélation entre les erreurs instantanées de deux capteurs (ou plus) au mêmes instants (le même jour et la même heure hhhmss), c'est-à-dire entre les trois valeurs dX, dY, dZ pour un capteur avec les valeurs dX', dY', dZ' d'un autre capteur.
- 3- Corrélation entre les erreurs instantanées du même capteur mais dans deux jours successifs. Par exemple entre un instant d'un jour et l'instant équivalent pour le lendemain. C'est-à-dire entre les trois valeurs dX, dY, dZ à l'instant t (dans un jour) et les valeurs dX', dY', dZ' à l'instant $t - 4 \text{ minutes}$ du jour suivant.

Pour le 1^{er} type de corrélation (entre les erreurs de 2 instants successifs du même capteur), la Figure III- 24 montre les variations des écarts en X, Y et Z pour le même capteur (1^{er} capteur au 1^{er} jour – 22/07/2008). Les courbes sont similaires pour les 2 autres capteurs et sur les 2 autres jours.

Une analyse des variations successives entre les écarts en X, Y et Z est effectuée. On a commencé par calculer les différences entre les écarts à chaque instant t et $(t-1)$. Ces différences sont ensuite comparées entre elles.

Résultats de l'expérimentation :

- 1- Les écarts dX et dY changent toujours ensemble.
- 2- Les changements des écarts dZ sont indépendants des changements en dX et dY.

3- Les rapports entre dX et dY sont les suivants :

- Si les valeurs de dX et dY changent dans le même sens (+/+ ou -/-) alors $dY \approx dX/100$.
- Si les valeurs de dX et dY changent dans deux sens différents (+/- ou -/+) alors $dY \approx -100 dX$.

La Figure III- 25 montre un extrait des calculs de dX, dY et dZ pour des instants successifs.

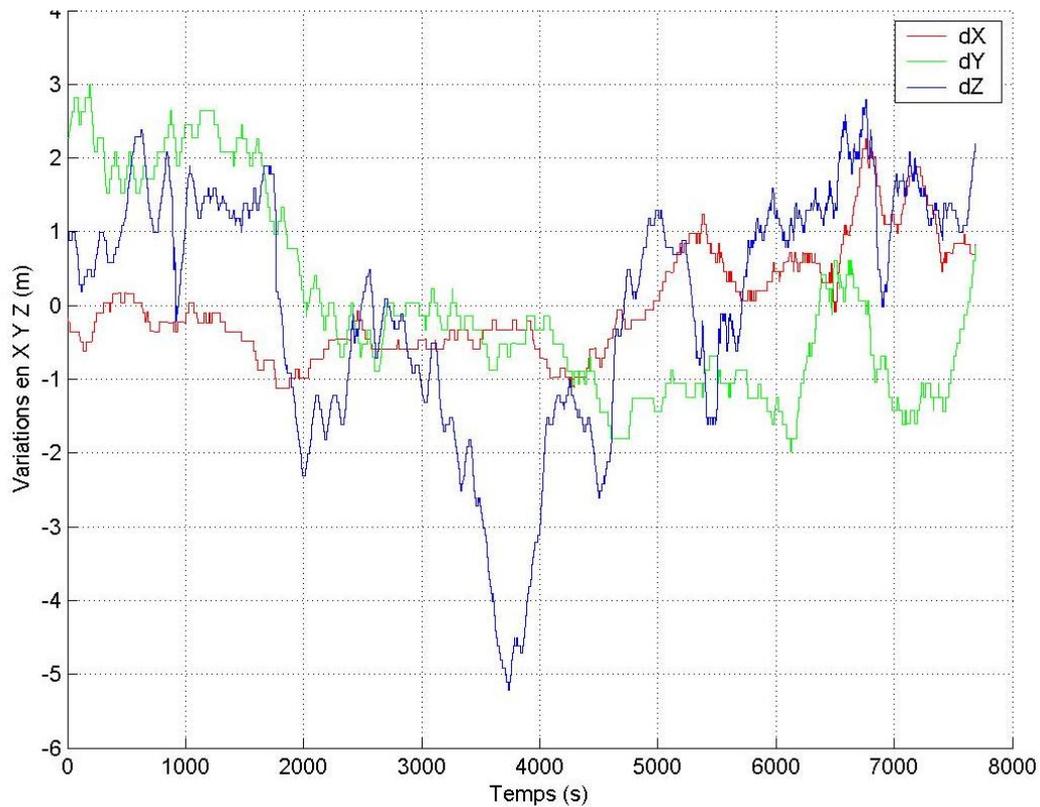


Figure III- 24 Variations des écarts en X, Y et Z pour le 1^{er} capteur – 22/08/2008

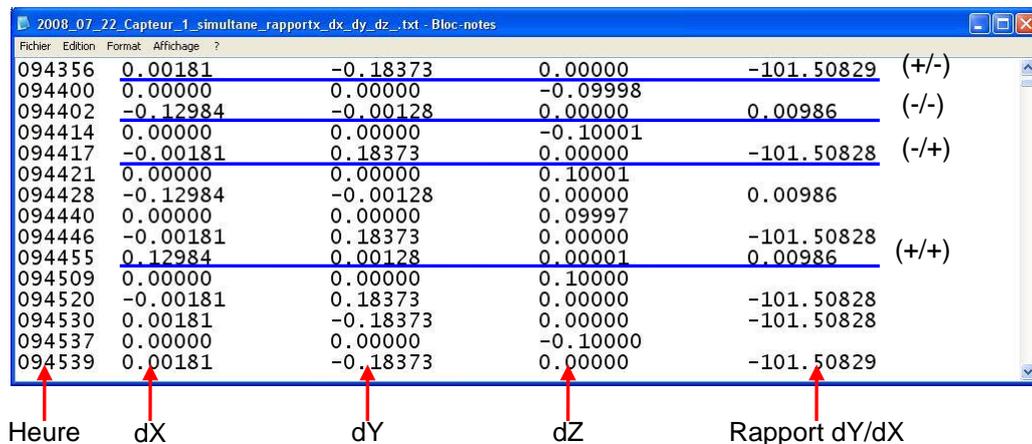


Figure III- 25 Extrait des variations dX, dY et dZ

Pour le 2^{ème} type de corrélation (corrélation entre les erreurs instantanées de deux capteurs aux mêmes moments), le 1^{er} capteur est considéré comme station de base et les corrections sont

appliquées au 2^{ème} et 3^{ème} capteur. Par la suite, le 2^{ème} capteur est considéré comme station de base et les corrections sont appliquées sur le 1^{er} et le 3^{ème} capteur. Enfin, le 3^{ème} capteur est considéré comme station de base et les corrections sont appliquées sur le 1^{er} et le 2^{ème} capteur. Les résultats obtenus sont ensuite comparés.

Les trois figures III- 26, III- 27, III- 28 montrent respectivement les variations simultanées (à la même seconde) des erreurs en X, Y et Z des 3 capteurs pour le 1^{er} jour de l'expérimentation (22/08/2008). On remarque que sur chaque graphe, les trois courbes associées aux trois capteurs ont globalement le même sens de variations (la même tendance).

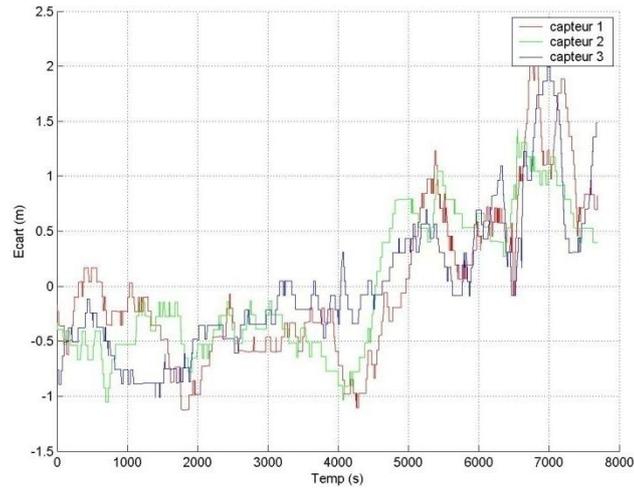


Figure III- 26 Erreurs simultanées des 3 capteurs, variations en X

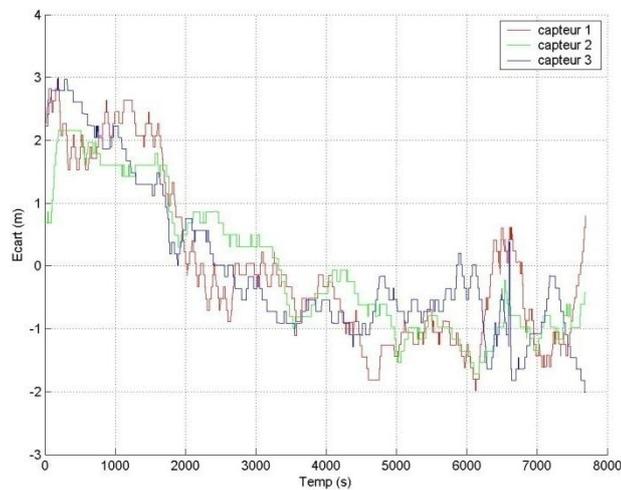


Figure III- 27 Erreurs simultanées des 3 capteurs, variations en Y

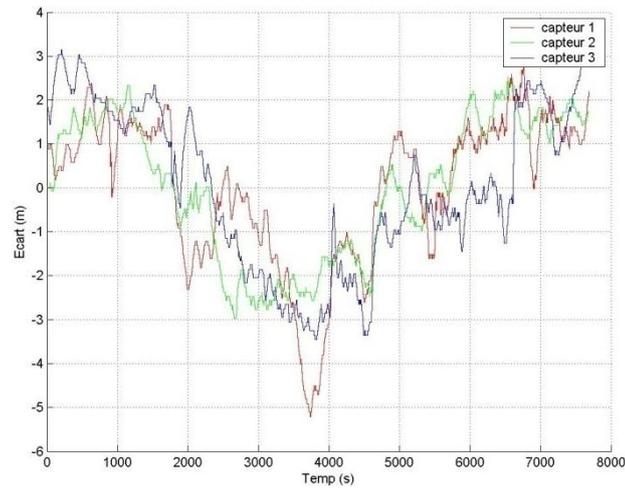


Figure III- 28 Erreurs simultanées des 3 capteurs, variations en Z

Le Tableau III—5 résume les résultats obtenus en appliquant la différence simple entre les capteurs pour le 1^{er} jour. Les valeurs données dans le tableau représentent les écarts types dans les trois directions (est, nord, hauteur).

Capteur		1 (rouge)	2 (vert)	3 (bleu)
Durée (seconde)		7686	7686	7686
Données originales	X (m)	0.7257	0.6317	0.6526
	Y (m)	1.3083	1.1173	1.2356
	Z (m)	1.6904	1.6113	1.8555
Capteur 1 comme station de base	X	-	0.4216	0.4579
	Y	-	0.6646	0.7772
	Z	-	1.1067	1.3123
Capteur 2 comme station de base	X	0.4216	-	0.4458
	Y	0.6646	-	0.6289
	Z	1.1067	-	1.1627
Capteur 3 comme station de base	X	0.4579	0.4458	-
	Y	0.7772	0.6289	-
	Z	1.3123	1.1627	-

Tableau III—5 Différence simple appliquée aux données du 1^{er} jour (22/07/2008)

La figure suivante représente les nuages de points de chaque capteur pour le 22/07/2008. Les nuages de points sont placés côte-à-côte pour faciliter la comparaison.

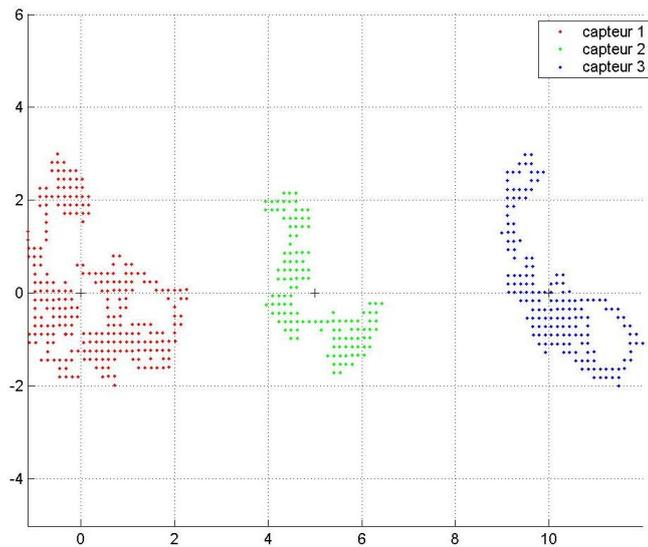


Figure III- 29 Nuages de points des 3 capteurs – 22/07/2008

Le Tableau III—6 résume les résultats obtenus en appliquant la ‘différence intelligente’ entre les capteurs pour le 1^{er} jour. Les valeurs données dans le tableau (comme dans le cas de la différence simple) représentent les écarts types dans les trois directions (est, nord, hauteur). Mais comme la ‘différence intelligente’ utilise deux stations de bases pour déduire les corrections, les erreurs instantanées de la station à corriger sont utilisées. Par exemple, en prenant le 1^{er} capteur comme référence et en essayant d’appliquer la ‘différence intelligente’ sur le 2^{ème} capteur, les erreurs instantanées de ce dernier sont utilisées comme erreurs d’une deuxième station. Pour le 3^{ème} capteur, ces erreurs instantanées sont utilisées comme les erreurs d’une deuxième station.

Capteur		1 (rouge)	2 (vert)	3 (bleu)
Durée (seconde)		7686	7686	7686
Données originales	X (m)	0.7257	0.6317	0.6526
	Y (m)	1.3083	1.1173	1.2356
	Z (m)	1.6904	1.6113	1.8555
Capteur 1 comme station de base	X	-	0.3591	0.4141
	Y	-	0.5187	0.6004
	Z	-	0.9801	0.9181
Capteur 2 comme station de base	X	0.3591	-	0.4093
	Y	0.5187	-	0.5478
	Z	0.9801	-	0.8461
Capteur 3 comme station de base	X	0.4141	0.4093	-
	Y	0.6004	0.5478	-
	Z	0.9181	0.8461	-

Tableau III—6 Différence intelligente appliquée aux données du 1^{er} jour (22/07/2008)

Les trois figures suivantes représentent les résultats des traitements sur les données de chaque capteur. Les graphes représentent respectivement : les données originales, les données filtrées en utilisant le filtre EMA (Exponential Moving Average) avec $\alpha = 0.99$ (ce choix a été fait sur la base de la valeur α qui réalise l’écart-type minimum en variant la valeur de α entre 0.5 et 0.99), la différence simple en utilisant le capteur C2 comme station de référence, la différence simple en utilisant le capteur C3 comme station de référence, la différence intelligente en utilisant le capteur C2 comme

station de référence, la différence intelligente en utilisant le capteur C3 comme station de référence. Les graphes en noir représentent les résultats en utilisant les données filtrées. Les ellipses en haut de la figure représentent les écarts types pour chaque nuage de point correspondant. Les nuages de points sont placés côte-à-côte pour faciliter la comparaison.

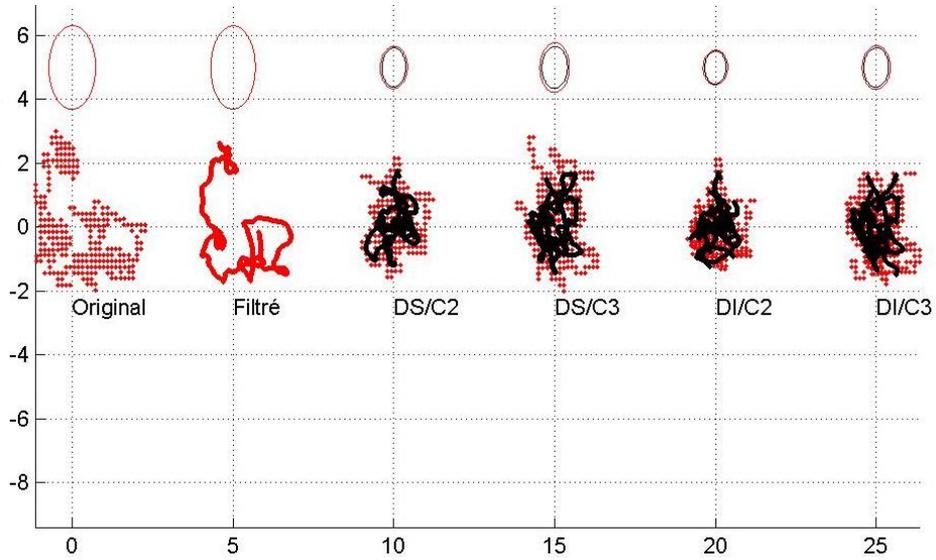


Figure III- 30 Traitements sur les données du 1^{er} capteur

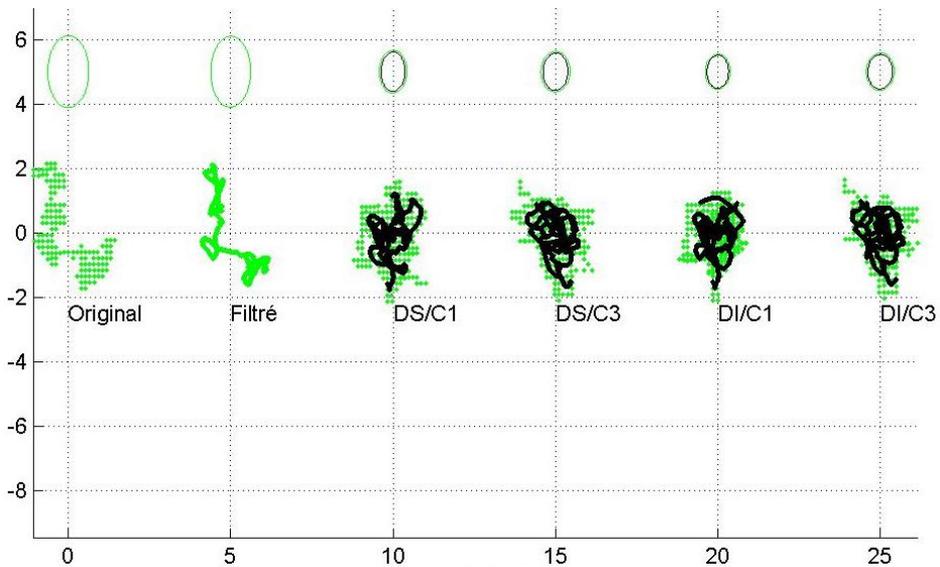


Figure III- 31 Traitements sur les données du 2^{ème} capteur

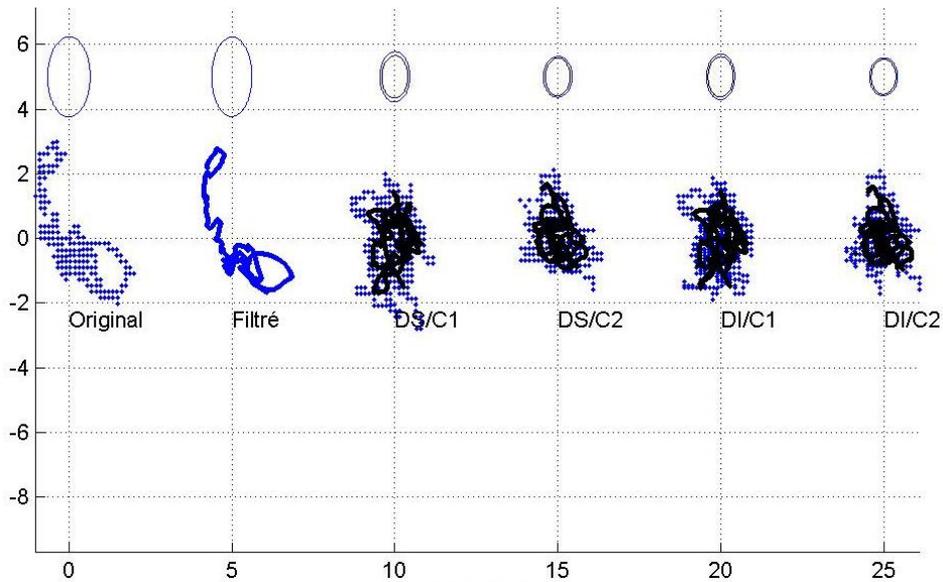


Figure III- 32 Traitements sur les données du 3^{ème} capteur

A partir des deux tableaux (différence simple et différence intelligente) et des trois figures précédentes, on remarque que le résultat de la différence simple (et la différence intelligente) sont plus centrées que les données originales. Les données filtrées donnent un résultat meilleur que les données originales. Le résultat de la différence intelligente est plus intéressant que le résultat de la différence simple.

En prenant chaque fois un capteur comme station de base, on remarque que les corrections appliquées (différence simple, différence intelligente, filtrage, combinaison du filtrage et des différences simples et intelligentes) aux autres capteurs donnent des résultats différents. Des résultats de localisation sont bien meilleurs que d'autres, ce qui montre la nécessité d'avoir une vue globale et donc d'une correction globale pour choisir la correction la plus appropriée.

Pour le 3^{ème} type de corrélation (corrélation entre les erreurs du même capteur entre deux jours successifs), nous avons considéré les données du 1^{er} jour comme des données de référence et puis les traitements différence simple, différence intelligent et le filtrage sont appliqués sur les données du 2^{ème} et 3^{ème} jour. Les résultats obtenus sont intéressants (précision améliorée) mais moins importants par rapport au 2^{ème} type de corrélation. Nous pouvons expliquer cela par deux facteurs :

- La météo est différente dans les trois jours. Même s'il faisait beau pendant les 3 jours de l'expérimentation, les conditions météos ne sont certainement pas les mêmes pour les 3 jours.
- Les satellites arrivent, en principe, chaque jour avec 4 minutes d'avance. Lors de l'application des différentes méthodes (différence simple, différence intelligente, ...) nous avons pris ce décalage en compte, mais en réalité les satellites n'arrivent pas avec exactement 4 minutes d'avances. Cela induit un certain décalage temporel entre les données de référence et les données à corriger.

6.2 Scénario 2 : Effet du multi-trajet sur la précision

La précision du GPS est dégradée dans un contexte urbain à cause des immeubles qui :

- limitent la visibilité du ciel (le capteur GPS ne voit pas tous les satellites présents),
- reflètent les signaux GPS (introduire des erreurs sur les mesures du temps et par conséquent sur les distances et donc sur les positions calculées : multitrajet),

Dans cette partie nous exposons les résultats d'évaluation de 5 méthodes de traitements : la différence simple, la différence intelligente, le filtrage, la simple différence avec le filtrage et la différence intelligente avec le filtrage.

Description des expérimentations :

Deux expérimentations ont été réalisées avec respectivement 5 et 9 capteurs (LiveNodes). Nous ne présentons ici que l'expérimentation avec 5 LiveNodes. La différence avec la deuxième expérimentation est seulement dans le nombre de capteurs, mais les traitements effectués sur les données sont les mêmes.

Cinq LiveNodes (C1, C2, ... C5) ont été placés sur les toits (capots) de voitures sur le parking de l'ISIMA comme le montre la Figure III- 33. Les données GPS sont diffusées (broadcast) en utilisant le protocole CIVIC [53]. Ces données sont enregistrées par une station ZigBee reliée à un ordinateur portable. Les données sont traitées en différé (offline) en utilisant un programme en C++ et MATLAB. L'expérimentation a eu lieu le 25/11/2008 entre 13h et 14h pour une durée approximative de 50 minutes.

Le Tableau III—7 résume les informations de positionnement (l'écart type) des 5 capteurs.



Figure III- 33 Lieu des expérimentations (parking ISIMA)

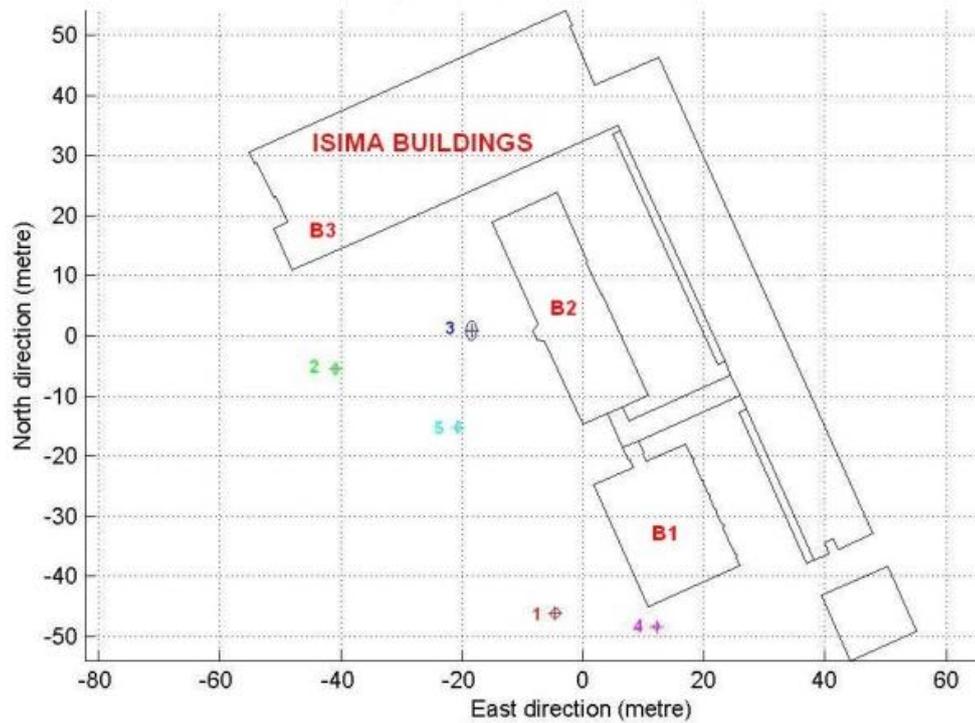


Figure III- 34 La disposition des 5 capteurs

Les 5 capteurs sont présentés sur la Figure III- 34. Ils sont représentés, respectivement, par les couleurs : rouge (C1), vert (C2), bleue (C3), magenta (C4) et cyan (C5). La position du capteur est schématisée par une croix (+) et sa précision par une ellipse en se basant sur les écarts types en X et Y. Les blocs B1, B2, B3 représentent les bâtiments de l'ISIMA entourant le parking où se sont déroulées les expérimentations. Les hauteurs des bâtiments B1, B2, B3 sont approximativement de 2, 5 et 10 mètres.

La Figure III- 35 présente les nuages des points des 5 capteurs. La Figure III- 36 illustre les précisions obtenues pour chaque capteur.

A partir de la Figure III- 36, on voit clairement que le capteur C3 (bleue) a la mauvaise précision et cela s'explique par deux raisons : à cause des bâtiments, la visibilité du ciel est limitée et l'effet du multi-trajet est accentué pour ce capteur.

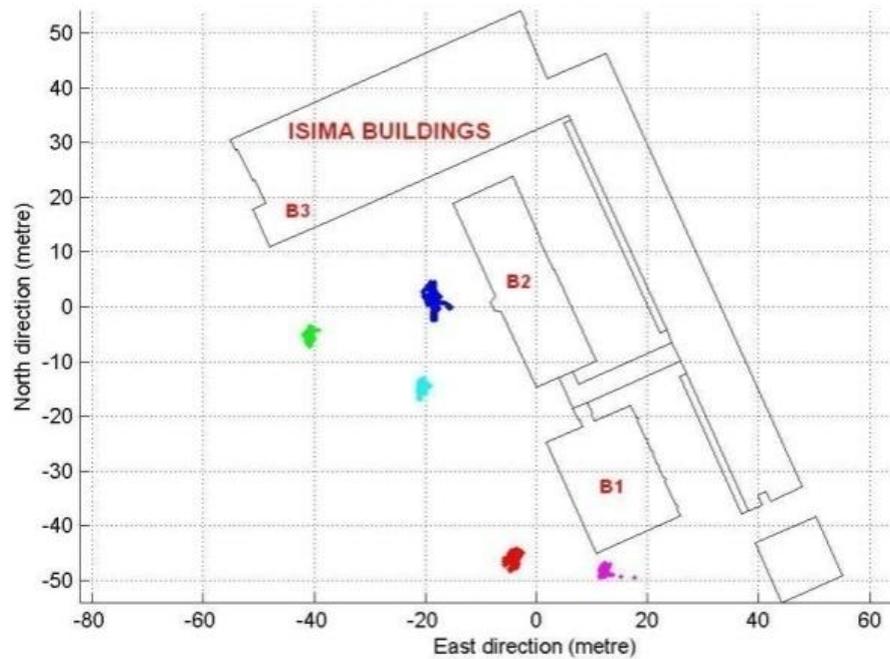


Figure III- 35 Les nuages de points des 5 capteurs

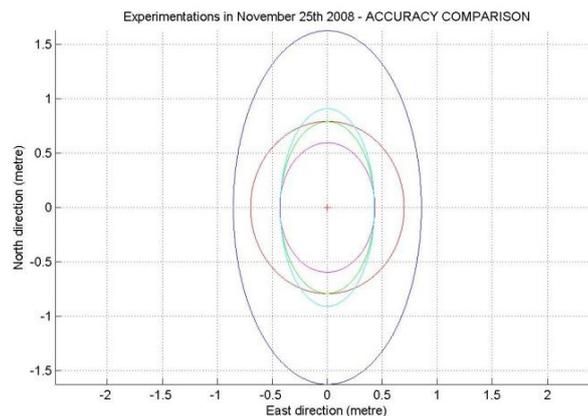


Figure III- 36 Comparaison des précisions des 5 capteurs

Dans le Tableau III—7, les valeurs en vert représentent les meilleures valeurs observées de l'écart-type. Les valeurs en rouge sont les mauvaises valeurs de l'écart type.

Ecart type(m)	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3	Capteur 4	Capteur 5
Nombre d'échantillons	2397	2719	2815	1307	1907
X	0.698	0.430	0.855	0.433	0.427
Y	0.791	0.790	1.624	0.594	0.907
Z	4.564	1.928	5.872	2.381	2.300

Tableau III—7 Résumé des écarts types des 5 capteurs (25/11/2008)

Pour plusieurs applications du GPS la composante Z (l'altitude) n'est pas utilisée. Dans les tableaux suivants, on se limite aux composantes X et Y. La première colonne à gauche représente le capteur utilisé comme station de base et pour chaque capteur X et Y sont respectivement les directions est et nord. Les valeurs données dans les tableaux suivants sont les écarts types obtenus après l'application d'un traitement comme la différence simple par exemple. Les valeurs en vert

représentent des améliorations ; celles en rouge représentent des dégradations. Le premier tableau résume les résultats de l'application de la différence simple en utilisant chaque capteur comme station de référence.

Dans le Tableau III—8, les valeurs en vert représentent des améliorations, les valeurs en rouge représentent des dégradations (cette convention reste valable sur les tableaux suivants).

Capteur		C1	C2	C3	C4	C5
C1	X	-	0.673	1.007	0.820	0.702
	Y	-	0.662	2.009	1.148	0.673
C2	X	0.663	-	0.923	0.597	0.540
	Y	0.651	-	1.921	1.013	0.659
C3	X	0.845	0.863	-	0.673	1.033
	Y	1.893	1.926	-	1.319	1.881
C4	X	0.802	0.554	0.868	-	0.592
	Y	0.972	0.915	1.699	-	1.037
C5	X	0.856	0.547	0.913	0.655	-
	Y	0.769	0.811	2.031	1.020	-

Tableau III—8 Résultats de la différence simple

Analyse des résultats de la différence simple :

Les résultats de la différence simple dans cette expérimentation sont plus mauvais que ceux obtenus dans les expérimentations présentées dans les précédents paragraphes. Ils sont même plus mauvais que ceux des données originales. Ce résultat peut être expliqué pour deux raisons :

- Dans les expérimentations précédentes (scénario I- espace ouvert), les capteurs sont placés dans un lieu sans obstacles. Dans cette expérimentation, et selon la position des 5 capteurs, chaque capteur avait ses erreurs propres. Par conséquent, l'application de la différence simple rajoute d'autres erreurs aux positions (initiales) des autres capteurs et ce qui augmente alors la valeur de l'écart type.
- Les positions GPS des précédentes expérimentations sont obtenues par un lien direct (un lien point à point entre le capteur et la station qui enregistre les données GPS) et avec une fréquence de 1 Hz (1 position par seconde). Dans cette expérimentation, la station qui enregistre les coordonnées GPS, n'avait pas de lien direct avec les autres capteurs. Les informations de quelques capteurs ont besoin de faire plusieurs sauts avant d'arriver au niveau de la station qui enregistre les positions GPS (la portée de chaque capteur a été limitée par programmation à 40 mètre. Le but initial de l'expérimentation étant de tester le protocole de communication CIVIC et notamment l'envoi directionnel des messages). A cause du multi-saut, des coordonnées pour quelques secondes sont manquantes. Par conséquent, la différence n'est pas toujours faite avec les données (de correction) de la même seconde. Quelquefois, il y a un décalage temporel entre les données de référence et les positions actuelles des capteurs.

Analyse des résultats du filtrage et de la différence simple :

Cette étape consiste, en premier lieu, à appliquer un filtre (EMA- Exponential Moving Average) avec le paramètre $\alpha = 0.99$. Les écarts types des données filtrées sont plus réduits que ceux des données originales (la partie haute du Tableau III—9, en bleu). L'application de la différence simple

sur les données filtrées donne des résultats meilleurs que l'application de la différence simple seule mais reste insuffisants.

Capteur		C1	C2	C3	C4	C5
Données filtrés	X	0.550	0.305	0.555	0.221	0.292
	Y	0.546	0.719	1.354	0.410	0.725
C1	X	-	0.496	0.606	0.495	0.554
	Y	-	0.619	1.719	0.786	0.345
C2	X	0.505	-	0.540	0.439	0.385
	Y	0.550	-	1.581	0.839	0.434
C3	X	0.505	0.347	-	0.587	0.519
	Y	1.603	1.065	-	1.581	1.669
C4	X	0.518	0.345	0.472	-	0.355
	Y	0.693	0.814	1.414	-	0.865
C5	X	0.641	0.363	0.539	0.392	-
	Y	0.379	0.550	1.645	0.795	-

Tableau III—9 Résultats de la différence simple avec les données filtrées

Analyse des résultats de la différence intelligente :

La différence intelligente consiste à considérer les erreurs instantanées comme suit :

- Si les deux erreurs ont le même sens (chaque composante X et Y est considérée séparément), alors la correction est la valeur minimale des deux erreurs.
- Si les deux erreurs ont deux sens différents, alors la correction est la moyenne des deux erreurs.

Le Tableau III—10 montre que les résultats de la différence intelligente sont plus intéressants que la différence simple combiné avec le filtrage. Le capteur C5 (cyan) peut corriger les positions de tous les autres capteurs. Mais, le capteur C3 (bleu) reste toujours le mauvais capteur pour corriger les positions des autres capteurs.

Capteur		C1	C2	C3	C4	C5
C1	X	-	0.4955	0.595	0.306	0.362
	Y	-	0.3950	1.012	0.554	0.419
C2	X	0.478	-	0.553	0.339	0.290
	Y	0.373	-	1.146	0.467	0.515
C3	X	0.574	0.548	-	0.391	0.573
	Y	1.001	1.194	-	0.779	0.809
C4	X	0.997	1.020	0.924	-	1.547
	Y	0.600	0.578	0.867	-	0.566
C5	X	0.504	0.285	0.482	0.337	-
	Y	0.432	0.484	0.948	0.483	-

Tableau III—10 Résultats de la différence intelligente

Analyse des résultats du filtrage et de la différence intelligente :

Le Tableau III—11 montre que la différence intelligente combinée avec le filtrage, donne les meilleurs résultats par rapport au filtrage et la différence intelligente seuls. Le capteur C3 (bleue) donne toujours les mauvais résultats. Pour pouvoir choisir un capteur, il est alors nécessaire d'avoir une vue globale des erreurs des capteurs.

Afin que l'utilisation de la différence intelligente soit possible (notamment pour un mobile où une référence ou moyenne de positionnement n'existe pas), il est nécessaire d'avoir au moins deux stations de références.

Capteur		C1	C2	C3	C4	C5
C1	X	-	0.391	0.432	0.273	0.298
	Y	-	0.335	0.698	0.363	0.291
C2	X	0.393	-	0.364	0.242	0.240
	Y	0.344	-	0.864	0.333	0.412
C3	X	0.358	0.354	-	0.231	0.336
	Y	0.672	0.882	-	0.740	0.645
C4	X	0.318	0.321	0.442	-	0.227
	Y	0.400	0.461	0.847	-	0.488
C5	X	0.380	0.251	0.311	0.242	-
	Y	0.270	0.383	0.869	0.363	-

Tableau III—11 Résultats de la différence intelligente avec les données filtrées

Synthèse :

- La différence intelligente donne des résultats meilleurs que la différence simple.
- Le filtrage améliore les résultats de la différence simple ainsi que la différence intelligente.
- La différence intelligente combinée avec le filtrage et une vue globale permettent d'avoir une meilleure correction.

7 La correction globale

Les méthodes différence simple et 'différence intelligente' utilisent une et deux stations de base respectivement. Leur généralisation pour s'appliquer au réseau de stations de base se fait comme suit :

1- La généralisation de la différence simple est obtenue en utilisant la moyenne des erreurs observées au niveau de toutes les stations comme correction différentielle.

2- La généralisation de la 'différence intelligente' se fait de la manière suivantes :

- Soit n_1 le nombre des stations avec des erreurs positives
- Soit n_2 le nombre des stations avec des erreurs négatives
- On prend le minimum des erreurs positives, on l'appelle E_1 .
- On prend le maximum des erreurs négatives, on l'appelle E_2 .
- La correction globale (c) est définie alors avec la formule suivante : $c = \frac{1}{(n_1+n_2)}(n_1E_1 + n_2E_2)$
- Les stations avec des erreurs instantanées nulles ne sont pas comptées pour le calcul de la correction.

A partir des données de la précédente expérimentation, nous avons appliqué la différence simple avec respectivement, 2, 3 et 4 stations. Les résultats obtenus sont montrés dans les trois tableaux III—12, III—13 et III—14. Dans ces tableaux, si les données d'une station sont absentes, ça veut dire

que la station est utilisée comme station de référence. Cette convention reste valable dans la suite du chapitre.

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	0.8693	0.5974	0.5142
Y (m)	-	-	1.8337	0.9432	0.6642
X	-	0.5747	-	0.6039	0.6905
Y	-	1.0152	-	0.8719	1.0459
X	-	0.4311	0.8501	-	0.4911
Y	-	0.7202	1.7310	-	0.7974
X	-	0.4486	0.8674	0.5896	-
Y	-	0.6238	1.8440	0.9962	-
X	0.6701	-	-	0.5160	0.6141
Y	1.0470	-	-	0.8571	1.0377
X	0.7044	-	0.8718	-	0.4707
Y	0.7240	-	1.7056	-	0.7882
X	0.6744	-	0.8787	0.4974	-
Y	0.5966	-	1.8204	0.9445	-
X	0.7304	0.5511	-	-	0.6280
Y	1.2023	1.1513	-	-	1.2621
X	0.7125	0.5468	-	0.5141	-
Y	1.0274	1.0130	-	0.8448	-
X	0.7386	0.4463	0.8779	-	-
Y	0.6976	0.6953	1.7082	-	-

Tableau III—12 Résultats de la différence simple globale (2 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	0.5427	0.5603
Y (m)	-	-	-	0.8107	0.8472
X	-	-	0.8484	-	0.4637
Y	-	-	1.7431	-	0.7125
X	-	-	0.8571	0.5389	-
Y	-	-	1.8219	0.9405	-
X	-	0.4732	-	-	0.5567
Y	-	0.8986	-	-	0.9876
X	-	0.4775	-	0.5419	-
Y	-	0.8092	-	0.8176	-
X	-	0.4105	0.8498	-	-
Y	-	0.6467	1.7481	-	-
X	0.6808	-	-	-	0.5255
Y	0.9427	-	-	-	0.9858
X	0.6631	-	-	0.4822	-
Y	0.8287	-	-	0.8020	-
X	0.6958	-	0.8677	-	-
Y	0.6370	-	1.7312	-	-
X	0.7069	0.4768	-	-	-
Y	0.9259	0.8923	-	-	-

Tableau III—13 Résultats de la différence simple globale (3 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	-	0.5035
Y (m)	-	-	-	-	0.8570
X	-	-	-	0.5126	-
Y	-	-	-	0.8092	-
X	-	-	0.8490	-	-
Y	-	-	1.7547	-	-
X	-	0.4374	-	-	-
Y	-	0.7784	-	-	-
X	0.6773	-	-	-	-
Y	0.8067	-	-	-	-

Tableau III—14 Résultats de la différence simple globale (4 stations)

Synthèse :

On remarque que la différence simple toute seule, même en utilisant plusieurs stations ne permet pas d'améliorer la précision pour tous les capteurs.

La deuxième méthode testée est la combinaison de la différence simple avec le filtrage. Les résultats de cette méthode sont donnés dans les trois tableaux III—15, III—16 et III—17.

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	0.5158	0.3565	0.3777
Y (m)	-	-	1.5306	0.7134	0.4535
X	-	0.3680	-	0.3130	0.4644
Y	-	0.8600	-	0.6180	0.8598
X	-	0.3192	0.5202	-	0.3662
Y	-	0.6823	1.4657	-	0.6149
X	-	0.3160	0.5271	0.3266	-
Y	-	0.5788	1.5720	0.7249	-
X	0.4870	-	-	0.3047	0.3818
Y	0.8828	-	-	0.6482	0.8180
X	0.5210	-	0.5291	-	0.3188
Y	0.5070	-	1.4079	-	0.5847
X	0.5186	-	0.5342	0.3243	-
Y	0.4096	-	1.5265	0.7435	-
X	0.5127	0.3433	-	-	0.3825
Y	0.9789	0.9726	-	-	1.0487
X	0.5143	0.3336	-	0.2642	-
Y	0.8274	0.8302	-	0.6307	-
X	0.5485	0.3143	0.5479	-	-
Y	0.4361	0.6194	1.4447	-	-

Tableau III—15 Résultats du filtrage+la différence simple globale (2 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	0.3006	0.3826
Y (m)	-	-	-	0.5869	0.6598
X	-	-	0.5087	-	0.3326
Y	-	-	1.4576	-	0.5235
X	-	-	0.5125	0.3129	-
Y	-	-	1.5348	0.7160	-
X	-	0.3129	-	-	0.3790
Y	-	0.7846	-	-	0.8120
X	-	0.3068	-	0.2767	-
Y	-	0.6901	-	0.5829	-
X	-	0.2943	0.5193	-	-
Y	-	0.6087	1.4864	-	-
X	0.4939	-	-	-	0.3355
Y	0.7547	-	-	-	0.7829
X	0.4937	-	-	0.2801	-
Y	0.6612	-	-	0.6016	-
X	0.5223	-	0.5307	-	-
Y	0.4191	-	1.448	-	-
X	0.5133	0.3068	-	-	-
Y	0.7169	0.7546	-	-	-

Tableau III—16 Résultats du filtrage+la différence simple globale (3 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	-	0.3444
Y (m)	-	-	-	-	0.6760
X	-	-	-	0.2807	-
Y	-	-	-	0.5935	-
X	-	-	0.5122	-	-
Y	-	-	1.4773	-	-
X	-	0.2905	-	-	-
Y	-	0.6822	-	-	-
X	0.5002	-	-	-	-
Y	0.6189	-	-	-	-

Tableau III—17 Résultats du filtrage+la différence simple globale (4 stations)

Synthèse :

Cette fois-ci, la combinaison de la différence simple et le filtrage permet d'améliorer la précision :

- Avec l'utilisation de 2 stations de référence, les résultats obtenus (précision) sont meilleurs que ceux obtenus par l'utilisation de la différence simple avec une seule station de référence.
- L'utilisation de 3 stations de référence, donne des résultats meilleurs par rapport à l'utilisation de 2 stations de référence. Cependant, elle ne permet pas d'améliorer la précision de tous les capteurs
- L'utilisation de 4 stations permet d'améliorer la précision de tous les capteurs.

La troisième méthode testée est la 'différence intelligente'. Les résultats de cette méthode sont montrés dans les trois tableaux III—18, III—19 et III—20.

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	0.8725	0.5382	0.4833
Y (m)	-	-	1.8517	0.9131	0.5854
X	-	0.6704	-	0.5810	0.8462
Y	-	0.9999	-	0.7604	0.8923
X	-	0.5754	0.9240	-	0.4982
Y	-	0.6884	1.7912	-	0.8124
X	-	0.5184	0.9567	0.5198	-
Y	-	0.6234	1.9352	0.9543	-
X	0.6700	-	-	0.5105	0.5984
Y	0.8792	-	-	0.6158	0.9804
X	0.6768	-	0.8806	-	0.4866
Y	0.7326	-	1.7270	-	0.7853
X	0.6645	-	0.8668	0.4783	-
Y	0.6198	-	1.8489	0.7855	-
X	0.7369	0.6827	-	-	0.8299
Y	1.3269	1.4158	-	-	1.1821
X	0.7381	0.5258	-	0.5238	-
Y	1.2157	1.3169	-	0.7101	-
X	0.7195	0.4298	0.8358	-	-
Y	0.7509	0.7582	1.7628	-	-

Tableau III—18 Résultats de la différence intelligente globale (2 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	0.4994	0.5804
Y (m)	-	-	-	0.6310	0.7731
X	-	-	0.8623	-	0.4588
Y	-	-	1.7175	-	0.7430
X	-	-	0.8579	0.4703	-
Y	-	-	1.8063	0.8045	-
X	-	0.6404	-	-	0.7953
Y	-	0.9720	-	-	0.8719
X	-	0.4804	-	0.4967	-
Y	-	0.9388	-	0.7234	-
X	-	0.5387	0.9658	-	-
Y	-	0.6737	1.7949	-	-
X	0.6829	-	-	-	0.5858
Y	0.8271	-	-	-	0.9002
X	0.6818	-	-	0.4694	-
Y	0.7778	-	-	0.5447	-
X	0.6605	-	0.8651	-	-
Y	0.7191	-	1.7195	-	-
X	0.7175	0.5081	-	-	-
Y	1.1461	1.2596	-	-	-

Tableau III—19 Résultats de la différence intelligente globale (3 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	-	0.5736
Y (m)	-	-	-	-	0.8225
X	-	-	-	0.4673	-
Y	-	-	-	0.6164	-
X	-	-	0.8619	-	-
Y	-	-	1.7049	-	-
X	-	0.4876	-	-	-
Y	-	0.9463	-	-	-
X	0.6825	-	-	-	-
Y	0.7877	-	-	-	-

Tableau III—20 Résultats de la différence intelligente globale (4 stations)

Synthèse :

Comme la différence simple, l'utilisation de la différence intelligente avec plusieurs stations, permet d'améliorer la précision de quelques capteurs, mais pas de la totalité.

La quatrième méthode testée est la combinaison de la 'différence intelligente' avec le filtrage. Les résultats de cette méthode sont montrés dans les trois tableaux III—21, III—22 et III—23.

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	0.5454	0.2207	0.2977
Y (m)	-	-	1.3263	0.4149	0.8869
X	-	0.3104	-	0.2209	0.3046
Y	-	0.7786	-	0.4154	0.8972
X	-	0.3059	0.5652	-	0.2910
Y	-	0.9633	1.5563	-	0.7746
X	-	0.3032	0.5572	0.2207	-
Y	-	0.8976	1.5032	0.4119	-
X	0.5503	-	-	0.2207	0.2920
Y	0.5459	-	-	0.4097	0.7249
X	0.5503	-	0.5553	-	0.2920
Y	0.6172	-	1.2748	-	0.7710
X	0.5290	-	0.5524	0.2207	-
Y	0.7234	-	1.1862	0.4097	-
X	0.5503	0.3052	-	-	0.2920
Y	0.6455	0.6627	-	-	0.7875
X	0.5184	0.3124	-	0.2207	-
Y	0.7575	0.6542	-	0.4097	-
X	0.5542	0.3061	0.5560	-	-
Y	0.5273	0.8530	1.4943	-	-

Tableau III—21 Résultats du filtrage+la différence intelligente globale (2 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	0.2207	0.2977
Y (m)	-	-	-	0.4122	0.8256
X	-	-	0.5454	-	0.2977
Y	-	-	1.3419	-	0.8708
X	-	-	0.5497	0.2207	-
Y	-	-	1.2632	0.4108	-
X	-	0.3104	-	-	0.3046
Y	-	0.7787	-	-	0.8889
X	-	0.3094	-	0.2207	-
Y	-	0.6897	-	0.4108	-
X	-	0.3032	0.5572	-	-
Y	-	0.9644	1.5703	-	-
X	0.5503	-	-	-	0.2920
Y	0.6172	-	-	-	0.7710
X	0.5290	-	-	0.2207	-
Y	0.7234	-	-	0.4097	-
X	0.5290	-	0.5524	-	-
Y	0.7234	-	1.1862	-	-
X	0.5184	0.3124	-	-	-
Y	0.7575	0.6542	-	-	-

Tableau III—22 Résultats du filtrage+la différence intelligente globale (3 stations)

	C1	C2	C3	C4	C5
X (m)	-	-	-	-	0.2977
Y (m)	-	-	-	-	0.8414
X	-	-	-	0.2207	-
Y	-	-	-	0.4104	-
X	-	-	0.5497	-	-
Y	-	-	1.2830	-	-
X	-	0.3094	-	-	-
Y	-	0.6931	-	-	-
X	0.5290	-	-	-	-
Y	0.7234	-	-	-	-

Tableau III—23 Résultats du filtrage+la différence intelligente globale (4 stations)

Synthèse :

Comme avec la différence simple, la combinaison du filtrage avec de la différence intelligente, permet d'améliorer la précision de tous les capteurs avec l'utilisation de 4 stations de référence.

8 Expérimentations sur la plateforme PAVIN

8.1 Présentation de la plateforme PAVIN

PAVIN (Plate-forme d'Auvergne pour Véhicules INtelligents) est un site de 5000 m² offrant aux petits véhicules de type « Cycab » la possibilité d'évoluer dans des environnements réalistes « urbain » d'une part avec 317 m de voies goudronnées entre façades d'immeubles, avec carrefour, rondpoint, zone de montée de passagers ... , et « rural » d'autre part avec 264 m de pistes stabilisées avec zone en pente, sol instable (« bac à sable »), anneau de vitesse (15 km/h max) ...

Équipement du site : informatique et commande centralisée, caméras, couverture WiFi, feux de signalisation, éclairage, GPS centimétrique, sonorisation, borne d'appel, bornes « Energie ».

Elle est opérationnelle depuis le 15 septembre 2008 (site de la maison de l'innovation¹⁹).



Figure III- 37 Un Cycab avec un LiveNode



Figure III- 38 La plateforme PAVIN – Circuit urbain

8.2 Scénario I : Correction globale

Cette expérimentation [52] a eu lieu le 23 avril 2009 entre 12h et 14h (GMT) pour une durée approximative de 90 minutes. Neuf LiveNodes ont été utilisés : 8 sur des positions fixes et un mobile (capteur 7).

La Figure III- 39 montre les coordonnées obtenues pour les 9 capteurs (fixes et mobiles). Deux capteurs fixes (capteurs 8 et 9) avaient un problème de batterie et même ils n'étaient pas aux mêmes endroits pendant toute l'expérimentation. Ils sont exclus des évaluations des différentes méthodes de corrections.

Remarques : Les capteurs ont été posés à même le sol, ce qui explique leur mauvaise réception. La plateforme PAVIN dispose aussi de murs, ce qui limite la visibilité du ciel pour certains capteurs.

¹⁹ <http://www.maisoninnovationcg63.fr/La-plate-forme-Pavin-des-vehicules.html>

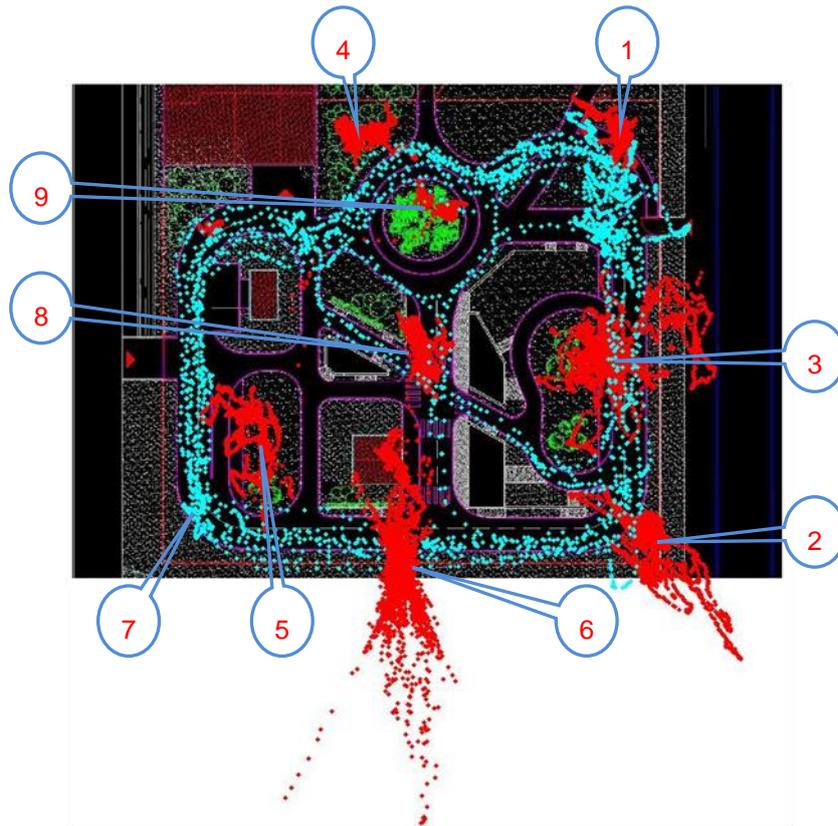


Figure III- 39 PAVIN- Positions des capteurs fixes (rouge) et mobile (cyan)

Comme nous l'avons vu pour les corrections précédentes, si le nombre de stations de référence est réduit (1, 2, 3 et même 4) les résultats de traitements ne sont pas très concluants. Pour cela, nous commençons par utiliser 4 puis 5 et enfin 6 stations de référence. Un nombre inférieur à 4 donne des résultats insatisfaisants.

Parmi les trajets effectués par le cycab (mobile) nous avons pris au hasard un et appliqué les traitements présentés dans les sections précédentes : différence simple, différence intelligente, filtrage, combinaison du filtrage et de la différence simple, la combinaison du filtrage et de la différence intelligente. On considère que la meilleure solution est celle qui donne moins de point à l'extérieur de la route (sur les trottoirs).

Evaluation avec 6 stations :

On commence par les traitements avec 6 stations de référence car il n'y a qu'une seule combinaison. Sur la Figure III- 40 (et les deux figures suivantes) sont présentés les positions originales ainsi que les résultats des différents traitements avec les conventions suivantes :

- En rouge, les coordonnées originales (trajet original),
- En bleu, le résultat de la 'différence intelligente',
- En magenta, le résultat de la combinaison du filtrage et la 'différence intelligente',
- En vert, le résultat de la différence simple,

- En cyan, le résultat de la combinaison du filtrage et la différence simple,
- Les croix en rouge (au centre des ellipses) représentent les positions estimées des stations de référence. Les ellipses montrent la précision de la localisation pour chaque station de référence.

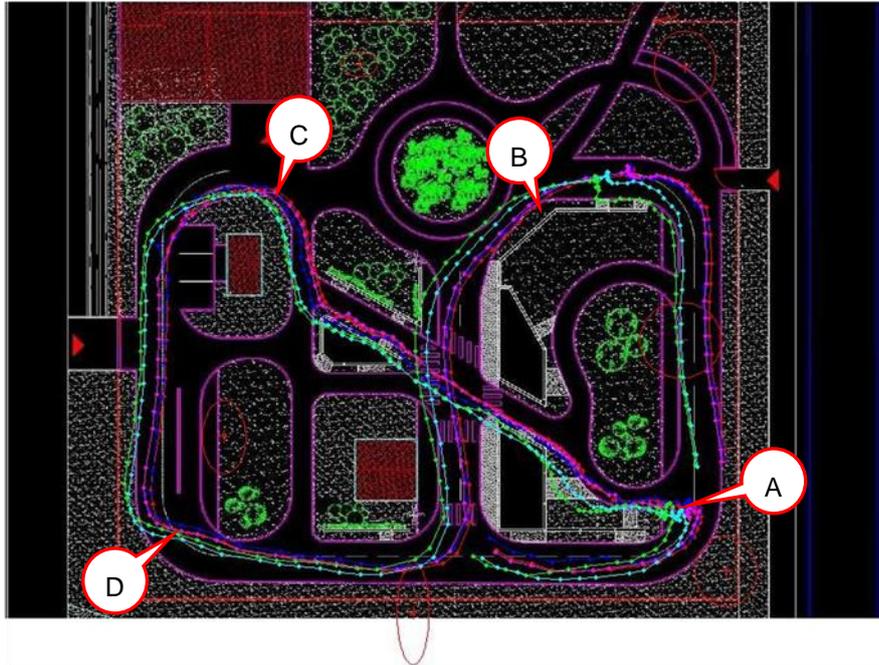


Figure III- 40 Pavin - Correction pour un mobile avec 6 stations de référence

Analyse du résultat : Un bilan global est difficile à établir, car pour un mobile, on n'a pas de référence sauf si on embarque un GPS centimétrique (DGPS – RTK) et considère ces positions comme une référence (c'est le cas du scénario II ci-dessous). Néanmoins, si nous supposons que le véhicule était tout le temps sur la route, nous pouvons considérer le trajet avec le plus petit nombre de points à l'extérieur de la route (sur les trottoirs) est le mieux localisé.

On remarque que les différents traitements ont un comportement globalement similaire, sauf aux virages (positions A, B, C et D sur la figure) où on voit surtout des changements de direction des erreurs.

Au final, on trouve que le trajet résultant de la différence intelligente combiné avec le filtrage donne les meilleurs résultats. En deuxième position on trouve la différence intelligente. La différence simple combinée avec le filtrage arrive troisième et en fin la différence simple.

Evaluation avec 5 stations :

Avec 5 stations, il y a 6 combinaisons, nous montrons sur la Figure III- 41 que le traitement en utilisant une seule combinaison de stations de référence (1-2-3-4-5)



Figure III- 41 Pavin - Correction pour un mobile avec 5 stations de référence

Analyse du résultat : Comme dans le cas d'utilisation de 6 stations, la différence intelligente combinée avec le filtrage donne le meilleur résultat.

Evaluation avec 4 stations :

Avec 4 stations, il y a 15 combinaisons, nous montrons sur la Figure III- 42 que le traitement en utilisant une seule combinaison de stations de référence (1-2-3-4)



Figure III- 42 Pavin - Correction pour un mobile avec 4 stations de référence

Analyse du résultat : Comme dans les cas d'utilisation de 6 et 5 stations, la différence intelligente combinée avec le filtrage donne le meilleur résultat. Cependant, avec les différentes combinaisons

entre les stations de référence, on remarque qu'il y a des disparités de résultats entre les différentes combinaisons notamment pour la différence simple.

Synthèse :

Un bilan global est difficile à établir, vu le nombre global des combinaisons possibles entre stations de référence ainsi que l'absence d'une référence pour un mobile. En effet, un mobile ne dispose pas de référence sauf si on embarque un GPS centimétrique et considérer ces positions comme une référence (c'est le cas du scénario II ci-dessous).

Globalement, la différence intelligente combinée avec le filtrage donne le meilleur des résultats. Elle est suivie par la différence intelligente seule (pas de filtrage). La troisième place est pour la différence simple combinée avec le filtrage et enfin la différence simple.

8.3 Scénario II : La moyenne de plusieurs récepteurs GPS

Dans cette expérimentation, 2 LiveNodes ont été embarqués à bord d'un cycab déjà équipé d'un GPS centimétrique (GPS différentiel – RTK, de marque Thalès). Les antennes GPS des deux capteurs ont été placées à 57.5 cm à droite et à gauche de l'antenne du GPS centimétrique (La position donnée par le récepteur GPS est celle de son antenne).

Les données des trois récepteurs GPS sont enregistrées. La fréquence des positions des deux LiveNodes est de 1 Hz. Pour le GPS-RTK, la fréquence est de 10 Hz. Les données enregistrées sont projetées sur la carte de la plateforme PAVIN (Figure III- 43). La ligne en bleu est la trace du GPS-RTK. La ligne en vert est la trace du capteur droit. La ligne en rouge est la trace du capteur gauche. La ligne en magenta représente la moyenne des données du récepteur droit et gauche.



Figure III- 43 PAVIN- trace d'un mobile avec 3 récepteur GPS

Analyse du résultat : On remarque que dans la partie haute de la Figure III- 43 (partie 3), les deux traces des deux LiveNodes se trouvent du même côté par rapport au GPS-RTK. Leur moyenne, ne permet donc pas de se rapprocher des positions données par le GPS-RTK (considéré comme référence pour le mobile). Cependant, dans la plus grande partie du trajet (partie 1 et 2), les traces des LiveNodes se trouvent à droite et à gauche du GPS-RTK. Leur moyenne se rapproche alors à la trace du GPS-RTK même si on remarque que la trace du récepteur droit (vert) devienne à gauche du GPS-RTK et que la trace du récepteur gauche devienne à droite du GPS-RTK.

9 Conclusion

Ce chapitre a présenté notre majeure contribution consistant en une nouvelle méthode de correction différentielle du GPS appelé LCD-GPS (Low Cost Differential GPS, Local Cooperative DGPS). Elle consiste à utiliser un réseau de capteurs sans fil dont les nœuds coopèrent pour donner une correction différentielle.

Plusieurs traitements ont été exposés, expérimentés et analysés. Ces méthodes sont : l'utilisation d'une carte numérique (map matching), la différence simple, la différence intelligente, le filtrage, la combinaison du filtrage avec la différence simple et la différence intelligente et l'utilisation de la moyenne de plusieurs récepteurs GPS.

Plusieurs expérimentations ont eu lieu (à l'ISIMA et sur la plateforme PAVIN). L'évaluation des différentes méthodes donne le résultat suivant :

- La différence intelligente donne des résultats meilleurs que la différence simple.
- Le filtrage améliore les résultats de la différence simple ainsi que la différence intelligente.
- La différence intelligente combinée avec le filtrage et une vue globale permettent d'avoir une meilleure correction.

Cependant, une étude plus étendue dans le temps (durée des expérimentations), permettra d'avoir plus de critères de choix de la méthode mais surtout d'avoir plus de confiance avec une méthode de correction ou avec une autre. Un autre facteur est le nombre de stations et leur disposition, si on augmente le nombre de stations on aura plus 'd'observateurs' est donc plus de confiance dans les corrections proposées.

Une utilisation d'antennes spéciales permet de diminuer l'effet du multi-trajet et d'améliorer la précision. Néanmoins cette solution augmente le prix de l'équipement (récepteur GPS+antenne spéciale)

Une autre solution est d'utiliser les réseaux de neurones pour l'apprentissage et la déduction des erreurs communes aux stations de base.

IV La plateforme matérielle et logicielle et ses applications

1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la plateforme matérielle et logicielle utilisée pour réaliser toutes nos expérimentations et d'évaluer notre solution du GPS différentiel (LCD-GPS).

Le schéma ci-dessous illustre l'architecture matérielle et logicielle d'un LiveNode dédié à la réalisation d'un LCD-GPS.

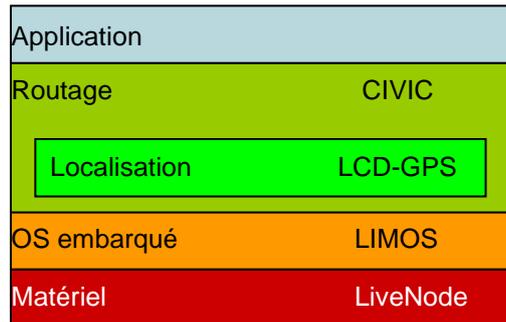


Figure IV- 1 Architecture matérielle et logicielle d'un LiveNode dédié au LCD-GPS

La plateforme matérielle est composée d'un ensemble de capteurs (LiveNode) et de station de base (Station ZigBee/Wi-Fi). Avant de présenter notre plateforme, les plateformes les plus connues dans le domaine des RCSF seront passées en revue.

La plateforme logicielle est composée de trois parties :

- Un système d'exploitation embarqué (LIMOS)
- Un protocole de routage (CIVIC)
- Un système de localisation (LCD-GPS) intégré au niveau de CIVIC.

Le chapitre se termine par la présentation des projets industriels réalisés à partir des différentes générations de CSF développés au sein de notre équipe de recherche SMIR (Systèmes Multi-sensoriels Intégrés Intelligents Répartis) du laboratoire LIMOS UMR 6158 CNRS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes).

2 Architecture Matérielle

Ces dernières années ont vu naître un nouveau type de réseaux appelés Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF), grâce notamment aux progrès récents dans la microélectronique et les technologies de transmission sans fil.

Actuellement, plusieurs Capteurs Sans Fil (CSF) ayant approximativement les mêmes caractéristiques sont réalisés afin de répondre aux besoins de la recherche et de l'industrie. Cependant tous ces capteurs (TmoteSky, Mica Mote, BTnode, µNode, EyesIFX,...) ont des capacités limitées et ils ne sont adaptés qu'à la réalisation d'un capteur simple (sensor) : température, humidité, luminosité, radiation, vibration, ...

2.1 Les plateformes existantes

Différentes plateformes existent. Elles diffèrent par le microcontrôleur utilisé, le système d'exploitation embarqué, le support de communication sans fil et sa portée, la consommation électrique, la taille, le prix ...

Parmi les capteurs sans fil existant, les plus connus sont Tmote Sky, MICAx (Mica2, MicaZ, Mica2dot), BTnode, μ Node et EyesIFX.

Le Tableau IV—1 compare 5 plateformes très connues dans le monde de la recherche.

	Tmote Sky	MICA2	BTnode	μ Node	EyesIFX
Photo					
μ Contrôleur	MSP430F1611	ATMEGA 128L	ATMEGA 128L	MSP430	MSP430F1611
Fréquence	8 MHz	8 MHz	8 MHz	4.6 MHz	8 MHz
RAM	10 kB	4 kB	64 + 180 kB	10 kB	10 kB
ROM	48 kB	128 kB	128 kB	48 kB	48 kB
Interface	- 6 GPIO - 6 ADC - I ² C, SPI, USB	- DIO - 8 ADC - 2 UART, I ² C, SPI	- GPIO - ADC - UART, I ² C, SPI	- 8 GPIO - 8 ADC et 2 DAC - JTAG, I ² C, SPI, USART	- DIO - ADC - SPI
Senseur (capteur)	humidité, luminosité, température	humidité, luminosité, température	humidité, luminosité, IR, température, microphone, accéléromètre (2 axes)	humidité, luminosité, température, mouvement	luminosité, température, RSSI
OS embarqué	TinyOS	TinyOS	BTnut, TinyOS	AmbientRT, TinyOS compatible	TinyOS
Emetteur/récepteur	Chipcon CC2420 (802.15.4)	CC1000 (-)	CC1000 (Bluetooth)	-	TDA5250
Portée - Extérieur - Intérieur	- 125 m - 50 m	- 152.40 m - - m	- >100 m - - m	- 200 m - 50 m	- - m - 15-30 m
Source d'énergie	2 piles AA (2.1 – 3.6V)	2 piles AA	DC (3.8 – 5V) ou 2 piles AA	2 piles AA (2.7 – 3.6V)	Pile bouton
Consommation - Au repos - RX/TX	- 5.1 μ A - 19.5 / 21.8 mA	- 16 μ A - 18 / 35 mA	- 9.9 mW (moy.) - 105.6 mW (moy)	- 2.5 μ A - 9 / 12.5 mA	- 0.2 mA - 9 / 12 mA
Prix	\$130	\$169	\$165	-	\approx 300 €/5 capteurs

Tableau IV—1 Comparaison entre les CSF existants [65]

Les plateformes existantes ont toutes des architectures matérielles similaires (équivalentes). Elles sont basées sur des microcontrôleurs RISC 8 ou 16 bits à faible consommation d'énergie. Pour la communication sans fil, la nouvelle tendance est d'utiliser le standard ZigBee (IEEE 802.15.4) comme médium d'accès sans fil.

Une comparaison plus étendue ainsi que d'autres plateformes peuvent être trouvés dans [65].

La réalisation des RCSF nécessite d'avoir une architecture matérielle et logicielle dédiée à cause des contraintes de ressources. Cependant comme le RCSF est un domaine de recherche très récent et ses domaines d'applications sont très larges et variés, il est nécessaire de développer un capteur avec plus de fonctionnalités pour permettre ainsi de prototyper rapidement une application bien déterminée. Le but étant d'avoir un CSF qui permet de valider une application en vérifiant sa faisabilité en termes de fonctionnalités (coopération, protocole de communication, prise en compte de la

contrainte énergétique (energy-aware), gestion des événements, gestion du multitâche, ...) et de consommation des ressources. Un tel capteur permet aussi de valider des concepts logiciels et matériels afin de minimiser la consommation énergétique, la taille du capteur et les pannes. Enfin, après le prototypage, il permet par la suite de développer un capteur optimal dédié à l'application désirée.

Le domaine d'applications des RCSF est très vaste et plusieurs problèmes restent encore ouverts et non-résolus (la consommation électrique, la taille, le coût, la fiabilité, ...). Pour élargir le champ d'application des CSF, nous proposons un CSF (nœud) versatile appelé LiveNode qui permet de prototyper rapidement une application. Ce CSF peut être utilisé pour différents domaines d'applications comme la télémédecine, la communication inter-véhicule (Projets MobiPlus et SUAB), la collecte de données environnementales (NeT-ADDED, New Technologies to Avoid Digital Division in e-Divided areas), etc.

2.2 Le LiveNode

La plateforme matérielle utilisée dans toutes nos expérimentations est basée sur un capteur appelé LiveNode [51](LIMOS²⁰ Versatile Embedded Node). Ce capteur (nœud) a été développé par notre équipe de recherche (SMIR, Systèmes Multi-sensoriels Intégrés Intelligents Répartis). Il permet de prototyper rapidement une application bien déterminée. Il a été utilisé dans plusieurs applications comme la télémédecine (capteur de détection de l'arythmie cardiaque [66]), la communication inter-véhicules (projet MobiPlus [58]), collecte de données environnementales (projet européen NeT-ADDED²¹).

Le LiveNode est l'association d'une architecture matérielle et d'un système d'exploitation embarqué LIMOS (Lightweight Multithreading Operating System) afin de permettre la réalisation d'un prototype d'une application très rapidement.

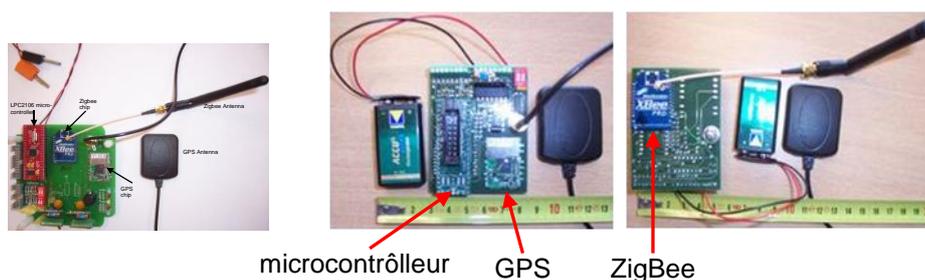


Figure IV- 2 Le LiveNode (deux générations)

(A gauche, une ancienne version du LiveNode, elle utilise le microcontrôle LPC2106 de Philips Semiconductors [61].)

Le LiveNode est une petite carte électronique de 70x55mm. Il est alimenté avec une batterie standard 9V.

²⁰ Lightweight Multi-threading Operating System

²¹ <http://www.netadded-project.eu/>

Le LiveNode, comme le montre la Figure IV- 3, est composé de :

- Un microcontrôleur à base d'un cœur ARM7TDMI (ATMEL AT91SAM7S256) [62][63]
- Un médium d'accès sans fil ZigBee (XBee Pro [68]) pour assurer la communication sans fil. L'utilisation d'un médium d'accès sans fil WiFi est aussi possible (si l'application en a besoin). Le choix a été porté sur ce module pour les raisons suivantes : le coût (25 €) – la portée de 1 mile (1.852 km) à l'extérieur et 200m à l'intérieur. Il est à noter que la portée du Wi-Fi est de 200m à l'extérieur. Pour la plupart d'applications, le besoin en terme de bande passante est relativement faible (256000 baud/s).
- Un récepteur GPS en option (selon les besoins de l'application).

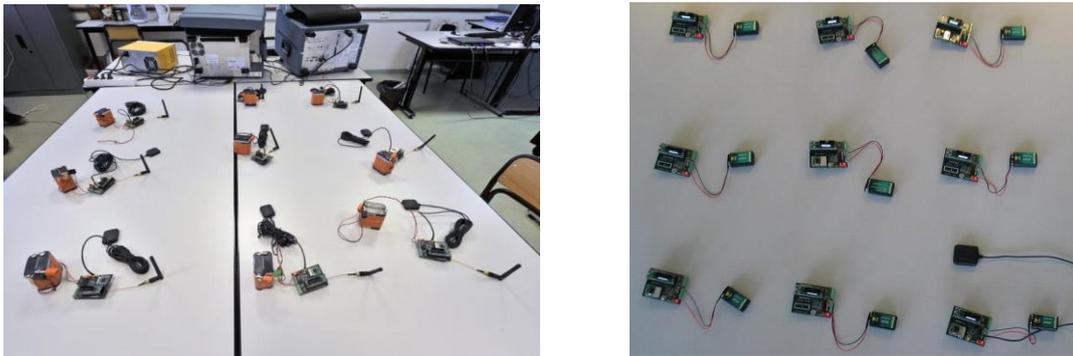


Figure IV- 3 Un ensemble de LiveNodes

Microcontrôleur

LIMOS a été porté avec succès sur différents microcontrôleurs; la dernière version utilise un ATMEL AT91SAMSS256 qui est basé sur un ARM7TDMI. Les principales caractéristiques de ce processeur sont :

- 64 Ko de mémoire SRAM et 256 Ko de mémoire Flash,
- 2 USART (plus un 3^{ième} pour le débogage) et un port USB esclave,
- une interface SPI Maître/Esclave,
- un contrôleur synchrone série (SSC),
- un support d'interface I2S,
- 1 convertisseur A/D 8 voies 10 bits,
- 9 voies DMA,
- 1 contrôleur parallèle IN/OUT et 3 timers.

La fréquence d'horloge de l'AT91SAM7S256 peut être configurée entre 500 Hz et 55 MHz. Ainsi, il est possible de trouver un compromis entre performance et consommation en réglant la fréquence du processeur.

Le médium d'accès sans fil :

Le LiveNode peut être équipé de trois types différents de médium d'accès sans fil : Wi-Fi (IEEE 802.11b), ZigBee (IEEE 802.15.4) ou MODEM GSM (GPRS). De ce fait, pour réaliser un

capteur sans fil multi-support on peut connecter 2, 3 ou 4 LiveNodes équipés de différents médiums d'accès ensemble (via l'interface SPI par exemple).



Figure IV- 4 Le multi-support WiFi-ZigBee (2 LiveNodes connectés ensemble)

Selon l'application on peut choisir le médium d'accès le plus approprié. Le Wi-Fi est très intéressant pour se connecter à Internet et il est indispensable pour des applications comme : smart-care, smart-home, ... Le module Wi-Fi utilisé est le Wi-EM de Digi International Inc. Il a une portée de 200m à l'extérieur et consomme 400mA [64].

Le ZigBee est mieux adapté pour les applications qui ne nécessitent pas une bande passante importante. Il a une portée plus grande que le Wi-Fi à l'extérieur et une portée équivalente au WiFi à l'intérieur. De plus, sa consommation d'énergie et son coût sont inférieurs à ceux du module WiFi existant sur le marché.

Etude de coûts

Le LiveNode n'est qu'une plateforme expérimentale et il n'est pas un produit commercial. Cependant, une version du LiveNode (μ Contrôleur + ZigBee + GPS) peut être évaluée à environ 200 €. Ce coût est dû à la fabrication en faible quantité.

Comparaison avec les autres CSF existants :

Le LiveNode (son microcontrôleur) dispose de plus de ressources (CPU et mémoire) que les autres CSF existants. De ce fait, il permet de prototyper rapidement une application dans différents domaines plus ou moins complexes qui ont besoins plus ou moins de ressources comme la télémédecine, la communication inter-véhicule, la collecte de données environnementales, ... Par conséquent, le LiveNode consomme plus d'énergie que les CSF existants. Le liveNode est utilisé comme plateforme expérimentale pour valider certains concepts comme le respect des contraintes énergétiques (energy-aware), l'architecture collaborative (coopération entre composants), ...

Il n'y a qu'une seule plateforme qui a le GPS en option : EnRoute400 [65]. Il est donc nécessaire de développer notre propre plateforme.

2.3 La station de base (ZigBee/Wi-Fi)

Cette station est réalisée aussi au laboratoire LIMOS. Elle est reliée à un ordinateur (portable) via une liaison série RS-232.

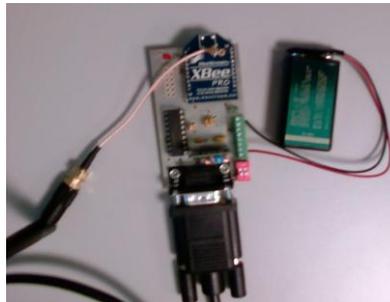


Figure IV- 5 La station ZigBee

Cette station permet notamment de recevoir les données diffusées par la liaison sans fil. Elle est utilisée aussi pour communiquer avec les LiveNodes en leur envoyant des messages de contrôle.

Pour le GPS, elle permet de demander à une station de base de fournir sa position actuelle, sa position moyenne, l'écart-type de sa position, l'heure ainsi que la correction actuelle (différence simple).

Elle peut servir aussi comme station Wi-Fi, il suffit de brancher un module Wi-Fi (Wi-EM de Digi International Inc) au lieu du module ZigBee (Digi International Inc) sur l'emplacement prévu.

Dans toutes nos expérimentations sur le LCD-GPS, nous n'avons utilisé que des LiveNodes et des stations de base (ou de contrôle) équipés avec des modules ZigBee.

3 Architecture Logicielle

3.1 Les systèmes d'exploitation embarqués dédiés aux RCSF

Il existe plusieurs systèmes d'exploitation (Operating System) dédiés aux RCSF. Ils peuvent être classés en trois catégories :

- 1- ceux basés sur les événements comme TinyOS [67] et Contiki [ref],
- 2- ceux basés sur le multithreading comme MantisOS [ref] et NutOS [ref],
- 3- ceux basés sur le multitâche centré données comme AmbientRT [ref].

Comme nous l'avons déjà vu, dans le Tableau I-2, Tmote Sky, Mica2 et EyesIFX utilisent TinyOS, BTNode utilise NutOS et TinyOS ; μ Node utilise AmbientRT et TinyOS.

Cependant ces systèmes ne prennent pas en compte le concept de tolérance aux pannes, ni celui d'architecture multicomposants qui implique un haut niveau d'abstraction pour les drivers. De plus, les systèmes orientés événements ne sont pas adaptés aux applications temps réel complexes et les systèmes basés sur le multithreading ne sont pas adaptés aux applications avec des ressources limitées [51].

Un nouveau système a donc été conçu pour répondre aux besoins précédemment exprimés : LIMOS (Lightweight Multi-threading Operating System) [71][72].

3.2 Le système LIMOS

LIMOS combine les avantages de TinyOS [68] et de SDREAM [70]. Pour cela, il peut être utilisé pour toutes les applications des RCSF qu'elles forment une seule tâche ou un ensemble de tâches (multitâche).

Les principales caractéristiques de LIMOS sont :

- Tolérances aux pannes : LIMOS possède un « chien de garde » qui redémarre le système en cas de défaillance. C'est un timer réinitialisé à temps régulier, en cas de blocage du système par exemple, cette réinitialisation n'aura pas lieu et quand le timer arrive à zéro, le système redémarre automatiquement.
- Mécanisme de synchronisation et de communication entre les composants est basé sur le concept du langage parallèle LINDA (tuple et IN/OUT) [70], permettant d'avoir plusieurs CPU et plusieurs threads. Ce concept utilise un espace d'échanges nommé "tuple" avec des primitives d'accès IN & OUT pour la communication entre les événements, les threads, les périphériques et les CPU.
- Utilisation d'un méta langage : LIMOS est système temps réel avec un méta langage (KML : Kernel Modeling Language) qui définit les primitives du système ainsi que leur mode de fonctionnement.
- Une architecture à deux niveaux : événements et threads. LIMOS est défini comme un ensemble d'événements. Chaque événement est un ensemble de threads. La Figure IV- 6 illustre ce découpage. Les événements et les threads sont interruptibles (ils peuvent être interrompus), mais seuls les threads sont préemptibles (ils peuvent être suspendus). Quand LIMOS n'a qu'un seul événement composé de plusieurs threads, il se comporte comme SDREAM (multitâche pur) et, lorsque chaque événement ne possède qu'un thread, son fonctionnement est similaire à celui de TinyOS (événementiel pur)
- Une politique d'ordonnancement à deux niveaux : "event-driven" (ordonnancement haut niveau des événements) et "priority-based preemptive" (ordonnancement bas niveau des threads).

Une instance R de LIMOS peut être définie comme suit :

$$R = \{E_i : i = 1..n; E_1 \Rightarrow E_2 \dots \Rightarrow E_n\} \quad (1)$$

$$E_i = \{T_{ij} : j = 1..m; T_{i1} \parallel T_{i2} \dots \parallel T_{im}\} \quad (2)$$

Où E est un événement et T un thread. Le symbole ' \Rightarrow ' indique une opération séquentielle et le symbole ' \parallel ' indique une opération parallèle.

A chaque événement et chaque thread est associé un niveau de priorité qui détermine l'ordre d'exécution.

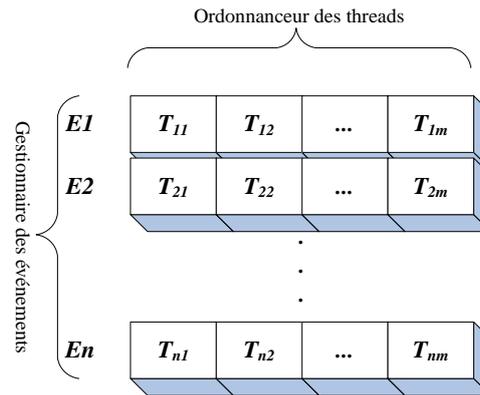


Figure IV- 6 L'architecture de LIMOS

LIMOS possède deux types d'événements : les matériels et les logiciels. Les événements matériels sont asynchrones et sont produits par les différents périphériques du CPU via les différentes interfaces (UART, I2C, SPI,...). Les événements logiciels sont, quant à eux, synchrones et produits par les exceptions logicielles (connexion réseau par exemple).

Les threads sont formés d'appels à des procédures qui réalisent les traitements des événements. Les threads sont les éléments essentiels des événements. Un événement contient au moins un thread. Une instance de LIMOS contient au moins un événement.

Au-dessus de cette couche d'abstraction du matérielle viennent se greffer les autres couches logicielles d'une application, parmi lesquelles la couche réseau.

3.3 Les algorithmes de routages existants (MANET)

Il existe quatre catégories de protocoles de routage pour les MANET (Mobile Ad hoc Network) :

- Les proactifs : ils maintiennent les tables de routage à jour. Pour cela, ils envoient périodiquement des messages de découverte des voisins. Les principaux protocoles proactifs sont : OLSR (Optimized Link State Routing) [75], DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) [76], and TBRPF (Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) [77].
- Les réactifs : ils ne cherchent les chemins pour envoyer les données qu'en cas de besoins. Les principaux protocoles réactifs sont : DSR (Dynamic Source Routing) [78], ABR (Associativity Based Routing) [79], AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector) [79][80].
- Hybrides : ils combinent les avantages des protocoles proactifs et réactifs en maintenant une table de routage à jour pour les voisins immédiats et ne cherche de chemin de routage pour les autres nœuds qu'en cas de besoins. Le plus connu est ZRP (Zone Routing Protocol) [81]. Il comporte deux composantes : une proactive en intra-zone et une réactive en inter-zone.
- Géographiques : ils utilisent les positions des nœuds (et éventuellement leur vitesse) pour acheminer l'information à destination. On trouve dans cette catégorie : LAR (Location-Aided

Routing) [82], DREAM (A distance routing effect algorithm for mobility) [83], GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks) [84].

Comparaison

Comme les protocoles proactifs maintiennent des tables de routage à jour pour atteindre la plupart ou la totalité des nœuds, les informations sont envoyées sans délai d'attente. Ils réagissent vite, cependant ils consomment de la bande passante en envoyant des messages de contrôle périodiquement. Ils sont adaptés pour des réseaux à forte réactivité de taille moyenne et d'une faible mobilité.

Les protocoles réactifs ont un temps de latence car ils doivent chercher la route pour atteindre le nœud destination. Une fois la route trouvée, il n'y a aucune latence. A l'inverse des protocoles proactifs, les protocoles réactifs ne consomment pas de la bande passante pour maintenir à jour la table de routage. Ce type de protocole est donc adapté aux réseaux de grande taille et avec une mobilité faible.

Les protocoles hybrides combinent les avantages des protocoles proactifs et réactifs, donc ils essaient de trouver un compromis entre la consommation de la bande passante et du temps de latence. Cependant, plus la complexité du routage augmente, plus les ressources du capteur seront prises. Un compromis doit être trouvé entre les ressources exploitées et les bénéfices réalisés.

Les protocoles géographiques exploitent les positions et les vitesses des nœuds ; cela suppose que chaque nœud dispose de ces deux informations. Le champ d'application de ce type de routage se trouve ainsi limité aux nœuds équipés de système de localisation comme le GPS par exemple.

Notre équipe de recherche développe un protocole de communication sans fil appelé CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative) [73][52][53]. C'est un protocole géographique destiné aux communications inter-véhicules.

3.4 Le protocole CIVIC

Les principales caractéristiques de CIVIC sont :

- 1- **L'utilisation du multi-support** : le protocole CIVIC prend en charge le multi-support i.e. l'utilisation de plusieurs médiums d'accès sans fil. Comme on l'a déjà vu, le LiveNode supporte l'utilisation du WiFi, ZigBee ou le GSM (GPRS). Pour avoir la possibilité d'utiliser deux supports il suffit de connecter deux LiveNodes via les bus SPI ou I²C.
- 2- **Support du mode ad hoc et infrastructure** : Le protocole CIVIC est conçu pour la communication inter-véhicules. Pour assurer la connectivité du réseau dans toutes les conditions de circulation (mode ad hoc impossible en cas densité faible des véhicules), des MMRS (Multi-support, Multi-service Routers and Servers) sont prévus pour assurer l'accès au réseau de tous les nœuds et d'améliorer la qualité de service (QoS). La Figure IV- 7 illustre comment les informations sont échangées entre deux nœuds en mode ad hoc et infrastructure via les MMRS.

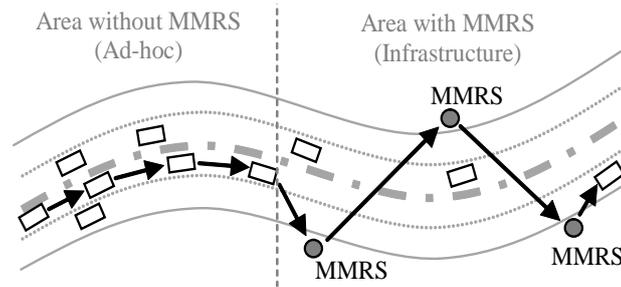


Figure IV- 7 CIVIC - Architecture mixte Ad-hoc et infrastructure

- 3- **Prise en compte du contexte** : CIVIC est défini dans un contexte de communication inter-véhicules. Les nœuds sont alors distribués autour des voies de circulation avec des mouvements directionnels (bien déterminés). Un facteur important du contexte est la distribution des nœuds. Elle peut être utilisée pour estimer l'utilisation de la bande passante. Quand un nœud (véhicule) passe par un MMRS, il envoie un message contenant son identifiant (VID- Vehicle IDentifier). Le message peut contenir aussi sa position, ce qui permet au MMRS d'estimer la distribution des véhicules et par conséquent une meilleure connaissance de l'état du trafic routier en temps réel. La direction est autre facteur très important de la connaissance du contexte. L'introduction de la direction permet d'améliorer le taux de réception des messages (PDR- Packet Delivery Ratio) ainsi que le délai de transmission [74].
- 4- **Garantie de la stabilité des liens à un saut** : un moyen pour assurer la QoS est de maintenir la stabilité des liens de communication. Le protocole CIVIC assure cette stabilité par l'exploration des nœuds voisins. Cette exploration est proactive et elle est réalisée par l'échange de message « HELLO », et elle n'est effectuée que si la stabilité des liens à un saut n'est plus à jour.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_r = \infty, \text{ if } v_r^{\max} = v_s; \\ \Delta t_r = \frac{R + x_s - x_r^{\max}}{v_r^{\max} - v_s}, \text{ if } x_r^{\max} > x_s \text{ and } v_r^{\max} > v_s; \\ \Delta t_r = \frac{R + x_r^{\max} - x_s}{v_s - v_r^{\max}}, \text{ if } x_r^{\max} < x_s \text{ and } v_r^{\max} < v_s; \\ \Delta t_r = \frac{x_r^{\max} - x_s}{v_s - v_r^{\max}}, \text{ otherwise.} \end{array} \right.$$

avec R est la portée du dispositif de communication sans fil, x_s est la position du nœud source et v_s est sa vitesse moyenne ; x_r^{\max} est la position d'un nœud voisin et v_r^{\max} est sa vitesse moyenne. x_r^{\max} et v_r^{\max} sont ajustées avec les imprécisions du GPS. Les équations ci-dessus signifient que l'envoi du message « Hello » dépend de la distance entre le nœud source, et son voisin et de leur vitesse relative.

- 5- **DANKAB** (Directional Area Neighbour Knowledge Adaptive Broadcast) : Le protocole CIVIC adopte le concept de DANKAB pour les transmissions multi-sauts. La Figure IV- 8 illustre ce principe. Les positions des nœuds source (S) et destination (D) sont connues. Si la position du nœud destination n'est pas connue, elle peut être obtenue par inondation (SF- Simple Flooding). Si un nœud S envoie des données vers le nœud D, un nœud intermédiaire ne participe au broadcast que s'il se trouve dans la direction du nœud D. Cette direction est définie par l'angle $\pm\alpha$. La valeur initiale de α est de 30° . Si aucun nœud ne se trouve dans cette direction, l'angle α est augmenté graduellement à 45° puis 90° et enfin à 180° .

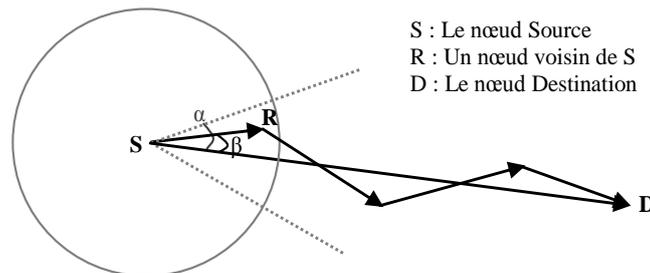


Figure IV- 8 Le concept de DANKAB

Un nœud R ne participe donc au broadcast que si $-\tan \alpha \leq \tan \beta \leq \tan \alpha$. $\tan \beta$ est calculé par la formule ci-dessous :

$$\tan \beta = \frac{(x_r - x_s)(y_d - y_s) - (y_r - y_s)(x_d - x_s)}{(x_r - x_s)(x_d - x_s) + (y_r - y_s)(y_d - y_s)}$$

La structure de la pile CIVIC

Le protocole a une structure de pile en quatre couches: application, réseau, couche MAC et couche d'adaptation MAC-Radio.

Ce protocole est implémenté avec le système d'exploitation embarqué LIMOS vu dans la section précédente.

Le fonctionnement du LCD-GPS dans CIVIC est le suivant : le LCD-GPS fournit les positions au protocole de routage CIVIC. Au début, il n'y a aucune correction et LCD-GPS délivre au protocole de routage CIVIC la position du GPS standard fournie par le récepteur GPS. Après la réception des corrections différentielles, le LCD-GPS fournit au protocole de routage CIVIC la nouvelle position corrigée.

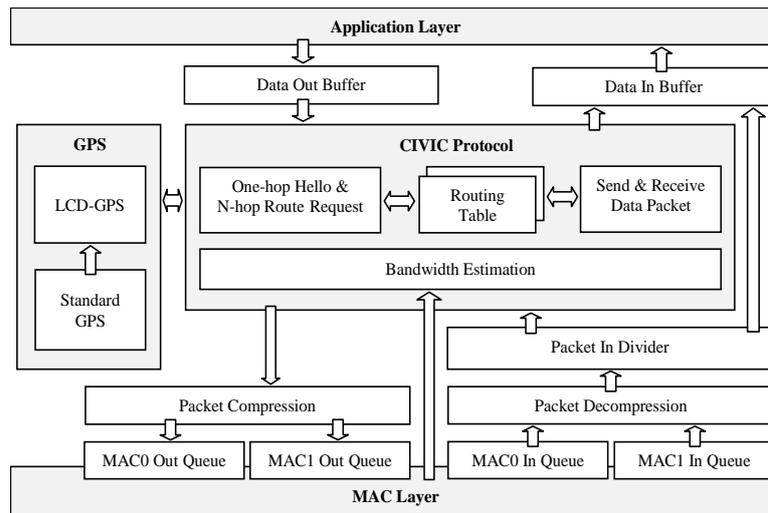


Figure IV- 9 La structure du protocole CIVIC avec LCD-GPS

Différentes expérimentations ont été réalisées pour évaluer conjointement CIVIC et LCD-GPS. Les résultats pour LCD-GPS ont été présentés au chapitre III. Nous ne discuterons ici que des résultats du protocole de routage CIVIC.

Expérimentation à l'ISIMA

Cette expérimentation [53] a eu lieu sur le parking de l'ISIMA (la même expérimentation décrite dans le chapitre III\Expérimentations à L'ISIMA\scénario 2, sauf ici, on présente les tests avec 9 LiveNodes au lieu des 5 présentés précédemment). Nous nous intéressons qu'à un seul aspect de cette expérimentation qui est la comparaison entre l'utilisation de l'algorithme de diffusion DANKAB dans CIVIC et l'inondation (SF, Simple Flooding). Afin de réaliser ce test correctement, la portée du ZigBee a été limitée à 40 m par programme (sinon, tous les nœuds peuvent se communiquer directement sans passer par des nœuds intermédiaires)

Scénario 1 : les huit nœuds demandent des informations de routage vers le nœud 'Destination' en utilisant le SF (l'inondation).

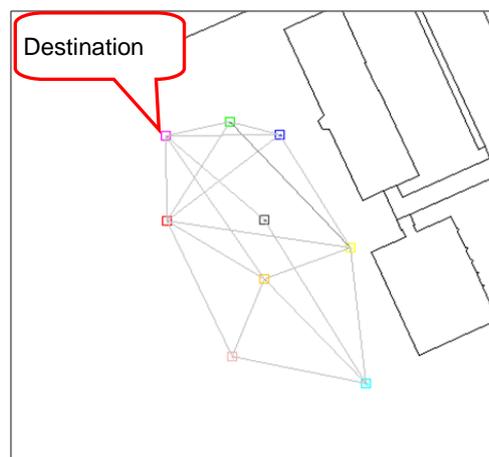


Figure IV- 10 La topologie du routage avec le SF

Scénario 2 : les huit nœuds demande des informations de routage vers le nœud 'Destination' en utilisant DANKAB (utilisation de la direction).

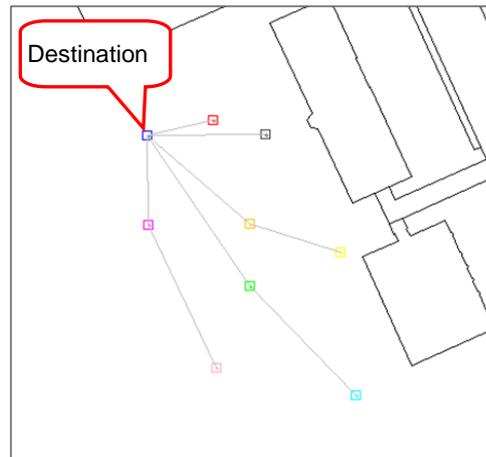


Figure IV- 11 La topologie du routage avec DANKAB

Résultats :

Dans le 1^{er} scénario, le nombre de saut moyen est de 2.1 tandis que dans le 2^{ème} cas, il n'est que de 1.39. A partir des deux figures IV- 10 et IV- 11, on voit clairement que dans le 1^{er} scénario, les routes trouvées ne respectent aucune direction car c'est le 1^{er} nœud qui reçoit l'information qui la diffuse. Par contre, dans le 2^{ème} scénario, on constate que les routes trouvées sont les plus appropriées.

Test sur la plateforme PAVIN

Cette expérimentation [53][52] a eu lieu sur la plateforme PAVIN (la même expérimentation décrite dans le chapitre III\Expérimentations sur la plateforme PAVIN).

Le but de l'expérimentation est d'évaluer la performance du protocole CIVIC embarqué sur un véhicule (Cycab, un véhicule électrique utilisé dans le monde de la recherche pour tester des algorithmes liés à la mobilité en général : guidage automatique, circulation en convoie, détection d'obstacle, ...). La Figure IV- 12 montre la disposition des capteurs sur la plateforme PAVIN. Le LiveNode S8 était embarqué sur un Cycab.

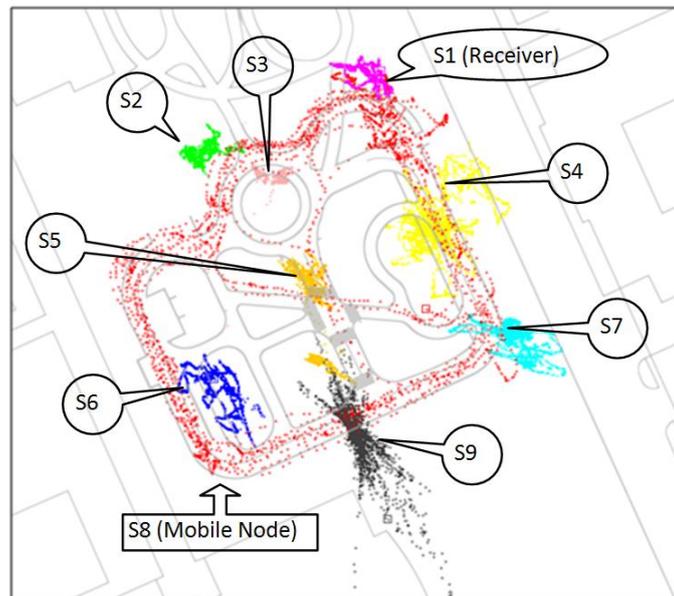


Figure IV- 12 Test de CIVIC sur PAVIN (disposition des nœuds)

Scénario : Un cycab est conduit du point A jusqu'au point F, il commence à demander les informations de routage vers le capteur S1 chaque 5 secondes. Les lignes grises représentent les chemins par lesquels la demande de routage ou sa réponse est passée.

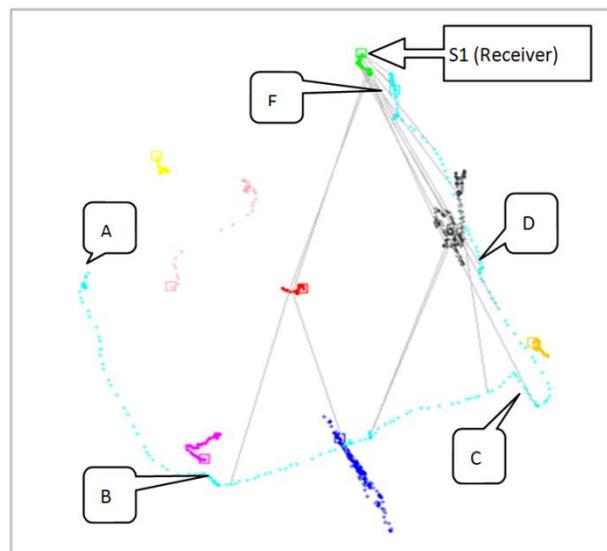


Figure IV- 13 Test de CIVIC sur PAVIN avec un mobile (véhicule cycab)

Résultats : A partir de la Figure IV- 13, on remarque que dans chaque segment du trajet de B jusqu'à F, les informations de routage passe par le nœud intermédiaire le plus approprié et que les transmissions respectent bien le mode directionnel.

3.5 Le LCD-GPS – Traitements GPS

Pour une station de référence, il y a deux phases :

- la première est la recherche de la position exacte,
- la deuxième est la délivrance d'une correction différentielle.

Pour les autres capteurs, il y a deux options :

- la première consiste à utiliser une carte numérique,
- la deuxième est l'utilisation de la solution différentielle (différence simple et différence intelligente entre autres).

Recherche de la position exacte

La Figure IV- 14 illustre le principe de la recherche de la position exacte. A chaque seconde, les informations envoyées par un récepteur GPS standard sous forme de trames NMEA, sont décodées pour extraire la position instantanée, la vitesse, l'heure et la date. Cette extraction est réalisée en utilisant un automate qui commence par vérifier le code de détection des erreurs (CRC, cyclic redundancy check) et par la suite la détermination de quelles trames NMEA il s'agit et enfin décodé chaque champ de la trame concernée (Les format complets des trames NMEA les plus utilisées sont donnés dans l'ANNEXE IV – Description du protocole NMEA – 0183). Les données de localisation sont éventuellement filtrées puis un calcul de la moyenne et de l'écart type est effectué. A la fin de cette phase la position trouvée est considérée comme la position réelle de la station de référence.

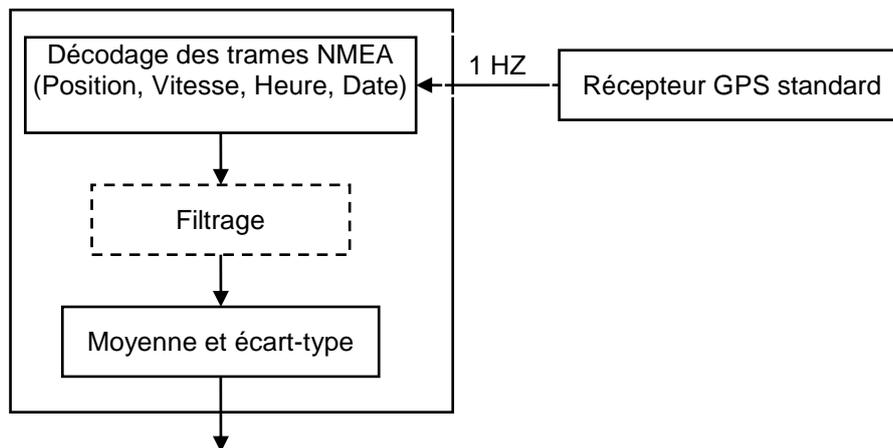


Figure IV- 14 LCD-GPS pour une station de référence – Phase I

Délivrance d'une correction différentielle

A partir des données de localisation instantanées délivrées par le récepteur GPS (éventuellement filtrées) et de la position réelle déjà connue, une fonction de correction (Différence simple, différence intelligente) est appliquée. Les paramètres résultants de cette fonction sont envoyés via le support sans fil au bénéfice des autres capteurs (LiveNodes). Le principe de cette deuxième phase qui constitue le rôle principal d'une station de base est illustré sur la Figure IV- 15

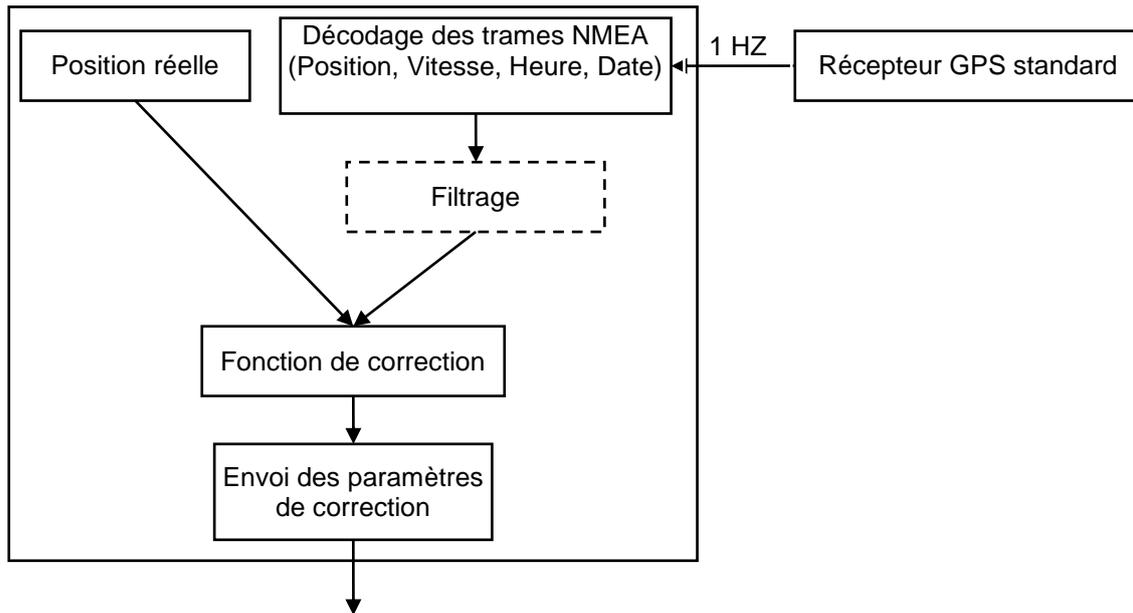


Figure IV- 15 LCD-GPS pour une station de référence – Phase II

Utilisation d'une carte numérique

Pour un capteur utilisant une carte numérique (map matching), cette carte est embarquée au niveau du capteur sous forme vectorielle. A chaque réception d'une nouvelle position, cette position est projetée sur le segment de la route le plus proche en respectant le sens de circulation. Les segments sont ordonnés avec le sens de circulation. Le principe de cette correction est illustré sur la Figure IV- 16.

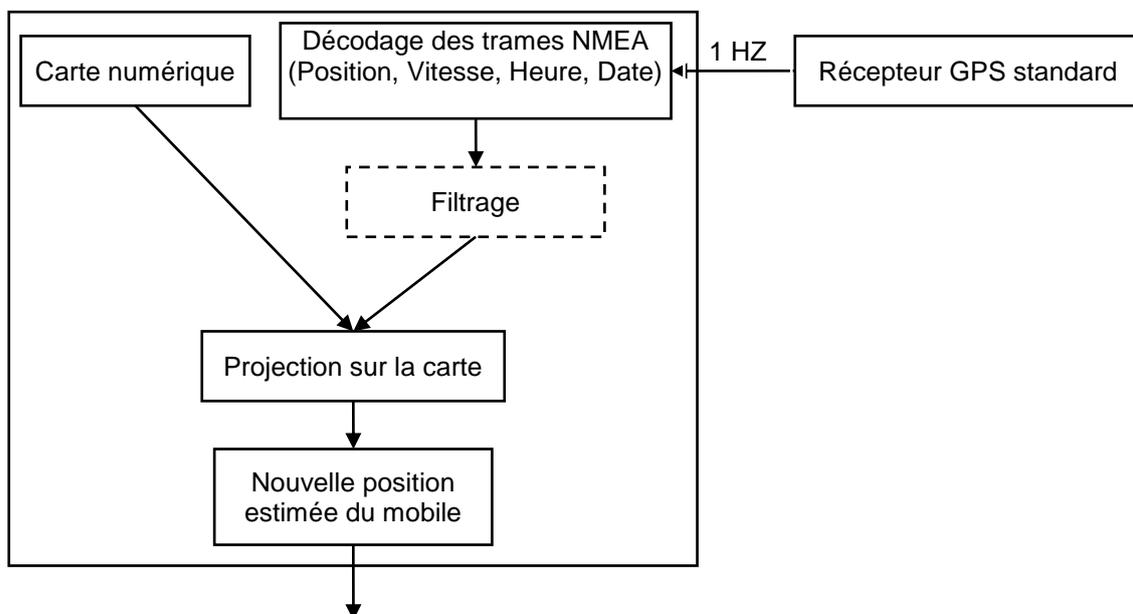


Figure IV- 16 LCD-GPS Utilisation d'une carte numérique

Application de la correction différentielle

Pour l'utilisation des méthodes de correction différentielles discutées dans le chapitre III, le fonctionnement de LCD-GPS est le suivant : une fois les paramètres de correction reçus (dx , dy , dz), et la position reçue à partir du récepteur GPS décodée, la fonction de correction est alors appliquée et la position calculée est considérée comme la vraie position du mobile (ou d'un autre capteur fixe). Le principe est illustré sur la Figure IV- 17.

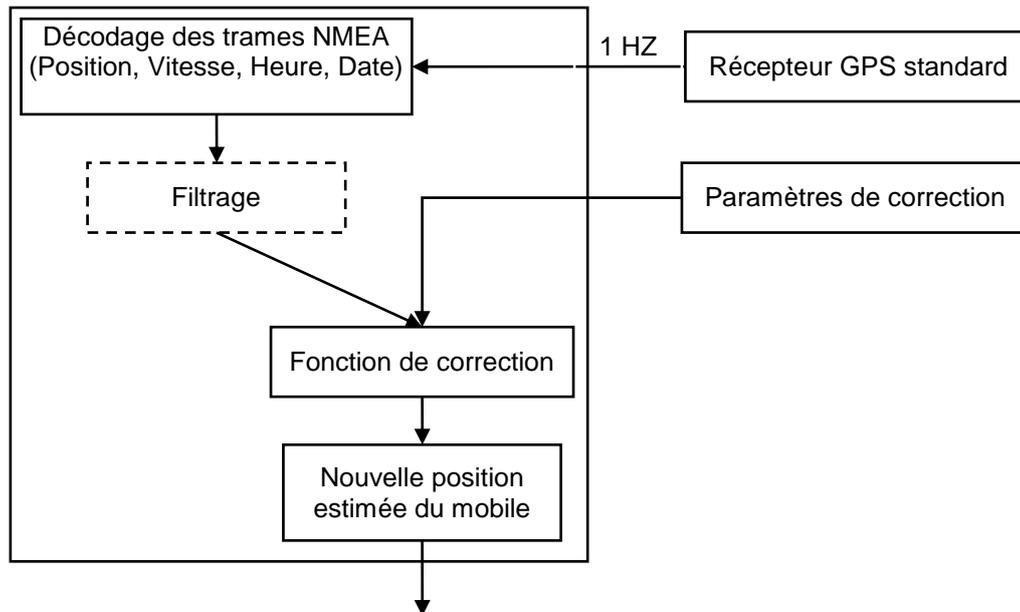


Figure IV- 17 LCD-GPS Correction différentielle

A noter que pour la différence intelligente et pour la correction globale, le calcul des paramètres est fait d'une manière centralisée et que ce n'est pas chaque station qui calcule la fonction de correction.

4 Cas d'utilisation du capteur LiveNode

Les plateformes matérielle (LiveNode) et logicielle (LIMOS/CIVIC) ont été évaluées dans plusieurs projets industriels et de recherche. On peut citer notamment le projet européen Net-ADDED, le projet MobiPlus, le projet STAR et la plateforme V2I.

4.1 Projet Net-ADDED

NeT-ADDeD "New Technologies to Avoid Digital Division in e-Divided areas" est un projet européen de 2 ans réalisé dans le cadre du FP6 (Framework Program 6) qui vise à développer et valider des technologies de communication hybride satellitaire et (sans fil) terrestres.

Douze partenaires de différents pays (France, Maroc, Grèce et Turquie) participent au projet. Le coordinateur du projet est EADS Astrium leader mondial dans la conception et la construction de systèmes de satellites.

Deux partenaires locaux participent au projet qui sont l'UBP (Université Blaise Pascal) et le Cemagref.

Les domaines d'application des résultats du projet sont : l'éducation, la santé (Healthcare), l'agriculture, le tourisme, services aux personnes et aux collectivités.

La participation des deux partenaires (UBP/Cemagref) au sein du projet concerne notamment, l'utilisation du LiveNode pour la collecte des données environnementales (l'humidité du sol).

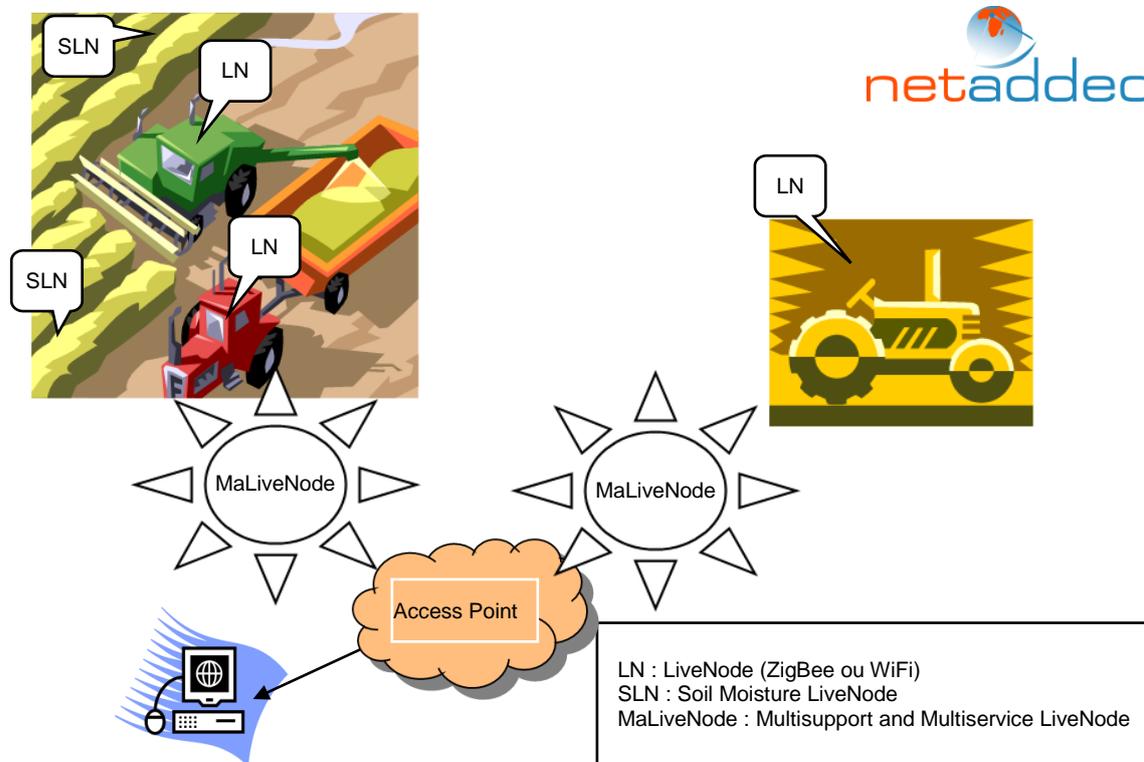


Figure IV- 18 Net-ADDED – Utilisation du LiveNode dans l'agriculture

Le principe est d'équiper tous les engins agricoles d'une ferme par exemple de LiveNodes (ZigBee ou WiFi). Dans le champ sont implantés des capteurs d'humidité. A travers un 'MaLiveNode' (voir Figure IV- 4) qui joue le rôle d'un routeur les informations des différents éléments constituant le réseau sont remontées vers un poste central via un point d'accès. Inversement, les informations de contrôle peuvent être acheminées vers les nœuds concernés via la même structure.

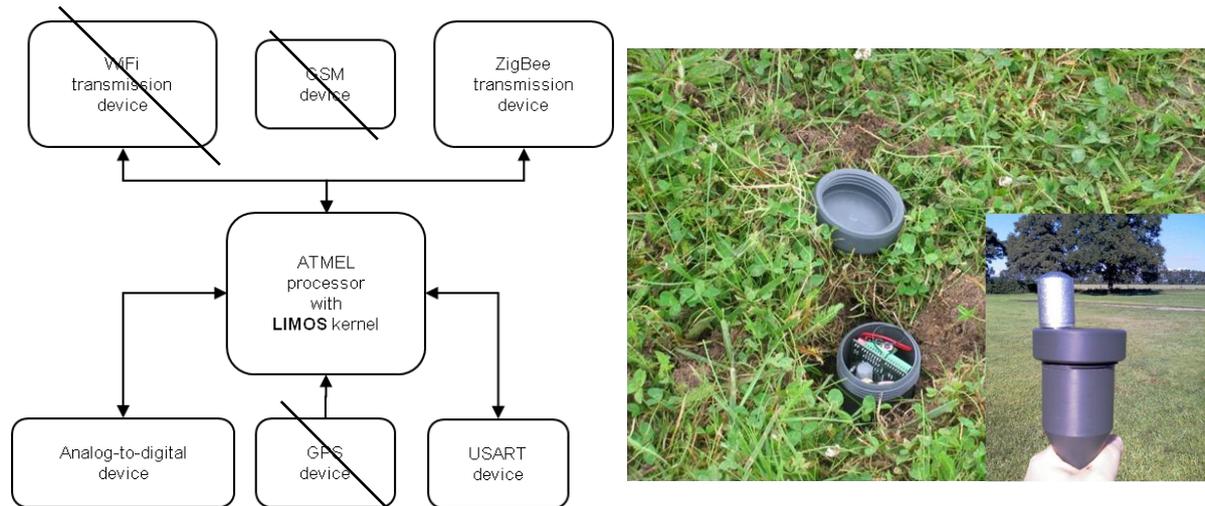


Figure IV- 19 Net-ADDED – LiveNode utilisé pour la collecte de l'humidité au sol.

Le liveNode est placé dans une boîte avant qu'il soit enterré au sol pour mesurer l'humidité. Ce capteur ne comporte pas de récepteur GPS, car le capteur est placé dans un endroit fixe et qu'il suffit de relever sa position au moment de son installation.

Pour les autres LiveNodes embarqués sur des engins, ils intègrent un récepteur GPS.

Dans le cadre du projet, une méthode d'estimation de la bande passante a été évaluée en milieu rural, ce travail fait suite à la thèse de doctorat de M. Amamra

4.2 Projet MobiPlus

Le LiveNode a été utilisé dans le domaine du transport en commun dans le cadre du projet MobiPlus [58]. Ce projet a été soutenu par le SMTC (Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'agglomération clermontoise). Plusieurs partenaires ont participé au projet parmi lesquels le LIMOS et le Cemagref. L'objectif du projet est l'amélioration de l'accessibilité des transports en commun aux personnes à mobilité réduite comme les malvoyants et les UFR (Usager en Fauteuil roulant).

Le système est composé de deux sous-systèmes :

- le sous-système bus,
- le sous-système quai

Le sous-système quai est constitué d'une borne dans laquelle est installé un LiveNode relié à un lecteur RFID. Chaque personne à mobilité réduite est munie d'un badge (tag) RFID contenant le type de son handicap. Quand il passe à proximité de la borne, le lecteur RFID détecte sa présence et envoie cette information au LiveNode. Le liveNode à son tour transmettra cette information au bus en approche via les deux supports de communication sans fil ZigBee et WiFi. Pour que la personne présente sache que sa présence est prise en compte, deux options sont disponibles :

- Si la personne présente est un malvoyant alors un bip est émis

- Si la personne présente est un UFR (usager en fauteuil roulant) alors une LED bleu est allumé pendant quelques instants.

La Figure IV- 20 montre la borne métallique et l'emplacement où sont installés le LiveNode et le lecteur RFID. Cette borne comporte un panneau solaire afin que le système soit complètement autonome.

La partie logicielle du système (sous-système bus et sous- système quai) est constituée du système LIMOS et d'une version allégée de CIVIC pour assurer notamment le multi-support de la communication sans fil.

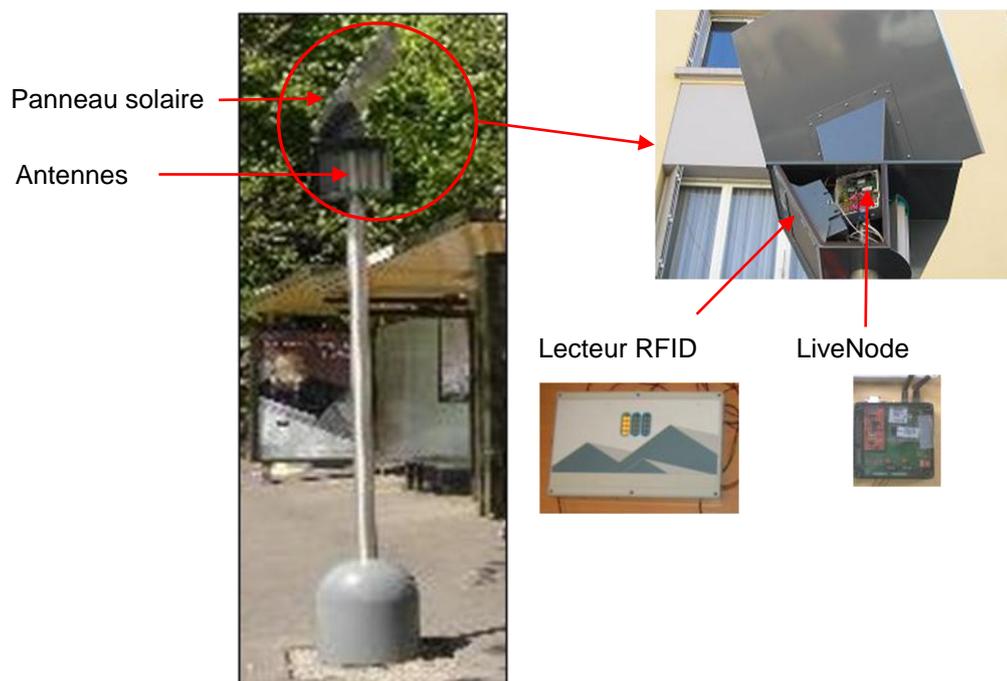


Figure IV- 20 MobiPlus – Le sous-système quai (SSQ)

Le sous-système bus est constitué d'un LiveNode (assurant le multi-support et la localisation par GPS), d'un annonceur sonore et d'un automate assurant le déploiement automatique de la palette du bus en cas de présence d'un UFR.

A l'approche du quai, le bus reçoit à travers les liaisons sans fil (ZigBee et WiFi) l'information de présence de personne à mobilité réduite. Le conducteur en sera informé par l'allumage d'un voyant sur son tableau de bord ainsi avec une annonce vocale (PMR, pour les malvoyants et UFR). Les personnes sur quai sont informées aussi de l'arrivée de bus par le clignotement de la LED en cas des UFR et par plusieurs bips en cas de PMR.

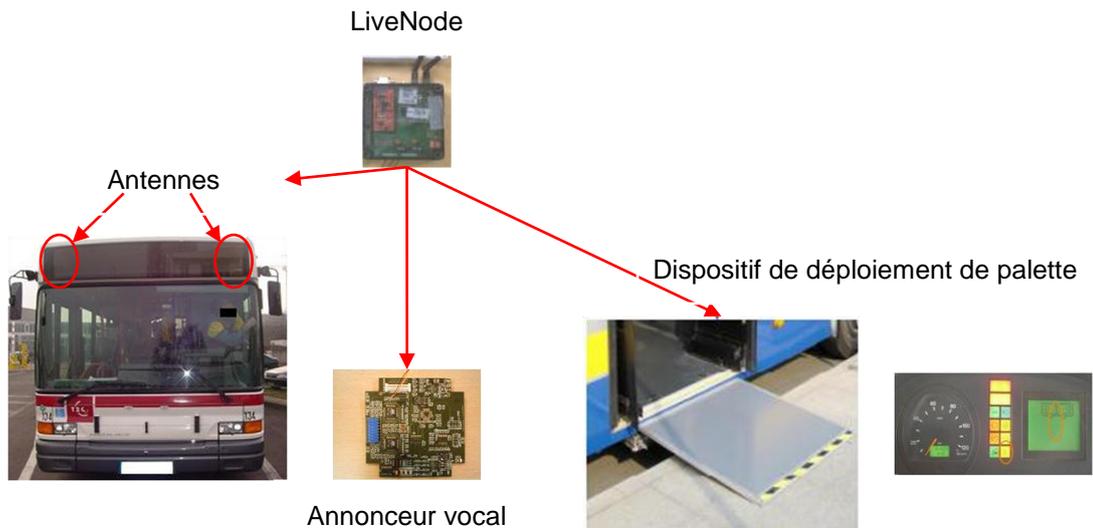


Figure IV- 21 MobiPlus – Le sous-système bus (SSB)



Figure IV- 22 MobiPlus – La plateforme expérimentale à Aubière

Deux plateformes expérimentales ont été réalisées : l'une à la place des Ramacles à Aubière et une autre à la place de Lille à Clermont-Ferrand. Le projet a donné lieu à un transfert technologie réalisé par la société TMS (Transport Management & Services). Le système est actuellement installé sur la ligne 6 des bus du transport en commun clermontois.

4.3 Autre projets et collaborations

Avant que la plateforme actuelle soit réalisée, d'autres capteurs ont vu le jour notamment un capteur (plusieurs versions) biomédical développé dans le cadre du projet STAR (Système Télé-Assistance Réparti [88] [66][88]). Cette application vise à détecter les arythmies cardiaques des malades et en avertir le médecin en charge. Le patient porte sur lui le capteur présenté sur la Figure IV- 23. Ce capteur analyse les signaux électrocardiogrammes du patient et en cas d'urgence, il avertit le médecin à l'hôpital via Internet.



Figure IV- 23 Projet STAR – Capteur biomédical

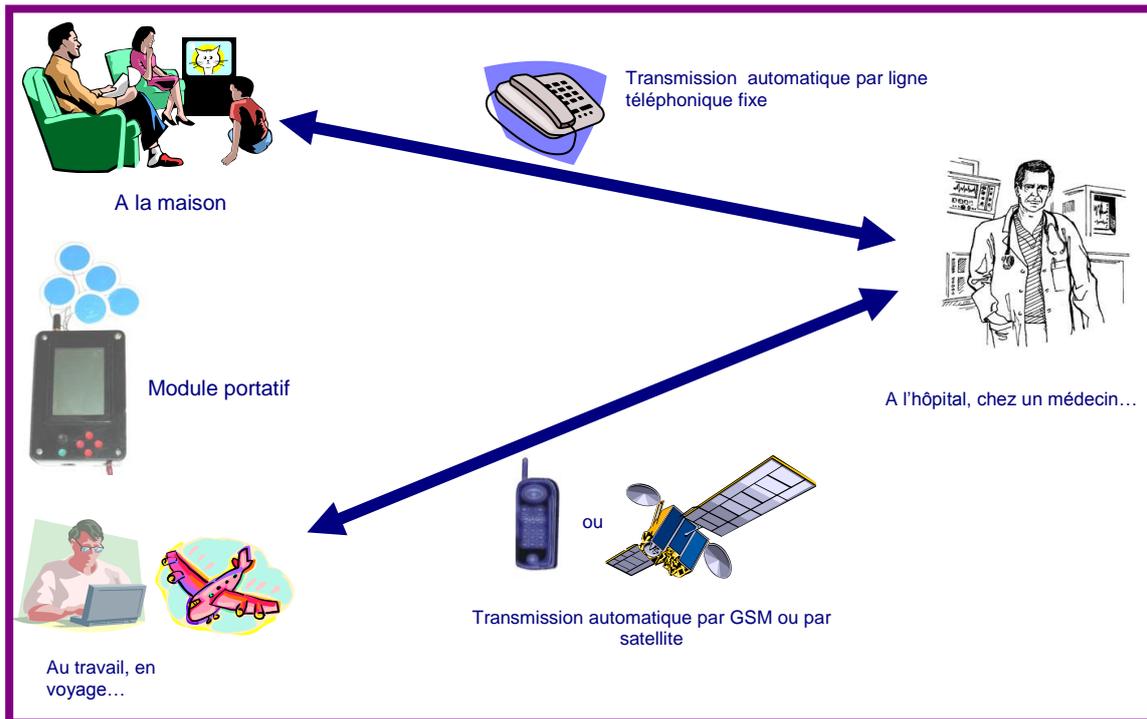


Figure IV- 24 Projet STAR – Principe général

La plateforme (LiveNode/LIMOS/CIVIC) est actuellement en cours d'expérimentation dans le cadre du projet V2I (Véhicules et Infrastructures Intelligents)²² de la fédération de recherche TIMS (Technologies de l'Information de la Mobilité et de la Sécurité). Ce projet pluridisciplinaires qui touche les domaines de l'Automatique, la Robotique, la Mécanique avancée, les Technologies de l'Information et des Communications. Il vise à développer des solutions futures dédiées à la mobilité des véhicules en milieux urbains, routiers et naturels.

Cette plateforme assurera la communication sans fil entre les véhicules en garantissant certaines qualités de service (minimiser les délais de transmission des données, réduire le taux de pertes de messages, ...).

²² <http://www.lasmea.univ-bpclermont.fr/spip.php?rubrique50>

5 Conclusion

Ce quatrième chapitre a été consacré à la présentation de la plateforme matérielle et logicielle utilisées dans nos travaux de thèse. Cette plateforme est basée sur capteur sans fil (CSF) appelé LiveNode (LIMOS Versatile Embedded Node) réalisé localement par notre équipe de recherche. La partie logicielle est composée notamment d'un système d'exploitation embarqué appelé LIMOS (Lightweight Multi-threading Operating System) et d'un protocole de communication appelé CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative). Les traitements propres à la solution LCD-GPS présentés dans le troisième chapitre sont intégrés au sein du protocole CIVIC.

Le LiveNode est un capteur disposant de plus de ressources par rapport aux CSF existant permettant ainsi de réaliser rapidement un prototype d'une application donnée. Son association avec le système d'exploitation LIMOS permet de réaliser

La plateforme matérielle (LiveNode) et logicielle (LIMOS+CIVIC) a été validée à travers plusieurs projets industriels et collaborations de recherche.

Nos travaux sur le LCD-GPS [54][55][56] est une autre pierre qui se rajoute à la construction des travaux de notre équipe SMIR. En effet, à travers les différentes versions (matérielles et logicielles) de cette plateforme notre équipe de recherche a acquis plusieurs savoir-faire allant de la conception de carte électroniques, passant par les logiciels bas niveau dédiés aux RCSF (systèmes d'exploitation embarqué (DREAM [88], SDREAM [70], LIMOS [71][72]et HEROS 'Hybrid Embedded Real-time Operating System' [87]), protocole de routage (CIVIC) [69], système de micro-fichier : LiveFile [86], outils d'administration [89]), et en aboutissant à des applications réelles valorisées via des transferts de technologies (STAR, Mobi+, NeT-ADDED, Hydrasol etc.).

CONCLUSION GENERALE

La localisation d'un nœud (objet, véhicule, personne, ...) joue un rôle important dans diverses applications : système de transport intelligent, télésurveillance, télédétection etc. Elle permet de proposer aux utilisateurs un service dépendant de leurs positions ou de réaliser des fonctions essentielles au réseau (routage, configuration de topologie de réseau, tracking, ...).

Le système de localisation le plus utilisé au monde pour les applications extérieures est le système GPS (Global Positioning System). En plus de la position, le système fournit en continu dans toutes les conditions météorologiques (avec une dégradation des performances) l'heure et la vitesse moyenne de déplacement.

Même si l'utilisation du GPS est limitée à l'extérieur et qu'il n'est pas très adapté aux Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) à cause de l'encombrement, du prix et de la consommation d'énergie des nœuds, son utilisation reste possible au niveau des amers qui ont, en général, plus de ressources et permettent ainsi aux autres nœuds de se localiser indirectement (par rapport aux amers) en utilisant d'autres méthodes de localisation comme le RSSI ou l'angle d'arrivée (AoA) par exemple.

Pour les mobiles (personnes ou véhicules), l'utilisation du GPS se justifie par sa couverture mondiale et par le fait qu'il délivre la position en continu et cela permet d'assurer le suivi (tracking) des mobiles.

Le champ d'utilisation du GPS est très large, mais l'application la plus connue est la navigation (terre/mer/air) et le suivi de flottes (bus, transport de marchandise, ...).

Les besoins de ces applications en termes de précision sont différents. Si la précision du GPS standard (mode absolu) est suffisante pour la randonnée par exemple, elle ne l'est pas pour le guidage automatique de véhicules d'où la nécessité de l'améliorer. Pour cela, le mode différentiel (DGPS, Differential GPS) a été introduit. Il exploite le constat suivant : les erreurs du GPS sont corrélées en espace et en temps, si on connaît les erreurs affectant un récepteur, on peut les supprimer au niveau d'un autre.

Le mode différentiel utilise donc, deux récepteurs au lieu d'un seul (mode absolu). L'un des deux récepteurs est utilisé comme station de base, placé dans une position connue avec une grande précision. Cette station surveille les erreurs du GPS, calcule des corrections et les transmet via un médium d'accès sans fil. Le deuxième récepteur recevant ces corrections, les applique sur ces données de localisation pour éliminer les erreurs communes avec la station de base.

Des corrections différentielles sont proposées aux utilisateurs civils partout dans le monde, certaines sont payantes (via des abonnements) et d'autres gratuites. Certaines corrections sont diffusées par des stations au sol pour des couvertures limitées et d'autres sont diffusées par satellites (Système d'augmentation de la précision par satellites) et qui ont de larges zones de couverture.

Ces corrections permettent d'atteindre des précisions entre 1 et 3 mètre. Pour avoir plus de précision, des stations de type (RTK, Real-Time Kinematic) sont nécessaires. Elles permettent

d'atteindre des précisions centimétriques. Cependant leur installation est difficile et surtout très onéreuse. Il est à noter que le GPS RTK est aussi sensible à l'environnement (e.g. milieu urbain). Donc, les données issues du GPS RTK ne sont pas toujours précises.

Nos travaux de thèse visant à améliorer la précision du GPS standard se sont inspirés du mode différentiel du GPS mais à l'inverse de la solution RTK qui utilise une grande station de base, la solution originale proposée dans cette thèse (LCD-GPS, Low Cost Differential GPS, Local Cooperative DGPS) est basée sur l'utilisation d'un RCSF équipés de récepteurs GPS standards à faible coût. La deuxième originalité est qu'elle est la seule étude de la possibilité de combiner plusieurs récepteurs GPS ensemble. En effet, les autres travaux combinent l'utilisation du GPS avec d'autres capteurs notamment la centrale d'inertie. Une autre particularité de cette méthode est la réalisation de la différence dans le domaine solution (sur les positions déjà calculées) et non pas dans le domaine mesures (sur les mesures de distance récepteur-satellites avant le calcul de la position). De ce fait, il est impossible d'appliquer les théories de traitement de signaux sur les données issues du récepteur GPS, car les signaux sont déjà traités et nous n'avons pas d'accès direct aux signaux reçus directement des satellites. Les seules informations dont nous disposons sont la position, la vitesse et l'heure.

Le but de notre travail est de réaliser une correction différentielle fiable et avec un minimum de coûts.

La première méthode évaluée est l'utilisation d'une carte numérique (Map matching) qui est adaptée aux véhicules dont le trajet est bien défini comme les bus de transport en commun. Pour que la méthode soit efficace, il faut que les cartes soient à jour et réalisées avec une précision suffisante. Cette méthode, n'est pas nouvelle et elle est exploitée par tous les GPS vendus dans le commerce pour la navigation automobile.

Nos contributions majeures sont les fonctions de correction : différence simple, différence intelligente, le filtrage, la combinaison du filtrage avec la différence simple ou la différence intelligente, et enfin leur généralisation pour pouvoir utiliser plusieurs stations de référence. La collaboration entre plusieurs nœuds permet d'assurer une certaine tolérance aux pannes, une robustesse aux erreurs, une fiabilité des corrections, ...

L'évaluation de ces méthodes est réalisée à l'aide d'une plateforme matérielle et logicielle développée par l'équipe SMIR du laboratoire LIMOS. La partie logicielle est composée notamment d'un système d'exploitation embarqué appelé LIMOS (LIghtweight Multi-threading Operating System) et d'un protocole de communication sans fil appelé CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative) et enfin les traitements propres à la solution LCD-GPS. La partie matérielle consiste en un réseau de capteurs appelés LiveNodes (LIMOS Versatile Embedded Node).

Sur cette plateforme notre travail initial était d'implémenter la localisation par GPS au niveau du protocole de communication CIVIC. Ce protocole utilise les positions géographiques pour l'échange des messages entre les nœuds du réseau de façon directive.

Les résultats d'analyse des expérimentations montrent que la solution proposée permet d'améliorer la précision dans les endroits ouverts (un taux supérieur à 40% avec la différence intelligente) comme dans un champ par exemple (application possible à l'agriculture). Cependant, elles montrent aussi que la solution est sensible à l'environnement (à cause du multitrajet) notamment dans un contexte urbain. Les différentes approches proposées ne permettent pas de minimiser les erreurs dues au multitrajet. Donc, pour améliorer la précision, d'autres pistes sont envisageables comme les réseaux de neurones et l'antenne spécifique anti multitrajet (antenne a plan absorbant, antenne de type Choke Ring [38]). Cependant cette solution accroîtra le coût (et la taille) des capteurs et par conséquent le coût de la solution globale.

La problématique abordée étant assez complexe, les travaux réalisés se sont focalisés sur l'analyse de la corrélation entre les erreurs de quelques capteurs. Il est nécessaire alors de tester ces fonctions de correction sur un nombre plus grand de capteurs et dispersés sur un champ plus large en étudiant l'effet de la disposition des nœuds et leur éloignement.

Les besoins existent : pour l'agriculture de précision, localisation en ville (guidage aux personnes malvoyantes), des applications comme LBS (Location Based Services) comme la recherche du restaurant le plus proche, informations affichées selon la position d'une personne participant à une visite guidée d'une ville ou à un parcours touristiques, ...

Les résultats obtenus montrent que le LCD-GPS peut être utilisé pour diverses applications mais qu'il est très sensible à l'environnement (multi-trajet). Cependant, il est à noter que, le RCSF permet en général la réalisation d'un capteur robuste et sûr.

La multiplication des systèmes de localisation par satellites montre l'importance des enjeux de ce type de systèmes pour les applications militaires certes, mais aussi pour le marché grandissant des applications civiles.

Même si la solution est basée sur l'utilisation du système GPS, les résultats sont applicables sur les autres systèmes de localisation par satellites.

Malgré l'amélioration de la précision de ces systèmes (programmes de modernisation en cours) et de l'amélioration de la compatibilité entre eux, il restera toujours des applications civiles qui nécessitent plus de précision et de fiabilité que les services disponibles de base. Nos travaux restent toujours valables et se justifient par le fait de la corrélation des erreurs affectant les signaux des satellites et observés par plusieurs capteurs au même temps.

Bibliographie

- [1] Azzedine Boukerche, "Algorithms And Protocols For Wireless Sensor Networks", Wiley, ISBN: 978-0-471-79813-2, 11-2008
- [2] Shahin Farahani, "ZigBee Wireless Networks and Transceivers", Elsevier Inc, ISBN: 978-0-7506-8393-7, 09-2008, pp. 225-246
- [3] Anthony LaMarca, Eyal de Lara, "Location Systems: An Introduction to the Technology Behind Location Awareness", Synthesis Lectures on Mobile and Pervasive Computing, Vol. 3, No. 1, pp. 1-121, Morgan&Claypool Publishers, ISBN: 978-1-598-29581-8, 06-2008
- [4] Bhaskar Krishnamachari, "Networking Wireless Sensors", Cambridge University Press, ISBN: 978-0-521-83847-4, 11-2005
- [5] Ivan Stojmenovic, "Handbook Of Sensor Networks: Algorithms And Architectures", Wiley-Intersciencene, ISBN: 978-0-471-68472-5, 10-2005
- [6] Holger Karl, Andreas Willig, "Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks", Wiley, ISBN: 978-0-470-09510-2, 04-2005
- [7] Mihaela Cardei, Ionut Cardei, Ding-Zhu Du, "Resource Management in Wireless Networking", Springer, ISBN: 978-0-387-23807-4, 01-2005
- [8] Zafer Sahinoglu, Sinan Gezici, Ismail Guvenc, Ultra-wideband Positioning Systems, Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols, Cambridge University Press, ISBN-978-0521873093, 09-2008
- [9] Nel Samama, Global Positioning, Technologies and Performance, Wiley, 2008
- [10] Dragos Niculescu and Badri Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS)". In IEEE Global Communications Conference (GlobeCom'01), San Antonio, TX, USA, November 2001, pp. 2926–2931
- [11] Erin-Ee-Lin Lau, Boon-Giin Lee, Seung-Chul Lee, Wan-Young Chung, "Enhanced RSSI-Based High Accuracy Real-Time user Location Tracking System For Indoor And Outdoor Environments", International Journal On Smart Sensing And Intelligent Systems, VOL. 1, NO. 2, June 2008, pp. 534-548
- [12] Joe Albowicz, Alvin Chen, Lixia Zhang, "Recursive Position Estimation in Sensor Networks", In the 9th International Conference on Network Protocols, November 2001, pp. 35-41.
- [13] Erin-Ee-Lin Lau, Wan-Young Chung, "Enhanced RSSI-Based Real-Time User Location Tracking System for Indoor and Outdoor Environments", International Conference on Convergence Information Technology, 21-23 Nov. 2007, pp. 1213-1218
- [14] Seung-chan Shin, Byung-rak Son, Won-geun Kim and Jung-gyu Kim, "ERFS: Enhanced RSSI value Filtering Schema for Localization in Wireless Sensor Networks", in IFIP

- International Federation for Information Processing, Volume 264; Wireless Sensor and Actor Networks II; Ali Miri; (Boston: Springer), 2008, pp. 245-256
- [15] S. Simic and S. Sastry, "Distributed localization in wireless ad hoc networks", Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley, 2002.
- [16] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices, IEEE Personal Communications Magazine, 7(5):28-34, October 2000.
- [17] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS) using AOA", In Proceedings of INFOCOM 2003, San Francisco, CA, 2003, pp. 1734-1743
- [18] N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The cricket location-support system," in ACM MOBICOM, August 2000, boston,MA.
- [19] N. Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan, and S. Teller, "The cricket compass for context-aware mobile applications," in 6th ACM MOBICOM, July 2001, Rome, Italy.
- [20] R. Nagpal, H. Shrobe, and J. Bachrach. Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network. In Proc. of the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '03), Palo Alto, California, April 2003.
- [21] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," in INFOCOM. IEEE, March 2000
- [22] Schmidt, A., Strohbach, M., Van Laerhoven, K., Friday, A., and Gellersen, H., "Context acquisition based on load sensing," Proceedings of Ubicomp 2002, September 2002.
- [23] Orr, J., and Abowd, G., "The smart floor: A mechanism for natural user identification and tracking," Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2000), April, 2000. (Site du projet : <http://www.cc.gatech.edu/fce/smartfloor/>)
- [24] Paradiso, J., Abler, C., Hsiao, K., and Reynolds, M. The Magic Carpet: Physical Sensing for Immersive Environments. In Extended Abstracts of CHI'97 (Atlanta, GA, March 1997), 277-278
- [25] Fukumoto, M., and Shinagawa, M., "CarpetLAN: A novel indoor wireless(-like) networking and positioning system," Ubiquitous Computing, 7th International Conference, 2005, pp. 1-18
- [26] V. Ramadurai and M. L. Sichitiu. Localization in wireless sensor networks: A probabilistic approach. In Proceedings of the 2003 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2003), Las Vegas, NV, June 2003, pp. 275-281
- [27] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello, Location Systems for Ubiquitous Computing, IEEE Computer Journal, VOL. 34 N° 8, pp. 57-66, 2001
- [28] R. Want et al. "The Active Badge Location System," ACM Trans. Information Systems, Jan. 1992, pp. 91-102.

- [29] A. Harter and A. Hopper, "A Distributed Location System for the Active Office," IEEE Network, Jan./Feb. 1994, pp. 62-70.
- [30] A. Harter et al., "The Anatomy of a Context-Aware Application," Proc. 5th Ann. Int'l Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 99), ACM Press, New York, 1999, pp. 59-68.
- [31] Site web du projet Cricket <http://cricket.csail.mit.edu>
- [32] U.S. Department of Defense, "Standard Positioning System Performance Specification", October 2001.
- [33] Raquel A.F. Mini, Antonio A.F. Leureiro, Badri Nath, "The distinctive design characteristic of wireless sensor network: the energy map", 2004.
- [34] Fox, D. Hightower, J., Liao, L., Schulz, D., and Borriello, G., "Bayesian filters for location estimation", IEEE pervasive computing, 2, September 2003, pp. 24-33.
- [35] M. Meurer, S. Erker, S. Thöler, O. Montenbruck, A. Hauschild, and R. B. Langley, "GPS L5 First Light, A Preliminary Analysis of SVN49's Demonstration Signal", GPS World Magazine, June 2009, pp. 49-58.
- [36] R. BUCHER and D. MISRA, "A Synthesizable VHDL Model of the Exact Solution for Three-dimensional Hyperbolic Positioning System", VLSI Design, 2002, Vol. 15, N° 2, pp. 507-520.
- [37] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interface, Interface Control Document, ICD-GPS-200C, 10/10/1993
- [38] F. Duquenne, S. Botton, F. Peyret, D. Bétaille, P. Willis, "GPS Localisation et navigation par satellites", 2nd Ed. Lavoisier, ISBN 2-7462-1090-8, 2005
- [39] E.D. Kaplan, C. J. Hegarty, "Understanding GPS, Principles and Applications", 2nd Ed. ARTECH HOUSE, ISBN 1-558053-894-0, 2006
- [40] G. Lachapelle and R. Ong, "Can GLONASS Alleviate GAO Malaise?", pp. 16-18, GPS WORLD MAGAZINE, July 2009
- [41] GPS engine board ET-301, Product user manual, www.sparkfun.com/datasheets/GPS/ET-301%20USER%20Manual1.pdf
- [42] Klaus Betke, "The NMEA 0183 Protocol", August 2001 www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf
- [43] NMEA reference Manual, Sirf Technology, Inc., Janvier 2005, <http://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual1.pdf>
- [44] NMEA-0183 Messages, Guide for AgGPS Receivers, Trimble, http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-159714/NMEA_Messages_RevA_Guide_ENG.pdf
- [45] The Galileo Project – GALILEO Design consolidation, European Commission, 2003. Accessible à l'adresse http://www.hellas-sat.net/files/file/EU_galileo_design.pdf

- [46] David S. Chiu and Kyle P. O'Keefe, "Seamless Outdoor-to-Indoor Positioning, DGPS + UWB", GPS World Magazine, march 2009, pp. 32-38.
- [47] Transformation entre systèmes géodésiques en France Métropolitaine, document IGN, <http://www.ign.fr/DISPLAY/000/526/700/5267002/transformaton.pdf>
- [48] Projection cartographique conique de Lambert, Algorithmes, document IGN, http://www.ign.fr/DISPLAY/000/526/701/5267019/NTG_71.pdf
- [49] Patrick STAEBLER, Principes du GPS, septembre 1996
- [50] Jean-Marie Zogg, "GPS Basics, Introduction to the system, Application overview", 2002, http://geology.isu.edu/geostac/Field_Exercise/GPS/GPS_basics_u_blox_en.pdf
- [51] Kun Mean Hou, Gil De Sousa, Jean-Pierre Chanet, Hai-Ying Zhou, Messaoud Kara, Abdelaziz Amamra, Xunxing Diao, Christophe de Vault, Jian-Jin Li and Aurélien Jacquot, "LiveNode: LIMOS versatile embedded wireless sensor node", NOTERE'07, Workshop on Wireless Sensor Networks, pp. 65-69, Marrakesh, Morocco, June 4th, 2007.
- [52] Xunxing. Diao, Messaoud Kara, Jianjin Li, Kun-Mean Hou, Haiying Zhou, Aurélien Jacquot and Abdelaziz Amamra, "Experiments on PAVIN Platform for Cooperative Inter-vehicle Communication Protocol (CIVIC)," IEEE Africon 2009, ISBN: 978-1-4244-3919-5, Nairobi, Kenya, September 2009.
- [53] Xunxing. Diao, Messaoud Kara, Jianjin Li, Kun-Mean Hou, Haiying Zhou, and Aurélien Jacquot, "Cooperative Inter-vehicle Communication Protocol With Low Cost Differential GPS," Journal of Networks, Special Issue on Wireless Sensor Networks: Theory and Practice, Vol. 4 N°. 6, pp. 445-457 August 2009.
- [54] Messaoud Kara, Kun-Mean Hou, "Low Cost Differential GPS receivers (LCD-GPS): The differential correction function," NTMS'2008, Wireless Sensor Network Workshop, pp. 282-287, Tangier, Morocco, November 2008.
- [55] Messaoud Kara, Kun-Mean Hou, Jean-Pierre Chanet, Hai-Ying Zhou, Myoung-Ah Kang, François Pinet, "Low Cost Differential GPS receivers (LCD-GPS): A Local Cooperative Differential GPS solution", NOTERE'07 'NOuvelles TEchnologies de la Repartition', Workshop on Wireless Sensor Networks, pp. 29-34, Marrakesh, Morocco, June 4th, 2007.
- [56] Messaoud Kara, Kun-Mean Hou, Jean-Pierre Chanet, Hai-Ying Zhou, Myoung-Ah Kang, François Pinet, "Low Cost Differential GPS receivers (LCD-GPS): Urban vehicle tracking", I2TS'06 '5th International Information and Telecommunication Technologies Symposium', pp. 16-21, Cuiabá, MT, Brazil, December 06-08, 2006.
- [57] Gil De Sousa, Hai-Ying Zhou, Kun-Mean Hou, Jean-Pierre Chanet, Christophe de Vault, Jian-Jin Li, Abdelaziz Amamra and Messaoud Kara, « LEC: An Operating System Routing Protocol Integrated for Wireless Sensor », I2TS'2006, pp. 176-177, Cuiabá, MT, Brazil, December 06-08, 2006.

- [58] Hai-Ying Zhou, Gil de Sousa, Jean-Pierre Chanet, Kun-Mean Hou, Jian-Jin Li, Christophe de Vault and Messaoud Kara, "An Intelligent Wireless Bus-Station System Dedicated to Disabled, Wheelchair and Blind Passengers", ICWMMN'06 'International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks', pp. 1659-1662, Hangzhou, China, November 06-09, 2006.
- [59] G. Taylor, C. Brunsdonb, J. Lia, A. Oldena, D. Steupa, M. Wintera, 'GPS accuracy estimation using map matching techniques:applied to vehicle positioning and odometer calibration', Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 30, N° 6, pp. Pages 757-772, 2006
- [60] GPS guide for beginners, Garmin, 2000, <http://www.mda.gov.br/saf/arquivos/1024115507.pdf>
- [61] Philips Semiconductors, "LPC2106/2105/2104 Preliminary User Manual", User manual, (2003).
- [62] AT91 ARM Thumb-based Microcontrollers, data sheet, http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/6175s.pdf
- [63] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc6175.pdf
- [64] "Digi Connect EM & Digi Connect Wi- EM Hardware Reference", Digi International Inc., 2006 http://www.digi.com/pdf/prd_ds_digiconnectem_hwman.pdf
- [65] A.-B. Garcia-Hernando et al., Problem Solving for Wireless Sensor Networks, DOI : 10.1007/978-1-84800-203-6_3, Springer-Verlag London Limited 2008
- [66] Hai-Ying ZHOU, "Réseau de capteurs sans fil dédié à la detection et au diagnostic d'arythmie cardiaque en temps reel, en continu et à distance", Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II, 2004
- [67] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer & D. Culler, "TinyOS: an Operating System for sensor networks", Rapport technique, University of Berkeley, Berkeley, USA, 32 pages, 2003.
- [68] Digi International Inc. XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules, Product Manual v1.xAx - 802.15.4 Protocol, http://ftp1.digi.com/support/documentation/manual_xb_oem-rf-modules_802.15.4_v1.xAx.pdf
- [69] J-P. Chanet, "Algorithme de routage copératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri-environnementaux", Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, 2007
- [70] Haiying Zhou, Kun Mean Hou, Christophe De Vault, "SDREAM : A Super-small Distributed REAL-time Microkernel dedicated to wireless sensors", International Journal of Pervasive Computing and Communications, Vol. 2, Issue 4, pp. 398-410, 2006
- [71] H. Zhou, K. M. Hou, J. P. Chanet, C. De Vault & G. De Sousa. "LIMOS: a tiny real-time microkernel for wireless objects". In 2nd IEEE International Conference on Wireless

- Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2006), pp. 1-4, Wuhan, China, 2006.
- [72] Zhou H.Y. et al., "A novel hybrid real-time micro-kernel dedicated to wireless sensor network", Proceeding of ICWMMN'06, HangZhou, China, Nov. 2006.
- [73] X. X. Diao, J. J. Li, K. M. Hou, H. Y. Zhou, and A. Jacquot, "Cooperative Inter-vehicle Communication Protocol Dedicated to Intelligent Transport Systems," NTMS'2008, WSN Workshop, pp. 139-143, Tangier, Morocco, November 2008
- [74] J. Hao, K. M. Hou, J-J. Li, J-P Chanet, C. De Vaulx, H-Y Zhou, et al., "The capacity and packets delivery of MANET On Road: MANETOR," Global Mobile Congress, pp. 553-558, China, 2005.
- [75] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol," IETF RFC 3626, October 2003.
- [76] C.E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination Sequence-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," Computer Communication Review, 24(4), 1994, 234-244.
- [77] R. Ogier, F. Templi, and M. Lewis, "Topology dissemination based on reverse-path forwarding (TBRPF)." IETF RFC 3684, February 2004.
- [78] D. B. Johnson, D. A. Maltz and J. Broch, "DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad-hoc Networks," Ad-hoc Networking, Ed. Addison-Wesley/Charles E. Perkins, pp. 139-172, 2001.
- [79] C. K. Toh, "Long-lived Ad-Hoc Routing based on the concept of Associativity," IETF MANET Working Group, Inter Draft, March 1999.
- [80] T. Kosch, Ch. Schwingenschlögl and L. Ai, "Information Dissemination in Multihop Inter-Vehicle Networks – Adapting the Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing Protocol (AODV)," in Proc. of The IEEE 5th Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems, Singapore, 2002.
- [81] J. Schaumann, "Analysis of the Zone Routing Protocol," Dec. 2002. Disponible à l'adresse : <http://www.netmeister.org/misc/zrp/zrp.pdf>.
- [82] Young-Bae Ko and Nitin H. Vaidya, 'Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks' Wireless Networks, Vol. 6, Issue 4, pp 307-321, 2000
- [83] S. Basagni, I. Chlamtac, V.R. Syrotiuk, B.A. Woodward, 'A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM), Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pp. 76-84, 1998
- [84] Brad Karp, H. T. Kung, 'GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks',n MobiCom '00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (2000), pp. 243-254.

- [85] Abdelaziz Amamra, Techniques d'Estimation de la Bande Passante Disponible de Réseaux Sans Fil, thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, 2008
- [86] Gil DE SOUSA, Etude en vue de la réalisation de logiciels bas niveau dédié aux réseaux de capteurs sans fil: microsysteme de fichiers, thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, 2008.
- [87] Hai-Ying Zhou, Kun-Mean Hou, Christophe DE Vaulx, and De-Cheng Zuo, 'A Hybrid Embedded Real-time Operating System for Wireless Sensor Networks', JOURNAL OF NETWORKS (JNW), Vol. 4, N° 6, pp.428-435, August 2009,
<http://www.academypublisher.com/jnw/vol04/no06/jnw0406428435.pdf>
- [88] Christophe de Vaulx, 'Etude et développement d'un micro noyau réparti, temps réel et tolérant aux fautes : DREAM', Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, 2003
- [89] Aurélien JACQUOT, Jean-Pierre CHANET, Kun Mean HOU, Xunxing DIAO and Jian-Jin LI, 'LiveNCM : A new wireless management tool', AFRICON 2009, Nairobi, Kenya

ANNEXE I – ALMANACH

1 Paramètres d'une orbite de satellite

Les paramètres inclus dans l'almanach et qui décrivent les orbites des satellites sont les suivants :

- Ω_0 : La longitude du nœud ascendant.
- i_0 : L'angle d'inclinaison, angle entre le plan équatorial et le plan orbital.
- ω : L'argument du périégée, angle dans le plan de l'orbite entre l'équateur et le périégée.
- \sqrt{A} : Avec A le demi grand axe.
- e : L'excentricité.
- M_0 : L'anomalie moyenne au temps de référence.

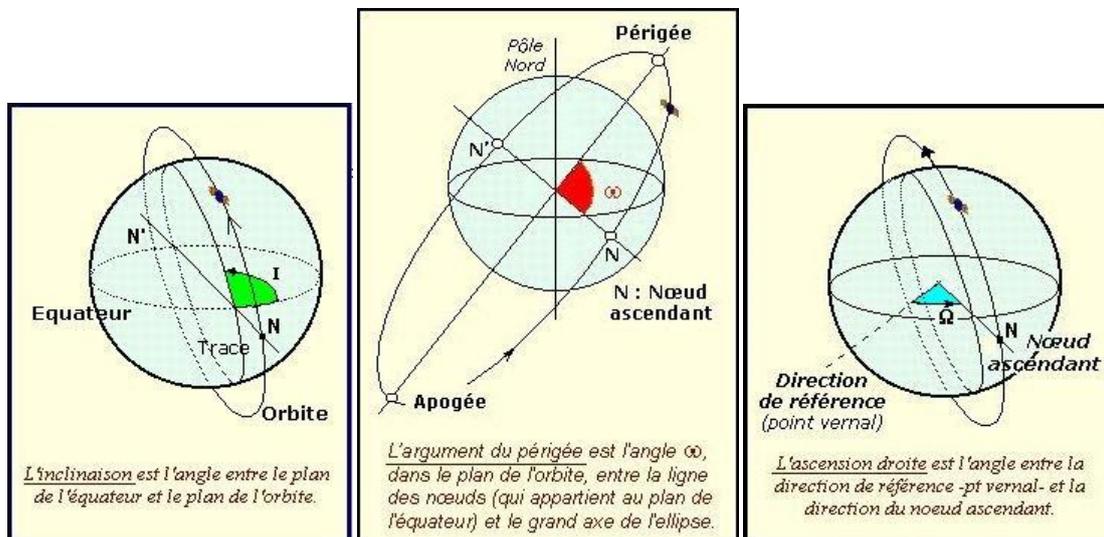


Figure i1- 1 Les différents paramètres d'une orbite de satellite

(Figures extraites à partir de la documentation du logiciel Solstice du ministère français de l'éducation nationale)

2 Extrait d'un almanach

Ci-dessous un extrait de l'almanach de la semaine 516 du GPS au format YUMA (.alm). La semaine du dimanche 12 au samedi 18 juillet 2009.

La semaine zéro du GPS commence à minuit du samedi 05 au dimanche 06 janvier 1980. Le numéro de la semaine est codé sur 10 bits. Quand le nombre de la semaine arrive à 1024 il devient, semaine zéro et ainsi de suite. Le numéro de semaine est repassé à zéro durant la semaine du 22 août 1999.

L'almanach de la semaine courante peut être téléchargé sur le site des gardes côtes américains à l'adresse suivantes : <http://www.navcen.uscg.gov/gps/current/current.alm>

```
***** Week 516 almanac for PRN-01 *****
ID:                                01
```

```
Health: 063
Eccentricity: 0.3611564636E-002
Time of Applicability(s): 233472.0000
Orbital Inclination(rad): 0.9616470337
Rate of Right Ascen(r/s): -0.7989001460E-008
SQRT(A) (m 1/2): 5153.675293
Right Ascen at Week(rad): 0.2908960819E+001
Argument of Perigee(rad): 0.928293943
Mean Anom(rad): 0.7227753401E+000
Af0(s): -0.6580352783E-004
Af1(s/s): 0.3637978807E-011
week: 516
```

```
***** Week 516 almanac for PRN-02 *****
ID: 02
Health: 000
Eccentricity: 0.9068489075E-002
Time of Applicability(s): 233472.0000
Orbital Inclination(rad): 0.9407215118
Rate of Right Ascen(r/s): -0.8025381248E-008
SQRT(A) (m 1/2): 5153.625977
Right Ascen at Week(rad): -0.1286777258E+001
Argument of Perigee(rad): 2.862928748
Mean Anom(rad): -0.1803296685E+001
Af0(s): 0.1602172852E-003
Af1(s/s): 0.0000000000E+000
week: 516
```

```
***** Week 516 almanac for PRN-03 *****
ID: 03
Health: 000
Eccentricity: 0.1206731796E-001
```

La signification de chaque paramètre du format YUMA est expliqué ci-dessous :

ID: PRN of the SVN

Health: 000=usable

Eccentricity: This shows the amount of the orbit deviation from circular (orbit). It is the distance between the foci divided by the length of the semi-major axis (our orbits are very circular).

Time of Applicability: The number of seconds in the orbit when the almanac was generated. Kind of a time tag.

Orbital Inclination: The angle to which the SV orbit meets the equator (GPS is at approx. 55 degrees). Roughly, the SV's orbit will not rise above approx. 55 degrees latitude. The number is part of an equation: $\# = \pi/180 =$ the true inclination.

Rate of Right Ascension: Rate of change in the measurement of the angle of right ascension as defined in the Right Ascension mnemonic.

SQRT(A) Square Root of Semi-Major Axis: This is defined as the measurement from the center of the orbit to either the point of apogee or the point of perigee.

Right Ascension at Time of Almanac (TOA): Geographic Longitude of the Asending Node of the Orbit Plane at the Weekly Epoch.

Argument of Perigee: An angular measurement along the orbital path measured from the ascending node to the point of perigee, measured in the direction of the SV's motion.

Mean Anomaly: Angle (arc) traveled past the longitude of ascending node (value= 0-180 degrees or 0-negative 180 degrees). If the value exceeds 180 degrees, subtract 360 degrees to find the mean anomaly. When the SV has passed perigee and heading towards apogee, the mean anomaly is positive. After the point of apogee, the mean anomaly value will be negative to the point of perigee.

Af(0): SV clock bias in seconds

Af(1): SV clock Drift in seconds per seconds

week: GPS week (0000-1024), every 7 days since 22 Aug 1999

Un autre format de l'almanach est le format SEM (.al3). Il est accessible aussi sur le site des gardes de côtes américains (NAVCEN) à l'adresse suivante :

<http://www.navcen.uscg.gov/gps/current/current.al3>

Tous ces paramètres sont accessibles à partir du lien suivant :

<http://www.navcen.uscg.gov/gps/gpssem.htm>

3 Logiciel « Planning de Trimble »

En se bant sur l'almanach, des logiciels de planification comme "Planning" de "Trimble" permettent de prévoir le passage des satellites. Ci-dessous des graphiques générés avec ce logiciel pour Clermont-ferrand pour le 19 juin 2009. La position approximative utilisée est (45° 45' N, 3° 6' E). L'angle de coupure choisie est de 5° ; ça veut dire si un satellite a seulement un angle par rapport à l'horizon qui ne dépasse pas 5°, ce satellite n'est pas pris en compte.

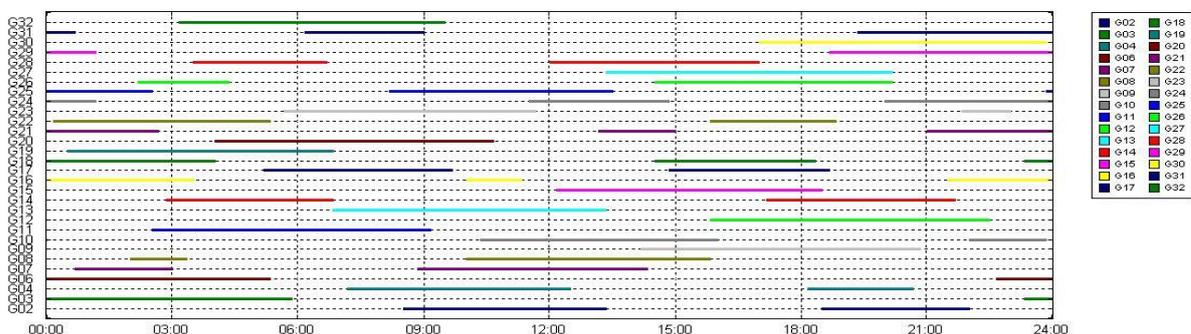


Figure i1- 2 Visibilité des satellites GPS sur Clermont-Ferrand

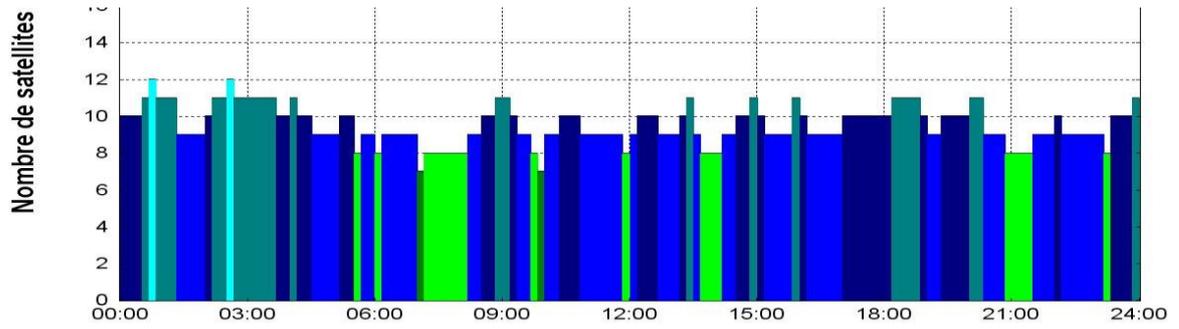


Figure i1- 3 Nombre de satellites visibles

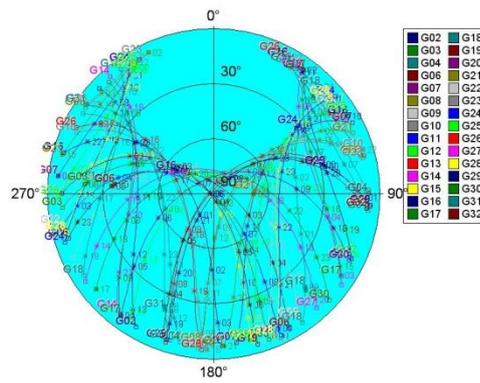


Figure i1- 4 Carte du ciel : Azimut & Elévation durant 24 heures

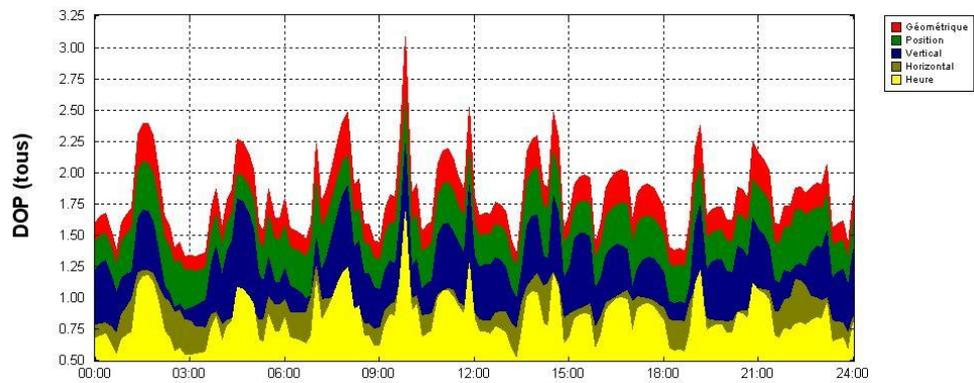


Figure i1- 5 Les différentes valeurs de DOP

ANNEXE II – MESSAGE DE NAVIGATION

1 *Format du message de navigation*

Le message de navigation est composé de trames de 1500 bits. Chaque trame dure 30 secondes du fait du débit de 50 bps (bit par seconde). Chaque trame contient 5 sous trames de 10 mots de 30 bits. Les sous-trames 1 à 3 ont leur contenu qui ne change pas en général de trame à trame alors que les sous-trames 4 et 5 contiennent différentes "pages" à chaque trame.

La trame principale contient à son tour toutes les pages des sous trames 4 et 5 et consiste en 25 trames complètes. Le temps de transmission de la trame principale est de 12,5 minutes.

Chaque bit a une durée de 20 ms. Dans ce laps de temps, le code C/A (1023 moments à 1,023 MHz) est répété 20 fois. Les 30 bits de chaque mot sont composés de 24 bits d'information et de 6 bits de contrôle de parité (code de Hamming étendu).

Les deux figures suivantes illustrent le contenu du message de navigation :

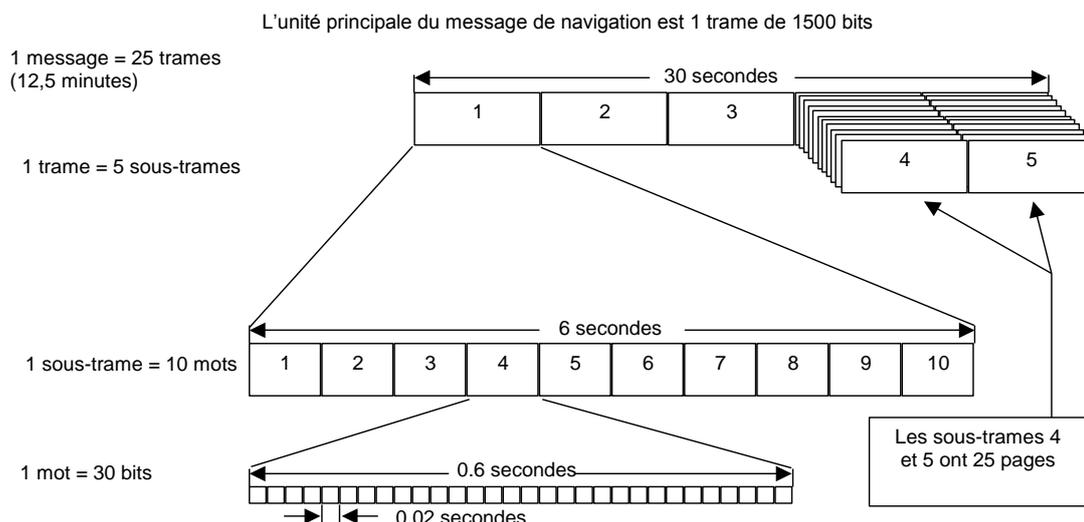


Figure i2- 1 Structure du message de navigation

2 *Contenu du message de navigation*

Le contenu de chaque sous-trame est particulier à la sous-trame.

La sous-trame 1 contient les paramètres de corrections d'horloge, différents indicateurs d'états et l'âge des données.

Les sous-trames 2 et 3 contiennent les éphémérides du satellite transmettant le message.

La sous-trame 4 contient suivant les pages, les paramètres du modèle ionosphérique, les paramètres de passage du temps GPS au temps UTC (*Universal Time Coordinated*, le temps universel coordonné), des indicateurs signalant le cryptage éventuel du code P et si plus de 24 satellites sont en orbite, l'almanach et l'état de santé des satellites en excès. Certaines pages sont réservées.

La sous-trame 5 contient de la page 1 à 24 les almanachs de chaque satellite (de 1 à 24) en orbite. La page 25 contient l'état de santé de ces 24 satellites.

L'almanach est une information (moins précise) qui permet de calculer une position approximative (précision kilométrique) d'un satellite. Il est utilisé pour déterminer si un satellite est visible, c'est-à-dire au-dessus de l'horizon. Ceci facilite la recherche des satellites et leur acquisition. L'almanach permet d'avoir une idée du Doppler du signal satellite. En centrant la recherche en fréquence sur ce Doppler, on raccourcit les temps d'acquisition.

Une fois le signal d'un satellite est acquis et son message de navigation démodulé, le récepteur utilise les éphémérides.

Chaque sous-trame commence par un mot de télémesure dont le préambule est fixe et identique pour tous les satellites opérationnels. Ce préambule permet la synchronisation mot du message de navigation.

Le mot de télémesure est suivi du mot HOW (Hand-Over-Word) qui multiplié par 4 donne le temps GPS au début de la sous-trame suivante. Ce temps est le temps écoulé depuis le début de la semaine GPS (dimanche 00h00) le HOW s'incrémente toutes les 6 secondes.

Ce temps permet d'initialiser le code P, long d'une semaine, en vue de son acquisition.

La figure ci-dessus illustre le contenu du message de navigation :

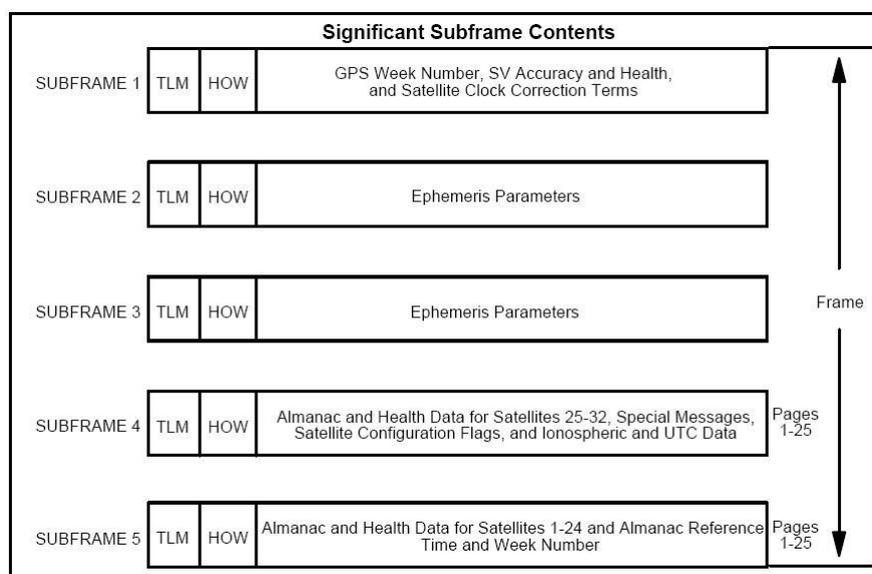


Figure i2- 2 Contenu du message de navigation

ANNEXE III – Calcul des valeurs DOP

Les différentes valeurs DOP (Dilution Of Precision) donnent une indication sur la précision du positionnement. Plus la valeur DOP est importante, moins est la précision.

Cette fiche est accessible sur Internet à l'adresse suivante :

<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/gdop.gif>

GPS GDOP Example - Peter H. Dana - 4/24/96

Satellite (SV) coordinates in ECEF XYZ from Ephemeris Parameters and SV Time

$SVx_0 := 15524471.175$	$SVy_0 := -16649826.222$	$SVz_0 := 13512272.387$	SV 15
$SVx_1 := -2304058.534$	$SVy_1 := -23287906.465$	$SVz_1 := 11917038.105$	SV 27
$SVx_2 := 16680243.357$	$SVy_2 := -3069625.561$	$SVz_2 := 20378551.047$	SV 31
$SVx_3 := -14799931.395$	$SVy_3 := -21425358.24$	$SVz_3 := 6069947.224$	SV 7

Receiver Position Estimate in ECEF XYZ

$R_x := -730000$ $R_y := -5440000$ $R_z := 3230000$

For Each of 4 SVs $i := 0..3$

Ranges from Receiver Position Estimate to SVs (R) and Array of Observed - Predicted Ranges

$$R_i := \sqrt{(SVx_i - Rx)^2 + (SVy_i - Ry)^2 + (SVz_i - Rz)^2}$$

Compute Directional Derivatives for XYZ and Time

$$Dx_i := \frac{SVx_i - Rx}{R_i} \quad Dy_i := \frac{SVy_i - Ry}{R_i} \quad Dz_i := \frac{SVz_i - Rz}{R_i} \quad Dt_i := -1$$

Solve for Correction to Receiver Position Estimate

$$A := \begin{bmatrix} Dx_0 & Dy_0 & Dz_0 & Dt_0 \\ Dx_1 & Dy_1 & Dz_1 & Dt_1 \\ Dx_2 & Dy_2 & Dz_2 & Dt_2 \\ Dx_3 & Dy_3 & Dz_3 & Dt_3 \end{bmatrix} \quad P := (A^T \cdot A)^{-1}$$

Compute Geometric Dilution of Precision (GDOP) terms:

$$GDOP := \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2} + P_{3,3}} \quad GDOP = 6.806$$

$$PDOP := \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2}} \quad PDOP = 6.171$$

$$TDOP := \sqrt{P_{3,3}} \quad TDOP = 2.871$$

ANNEXE IV – Description du protocole NMEA – 0183

Cette partie décrit le protocole NMEA – 0183 (The National Marine Electronics Association). Elle est réalisée en se basant, notamment, sur les documents suivants :

- Manuel du récepteur GPS ET-301 (utilisé par notre capteur LiveNode) [41]
- 'The NMEA 0183 Protocol' [42]
- 'NMEA Reference Manual' [43]
- 'NMEA-0183 Messages, Guide for AgGPS Receivers' [44]

Le format général des messages NMEA est le suivant :

\$TTSSS,D1,D2,...,*HH<CR><LF>

Les deux premiers caractères 'TT' identifient le type de l'outil de navigation dont un extrait est donné ci-dessous :

Code de la source	Description
GP	Global Positioning System (GPS)
HC	Heading – Magnetic Compass
HE	Heading – North Seeking Gyro
HN	Heading – Non North Seeking Gyro
P	Proprietary Code
RA	RADAR and/or ARPA

Tableau A4 - 1 codes des outils de navigation

Les trois caractères suivants 'SSS' donnent le code du message NMEA. Le tableau ci-dessous résume les codes NMEA les plus utilisés.

Code message	Description
GGA	Global positioning system fixed data
GGL	Geographic position – Latitude/Longitude
GSA	GNSS DOP and active satellites
GSV	GNSS satellites in view
RMC	Recommended minimum specific GNSS data
VTG	Course over ground and ground speed

Tableau A4 - 2 codes des messages NMEA – 0183

Les champs (D1, D2, ...) de chaque message de navigation sont séparés par des virgules. Si le champ est manquant (par exemple, la position n'est pas encore disponible), la virgule reste en place. Donc, si deux virgules se suivent, ça veut dire que le champ de donnée correspondant n'est pas disponible.

Chaque message NMEA se termine par deux caractères de contrôle d'erreur 'HH' en hexadécimal. En fait, c'est un seul octet obtenu en faisant des XOR (ou exclusif) entre les caractères formant le message NMEA compris entre le '\$' et '*'. Les deux caractères '\$' et '*' ne sont pas inclus dans le calcul. Et à la fin, le code obtenu est codé en ASCII sur deux caractères.

<CR> et <LF> dénotent le retour chariot et saut de ligne (\r et \n en langage C).

Les messages les plus utilisés sont les suivants :

- GP GGA : Temps UTC, Latitude, Longitude, Altitude, Nombre de satellites, HDOP.

- GPGLL : Latitude, Longitude, temps UTC.
- GPRMC : Temps UTC, Latitude, Longitude, Vitesse, Cap.
- GPGSV : Nombre de satellites en vue et pour chaque satellite les informations suivantes : Elévation, Azimut et Qualité du signal (Signal/bruit).
- GPGSA : Affectation des satellites captés aux canaux du récepteur, les valeurs de HDOP, VDOP, PDOP.
- GPVTG : Le cap, la vitesse en k/h et en nœuds.

Le détail de chaque message est donné dans les paragraphes suivants. Nous utilisons un extrait des données obtenues lors de l'une de nos expérimentations pour expliciter chaque message.

```

Extrait_C1_2008_07_22_origine_txt - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
$GPGGA,123548.000,4545.5480,N,00306.6852,E,1,09,0.9,418.0,M,48.7,M,,0000*56
$GPGLL,4545.5480,N,00306.6852,E,123548.000,A*38
$GPGSA,A,3,22,18,17,26,28,10,12,09,15,,1.5,0.9,1.2*32
$GPGSV,3,1,11,15,82,171,44,26,66,130,43,09,40,276,42,28,39,052,42*7A
$GPGSV,3,2,11,18,32,297,41,17,26,106,41,12,13,212,35,22,07,326,30*7C
$GPGSV,3,3,11,10,05,181,28,08,03,077,36,05,00,220,*44
$GPRMC,123548.000,A,4545.5480,N,00306.6852,E,0.08,27.39,220708,,*37
$GPVTG,27.39,T,,M,0.08,N,0.1,K*56

```

Figure A4 - 1 Extrait de messages NMEA - GPS

1 Message GGA - Global positioning system fixed data

Exemple :

\$GPGGA,123548.000,4545.5480,N,00306.6852,E,1,09,0.9,418.0,M,48.7,M,,0000*56

Exemple	Format	Unité	Description
123548.000	hhmmss.sss		Heure UTC
4545.5480	ddmm.mmmm	d Degré m Minute	Latitude
N	N ou S	Nord ou Sud	Direction de la latitude
00306.6852	Dddmm.mmm	d Degré m Minute	Longitude
E	E ou W	Est ou Ouest (West)	Direction de la longitude
1	0 ou 1		Etat : 0 – Position n'est pas valide 1 – Position valide (SPS) 2 – Position valide (DGPS)
09	dd		Nombre de satellites
0.9			HDOP
418.0		Mètre	Altitude
M		M = Mètre	Unité de l'altitude
48.7		Mètre	Séparation géoïde
M		M = Mètre	Unité de la séparation géoïde
(vide)		seconde	Age de la correction DGPS
0000			Identifiant de la station DGPS
56	HH		Contrôle d'erreur

Tableau A4 - 3 Format du message GGA

2 Message GGL - Geographic position – Latitude/Longitude

Exemple :

\$GPGLL,4545.5480,N,00306.6852,E,123548.000,A*38

Exemple	Format	Unité	Description
4545.5480	ddmm.mmmm	d Degré m Minute	Latitude
N	N ou S	Nord ou Sud	Direction de la latitude
00306.6852	Dddmm.mmm	d Degré m Minute	Longitude
E	E ou W	Est ou Ouest (West)	Direction de la longitude
123548.000	hhmmss.sss		Heure UTC
A	A ou V		Etat : V – Position n'est pas valide A – Position valide
38	HH		Contrôle d'erreur

Tableau A4 - 4 Format du message GGL

3 Message GSA - GNSS DOP and active satellites

Exemple :

\$GPGSA,A,3,22,18,17,26,28,10,12,09,15,,,,,1.5,0.9,1.2*32

Exemple	Format	Unité	Description
A	A ou M		Mode de changement 2D/3D A = Automatique, M = Manuel
3	1 ou 2 ou 3		1 - Position n'est pas valide 2 - Position 2D 3 - Position 3D
22			Satellite affecté au canal 1
18			Satellite affecté au canal 2
17			Satellite affecté au canal 3
26			Satellite affecté au canal 4
28			Satellite affecté au canal 5
10			Satellite affecté au canal 6
12			Satellite affecté au canal 7
09			Satellite affecté au canal 8
15			Satellite affecté au canal 9
(vide)			Satellite affecté au canal 10
(vide)			Satellite affecté au canal 11
(vide)			Satellite affecté au canal 12
1.5			PDOP - Position DOP
0.9			HDOP - Horizontal DOP
1.2			VDOP - Vertical DOP
32	HH		Contrôle d'erreur

Tableau A4 - 5 Format du message GSA

4 Message GSV - GNSS satellites in view

Exemple :

\$GPGSV,3,1,11,15,82,171,44,26,66,130,43,09,40,276,42,28,39,052,42*7A

\$GPGSV,3,2,11,18,32,297,41,17,26,106,41,12,13,212,35,22,07,326,30*7C

\$GPGSV,3,3,11,10,05,181,28,08,03,077,36,05,00,220,*44

Exemple	Format	Unité	Description
3			Nombre de messages GSV
1	1 ou 2 ou 3		Numéro du message
11			Nombre de satellites en vue
15			Numéro du satellite
82			Élévation
171			Azimut
44	0 - 99	dBHz	SNR (C/No) signal su bruit
26			Numéro du satellite
66			Élévation
130			Azimut
09	0 - 99	dBHz	SNR (C/No) signal su bruit
...			...
7A	HH		Contrôle d'erreur

Tableau A4 - 6 Format du message GSV

5 Message RMC - Recommended minimum specific GNSS data

Exemple :

\$GPRMC,123548.000,A,4545.5480,N,00306.6852,E,0.08,27.39,220708,,*37

Exemple	Format	Unité	Description
123548.000	hhmmss.sss		Heure UTC
A	A ou V		Etat : V – Position n'est pas valide A – Position valide
4545.5480	ddmm.mmmm	d Degré m Minute	Latitude
N	N ou S	Nord ou Sud	Direction de la latitude
00306.6852	Dddmm.mmm	d Degré m Minute	Longitude
E	E ou W	Est ou Ouest (West)	Direction de la longitude
0.08		Mile marin par heure (knots)	La vitesse (Speed Over Ground)
27.39		degré	Le cap (Course Over Ground)
220708	jjmmaa	Jour/mois/année	Date
37	HH		Contrôle d'erreur

Tableau A4 - 7 Format du message RMC

6 Message VTG - Course over ground and ground speed

Exemple :

\$GPVTG,27.39,T,,M,0.08,N,0.1,K*56

Exemple	Format	Unité	Description
27.39		degré	Le cap (Course Over Ground)
T		T = True	Le cap est donné par rapport au nord géographique et non pas par rapport le nord magnétique
(vide)			
M		M = Magnétique	
0.08		Mile marin par heure	La vitesse (Speed Over Ground)
N		Knots	Mile marin par heure (knots)
0.1		Km/h	La vitesse (Speed Over Ground)
K		Km/h	Kilomètre par heure
56	HH		Contrôle d'erreur

Tableau A4 - 8 Format du message VTG

Wireless Sensor Networks: A Study for developing a Low Cost Differential GPS receiver.

Abstract

The localization system most commonly used outdoors, worldwide, by far is the GPS (Global Positioning System). It provides the position (and time) continuously (24 hours a day) and in all weather conditions. However, its accuracy does not meet the requirements of all applications.

The work in this thesis aims to improve the accuracy of GPS based on the differential mode (DGPS, Differential GPS). But unlike the solution RTK (RTK, Real-Time Kinematic) that uses a large base station, which is difficult to install and very expensive, the original solution proposed in this thesis (LCD-GPS, Low Cost Differential GPS, Local Cooperative DGPS) is based on the use of a Wireless Sensor Network (WSN) equipped with low cost standard GPS receivers.

Works conducted include the use of a digital map (Map Matching), the simple difference, the intelligent difference, the filtering and a global correction.

To evaluate this solution, a hardware and software platform has been developed; it consists of a network of wireless nodes called LiveNodes (LIMOS Versatile Embedded Node). The software part is composed particularly of an embedded operating system called LIMOS (Lightweight Multi-Threaded Operating System) and a wireless communication protocol called CIVIC (Inter Vehicle Communication and Intelligent Cooperative) and finally the specific processing of LCD-GPS solution.

The results show that the LCD-GPS can be used for various applications but it is very sensitive to the environment (multipath). However, it is noted that the WSN can generally achieve a robust and reliable location sensor.

Résumé

Le système de localisation le plus utilisé à l'extérieur, à l'échelle mondiale, est de loin le GPS (Global Positioning System). Cependant, sa précision n'est pas suffisante pour toutes les applications.

Les travaux menés dans cette thèse visent à améliorer la précision du GPS en s'inspirant du mode différentiel (DGPS, Differential GPS). Mais à l'inverse de la solution RTK (RTK, Real-Time Kinematic) qui utilise une grande station de base et qui est difficile à installer et surtout très onéreuse, la solution originale proposée dans cette thèse (LCD-GPS, Low Cost Differential GPS, Local Cooperative DGPS) est basée sur l'utilisation d'un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) équipés de récepteurs GPS standards à faible coût.

Ces travaux incluent l'utilisation d'une carte numérique (Map Matching), la différence simple, la différence intelligente, le filtrage, la correction globale, ...

Afin d'évaluer cette solution, une plateforme matérielle et logicielle a été développée, elle consiste en un réseau de capteurs appelés LiveNodes (LIMOS Versatile Embedded Node). La partie logicielle est composée notamment d'un système d'exploitation embarqué appelé LIMOS (Lightweight Multi-threading Operating System) et d'un protocole de communication sans fil appelé CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative) et enfin les traitements propres à la solution LCD-GPS.

Les résultats obtenus montrent que le LCD-GPS peut être utilisé pour diverses applications mais qu'il est très sensible à l'environnement (multi-trajet). Cependant, il est à noter que, le RCSF permet en général la réalisation d'un capteur robuste et sûr.