

# THESE

présentée en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE  
Spécialité Electronique

par

**Juliette MARAIS**  
Ingénieur ISEN

Le 4 Juillet 2002

**LOCALISATION DE MOBILES TERRESTRES PAR SATELLITES.  
MISE EN ŒUVRE D'OUTILS PERMETTANT  
L'ANALYSE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE  
PROPAGATION ET DES EFFETS DE MASQUES  
SUR LA DISPONIBILITE DU SERVICE OFFERT.**

Membres du jury :

- Mme Berbineau, Directrice de thèse
- M. Degauque, Directeur de thèse
- M. Benjelloun, Rapporteur
- M. Citerne, Rapporteur
- M. Bétaille
- M. Bousquet
- M. Franckart
- M. Heddebaut
- M. Legenne

Thèse préparée au sein du LEOST (Laboratoire Electronique, Ondes et Signaux pour les Transports) - INRETS

# Sommaire

<b>SOMMAIRE</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>6</b>
<b>CHAPITRE 1 :</b>	<b>9</b>
<b>LES BESOINS ACTUELS POUR LA LOCALISATION DES MOBILES TERRESTRES ET LES SYSTEMES EXISTANTS</b>	<b>9</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>9</b>
1.1 les différentes catégories de systèmes	9
1.2 Principales applications de la localisation de mobiles	10
<b>2 La localisation par satellites</b>	<b>10</b>
2.1 Les systèmes géodésiques de référence	10
2.2 Les différents systèmes	11
2.3 La triangulation	11
<b>3 Le système GPS</b>	<b>13</b>
3.1 Généralités	13
3.2 Le signal du satellite GPS	14
3.2.1 Description	14
3.2.2 Traitement du signal	15
3.2.2.1 Calcul de la pseudo-distance	15
3.2.2.2 Mesures sur la phase	17
3.2.2.3 Les filtrages	17
3.3 Les niveaux de service	18
<b>4 La disponibilité du système</b>	<b>20</b>
4.1 Les effets atmosphériques	20
4.2 Disposition géométrique des satellites	20
4.3 Disponibilité dans le temps	22
4.3.1 Nombre de satellites disponibles en fonction du temps	22
4.3.2 Influence du nombre de satellites reçus sur la précision de localisation	23
4.4 Influence de l'effet de masque	24
4.4.1 Influence des masques proches	25
4.4.2 Masques le long d'une trajectoire : Cas du canyon urbain (et de la tranchée ferroviaire)	26
4.5 Importance des trajets multiples	27
4.5.1 Le trajet multiple	27
4.5.2 Réception directe uniquement	28
<b>5 Les améliorations du système</b>	<b>30</b>
5.1 Les corrections différentielles du GPS : le DGPS	30
5.2 L'hybridation	30
5.3 Autres constellations pour la localisation	31
5.3.1 Le système GLONASS	31
5.3.2 GLOBALSTAR	32
5.3.3 De GNSS 1 à GNSS 2 (GALILEO)	32

<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE 2 :</b>		<b>34</b>
<b>OUTIL DE PREDICTION DES SATELLITES DISPONIBLES LE LONG DU TRAJET D'UN MOBILE BASE SUR UNE APPROCHE OPTIQUE</b>		<b>34</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>34</b>
<b>2</b>	<b>Approche conjointe simulation/expérimentation</b>	<b>34</b>
2.1	Prédiction de passage des satellites à l'aide du logiciel STK	36
2.2	Utilisation d'un enregistrement vidéo	37
2.2.1	Spécifications techniques du système d'acquisition	37
2.2.1.1	L'installation des caméras et du matériel d'acquisition	37
2.2.1.2	Le choix du système optique	38
2.2.1.3	Support d'enregistrement	40
2.2.1.4	Le multiplexeur	41
2.2.1.5	Les images extraites des enregistrements	42
2.2.2	Détection de la ligne d'horizon	42
2.2.2.1	La notion d'image vidéo en niveau de gris	42
2.2.2.2	La notion de colonne de l'image	43
2.2.2.3	Calcul de la ligne d'horizon	43
2.2.2.4	Les cas particuliers	47
2.2.3	Reconstruction tridimensionnelle de l'environnement	49
2.2.3.1	La stéréovision bi-caméras	49
2.2.3.2	La notion de primitives	51
2.2.3.3	La mise en correspondance	52
2.2.3.4	La triangulation	52
2.2.3.5	La stéréovision mono-caméra	53
2.2.3.6	Génération des deux images à partir d'une caméra	53
2.2.3.7	Extraction des primitives	53
2.2.3.8	Mise en correspondance	54
2.2.3.9	Reconstruction tridimensionnelle	56
2.2.3.10	Résultats	59
2.3	Le comptage des satellites	62
<b>3</b>	<b>Utilisation de l'outil</b>	<b>62</b>
3.1	Prédiction du nombre de satellites visibles le long d'une trajectoire	62
3.1.1	En environnement routier	62
3.1.2	En environnement ferroviaire	64
3.1.2.1	Description	64
3.1.2.2	Résultats	64
3.2	Caractérisation de l'environnement par le traitement d'image	65
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>66</b>
<b>CHAPITRE 3 :</b>		<b>68</b>
<b>CARACTERISATION DES PHENOMENES DE PROPAGATION LORS DE LA RECEPTION DES SIGNAUX EN NLOS</b>		<b>68</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>68</b>

<b>2</b>	<b>Etude théorique</b>	<b>69</b>
2.1	Réflexion d'une onde électromagnétique sur un plan	69
2.2	Diffraction d'une onde électromagnétique sur une arête	72
2.3	Impact théorique d'une réflexion sur la position	74
<b>3</b>	<b>Contribution respective de la réflexion et de la diffraction</b>	<b>75</b>
3.1	Contribution du rayon diffracté	75
3.1.1	Etude théorique	75
3.1.2	Etude expérimentale	77
3.1.2.1	Présence de satellites reçus en NLOS	77
3.1.2.2	Définition d'une zone de réception en NLOS	79
3.2	Atténuation après une réflexion	80
3.2.1	Simulation et théorie : l'atténuation dans un canyon urbain	80
3.2.2	Description de la mesure	81
3.2.3	Présentation des résultats	83
3.3	Atténuation après deux réflexions	83
3.3.1	Configuration	83
3.3.2	Essais avec l'antenne parabolique	85
3.3.3	Essais avec l'antenne omnidirectionnelle	85
3.3.4	Effet de la polarisation de l'antenne	85
3.3.5	Application aux mesures avec l'antenne patch	86
3.4	Variation de l'atténuation en fonction du type d'obstacle	87
3.4.1	Simulation et théorie : niveau de signal reçu en fonction de différents coefficients de permittivité et de conductivité.	87
3.4.2	Mesures d'atténuation sur différents types d'obstacles	87
3.5	Résultats expérimentaux en environnement urbain réel.	89
<b>4</b>	<b>Impact de la réflexion sur la localisation</b>	<b>91</b>
4.1	Impact sur la disponibilité	91
4.2	Impact sur la précision de localisation	91
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>96</b>
	<b>CHAPITRE 4 :</b>	<b>97</b>
	<b>MESURES EN ENVIRONNEMENT URBAIN</b>	<b>97</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>97</b>
<b>2</b>	<b>Prise en compte des satellites reçus après une réflexion</b>	<b>97</b>
2.1	Le principe	98
2.2	La méthode	99
<b>3</b>	<b>Les mesures</b>	<b>101</b>
3.1	L'équipement embarqué	101
3.1.1	Le récepteur GPS	101
3.1.2	Le système d'acquisition des images	101
3.2	Les environnements choisis	102
3.3	Comparaison du nombre de satellites reçus et du nombre prédit	106
3.3.1	Nombre de satellites le long du trajet	106
3.3.2	Répartitions des satellites réfléchis et directs le long du trajet	110
3.3.3	L'impact des signaux réfléchis sur la précision de la localisation	114
<b>4</b>	<b>Perspectives d'améliorations de l'outil</b>	<b>116</b>

4.1	Acquisition des images	117
4.1.1	Le réglage du pas d'échantillonnage	117
4.1.2	La profondeur d'un obstacle	120
4.1.3	Cas particuliers d'obstacles non isolés	121
4.2	Application dans le contexte ferroviaire	121
4.2.1	La couverture radioélectrique	121
4.2.2	Génération d'une base de données	123
4.2.3	Génération de gabarits	124
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>124</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>125</b>
	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :</b>	<b>128</b>
	<b>GLOSSAIRE</b>	<b>131</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>133</b>
	<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b>	<b>148</b>

# Introduction générale

Les démarches européennes, nationales et locales pour développer les systèmes intelligents de transport routier et ferroviaire visent à augmenter la sécurité des déplacements, optimiser l'usage des infrastructures existantes, réduire les coûts de fonctionnement et de maintenance et réduire l'impact des transports sur l'environnement. Poussés par ces exigences, le monde des transports s'appuie de plus en plus sur une large gamme de solutions technologiques et notamment sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Dans ce contexte, les systèmes de localisation des mobiles terrestres sont amenés à jouer un rôle clef.

Parmi les technologies existantes pour la localisation des mobiles terrestres, on peut distinguer deux grandes catégories : les systèmes de radiolocalisation et les systèmes de localisation à l'estime. Depuis plusieurs années, le thème de la localisation des mobiles terrestres est un sujet de recherche privilégié à l'INRETS-LEOST avec ses partenaires académiques ou industriels. Citons notamment les travaux sur la localisation des trains par guide d'onde [Heddebaut, 95] et ceux menés en collaboration avec le laboratoire TELICE de l'USTL [Tatkeu, 99] qui ont montré la faisabilité d'un système de localisation de mobiles par radiogoniométrie et réseau cellulaire GSM. Cette approche a été affinée afin de localiser les appels d'urgence des usagers le long d'une autoroute en collaboration avec l'IEMN-DOAE à l'UVHC [Laoufi, 00]. Il s'agit aujourd'hui de compléter ces solutions terrestres en étudiant les solutions satellitaires qui permettent de garantir la disponibilité du service dans les zones de couverture radioélectrique faible ou inexistante en intégrant l'arrivée du futur système européen GALILEO.

Quel que soit le domaine d'application, la disponibilité du service offert constitue un critère de choix déterminant pour un système de localisation des mobiles. Cette disponibilité dépend de la réception ou non des signaux utiles et de la précision de la localisation finale en fonction du temps. Selon les applications envisagées, les exigences de disponibilité des signaux peuvent aller de 60 % à 99 % du temps pour des précisions variant de plusieurs centaines de mètres à moins d'un mètre, notamment pour des applications de contrôle-commande dans le domaine ferroviaire.

Des études ont montré que la disponibilité de la plupart des systèmes de localisation des mobiles terrestres actuels utilisant des signaux issus de satellites voient leur disponibilité considérablement réduite lorsque le canal de propagation est obstrué par la présence de masques comme en milieu urbain dense ou ferroviaire [Bricquet, 97]. Afin de garantir les exigences d'une application donnée, les systèmes de localisation par satellites sont donc en général complétés par des systèmes de navigation à l'estime, des balises au sol et des systèmes diffusant des informations de correction. L'utilisateur doit donc être équipé d'un dispositif complexe, exploitant conjointement à l'aide d'un calculateur sophistiqué coûteux, les différents capteurs (récepteur GPS, gyromètres, odomètres, cartographie embarquée, etc.) mais aussi d'un dispositif de communication (récepteur radio RDS ou DAB, radio téléphone GSM, etc.). De tels systèmes équipent déjà des véhicules particuliers haut de gamme mais représentent un investissement important pour l'équipement de flottes de transports collectifs (trains,

réseaux de bus). Le développement d'applications de localisation et de communication à faible coût à caractère sécuritaire dans le domaine routier ou ferroviaire passe donc par la mise au point de solutions qui permettent de s'affranchir de ces systèmes multi-capteurs. Il apparaît ainsi que la connaissance de la disponibilité d'une constellation de satellites le long d'une trajectoire terrestre est une composante essentielle.

Actuellement, il n'existe aucun outil qui permette de fournir cette information de disponibilité radioélectrique quel que soit l'environnement. Partant de ce constat, la recherche menée au sein de l'INRETS-LEOST consiste à développer un outil de prédiction de la disponibilité d'un système de localisation des mobiles terrestres par satellites permettant de :

- définir les zones de faible couverture radioélectrique qui pourront éventuellement faire l'objet d'un déploiement de pseudolites,
- préciser si certains satellites doivent être exclus du calcul de position,
- évaluer l'erreur de positionnement obtenue en tout point.

Ces informations obtenues a priori le long d'une trajectoire peuvent permettre de construire une base de données embarquée qui, en temps réel, contribue alors à fiabiliser la mesure du récepteur GPS (ou GALILEO) sans utiliser de capteurs supplémentaires et à garantir les exigences de sécurité du système.

La localisation fondée sur l'utilisation de satellites est calculée à partir des mesures du temps de propagation de chacun des signaux issus des satellites visibles qui fournissent des valeurs de pseudo-distance entre chacun des satellites considéré et le récepteur. Les résultats sont entachés d'un certain nombre d'erreurs. Certaines sont connues et des corrections sont apportées directement par le récepteur à l'aide de modèles, ce sont les erreurs liées à la traversée de l'atmosphère. D'autres sont fonction des masques radioélectriques autour du récepteur et ne peuvent pas être corrigées a priori car il n'existe pas de modélisation généralisable à tous les environnements, ce sont les erreurs induites par la propagation par trajets multiples.

La plupart des travaux actuels sur les signaux issus de satellites considèrent trois situations de réception ou trois états [Akturan, 95]. Le cas le plus favorable pour la réception d'un signal satellite est la réception en visibilité directe. Le signal ne subit pas les atténuations et les retards dus aux trajets multiples. On parle alors d'état LOS (Line Of Sight). Lorsque les signaux en provenance des satellites sont masqués, les satellites sont soit non reçus, soit reçus par trajets multiples et donc susceptibles d'engendrer une erreur dans le calcul de la position. On parle alors d'état bloqué ou NLOS (Non Line Of Sight). La prédiction de la disponibilité passe donc nécessairement par l'identification de ces trois états.

En 1999, à l'issue des travaux réalisés dans le cadre d'un projet avec la SNCF [Marais, 99] et d'un stage de DEA à l'INRETS-LEOST, nous avons mis au point les fondements d'un outil de prédiction PREDISSAT (PREDictive Software for Satellite Availability in the field of Transport) qui permettait alors de prédire le nombre de satellites susceptibles d'être reçus le long d'une ligne de chemin de fer en classant les satellites selon deux états : visible ou LOS (Line Of Sight) et non visible ou NLOS (Non Line Of Sight).

Le premier chapitre de ce mémoire de thèse décrit les principales techniques de radiolocalisation. Nous donnons notamment les raisons pour lesquelles les systèmes fondés sur l'utilisation de satellites sont les systèmes majoritairement utilisés aujourd'hui. Nous citons les différents systèmes existants et détaillons plus particulièrement le système américain GPS très largement utilisé dans le monde, système sur lequel nous avons réalisés tous les essais. Nous décrivons les difficultés généralement rencontrées lors des applications au domaine du transport et nous présentons les solutions technologiques mises en œuvre pour améliorer les performances finales du système de localisation. Nous illustrons alors la nécessité de développer l'outil PREDISSAT.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons la première version de cet outil, destiné à prédire la disponibilité d'une constellation de satellites de localisation le long du trajet d'un mobile terrestre. Nous exploitons la première approche qui consiste à définir deux états du signal et à prédire le nombre de satellites utilisables par le récepteur en ne considérant que les satellites visibles au sens optique du terme depuis un récepteur. Ils se situent alors au-dessus des obstacles appelés masques et repérés par un processus d'acquisition d'images vidéo et d'analyse des enregistrements par l'implémentation d'algorithmes semi-automatiques en traitement différé. Les principes des processus d'acquisition et de traitement des images sont décrits ainsi que les algorithmes de reconstruction de l'environnement à 360° autour de l'antenne. Une fois les masques définis, le passage des satellites est simulé afin de prédire le nombre de satellites d'élévations supérieures aux élévations du masque à un instant donné et le long d'une trajectoire donnée. Nous présentons quelques résultats obtenus lors de la validation de l'outil en environnement ferroviaires durant des essais réalisés avec la coopération de la SNCF. Il apparaît clairement qu'en environnement très masquant, le nombre de satellites en visibilité optique ne constitue qu'une partie de la totalité des satellites reçus et utilisés par le récepteur.

Dans le troisième chapitre, afin de classifier les satellites selon la réception du signal, nous nous intéressons aux trois états définis : LOS, NLOS et bloqué. Afin de prendre en compte les phénomènes radioélectriques intervenant dans la réception d'un signal, nous avons réalisé plusieurs simulations à partir de différents modèles de propagation qui nous ont permis de formuler un certain nombre d'hypothèses sur les signaux reçus qui ont été validées expérimentalement. Nous avons ainsi étudié l'influence des trajets multiples sur l'amplitude et le temps de propagation d'un signal dans des environnements typiques afin de déterminer comment et quels satellites supplémentaires de l'état NLOS il convient d'intégrer dans les prédictions.

Dans le quatrième chapitre nous utilisons les conclusions de notre étude des phénomènes de propagation afin d'améliorer le processus de classification des satellites et donc la prédiction finale en fonction de l'environnement. Des campagnes de mesures ont été réalisées dans différents environnements urbains de l'agglomération lilloise. Les résultats de mesures sont comparés aux résultats donnés par PREDISSAT afin d'évaluer les performances de cette version finale de l'outil. Nous nous attachons à analyser les résultats à chaque étapes du fonctionnement de l'outil. Ceci nous permet de proposer et de tester des pistes d'évolution de l'outil. Nous présentons également les utilisations actuelles de l'outil dans le cadre de projets au sein de l'INRETS-LEOST, l'un pour l'urbain, l'autre pour le ferroviaire.



## Chapitre 1 :

# Les besoins actuels pour la localisation des mobiles terrestres et les systèmes existants

## 1 Introduction

Les dispositifs de localisation de mobiles deviennent progressivement incontournables dans le domaine du transport. L'application la plus connue du grand public est la navigation ou guidage automobile qui équipe désormais certains véhicules en série et qui devrait se généraliser dans les années à venir. La localisation joue aussi un rôle majeur dans l'organisation et la gestion de flottes de véhicules (taxis, secours...). Les techniques en la matière ont fait, au cours des dernières années, des progrès considérables associés à des baisses de coût qui rendent possible des utilisations multiples tant professionnelles que personnelles.

L'objectif de ce chapitre est de présenter le contexte de la localisation appliquée au transport terrestre et de résumer les principes de fonctionnement des systèmes utilisés. Après avoir rappelé les grandes catégories de systèmes et leurs applications, nous détaillerons, dans une première partie, le principe de triangulation utilisé par les systèmes fondés sur l'utilisation de satellites. La deuxième partie décrira plus particulièrement le système GPS qui domine le marché depuis quelques années. Le calcul de position est entaché d'un certain nombre d'erreurs que nous expliciterons. Enfin, nous concluerons en présentant quelques exemples de performances de ce système et les améliorations apportées par des capteurs ou constellations supplémentaires pour atteindre des exigences de précision plus élevées.

### 1.1 les différentes catégories de systèmes

Un système de localisation de mobiles terrestres est un ensemble de composants électroniques ou électromécaniques capables d'acquérir les informations nécessaires afin de localiser ces mobiles. Il peut être distant ou embarqué. Nous nous intéresserons dans ce mémoire, aux systèmes permettant un positionnement autonome. Ceux-ci peuvent être répertoriés en trois catégories [Cottinet, 98] :

- **les systèmes de proximité.** Ils fonctionnent avec des balises implantées en certains points de l'infrastructure. Ces systèmes sont souvent coûteux en particulier parce qu'ils nécessitent le déploiement d'une infrastructure dédiée et une maintenance importante.
- **les systèmes de localisation à l'estime.** Le véhicule est localisé en mesurant la distance parcourue à partir d'un point de référence et en suivant les variations de cap. Dans la plupart des applications, le capteur de distance est un odomètre qui compte le nombre de tours de roues. Le capteur d'angle peut être un gyroscope, un compas magnétique, le déplacement de la barre de direction, le mouvement du volant ou la différence des distances parcourues par les roues arrières. Ces systèmes sont très souvent intégrés aux dispositifs embarqués de guidage routier. Efficaces, ils nécessitent cependant un recalage très fréquent du fait de la dérive importante de ces capteurs.
- **les systèmes de radiolocalisation.** Cette catégorie de systèmes est elle-même divisée en quatre grandes familles [Drane, 98] décrites dans [Tatkeu, 99] :
  - *les systèmes de triangulation* fondés sur la mesure des temps de propagation (TOA : Time Of Arrival) des signaux entre le mobile et des émetteurs non synchronisés comme par exemple les systèmes satellitaires (GPS, GLONASS, GLOBALSTAR) ou les réseaux cellulaires de type GSM.
  - *Les systèmes hyperboliques* fondés sur la mesure des temps de propagation entre le mobile et des émetteurs synchronisés (TDOA : Time Difference Of Arrival)

comme par exemple les systèmes DECCA, LORAN C et les systèmes cellulaires de type IS95.

- *Les systèmes de localisation par radiogoniométrie* fondés sur la mesure des angles de gisement d'émetteurs fixes (AOA : Angle Of Arrival) comme les systèmes radiophares et radioalignements.
- *Les systèmes de localisation fondés sur une comparaison de la phase* des signaux émis et reçus comme le font aussi les systèmes satellitaires de type GPS.

## **1.2 Principales applications de la localisation de mobiles**

Les systèmes doivent très souvent permettre l'échange de communications entre les mobiles et le centre dont ils dépendent. Dans de nombreuses applications, le système de localisation intègre plusieurs principes et dispositifs afin d'atteindre la qualité requise.

Les applications mises en place imposent des caractéristiques bien précises pour ces systèmes telles que :

- le type de localisation : la localisation est effectuée à bord des mobiles (self-positioning ou auto-positionnement) ou via un poste central (remote positioning ou localisation à distance),
- la couverture géographique : internationale, nationale, régionale, urbaine, locale...,
- l'environnement : rase campagne, urbain, souterrain, bâtiment,
- la précision : absolue (500 m, 100 m, 10 m, 1 m, quelques centimètres) ou relative (pourcentage de la distance parcourue),
- la disponibilité : à 100 %, 98 %...,
- le renouvellement : toutes les heures, tous les jours, à la demande, en continu,
- le temps de réponse « à froid » (à l'initialisation ou après une longue perte de la localisation),
- les services associés : communications numériques, vocales, télécopie,
- le coût.

Selon le type d'application, engageant la sécurité du système ou non, les exigences diffèrent. Parmi les applications ne nécessitant pas la sécurité du système, on cite la gestion de flotte de transporteurs routiers ou de trains, le guidage des automobilistes ou encore l'information d'usagers de transports collectifs urbains. Ces applications requièrent une précision variant de 50 m à une centaine de mètres et peuvent souffrir de brèves interruptions de service.

Des applications ayant trait à la sécurité des passagers ou du conducteur nécessitent une disponibilité de services et des précisions plus importantes (de 1 m à 200 m) s'il s'agit de localiser un appel d'urgence, de gérer une flotte d'intervention de secours (pompiers, police, SAMU...) afin d'améliorer efficacité et rapidité, voire des précisions inférieures à 1 m dans le cas des applications de contrôle-commande ferroviaire.

Parce qu'ils répondent à la plupart de ces caractéristiques, les systèmes de positionnement par satellites sont particulièrement utilisés dans le domaine du transport. Le principal atout d'un système satellitaire réside dans sa couverture mondiale. Il est, de plus, indépendant de toute infrastructure, donc plus facile à maintenir et susceptible de passer d'un système national à un autre sans difficulté. Ceci, à des coûts de plus en plus faibles grâce à l'essor de ces technologies pour des applications grand public. Le paragraphe 2 détaille le fonctionnement d'un système de positionnement satellitaire.

## **2 La localisation par satellites**

### **2.1 Les systèmes géodésiques de référence**

Tout système de localisation se fonde sur un système géodésique de référence afin de positionner satellites et utilisateurs dans un même repère, centré sur le centre des masses de la terre. De nombreux modèles d'ellipsoïdes représentent mathématiquement la géométrie de la terre. Chaque référentiel

géodésique est associé à l'un d'eux. En France, le système de coordonnées se fonde sur le Réseau Géodésique Français RGF 93. Le GPS s'appuie sur le WGS 84 (World Geodetic System 1984) fournissant une référence à 1 m près quel que soit le lieu de la surface du globe considéré. Cette notion de système de référence et de coordonnées est fondamentale pour la localisation puisque les coordonnées exprimées dans chacun des systèmes peuvent différer considérablement. Les transformations d'un référentiel à l'autre sont donc indispensables pour ne pas entraîner d'erreurs de localisation. Les transformations mathématiques à appliquer pour les changements de référentiels sont détaillées dans [Botton, 97].

La navigation par satellites consiste en général à localiser des mobiles sur terre, sur mer, en l'air, voire dans l'espace. Le récepteur dont est muni l'utilisateur à bord du mobile mesure la distance entre le récepteur et plusieurs satellites à l'aide des messages transmis par ces derniers. Ces systèmes de localisation utilisent des réseaux de cercles ou sphères.

## 2.2 Les différents systèmes

Les systèmes de satellites sont classifiés suivant quatre catégories relatives à l'altitude des satellites par rapport au sol [Abriat, 98] (tableau 1.1) :

LEO (Low Earth Orbit)	MEO (Medium Earth Orbit)	GEO (Geostationary)	HEO High Earth Orbit
3000 km	30 000 km	40 000 km	
GLOBALSTAR	GPS GLONASS ELLIPSO	INMARSAT EUTELTRACS	

**Tableau 1.1. Différents systèmes de localisation par satellite**

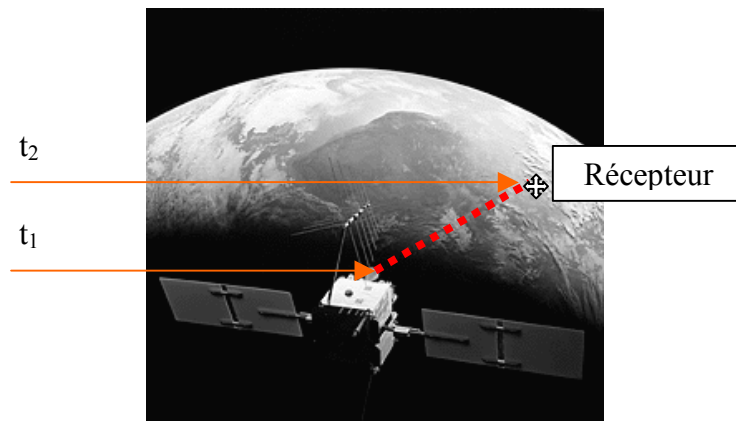
- Les systèmes GPS (20 000 km, 24 satellites) et GLONASS (19 100 km, 24 satellites), comme le futur GALILEO (23 000 km, 30 satellites) sont dédiés à la navigation. Nous décrirons ces trois systèmes dans ce chapitre.
- GLOBALSTAR (1 400 km, 48 satellites) ou EUTELTRACS (36 000 km, 2 satellites géostationnaires) offrent des solutions de positionnement combinées aux moyens de communication.
- ELLIPSO (2 constellations de satellites : 10 satellites en orbite elliptique + 4 satellites en orbite circulaire équatoriale à 8050 km) propose des informations de positionnement mais est avant tout un système de communication.

## 2.3 La triangulation

Les systèmes de localisation fondés sur l'utilisation de satellites permettent à l'utilisateur de déterminer sa position à partir des positions connues de plusieurs satellites et de la mesure des temps de propagation des signaux issus de chacun de ces satellites. La position du récepteur est, en général, obtenue en quasi-temps réel en quelques secondes d'observation. Nous expliquons ici le principe de

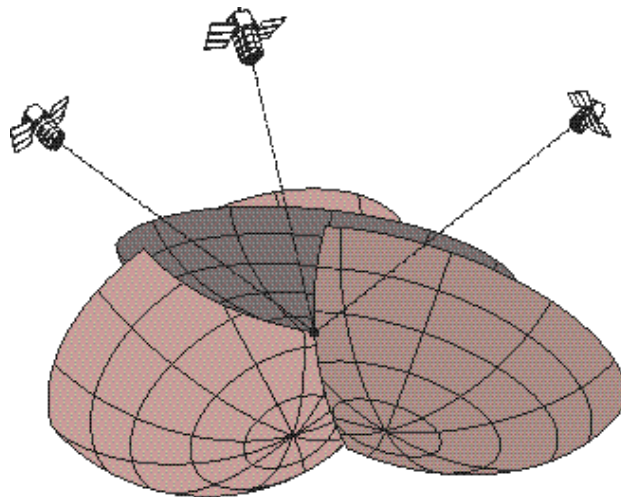
base de ce calcul. Nous détaillerons la réception du signal et son traitement dans le cas du GPS, paragraphe 3.2.

Chaque satellite de la constellation émet des éphémérides (ensemble des paramètres qui décrivent l'orbite d'un satellite) qui permettent de calculer la position du satellite dans un repère terrestre au moment de la mesure. Connaissant l'heure exacte d'émission d'un message ( $t_1$  sur la figure 1.2), il suffit de lire l'heure d'arrivée de ce message sur l'horloge du récepteur ( $t_2$ ) pour en déduire le temps de propagation du signal. Cette valeur, multipliée par la vitesse de la lumière, donne la distance émetteur - récepteur. La position du satellite étant transmise dans le message, il est alors possible de tracer une sphère de rayon égal à la pseudo-distance autour du satellite considéré.



**Figure 1.2. Mesure du temps de propagation.**

L'intersection de trois sphères donne deux points. L'un de ces deux points, situé à l'intérieur du globe terrestre, ne représente pas une position plausible. Il est donc éliminé et la position calculée est identifiée (cf. figure 1.3). Le calcul de la position requiert donc au minimum la réception de 3 satellites simultanément.



**Figure 1.3. Principe de calcul du positionnement d'un mobile par triangulation.**

En réalité, quatre satellites sont nécessaires pour tenir compte de la non synchronisation du récepteur et des horloges satellites. De plus, pour des raisons techniques et économiques, les horloges ne sont jamais parfaitement précises (les horloges embarquées sur les satellites du bloc II dérivent de  $10^{-13}$  s à  $10^{-14}$  s par jour et la précision d'une horloge de récepteur est de l'ordre de  $10^{-6}$  s/jour) [Botton, 97]. La distance est donc faussée par le décalage en temps entre l'heure satellite et l'heure récepteur, appelé biais d'horloge  $\Delta T$ . C'est pourquoi, dans la terminologie GPS, cette distance est appelée « pseudo-

distance ». Dès lors, le nombre d'inconnues passe à quatre ( $X$ ,  $Y$ , et  $Z$  utilisateur et  $\Delta T$ ), ce qui conduit à utiliser un quatrième satellite pour résoudre le système d'équations (1.1).

Soient  $X_{S_i}$ ,  $Y_{S_i}$  et  $Z_{S_i}$  les coordonnées cartésiennes d'un satellite  $i$ ,  $X_R$ ,  $Y_R$  et  $Z_R$  les coordonnées cartésiennes du récepteur,  $PD_i$  la pseudo-distance liée à  $S_i$  et  $c$  la vitesse de la lumière.

$$\begin{aligned}
 PD_1 &= \sqrt{(X_{S_1} - X_R)^2 + (Y_{S_1} - Y_R)^2 + (Z_{S_1} - Z_R)^2} + c\Delta T \\
 PD_2 &= \sqrt{(X_{S_2} - X_R)^2 + (Y_{S_2} - Y_R)^2 + (Z_{S_2} - Z_R)^2} + c\Delta T \\
 PD_3 &= \sqrt{(X_{S_3} - X_R)^2 + (Y_{S_3} - Y_R)^2 + (Z_{S_3} - Z_R)^2} + c\Delta T \\
 PD_4 &= \sqrt{(X_{S_4} - X_R)^2 + (Y_{S_4} - Y_R)^2 + (Z_{S_4} - Z_R)^2} + c\Delta T
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

La résolution du système (1.1) permet de connaître les coordonnées  $X_R$ ,  $Y_R$  et  $Z_R$  et le délai  $\Delta T$  correspondant au biais d'horloge du récepteur.

L'Europe initie le système GALILEO. Cependant, le système de localisation GPS constitue aujourd'hui le système en service le plus utilisé. C'est pourquoi notre étude s'est intéressée à cette constellation.

### 3 Le système GPS

#### 3.1 Généralités

Le GPS ou Global Positioning System est un système américain de satellites de navigation géré par le DoD (Department of Defence). Depuis plusieurs années, le GPS appelé également NAVSTAR (NAVigation System by Timing And Ranging) ou système de navigation par satellites a largement atteint ses buts militaires initiaux et est devenu de plus un outil incontournable pour bon nombre d'applications civiles. Le GPS est un système de positionnement à quatre dimensions qui fournit la longitude, la latitude, l'altitude et l'heure.

Le réseau du GPS-NAVSTAR est divisé en trois segments principaux :

- **le segment spatial**, composé d'au moins 24 satellites à défilement, disposés régulièrement sur six plans orbitaux à raison de quatre satellites par orbite. Il est complètement opérationnel depuis le 8 décembre 1993.

Les orbites sont inclinées de  $55^\circ$  par rapport au plan équatorial. Chaque satellite effectue une rotation complète autour du globe à l'altitude de 20 185 km. Un satellite décrit une orbite en une demi-journée sidérale, c'est à dire qu'un utilisateur terrestre voit un même satellite toutes les 23 heures 56 minutes au même endroit du fait de la différence entre la période de rotation des satellites et de la terre. Chaque satellite a un angle de vue de 28 degrés sur la sphère terrestre. Ainsi en tout point de la surface du globe avec un angle de visibilité de  $5^\circ$ , six à dix satellites au moins sont visibles. La constellation est représentée sur la figure 1.4.



**Figure 1.4. Constellation GPS**

- **le segment de contrôle** est constitué de cinq stations de contrôle, de trois émetteurs de télécommande et d'une station de contrôle centrale. Ses principales fonctions sont de suivre les satellites afin d'estimer leur orbite, d'ajuster leurs éphémérides, de modéliser la dérive des horloges et de remettre à jour les messages de navigation que les satellites diffusent. Il surveille et maintient l'état de chaque satellite.

- **le segment utilisateur** (sur terre, sur mer ou en l'air) est composé des utilisateurs militaires et associés et des utilisateurs civils. Ils disposent de récepteurs capables de recevoir, décoder et traiter les messages émis par les satellites GPS.

## **3.2 Le signal du satellite GPS**

### **3.2.1 Description**

Chaque satellite émet un signal dans la bande L centré sur deux fréquences  $L1 = 1575,42$  MHz et  $L2 = 1227,6$  MHz de largeur de bande 20 MHz. Les niveaux de signaux reçus sur terre se situent entre -160 et -166 dBW. Chaque satellite émet un code qui lui est propre de manière à ce que chaque récepteur puisse l'identifier parfaitement. Chacune des fréquences porte un message constitué des éphémérides de chaque satellite à 50 Hz (ou 50 bits/s), des données de correction de propagation et de temps satellites qui permettent au récepteur de retrouver très précisément la position du satellite dans le référentiel de temps absolu GPS. L'information relative à chaque satellite est transmise sur les ondes porteuses. La seconde porteuse est utile lorsque la fréquence L1 est perturbée et permet, par une technique différentielle, la correction des retards dus à l'ionosphère. Les signaux de chaque satellite sont très stables en fréquence, grâce à des horloges atomiques embarquées.

La transmission se fait selon la technique d'étalement de spectre par répartition dans les codes. Le signal reçu par un récepteur situé sur terre est alors d'une amplitude telle qu'il semble noyé dans le bruit thermique généré par le récepteur.

Chaque satellite utilise des codes pseudo-aléatoires orthogonaux différents (Pseudo Random Number) :

- **Le Code C/A (Coarse/Acquisition code)** est superposé aux données de navigation sur la porteuse L1. Il est généré à 1,023 MHz. Il est appelé code « court ».

- **Le Code P (Precision Code)** généré à 10,23 MHz, est superposé aux données de navigation sur les deux porteuses L1 et L2. Il est appelé code « long » et est réservé à l'armée américaine. Il offre l'accès à une précision maximale (PPS). Un code militaire, ajouté au code P sur les deux porteuses, protège contre le leurrage.

En réception, l'accès multiple à répartition dans les codes permet de séparer les signaux issus de chaque satellite.

Sur les porteuses L1 et L2, les signaux avant modulation s'écrivent sous la forme :

$$S1 = A_p \times m(t) \times P(t) \times \cos(2\pi L_1 t + \Phi) + A_c \times m(t) \times C(t) \times \sin(2\pi L_1 t + \Phi) \quad (1.2)$$

$$S2 = B_p \times m(t) \times P(t) \times \cos(2\pi L_2 t + \Phi) \quad (1.3)$$

Où C(t) et P(t) représentent respectivement les codes C/A et P, fonctions du temps ne prenant que les valeurs -1 et +1. Le message m(t) contient les éphémérides du satellite, des corrections des effets de l'ionosphère, l'état de santé du satellite, les paramètres d'horloge... et A<sub>p</sub>, A<sub>c</sub> et B<sub>p</sub>, les amplitudes des signaux.

Le schéma de la figure 1.5 représente la génération des signaux S1 et S2.

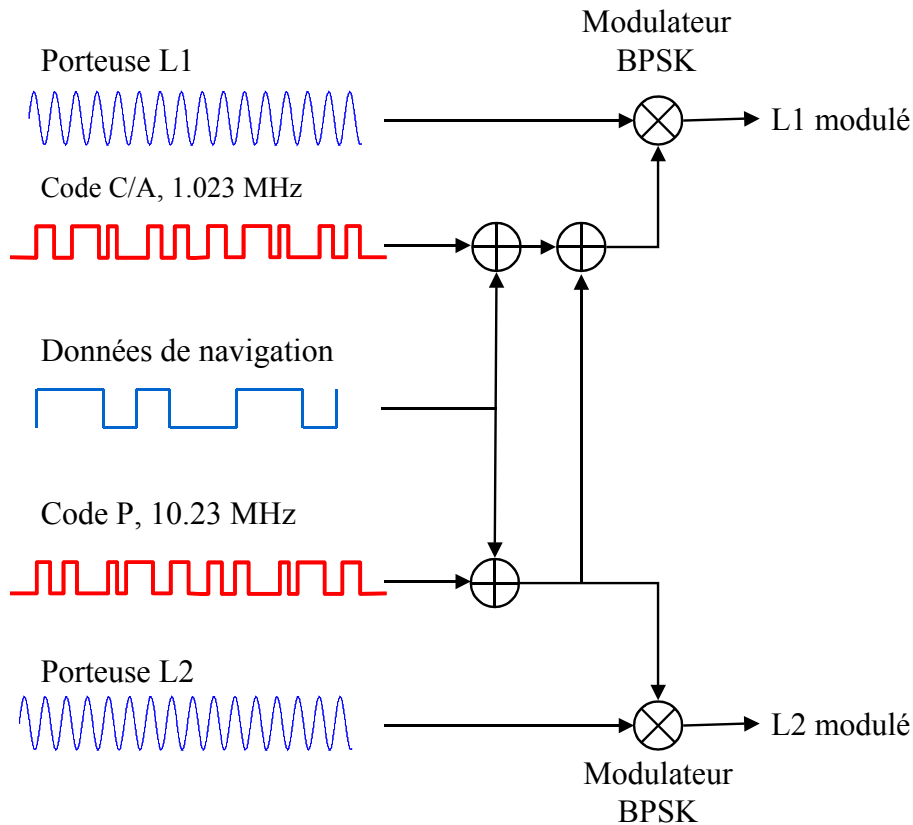


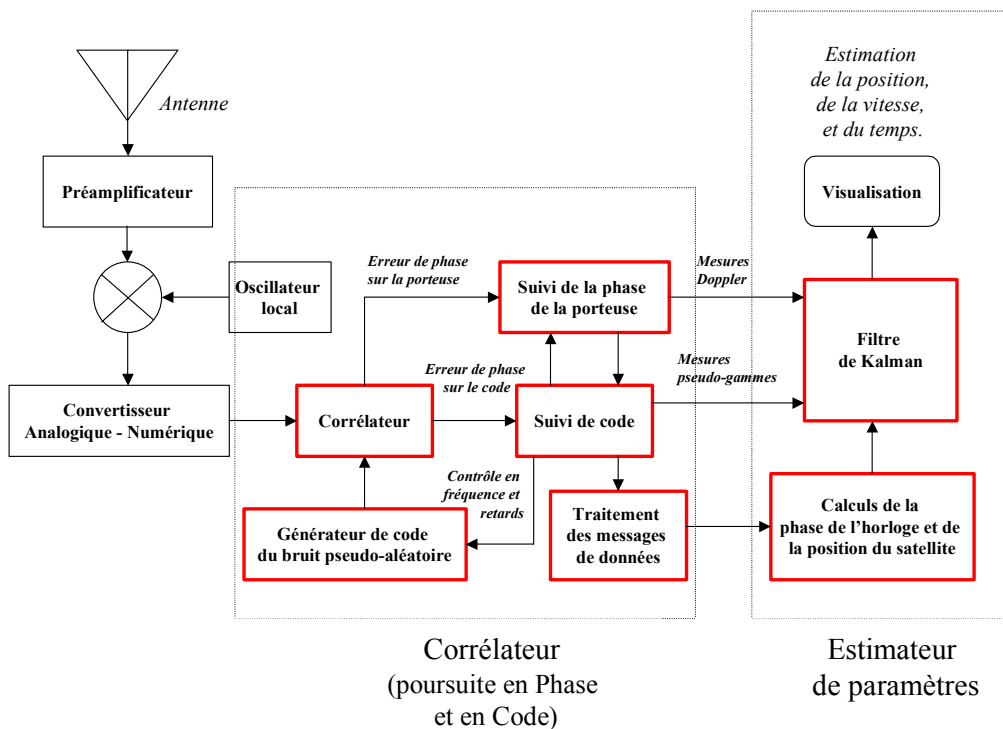
Figure 1.5. Schéma de la génération des signaux L1 et L2.

### 3.2.2 Traitement du signal

#### 3.2.2.1 *Calcul de la pseudo-distance*

La figure 1.6 représente l'architecture type d'un récepteur GPS.

L'accès au satellite se fait par la sélection de son code. Le traitement des données comporte deux phases : l'**accrochage** et la **poursuite**.

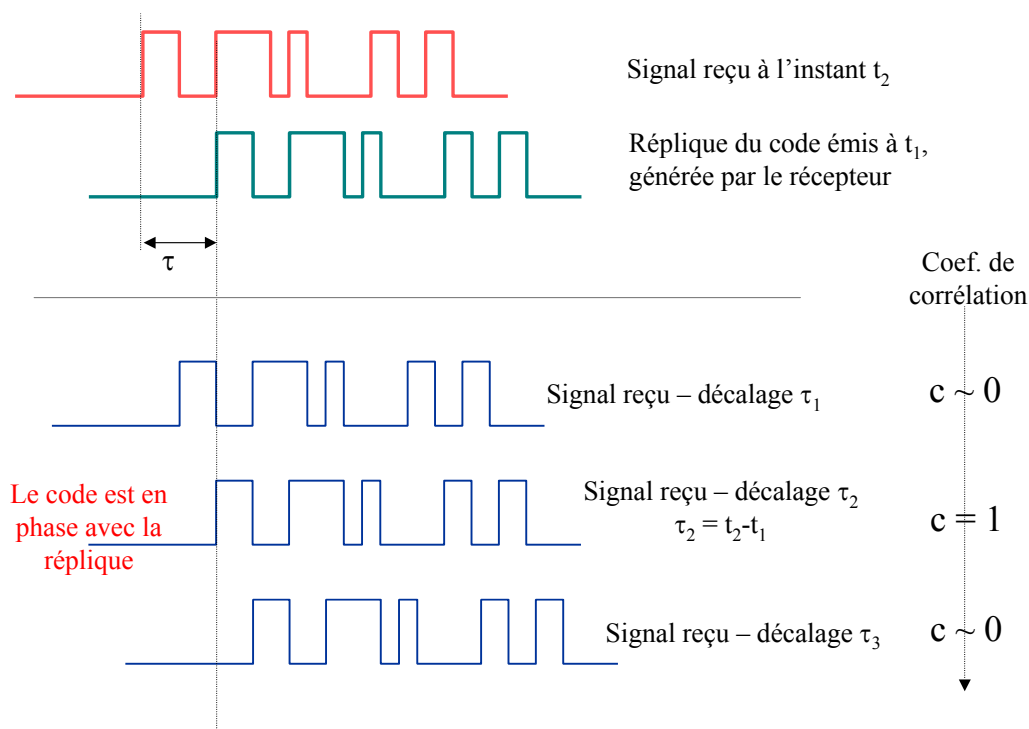


**Figure 1.6. Schéma bloc d'un récepteur GPS (Source : ULCO).**

L'accrochage consiste à chercher un satellite et, pour cela, le récepteur génère localement une réplique du code de ce satellite. Il effectue l'intercorrélation rapide des deux codes afin de vérifier que le code reçu est bien le code cherché. Si c'est le cas, un verrouillage sur le signal est alors réalisé par des boucles de poursuite du code et de la porteuse. Le récepteur calcule ensuite le temps  $\tau$  que le signal a mis depuis le satellite jusqu'à sa réception. Cette valeur  $\tau$  est déterminée en faisant glisser le code reçu jusqu'à ce qu'il soit en phase avec la réplique du signal générée par le récepteur. Le coefficient de corrélation est calculé à chacun des décalages tel qu'illustré schématiquement figure 1.7. Il est maximal lorsque les signaux sont en phase. On sait alors que le décalage entre le signal reçu et la réplique correspond au temps de parcours du signal. Les décalages sont proportionnels à la durée d'un bit et déterminent la précision en temps. Pour reprendre la terminologie classique en étalement de spectre, plus le temps symbole sera court, plus la précision sera grande.

En multipliant  $\Delta t$  par la vitesse de la lumière  $c$ , la pseudo-distance entre le satellite et le récepteur est calculée.





**Figure 1.7. Principe du pic de corrélation**

### 3.2.2.2 Mesures sur la phase

Si le fonctionnement de base du GPS repose sur l'utilisation de ces codes C/A et P, de nombreuses applications fondées sur la mesure de la différence de phase des signaux transmis en bande L ont vu le jour. Le principe de la mesure sur la phase est une comparaison de la phase du signal reçu avec la phase de la réplique de signal généré par le récepteur. La pseudo-distance étant proportionnelle à la différence de phase entre le récepteur et le satellite, ce calcul de distance par mesure de phase constitue un autre moyen de localiser le récepteur.

L'inconvénient réside dans le fait que la grandeur effectivement mesurable n'est que la partie fractionnaire de la phase : le nombre entier de longueur d'onde initial contenu dans la distance récepteur-satellite n'est pas mesurable par le récepteur. On dit que la mesure de phase est ambiguë. Ces récepteurs plus coûteux mais plus précis sont en général utilisés pour des applications telles que la géodésie ou la topographie selon la méthode Real Time-Kinematic (RTK) ou positionnement cinématique qui effectue une mesure GPS en temps réel relative.

La position et la vitesse d'un objet sont déterminées en fonction de la position d'une référence connue en effectuant des mesures de phases avec deux récepteurs. L'un installé sur la station de référence (dont les coordonnées sont connues) et l'autre sur le point à positionner. La référence envoie des données de corrections au point de mesure via une liaison radio par exemple via GSM. Une première phase d'initialisation permet de lever l'ambiguïté sur la phase. L'avantage majeur de cette technique réside dans la précision de la localisation qui peut atteindre le centimètre.

Dans la suite de nos études, nous ne considérerons que des récepteurs de navigation embarqués réalisant uniquement une mesure sur les codes.

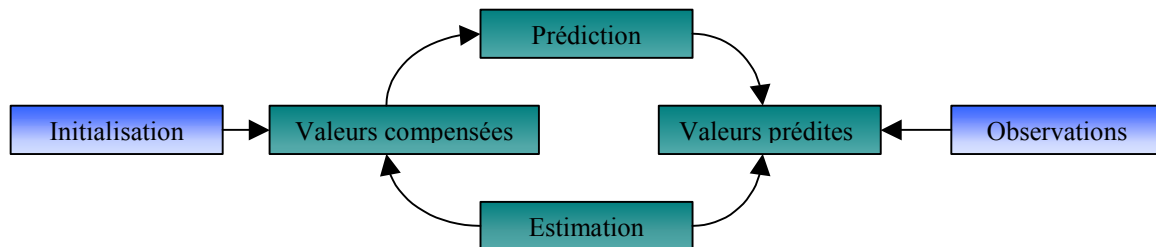
### 3.2.2.3 Les filtrages

#### Le filtrage de Kalman

Les mesures de position et de vitesse peuvent être entachées de bruit et d'autres sources d'erreurs. Ces imprécisions conduisent à des mesures de navigation bruitées. Un filtrage de Kalman est en général mis en œuvre pour calculer des résultats de navigation lissés.

Dans un système dynamique (qui varie en fonction du temps, comme c'est le cas des positions calculées par le récepteur GPS), les variables du système sont des variables d'état. L'état d'un système peut être caractérisé à un instant donné par un vecteur regroupant les paramètres permettant à l'utilisateur de connaître ce système.

Le filtre de Kalman répond à la question suivante : étant donnée notre connaissance du comportement du système et la nouvelle mesure, quelle est la meilleure estimation de la position ? Schématiquement, il peut être représenté de la manière suivante (figure 1.8) :



**Figure 1.8. Schématisation du filtre de Kalman.**

### *Le filtrage particulaire*

De nouvelles techniques de filtrage apparaissent, plus performantes que le filtrage de Kalman. Il s'agit du filtrage particulaire. Ce filtrage est une méthode optimale d'estimation de processus non linéaire au travers de capteurs. La résolution du système constitué des équations d'état et d'observation du système est réalisée en observant l'évolution de N particules qui évoluent parallèlement en fonction des mesures relevées par les capteurs (soit le GPS). Chaque particule simule une trajectoire possible et est pondérée par la probabilité que cette trajectoire soit la trajectoire à estimer [Diginext, 96]. Une redistribution périodique des particules permet de concentrer les particules sur les positions les plus vraisemblables au vu des observations [Hue, 01].

Ce type de filtrage est utilisé dans des champs d'applications très vastes : hybridation de capteurs, détection / poursuite de mouvement à partir de radar, sonar, vidéo, reconnaissance de formes dans une image...

### **3.3 Les niveaux de service**

Le GPS offre deux types de service:

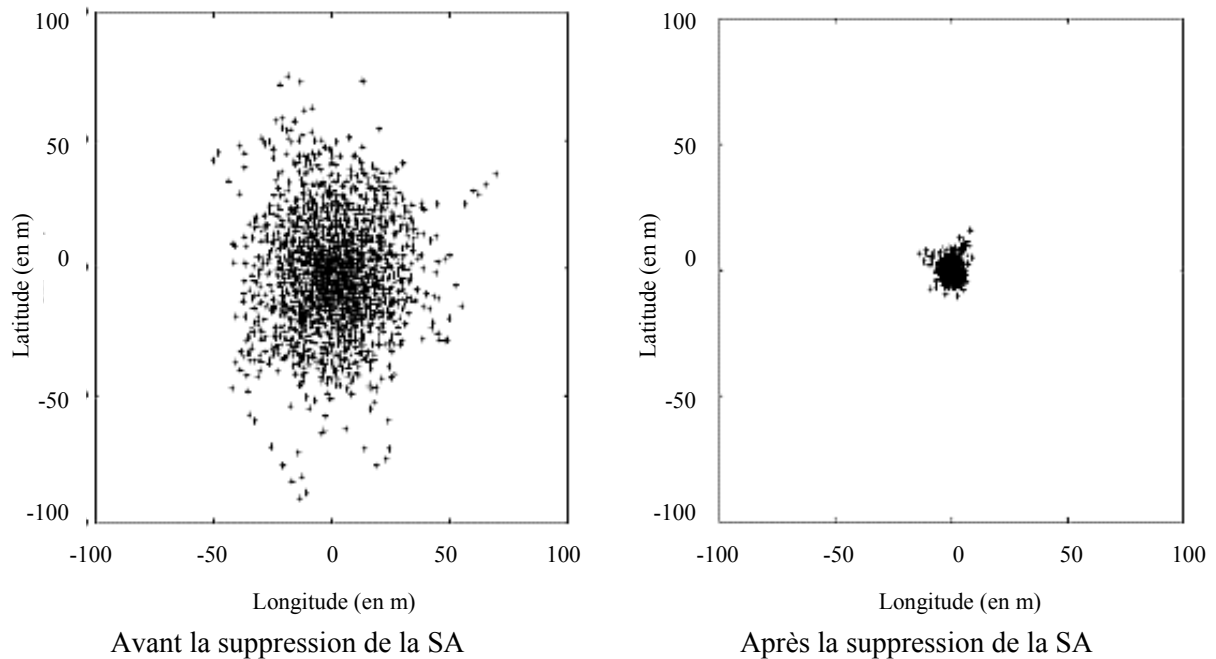
- **Le SPS (Standard Positioning System)** ou niveau de service standard est accessible à tout utilisateur civil muni d'un récepteur GPS. Ce niveau de service est porté par le code C/A. Il offre une précision de 21 m à 95% du temps dans le plan horizontal et 27.7 m dans le plan vertical.

Un paramètre permet de dégrader un peu plus ce niveau de service. Il s'agit de la SA (Selective Availability) générée par l'intermédiaire d'un bruit de phase ou « jitter » introduit sur les transitions du signal de données transmis. Seuls les militaires américains en possèdent la clé. Depuis mai 2000, cette dégradation n'est plus en vigueur mais le président des Etats-Unis possède le pouvoir de la réactiver. Les gains apportés par la suppression de la dégradation sont visualisés sur la planche 1.9. Un certain nombre de sources d'erreurs subsistent cependant. Elles sont rassemblées et quantifiées dans la table 1.10.

- **Le PPS (Precise Positioning System)** est accessible uniquement aux utilisateurs militaires ou aux utilisateurs autorisés par le Département de la Défense (DOD) sur des critères de défense nationale et internationale. Il offre une précision. Il est codé en code P. De plus, son accès est contrôlé par la cryptographie du signal appelée antibrouillage ou antileurrage ou AS (Anti Spoofing) qui consiste à

éviter le brouillage volontaire des signaux GPS par des utilisateurs « ennemis ». Le code P, une fois crypté, est appelé code Y.

Chacun des graphes de la figure 1.9 représente une journée d'acquisition de la position fournie par le GPS réalisée par la NCAD Corporation, à Erlanger, Kentucky en Mai 2000. Les graphiques montrent que la SA génère une dispersion des points de mesure. Les points sont situés dans un rayon de 45 m (pour 95% de points). Sans la SA, 95% des points sont maintenant compris dans un cercle de rayon de 6,3 m.



**Figure 1.9. Précision de localisation du GPS avec et sans la SA**  
(Source : NOAA National Geodetic Survey).

Source de l'erreur	Erreur typique (mètres, $1\sigma$ )	
	SPS avec la SA	SPS sans la SA
SA	24.0	0.0
Retard ionosphérique	7.0	7.0
Retard troposphérique	0.2	0.2
Erreur d'horloge et d'éphémérides	2.3	2.3
Bruit du récepteur	0.6	0.6
Trajets multiples	1.5	1.5
UERE (erreur sur la mesure de distance)	25.0	7.5
HDOP (géométrie des satellites)	1.5	1.5
Précision horizontale totale, 95%	75.0	22.5

**Table 1.10. Classification des erreurs avec et sans la SA** (Source : [Shaw, 00]).

## 4 La disponibilité du système

Quel que soit le domaine d'applications des systèmes de localisation, un critère de choix déterminant réside dans la disponibilité du service offert. Nous utiliserons la définition de la disponibilité donnée par [Kaplan, 96] : « *La disponibilité d'un système de navigation est le pourcentage de temps pendant lequel le service du système est utilisable avec la précision souhaitée* ».

Elle est fonction à la fois des caractéristiques physiques de l'environnement, de la disponibilité du signal et des performances techniques de la transmission. Dans nos travaux, nous avons analysé l'impact de ces paramètres. Afin de donner une définition complète, il convient de prendre en compte la couverture radioélectrique du système mais aussi les temps de panne et de maintenance des satellites.

Les sources d'imprécisions sur le résultat de localisation sont principalement liées à une mauvaise estimation de la pseudo-distance entre le satellite et le récepteur. Ces erreurs sont imputables à une mauvaise mesure du temps de propagation relative à :

- la disposition géométrique des satellites,
- aux phénomènes de propagation (propagation dans l'ionosphère, la troposphère ou phénomènes de trajets multiples),
- aux erreurs d'éphémérides (erreurs de modélisation de la position du satellite) ou de synchronisation des horloges.
- aux erreurs propres au récepteur (biais de l'horloge, bruit de mesure...).

Dans les paragraphes qui suivent, nous revenons sur certaines de ces erreurs, ainsi que sur la caractéristique non géostationnaire de la constellation qui influence la disponibilité des signaux dans le temps.

### 4.1 Les effets atmosphériques

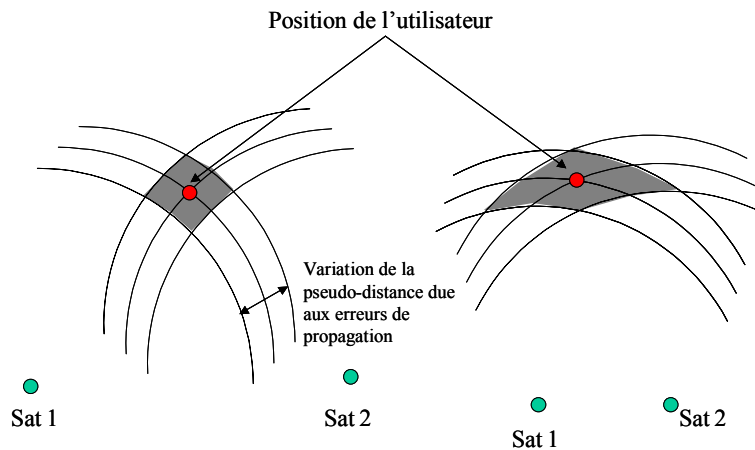
Pendant leur parcours depuis le satellite jusqu'au récepteur, les signaux sont retardés dans l'ionosphère (entre 70 et 2000 km d'altitude) et la troposphère (0 à 10 km d'altitude).

En effet, les différentes couches de l'atmosphère (ionosphère, troposphère, stratosphère) sont des milieux qui affectent le temps et la trajectoire de propagation du signal.

En pratique, une correction ionosphérique peut être évaluée par l'utilisation conjointe des deux ondes L1 et L2. Concernant la traversée troposphérique, de nombreux modèles de correction existent dans la littérature (modèles de Saastamoinen, Hopfield, Chao, Marini et Murray...) [Brunner, 93] [Spilker, 96]. Ces modèles sont fonction de paramètres tels que l'élévation du satellite, la température ou la pression issues de données météorologiques ou d'estimations stochastiques. Des corrections sont contenues dans les messages radiodiffusés.

### 4.2 Disposition géométrique des satellites

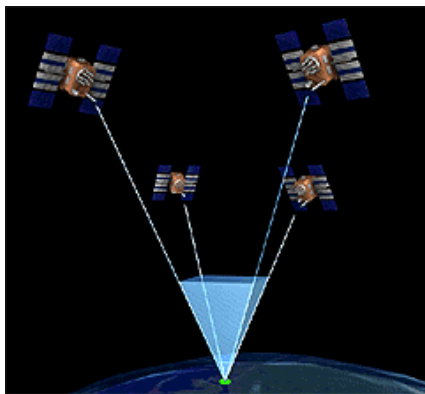
Si le calcul de position met en jeu un ensemble de satellites regroupés dans un même secteur de l'espace la précision du calcul diminue. Le positionnement « idéal » des trois satellites utilisés pour le calcul serait les sommets éloignés d'un triangle équilatéral. L'explication de ce concept est illustrée figure 1.11. En effet, le schéma de gauche illustre un scénario dans lequel deux satellites sont approximativement à angle droit par rapport à la position de l'utilisateur. La zone d'incertitude relative aux erreurs possibles de mesure de la pseudo-distance est beaucoup plus petite que celle de la figure de droite, qui illustre un scénario dans lequel les deux satellites sont proches.



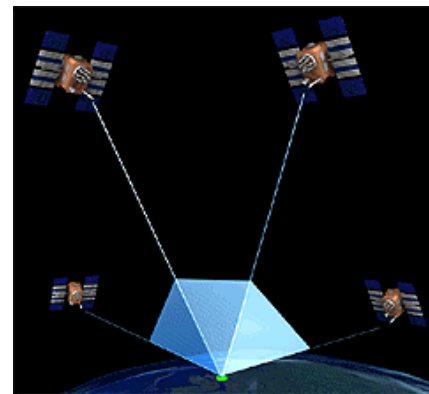
**Figure 1.11. Illustration des erreurs liées à la géométrie du système.**

Pour caractériser la position géométrique des satellites, le GPS calcule un coefficient appelé GDOP (Geometric Dilution of Precision) qui est un nombre sans dimension déterminé par la position relative des satellites considérés pour la localisation par rapport au récepteur. Il s'agit d'un facteur qui peut être pris en compte par le récepteur GPS pour effectuer un choix parmi les satellites à utiliser dans le calcul de la localisation. Il constitue une mesure de l'erreur imputable à la géométrie du système.

Dans le cas où l'on considère quatre satellites pour se localiser, cette notion s'illustre en considérant le volume de l'hexaèdre formé par l'utilisateur et les quatre satellites. Le GDOP est inversement proportionnel au volume de cet hexaèdre (figure 1.12). La précision sera d'autant meilleure que ce volume sera grand.



Géométrie moyenne



Bonne géométrie

**Figure 1.12. Influence de la géométrie des satellites sur la précision de localisation.**

La plupart des récepteurs actuels utilisent un nombre maximal de satellites dès lors qu'ils sont reçus avec un niveau de signal suffisant. Cependant, un GDOP maximal peut être imposé par l'utilisateur pour que le récepteur sélectionne la combinaison optimale de satellites. La valeur du GDOP est extraite de la linéarisation du système d'équations utilisé dans le calcul de position et s'exprime comme suit.

La position du satellite est connue selon son élévation (el) et son azimut (az). Dans un repère orthonormal centré sur l'observateur (O, x, y, z), les coordonnées des vecteurs unités  $a_i = (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})$  pointant vers le satellite i s'expriment de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
a_{xi} &= \cos(el_i) \sin(az_i) \\
a_{yi} &= \cos(el_i) \cos(az_i) \\
a_{zi} &= \sin(el_i)
\end{aligned}
\tag{1.4}$$

Dans le cas où n satellites sont utilisés, considérons H constituée des vecteurs  $a_i$  :

$$H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 1 \\ a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} & 1 \end{bmatrix}
\tag{1.5}$$

Alors, la résolution du système linéaire  $\Delta D = H \times \Delta X$ , où  $\Delta D$  représente le vecteur écart sur les pseudo-distances, et  $\Delta X$  le vecteur écart sur la position, conduit à calculer :

$$(H^T H)^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix}
\tag{1.6}$$

Le lecteur intéressé trouvera le détail des calculs dans [Yarlagadda, 97]. Le GDOP est défini selon la relation (1.7), [Kaplan, 96], où les  $D_{ij}$  sont les coefficients de la matrice :

$$GDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}}
\tag{1.7}$$

A partir de la matrice (1.6), d'autres coefficients de précision sont définis :

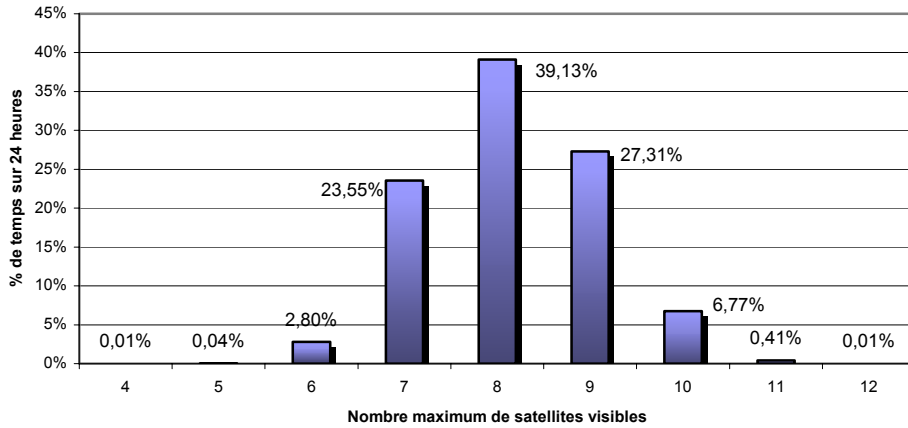
- PDOP (Position Dilution of Precision : coefficient d'affaiblissement de la précision du résultat de positionnement instantané)  $PDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}$ ,
- Horizontal DOP (coefficient d'affaiblissement de la précision sur la composante horizontale du résultat de positionnement instantané)  $HDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22}}$ ,
- Vertical DOP (coefficient d'affaiblissement de la précision sur la composante verticale du résultat de positionnement instantané)  $VDOP = \sqrt{D_{33}}$  et
- Time DOP (coefficient d'affaiblissement de la précision du résultat de synchronisation instantané)  $TDOP = \sqrt{D_{44}}$ .

Cette notion de GDOP est commune à tous les systèmes de localisation utilisant la mesure des temps de propagation.

### 4.3 Disponibilité dans le temps

#### 4.3.1 Nombre de satellites disponibles en fonction du temps

Les satellites GPS sont des satellites en orbites quasi-circulaires. Leurs positions varient donc en fonction du temps. Le système est conçu de manière à ce qu'en tout point du globe 6 satellites au minimum soient accessibles. En pratique, 8 satellites seront visibles au dessus de 5 degrés d'élévation dans plus de 70% du temps comme illustré figure 1.13.

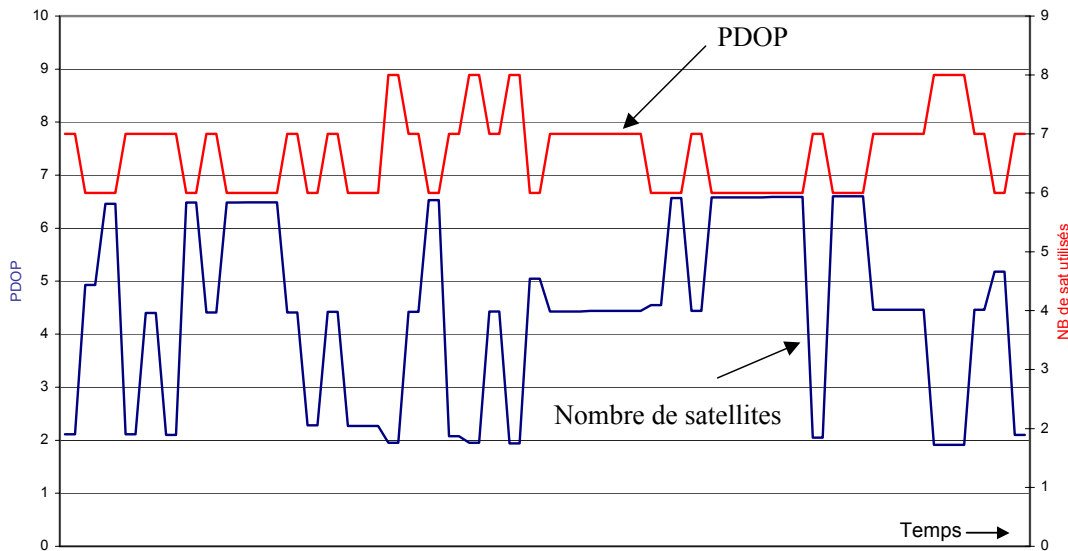


**Figure 1.13. Profil de visibilité des satellites GPS (Source : DoD USA)**

Cependant, en un point, y compris si l'environnement est fixe, les satellites utilisés ne seront pas les mêmes d'un instant à l'autre. Le nombre de satellites disponibles et la géométrie de la constellation seront donc variables dans le temps.

#### 4.3.2 Influence du nombre de satellites reçus sur la précision de localisation

Le nombre de satellites disponibles pour le calcul de localisation influence la précision de la localisation. En effet, les coefficients de précision, tel que le PDOP, sont directement liés au nombre de satellites (figure 1.14). Comme le GDOP, la précision de la localisation augmente quand le PDOP diminue. Plus le nombre de satellites reçu est grand, plus le récepteur pourra choisir la meilleure configuration géométrique pour une bonne précision.



**Figure 1.14. Variation du PDOP avec le nombre de satellites utilisés en fonction du temps (mesure réalisée en environnement urbain sur un véhicule en mouvement)**

Les essais de Y. Morioka [Morioka, 00] mettent en évidence l'évolution de la précision de la localisation en fonction du nombre de satellites reçus (figure 1.15).

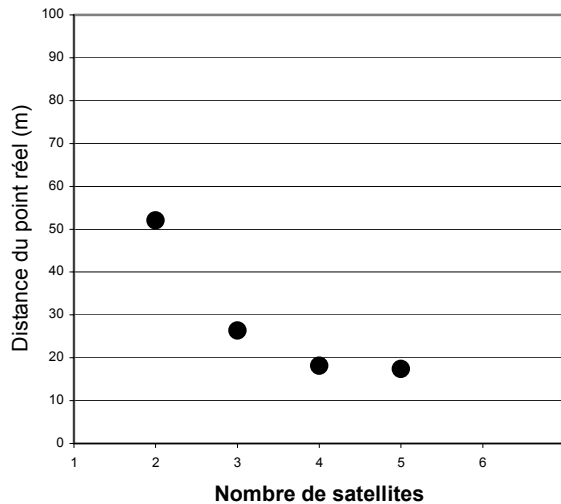


Figure 1.15. Erreur de localisation en fonction du nombre de satellites reçus [Morioka, 00].

#### 4.4 Influence de l'effet de masque

Le cas le plus favorable au sens de la qualité et du niveau de signal reçu est le cas où le champ électrique est reçu directement. Ce champ est reçu lorsque le trajet émetteur-récepteur se fait au dessus de la ligne de visibilité directe. Il n'y aura alors aucun retard dû aux multichemins du signal et l'atténuation de signal sera imputable aux seules pertes en espace libre (ou « path loss »). La ligne d'horizon au sens ligne de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur est représentée figure 1.16.

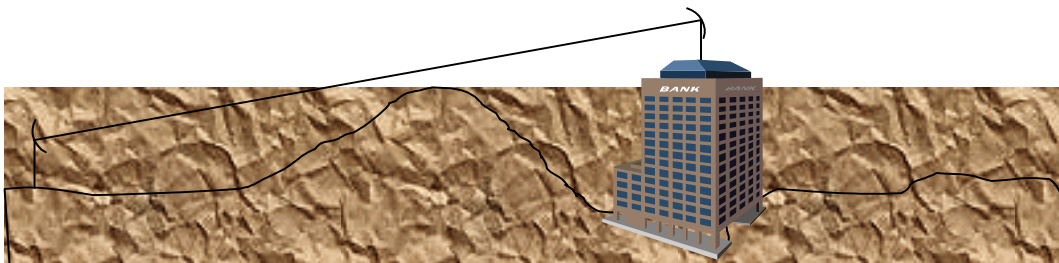
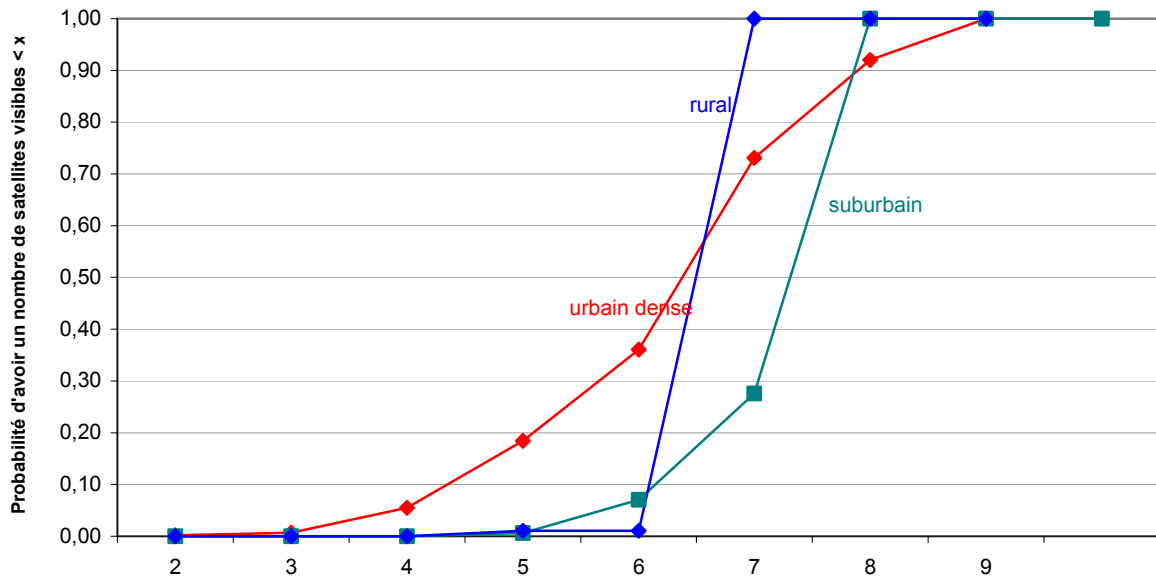


Figure 1.16. Ligne de visibilité directe.

En milieu urbain ou en tranchée ferroviaire, la ligne d'horizon optique peut atteindre des élévations importantes du fait la présence d'obstacles tels que les immeubles. Le masquage est un des facteurs majeurs intervenant dans les erreurs de toute localisation par GPS dans ces environnements.

Nos différentes campagnes d'essais illustrent la variation de la probabilité d'avoir un nombre de satellites visibles selon le type d'environnement que rencontre le récepteur (figure 1.17). Cette variation s'explique par les évolutions des hauteurs des masques, qui statistiquement, seront plus élevés en environnement urbain qu'en environnement résidentiel.





**Figure 1.17. Evolution du nombre de satellites visibles pour différents types d'environnements.**

Nous développons dans les paragraphes suivants, l'influence des masques dans un exemple canonique et dans un environnement réel urbain.

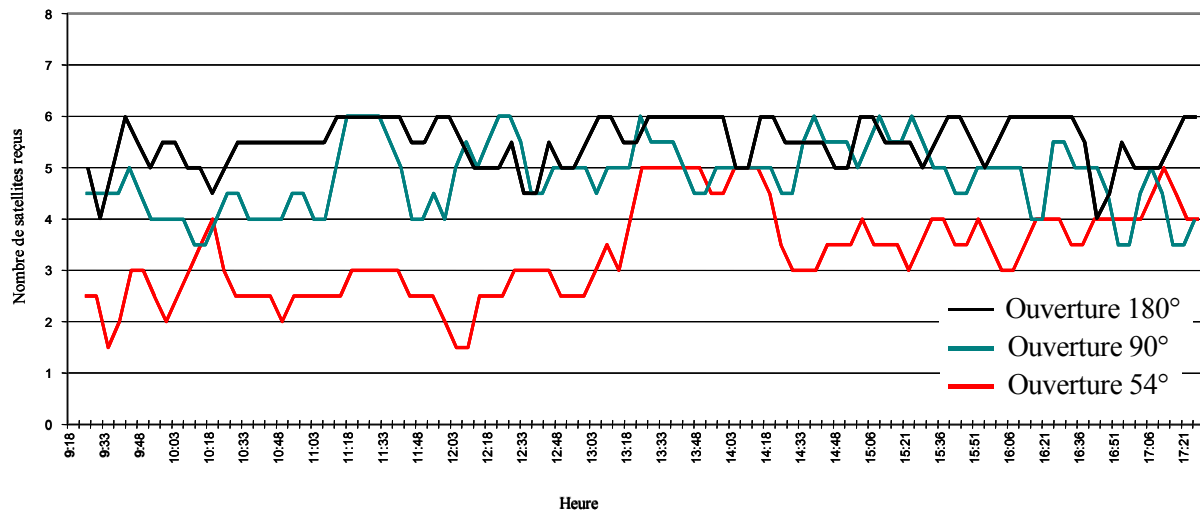
#### 4.4.1 Influence des masques proches

La disponibilité de la plupart des procédés de localisation de mobiles terrestres par satellites se dégrade considérablement en milieu urbain ou ferroviaire à cause de l'importance des effets de masque.

Dans ce type d'environnement, la disponibilité de l'information de positionnement n'est pas garantie. En effet, le nombre minimal de quatre satellites nécessaire à la triangulation n'est pas toujours atteint comme illustré dans [Ostan, 00] et dans les essais que nous avons réalisés.

L'influence de l'environnement proche de l'antenne sur le nombre de satellites reçus par l'antenne GPS peut être évaluée de façon expérimentale [Marais, 98]. L'antenne GPS est introduite dans l'axe principal d'un cylindre métallique dont les parois sont recouvertes de matériau absorbant afin d'éviter toute réception par trajets multiples dans la bande de fréquence du GPS (1.5 GHz). L'antenne est enfoncée à l'intérieur du cylindre de façon à simuler des effets de masque de plus en plus importants comme si l'antenne se trouvait dans une tranchée. Les mesures ont été réalisées pendant plusieurs heures.

Nous présentons sur les courbes de la figure 1.18, le nombre de satellites vus par l'antenne en fonction du temps, pour trois positions de cette antenne à l'intérieur du cylindre qui correspondent aux trois ouvertures  $180^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $54^\circ$ . Ces courbes montrent que le nombre de satellites vus par l'antenne décroît avec l'angle d'ouverture de l'antenne. Des résultats similaires sont obtenus dans le cas réel d'une antenne placée sur le toit d'un véhicule dans un canyon urbain ou dans un tranchée ferroviaire.



**Figure 1.18. Evolution du nombre de satellites reçus pour différentes ouvertures du cône de visibilité.**

#### 4.4.2 Masques le long d'une trajectoire : Cas du canyon urbain (et de la tranchée ferroviaire)

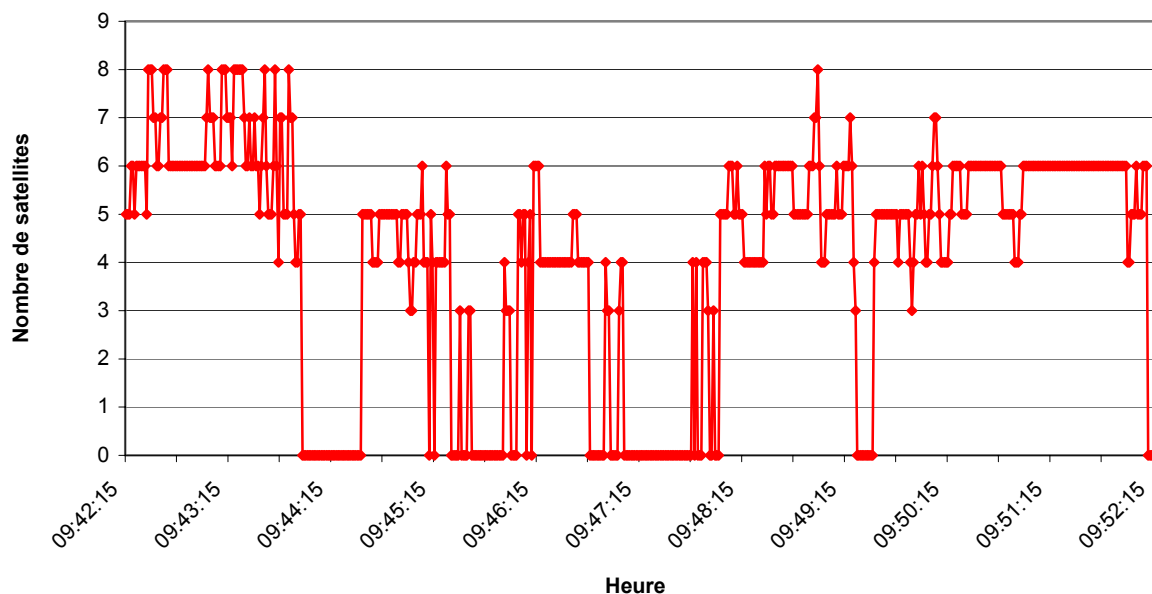
Pour étayer les propos du paragraphe 4.4.1 et confirmer d'autres résultats trouvés dans la littérature [Morioka, 00] [Briquet, 97], nous avons mené plusieurs campagnes de mesures de la disponibilité des signaux GPS dans un environnement urbain critique.

Des mesures sur un véhicule à l'arrêt ont montré l'effet du masquage sur le nombre de satellites reçus par le récepteur. On appelle canyon urbain l'environnement formé par deux immeubles élevés parallèles à la trajectoire du mobile. Dans un tel environnement correspondant à des masques d'élévation de 40 à 50° par rapport à l'horizontale de l'antenne, le récepteur n'utilise la totalité de ses 8 canaux que 9% du temps.

##### *Essais dynamiques*

Une campagne d'essais dynamiques a été réalisée dans le vieux quartier de Lille. Ce quartier est caractérisé par des rues étroites, encadrées de petits immeubles. Les variations du nombre de satellites disponibles sont illustrées figure 1.19.

Le tableau 1.20 présente les principales caractéristiques de cette mesure.



**Figure 1.19. Nombre de satellites reçus et utilisés lors d'une traversée du vieux lille.**

Nombre moyen de satellites utilisés pour le calcul	4
Durée maximale de perte du signal sur 600 s.	30 s.
Durée moyenne de perte du signal sur 600 s.	7,3 s.
Temps total de « non-localisation » sur les 600 secondes de la mesure	146 s.

**Tableau 1.20. Caractéristiques des acquisitions effectuées lors d'une traversée du vieux Lille.**

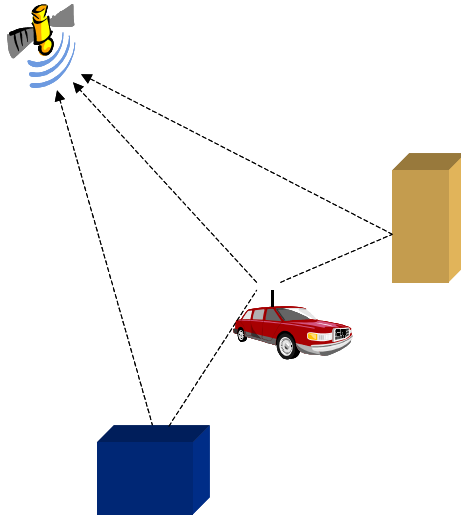
Dans ce contexte urbain critique, la position est perdue pendant 146 secondes soit 24,3 % du temps. Les pertes minimales (quelques secondes) ne sont pas critiques si la sécurité du système n'est pas indispensable. Cependant, une perte de 30 secondes paraît peu acceptable pour un besoin de localisation continue. Elle correspond à un déplacement du véhicule sur une distance de 416 mètres si celui-ci se déplace en ville à 50 km/h. Cette distance est importante si l'on considère une application de guidage ou de localisation précise (gestion du trafic...).

## **4.5 Importance des trajets multiples**

### **4.5.1 Le trajet multiple**

#### *Définition*

Lorsqu'il existe des obstacles entre l'émetteur et le récepteur, le signal électromagnétique subit différents phénomènes qui dévient la trajectoire de l'onde : réflexion, diffraction et diffusion. Les signaux issus de l'émetteur se propagent jusqu'au récepteur en ayant suivi différents chemins, on parle alors de trajets multiples (figure 1.21). Ces phénomènes se traduisent directement sur les caractéristiques du champ électromagnétique. Ils influencent l'amplitude, la fréquence et la phase du signal complexe.



**Figure 1.21. Le trajet multiple.**

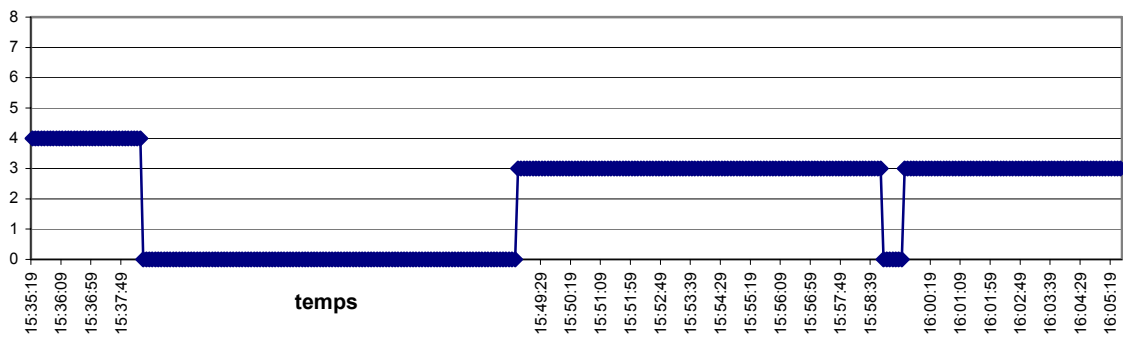
Les signaux issus de l'émetteur parviennent avec des retards différents qui dépendent de la distance parcourue par ces ondes. A l'entrée du récepteur, le signal reçu est donc la somme de toutes ces contributions. La corrélation étant réalisée sur le trajet reçu d'amplitude la plus forte, l'erreur est conséquente dès que le trajet direct n'est plus disponible. En effet, les retards génèrent une erreur sur le calcul du temps de propagation par le récepteur GPS et l'erreur sur la pseudo-distance qui en découle se répercute directement sur le calcul de la position du mobile [Botton, 97].

L'effet de trajet multiple est fonction de la géométrie des obstacles proches de l'antenne de réception. C'est pourquoi il n'en existe pas de modélisation. En mesure statique, la solution pour s'affranchir de ces effet réside dans le choix de la position de l'antenne. Dans le contexte transport, l'utilisation du GPS est dynamique et ce choix n'est évidemment pas possible. Il convient cependant de noter que les satellites les plus bas étant les plus sensibles au trajet multiple, la majorité des récepteurs effectue, lorsqu'un nombre important de satellites est disponible, une sélection en fonction de l'élévation des satellites utilisés.

#### 4.5.2 Réception directe uniquement

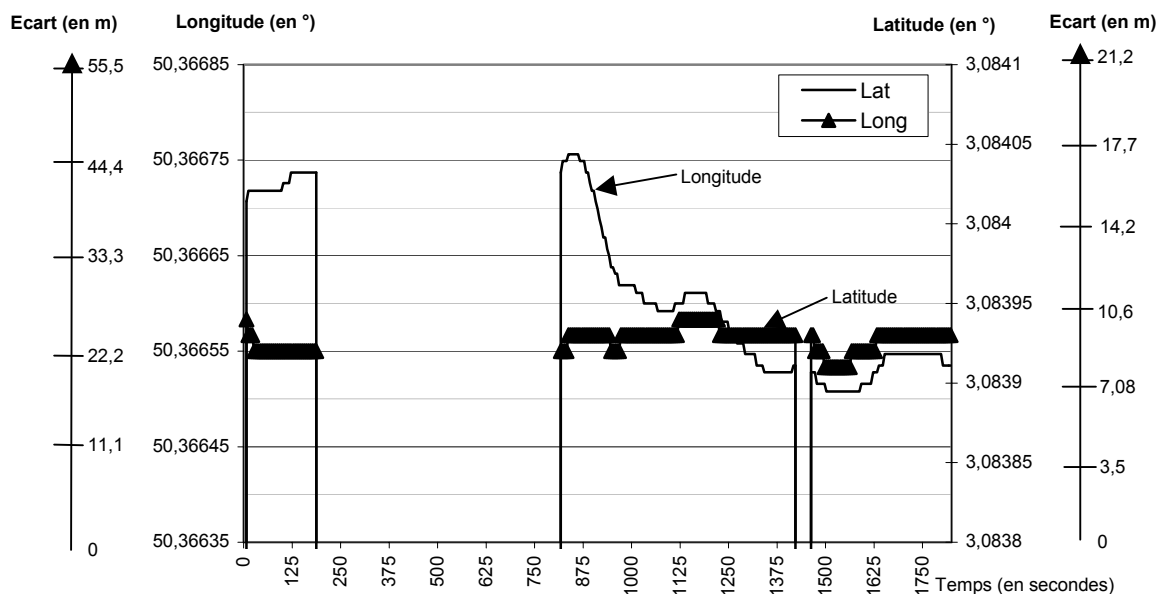
Partant du principe que chaque réflexion que subit le signal affecte son rapport signal sur bruit (S/B), nous avons bridé le récepteur en lui imposant de n'utiliser que les signaux reçus avec un rapport signal sur bruit S/B maximal afin d'exclure du calcul tous les satellites reçus indirectement. La durée de l'observation est d'une trentaine de minutes.

Pendant l'acquisition, la combinaison de satellites disponibles varie. Les résultats en terme de nombre de satellites disponibles sont illustrés figure 1.22.



**Figure 1.22. Nombre de satellites reçus par trajet direct dans un canyon urbain pendant 30 minutes.**

Le nombre de satellites n'exécède jamais quatre et la position n'est pas calculable pendant de longs intervalles de temps (30 secondes à 10 minutes). On observe l'impact de cette mauvaise disponibilité sur le calcul de la position du récepteur. La figure 1.23 montre l'évolution de la latitude et de la longitude au cours de l'acquisition. Puisque le calcul de position n'est pas possible pour un nombre de satellites inférieur à 3, cette information n'est pas toujours disponible. On remarque la forte variation de la latitude après la perte de la localisation de 10 minutes.



**Figure 1.23. Evolution des latitude et longitude en fonction du temps.**

Ce paragraphe illustre l'importance de la visibilité et de la géométrie des satellites sur la disponibilité d'une constellation de satellites. Dans un environnement rural, la visibilité est presque totale et le choix des satellites pour une bonne géométrie est large. Ce n'est pas le cas de certains environnements urbains ou ferroviaires dans lesquels le nombre de satellites situés au dessus de la ligne d'horizon est très faible et le nombre de combinaisons entre les satellites disponibles ne permet pas toujours une bonne géométrie pour le calcul de position. C'est pourquoi l'approche présentée dans le deuxième chapitre a pour but de quantifier le nombre de satellites recevables à un instant donné par trajet direct.

## 5 Les améliorations du système

### 5.1 Les corrections différentielles du GPS : le DGPS

La correction différentielle connue sous le nom de DGPS (Differential-GPS) s'applique de façon générale aux signaux GPS ou GLONASS permettant une couverture mondiale. Elle permet de corriger, en temps réel, une partie des erreurs dues à la propagation et d'affiner la précision de la localisation. Deux méthodes ont été développées, l'une appelée "Local Area Differential GPS" ou LADGPS qui fournit des corrections valides dans une zone de superficie limitée, l'autre appelée "Wide Area DGPS" ou WADGPS qui couvre une zone étendue. A cette fin, une station réceptrice "géoréférencée" compare en temps réel la localisation fournie par les satellites à sa position absolue. Elle diffuse ensuite des données de correction par un moyen de communication (ex : RDS, GSM, 3-RP, liaison avec un satellite géostationnaire, etc.) vers des récepteurs couplés aux capteurs de localisation embarqués (GPS, GLONASS). Les corrections sont alors introduites dans l'équipement au moyen d'un port de communication normalisé [Hunter, 90] et [Bonin, 90]. Le principe de la correction différentielle est illustré sur la figure 1.24.

Un certain nombre d'opérateurs commercialisent aujourd'hui des abonnements pour la diffusion de corrections différentielles par des satellites géostationnaires sur le principe du WAAS (Wide Area Augmentation System), tels que SkyFix pour des applications maritimes, ou encore Landstar ou OmniStar.

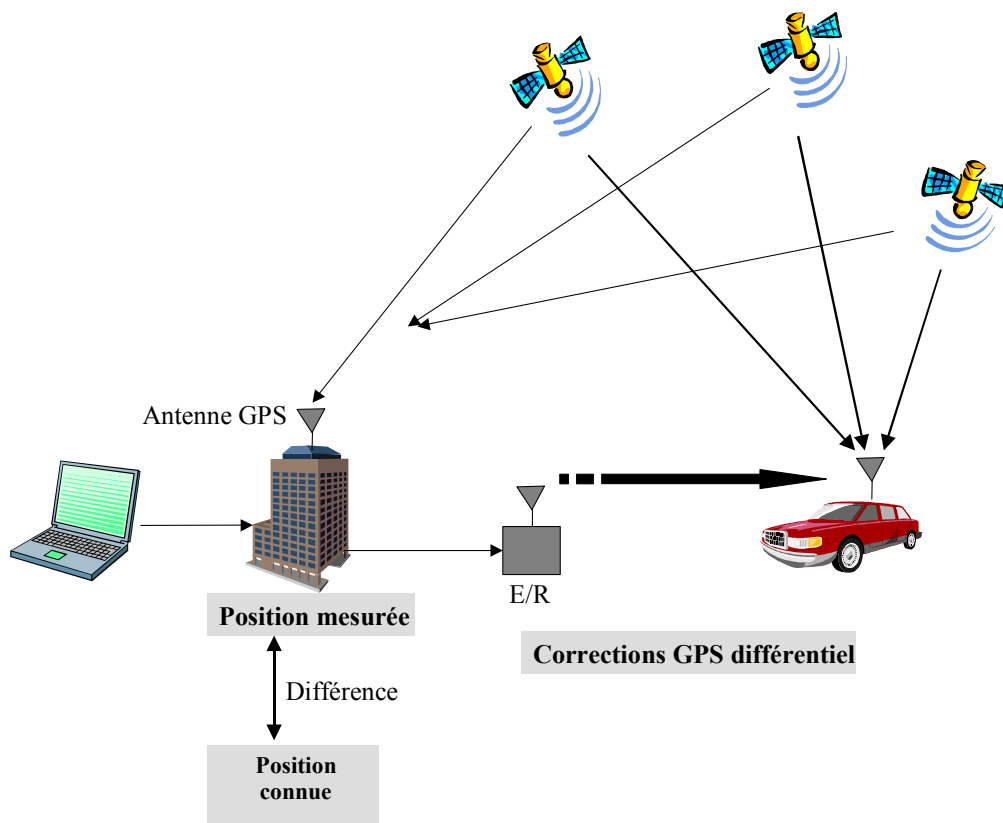


Figure 1.24. Principe du DGPS.

### 5.2 L'hybridation

Dans le but de résoudre l'imprécision de la mesure dans le cas de l'utilisation du GPS seul et d'assurer la continuité de la localisation même lors de passages sous des tunnels ou dans des

environnements critiques, les systèmes fondés sur l'utilisation du GPS sont associés à d'autres capteurs. C'est le cas des utilisations ferroviaires mais aussi des applications routières grand public en cours de développement et de diffusion.

Les capteurs utilisés peuvent être les suivants :

- accéléromètre,
- capteur de pression atmosphérique en aéronautique,
- gyroscope : mesure le déplacement angulaire
- odomètre : capteur de distance et vitesse monté, sur les roues,
- compas magnétique : mesure le cap du véhicule,
- capteur d'inclinaison,
- la connaissance d'une cartographie numérique de la voie...

Des techniques de filtrage de Kalman sont appliquées aux différents types d'information comme au système de positionnement satellitaire dans le but d'améliorer la précision ou de réduire les probabilités d'erreur.

A titre d'exemple, le système GPS est couplé à un système de localisation à l'estime (Dead Reckoning) [Drane, 98]. Le principe de ce système est l'utilisation de capteurs de position relative qui nécessitent la connaissance du point de départ du véhicule et des indicateurs de vitesse, direction... pour calculer sa position présente.

C'est le cas des systèmes de localisation automobiles qui associent l'antenne GPS à un gyroscope, un tachymètre, ainsi qu'à des logiciels de cartographie numérique (map matching) pour assurer un guidage continu du conducteur. Le guidage est vocal et le système tend de plus en plus à intégrer les technologies multimédia pour prendre en compte le trafic (embouteillages, accidents...) et offrir une panoplie de services tels que l'assistance en cas de panne, de vol ou la diffusion d'informations touristiques ciblées.

L'industrie ferroviaire privilégie elle aussi un système embarqué, sans balise sur la voie pour limiter les coûts de maintenance. Le choix des capteurs complémentaires est fonction du type d'application souhaitée (à caractère sécuritaire ou non).

Le système satellitaire est déjà utilisé pour des applications de localisation ferroviaires non sécuritaires (projets LOTUS [Jean, 99],...). Des études récentes ont étudié ou développé des solutions de positionnement aidé par satellite mais ces systèmes nécessitent des systèmes embarqués de localisation multi - capteurs complexes.

### **5.3 Autres constellations pour la localisation**

D'autres constellations de satellites de localisation ont été mentionnées dans ce chapitre. Chacune de ces constellations permet à l'utilisateur de se positionner. Cependant, elles constituent aussi un moyen de compléter un système, en augmentant le nombre de satellites disponibles avec des récepteurs capables de traiter l'ensemble des signaux comme c'est déjà le cas avec les récepteurs GPS/GLONASS et comme il est prévu de le faire avec le système GALILEO.

#### **5.3.1 Le système GLONASS**

Le système GLONASS (GLOBAL'naya Navigatsionaya Sputnikovaya Sistema) constitue le programme de navigation russe similaire au système GPS à la différence que les données transmises par ses satellites ne sont pas volontairement dégradées.

La constellation se fonde sur trois plans orbitaux. Chaque plan possède huit satellites soit au total 21 + 3 de réserve.

Chaque satellite GLONASS dispose de deux canaux de transmission : le canal L1 qui est transmis à  $1602 + 0.5625*n$  MHz et le canal L2 à  $1246 + 0.4375*n$  MHz où n représente le numéro de séquence du satellite.

La disponibilité de la constellation GLONASS pose aujourd'hui un problème car la constellation souffre de difficultés importantes de maintenance et le nombre de satellites simultanément opérationnels n'est pas suffisant. Quatre nouveaux satellites ont cependant été mis en orbite en octobre 2000 et les autorités russes affirment leur volonté de remettre le système en opération.

### 5.3.2 GLOBALSTAR

La constellation GLOBALSTAR de satellites en orbites basses (LEO) offre des services payants de télécommunication et de localisation. La localisation est effectuée suivant le même principe que dans le système GPS.

La constellation GLOBALSTAR est composée de 48 satellites défilant à 1410 km d'altitude. Les satellites sont répartis sur huit orbites de six satellites chacune, inclinées à  $52^\circ$  et offrent un service de communications personnelles comprenant la voix, la transmission de données incluant de la télécopie à 9,6 kbits/s pour tout client situé entre  $70^\circ$  Nord et  $70^\circ$  Sud en latitude. Les stations terriennes assurent les liaisons avec les mobiles via les satellites.

### 5.3.3 De GNSS 1 à GNSS 2 (GALILEO)

En Europe, l'initiative EGNOS ou European Geostationary Navigation Overlay Service constitue une approche WADGPS décrite dans le paragraphe précédent. Celle-ci propose notamment de vérifier en temps réel l'intégrité des signaux émis par les satellites GPS et de diffuser tout dysfonctionnement de la constellation grâce à une transmission effectuée depuis un satellite géostationnaire.

EGNOS constitue la première étape de l'initiative européenne intitulée GNSS 1 (Global Navigation Satellite System 1<sup>st</sup> generation) visant à pallier les imperfections des solutions GPS et GLONASS seules. Sa mise en oeuvre est prévue pour 2003. Les améliorations d'EGNOS concernent aussi la précision et la disponibilité. EGNOS devrait atteindre une précision dans le plan horizontal comprise entre 4 et 7 mètres. La disponibilité devrait atteindre entre 99 % et 99,999 % du temps exactement, contre 95,7 % pour GPS. De plus, le système devrait contenir une amélioration de la validation des données, par un contrôle du fonctionnement en temps réel qui préviendrait l'utilisateur si les données fournies risquent de manquer de fiabilité (suite à une défaillance satellite ou autres...).

La deuxième étape est appelée GNSS-2. Son objectif est l'obtention d'un système de navigation indépendant, civil et contrôlé par une organisation civile, interopérable avec le système américain GPS et appelé Galiléo [Carle, 00]. La décision finale émanant de la commission européenne date de Mars 2002. Galiléo prendra ainsi le relais d'EGNOS en 2008, les premiers satellites devant être lancés avant 2005.

La constellation sera constituée de 27 satellites MEO et complétée par trois satellites géostationnaires. Les satellites seront répartis selon trois plans orbitaux à 23 616 km d'altitude au dessus de la terre. Les plans seront inclinés de  $56^\circ$  par rapport au plan équatorial.

Le système offrira deux niveaux de service : OA (Open Access) disponible pour tout utilisateur, et CA (Control Access) plus restreint. Ses applications seront semblables à celles des systèmes GPS et GLONASS (Dans le domaine routier : navigation, protection contre le vol, services d'urgence... Dans le domaine ferroviaire : gestion de flotte, gestion de la signalisation etc.). Sa couverture s'étendra jusqu'aux latitudes  $75^\circ$  Nord.



## 6 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir brièvement rappelé les différents types de systèmes de localisation, nous avons présenté les principales caractéristiques des systèmes de localisation par satellites existants, en détaillant le principe de fonctionnement du GPS qui est aujourd'hui le système le plus largement utilisé dans le monde. La précision de ces systèmes satellitaires est en général fonction du type de service autorisé (Service précis ou standard) et des conditions de réception des signaux.

Nous avons plus particulièrement insisté sur les principaux paramètres qui conditionnent la disponibilité du système GPS. Aux erreurs typiques causées par la propagation du signal à travers l'atmosphère s'ajoutent des erreurs particulières au contexte du transport terrestre. Nous avons ainsi montré les difficultés engendrées par les masquages dans les environnements denses en obstacles tels que les tranchées ferroviaires ou les environnements urbains. La disponibilité du service est alors restreinte : le nombre de satellites disponibles pour le calcul diminue, la précision géométrique se dégrade, allant jusqu'à l'impossibilité de localiser le mobile.

Nous avons proposé une liste non exhaustive de solutions complémentaires, fondées sur l'utilisation de capteurs supplémentaires qui existent aujourd'hui afin de pallier ces problèmes de disponibilité. Ces solutions représentent un investissement non négligeable notamment lors de l'équipement de flottes de transports collectifs. Ce constat est à l'origine du développement de l'outil PREDISSAT (PREDIctive Software for Satellite Availability in the field of Transport) qui a fait l'objet des travaux de thèse présentés dans ce mémoire. Le but de cet outil est de prédire la disponibilité du système satellitaire le long d'une trajectoire afin de s'affranchir de ces capteurs supplémentaires qui rendent difficile le développement de systèmes faibles coûts et en sécurité.

## Chapitre 2 :

# Outil de prédiction des satellites disponibles le long du trajet d'un mobile basé sur une approche optique

## 1 Introduction

Nous avons exposé, dans le premier chapitre, les difficultés posées par l'utilisation de systèmes de localisation par satellites dans les environnements transports (urbains ou ferroviaires) et la nécessité de caractériser les masquages pour une mission donnée (trajet et horaire) ou encore afin d'en établir un modèle statistique dans des environnements typiques.

Pour répondre à ce besoin en terme de nombre de satellites disponibles pour le calcul de localisation, nous disposons de deux approches.

La première résulte d'une approche expérimentale. Elle consiste à parcourir à de nombreuses reprises une trajectoire, à des heures différentes, pour observer les variations de la constellation de satellites reçus et enregistrer le nombre de satellites utilisés dans le calcul de la position. Cette méthode demande cependant une mobilisation longue de personnels et de matériels et pose des difficultés pratiques dès lors qu'il s'agit de réaliser des tests répétitifs sur des voies ferroviaires.

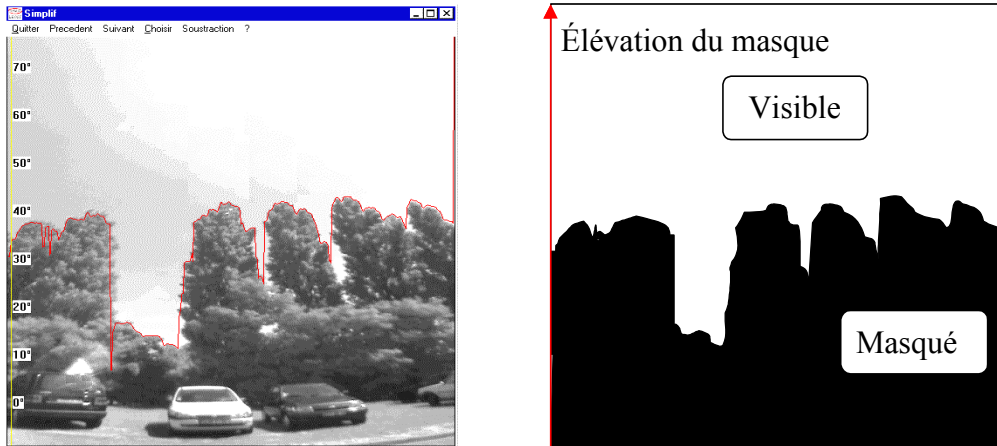
La seconde approche est fondée sur une expérimentation minimale et des simulations en temps différé. Pour cela, nous avons développé un outil de prédiction de la disponibilité d'une constellation de satellites le long d'une trajectoire connue, appelé PREDISSAT (PREDictive Software for Satellite Availability in the field of Transport). Cette étude a été initiée dans le cadre de la collaboration franco-allemande DEUFRAKO-P en 1998. L'outil détermine plus particulièrement le nombre de satellites disponibles en fonction de la position d'un mobile le long de son trajet et des masques qui l'entourent. La méthode adoptée consiste à filmer, lors d'un passage unique, l'environnement de l'antenne à l'aide de caméras embarquées. Une analyse semi-automatique des images acquises permet, en laboratoire, de déterminer les propriétés des masques optiques le long du trajet en trois dimensions. Ces masques sont ensuite associés aux données satellitaires simulées.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description du logiciel de simulation des trajectoires des satellites commercialisé par la société Teuchos exploité en association avec le logiciel de traitement et d'analyse d'images qui a été développé pendant cette thèse. Les résultats obtenus grâce à l'utilisation conjointe des données fournies par chacun des deux outils et leur analyse sont présentés dans la deuxième partie de ce chapitre.

## 2 Approche conjointe simulation/expérimentation

Le cas le plus favorable au sens de la qualité et du niveau de signal reçu est le cas où le champ électrique est reçu directement, c'est à dire lorsque le trajet émetteur-récepteur se fait au-dessus de la ligne de visibilité directe. En effet, lorsque les satellites sont masqués, ils sont soit non reçus, soit reçus par trajets multiples et donc susceptibles d'engendrer une erreur dans le calcul de la position. Deux hypothèses peuvent alors être étudiées. L'outil présenté dans ce chapitre prédit le nombre de satellites utilisables par le récepteur en ne considérant que les satellites visibles au sens optique du terme depuis un récepteur. Ils se situent alors au-dessus des obstacles appelés masques, comme cela est illustré sur la figure 2.1. L'approche adoptée initialement est donc binaire. Les satellites sont classés en deux états : LOS (Line Of Sight) et NLOS (Non Line Of Sight). Les chapitres 3 et 4 de ce

mémoire développeront la deuxième approche possible qui consiste à considérer à la fois les satellites visibles optiquement et une partie des satellites reçus par trajets multiples.



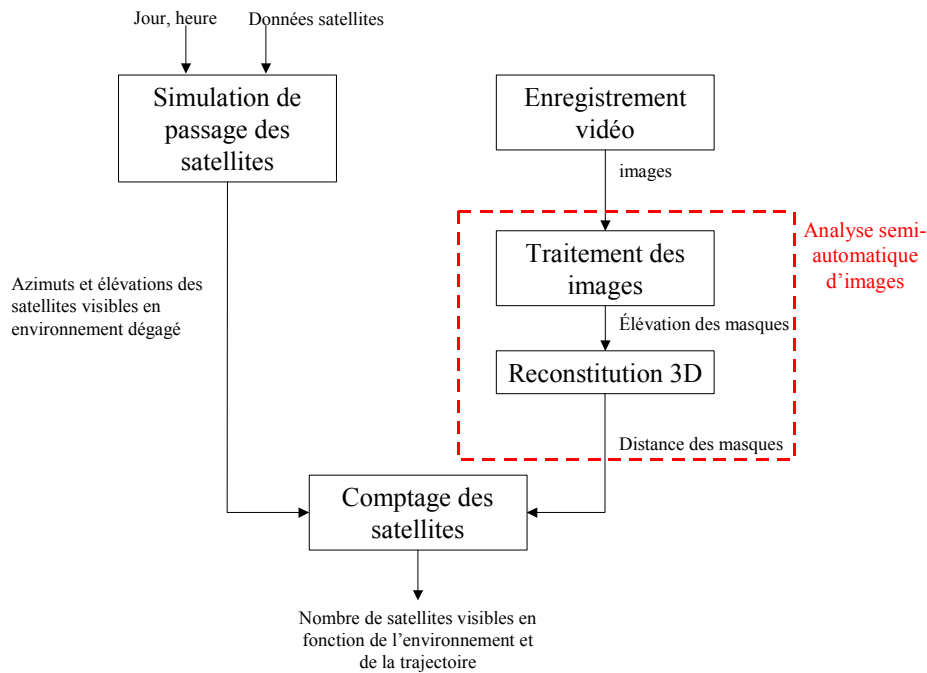
**Figure 2.1. Principe de l'outil.**

L'élévation du satellite constitue le critère de classement : un satellite est masqué dès que son élévation est inférieure à celle du masque dans une direction donnée.

Pour distinguer, le long du trajet, le nombre de satellites masqués du nombre de satellites visibles, nous utilisons :

- la prédiction des angles d'élévation des satellites depuis le mobile en utilisant le logiciel *Satellite Tool Kit* [STK], développé par la société AGI et disponible au laboratoire,
- les caractéristiques tridimensionnelles des masques de l'environnement autour de l'antenne de réception satellite, obtenues grâce à une analyse des images d'un enregistrement vidéo.

Une étape de comparaison entre ces deux types de données permet d'identifier les satellites visibles depuis l'antenne du récepteur à tout instant en chaque point de la trajectoire du mobile. La figure 2.2 présente un schéma synoptique des différentes étapes de la méthode explicitée dans les paragraphes qui suivent.



**Figure 2.2. Schéma synoptique des différentes étapes de la méthode développée.**

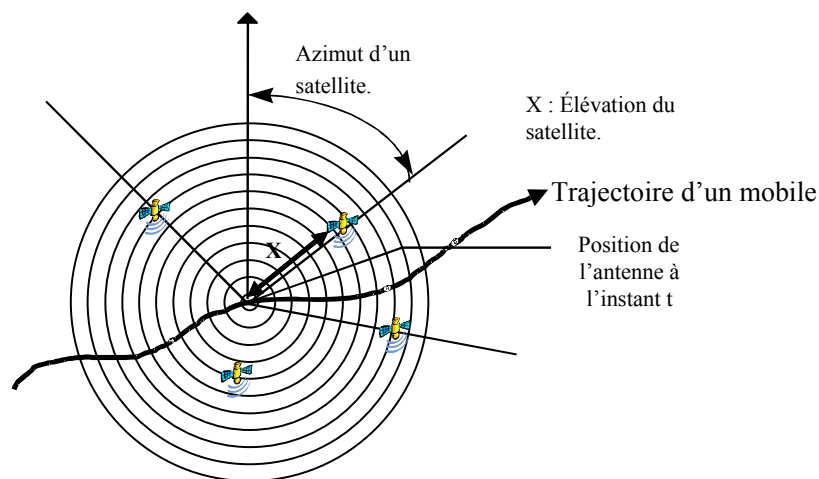
## **2.1 Prédiction de passage des satellites à l'aide du logiciel STK**

Le logiciel STK prédit la position des satellites dans la constellation considérée. Ce logiciel est largement utilisé dans le domaine de l'aérospatiale. Il se compose de plusieurs outils d'analyse et d'affichage des relations entre les satellites, leurs orbites, et les mobiles maritimes, terrestres et aériens.

D'après la position et le trajet du mobile, définis par les coordonnées de la trajectoire, la date précise d'observation et la position de chaque satellite du système à un instant  $t$ , le logiciel STK fournit :

- le nombre et l'identité des satellites visibles depuis le mobile à cette date,
- la position de ces satellites dans l'espace à l'instant d'observation en terme d'azimut et d'élévation.

Dans STK, la position des satellites est rafraîchie régulièrement par le chargement de fichiers de données au format « two-line element set » issus du North American Aerospace Defense Command (NORAD) afin de prendre en compte d'éventuelles modifications de la constellation (nouveaux satellites, corrections des orbites...). A chaque date et en chaque point de la trajectoire, les résultats fournis par STK peuvent être représentés graphiquement sur 360° autour de l'antenne, tel qu'indiqué sur la figure 2.3. Au point représenté sur la figure, 4 satellites sont disponibles autour de l'antenne de réception. Dans les algorithmes, nous utilisons les données au format « texte » pour un traitement automatique. Un fichier contient les informations de date, azimut, élévation et distance du satellite concerné.



**Figure 2.3. Position de 4 satellites autour de l'antenne en un point de la trajectoire.**

Pour la perception de l'environnement autour de l'antenne, nous utilisons l'analyse des images des enregistrements vidéo. Les principes de l'acquisition et du traitement sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

## **2.2 Utilisation d'un enregistrement vidéo**

Cette section présente l'architecture d'un système en temps différé de reconstruction tridimensionnelle des masques situés autour d'une antenne de réception des signaux satellites, par une technique de mise en correspondance d'images stéréoscopiques. Nous décrivons les caractéristiques techniques des capteurs utilisés et les algorithmes que nous avons développés pour un traitement semi-automatique des données.

Le système nécessite un enregistrement préalable des données vidéo et des données spatiales. Cette étape fait appel à un système d'acquisition multi-capteurs qui sera décrit dans une première partie. Une méthode de « détection de ligne d'horizon » et de « mise en correspondance », exposée dans une seconde partie, est ensuite appliquée à l'ensemble des informations vidéo sauvegardées.

Il faut noter que, bien que les traitements mis en place ne soient pas dédiés à une application temps-réel, les algorithmes ont été optimisés afin d'assurer une bonne rapidité d'exécution.

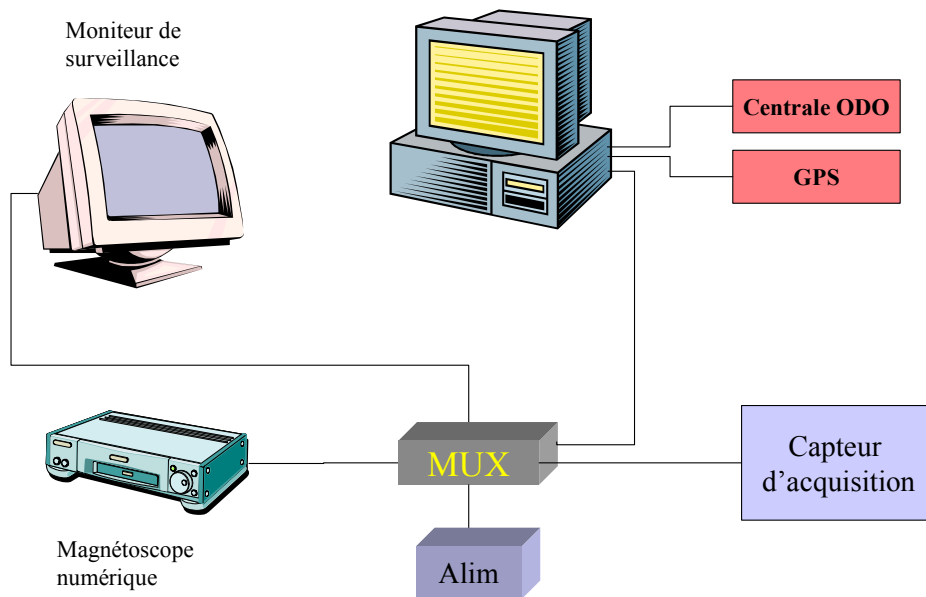
### **2.2.1 Spécifications techniques du système d'acquisition**

#### *2.2.1.1 L'installation des caméras et du matériel d'acquisition*

Le schéma 2.4 présente le système d'acquisition tel qu'il a été développé pour les essais ferroviaires.

Il est composé des éléments suivants :

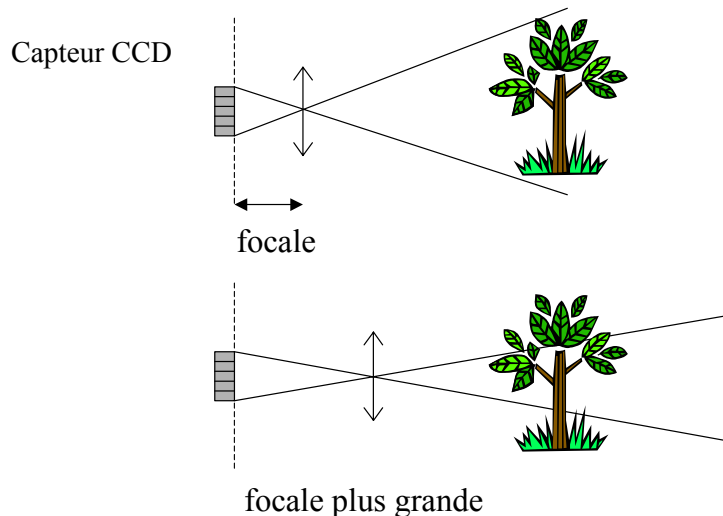
- les caméras,
- le moniteur qui permet de visualiser l'enregistrement pendant le trajet,
- le multiplexeur qui entrelace les images issues des caméras droite et gauche et les données codées issues du récepteur GPS et de la centrale odométrique du véhicule,
- le magnétoscope numérique à bande sur laquelle sont enregistrées les données et,
- le PC qui synchronise l'ensemble.



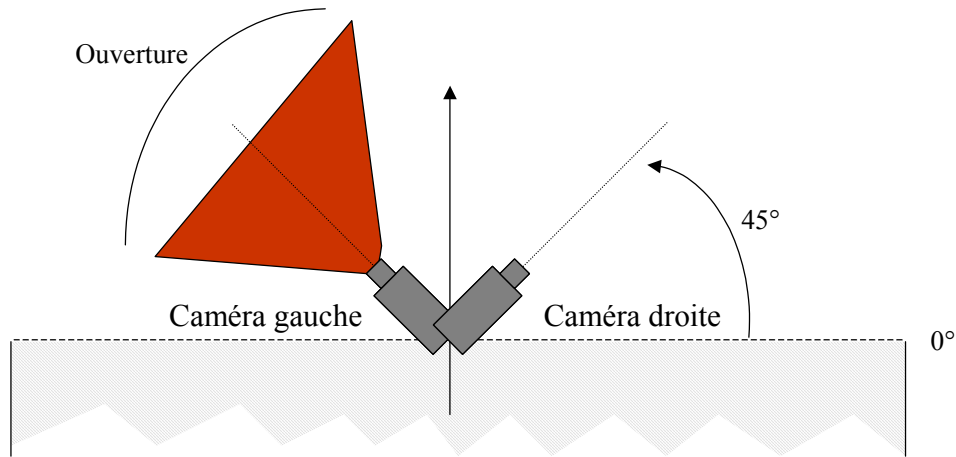
**Figure 2.4. Représentation du système d'acquisition embarqué utilisé pour l'enregistrement des données depuis le train.**

### 2.2.1.2 Le choix du système optique

Les caméras utilisées sont des caméras matricielles analogiques noir et blanc équipées d'un capteur CCD (capteur à transfert de charge). Le choix de l'objectif des caméras est déterminant puisqu'il va imposer le nombre de caméras nécessaires à l'analyse du cône de visibilité d'ouverture égale à  $180^\circ$  au-dessus de l'antenne. La focale de l'objectif choisie est le résultat d'un compromis entre la déformation géométrique qui apparaît sur les images lorsque la focale est faible et l'angle d'ouverture de l'objectif qui décroît lorsque la focale augmente (figure 2.5). Nous avons opté pour un système composé de deux caméras installées dans la configuration illustrée figure 2.6.



**Figure 2.5. Choix de la focale pour l'angle d'ouverture.**

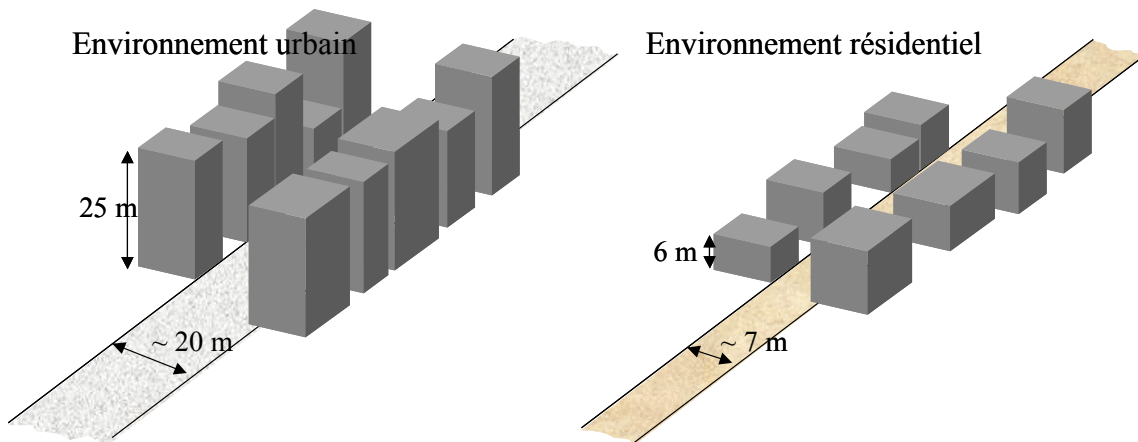


**Figure 2.6. Angles d'ouverture et disposition des caméras.**

Notre système doit permettre, dans des environnements différents, de visualiser et d'analyser l'ensemble des données de masquage. Les différents types d'environnements sont caractérisés par les paramètres résumés dans le tableau 2.7 [Malicorne, 01]. Ces données permettent de dessiner des environnements type, comme sur la figure 2.8. Le choix des objectifs des caméras est directement lié au type d'environnement. En effet, dans un contexte urbain dense, où les obstacles sont élevés et proches, il convient d'adopter un angle d'ouverture important pour couvrir l'espace et donc d'utiliser une focale faible. Pour les environnements de voies de chemin de fer autour desquelles les obstacles seront plus éloignés, une focale plus grande pourra être adoptée.

	Hauteur des immeubles		Largeur de la rue (m)
	Moyenne (m)	Déviation standard (m)	
Urbain	25	6	20-25
Résidentiel	6	3	7
Industriel	8	2	19
Urbain dense	30	10	45-60

**Tableau 2.7. Paramètres typiques des différents environnements traités.**



**Figure 2.8. Représentation de deux types d'environnements : urbain et résidentiel.**

La précision de l'image est directement liée au choix de la focale. Quel que soit l'angle d'ouverture de la caméra, le nombre de pixels dans une image est le même. Ainsi plus l'angle d'ouverture est faible, plus la résolution angulaire de l'élévation des masques détectés est importante. Ainsi, avec un angle d'ouverture de  $80^\circ$  et une image de 512 pixels, un pixel représente  $0,15^\circ$  alors qu'avec un angle d'ouverture de  $45^\circ$ , un pixel représente  $0,008^\circ$ .

La résolution pixel retenue pour l'étape de numérisation des images fixe la résolution angulaire de l'image à analyser.

Lors des essais ferroviaires dont les résultats sont présentés plus loin dans ce mémoire, chaque caméra est constituée d'un capteur CCD de dimensions  $6,3 \text{ mm} \times 4,7 \text{ mm}$  et équipée d'un objectif dont la focale est égale à  $3,6 \text{ mm}$ . Il en découle les caractéristiques d'ouverture et de résolution angulaire suivantes :

- ouverture verticale :  $82^\circ$ ,
- ouverture horizontale :  $66^\circ$ ,

et lors de l'acquisition d'une image de dimension 512 pixels x 512 pixels,

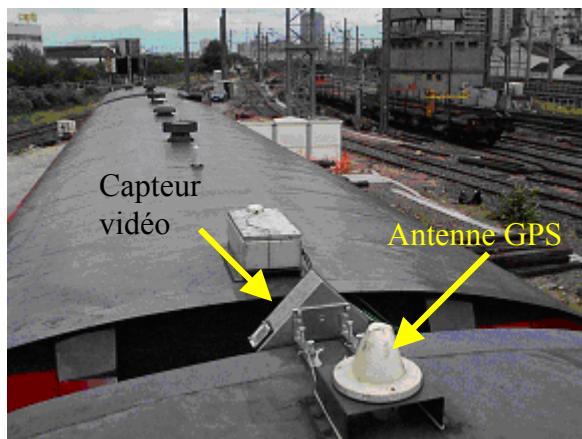
- résolution angulaire verticale :  $0,16^\circ$ ,
- résolution angulaire horizontale :  $0,13^\circ$ ,

Afin de bénéficier d'un angle d'ouverture le plus grand possible, les caméras ont été positionnées de telle sorte que les parties verticales de l'environnement apparaissent sur la dimension horizontale de la caméra.

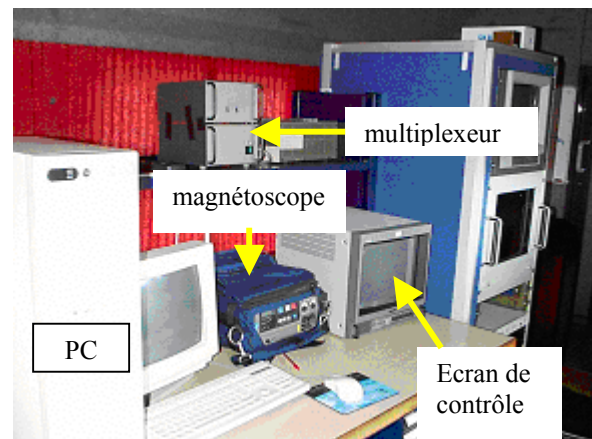
### 2.2.1.3 Support d'enregistrement

A l'époque où nous avons réalisé les essais ferroviaires, nous n'avions pas la possibilité matérielle d'enregistrer, en temps-réel, l'image, les données GPS et odométriques sur un disque dur. L'ensemble a donc été enregistré sur bande numérique ce qui n'est plus le cas aujourd'hui. Nous bénéficions maintenant d'une capacité d'enregistrement supérieure et d'une résolution vidéo plus importante.

Les figures 2.9 et 2.10 sont des photos de l'installation des caméras sur le toit du train et du matériel d'acquisition des données à l'intérieur du train lors d'un trajet entre Tournan et Coulommiers en Juin 1998.



**Figure 2.9. Caméras placées à proximité de l'antenne sur le toit du train.**



**Figure 2.10. Installation du système d'acquisition à l'intérieur du train.**



#### 2.2.1.4 Le multiplexeur

Afin d'obtenir une reconstruction tridimensionnelle de la scène aussi proche que possible de la réalité, il est nécessaire d'enregistrer les couples d'images issues des deux caméras aux mêmes instants. Dans la mesure où les images sont traitées en laboratoire, deux solutions sont envisageables. La première consiste à effectuer un enregistrement synchrone des différentes images issues des caméras. Ceci est matériellement impossible dans la mesure où nous ne pouvons garantir le démarrage synchronisé de deux magnétoscopes. La deuxième solution utilise le procédé de codage temporel, qui consiste à attribuer un numéro à chaque image pour la retrouver en temps différé. Cette méthode requiert cependant un matériel important. C'est pourquoi nous avons utilisé un système développé au laboratoire, utilisant un magnétoscope unique associé à un multiplexeur [Dooze, 01] réalisé au laboratoire et dont le principe est de multiplexer de façon synchrone les signaux issus des différentes sources vidéos sur un support unique, tel qu'illustré figure 2.11. Le multiplexeur génère une image composée d'un entrelacement des lignes de chacune des sources (figure 2.12).

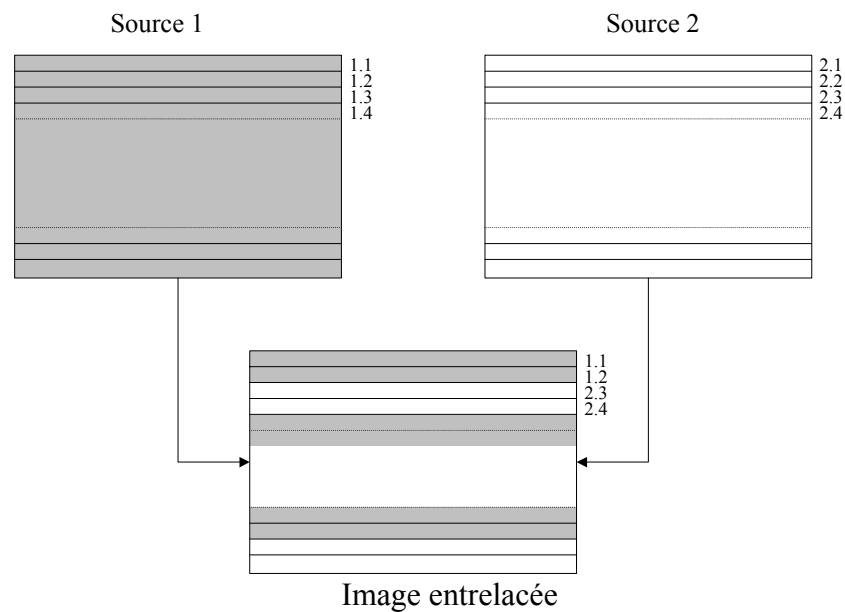


Figure 2.11. Principe du multiplexeur.

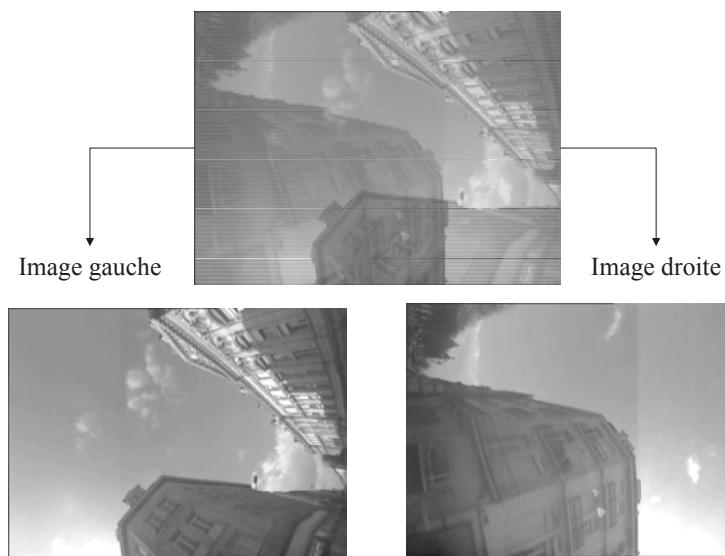


Figure 2.12. Images droite et gauche multiplexées, puis démultiplexées.

### 2.2.1.5 Les images extraites des enregistrements

Chaque caméra fournit 25 images par seconde. Après démultiplexage, nous disposons donc, toutes les 1/25 seconde, d'une image gauche et d'une image droite dont la résolution est divisée par 2.

Dans l'enregistrement, une colonne est extraite au centre d'une image tous les  $x$  mètres. De par la position des caméras, cette colonne correspond à une vue exactement perpendiculaire à l'antenne. Une nouvelle vue spatio-temporelle de l'environnement peut ainsi être reconstituée en juxtaposant chacune des colonnes  $i$  extraites. La figure 2.13 présente 11 images d'une séquence acquise à l'occasion d'essais ferroviaires, d'après lesquelles nous construisons l'image spatio-temporelle  $I$ . Chaque colonne  $i$  de l'image  $I$  peut être repérée le long du trajet (par exemple, au point kilométrique ferroviaire).

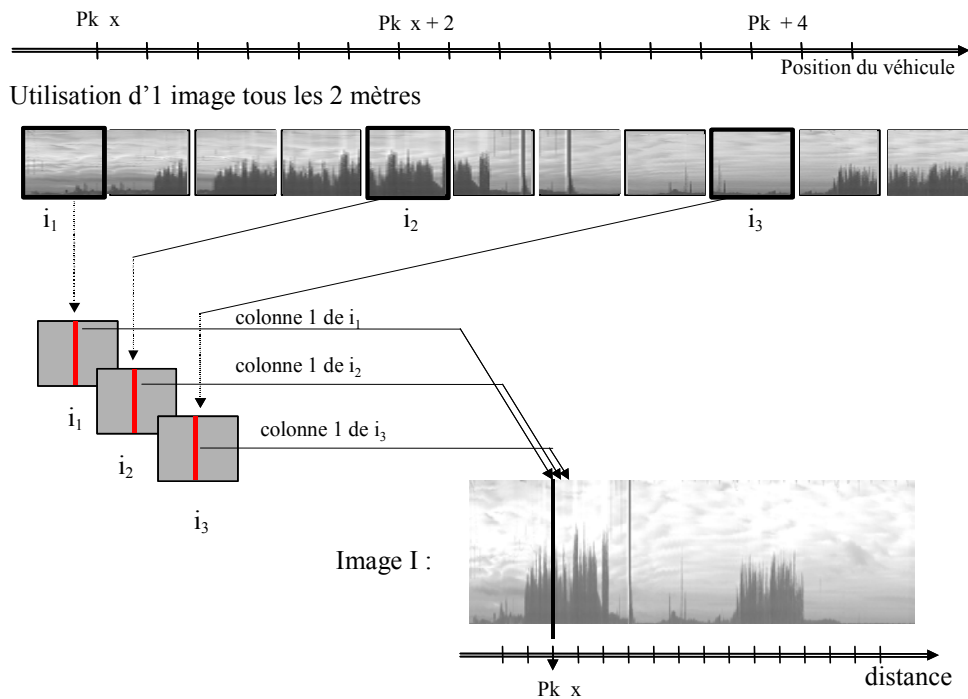


Figure 2.13. Principe de stockage des images.

## 2.2.2 Détection de la ligne d'horizon

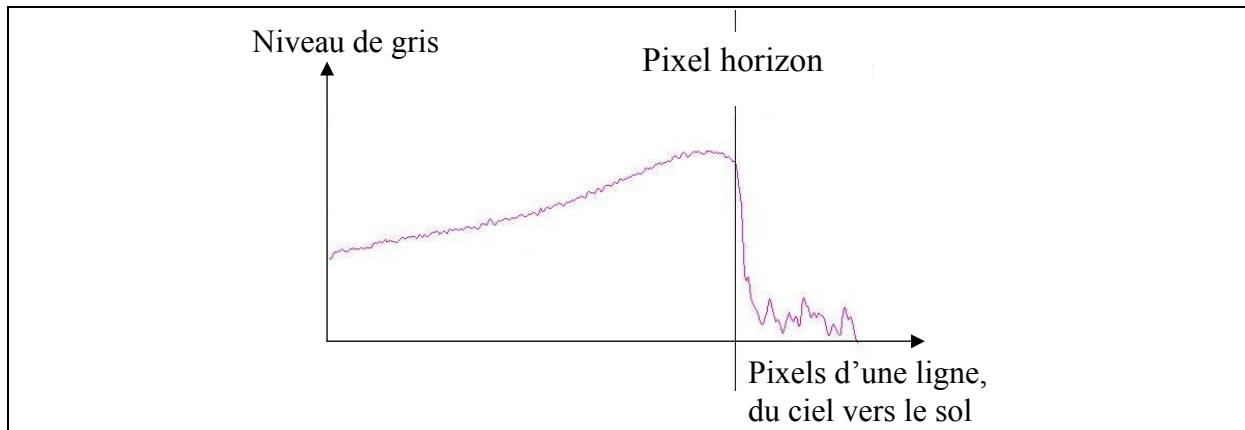
Après cette présentation du système d'acquisition des images, il convient de décrire la méthode utilisée pour la détection de l'horizon optique dans chacune des images. Pour cela, des algorithmes ont été développés en langage C, capables de détecter, par une analyse des données vidéo, les points qui délimitent la frontière entre le ciel et les obstacles. Connaissant la résolution angulaire du système optique, il est alors possible de déterminer l'élévation d'un obstacle.

### 2.2.2.1 La notion d'image vidéo en niveau de gris

Les capteurs CCD donnent des matrices à deux dimensions dont les coefficients représentent le niveau de gris de chacun des points de l'image appelés pixels. Un point correspond à un niveau de gris codé sur 8 bits entre 0 et 255. 0 correspond à un point noir et 255 à un point blanc. Le niveau de gris est relatif à l'intensité lumineuse en chaque pixel.

### 2.2.2.2 La notion de colonne de l'image

Typiquement, une colonne de l'image est composée d'une zone « claire » et d'une zone « sombre ». La figure 2.14 représente graphiquement une courbe de niveau de gris d'une colonne extraite d'une image de l'environnement. Nous constatons, dans la majorité des cas, que le ciel correspond aux pixels dont le niveau de gris est élevé alors que l'obstacle est caractérisé par un ensemble de pixels de niveaux de gris faibles. Dans les autres cas, qui apparaissent en présence d'immeubles très clairs par exemple, le phénomène inverse apparaît. Ce constat a donné lieu à une modification des algorithmes de base afin de prendre en compte ces environnements peu contrastés.



**Figure 2.14. Exemple d'une colonne d'un fichier image type.**

La courbe de la figure 2.14 montre qu'une méthode par détection d'un seuil permettra de distinguer les deux zones de l'image. Cette méthode impose une contrainte forte qui est le choix d'une valeur de seuil. Cependant, les différences de luminosité ou de contrastes observées entre deux enregistrements distincts ne permettent pas de déterminer et de généraliser un seuil unique pour tout enregistrement. Nous présentons donc dans les paragraphes suivants les critères à observer pour le définir, les compromis nécessaires et les cas particuliers rencontrés, illustrés via des images typiques.

### 2.2.2.3 Calcul de la ligne d'horizon

L'horizon à définir correspond à la frontière entre le ciel et les masques généralement plus foncés (de niveaux de gris faibles). Les caractéristiques d'une ligne montrent que la répartition des niveaux de gris d'une colonne est composée de deux modes représentés sur l'histogramme d'une colonne A de l'image que nous avons choisie pour exemple (figure 2.15).

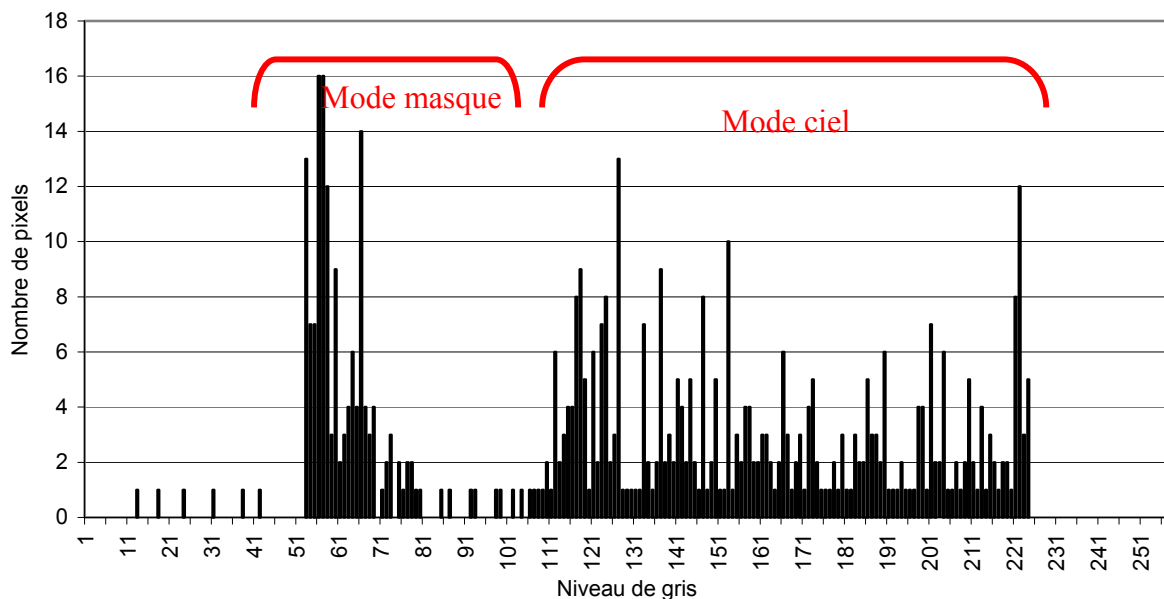


Figure 2.15. Histogramme d'une colonne de l'image.

Cette remarque nous a conduit à adopter une méthode de seuillage. Le seuil choisi correspond à une valeur de niveau de gris entre les deux modes. Dans l'exemple de la figure 2.15, le seuil choisi est égal à 101. Il est ensuite appliqué à chacune des colonnes de l'image. L'algorithme parcourt chacune des lignes du ciel vers le sol, afin de déterminer le premier pixel de niveau de gris qui atteint ce seuil, soit le premier pixel suffisamment sombre pour correspondre à un masque. Ce pixel est étiqueté comme étant le pixel « horizon » (figure 2.16).

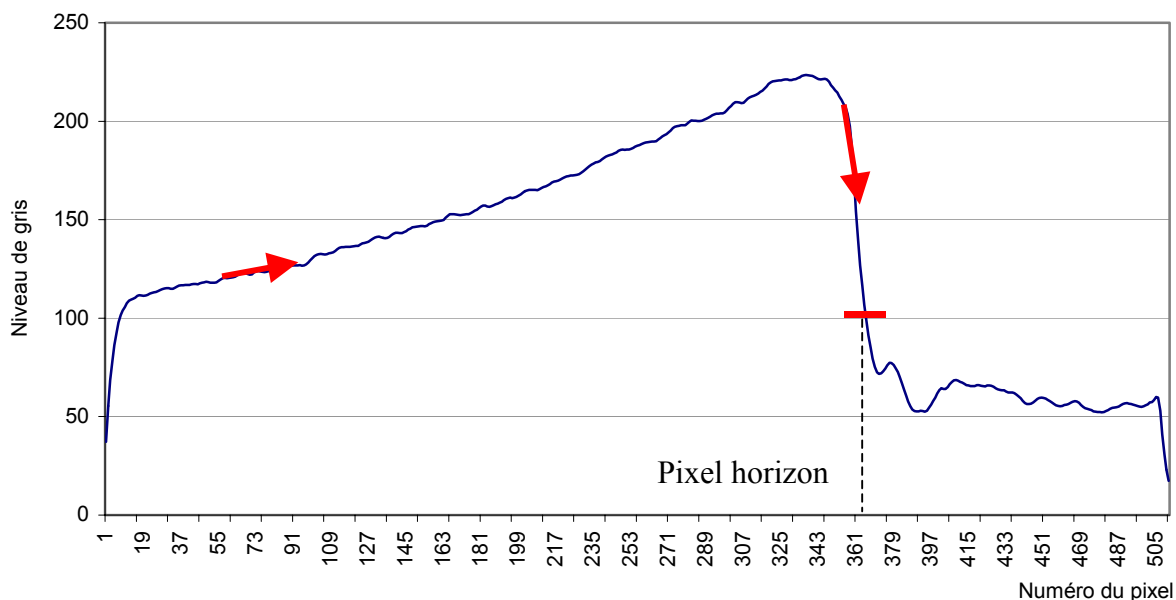
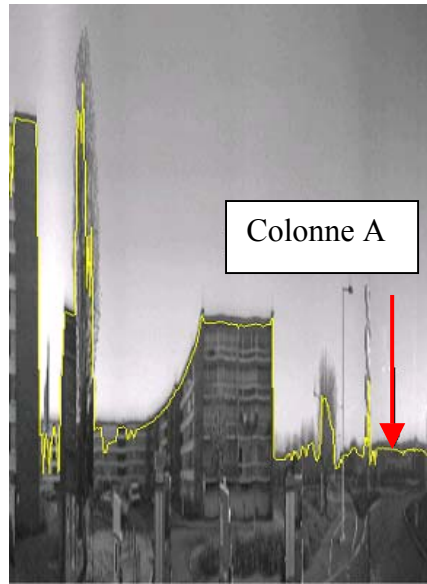


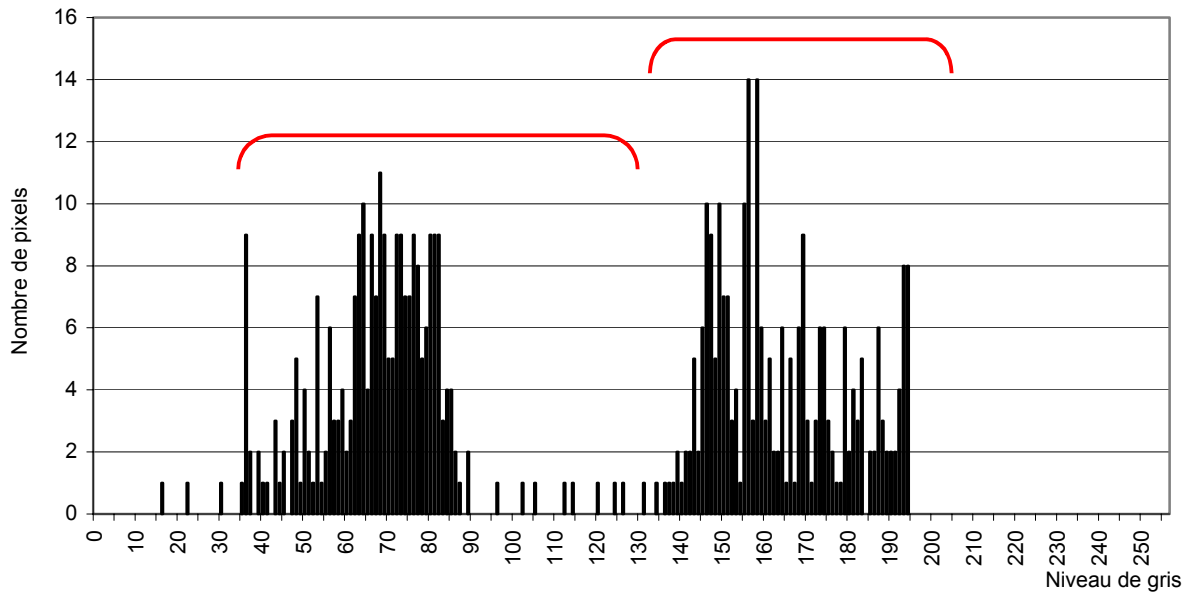
Figure 2.16. Représentation du niveau de gris de la colonne et position du pixel horizon.

Cependant, cette méthode nous contraint à choisir, pour chaque image que nous traitons, un seuil moyen utilisé pour toutes les lignes de l'image. Or, les profils de niveau de gris de chacune des colonnes peuvent différer les uns des autres. La figure 2.17 illustre la ligne d'horizon détectée avec le seuil de 101.

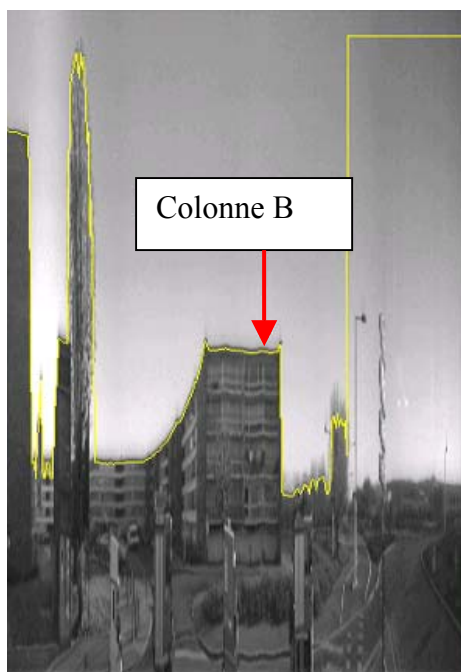


**Figure 2.17. Résultat de la détection avec un seuil de 101.**

Ce seuil ne convient pas à l'arbre qui n'est que partiellement détecté. De plus, le bâtiment central est légèrement tronqué. L'observation de l'histogramme d'une colonne B de cet immeuble (figure 2.18) fait apparaître un seuillage possible de 130, que nous appliquons à l'image entière (figure 2.19).



**Figure 2.18. Histogramme de la colonne B.**



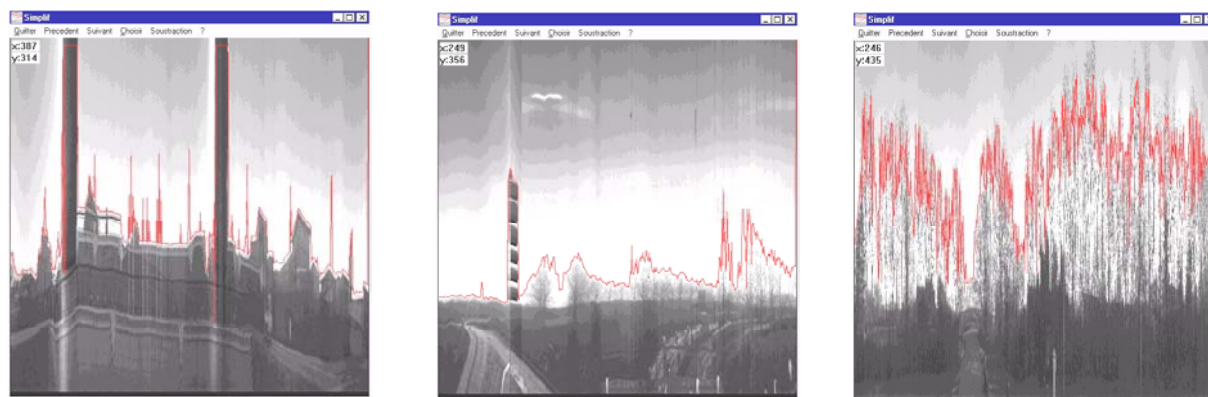
**Figure 2.19. Résultat de la détection avec un seuil de 130.**

La figure 2.19 montre que ce seuil est plus adapté pour la moitié gauche de l'image mais implique des erreurs considérables à droite de l'image. Cet exemple illustre la nécessité d'un compromis dans le choix du seuil pour chacune des colonnes des images que nous traitons et souligne la difficulté d'automatisation de la procédure.

Le choix d'un seuil unique provoque des erreurs importantes. Un réglage manuel du seuil de détection en fonction de la luminosité des enregistrements a été prévu. Dans une portion d'image donnée, la détection de la ligne d'horizon est visualisée afin d'accorder au mieux le seuil aux particularités de l'image. Des améliorations des algorithmes de traitement implémentés dans le cadre de projets à l'INRETS envisagent la mise en œuvre d'une méthode par seuil adaptatif.

Chaque colonne de l'image est ainsi traitée et l'ensemble des pixels étiquetés « horizon » compose la ligne d'horizon cherchée. Chaque point de cette ligne ainsi définie correspond à un angle d'élévation de l'obstacle dans l'image spatiale. L'élévation de chacun des masques est localisée dans l'espace avec une information correspondant à la position du mobile sur sa trajectoire stockée dans chaque image.

Les trois photos de la figure 2.20 donnent des exemples de lignes d'horizon calculées et représentées en rouge.

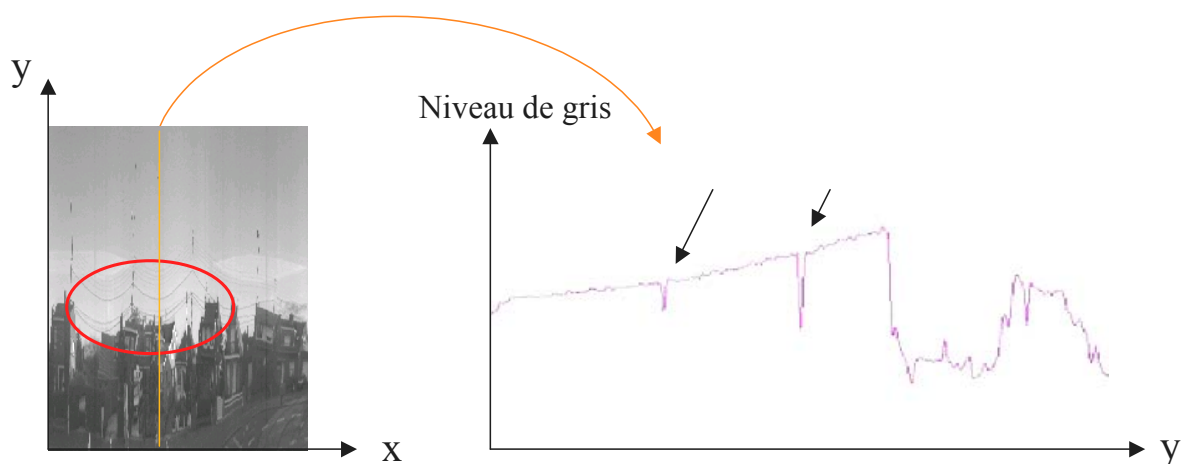


**Figure 2.20. Quelques exemples. En rouge, la ligne d'horizon calculée.**

Deux types d'obstacles particuliers conduisent à des erreurs importantes : les ponts et les câbles électriques. Ils font l'objet d'un traitement spécifique.

#### 2.2.2.4 Les cas particuliers

- Les ponts : Un traitement particulier a été développé pour détecter la présence de ponts. Un passage sous un pont constitue un cas particulier dans la mesure où la colonne entière est d'un niveau de gris très faible. Du point de vue du récepteur satellites, un passage sous un pont de longueur significative représente un masquage total critique et provoque une perte totale de signal et ainsi un nombre nul de satellites reçus.
- Les câbles électriques : Le long des routes ou des voies ferrées, il est fréquent de longer des installations électriques qui vont interrompre l'allure uniforme du niveau de gris du ciel. A titre d'exemple, la présence de câbles électriques provoque des chutes ponctuelles du niveau de gris dans la zone ciel illustrées figure 2.21.



**Figure 2.21. Colonne bruitée.**

La taille de ces obstacles n'est cependant pas suffisamment grande pour être considérée comme des obstacles pouvant perturber la réception du signal issu d'un satellite. La variation rapide qu'ils provoquent dans la courbe de niveau de gris ne doit donc pas être détectée comme le pixel caractérisant la frontière ciel-masque. C'est pourquoi, afin d'atténuer les conséquences de ces obstacles dans le traitement d'images, chacune des lignes verticales constituant l'image est lissée par un filtre linéaire récursif de type passe bas d'ordre 1.

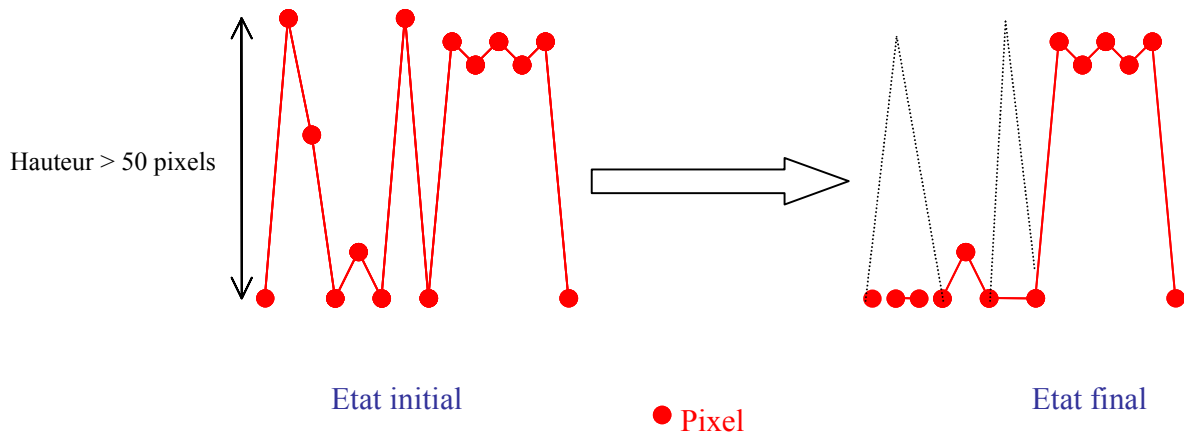
Si nous notons  $I(x)$  la valeur de niveau de gris du pixel à position  $x$  dans la ligne que nous traitons, le filtre passe-bas récursif  $R(x)$  est défini par l'équation  $R(x) = a I(x) + b R(x-1)$ , avec  $a$  et  $b$  deux coefficients réels tels que  $a+b < 1$  afin d'assurer la convergence du filtre. La réponse fréquentielle du filtre est telle que plus la valeur de  $b$  augmente, plus la fréquence de coupure de  $R$  est faible et un effet de flou apparaît. Le choix de  $b$  et de  $a$  doit être tel que l'effet de lissage n'altère pas trop la distribution des niveaux de gris de l'image et donc la bonne localisation de la ligne d'horizon.

Un résultat de filtrage est présenté figure 2.22. La ligne verte, non filtrée est interrompue par un nombre important de petits obstacles. La ligne rouge représente la courbe filtrée.



**Figure 2.22. Filtrage d'une colonne.**

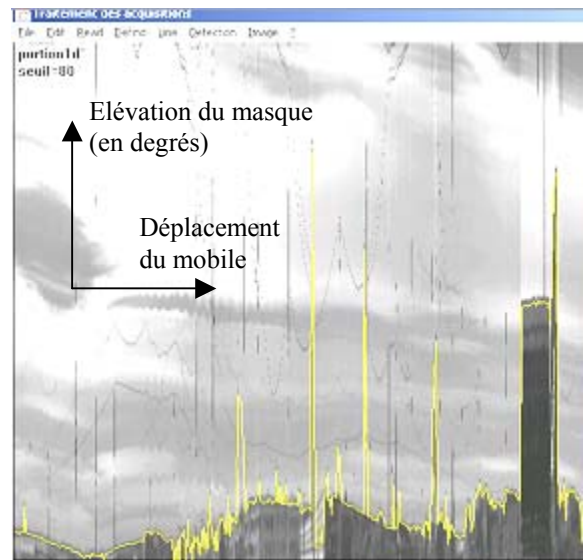
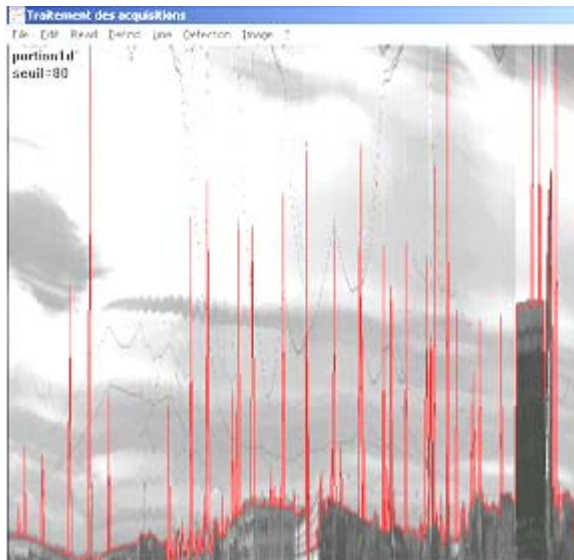
- Les poteaux ou autres obstacles fins peu masquants : Un processus de filtrage est appliqué à la ligne d'horizon afin d'éliminer la contribution des poteaux et des autres obstacles de faibles épaisseurs ne faisant pas obstacle à la réception des signaux GPS dans la définition de la ligne d'horizon. Le principe de ce filtrage consiste à éliminer les variations rapides et isolées de la ligne d'horizon. Un point isolé de la ligne d'horizon caractérisé par une élévation importante entre deux autres points dont l'élévation est faible reçoit la valeur de ses voisins (figure 2.23). Cette méthode possède l'avantage de faire disparaître les détails trop fins sans affecter l'allure générale de la courbe.



**Figure 2.23. Filtrage horizontal.**

La figure 2.24 présente les résultats après l'opération de détection des obstacles dans une image très affectée par une suite de poteaux. Les résultats après l'application du filtre sur la ligne d'horizon sont présentés figure 2.25.





**Figures 2.24 et 2.25. Avant et après le filtrage.**

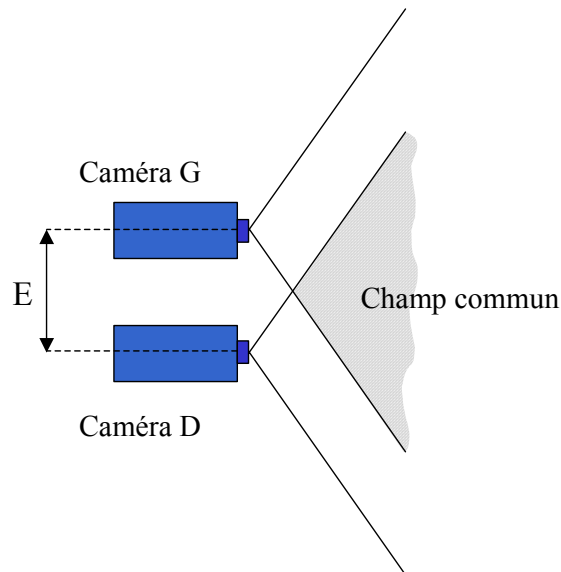
- La luminosité : Le traitement des images extraites d'enregistrements vidéo dynamiques pose des difficultés d'automatisation. En effet, les conditions d'enregistrement ne sont pas toujours les mêmes et de nombreux cas particuliers d'éclairages apparaissent. C'est le cas notamment des zones de saturation causées par un éclairage proche de l'horizon, ou des obstacle très clairs vus sur un fond de ciel très clair. Imaginons la présence d'un immeuble très clair devant un ciel très nuageux. Comment détecter l'immeuble sans détecter les nuages alors que l'obstacle et le ciel sont représentés par des ensembles de pixels dont les niveaux de gris sont identiques ? Afin de répondre à certains problèmes d'éclairage, une détection du sol vers le ciel par une méthode de seuillage est applicable.

Une fois la ligne d'horizon déterminée, les élévations des obstacles sont connues à droite et à gauche perpendiculairement au mobile à l'instant  $t$ . Ces données ne suffisent pas à déterminer complètement la position de l'obstacle dans l'espace. En effet, les positions des satellites GPS sont réparties tout autour de l'antenne. Il est donc nécessaire de reconstituer une vision tridimensionnelle de l'environnement à partir des données issues des images droite et gauche. Il convient donc de déterminer deux autres grandeurs : la distance à l'obstacle  $d$  et la hauteur de l'obstacle  $h$ .

### 2.2.3 Reconstruction tridimensionnelle de l'environnement

#### 2.2.3.1 *La stéréovision bi-caméras*

Le principe de stéréovision reproduit le système humain de vision en utilisant deux caméras. En effet, c'est l'utilisation conjointe de nos deux yeux qui permet d'apprécier la structure tridimensionnelle d'un objet. Comme pour la vision binoculaire, les axes optiques des deux caméras convergent vers la scène et les caméras ont un champ de vision commun (figure 2.26), dans lequel le cerveau reconstruit la troisième dimension des objets qui y sont présents.



**Figure 2.26. Stéréoscope.**

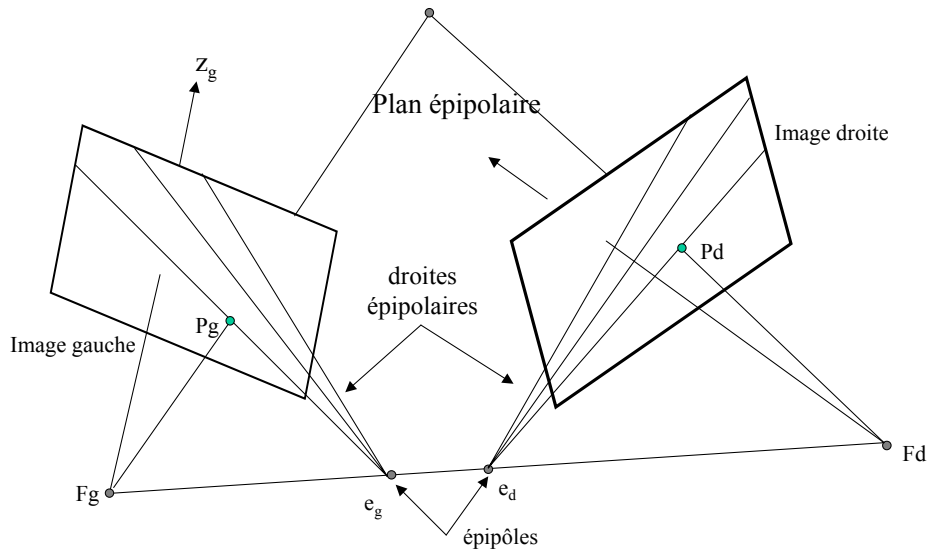
Un système stéréoscopique s'organise de la manière suivante [Burie, 95] :

- acquisition des images,
- extraction des primitives dans chaque image,
- mise en correspondance des primitives,
- triangulation géométrique,
- reconstruction tridimensionnelle de la scène.

Nous décrivons les principes de base de chacune de ces étapes.

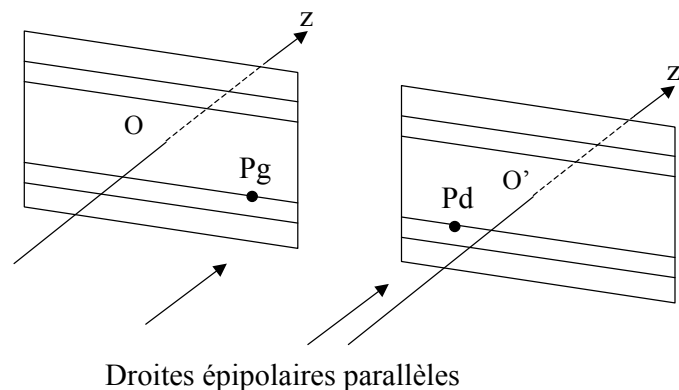
La géométrie des capteurs d'acquisition des images est fondamentale dans la mesure où elle est utilisée dans la triangulation et la reconstruction tridimensionnelle de la scène. Un point de la scène réelle est présent dans chacune des images du stéréoscope. Ce point est repéré par ses coordonnées dans les repères liés à chacune des deux images. Les calculs de triangulation géométrique les utilisent alors afin de déterminer les coordonnées du point dans un repère associé à la scène réelle. Il est donc impératif de déterminer les relations géométriques qui permettent de passer du repère caméra gauche au repère caméra droite, ainsi que celles permettant de passer au repère associé à la scène. Ces relations dépendent de l'étape de calibrage.

Etant donné un point  $P_g$  de l'image gauche, le processus consiste à chercher son correspondant  $P_d$  dans l'image droite. Le point  $P_d$  appartient nécessairement à une droite de l'image droite entièrement définie par la donnée de  $P_g$ . Cette droite est appelée droite épipolaire associée à  $P_g$ . Il existe réciproquement une droite épipolaire conjuguée associée à  $P_d$ . Dans chaque image, les droites épipolaires forment un faisceau de droites, et leur point commun s'appelle l'épipôle (figure 2.27). L'épipôle droit  $e_d$  est la projection du centre focal  $F_g$  de la caméra gauche dans l'image droite et réciproquement [Ruichek, 97].



**Figure 2.27. Configuration générale d'un capteur stéréoscopique.**

Dans la configuration idéale, les axes optiques sont parallèles. Les droites épipolaires constituent alors un ensemble de droites parallèles tel qu'illustré figure 2.28. Cette configuration est réglée lors de la phase de calibrage du stéréoscope, étape indispensable à l'utilisation du système. Cette disposition simplifie les calculs et assure une meilleure précision dans la localisation des éléments de la scène.



**Figure 2.28. Système stéréoscopique dont les capteurs sont parallèles.**

L'écart entre les deux caméras est appelé entraxe  $E$ . Dans le même souci que lors du choix des capteurs, il convient de déterminer l'entraxe et la distance focale en fonction du domaine d'application.

### 2.2.3.2 La notion de primitives

Il n'est pas envisageable d'apparier chaque pixel de l'image à son correspondant dans l'autre image car le temps de calcul serait beaucoup trop important et parce qu'un pixel ne contient pas d'information suffisante pour l'identifier. Les images sont d'abord traitées afin d'en extraire des éléments caractéristiques appelés primitives. Leur appariement d'une image à l'autre doit être aisé et le moins ambigu possible. On choisit donc des points remarquables (coins, points de courbure...), des d'objets, des régions homogènes... L'extraction des primitives constitue la première étape du traitement. Elle permet d'obtenir, pour chaque image, les candidats pour la procédure de mise en correspondance.

### 2.2.3.3 La mise en correspondance

La mise en correspondance des primitives nécessite de mettre en œuvre des critères de ressemblance afin de décider de la vraisemblance d'un appariement. Ces contraintes permettent de lever les ambiguïtés. Nous citons ici les contraintes les plus usitées.

- La contrainte épipolaire permet de passer à une seule dimension puisque deux primitives correspondantes se trouvent nécessairement sur des droites épipolaires conjuguées.
- La contrainte d'ordre suppose que l'ordre des primitives est le même dans les deux images du couple stéréoscopique et
- la contrainte d'unicité suppose qu'un point de l'image gauche n'a qu'un seul correspondant dans l'image droite.

La phase d'application des contraintes permet d'exclure un certain nombre d'ambiguïtés. Si toutes les contraintes sont respectées, le critère de ressemblance est calculé afin de valider l'appariement.

### 2.2.3.4 La triangulation

Une fois les couples de points définis, la phase de triangulation géométrique permet de situer les points utiles dans le repère associé à la scène.

On observe un point A particulier dans le champ commun. Ce point apparaît dans les images filmées par les deux caméras avec pour coordonnées respectivement  $(x_g, y_g)$  et  $(x_d, y_d)$  dans les images gauche G et droite D (figure 2.29). Une fois le stéréoscope calibré, on appelle disparité  $\delta$  la distance  $|x_g - x_d|$  et la position du point A dans un repère associé à la scène  $(x, y, z)$  est :

$$x = \frac{x_g \times E}{\delta} \quad \text{où } E \text{ définit l'entraxe des caméras,} \quad (2.1)$$

$$y = \frac{y_g \times E}{\delta}, \quad (2.2)$$

$$z = \frac{f \times E}{\delta}, \quad \text{où } f \text{ représente la focale de l'objectif.} \quad (2.3)$$

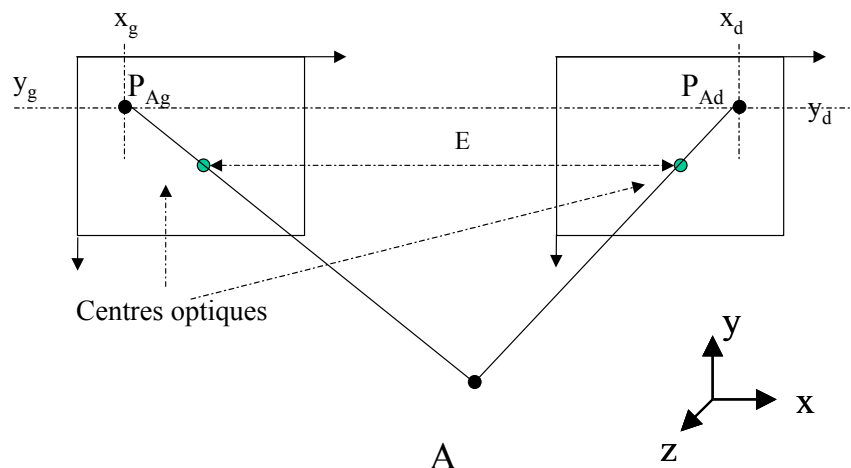


Figure 2.29. Localisation 3D.

Le procédé de traitement que nous avons développé utilise un système de stéréovision mono-caméra inspiré de ces méthodes.

### 2.2.3.5 La stéréovision mono-caméra

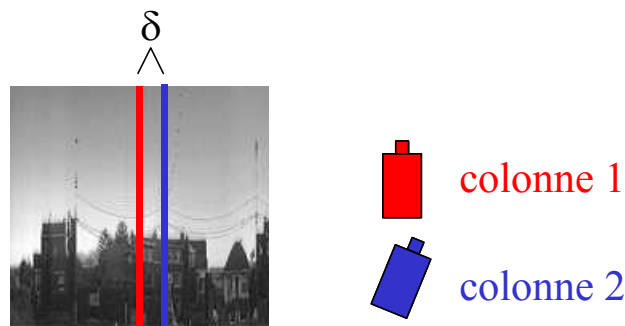
La solution adoptée permet de retrouver l'approche bi-caméras grâce au mouvement du véhicule et malgré l'utilisation d'une unique caméra. A l'instar des systèmes bi-caméras de reconstruction tridimensionnelle, nous cherchons à apparier des primitives extraites dans deux images acquises à deux instants distincts correspondants à deux positions différentes du véhicule. En redéfinissant chacune des variables des équations (2.1), (2.2) et (2.3), il est alors possible de calculer les coordonnées 3D de chaque point de la scène.

### 2.2.3.6 Génération des deux images à partir d'une caméra

Les propriétés dynamiques des scènes que nous observons lorsque le véhicule est en mouvement permettent d'adopter une approche stéréoscopique en utilisant une seule caméra.

L'obtention de la seconde image spatio-temporelle s'effectue conformément à la méthode décrite figure 2.13 en utilisant une seconde colonne  $j$  dans chaque image de l'enregistrement (figure 2.30). La disparité  $\delta$ , définie précédemment, correspond alors au décalage spatial entre ces deux lignes.

En juxtaposant les colonnes  $j$  extraites dans chaque image  $i_i$ , nous créons une deuxième image spatio-temporelle. Cette image, notée image  $G'$  et  $D'$  respectivement pour gauche et droite, correspond à une vision « oblique » de l'environnement (figure 2.30), complémentaire à la vision perpendiculaire, notée  $G$  et  $D$ , obtenue par l'utilisation de la première ligne.



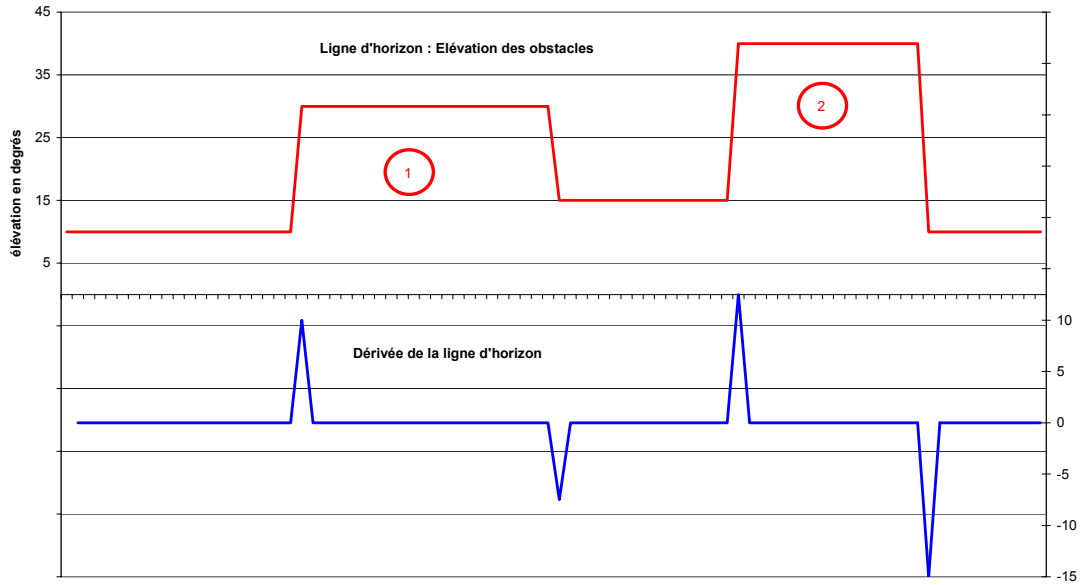
**Figure 2.30. Utilisation de deux lignes de l'image pour la stéréovision.**

### 2.2.3.7 Extraction des primitives

Le calcul des lignes d'horizon est effectué simultanément sur les images  $D$  et  $D'$  (respectivement  $G$  et  $G'$ ). Les profils des deux lignes d'un même côté de la trajectoire sont très semblables. Ils représentent le même horizon, observés depuis deux angles de vue différents.

Les primitives recherchées sont les contours de début et fin d'obstacles. Ces contours apparaissent sur la courbe dérivée de la ligne d'horizon. Les maxima de dérivées représentent les débuts et fins d'obstacles dans chacune des images. La figure 2.31 présente un exemple théorique d'une ligne d'horizon extraite d'une image  $D$ . Deux obstacles apparaissent clairement et sont mis en évidence avec la dérivée de la courbe : l'obstacle débute à l'abscisse du maximum de la dérivée et se termine à l'abscisse du minimum.

Le signe de la dérivée caractérise la nature du contour : une dérivée négative correspond à un front descendant, une dérivée positive correspond à un front montant. Cette distinction est importante pour apparier correctement des fronts de même nature.



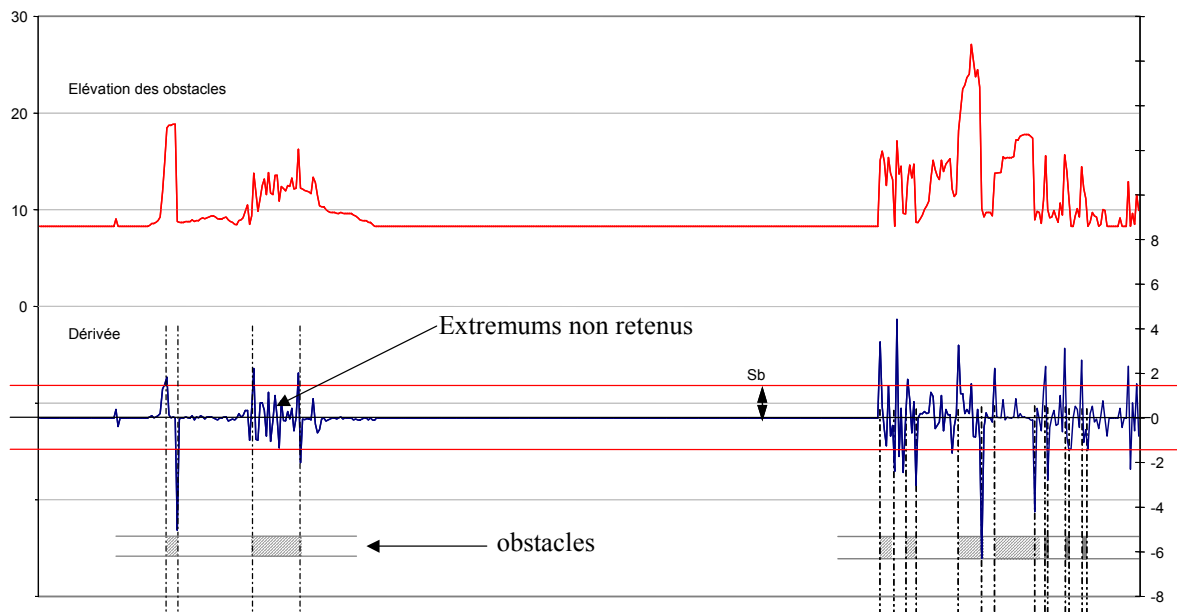
**Figure 2.31. Exemple typique d'une ligne d'horizon et de sa dérivée.**

L'opération de détection des contours réalisée revient à extraire les obstacles prépondérants, c'est-à-dire ceux jugés fortement masquants.

#### 2.2.3.8 Mise en correspondance

Les contours de l'image D doivent être repérés dans l'image D'. L'étape de mise en correspondance consiste à sélectionner les primitives importantes et à appairer les contours dans chacune des images, ici le début de l'obstacle 1 de l'image D avec le début de l'obstacle 1 dans l'image D', afin de calculer, par triangulation, la position en trois dimensions de ces obstacles dans la scène. Il est important de noter que plus les filtres auront lissé les courbes, moins la localisation des extremums de la dérivée sera précise.

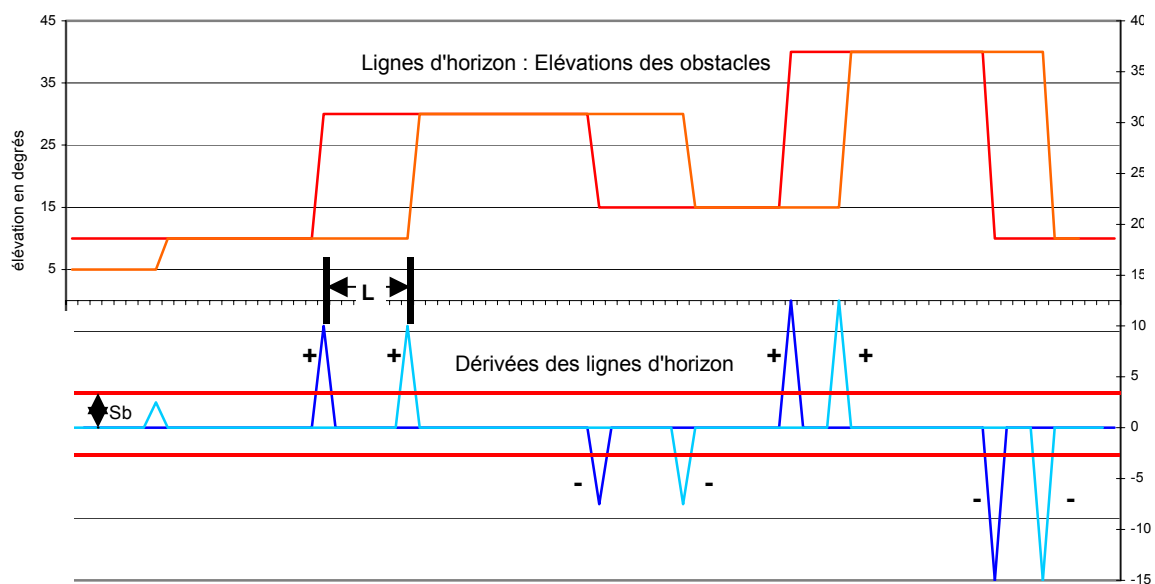
Dans un cas réel, les courbes dérivées sont plus complexes et représentent chacune des variations de la ligne d'horizon. La courbe 2.32 illustre un exemple de courbe dérivée d'une ligne d'horizon représentant deux bosquets. Il n'est pas utile de considérer chacun des extremums de cette dérivée (et il serait bien trop complexe d'appairer autant de points dans chaque image), c'est pourquoi, afin de sélectionner les extremums significatifs et d'éliminer les contours peu importants, nous fixons un seuil  $S_b$  en dessous duquel les extremums seront ignorés. Nous formons ainsi des blocs d'obstacles. Dans l'exemple de la figure 2.32, nous retiendrons deux blocs d'obstacles (ici des « blocs » de végétation) dans la moitié gauche de l'image.



**Figure 2.32. Sélection des extremums.**

Le traitement consiste à balayer l'image de gauche à droite afin de rechercher chacun des extremums sélectionnés dans la première image dans un intervalle proche dans la deuxième image. Deux contours appariés doivent correspondre à deux extremums de dérivée de même signe et apparaître dans le même ordre dans les deux images.

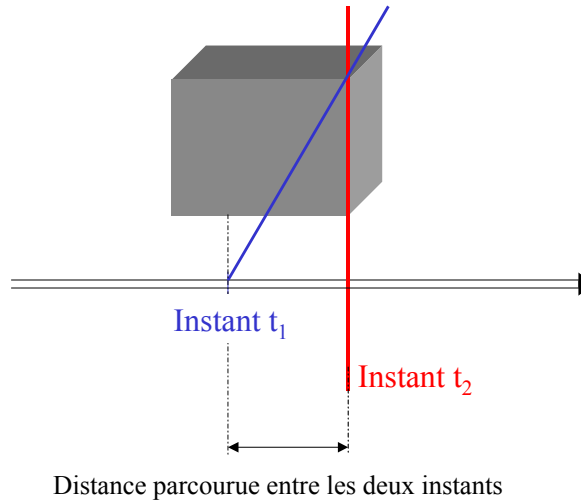
Reprenons l'exemple simple de la figure 2.31. La ligne d'horizon issue de la deuxième image a été superposée à la première ainsi que sa dérivée. L'appariement consiste à associer les deux premiers extremums positifs pour en extraire la distance  $L$ , puis les deux extremums négatifs pour détecter la fin de l'obstacle 1 (figure 2.33), etc. L'entraxe  $E$  définie précédemment dans le cadre des systèmes de reconstruction tridimensionnelle bi-caméras correspond alors à cette valeur de  $L$  pour laquelle les deux contours ont été appariés.



**Figure 2.33. Appariement des contours.**

### 2.2.3.9 Reconstruction tridimensionnelle

Des relations trigonométriques lient les élévations des masques et la distance séparant les contours détectés et reconnus dans les deux images. En effet, si l'arête du bâtiment est repérée obliquement dans l'image D' à l'instant  $t_1$ , et perpendiculairement dans l'image D à l'instant  $t_2$ , la distance parcourue entre ces deux points suffit à déterminer la distance et la hauteur de l'arête (figure 3.34).



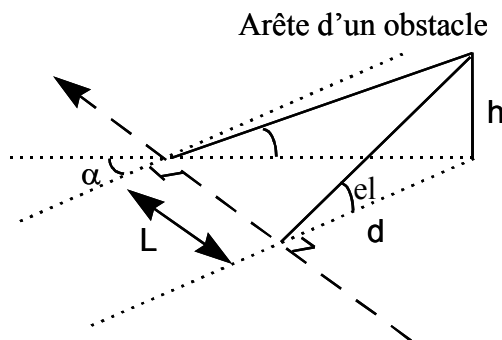
**Figure 2.34. Mise en correspondance.**

Les grandeurs utilisées dans les calculs sont définies sur les figures 2.35 et 2.36. Nous retrouvons les relations utilisées par la stéréoscopie, avec les expressions de :

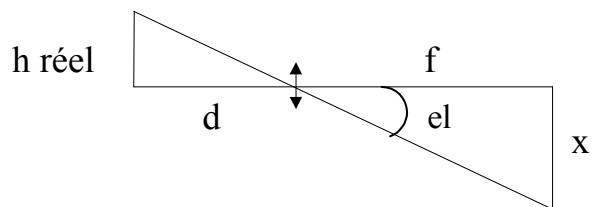
- la distance à l'obstacle  $d$  : 
$$d = \frac{L}{\tan \alpha} = \frac{f \times E}{\delta}, \quad (2.4)$$

- la hauteur de l'obstacle  $h$  : 
$$h = d \tan el = \frac{x \times E}{\delta}, \text{ où } el \text{ est l'élévation de l'obstacle détectée plus tôt et } x \text{ le nombre de pixels représentant l'obstacle dans l'image.} \quad (2.5)$$

La figure 2.37 résume l'ensemble du processus.

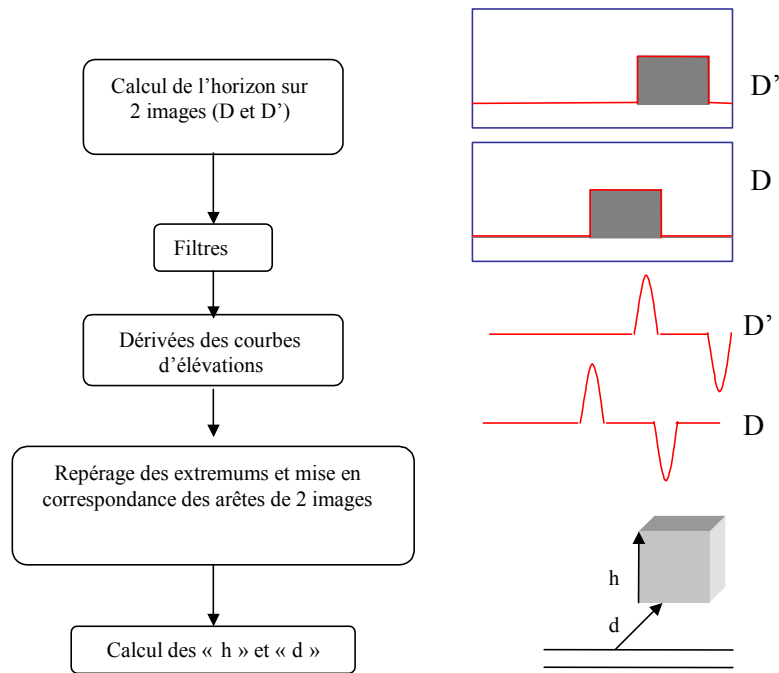


**Figure 2.35. Notations géométrique.**



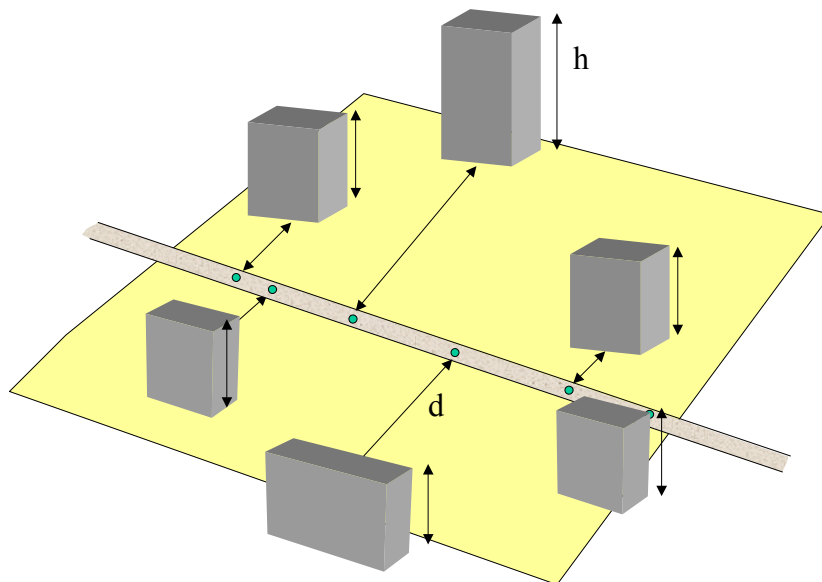
**Figure 2.36. Notations stéréoscopiques.**



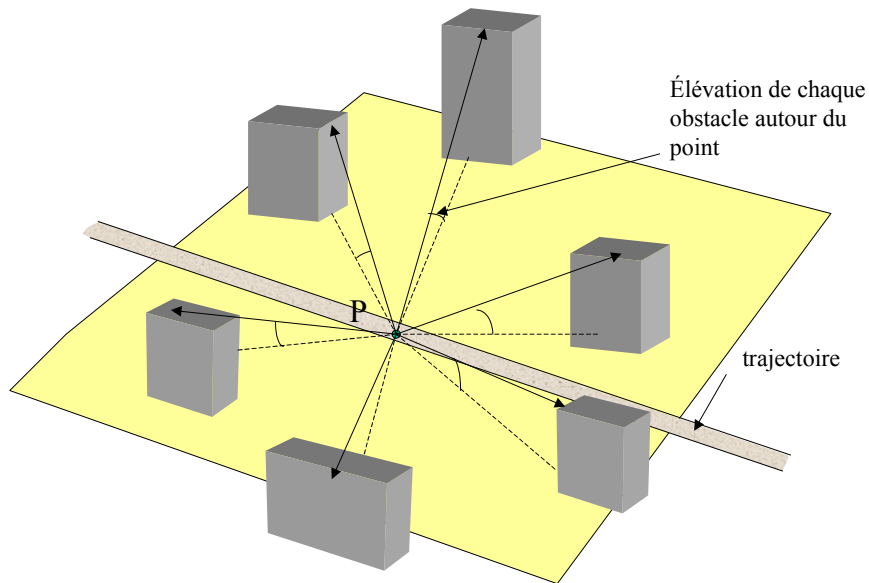


**Figure 2.37. Calcul de la position et de la hauteur de l'obstacle en utilisant deux lignes.**

Avec cette méthode, les obstacles sont repérés et caractérisés le long de la trajectoire tel qu'illustré figure 2.38, d'après leurs distances à la trajectoire et leurs hauteurs. La réception du signal satellite en chaque point de la trajectoire doit cependant être considérée tout autour de l'antenne GPS. Il est donc nécessaire de calculer l'élévation du masque autour de chaque point P de la trajectoire (figure 2.39).

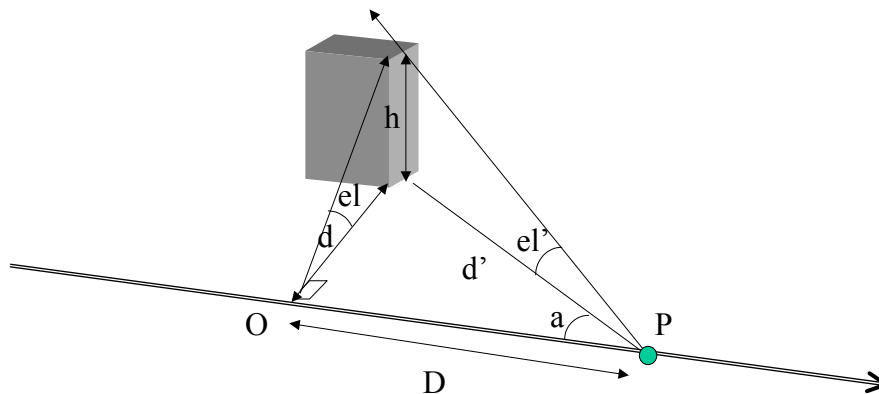


**Figure 2.38. Position des obstacles autour de la trajectoire.**



**Figure 2.39. Élévation des masques à 360° autour de l'antenne.**

Nous considérons une portion de trajectoire rectiligne. Puisqu'il s'agit d'un traitement différé, nous disposons des informations de position des obstacles à droite et à gauche de toute la trajectoire. En tout point P de la trajectoire, nous observons les données antérieures et postérieures sur une distance  $-D_{\max}$  à  $+D_{\max}$ . Les élévations sont calculées tous les  $x$  mètres d'après les notations de la figure 2.40 et les relations géométriques 2.6, 2.7 et 2.8.



**Figure 2.40. Notations utilisées dans le calcul du masque à 360°.**

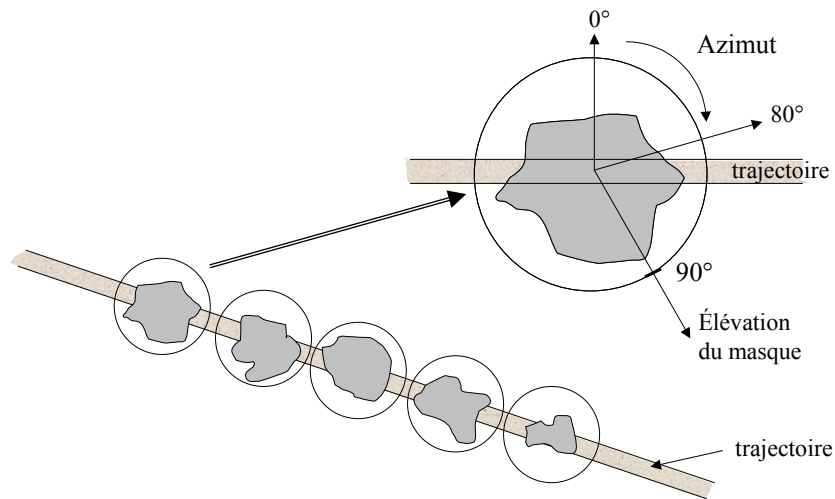
Sachant qu'une des faces de l'obstacle est perpendiculaire au point O et connaissant la distance OP notée D, nous calculons les angle  $el'$  et  $a$  qui représente l'azimut par rapport à la direction du véhicule à partir des expressions (2.6) à (2.8).

$$d' = \sqrt{d^2 + D^2} \quad (2.6)$$

$$el' = \arctan\left(\frac{h}{d'}\right) \quad (2.7)$$

$$a = \arctan\left(\frac{d}{D}\right) \quad (2.8)$$

La reconstruction de l'horizon est effectuée avec un échantillonnage fixé selon les besoins de l'application visée ( $x = 10\text{ m}, 20\text{ m}, \dots$ ) et les masques des signaux satellites sont identifiés le long de la trajectoire tel que représenté schématiquement figure 2.41.



**Figure 2.41. Reconstruction du masque autour de l'antenne tous les x mètres.**

### 2.2.3.10 Résultats

#### - Précision des résultats du traitement d'image

Lors de la phase de mise en correspondance, deux paramètres influent sur la précision des résultats :  $\delta$  et  $\Delta l$  dont dépend aussi la précision de  $d$  et  $h$ . Nous présentons ici les réflexions à mener afin de choisir ces paramètres.

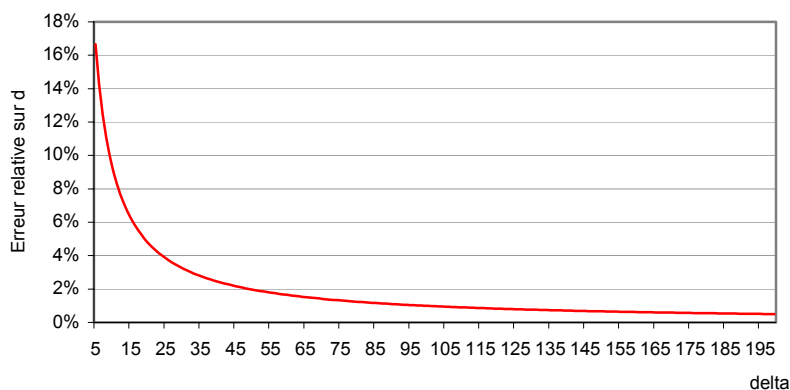
#### - Choix de $\delta$ et du pas d'échantillonnage de l'image $\Delta l$ .

La disparité  $\delta$  est ajustée en fonction de l'environnement que le système doit traiter. Pour un type d'environnement donné, considérons une erreur d'un pixel sur la disparité.

La distance de l'obstacle ainsi détecté s'écrit  $d_e = \frac{f \times E}{\delta + 1}$ . L'erreur relative sur  $d$  devient alors :

$$\frac{d\varepsilon}{d} = \frac{\delta}{\delta + 1} \quad (2.9)$$

L'évolution de l'erreur relative en fonction de  $\delta$  est représentée graphiquement figure 2.42.



**Figure 2.42. Variation de l'erreur relative sur  $d$  en fonction de  $\delta$ .**

L'erreur tolérée impose la valeur de  $\delta$ . Cependant, l'erreur relative diminue lorsque  $\delta$  augmente et la déformation des obstacles s'accroît, rendant alors plus difficile la phase de mise en correspondance temporelle (critère de ressemblance). Un compromis doit donc être fait.

L'erreur sur la distance est également directement liée au pas d'échantillonnage. En effet, dans la phase de mise en correspondance, lors de l'appariement des contours (figure 2.33), la précision est fonction du nombre de pas séparant les deux extremums des dérivées.

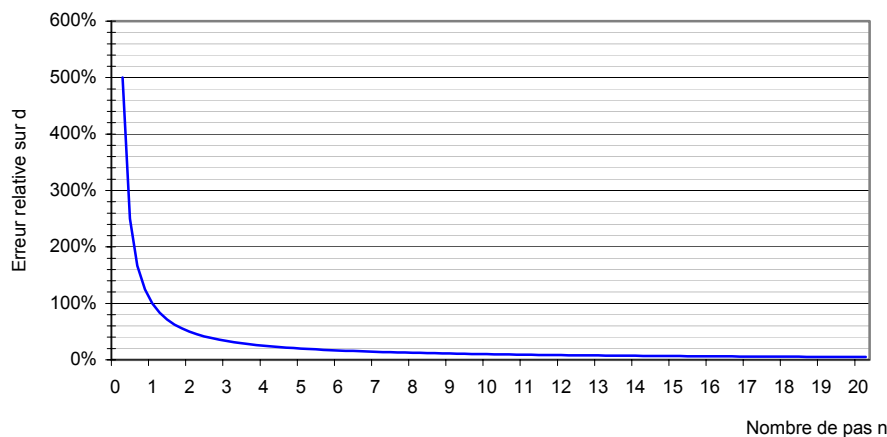
L est la distance entre deux points appariés lors de la mise en correspondance (figure 2.35). Elle s'exprime selon (2.10) :

$$L = n \times \Delta l = \frac{d \times \delta}{f} \quad \text{où } n \text{ représente le nombre de pas.} \quad (2.10)$$

L'erreur relative sur la distance s'écrit alors :

$$\frac{d\varepsilon}{d} = \frac{1}{n} \quad (2.11)$$

L'erreur sur la distance sera d'autant plus petite que le nombre de pas entre les deux points appariés sera grand. Les variations de l'erreur en fonction du nombre de pas sont données figure 2.43. Pour une erreur relative de 10 % au maximum, il convient de choisir  $\Delta l$  afin d'obtenir  $n$  supérieur ou égal à 10 pour les obstacles les plus proches.



**Figure 2.43. Variation de l'erreur en fonction du nombre de pas n.**

Si  $d_{\min}$  est la distance à l'obstacle le plus proche, la vitesse minimale d'échantillonnage  $\Delta l = \frac{L_{\min}}{n_{\min}}$  du système peut être calculée.

- *Influence de l'erreur en fonction du choix.*

Afin d'obtenir les résultats les plus précis et les plus robustes possibles, il est important d'analyser les variations des paramètres tri-dimensionnels calculés en fonction :

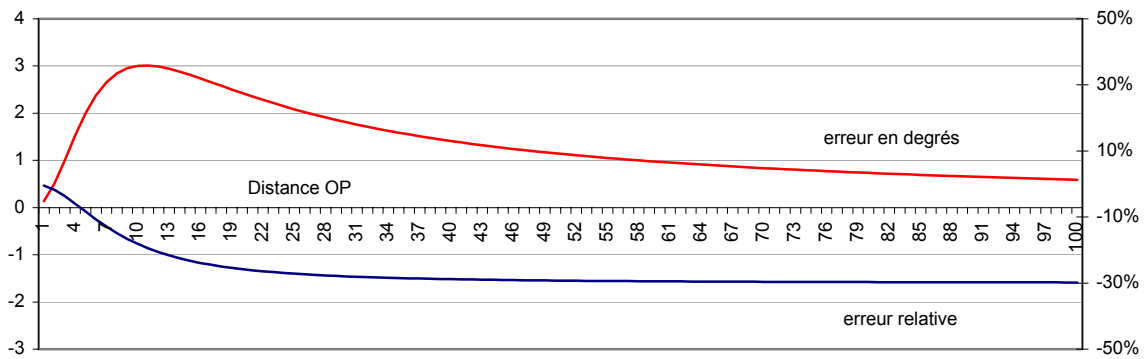
- d'une erreur d'appariement temporel et
- d'une erreur de localisation des points de contours de la ligne d'horizon,

qui se manifestent respectivement par une imprécision sur la distance L et sur l'élévation el.

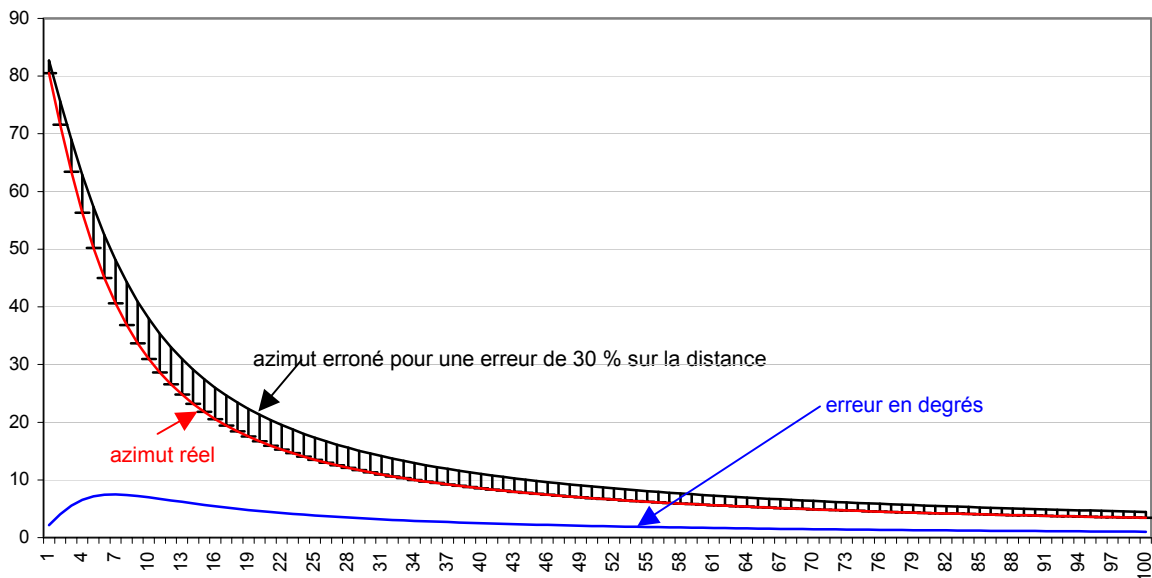
- *L'erreur sur d et h.*

Nous avons défini ci-dessus les procédures de choix des paramètres caractérisant la précision de la reconstruction tridimensionnelle. Appliquons maintenant ces règles à un exemple numérique dans lequel  $\delta = 68$ ,  $\Delta l = 2$ , et  $d_{\min} = 10 \text{ m}$ . D'après les courbes 2.42 et 2.43, l'erreur liée à  $\delta$  est égale à 1.45 % et celle imputée à  $\Delta l$  est égale à 20 %, soit une erreur totale de l'ordre de 30 % sur la distance obstacle - trajectoire. Cette erreur a une influence sur la reconstruction du masquage en un point P de

la trajectoire. Au point O, perpendiculaire à l'obstacle,  $d = 1,3 \times d_{réel}$ . Nous calculons l'élévation, puis l'azimut du masque créé par l'obstacle lorsque le mobile se déplace sur l'axe (OP) et parcourt une distance de 0 à 100 mètres. L'erreur relative de l'élévation peut atteindre 30%. Cependant, cette erreur ne représente que 3 degrés dans le cas d'un obstacle de taille moyenne tel qu'un canyon urbain de 30° d'élévation (figure 2.44). Cette erreur de 30 % se répercute sur le calcul d'azimut. C'est au plus près de l'obstacle que l'erreur est la plus importante. L'erreur maximale est de 7 degrés sur l'azimut de l'obstacle (figure 2.45).



**Figure 2.44. Erreur sur la distance en fonction de la distance OP.**



**Figure 2.45. Erreur sur l'azimut.**

A l'avenir, nous nous attacherons à optimiser au mieux les paramètres du dispositif pour minimiser ces écarts en fonction du type d'environnement à appréhender. Nous appliquerons ce choix pour les résultats présentés dans le chapitre 4.

Après avoir reconstruit le masque à 360° autour de l'antenne (figure 2.39), ce masque est appliqué aux résultats de simulation de passage des satellites dans la phase de comptage.

## 2.3 Le comptage des satellites

En tout point de la trajectoire et à tout instant, la procédure de comptage consiste à associer les résultats fournis par le logiciel STK (élévation et azimut des satellites) aux résultats fournis par le traitement d'images décrit précédemment (élévation et azimut du masque). Cette comparaison, dont le principe est présenté figure 2.46, permet de déduire le nombre de satellites disponibles pour la localisation du mobile, à un endroit et à un instant donnés. Les satellites situés à l'extérieur de la zone de visibilité sont exclus en réalisant l'intersection du traitement d'image et de la simulation.

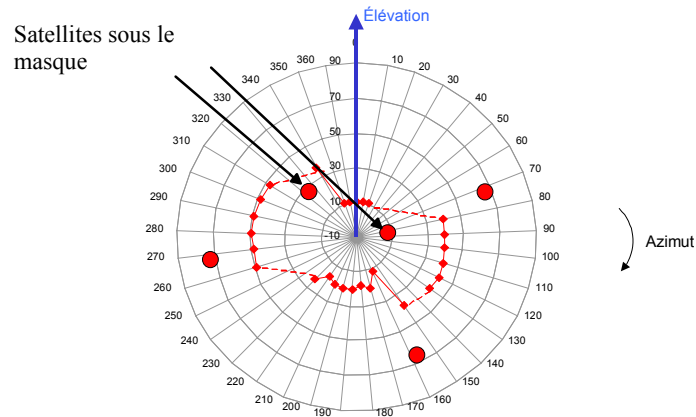


Figure 2.46. Procédure de comptage des satellites.

## 3 Utilisation de l'outil

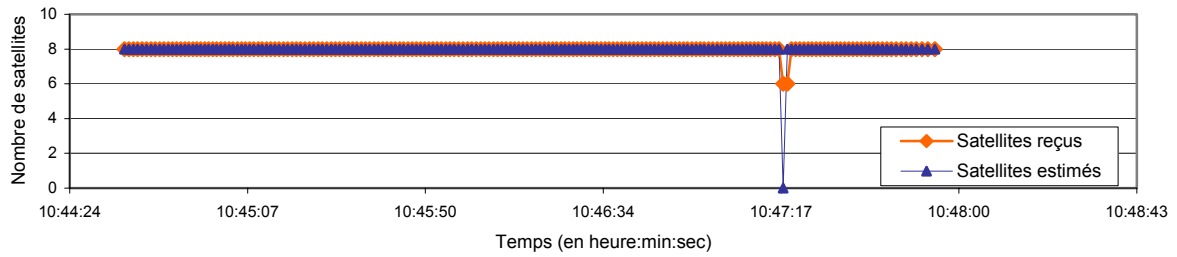
### 3.1 Prédiction du nombre de satellites visibles le long d'une trajectoire

Avant une utilisation systématique de l'outil, les performances de l'outil ont été évaluées. Après une validation statique, l'outil a été testé dans des contextes divers : ferroviaires et routiers et dans différents types d'environnements : urbain, suburbain, ou rural lors, cette fois, d'essais dynamiques.

#### 3.1.1 En environnement routier

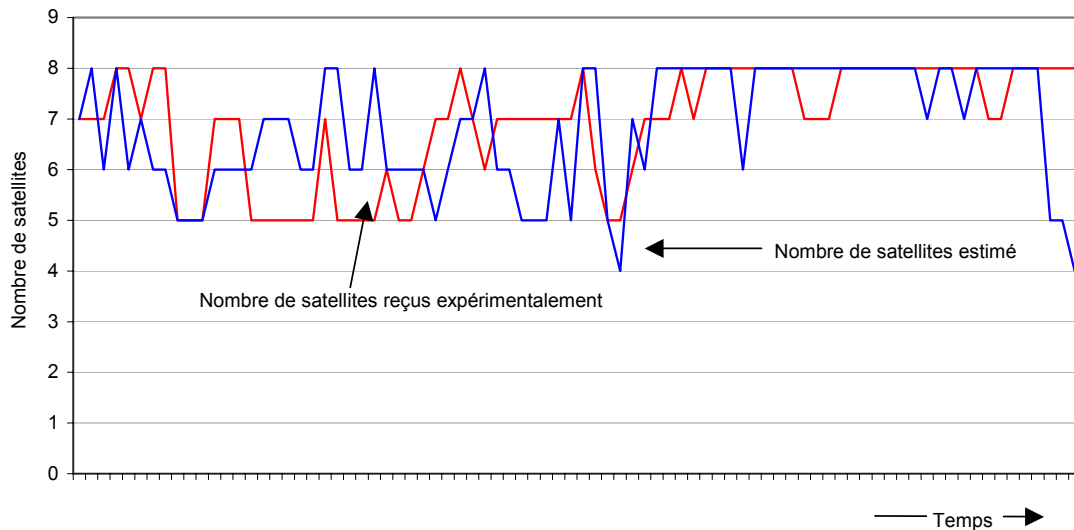
Des essais ont montré l'intérêt de l'approche décrite. Nous avons comparé le nombre de satellites disponibles calculé par l'outil et celui réellement vu par une antenne placée sur le toit du camion du laboratoire. Le nombre de satellites disponibles en environnement non masqué est souvent supérieur à 8. Cependant, limités par les 8 canaux du récepteur, nous considérons un nombre de satellites maximal de 8 pour la comparaison avec le nombre de satellites effectivement reçu.

La caractérisation des masquages a montré que les masques de l'environnement rural sont majoritairement situés à des élévations très faibles. Les contraintes sur la réception du signal issu des satellites sont donc quasiment nulles. La courbe 2.47 montre un parcours rural dans la banlieue lilloise : le seul masque perturbant la réception est un passage bref sous un pont. La correspondance entre nos simulations et le nombre réel de satellites rencontré est alors immédiate.

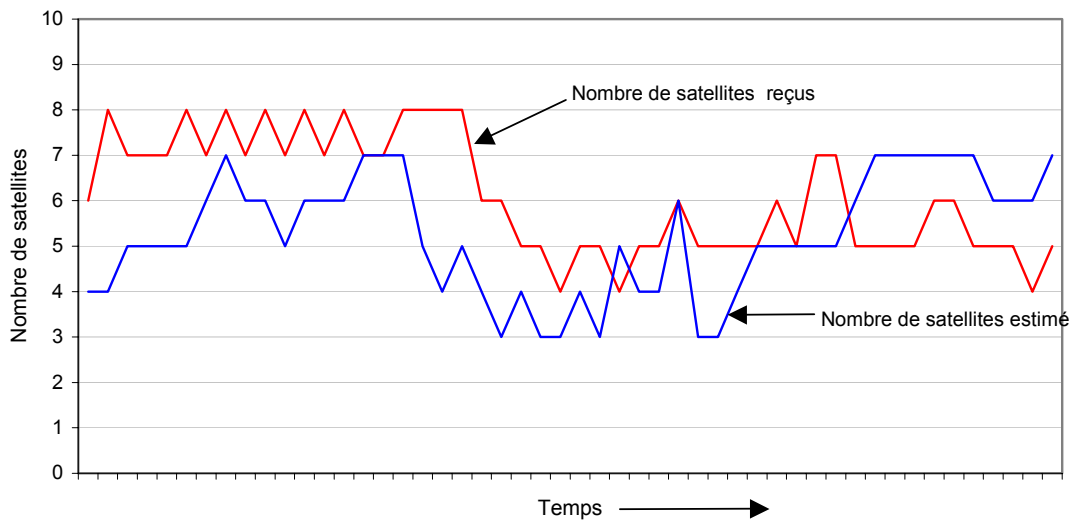


**Figure 2.47. En environnement rural (peu de masquages et un pont).**

L'environnement suburbain est caractérisé par des masquages plus fréquents et plus élevés. La figure 2.48 illustre les variations plus rapides du nombre de satellites. Les variations de la courbe relative au nombre de satellites effectivement reçus (courbe rouge) sont comparables au nombre de satellites prévus par la simulation. L'erreur moyenne entre ces deux résultats est égale à 0,9 satellite. En urbain, la moyenne des erreurs obtenues sur la portion de la figure 2.49 est égale à 0,86 satellite.



**Figure 2.48. En environnement suburbain.**



**Figure 2.49. En environnement urbain.**

### 3.1.2 En environnement ferroviaire

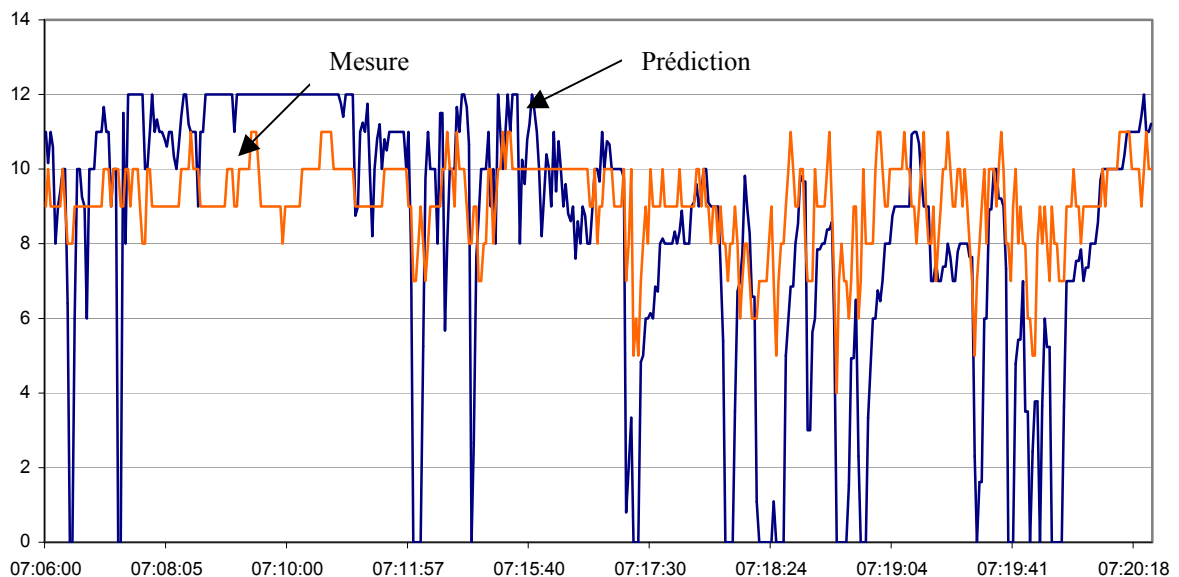
#### 3.1.2.1 *Description*

Lors d'essais ferroviaires, nous avons utilisé une antenne placée sur le toit d'un autorail d'essais de la Direction de la Recherche et de la Technologie de la SNCF et connectée à un récepteur GPS lors d'un trajet entre Tournan et Coulommiers en Juin 1998. La figure 2.50 présente une comparaison sur une portion de 15 minutes de la trajectoire parcourue. Afin de faciliter la lecture de cette courbe, les résultats sont moyennés sur une période mobile de 10 secondes figure 2.51.

#### 3.1.2.2 *Résultats*

L'erreur moyenne entre ces deux courbes est égale à 0,33 satellite.

L'ensemble des essais, routiers et ferroviaires, montre une oscillation du nombre de satellites prédit autour du nombre de satellites effectivement reçu. Les résultats sont donc encourageants et valident l'approche développée. Il convient cependant de noter que l'ensemble des résultats obtenus montre des prédictions légèrement pessimistes.



**Figure 2.50. Exemple de résultats bruts obtenus en essais ferroviaires.**



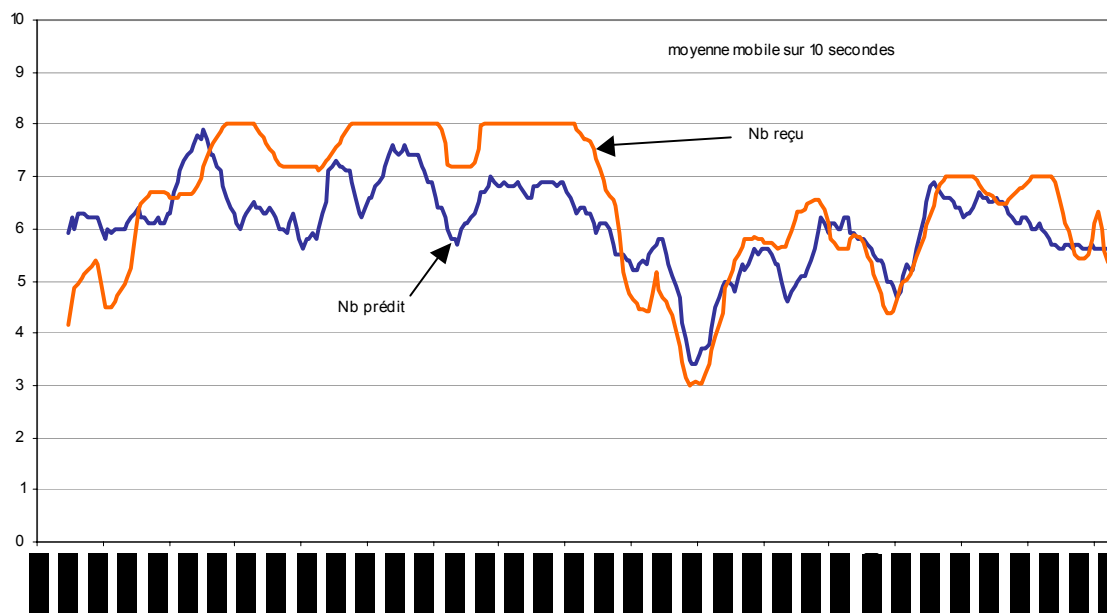


Figure 2.51. Exemple de résultats moyennés obtenus en environnement ferroviaire.

Notons également que le procédé de traitement d'images de PREDISSAT permet d'analyser de façon fortement automatisée et statistiquement un nombre important de données relatives aux élévations des masques. Nous présentons ci-dessous quelques résultats.

### 3.2 Caractérisation de l'environnement par le traitement d'image

Nous avons utilisé l'outil afin de caractériser l'environnement ferroviaire sur la ligne Paris-Coulommiers parcourue lors des essais dans le projet DEUFRAKO-P. Nous avons identifié trois types d'environnement : rural, suburbain et forestier. Les algorithmes de traitement d'image permettent l'exploitation des bandes vidéos et l'extraction d'informations statistiques relatives à l'élévation des masques le long de la trajectoire dans chacun des types d'environnements (figure 2.52).

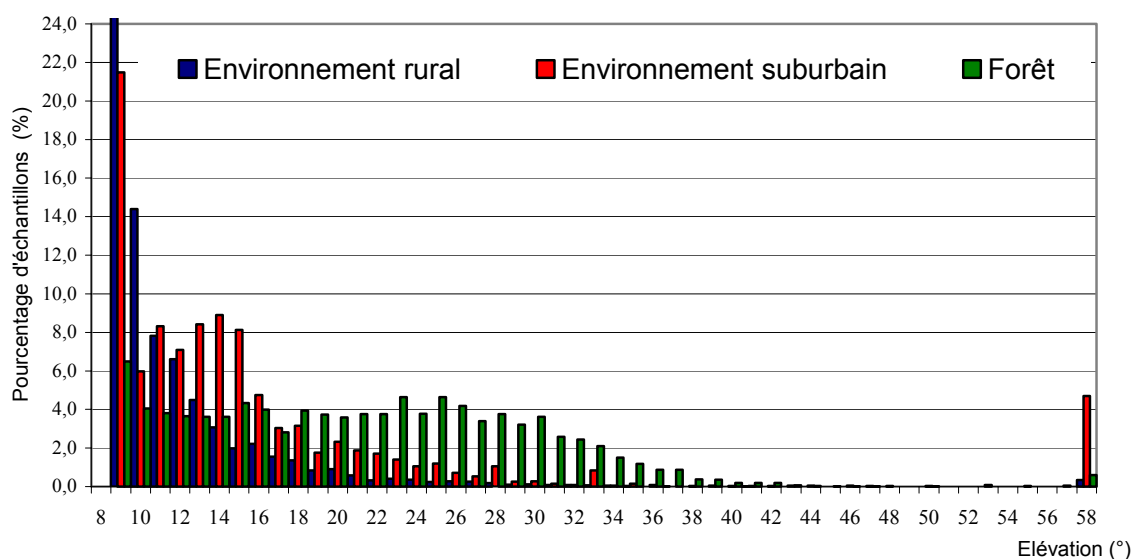


Figure 2.52. Répartition des angles d'élévations des masques en fonction du type d'environnement.

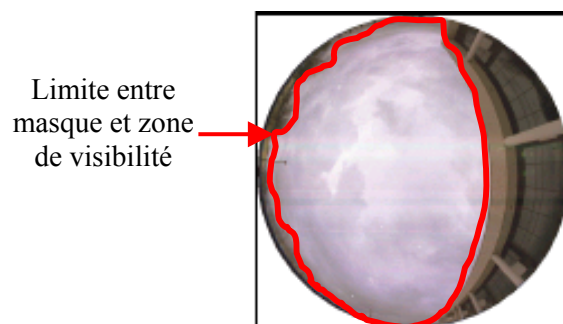
Cette caractérisation, couplée à une analyse dans le temps, permet d'obtenir la probabilité de rencontrer une élévation des masques pendant une durée  $\Delta t$  le long d'un trajet. Dans l'hypothèse où d'autres essais le long d'autres voies de chemin de fer permettraient de mettre en évidence des lois de probabilité assez générales et caractéristiques du type d'environnement traversé, nous obtiendrions dans la suite des formes de modèles empiriques des caractéristiques de masquage.

## 4 Conclusion

Nous venons de montrer que l'approche optique adoptée dans l'outil permet de déterminer efficacement le nombre de satellites reçus par trajet direct. Les résultats sont encourageants bien que le nombre de satellites prédit soit souvent pessimiste. Les algorithmes de traitement d'images développés ont prouvé leur fiabilité dans la détection de la ligne d'horizon optique. Nous avons illustré l'influence du choix des paramètres (disparité et pas d'échantillonnage) du système stéréoscopique sur les imprécisions finales de la reconstruction de l'environnement. Quelques difficultés demeurent non résolues aujourd'hui par les techniques de traitement d'images, notamment certains cas particuliers de l'environnement urbain avec des obstacles très clairs dont le traitement ne peut pas être automatisé.

Nous avons proposé des pistes réalistes d'amélioration de l'outil dans un futur proche. Les algorithmes de traitement, les ressources et les procédés de stockage peuvent être facilement optimisés afin d'exploiter la totalité des données vidéo, soit les 25 images chaque seconde ainsi que leur localisation dans l'espace. Les algorithmes de reconstruction tridimensionnelle peuvent aussi être optimisés afin d'affiner la précision de la localisation des obstacles dans l'espace et de s'affranchir de l'hypothèse d'une trajectoire rectiligne autorisant une utilisation dans des environnements de type urbains très denses. Pour cela, un stéréoscope bi-caméras pourra être envisagé. Bien qu'il soit plus difficile à mettre en place sur un plan matériel, il offrira des possibilités accrues de reconstruction de l'environnement en trois dimensions.

Enfin, l'utilisation d'une caméra fish-eye pourrait être envisagée dans de futures applications. Ce type de caméra demande cependant de repenser la philosophie du traitement des images. La figure 2.53 est une photo obtenue avec un objectif fish-eye. Elle représente le cône de visibilité directement au-dessus de la caméra. La courbe rouge superposée caractérise la frontière entre le masque et le ciel. La caméra à objectif fish-eye possède une moins bonne résolution angulaire mais permet d'obtenir un calcul de l'angle d'élévation des obstacles à 360° autour de l'antenne globalement plus précis. En contrepartie, nous ne bénéficions plus de l'aspect positionnement spatial des obstacles. Une comparaison des résultats obtenus avec ce type de caméra serait intéressante mais ne faisait pas l'objet de notre travail de thèse.



**Figure 2.53. Elévation du masque à 360° autour de l'antenne (Source : [Vogel, 95]).**

Nous avons présenté des résultats expérimentaux en environnements routier et ferroviaire. Ils montrent comment il est possible de caractériser l'environnement autour de l'antenne par le traitement

d'images. Ils font apparaître les limites de la première version de l'outil qui ne tient compte que des satellites dont le signal est reçu en visibilité directe, excluant les quelques satellites reçus alors qu'ils ne sont pas visibles optiquement. Ces satellites sont reçus par trajet indirect uniquement bien que leur élévation soit inférieure au masque. Nous faisons l'hypothèse que ces satellites sont à l'origine des écarts entre les prédictions et les mesures. Dans le chapitre 3, nous allons détailler les phénomènes de propagation qui interviennent afin de caractériser ces satellites reçus par trajets multiples et de les intégrer dans la prédiction. Nous montrerons les conséquences de la prise en compte de ces satellites dans le calcul de la localisation.

## Chapitre 3 :

# Caractérisation des phénomènes de propagation lors de la réception des signaux en NLOS

## 1 Introduction

Les résultats obtenus avec la première version de PREDISSAT et présentés dans le chapitre 2 montrent les limites de l'approche binaire qui ne tient compte que des satellites en visibilité optique ou LOS. En effet, il apparaît clairement dans les résultats expérimentaux que des satellites situés en dessous du masque optique peuvent être reçus par le récepteur.

Avec le développement des systèmes de communications par satellites de type LEO (Low Earth Orbit) et MEO (Medium Earth Orbit), un certain nombre d'études visant à caractériser la disponibilité du lien de communication ont été menées ces dernières années [Karasawa, 97], [Vogel, 90], [Barts, 92]. Les satellites sont des émetteurs/récepteurs mobiles. Les phénomènes de propagation qui sont connus dans les systèmes de télécommunications terrestres, mais la position du satellite par rapport au masque varie. Les modèles de canal de propagation développés dans ces études font appel à la notion d'état du satellite afin de quantifier le signal reçu par le mobile. Ces états permettent de calculer la probabilité avec laquelle le niveau du signal reçu est supérieur au seuil de réception du récepteur. Ces informations sont alors utilisées dans des algorithmes de diversité dans la sélection des satellites. Les modèles font généralement appel à :

- l'état A, lorsque le signal est reçu en visibilité directe (LOS : Line Of Sight),
- l'état B, lorsque le signal est reçu par multichemins (masquage partiel, réflexion et diffraction par des arbres et des obstacles ou NLOS : Non Line Of Sight),
- l'état C, en l'absence de signal lorsque des masques importants obstruent la visibilité et que le signal est bloqué.

Les modèles considérés donnent des distributions statistiques de la variation du niveau de signal reçu autour de la valeur moyenne selon le type d'environnement. Les plus connus sont les modèles classiques de Rayleigh appliqué à l'état NLOS et le modèle de Rice appliqué à l'état LOS [Saunders,99]. D'autres modèles font appel à une approche Markovienne et combinent l'utilisation de plusieurs distributions classiques pondérées par les probabilités d'obtenir un satellite dans chacun des états et de passer d'un état à l'autre. Pour la mise au point de l'outil PREDISSAT, nous avons utilisé une telle approche, faisant appel aux différents états des satellites. Les états A et C correspondent aux deux états pris en compte dans la première version de PREDISSAT présentée dans le deuxième chapitre. Les résultats obtenus ont montré les limites de cette approche binaire qui ne tient compte que des satellites en visibilité optique.

Dans ce troisième chapitre, nous nous intéressons aux satellites reçus par multichemins (état B) afin de déterminer un critère permettant leur identification parmi les satellites susceptibles d'être reçus et d'autoriser ainsi leur prise en compte avec PREDISSAT. Dans un premier temps, nous rappelons les différents phénomènes mis en jeu dans la propagation par multichemins. Puis, les signaux des satellites reçus en absence de trajet direct sont caractérisés à l'aide de simulations et de façon expérimentale. Ils sont classifiés selon les trois états A, B et C. Enfin, nous évaluons de façon simple l'impact de ces satellites reçus par trajets multiples sur la disponibilité et sur l'erreur de localisation. Ces trois étapes de caractérisation, classification et évaluation de l'erreur sont nécessaires afin d'implanter dans l'outil PREDISSAT la prise en compte des satellites reçus en NLOS.

## 2 Etude théorique

Une onde radioélectrique émise en un point se propage selon une infinité de rayons qui atteignent le récepteur après avoir subi un certain nombre de phénomènes tels que des réflexions, des diffractions et des diffusions sur des obstacles mobiles ou non comme illustré figure 3.1. Ces phénomènes modifient l'amplitude, la phase et la fréquence du signal.

Le récepteur GPS reçoit la contribution des signaux issus des satellites par trajet direct et celle des signaux ayant suivi des trajets différents. La localisation se fonde sur la mesure du temps de propagation de chacun des signaux suivant un principe de corrélation. Pour chaque satellite, le récepteur utilise ainsi le trajet prépondérant en amplitude, afin de calculer la distance parcourue depuis l'émetteur. En l'absence de trajet direct, les trajets multiples vont donc affecter directement le calcul.

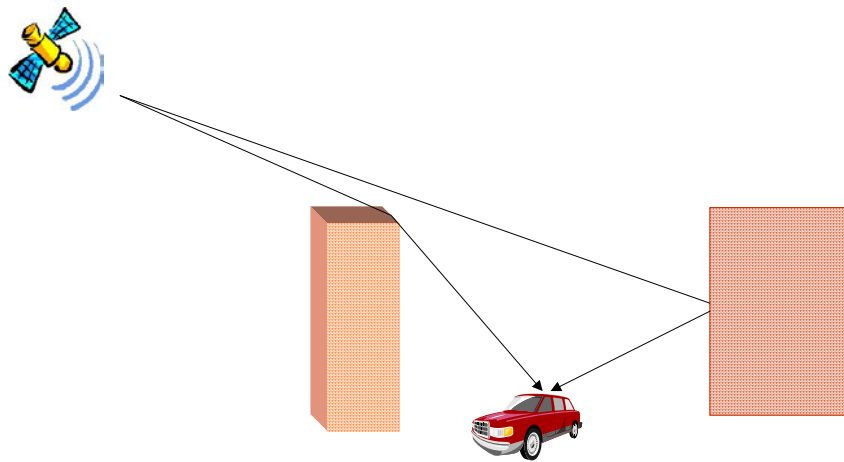


Figure 3.1. Trajets multiples.

Nous rappelons dans les paragraphes qui suivent les caractéristiques de ces phénomènes et leurs conséquences sur le signal.

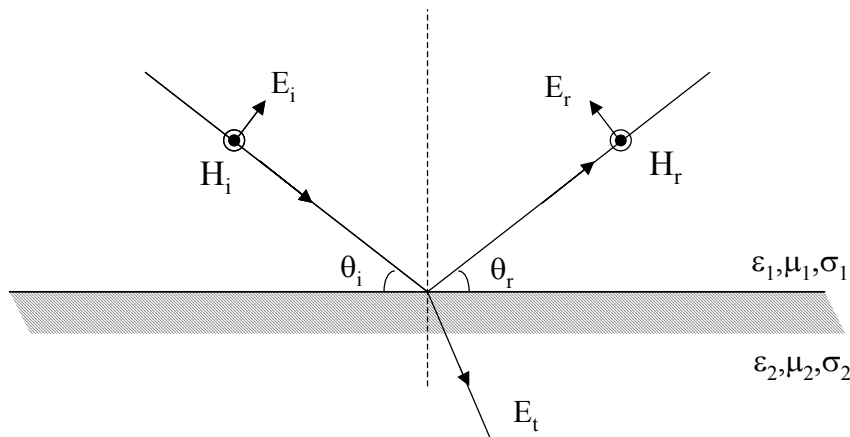
### 2.1 Réflexion d'une onde électromagnétique sur un plan

Le phénomène de réflexion apparaît lorsqu'une onde électromagnétique heurte un objet de dimensions très grandes devant la longueur d'onde. Si la surface peut être considérée comme plane, il s'agit d'une réflexion spéculaire. Selon les lois de Snell-Descartes, l'énergie est répartie entre l'onde réfléchie et l'onde transmise dans le second milieu. Quand la surface est un matériau parfaitement conducteur, la totalité de l'énergie de l'onde est réfléchie et le signal ne subit aucune perte. L'angle de réflexion est alors égal à l'angle d'incidence (figure 3.2). Si la surface présente un caractère rugueux, on parle de réflexion diffuse. L'énergie est alors rediffusée dans toutes les directions et les rayons diffusés ne sont pas reçus avec un niveau de signal suffisant par le récepteur. Nous ne considérerons donc ici que les réflexions spéculaires.

Lorsque l'obstacle est un conducteur parfait, la relation entre les champs électriques incident et réfléchi est exprimée par l'intermédiaire du coefficient de réflexion de Fresnel  $\Gamma$ . Ce coefficient est fonction des propriétés du matériau, de la polarisation de l'onde, de l'angle d'incidence et de la fréquence de l'onde propagée [Rappaport, 01]. Les milieux dans lesquels évolue l'onde sont caractérisés par leur permittivité  $\epsilon$ , leur perméabilité  $\mu$  et leur conductivité  $\sigma$ . Un milieu diélectrique est décrit par la relation complexe (3.1).

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - j\epsilon' \quad (3.1)$$

où  $\epsilon_0$  est une constante et vaut  $8,85 \times 10^{-12}$  F/m.  $\epsilon_r$  représente la permittivité relative du milieu. Si le diélectrique est parfait (sans pertes),  $\epsilon'$  est nulle et  $\epsilon$  est réelle.



Les indices i,r et t sont relatifs aux champs incident, réfléchi et transmis

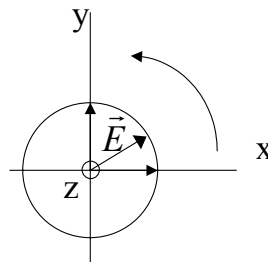
**Figure 3.2. Représentation géométrique d'une réflexion pour un champ électrique parallèle au plan d'incidence.**

Le champ électrique réfléchi  $E_r$  s'exprime en fonction du champ émis  $E_i$  et du coefficient de réflexion  $\Gamma$  selon la relation :  $E_r = \Gamma E_i$ . D'après les lois de Snell-Descartes, pour un conducteur parfait,  $\theta_r = \theta_i$ . Les coefficients de réflexion diffèrent selon que les composantes du champ électrique sont parallèles ou normales au plan réfléchissant. Lorsque l'onde se propage en espace libre,  $\Gamma$  s'écrit alors :

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{-\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad \text{si le champ E est dans le plan d'incidence} \quad (3.2)$$

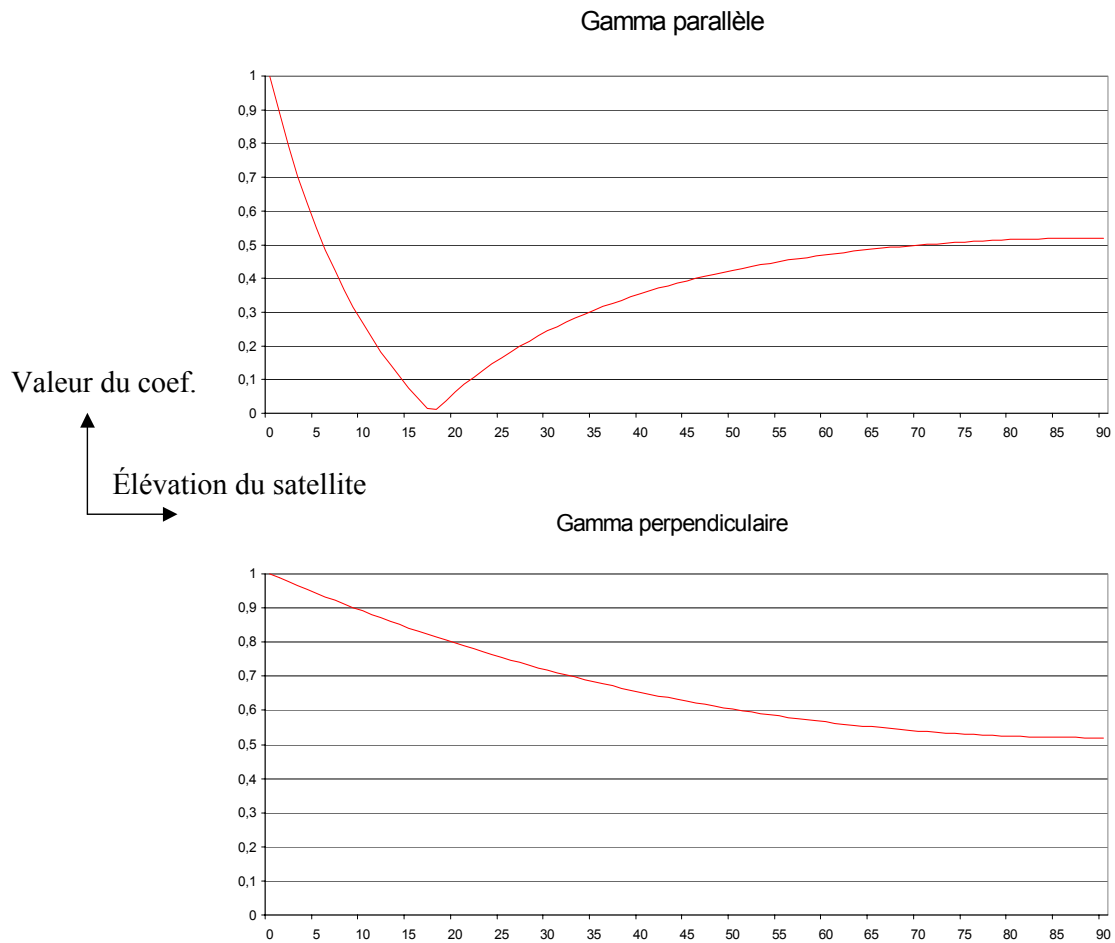
$$\text{Ou } \Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad \text{si le champ est normal au plan d'incidence.} \quad (3.3)$$

Dans le cas d'une onde polarisée circulairement, le champ électrique incident  $E_i$  est composé de deux ondes polarisées linéairement et déphasées de  $90^\circ$ . Dans le cas de la polarisation circulaire droite du signal GPS, le vecteur électrique  $E$  tourne en fonction du temps dans le sens trigonométrique. Il s'écrit comme la somme de deux composantes orthogonales  $E_{i\perp}$  et  $E_{i\parallel}$ . Le champ réfléchi peut alors se décomposer en somme de deux ondes réfléchies orthogonales et polarisées linéairement  $E_{r\parallel}$  et  $E_{r\perp}$ , exprimées en fonction de  $E_{i\perp}$  et  $E_{i\parallel}$  et de  $\Gamma_{\perp}$  et  $\Gamma_{\parallel}$ .



**Figure 3.3. Polarisation circulaire droite**

A partir des équations 3.2 et 3.3, l'évolution des coefficients de réflexion sur un mur de permittivité  $\epsilon_r = 10$  est représentée figure 3.4 en fonction de l'angle d'élévation du satellite émetteur.

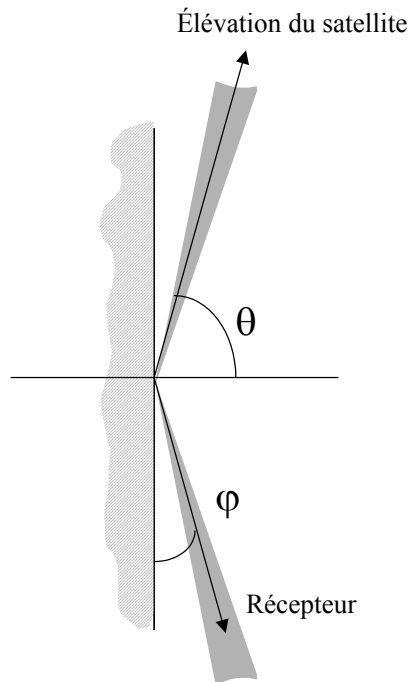


**Figure 3.4. Evolution du coefficient de réflexion en fonction de l'élévation du satellite.**

La valeur de l'angle pour laquelle il n'y a aucune réflexion est l'angle pour lequel le coefficient  $\Gamma_{\parallel}$  s'annule. Il est appelé angle de Brewster. Dans le cas de la propagation en espace libre, l'angle de Brewster est donné par la valeur de  $\theta_b$  tel que :

$$\sin \theta_b = \sqrt{\frac{\varepsilon_r - 1}{\sqrt{\varepsilon_r^2 - 1}}} \quad (3.4)$$

L'angle de Brewster n'existe que dans le cas d'une polarisation verticale (parallèle). Dans un environnement urbain caractérisé par des obstacles de permittivité relative comprise entre 5 et 15 F/m, l'angle de Brewster apparaîtra pour des élévations de satellites  $\theta$  comprises entre 70 et 75° et lorsque l'angle  $\varphi$  est compris entre 15 et 20° tel qu'illustré figure 3.5. Il faudra ainsi conjuguer cette élévation du satellite avec la présence d'un obstacle proche et élevé et une absence de trajet direct pour observer l'angle de Brewster. Compte tenu des caractéristiques orbitales de la constellation GPS (et du futur système Galiléo) et du caractère très particulier de la configuration, on considère que ces conditions ne seront que très rarement réunies.

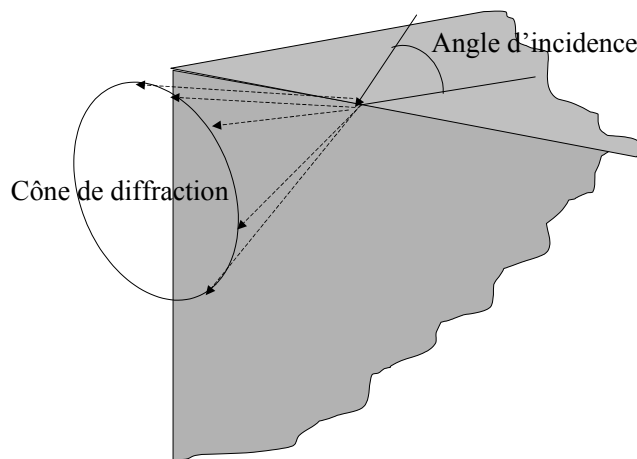


**Figure 3.5. Configuration particulière de l'angle de Brewster.**

Lorsque  $\theta < \theta_b$ , on montre que l'onde réfléchi subit un déphasage de  $180^\circ$ . L'onde circulaire étant composée des deux ondes parallèle et perpendiculaire, le sens de rotation de la polarisation change de sens [Barts, 92]. Dans le cas des expérimentations réalisés au cours de cette thèse, les satellites observés sont toujours reçus depuis une élévation inférieure à  $\theta_b$ . Les réflexions du signal provoquent donc une inversion de la circularité de la polarisation. Si un cas particulier de réflexion au-delà de l'incidence critique de Brewster survient, la circularité du signal après réflexion est détruite.

## **2.2 Diffraction d'une onde électromagnétique sur une arête**

Lorsque le rayon émis intercepte l'arête d'un obstacle, on parle de phénomène de diffraction. Les rayons diffractés se répartissent suivant un cône dont l'axe coïncide avec l'arête et dont le demi-angle au sommet est identique à celui fait par l'arête et le rayon incident (loi de diffraction de Keller). Si l'on considère une onde diffractée par un dièdre à bord droit (figure 3.6), l'énergie, après diffraction, est dispersée en une infinité de rayons le long du cône de diffraction. Du fait de cette dispersion, les rayons susceptibles d'atteindre le récepteur ne portent qu'une très faible partie de l'énergie émise.

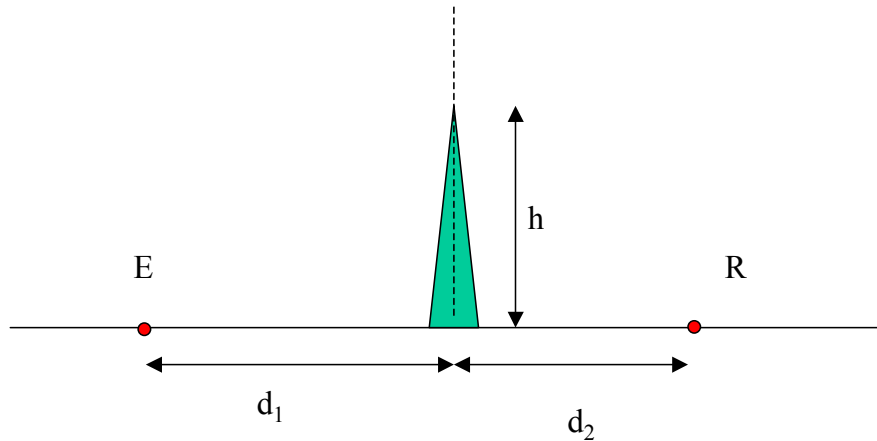


**Figure 3.6. Cône de diffraction.**



On trouve dans la littérature différents modèles visant à quantifier l'atténuation d'un signal diffracté sur une ou plusieurs arêtes. L'expression de la diffraction par un écran a été donnée par Millington. Cette solution a été utilisée pour mettre au point d'autres méthodes fondées sur les relations de la diffraction par un seul obstacle : modèles de Bullington, Epstein et Peterson, Deygout et le modèle de Picquenard [Lee, 82]. La particularité de ces méthodes réside dans la modélisation des obstacles diffractant successivement l'onde émise.

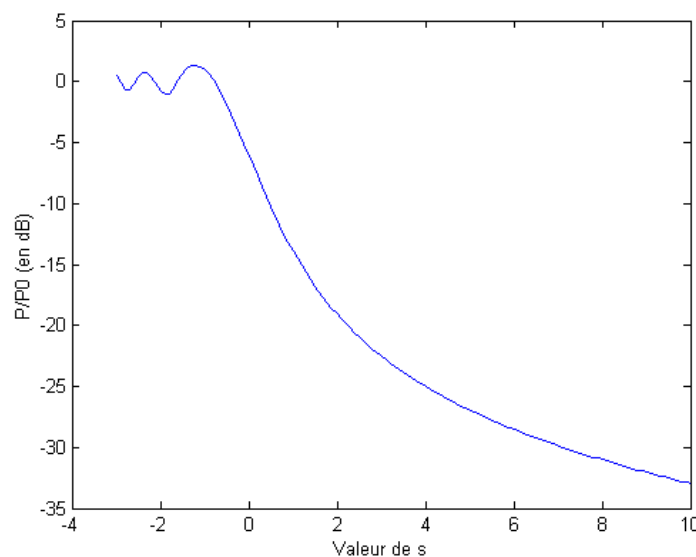
Lorsque les méthodes simplifiées ne suffisent pas, on peut avoir recours à la résolution numérique des équations intégrales [Parsons, 01]. On considère la géométrie définie par la figure 3.7. L'onde est émise depuis E. La perte en puissance par rapport à  $P_0$  (puissance reçue au point R sans obstacle) s'écrit selon (3.5).



**Figure 3.7. Géométrie de la scène.**

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{2} - \int_0^s \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \right)^2 + \left( \frac{1}{2} - \int_0^s \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

où  $s$ , connu sous le nom de paramètre de diffraction de Kirchhoff-Fresnel, est fonction des distances  $d_1$ ,  $d_2$ , de la hauteur de l'obstacle  $h$  et de la longueur d'onde  $\lambda$  :  $s = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}}$ . Cette expression est tracée sur la figure 3.8.



**Figure 3.8. Evolution du champ reçu en fonction de  $s$ .**

Dans le cas d'une émission depuis un satellite, on considère que l'on a  $d_1 \gg d_2$ . La figure 3.9 présente l'allure de la courbe dans cette hypothèse, pour une distance  $d_2$  variant de 1 m à 100 m. Le coefficient  $s$  est toujours grand devant 1, ce qui correspond, comme indiqué sur la figure 3.8, à une valeur  $P/P_0$  très faible et donc une atténuation du signal importante par rapport au trajet direct.

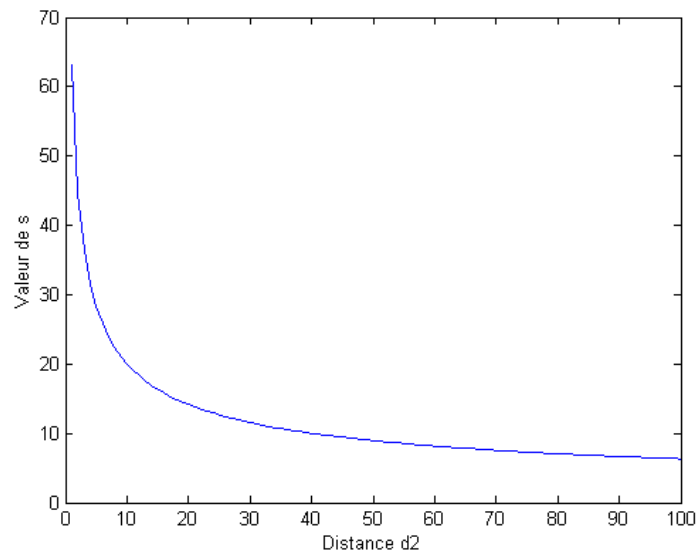


Figure 3.9. Evolution de  $s$  en fonction de  $d_2$ .

### 2.3 Impact théorique d'une réflexion sur la position

Le retard induit par les phénomènes de propagation dépend de la géométrie des obstacles et en particulier des obstacles proches. Dans un canyon urbain, une erreur due à une réflexion sur la pseudo-distance sera de l'ordre de 10 à 15 m. Pour exemple, nous évaluons l'impact du pire cas, (soit 15 m) sur un calcul de position à partir de 4 satellites. Soit les satellites 9, 18, 23 et 26 disposés autour de l'antenne tel qu'illustré figure 3.10.

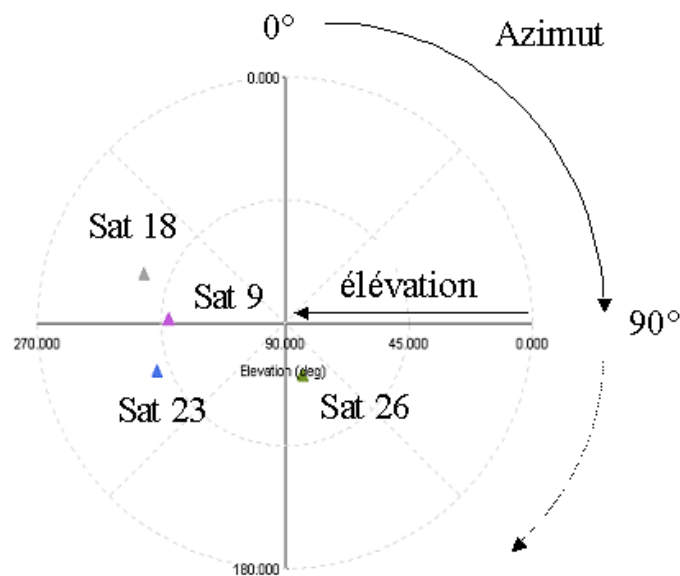


Figure 3.10. Répartition des satellites autour de l'antenne.

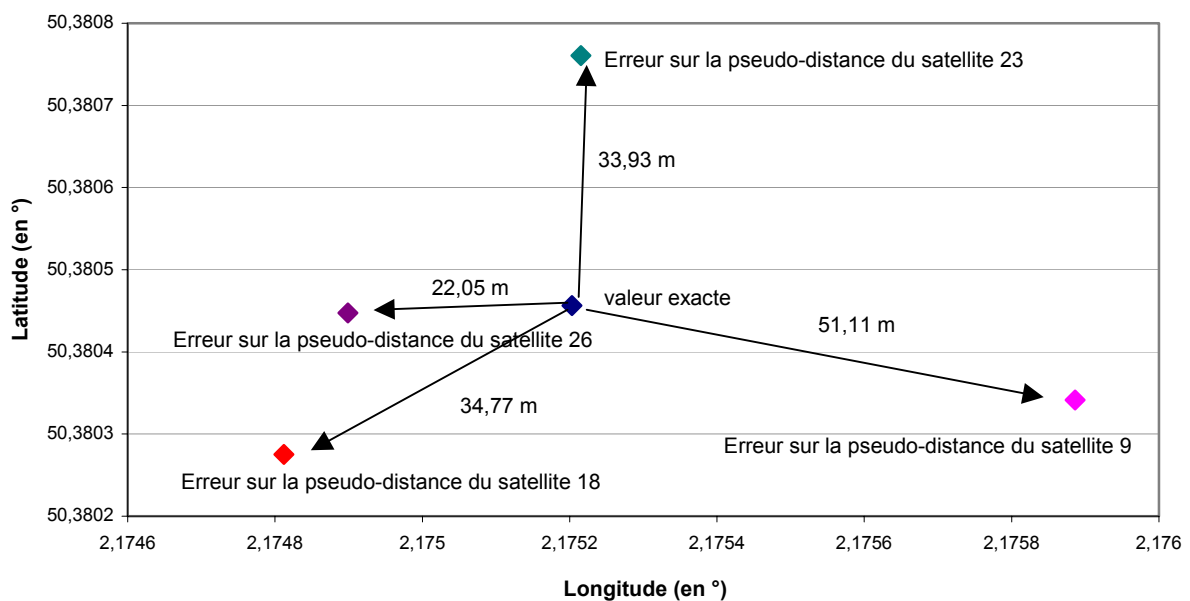
Nous résolvons le système constitué des quatre équations contenant les informations de position des satellites en coordonnées ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed), à partir des valeurs exactes des pseudo-distances puis en ajoutant 15 m à chacune des pseudo-distances l'une après l'autre. Les simulations montrent une erreur sur la position du mobile variant de 22 à 51 m selon le satellite affecté. Les positions sont représentées sur un même graphe (figure 3.11).

La conversion des erreurs de latitude et longitude en distance est réalisée d'après les équations (3.6) et (3.7). Soit le rayon méridien de la terre  $R_{\text{meridien}} = 20\,043$  km et le rayon de la terre  $R = 6380$  km. A une latitude  $Lat$  donnée, le rayon de la terre devient :

$$R_{Lat} = 2\pi R \cos(Lat) \quad (3.6)$$

On en déduit les approximations suivantes :

$$\begin{aligned} 1^\circ \text{ de longitude} &= R_{lat} / 360 \\ 1^\circ \text{ de latitude} &= R_{\text{meridien}} / 180 \end{aligned} \quad (3.7)$$



**Figure 3.11. Représentation des positions calculées avec les erreurs sur une des pseudo-distances.**

### 3 Contribution respective de la réflexion et de la diffraction

Afin d'évaluer les contributions de chacun des phénomènes de propagation (réflexion et diffraction), nous avons, dans un premier temps, utilisé plusieurs outils de simulation dans la configuration du canyon urbain afin de mettre au point des expérimentations spécifiques pour valider les résultats de simulation.

#### 3.1 Contribution du rayon diffracté

##### 3.1.1 Etude théorique

Nous nous plaçons dans la configuration de canyon urbain de la figure 3.12. Nous avons utilisé des logiciels développés au laboratoire TELICE de l'USTL dans le cadre de la thèse de J. Vandamme et fondés sur les lois de l'Optique Géométrique.

Le champ  $E$  reçu par le récepteur résulte de la somme des différentes contributions, soit :

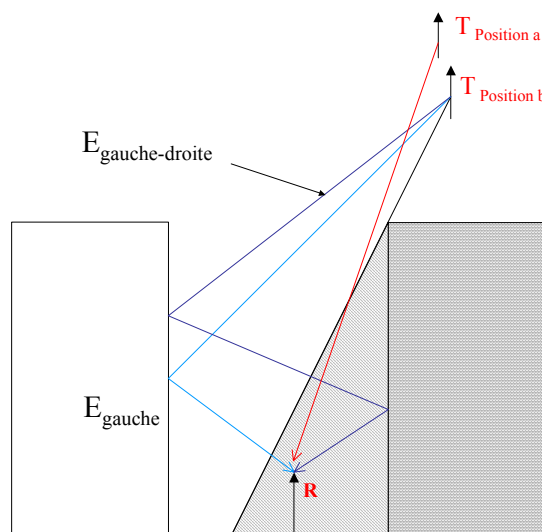
$$E_{reçu} = E_{direct} + E_{réfléchi} + E_{diffracté} \quad (3.8)$$

Le canal de transmission est une rue. Une impulsion est émise depuis une antenne, de type dipôle électrique vertical, placée au point T sur le toit du bâtiment en visibilité directe (position a) puis en zone d'ombre (position b sur la figure 3.12). Les amplitudes des différentes impulsions reçues sont représentées à l'instant où elles atteignent le récepteur sur les courbes de la figure 3.13. On constate que l'amplitude du rayon direct, issu d'un satellite d'élévation  $35^\circ$ , est atténuée conformément aux valeurs données par les courbes de la figure 3.4 ( $\Gamma_{//} = 0,45$ ) lorsqu'elle est réfléchiée une fois ( $E_{r1}$ ) puis deux ( $E_{r2}$ ) :

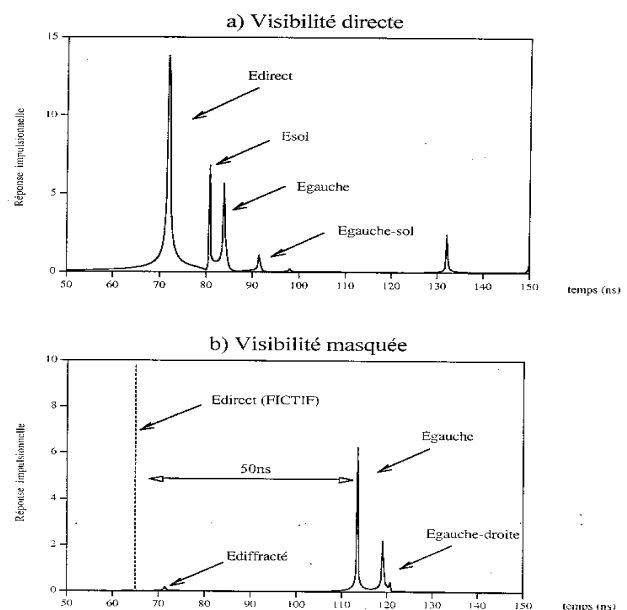
$$E_{r1} \sim 0,45 E_i \text{ et } E_{r2} \sim 0,45^2 E_i = 0,2 E_i.$$

Ces courbes mettent en évidence les phénomènes d'atténuation et de retard causés par les trajets multiples. Lorsque le satellite est particulièrement haut, le trajet direct est reçu le premier, avec l'amplitude la plus forte. Les rayons réfléchis et diffractés suivent un trajet plus long. Ils arrivent décalés dans le temps et très atténués.

Le principe de corrélation utilisé par le récepteur exploite le signal de niveau le plus fort. En présence d'un trajet direct d'amplitude forte et de trajets multiples retardés et atténués, le trajet direct est traité. Si ce trajet n'est pas disponible, c'est l'amplitude du trajet prépondérant qui sert au calcul de pseudo-distance. Les trajets multiples vont donc affecter directement ce calcul en absence de trajet direct.



**Figure 3.12. Evolution de la position des satellites par rapport à la rue.**

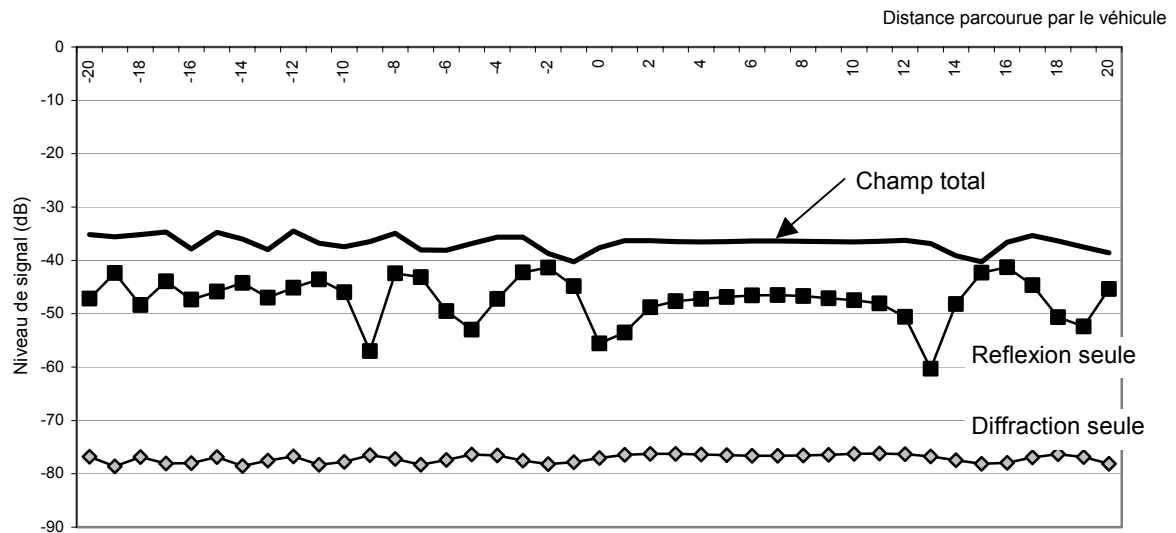


**Figure 3.13. Exemple de réponses impulsionnelles en LOS et NLOS dans un canyon urbain (Source : [Vandamme, 96]).**

Toujours avec le même logiciel, nous considérons les contributions d'une réflexion et de la diffraction depuis un émetteur fixe lorsque le véhicule se déplace. La courbe 3.14 présente le niveau de signal reçu le long de cette trajectoire. Cette simulation montre que la contribution de la diffraction est très faible devant celle de la réflexion.

Nous avons ensuite réalisé différentes simulations de la réception du signal satellite depuis le canyon urbain en fonction de l'angle d'élévation du satellite par rapport au récepteur. Deux types de logiciels ont été utilisés. L'un utilise les modèles de diffraction de Fresnel et l'approche de Deygout, l'autre est un logiciel de tracé de rayons (SimuOG) et utilise la théorie des images. Les comparaisons des différents résultats [Marais, 01] ont montré que le phénomène de diffraction devient prépondérant lorsque l'élévation des satellites est très faible et que les rayons reçus par réflexion n'atteignent le

récepteur qu'après plus de deux réflexions. Dans cette configuration, les élévations des satellites reçus et leurs niveaux de signal sont très faibles et ces satellites ne sont pas pris en compte pour la localisation. Au regard de ces résultats, le phénomène de diffraction ne sera plus pris en considération dans la suite de nos travaux.

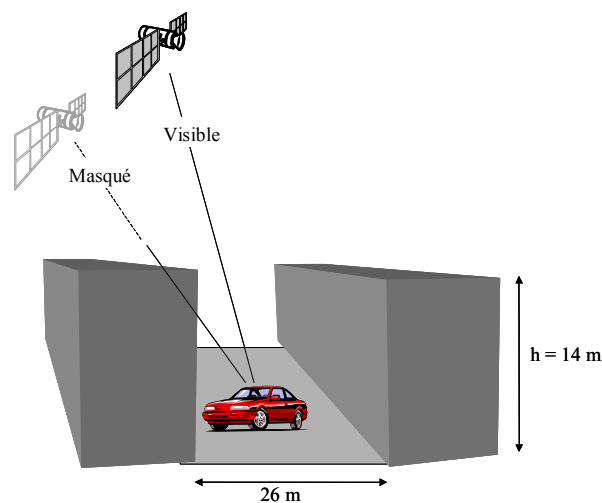


**Figure 3.14. Contributions respectives du champ réfléchi et du champ diffracté dans un canyon urbain.**

### 3.1.2 Etude expérimentale

#### 3.1.2.1 Présence de satellites reçus en NLOS

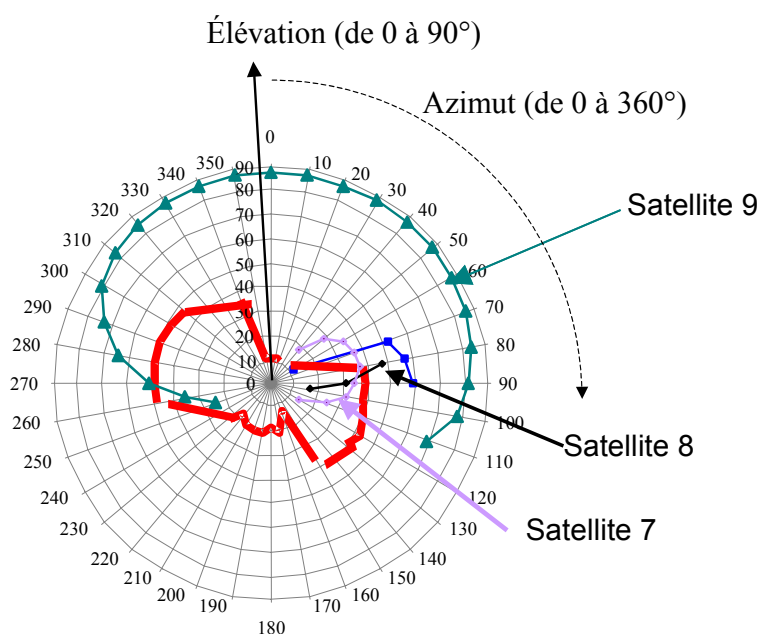
Pour mettre en évidence expérimentalement la réception de signaux par trajets multiples, nous avons réalisé des campagnes de mesures en environnement connu. Une antenne et un récepteur GPS (Trimble, 8 canaux) ont été placés sur le toit d'une voiture à l'arrêt dans un canyon urbain, comme représenté sur la figure 3.15.



**Figure 3.15. Configuration expérimentale.**

Les données GPS sont enregistrées sur un PC pendant plusieurs heures. Elles contiennent l'identité du satellite (son code PRN) et le niveau de réception du signal.

La figure 3.16 compare la position des satellites au fil du temps et l'élévation du masque autour de l'antenne. La courbe en gras représente l'angle d'élévation du masque calculé ou horizon optique. Les évolutions des positions de quatre satellites reçus par le récepteur sont tracées sur ce même graphe avec des symboles différents.



**Figure 3.16. Position des satellites par rapport au masque (résultats de mesures).**

Ces mesures montrent que les satellites reçus au cours du temps se situent de part et d'autre de la ligne d'horizon optique. Un parallèle avec les niveaux de signal de ces satellites montre que les niveaux élevés des signaux reçus sont attribués aux satellites situés au-dessus de la ligne d'horizon optique. A titre d'exemple, l'élévation du satellite 9 est comprise entre 70 et 90°, c'est à dire que le satellite se situe au-dessus du masque, pendant presque toute la mesure et le niveau de signal reçu est élevé. La réception des satellites au-dessous du masque optique par des phénomènes de propagation tels que le multitrajets atténue le niveau de signal. Le niveau de signal en NLOS est beaucoup plus faible mais reste suffisant pour être exploité par le récepteur.

Les niveaux de signal de deux satellites, numéros 8 et 7, sont représentés respectivement figures 3.17 et 3.18. Ces niveaux, issus des mesures, sont reportés en AMU (Amplitude Measurement Unit) qui est une unité du fabricant Trimble. Cette unité est liée au dBHz, utilisé sur certaines courbes de ce mémoire, par l'équation (3.9). Les AMUs sont normalisés par le récepteur de façon à obtenir un niveau compris entre 0 et 25 AMU (soit 24 à 52 dBHz).

$$SNR(dBHz) = 20 \log_{10} AMU + 24 \quad (3.9)$$

Les courbes font apparaître que le niveau de signal décroît lorsque son élévation devient inférieure à celle du masque ou encore lorsque le satellite change d'azimut et disparaît derrière un obstacle. Les courbes des figures 3.17 et 3.18 montrent que des satellites dont l'élévation est inférieure à l'élévation du masque sont cependant reçus par le récepteur.

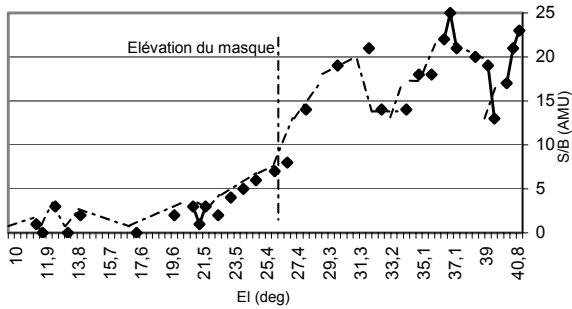


Figure 3.17. Niveau de signal reçu pour un satellite en fonction de son élévation.

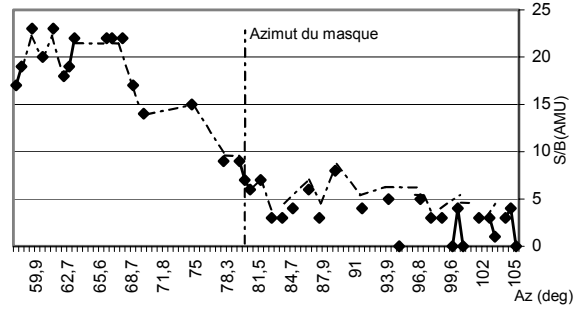


Figure 3.18. Niveau de signal reçu pour un satellite en fonction de son azimut.

### 3.1.2.2 Définition d'une zone de réception en NLOS

Dans la configuration canyon urbain, deux immeubles parallèles se font face. Par une approche géométrique simple, nous calculons une nouvelle frontière dans la zone NLOS qui représente l'élévation minimale d'un satellite depuis laquelle le signal sera reçu après une réflexion. Le calcul consiste à déterminer le lieu des points de la première réflexion en fonction de l'élévation du satellite selon le schéma figure 3.19. Il est réalisé à partir des relations géométriques détaillées dans l'annexe 1. Cette frontière est représentée schématiquement sur la photo 3.20 ainsi que sur la figure 3.21 par la ligne continue fine notée C1. La courbe en gras correspond à la ligne d'horizon optique définie précédemment, matérialisée par le haut d'un immeuble et notée C2. Les autres courbes traduisent chacune la variation de la position d'un satellite expérimentalement reçu au cours du temps.

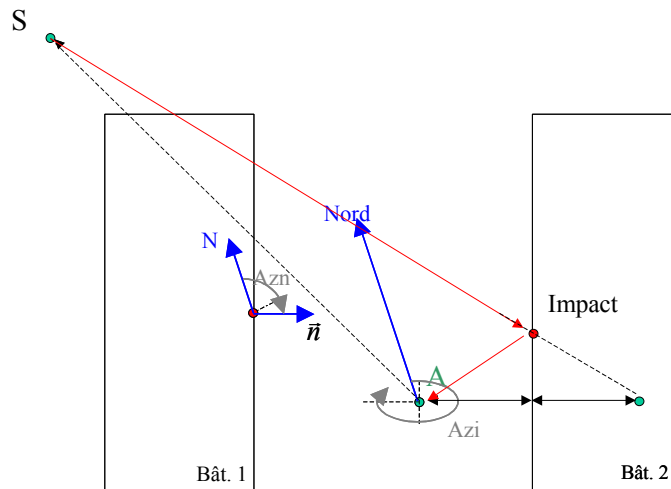


Figure 3.19. Point d'impact de la réflexion sur un bâtiment.

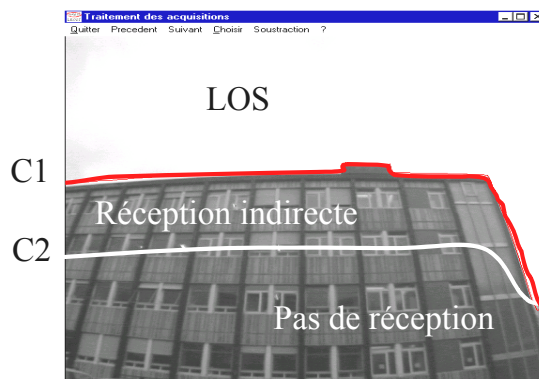


Figure 3.20. Zone de réception en NLOS.

La figure 3.21 montre que les satellites a, b et c de la figure sont reçus dans la zone entre les deux courbes C1 et C2. Cette zone est large par rapport à une possible incertitude de mesure de l'horizon optique. Par conséquent, on considère que cette zone est une zone de réception masquée mais non bloquée et que les satellites dont l'élévation se situe dans cette zone sont donc reçus par trajets multiples, ce qui correspond à l'état B des modèles de propagation tel que défini dans l'introduction de ce chapitre.

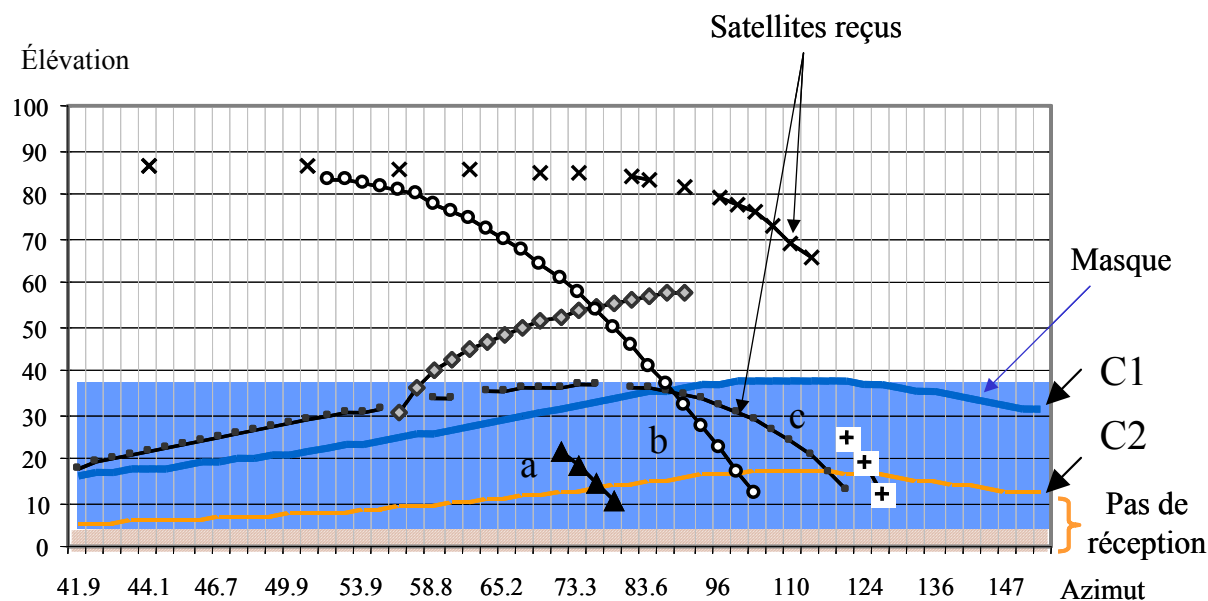


Figure 3.21. Schématisation de la zone correspondant à l'état « masqué ».

Nous avons montré que le signal issu d'un satellite peut être reçu alors qu'il est en NLOS. Il convient donc d'évaluer les contributions respectives de la réflexion et de la diffraction.

Nous allons maintenant caractériser plus finement les signaux reçus après une réflexion.

## 3.2 Atténuation après une réflexion

### 3.2.1 Simulation et théorie : l'atténuation dans un canyon urbain

D'après les conclusions du paragraphe 3.1, lorsque le satellite est reçu par trajet multiple, nous ne considérons plus que les trajets réfléchis. Chaque réflexion du signal provoque une atténuation supplémentaire. Sachant que le critère de prise en compte d'un satellite par le récepteur est fondé sur le niveau de signal reçu, nous cherchons à déterminer le nombre maximal de réflexions permettant au signal d'être encore reçu avec un niveau supérieur au seuil de sensibilité du récepteur.

Une étude théorique a été réalisée dans la configuration de canyon urbain (entre les bâtiments P4 et P5 de l'USTL) utilisé dans tous nos essais. Une source émettrice à 1.5 GHz est placée sur le toit de l'un des immeubles, en retrait afin de n'autoriser qu'une puis deux réflexions. Cette source est équivalente à un satellite d'élévation inférieure à  $45^\circ$ , non visible optiquement (soit  $\theta_i < 45^\circ$ ). D'après les courbes de la figure 3.4, le coefficient de réflexion  $\Gamma_{\parallel}$  est alors compris entre 0,4 et 0,5 et  $\Gamma_{\perp}$  entre 0,5 et 0,6 si le champ est normal au plan d'incidence. L'atténuation après une réflexion sera de l'ordre de 4 à 5 dB et de l'ordre de 8 à 10 dB après deux réflexions.

Compte tenu de la sensibilité des récepteurs GPS, nous faisons l'hypothèse que seuls les signaux ayant subi une seule réflexion peuvent encore être reçus et exploités. Nous allons la vérifier de façon expérimentale.



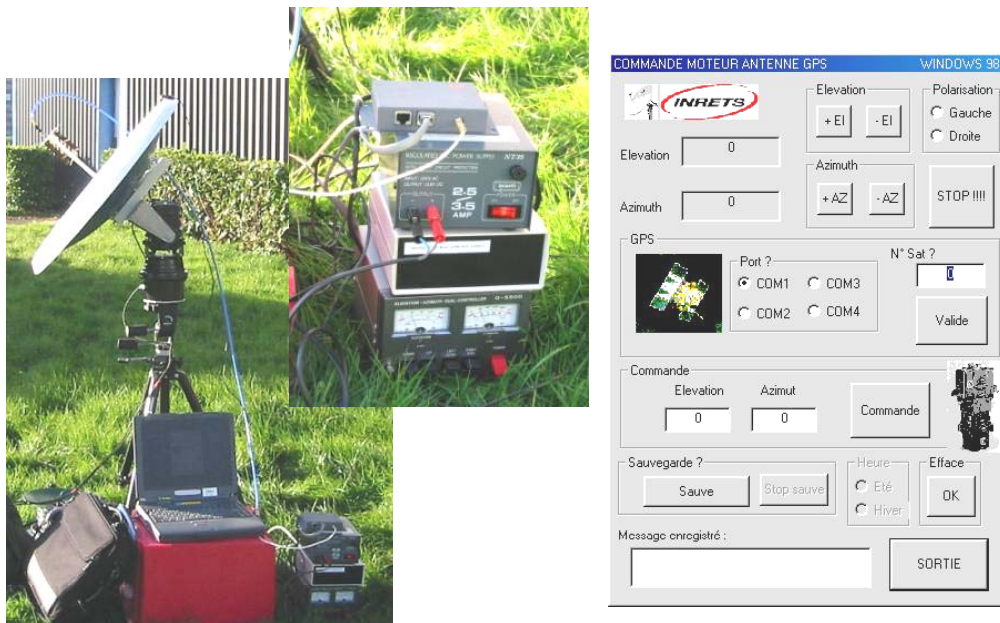
### 3.2.2 Description de la mesure

Afin de déterminer expérimentalement le nombre maximal de réflexions permettant au signal d'être encore reçu avec un niveau supérieur au seuil de sensibilité du récepteur, nous mesurons l'atténuation introduite par chaque réflexion du signal satellite sur des bâtiments. Connaissant la position des satellites au dessus du lieu d'expérimentation, une antenne très directive (ouverture : 21,2 et 23,8° pour les polarisations circulaires gauche et droite, gain : 18 dB, photo 3.22) permet d'isoler le signal issu d'un satellite, de mesurer le niveau de signal reçu après chaque réflexion et de déterminer ainsi le nombre maximal de réflexions. La direction dans laquelle est placée l'antenne est préalablement calculée en tenant compte des caractéristiques géométriques du site de mesure et de l'heure de la mesure.



Photos 3.22. Antenne directive à polarisation circulaire.

La polarisation de l'hélice utilisée est fonction du nombre de réflexions considérées puisque chacune des réflexions inverse le sens de la polarisation du signal. L'antenne est connectée à un ordinateur portable via le récepteur GPS. Elle est pilotée par un moteur pas à pas. L'antenne et l'interface I2C de commande ont été réalisées et testées au laboratoire (photo 3.23). Le pilotage du moteur est jumelé à la sauvegarde de différentes données issues des trames GPS, géré par un logiciel développé en C++ et décrit dans l'annexe 3.

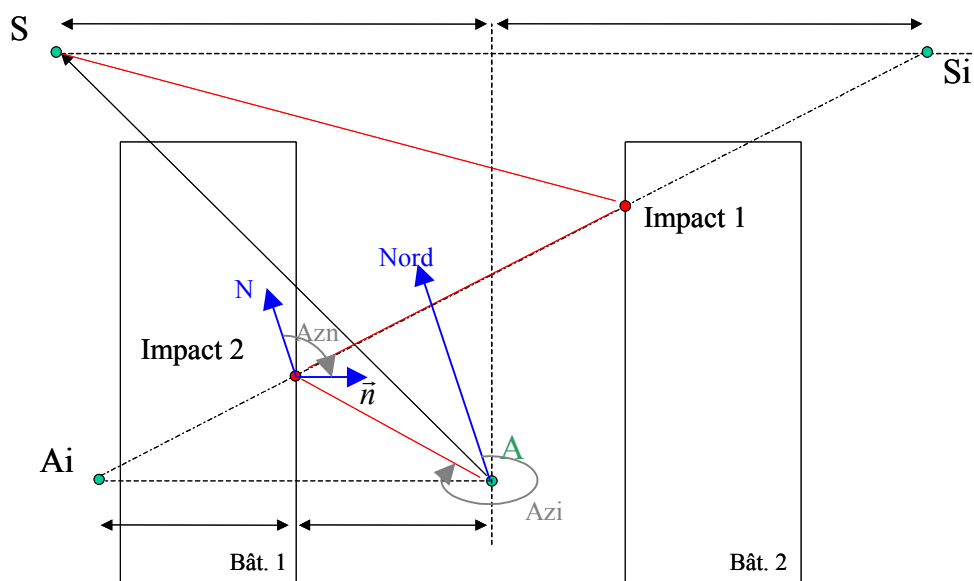


Équipement expérimental

Interface de communication  
PC/moteur et GPS

Photo 3.23. Equipement expérimental.

Afin de mesurer les niveaux de signal après une puis deux réflexions, nous calculons le lieu des points d'impact I1 et I2 correspondant à une, puis deux réflexions. Le schéma figure 3.24 sert de base aux calculs dont le détail est donné en annexe 1.



**Figure 3.24. Configuration du canyon urbain (vue de dessus).**

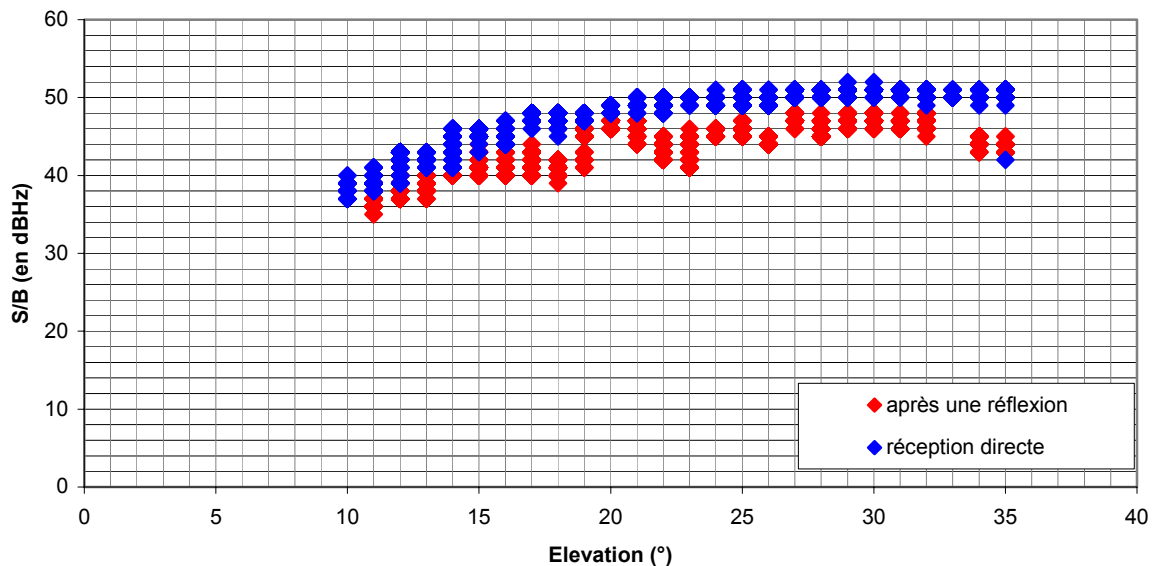
La parabole permet d'isoler la réception d'un trajet réfléchi d'un trajet direct issu du même satellite. Le même satellite est observé plusieurs jours de suite aux mêmes heures afin qu'il soit toujours aux mêmes positions dans le ciel. La période d'observation est choisie afin qu'une réflexion sur la paroi soit possible. Sur le lieu d'expérimentation, le satellite numéro 4 est reçu par réflexion de 16h à 17h15 les 30 et 31 juillet et le 1er août 2001. L'élévation du satellite varie de  $45^\circ$  à  $10^\circ$ . Le lieu des points d'impact du rayon satellite est représenté figure 3.25.



**Image 3.25. Représentation « approximative » de l'évolution de la position du point d'impact.**

### 3.2.3 Présentation des résultats

L'évolution du rapport S/B pour le satellite 4 reçu le mardi 31/07/01 en réception directe est donnée figure 3.26. Ce rapport décroît pour les élévations basses. La réception devient difficile en dessous de 15°. Il est possible que les arbres situés aux alentours masquent en partie la réception. Nous adaptons la polarisation de l'antenne en fonction du signal suivi. Figure 3.26, nous comparons les rapports S/B entre les signaux reçus en réception directe (polarisation gauche) ou après une réflexion (polarisation droite). On remarque que l'atténuation provoquée par la réflexion varie de 4 à 6 dBHz.



**Figure 3.26. Comparaison des rapports signal sur bruit en fonction de l'élévation du satellite.**

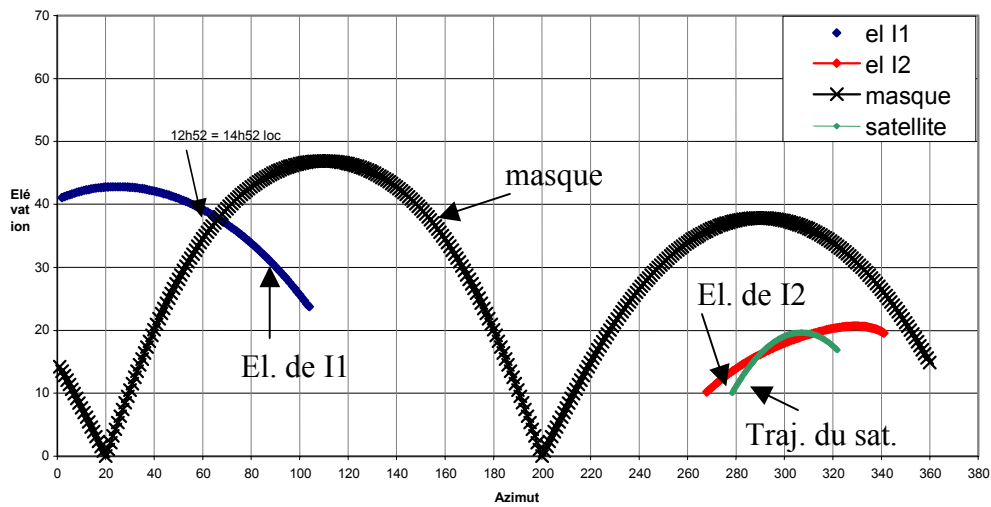
L'analyse des résultats montre que la moitié des mesures après une réflexion sont quantifiées d'un rapport S/B supérieur à 43 dBHz alors que, par trajet direct, le rapport S/B dépasse 48 dBHz. Ces essais ont été reproduits. Dans tous les cas, l'écart moyen entre le rapport signal sur bruit d'un satellite reçu directement et celui d'un satellite reçu après une réflexion est inférieur à quelques dBHz, ce qui n'est pas suffisamment important pour empêcher l'utilisation du signal réfléchi.

Nous analysons maintenant la possibilité de recevoir un signal après qu'il ait subi deux réflexions successives. D'après le paragraphe 3.1 de ce chapitre, l'amplitude du signal émis est divisée par cinq après deux réflexions. Nous cherchons expérimentalement à montrer que cette atténuation est trop importante pour que le récepteur utilise ce signal.

## 3.3 Atténuation après deux réflexions

### 3.3.1 Configuration

On observe les réflexions dans un plan vertical à la scène. D'après la configuration de la figure 3.24, on calcule le lieu des points d'impact lorsque le satellite se déplace. La figure 3.28 représente la trajectoire du satellite, d'élévation comprise entre 10 et 20°, d'une part et les positions des points d'impact sur les façades des bâtiments d'autre part. Lorsque les positions des points d'impact E1 et E2 sont sous l'élévation maximale du masque, le satellite est reçu dans le canyon après deux réflexions. Cependant, les calculs et les simulations effectués à partir de plusieurs configurations réelles ont montré que les périodes pendant lesquelles un satellite est reçu après deux réflexions et sans contribution d'autres rayons sont très courtes et représentent des circonstances peu fréquentes.

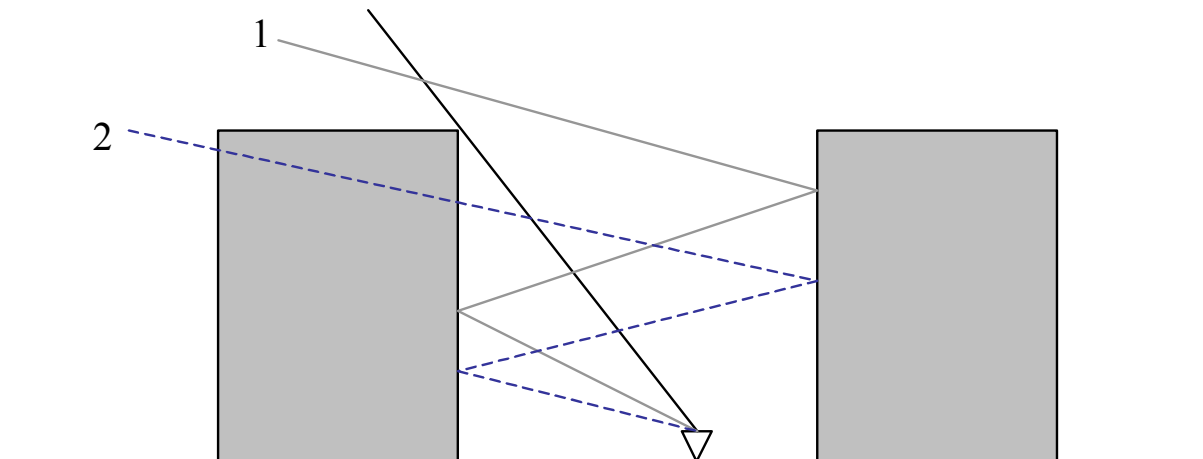


**Figure 3.27. Elévation des points d'impact « virtuels » du satellite sur les bâtiments par rapport au masque (en noir) dans un cas exploitable.**

Les essais sont réalisés dans le canyon urbain considéré précédemment, toujours avec l'antenne parabolique. Un satellite a été sélectionné en fonction de sa position afin qu'un rayon issu de ce satellite atteigne le récepteur après deux réflexions. Le satellite doit donc être choisi :

- dans une zone perpendiculaire aux bâtiments et
- à une élévation suffisamment basse pour que le signal se réfléchisse sur les façades des deux bâtiments.

Sur le schéma de la figure 3.28, on observe cependant qu'en dessous d'une élévation limite du satellite, la réception est interrompue complètement. Le satellite 1 est reçu après deux réflexions alors que la visibilité du satellite 2 est complètement bloquée par le bâtiment bien que son élévation ne soit pas beaucoup plus faible.



**Figure 3.28. Dans une configuration de canyon urbain, exemples de rayons reçus après deux réflexions.**

Nous essayons de mesurer expérimentalement la réception de l'un de ces signaux.

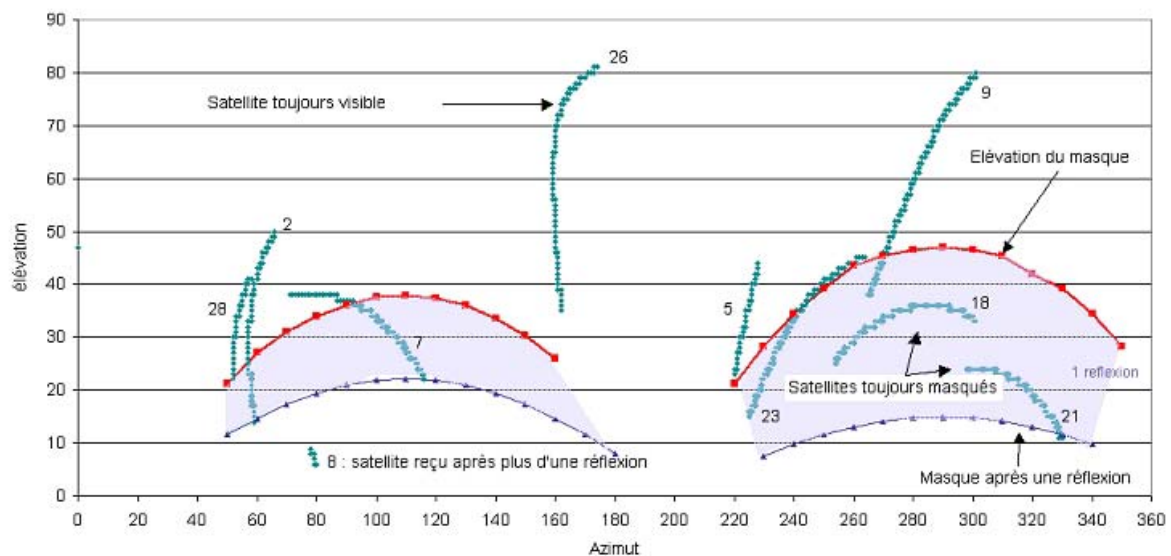
### 3.3.2 Essais avec l'antenne parabolique

Afin d'évaluer le signal reçu après deux réflexions, nous utilisons, dans le canyon des essais, la parabole et l'hélice circulaire à polarisation gauche (la polarisation des signaux GPS émis est circulaire droite. Elle est réfléchi deux fois par les bâtiments puis par la parabole). Le satellite PRN 17 a été suivi sans succès. Il n'est pas reçu. Nous avons renouvelé les essais avec d'autres satellites sans succès.

Deux hypothèses sont envisagées : l'échec du suivi de ce satellite peut être lié à un manque de précision de l'orientation de l'antenne ou à un niveau de signal trop faible à la réception. Nous renouvelons la mesure avec l'antenne omnidirectionnelle afin d'éliminer la première hypothèse.

### 3.3.3 Essais avec l'antenne omnidirectionnelle

Dans le même environnement, les positions de tous les satellites sont enregistrées. Elles sont représentées sur les courbes de la figure 3.29, ainsi que l'élévation du masque optique et l'élévation minimale pour une réception après une réflexion. Le masque est calculé comme expliqué en annexe 1. Sur la figure 3.29, on observe que les satellites utilisés sont tous situés au-dessus de la frontière « une réflexion ». Seul le satellite 8 est positionné dessous. Le trajet entre le récepteur et ce satellite est donc affecté par au moins deux réflexions. La lecture des rapports S/B correspondant à ce satellite et fournis par le récepteur traduit une non-utilisation de celui-ci. Le niveau de signal est trop faible et, par défaut, vaut 0.



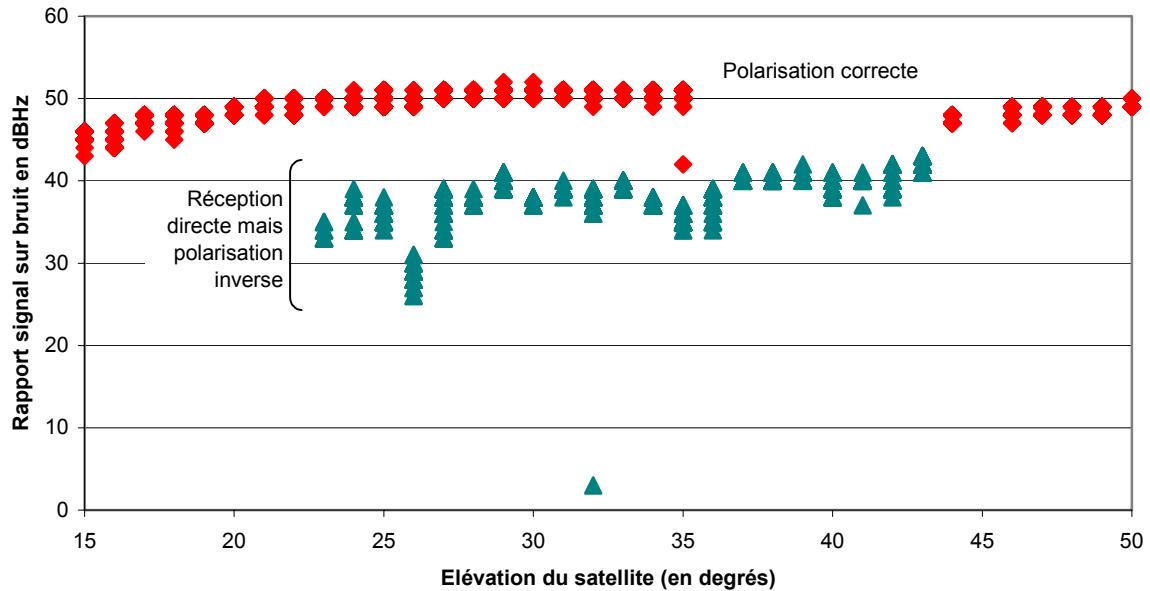
**Figure 3.29. Positions des satellites pendant les mesures.**

Les essais dans ce canyon ne nous ont jamais permis de mesurer des signaux reçus après plus d'une réflexion. Dans la suite de nos travaux, nous nous limitons à la prise en compte d'une seule réflexion. L'hypothèse que l'énergie du signal n'est pas suffisante pour être utilisée par le récepteur après deux réflexions n'est pas strictement validée. Nous verrons dans la suite de mémoire que les résultats obtenus n'ont pas contredit cette hypothèse.

### 3.3.4 Effet de la polarisation de l'antenne

L'antenne patch omnidirectionnelle, à polarisation circulaire droite, est conçue pour recevoir essentiellement les signaux reçus en visibilité directe. En conséquence, un signal reçu après une réflexion est fortement atténué. Un exemple de l'effet de la dépolarisation en réception est donné

figure 3.30. Le niveau de signal d'un satellite en visibilité optique est mesuré avec l'antenne parabolique en polarisation inverse. Le rapport signal sur bruit reçu est alors compris entre 25 et 44 dBHz. Avec l'antenne patch, le rapport signal sur bruit d'un signal réfléchi est donc compris entre 24 dBHz et 41 dBHz, qui correspondent aux valeurs présentées ci-dessus moins les 4-5 dB d'atténuation dus à la réflexion.

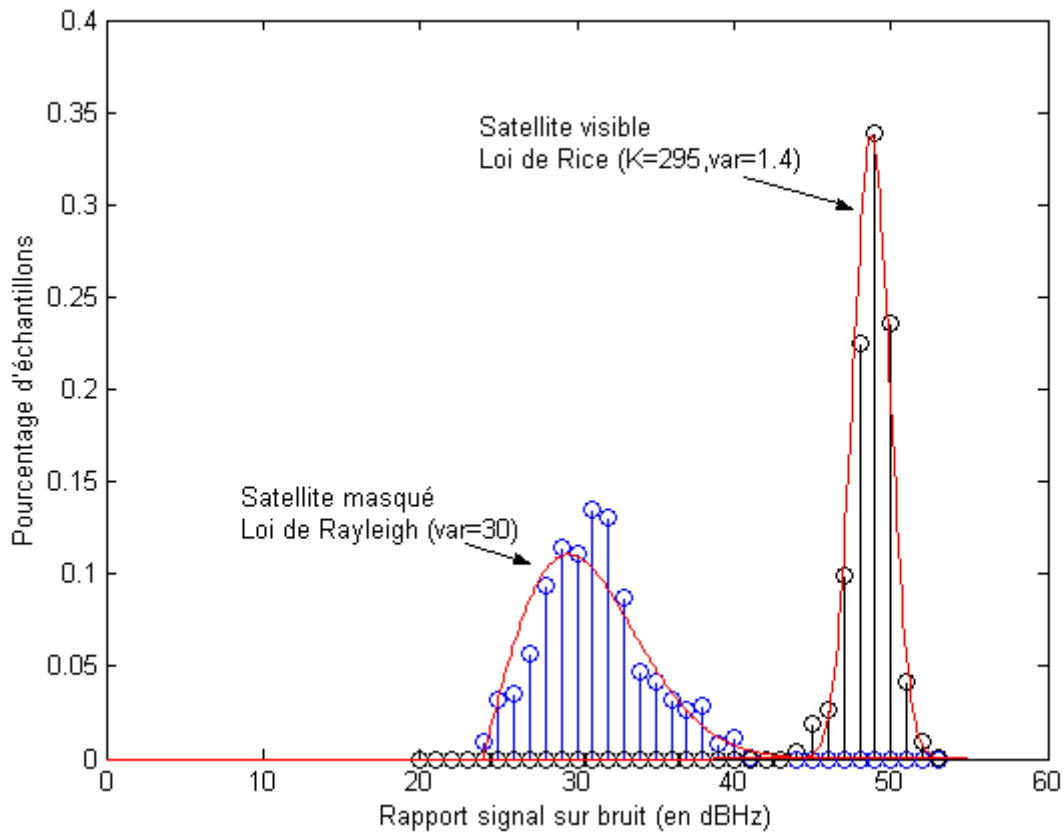


**Figure 3.30. Effet de la polarisation inverse sur le rapport signal sur bruit reçu.**

### 3.3.5 Application aux mesures avec l'antenne patch

Une classification des rapports S/B des signaux issus de satellites toujours masqués ou toujours visibles permet de comparer et d'isoler les « classes » de valeurs relatives à chacun de ses états LOS et NLOS. La figure 3.31 donne la distribution des rapports S/B de deux satellites de positions connues. D'après la connaissance de l'environnement de l'antenne, nous savons que l'un des satellites est masqué et que l'autre est en visibilité directe pendant toute la mesure. Conformément aux valeurs annoncées ci-dessus, les deux classes sont toujours bien distinctes.

Les courbes obtenues ressemblent aux distributions classiques utilisées en télécommunications et peuvent être approximées par des lois connues. Les classes LOS et NLOS de la figure 3.31 sont modélisées respectivement par des lois de Rice (seul le trajet direct est exploité) et de Rayleigh (en absence de trajet direct, la corrélation est effectuée sur le signal issu du trajet réfléchi) dont les définitions sont rappelées en annexe quatre. Ces caractéristiques seront utilisées ultérieurement dans le quatrième chapitre lors de la mise au point d'un critère permettant de tenir compte des satellites reçus par trajets multiples dans l'outil PREDISSAT.



**Figure 3.31. Comparaison des rapports S/B pour un satellite visible, en noir, et un satellite masqué (reçu après une réflexion), en bleu.**

### **3.4 Variation de l'atténuation en fonction du type d'obstacle**

Nous avons rappelé précédemment que le coefficient de réflexion de Fresnel  $\Gamma$  dépend des caractéristiques  $\epsilon$  et  $\sigma$  du matériau. Nous nous intéressons maintenant à la variation de l'atténuation du signal en fonction du type de matériau de l'obstacle réfléchissant.

#### **3.4.1 Simulation et théorie : niveau de signal reçu en fonction de différents coefficients de permittivité et de conductivité.**

Une étude paramétrique a montré que le rapport signal sur bruit après une réflexion n'est pas affecté par la nature de l'obstacle réfléchissant. En effet, les simulations réalisées avec le logiciel SimuOG (développé par Ph. Mariage et présenté brièvement en annexe 2) donnent, pour des valeurs typiques de  $\epsilon$  entre 5 et 15, et de  $\sigma$  entre 0,001 et 0,1, des variations du niveau de signal très faibles. On observe un écart maximal de la valeur du champ E de 0,25 dB quand  $\sigma$  varie et  $\epsilon_r$  est fixé ( $\epsilon_r = 5$ ) et un écart maximal de E de 3,54 dB quand  $\epsilon_r$  varie et  $\sigma = 0,001$ , cela à une fréquence de 1,5 GHz.

#### **3.4.2 Mesures d'atténuation sur différents types d'obstacles**

Afin de confirmer ces résultats, nous avons mené une campagne de mesures. Nous avons observé le comportement du rapport signal sur bruit après réflexion sur différents types d'obstacles en utilisant l'antenne directive et le banc de mesure déjà présentés.

L'antenne suit un satellite sélectionné pour sa position par rapport à l'obstacle au moment des mesures. La figure 3.32 illustre la variation du rapport signal sur bruit en fonction de l'élévation du satellite dans différentes configurations : en réception directe, et après une réflexion sur deux types de bâtiments différents. Le mur du bâtiment de l'INRETS est composé de béton et de vitres. Le mur métallique est un mur de halle de sport représenté figure 3.33.

Le graphique comparatif de la figure 3.32 confirme qu'il n'y a pas de différence significative entre les rapports signal sur bruit selon que la réflexion a eu lieu sur un mur ou sur l'autre. Le tableau 3.34 appuie ces conclusions en donnant les ordres de grandeurs des valeurs mesurées.

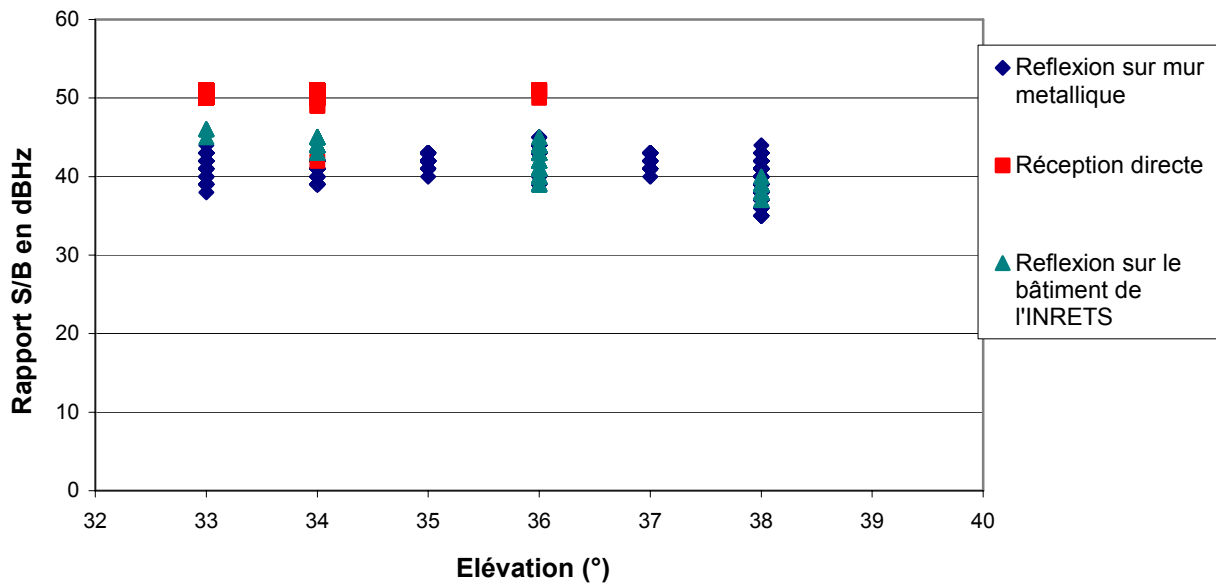


Figure 3.32. variation des rapports signal sur bruit en fonction de l'élévation du satellite.



Figure 3.33. Mur métallique réfléchissant le signal.



	sur l'INRETS	direct	sur métal
Moyenne (dBHz)	~ 42	~ 50	~ 41
Valeur minimale (dBHz)	37	42	35
Valeur maximale (dBHz)	46	51	45
Ecart - type	2,14	0,71	1,97

Tableau 3.34. Tableau récapitulatif de valeurs caractéristiques du rapport S/B en dBHz.

### 3.5 Résultats expérimentaux en environnement urbain réel.

Nous avons mesuré les rapports S/B des satellites reçus lors d'un parcours dans Lille. La trajectoire du véhicule équipé de notre récepteur GPS est représentée figure 3.35. Elle comporte des passages dans divers types d'environnements (suburbain - A, et urbain dense de deux types : récent - B - ou ancien - C). Les distributions des angles d'élévation des masques de ces trois environnements sont données figure 3.36.

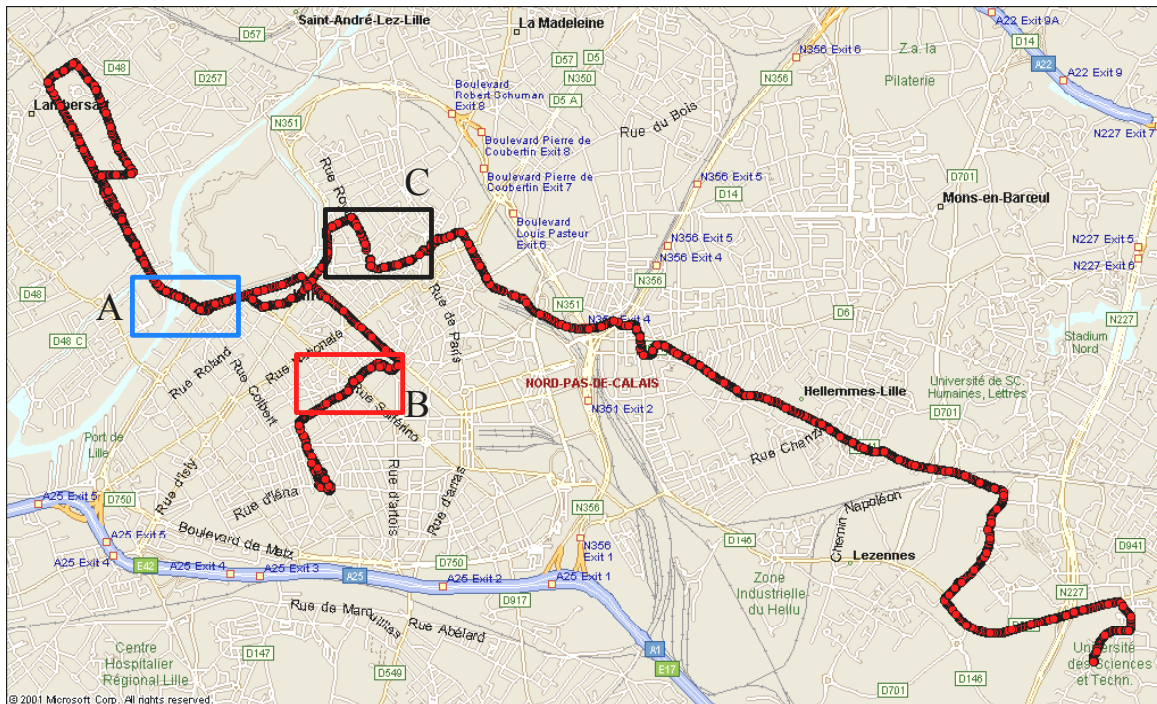
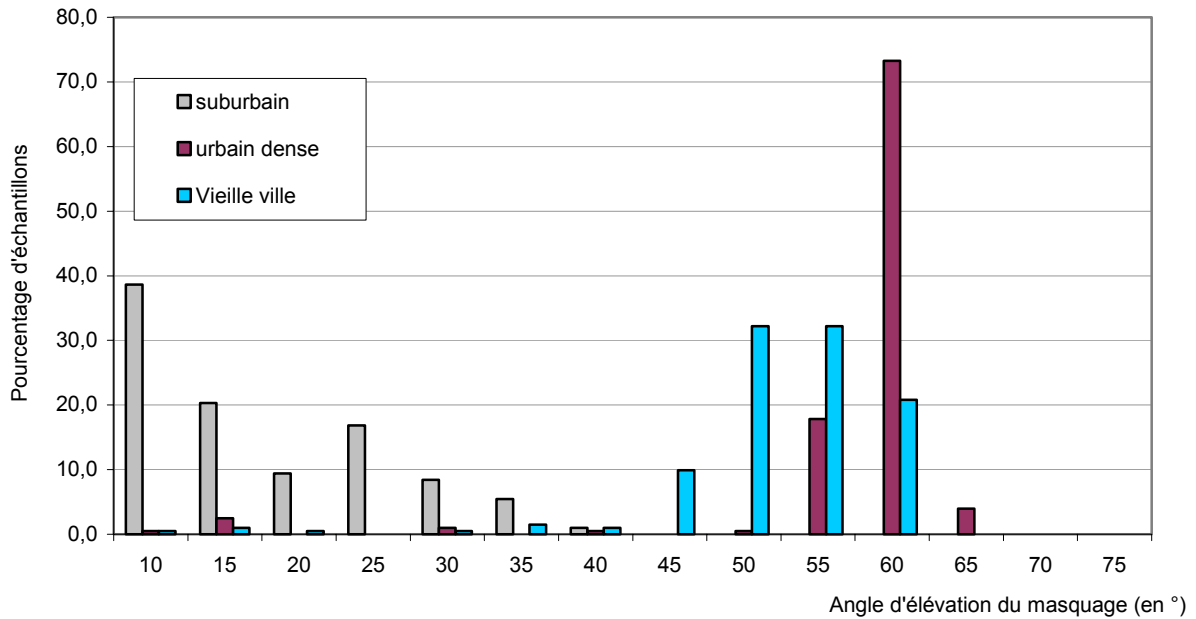
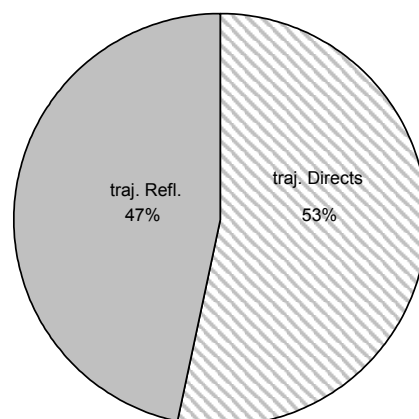


Figure 3.35. Trajectoire d'essais.



**Figure 3.36. Répartition des angles d'élévation des masques dans les trois environnements considérés.**

En environnement masqué, les rapports signal sur bruit mesurés sont répartis entre 24 et 52 dBHz. A partir des distributions de niveau de signal que nous avons établi (§ 3.3), nous classons les signaux reçus lors d'essais dynamiques en environnement urbain. Cette classification permet d'isoler les satellites reçus par trajet direct de l'ensemble des satellites. La figure 3.37 illustre la répartition moyenne de satellites reçus par trajets multiples par rapport aux satellites reçus par trajet direct. Sur la globalité du trajet choisi, nous avons observé qu'un peu plus d'un satellite sur deux est reçu directement (53 %). Ces résultats montrent que, dans un environnement très masqué, si le récepteur utilise tous les satellites qu'il peut recevoir dans le calcul de sa position, il utilise des satellites reçus par trajets multiples. Nous savons que les trajets multiples se réduisent à la réception après une réflexion. Par conséquent, nous pouvons quantifier l'erreur induite par leur utilisation dans différents contextes et évaluer leur impact dans le processus de localisation du mobile.



**Figure 3.37. Proportion moyenne du nombre de satellites reçus par trajets directs sur la globalité du trajet.**

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous appliquons l'impact d'une réflexion à des configurations simples. Nous utiliserons ensuite l'ensemble des critères avec PREDISSAT dont les résultats seront présentés dans le chapitre quatre.

## 4 Impact de la réflexion sur la localisation

### 4.1 Impact sur la disponibilité

Les essais que nous avons réalisés lors de parcours dans Lille nous ont montré l'importance des trajets réfléchis dans le calcul de localisation effectué par le récepteur. Nous avons montré dans le chapitre 1 (§ 4.5.2, figures 1.22 et 1.23) les résultats que nous avons obtenu dans un environnement de type canyon. Ces essais, réalisés en bridant le récepteur que nous utilisons afin de n'utiliser que les satellites reçus par trajet direct, ont montré que la prise en compte des trajets directs seuls ne permet pas toujours de localiser le véhicule. C'est pourquoi il peut être nécessaire de considérer tous les satellites pour obtenir une position même si celle-ci est erronée par les erreurs de pseudo-distances. En outre, l'erreur sur la pseudo-distance peut être évaluée afin de qualifier la mesure.

Une première évaluation de ce type d'approche a été abordée dans [Malicorne, 01].

### 4.2 Impact sur la précision de localisation

Lorsque le signal subit une réflexion, la mesure de pseudo-distance entre le récepteur et le satellite est entachée d'erreur. Dans la configuration canyon urbain que nous traitons, nous proposons, en nous inspirant de [Wang, 00], d'évaluer l'erreur sur la pseudo-distance comme illustré figure 3.38.

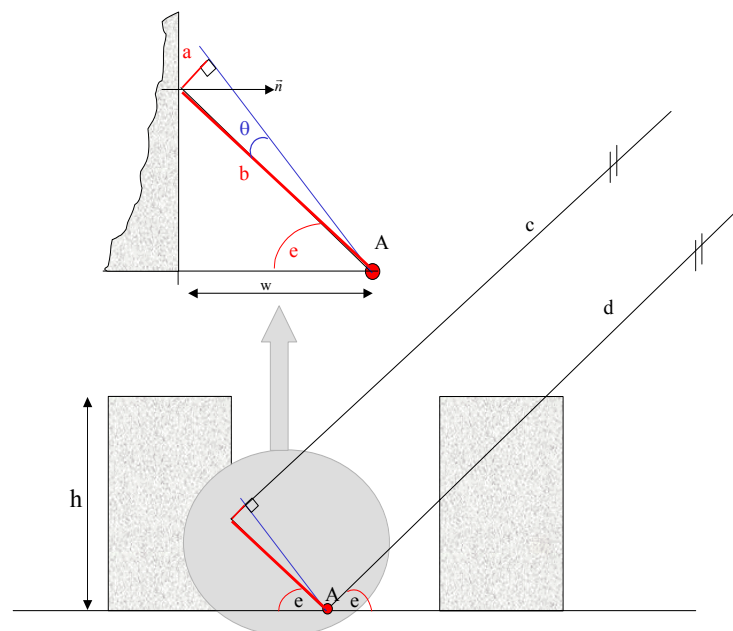


Figure 3.38. Configuration traitée et notations utilisées.

Les satellites GPS étant situés à 20 000 km, nous faisons l'hypothèse que les deux distances  $c$  et  $d$  sont du même ordre de grandeur.

$$c \approx d \quad (3.10)$$

Soit  $e$  l'élévation du satellite, on calcule alors les valeurs  $a$ ,  $b$ ,  $\theta$ , et le retard  $r$  selon les équations (3.11) à (3.14)

$$\theta = 90 - 2e \quad (3.11)$$

$$b = \frac{w}{\cos e} \quad (3.12)$$

$$a = b \tan \theta \quad (3.13)$$

$$r = a + b = w \frac{1 + \tan \theta}{\cos e} \quad (3.14)$$

Dans le cas particulier de la configuration étudiée rappelée figure 3.39, nous calculons les valeurs de  $r$  pour différentes élévations de satellites. On constate (tableau 3.40) que plus l'élévation est faible, plus l'erreur est importante.

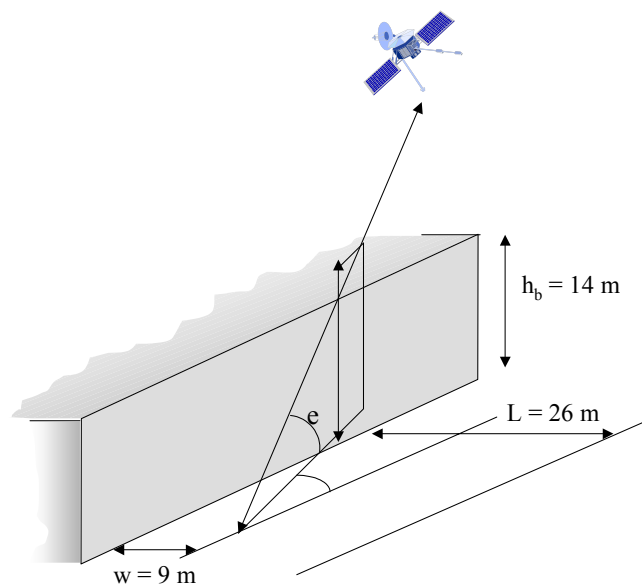
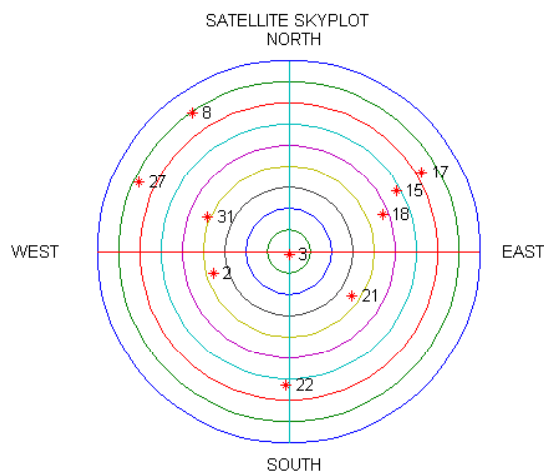


Figure 3.39. Configuration simulée.

e	r (m)
35	14,98
40	13,82
45	12,73
50	11,53
55	9,98

Tableau 3.40. Exemples de valeurs du retard  $r$  sur la pseudo-distance.

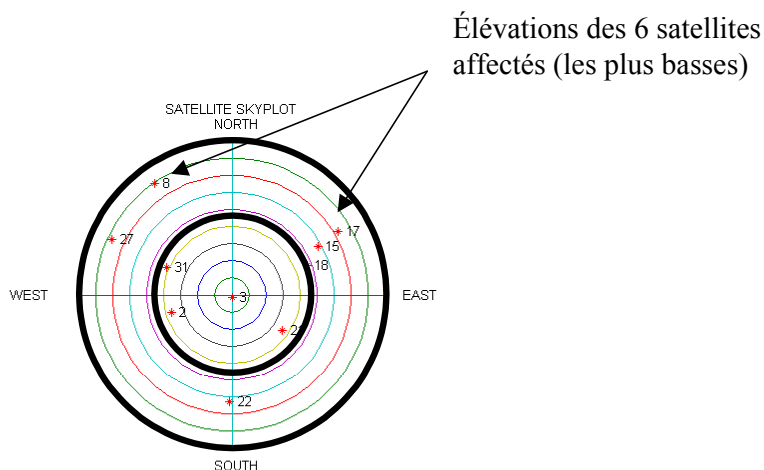
En utilisant des bibliothèques spécifiques de Matlab, GPSofT commercialisé par la société Navtech, nous calculons l'impact d'une erreur de pseudo-distance de 15 mètres sur le calcul de la position, dans le cas d'une configuration réelle de satellites visibles depuis l'INRETS. Les positions des 9 satellites sont indiquées figure 3.41. La fonction utilisée calcule une position de l'utilisateur à partir d'une matrice de positions des satellites et les pseudo-distances associées via une solution ordinaire de moindre carrés.



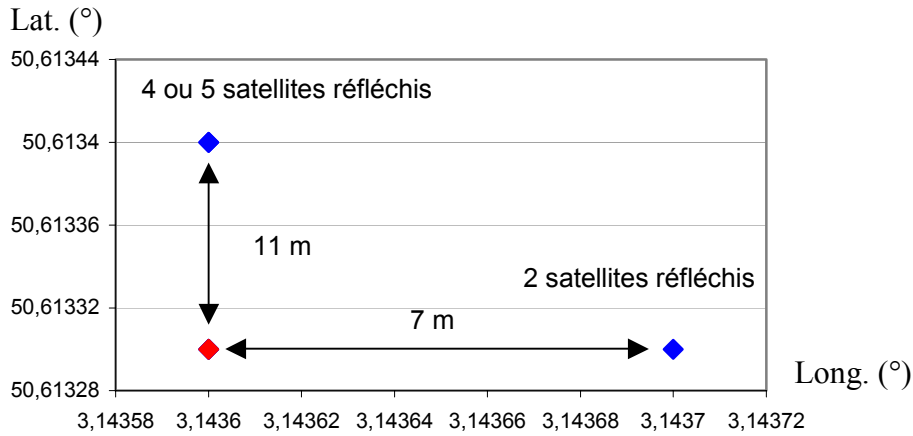
**Figure 3.41. Position des satellites utilisés.**

Dans un premier temps, nous avons affecté cette erreur de pseudo-distance à un seul des 9 satellites visibles. L'erreur de localisation obtenue est au maximum égale à 11 m suivant l'axe des latitudes. Dans un deuxième temps, l'erreur est appliquée à plusieurs satellites simultanément parmi les satellites visibles. Trois configurations sont examinées.

- **Configuration 1** : on considère que les satellites les plus affectés sont les satellites d'élévations les plus basses parmi les 9 satellites visibles, c'est-à-dire 1, 2, 3, 4 puis 5 satellites parmi 9 (figure 3.42). Deux configurations n'affectent pas le résultat de localisation : il s'agit des cas où la pseudo-distance du satellite le plus bas est erronée et du cas où les 3 plus bas sont affectés. Une erreur de longitude de 7 m est remarquée si les deux satellites d'élévations les plus basses se réfléchissent. La latitude est faussée si 4 ou 5 pseudo-distances sont erronées.

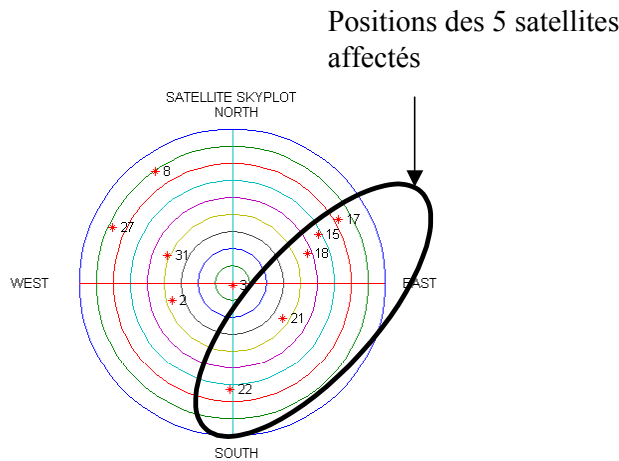


**Figure 3.42. Positions des 6 satellites affectés dans la configuration 1.**

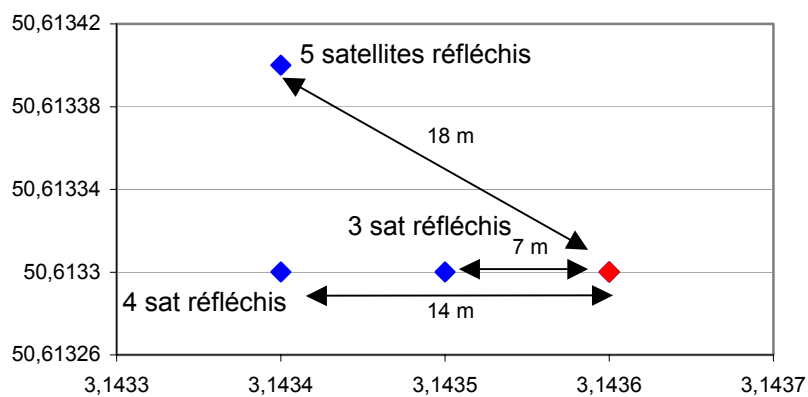


**Figure 3.43. 1<sup>ère</sup> configuration : Réflexions des satellites les plus bas.**

- Configuration 2 : les signaux issus des satellites se réfléchissent sur un même bâtiment. Les satellites affectés, parmi les 9 visibles, sont donc situés dans une même zone d'azimut. La figure 3.45 montre que les erreurs de localisation sont un peu plus importantes. L'erreur de pseudo-distance sur les 3, 4 et 5 satellites les plus bas d'une même zone d'azimut étendue de 15 m implique respectivement des erreurs de 7, 14 et 18 m.

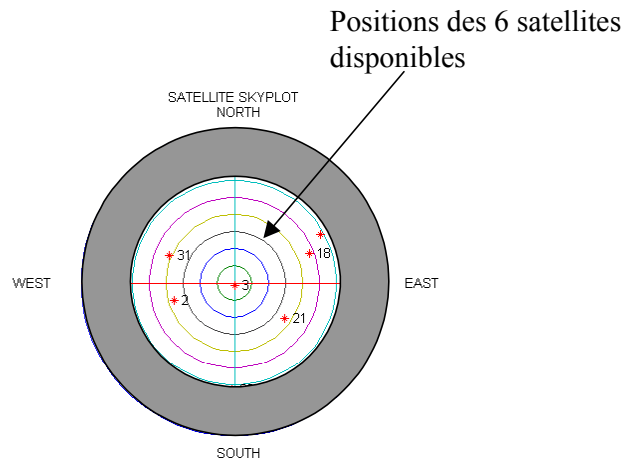


**Figure 3.44. Choix des 5 satellites affectés dans la configuration 2.**

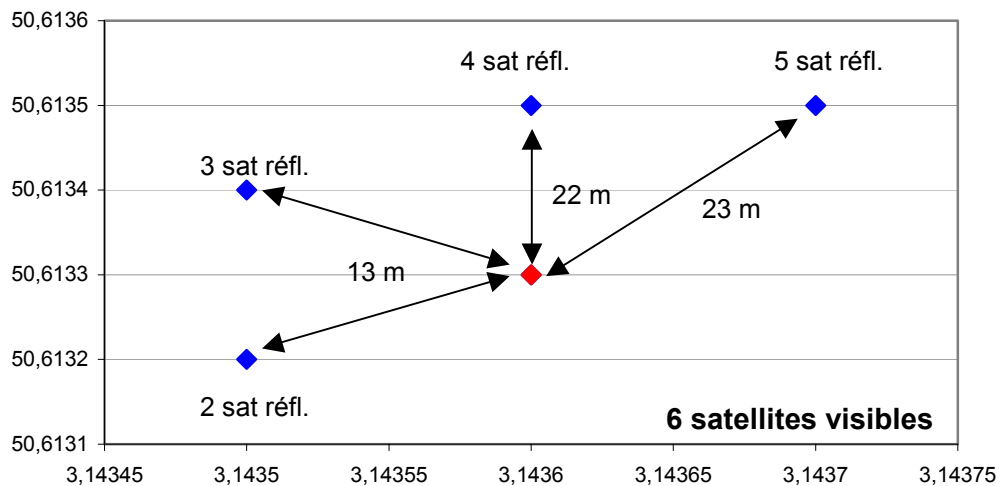


**Figure 3.45. 2<sup>ème</sup> configuration : Réflexion des satellites depuis une même zone d'azimut.**

- **Configuration 3** : le véhicule traverse un environnement urbain de masque 30°. Dans ce cas, seuls 6 satellites sont visibles.



**Figure 3.46. Positions des 6 satellites visibles (les plus hauts).**



**Figure 3.47. 3<sup>ème</sup> configuration : Réflexion de 1 à 5 satellites parmi 6 (au lieu de 9).**

La position du mobile découle de la résolution d'un système d'équations à quatre inconnues. Chaque équation représente l'équation d'une sphère centrée sur le satellite et de rayon la pseudo-distance. Lorsque le système comprend plus de quatre équations, la position finale est obtenue par une méthode des moindres carrés. Ainsi, cette position est la solution qui minimise l'erreur parmi toutes les solutions possibles. Il paraît donc logique que l'erreur de pseudo-distance augmente lorsque le nombre de satellites visibles diminue.

Des essais en environnements urbain et ferroviaire ont montré que la configuration avec six satellites reçus est la plus fréquente. Ces résultats confirment les hypothèses émises dans le chapitre 1, § 4.5.2 et expliquent les erreurs de positionnement que subit le système de localisation en environnement fortement masqué. Dans le chapitre suivant, ce même phénomène est confirmé par des essais dynamiques. Il est cependant difficile de comparer les résultats de simulation, isolés et bruts, aux données du récepteur qui, nous le rappelons, applique un filtrage de Kalman qui permet d'améliorer le résultat final.

## 5 Conclusion

Les modèles de canal de propagation utilisés dans les systèmes de télécommunications terrestres et visant à quantifier le signal reçu par le mobile décrivent une répartition des signaux reçus en trois états. Ainsi, les signaux issus des satellites peuvent être :

- reçus par trajet direct,
- reçus par trajets multiples,
- bloqués et non reçus par le récepteur.

Les résultats obtenus grâce à l'approche présentée dans le chapitre 2 ont montré les limites de l'approche optique qui ne tient compte que des satellites en visibilité directe ainsi que la nécessité d'intégrer les satellites reçus en NLOS par trajets multiples.

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les signaux des satellites reçus en absence de trajet direct. Nous avons montré que nous pouvions négliger les signaux reçus par diffraction ou après plusieurs réflexions. L'exploitation conjointe des simulations et des expérimentations a permis de mettre en évidence que le phénomène de diffraction et les réflexions multiples atténuent très fortement le signal satellite. Le signal reçu est alors en dessous du seuil de sensibilité du récepteur et n'est pas utilisé dans le calcul de localisation.

De nombreux essais réalisés avec une antenne directive spécifique nous ont permis de caractériser les signaux reçus après une réflexion comparativement à ceux reçus en visibilité directe. Deux distributions des rapports S/B classiques peuvent être mis en évidence, celle de Rice et celle de Rayleigh. De plus, une première approche par simulation sous Matlab précise l'ordre de grandeur des erreurs de localisation dans différentes configurations de réception.

A partir de ces résultats, nous allons expliciter et tester dans le dernier chapitre un ou des critères qui seront implantés dans l'outil PREDISSAT afin que la prédiction des satellites tienne compte des satellites reçus en NLOS en affectant ces derniers d'une pondération relative à l'erreur de localisation qu'ils sont susceptibles d'introduire.



## Chapitre 4 :

# Mesures en environnement urbain

## 1 Introduction

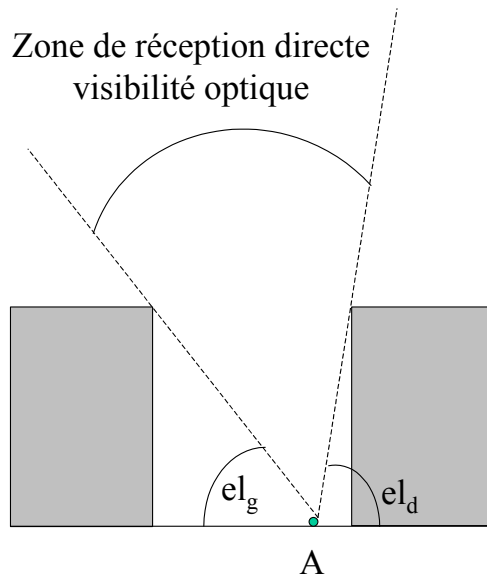
Nous avons présenté dans le premier chapitre de cette thèse les principes de base des systèmes de localisation par satellites et les difficultés liées à leur utilisation dans des environnements fortement masquants, tels que les environnements urbains ou les tranchées ferroviaires. Nous avons développé pour des applications transports un outil appelé PREDISSAT, afin de prédire la disponibilité du système de localisation le long d'une trajectoire. Cet outil utilise, dans sa première version, une approche optique fondée sur un procédé de stéréovision mono-caméra décrit dans le chapitre 2. Il permet de prédire, le long d'une trajectoire connue, le nombre de satellites reçus par le récepteur en visibilité directe. Cette méthode « optique » a été validée lors d'expérimentations dans plusieurs types d'environnements. Ces essais encourageants ont notamment permis de mettre en évidence qu'en environnement urbain, où les obstacles sont très proches du mobile, le nombre de satellites reçus par trajet direct est largement inférieur au nombre de satellites réellement reçus composé de satellites en réception directe mais aussi indirecte.

Dans le chapitre 3, nous avons caractérisé les phénomènes de propagation qui affectent une onde issue d'un satellite jusqu'à sa réception. Nous avons démontré qu'il n'est pas nécessaire de considérer les signaux diffractés, ni les signaux affectés par plusieurs réflexions. Nous avons mis en évidence une classification possible des satellites reçus en NLOS parmi les autres satellites reçus. Nous avons proposé une évaluation simple de l'erreur introduite par la réflexion.

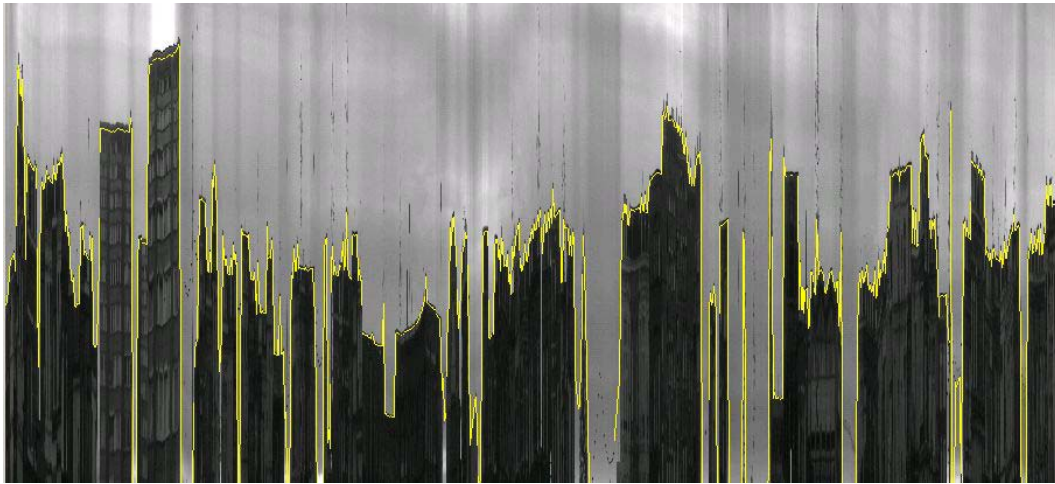
Nous avons intégré ces conclusions dans l'outil PREDISSAT afin d'améliorer ses performances, particulièrement en milieu urbain. Nous présentons dans ce chapitre la méthode développée pour reconstruire l'environnement autour de l'antenne de façon à pouvoir dénombrer le nombre de satellites reçus en visibilité directe et après une réflexion. Les expérimentations dans différents types d'environnements sont comparés aux résultats prédits. On constate la bonne concordance entre les résultats expérimentaux et la prédiction. Les essais confirment que la prise en compte des satellites reçus en NLOS augmente la disponibilité du système. Nous proposons des perspectives d'optimisation et d'applications de l'outil.

## 2 Prise en compte des satellites reçus après une réflexion

L'outil, dans sa première version, détermine le nombre de satellites visibles au sens optique du terme (figure 4.1). Lorsque les signaux issus de ces satellites ne rencontrent aucun obstacle quand ils se propagent jusqu'au récepteur, on parle de réception directe et de satellites reçus par trajet direct. L'outil analyse les enregistrements vidéo, repère le pixel qui sépare le ciel des obstacles et détecte la ligne d'horizon tracée sur l'image de la figure 4.2. Cet outil a été détaillé dans le deuxième chapitre de ce mémoire.



**Figure 4.1. Angles d'élévation des masques optiques.**



**Figure 4.2. Détection de la ligne d'horizon optique.**

Pour calculer les élévations des masquages le long du trajet, nous faisons l'hypothèse que, dans les environnements routiers très masqués, les trajectoires sont majoritairement rectilignes et que les masques sont de type canyon urbain. On exploite alors l'idée, démontrée dans le chapitre trois, qu'un satellite optiquement masqué peut être reçu après une seule réflexion sur la paroi du bâtiment qui lui fait face de l'autre côté de la rue. Cette configuration simple permet de définir un critère géométrique pour l'intégration des satellites dans l'état NLOS. Il est alors possible de déterminer une nouvelle ligne d'horizon, plus basse que l'horizon optique, telle que les satellites dont l'élévation se situe au-dessus, tout en étant masqués optiquement, sont reçus par le récepteur.

## **2.1 Le principe**

Cette nouvelle frontière est détectée lors de la reconstruction de l'environnement en appliquant la théorie des images (détaillée en annexe 1) comme suit. La figure 4.3 représente, de chaque côté du canyon urbain, les deux rayons les plus bas reçus respectivement en visibilité directe et après une réflexion. Le point d'impact I du rayon émis par le satellite sur l'obstacle est à l'intersection de la droite (A'S) avec la paroi de l'obstacle. D'après la théorie des images, A' et A sont à égales distances de l'obstacle. Ainsi, lorsque l'élévation d'un satellite se situe dans la zone hachurée, le satellite est

reçu après une réflexion sur le bâtiment opposé. On considère donc que son élévation est au-dessus d'un obstacle fictif situé à la même distance que l'obstacle réel mais de hauteur plus petite. Tous les satellites d'élévations supérieures à ce masque fictif sont les satellites de la zone T (figure 4.3) susceptibles d'être reçus.

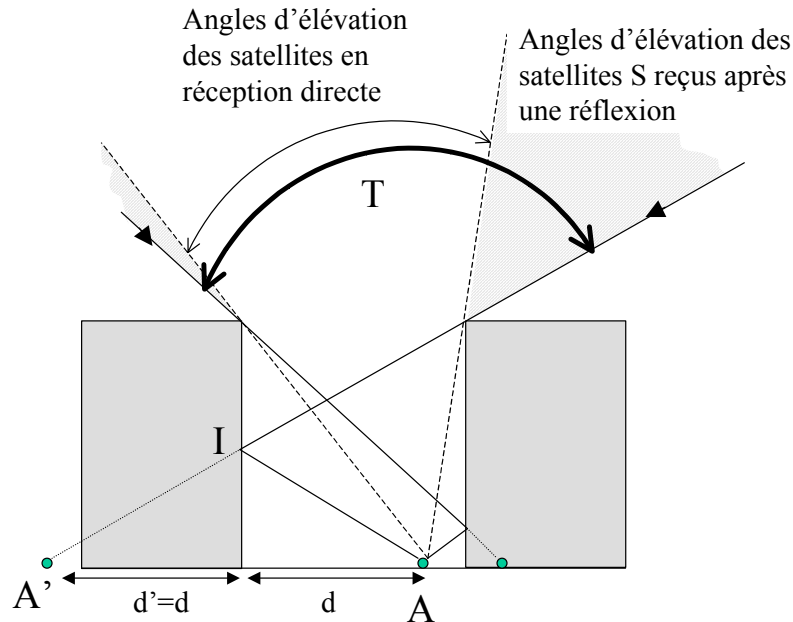
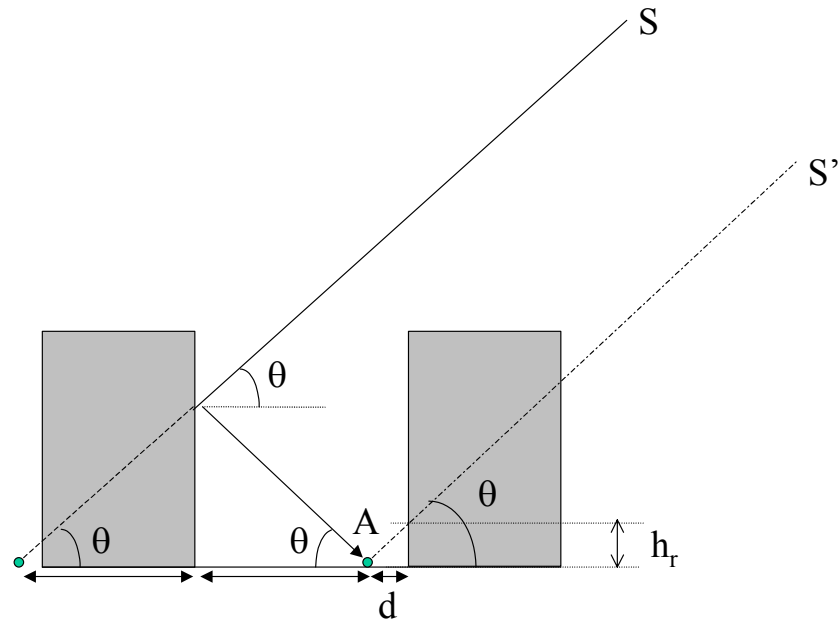


Figure 4.3. Deux zones de réception fonctions de l'angle d'élévation du satellite.

## 2.2 La méthode

Cette approche permet de définir de nouveaux obstacles fictifs de hauteurs  $h_r$  inférieures aux hauteurs réelles  $h$ . La hauteur  $h_r$  est déterminée à partir de la configuration géométrique simple donnée figure 4.4. L'élévation d'un satellite S varie au cours du temps. L'angle d'élévation minimal depuis lequel le satellite est reçu après une réflexion est égal à  $\theta$ . Les satellites GPS sont situés à plus de 20 000 km d'altitude, on considère donc que les droites parallèles (A'S) et (AS') représentent deux rayons issus d'un même satellite. Dès qu'un satellite a une élévation supérieure à l'angle  $\theta$ , le signal issu de ce satellite se réfléchit sur le bâtiment de gauche et est reçu en A. La hauteur relative  $h_r$  est donc la hauteur d'un obstacle « fictif » au-dessus duquel tout satellite est « visible » pour le récepteur, soit reçu directement ou après réflexion. La distance  $d$  entre l'antenne et le bâtiment est identique à la distance extraite de la stéréovision et la hauteur relative  $h_r$  s'exprime selon l'équation (4.1).

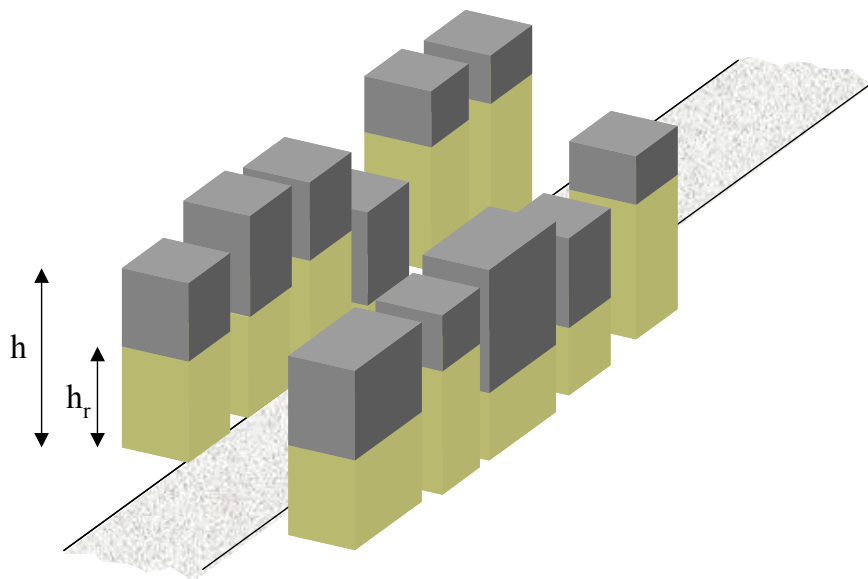
$$h_r = d \tan \theta \quad (4.1)$$



**Figure 4.4. Calculs des hauteurs relatives  $h_r$ .**

Comme lors de la reconstruction tridimensionnelle de l'environnement présentée dans le chapitre 2, le nouveau masque est calculé sur  $360^\circ$  autour de l'antenne de réception en terme d'angles d'élévations des masques à partir de la géométrie de la scène. La figure 4.5 montre une reconstitution d'un environnement type canyon urbain. La hauteur totale des bâtiments  $h$  est la hauteur donnée par la version optique de l'outil. Les hauteurs relatives  $h_r$  des obstacles utilisées pour la réception en visibilité directe et après réflexion sont en jaune. Elles représentent une portion des hauteurs réelles et sont calculées à partir des distances  $d$  du mobile aux obstacles fournies par le premier calcul.

En procédant selon deux étapes avec les hauteurs  $h$  et  $h_r$ , il est alors possible d'identifier séparément le nombre de satellites reçus par trajet direct (1<sup>ère</sup> étape) et la totalité des satellites reçus par trajets directs ou après une réflexion (2<sup>ème</sup> étape).



**Figure 4.5. Représentation tridimensionnelle des hauteurs réelles et relatives des obstacles.**

Cette nouvelle méthode a été implantée dans l'outil. Nous présentons maintenant les résultats des essais réalisés visant à évaluer les performances de PREDISSAT ainsi modifié.

### 3 Les mesures

#### 3.1 L'équipement embarqué

Afin d'exploiter les mesures avec l'outil PREDISSAT, nous avons équipé le camion laboratoire du LEOST avec le boîtier constitué de 2 caméras décrit dans le chapitre 2. Ces caméras enregistrent l'environnement de l'antenne GPS de part et d'autre du véhicule. La comparaison des prédictions avec les mesures est réalisée grâce à l'installation d'un récepteur GPS sur le véhicule.

##### 3.1.1 Le récepteur GPS

L'antenne GPS est une antenne standard omnidirectionnelle aimantée fixée sur le toit du camion (figure 4.6). On enregistre sur un PC les trames NMEA, suivantes, rafraîchies chaque seconde :

- GPZDA : qui donne l'heure GPS de chacune des séries de trames,
- GPGSV : qui contient les numéros des satellites visibles, leurs positions et le niveau de signal reçu,
- GPGSA : qui identifie les satellites utilisés pour le calcul,
- GPGLL : qui contient la position du mobile, calculée par le récepteur.

Le déclenchement des enregistrements est réalisé simultanément à l'enregistrement des images. Ces données permettent ensuite une comparaison avec les résultats prédits.



**Figure 4.6. Antenne patch.**

##### 3.1.2 Le système d'acquisition des images

Nous avons décrit le matériel et le processus d'acquisition dans le chapitre 2. Nous présentons ici les paramètres choisis lors des essais présentés dans ce chapitre.

- Les caméras sont équipées de capteurs CCD de dimensions 6,3 mm x 4,7 mm avec des objectifs dont la focale est égale à 3,6 mm. Elles sont fixées sur le toit du camion laboratoire.
- La disparité  $\delta$  est égale à 68 lignes. Cela signifie que nous utilisons la ligne centrale de chacune des images enregistrées et une deuxième ligne décalée dans l'image de 68 lignes dans le sens horizontal.
- Le pas d'échantillonnage de l'image  $\Delta l$  est fixé à 2 m pour limiter la quantité de données vidéo.



Figure 4.7. Boîtier contenant les deux caméras dos à dos.

### 3.2 Les environnements choisis

Afin de tester les performances de PREDISSAT nous avons sélectionné plusieurs environnements types afin de représenter quatre catégories de masquage :

- Environnement dégagé,
- Environnement suburbain,
- Environnement urbain,
- Environnement urbain dense.

Les trajectoires suivies pour les mesures sont représentées sur la carte de la figure 4.8. Elles sont localisées dans la ville de Lille et sa proche banlieue.

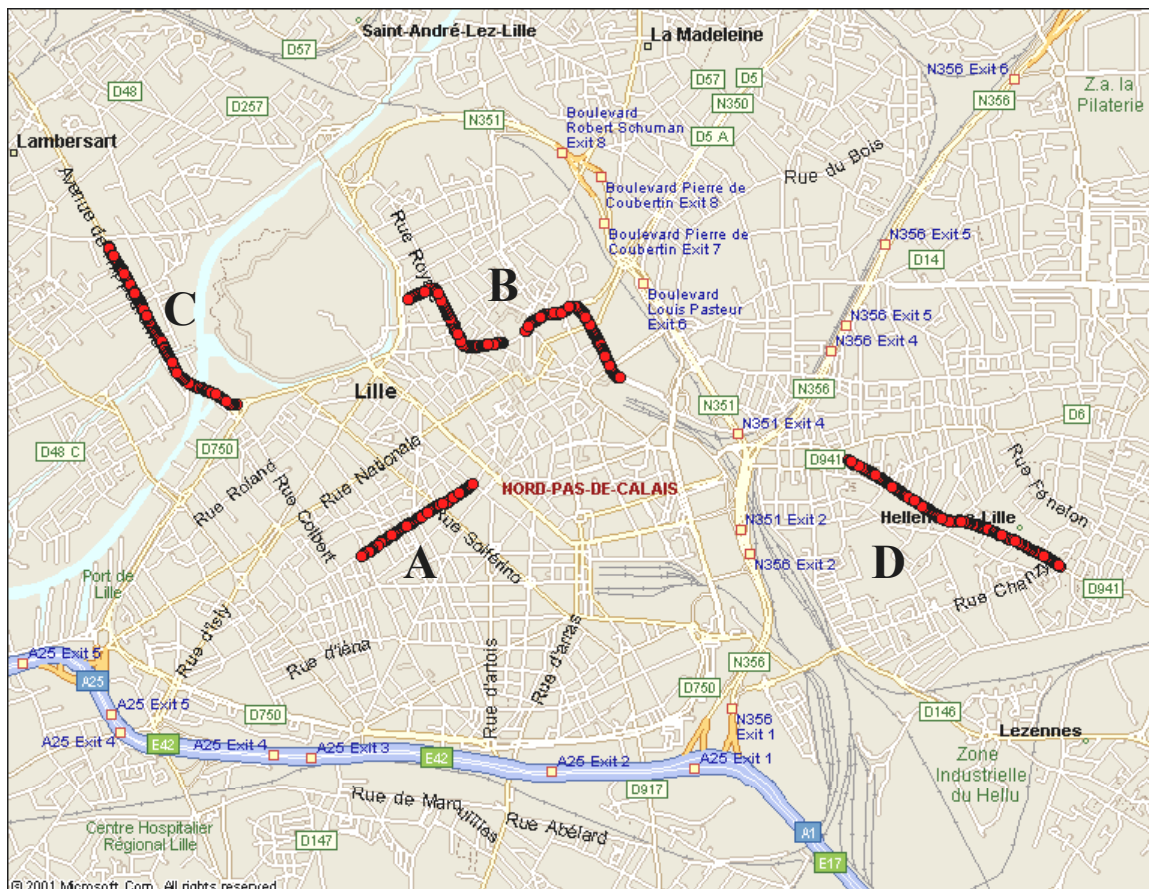


Figure 4.8. Portions de trajets expérimentés.



**Figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12. Photos des environnements A, B, C et D.**

La portion A est une rue à double sens, bordée d'immeubles de hauteur moyenne (15 à 20 m). Une photo illustre cet environnement figure 4.9. La portion B se situe le long des rues anciennes de la ville. Les rues sont étroites et bordées de petits immeubles (figure 4.10). On y circule en sens unique. La portion C surplombe le canal (la Deûle) et constitue une zone assez peu masquée (figure 4.11). La portion D est une longue rue d'une petite ville en bordure de Lille (Hellemmes). La rue est assez large (2 ou 3 voies) et les immeubles sont hauts de 2 à 3 étages (~ 10 m) (figure 4.12).

PREDISSAT extrait l'élévation des masques autour de l'antenne en appliquant les algorithmes de traitement d'images décrits au chapitre 2. Ces élévations peuvent être représentées le long du trajet de part et d'autre de la voie ou statistiquement avec les répartitions des élévations en pourcentage d'échantillons par tranches d'élévations de 5 degrés. La figure 4.13 montre l'évolution du masque en angles d'élévation respectivement à gauche et à droite du véhicule dans l'environnement dense A. L'élévation des masques perpendiculairement à la rue varie entre 50 et 60°. Pour comparaison, les figures 4.14 à 4.16 donnent les évolutions des élévations le long des trajets B, C et D. On constate que les élévations des masques dans les environnements A et B sont assez proches et que les élévations des masques dans les environnements C et D sont effectivement assez faibles.

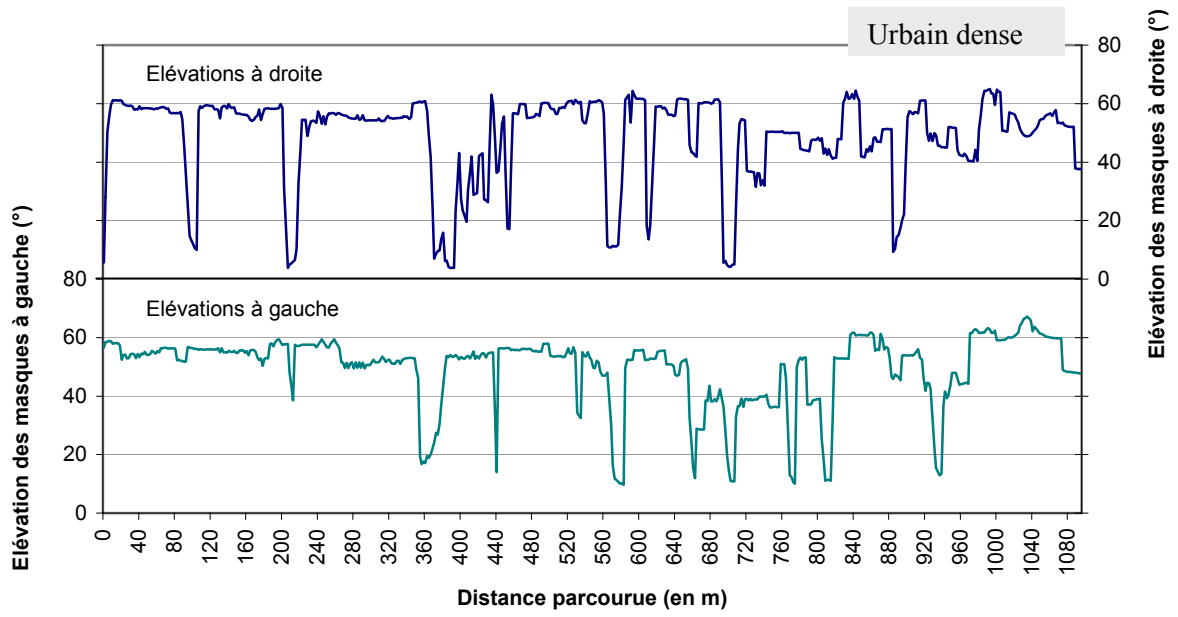


Figure 4.13. Elévations des masques le long de la portion A.

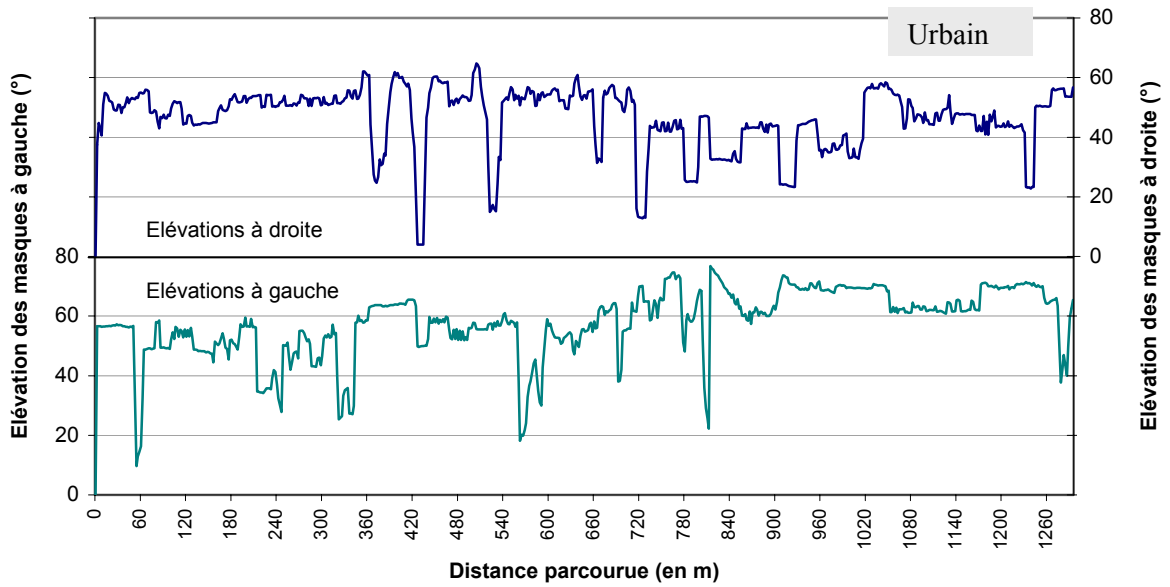


Figure 4.14. Elévations des masques le long de la portion B.



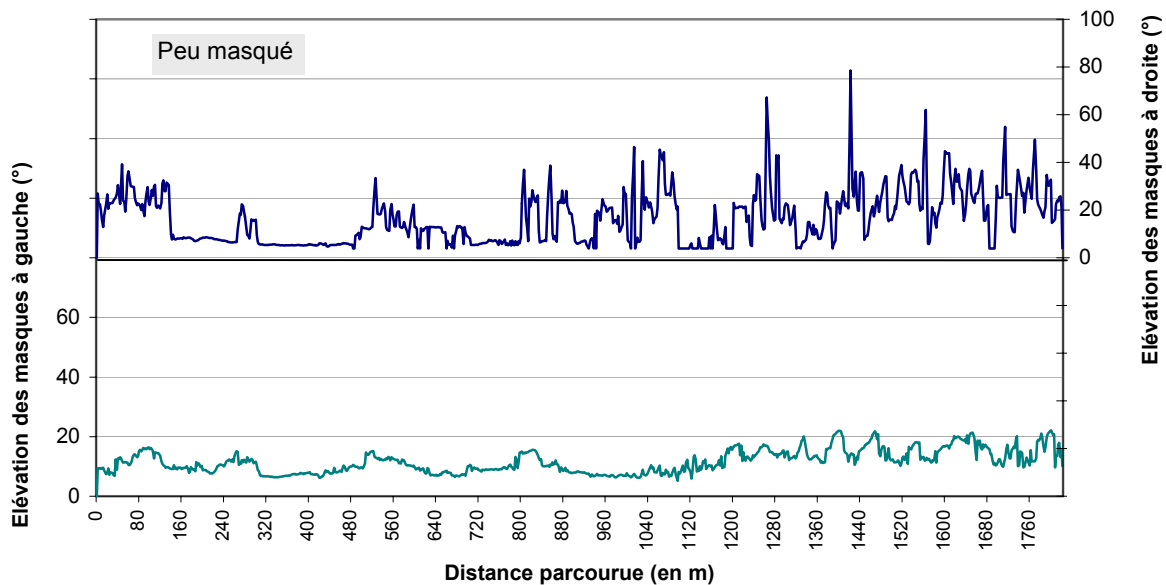


Figure 4.15. Elévations des masques le long de la portion C.

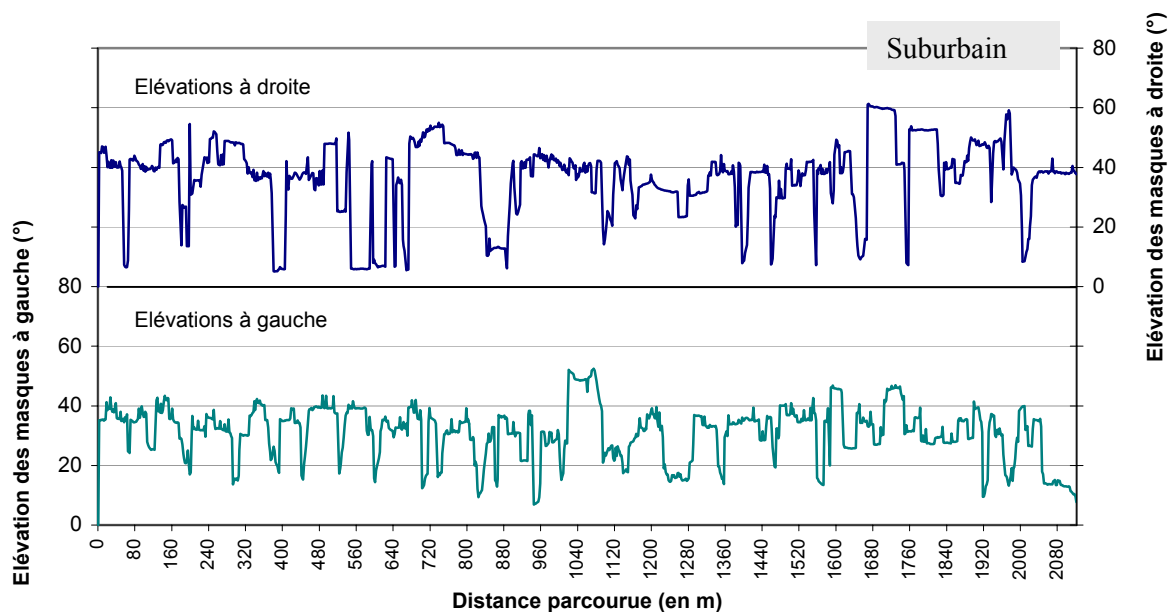
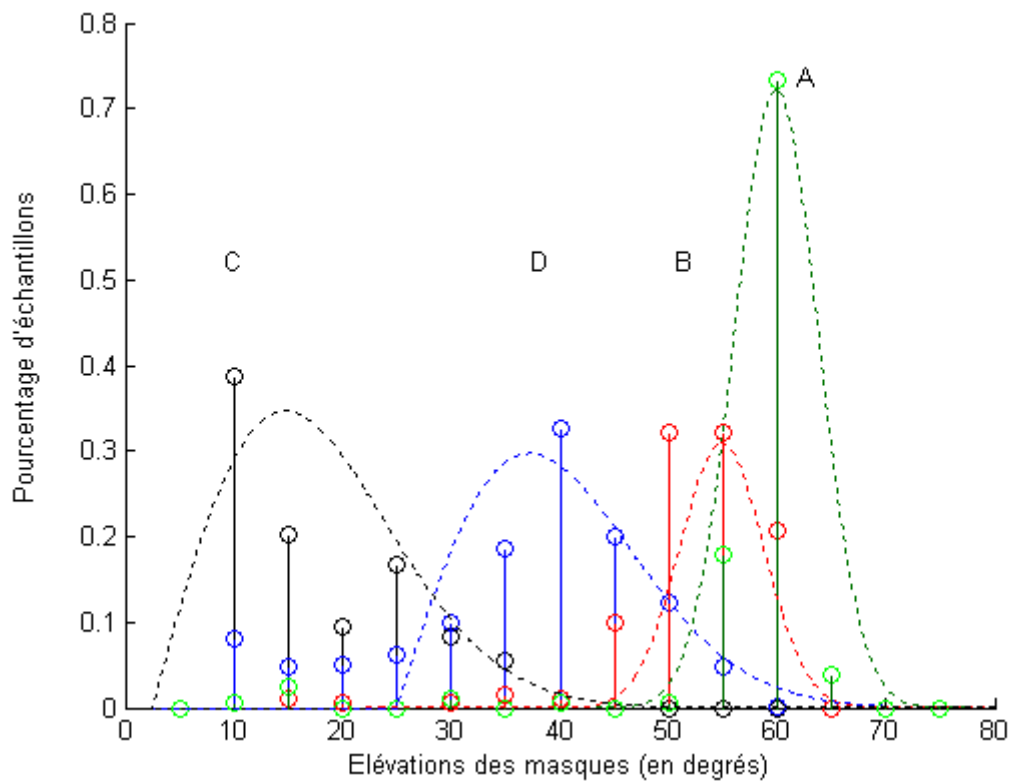


Figure 4.16. Elévations des masques le long de la portion D.

Les répartitions des angles d'élévations des masques peuvent être représentées sur un même graphique. [Saunders, 96] propose une approximation de hauteurs d'immeubles par des distributions de Rayleigh. Nous appliquons ce type de distribution aux élévations des masques rencontrés dans nos mesures (figure 4.17). Ces approximations sont grossières mais mettent en évidence les caractéristiques des différentes zones selon les paramètres de Rayleigh. Les répartitions statistiques des élévations le long de chacune des portions choisies confirment la classification des environnements choisis. La portion A est très masquée et les masques sont réguliers tout au long du trajet avec 73 % du temps un masque à  $60^\circ$  alors que les élévations de la portion C sont plus basses : plus de 50% du temps inférieures à  $15^\circ$ .



**Figure 4.17. Comparaison des répartitions des élévations selon les zones A, B, C et D.**

Dans la procédure dite de « comptage », déjà présentée dans le deuxième chapitre, l’outil PREDISSAT exploite conjointement les masques extraits du traitement d’image et les positions des satellites pour déterminer le nombre de satellites que le récepteur pourra recevoir le long de son parcours. Nous appliquons l’outil le long des zones définies ci-dessus.

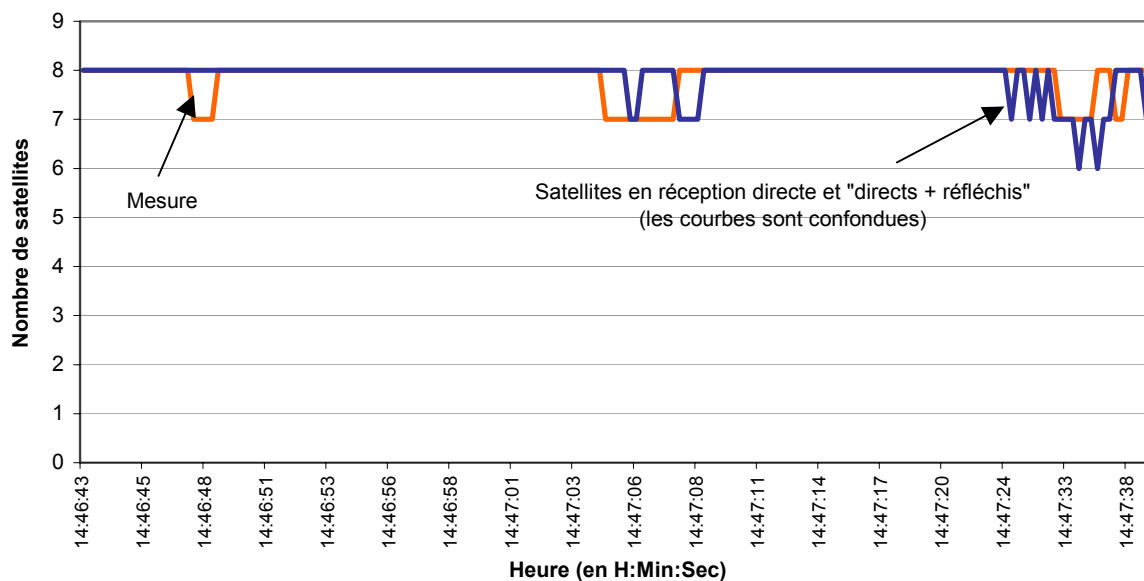
### **3.3 Comparaison du nombre de satellites reçus et du nombre prédit**

#### **3.3.1 Nombre de satellites le long du trajet**

On trace sur une même figure le nombre total de satellites reçus issu de la mesure (en rouge). On compare l’évolution de sa valeur aux prédictions données par PREDISSAT. A l’aide des deux méthodes exposées paragraphe 2.2, les prédictions sont décomposées en :

- nombre de satellites prédits optiquement (trajets directs uniquement) tracé en vert,
- nombre de satellites prédits en réception directe ou après une réflexion tracé en bleu.

On observe figure 4.18, qu’en environnement dégagé, les satellites sont presque tous reçus par trajet direct. En effet, les obstacles sont majoritairement peu élevés (environnement C) ou sont situés trop loin du mobile pour que l’onde soit réfléchi par les parois des masques avant d’atteindre le récepteur. L’influence de la prise en compte des satellites réfléchis dans le nombre total est donc peu visible dans les résultats de la figure 4.18.



**Figure 4.18. Résultats obtenus en environnement très dégagé.**

Sur les figures 4.20 à 4.22, nous présentons les prédictions obtenues dans des environnements plus fortement masqués avec les deux méthodes implantées dans PREDISSAT et nous les comparons aux mesures. Sur chaque figure, trois courbes sont tracées :

- en orange, le nombre de satellites effectivement reçu pendant la mesure,
- en vert, le nombre de satellites reçus par trajet direct ,
- en bleu, le nombre de satellites total reçus (directs et réfléchis une fois).

L’outil fournit des données plus fréquentes que le récepteur GPS dont la fréquence est limitée à une donnée toutes les secondes. Les résultats issus de la mesure sont donc moyennés dans les résultats qui suivent.

On constate que lors des trajets A, B et D (urbains et suburbains), les environnements fortement masqués restreignent la réception de signaux directs. Les courbes dénombrant uniquement le nombre de satellites visibles optiquement sont clairement en dessous du nombre de satellites effectivement reçus, ce qui confirme les résultats précédemment obtenus. En effet, en environnement urbain, les obstacles proches masquent fortement la réception des signaux directs. L’approche incluant les satellites reçus après une réflexion réduit l’écart entre simulation et prédiction. Le tableau 4.19 donne les valeurs moyennes des écarts obtenus. L’erreur est la différence absolue entre le nombre prédit et le nombre reçu.

Trajet	Erreur avec les satellites LOS	Erreur avec tous les satellites
A	1,37	0,67
B	2,11	1,04
D	1,43	1,02

**Tableau 4.19. Erreurs moyennes sur chaque trajet.**

En observant les résultats plus en détail, on constate qu'un décalage temporel entre les prédictions et les mesures apparaît. Nous proposons trois hypothèses relatives au fonctionnement du récepteur afin de l'expliquer.

Il existe un léger décalage dans le temps, visible sur la plupart des résultats. Ce décalage est lié d'abord à la fréquence d'échantillonnage des données GPS. En effet, nos prédictions considèrent qu'à l'instant précis où le satellite change d'état (devient masqué ou visible) le nombre de satellites est modifié. Cependant, comme les trames ne sont données qu'une fois chaque seconde, il existe un retard entre le moment où le satellite est utilisé et l'émission de la trame suivante. Ce décalage est illustré sur un extrait de trajet D. La figure 4.23 ne montre que les courbes représentant la mesure et le nombre de satellites prédit avec la dernière version de l'outil. Les résultats sont moyennés sur des périodes de 5 valeurs, soit tous les 10 mètres pour être plus lisibles. La courbe en trait fin représente l'évolution des valeurs prédites. Elle est décalée de trois secondes et tracée en bleu. On constate alors que l'erreur moyenne diminue sur cet extrait et passe de 0,84 satellite à 0,7.

Le processus de « poursuite et d'accrochage » du signal, mis en œuvre dans le récepteur, induit également une certaine inertie. Elle se traduit par le fait qu'un satellite passant de l'état masqué à l'état visible n'est pas immédiatement utilisé dans le calcul. On observe notamment que, lors du démarrage « à froid » du récepteur, la durée moyenne d'accrochage d'un minimum de trois satellites est égale à 110 secondes alors que la première position n'est donnée qu'après une durée de 118 secondes. L'inertie est moins importante lorsque le récepteur est en marche car les positions des satellites, transmises dans les almanachs, sont en mémoire dans le système. Expérimentalement, lors d'un masquage (total) d'une durée égale à trois secondes, le récepteur GPS donne deux valeurs intermédiaires avant de considérer que le nombre de satellites reçus est égal à zéro. A contrario, dans la prédiction, le nombre de satellites reçus passe brutalement à zéro dès que le masque est détecté. Cette remarque reste valable à la fin du masque. Le temps nécessaire au récepteur pour réutiliser les satellites dans le calcul peut varier de une à quatre secondes pour une durée de masquage allant de cinq secondes à une minute.

Les particularités du système, ses caractéristiques dynamiques (du véhicule mais aussi de la constellation) et les incertitudes concernant le fonctionnement détaillé de notre récepteur nous permettent difficilement d'analyser au cas par cas les erreurs le long des trajectoires. Nous avons proposé ici des explications matérielles. Nous essaierons dans la quatrième partie de ce chapitre de caractériser les sources d'erreur que nous avons pu identifier dans les processus d'acquisition et de traitement des images et qui affectent ponctuellement le nombre de satellites estimés. On remarque cependant, que, globalement, les prédictions fondées sur la prise en compte des satellites reçus après une réflexion semblent légèrement optimistes. Dans le paragraphe suivant, nous allons comparer les résultats avec les mesures en isolant le nombre de satellites réfléchis en chacun des points de la trajectoire afin d'analyser les raisons de ces écarts.

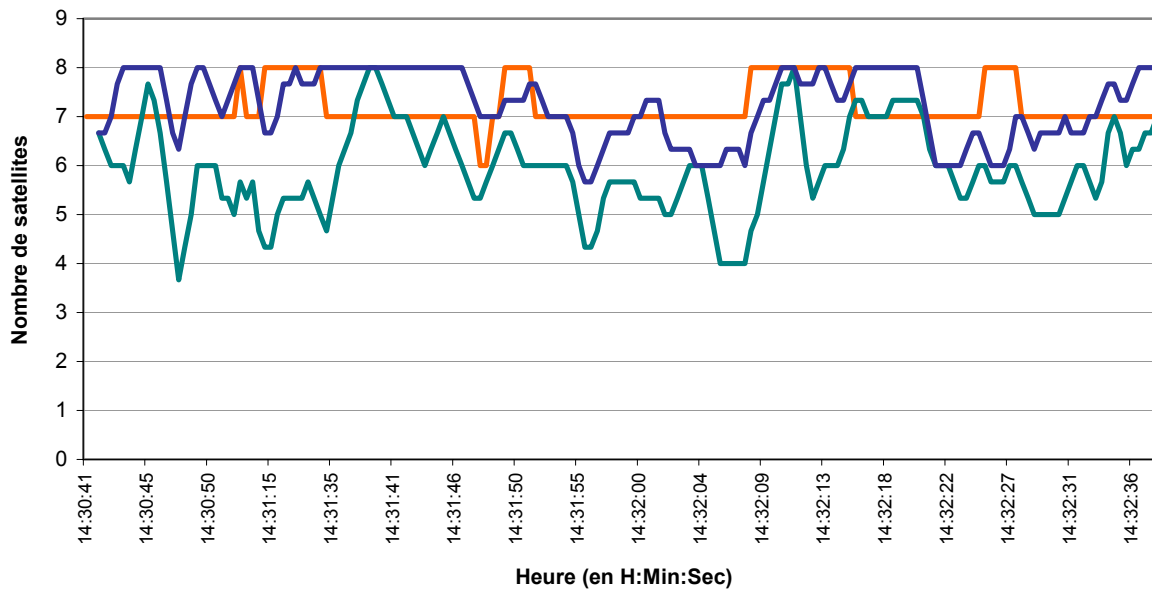


Figure 4.20. Résultats PREDISSAT le long du trajet A.

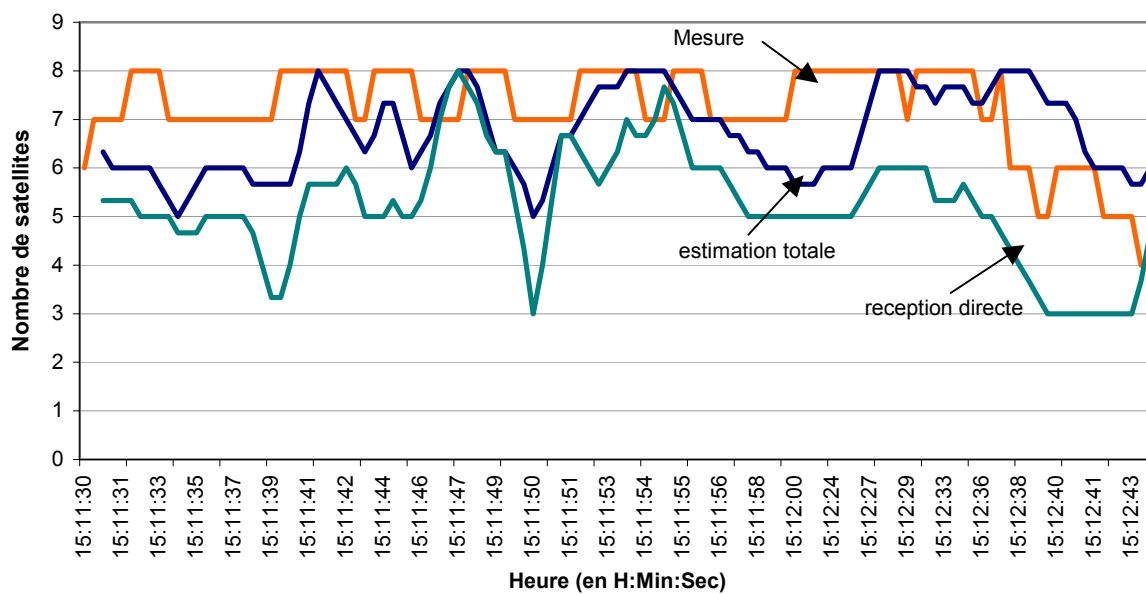


Figure 4.21. Résultats PREDISSAT le long du trajet B.

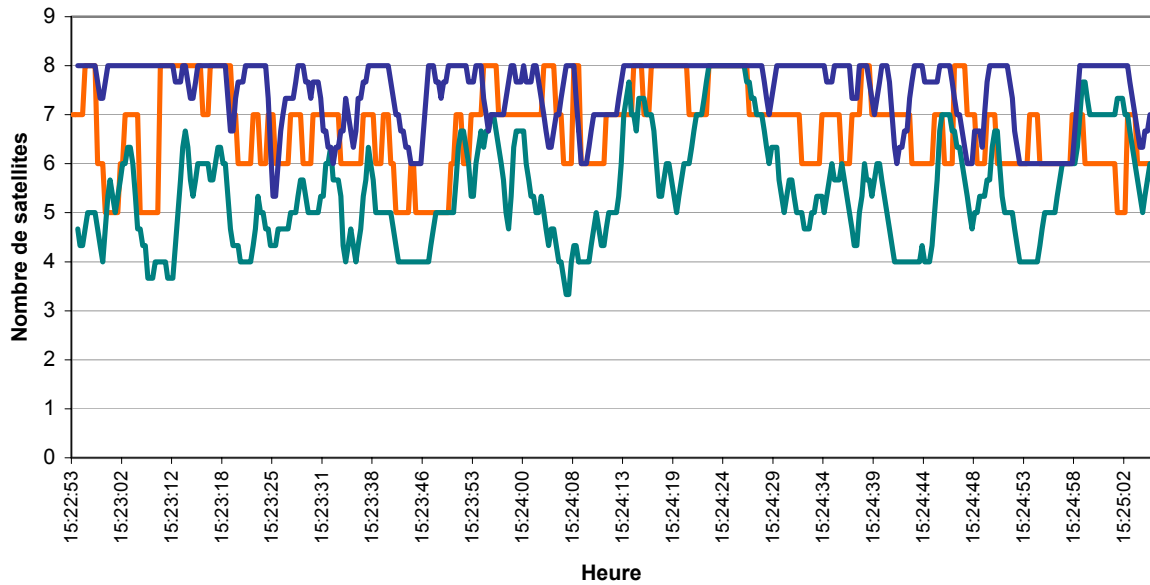


Figure 4.22. Résultats PREDISSAT le long du trajet D.

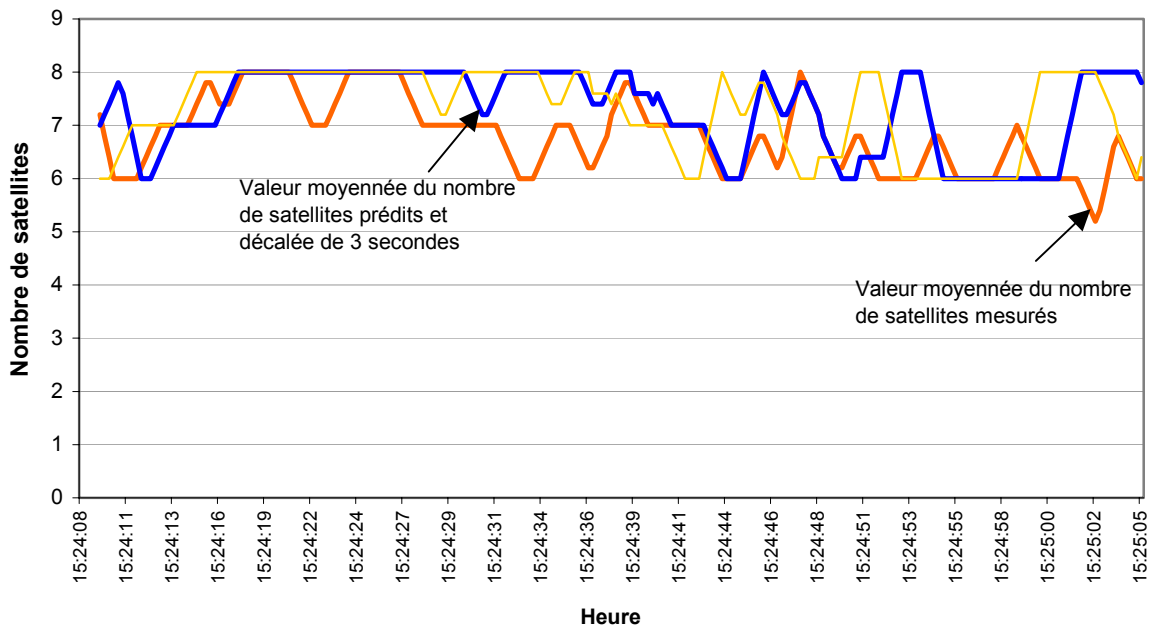


Figure 4.23. Résultats PREDISSAT. Extrait du trajet D décalé dans le temps.

### 3.3.2 Répartitions des satellites réfléchis et directs le long du trajet

A partir du nombre de satellites reçus uniquement en visibilité directe et du nombre total de satellites reçus, on peut extraire le nombre de satellites reçus après réflexion tout au long du trajet.

Dans le chapitre 3, par des expérimentations réalisées à plusieurs reprises dans des environnements typiques et connus, nous avons montré qu'il est possible de différencier les satellites reçus grâce à leur rapport signal sur bruit. Nous avons constaté que les rapports S/B des satellites reçus par trajets

multiples sont toujours strictement inférieurs à un seuil de 40 dBHz, ceux des satellites reçus par trajet direct étant supérieurs.

Nous illustrons ce résultat sur les mesures des rapports S/B de deux satellites. Les rapports S/B du satellite numéros 3 (élévation  $80^\circ$  - toujours au-dessus du masque) et du satellite numéro 17 (élévation  $10,5^\circ$  - toujours reçu par trajets multiples) sont enregistrés pendant le trajet A. Les 200 mesures sont classées et représentées respectivement figures 4.24 et 4.25. La répartition des rapports S/B entre satellites directs et satellites réfléchis a été observée à de nombreuses reprises lors de nos essais. Les rapports S/B des signaux suivent respectivement les distributions de Rice et Rayleigh comme nous l'avons déjà indiqué chapitre 3. Nous avons réalisé la même classification sur l'ensemble des trajets.

Les mesures de la figure 4.25 montrent un pourcentage élevé isolé de signaux reçus avec un rapport S/B de 24 dBHz. Cette valeur est atypique parmi l'ensemble de nos mesures. Le satellite observé étant positionné très bas sur l'horizon et dans l'axe de la rue, il est probable que ces mesures résultent d'une réception après deux réflexions dans le plan horizontal de la scène. Ce résultat semble contredire l'hypothèse selon laquelle nous avons éliminé la possibilité de recevoir un signal après deux réflexions. Cependant ce résultat est isolé parmi l'ensemble des résultats obtenus lors des essais dans l'agglomération lilloise pendant notre travail de thèse. Cette configuration nous semble rare, elle combine une position particulière du satellite dans l'axe d'une longue rue rectiligne. Cette remarque reste vraie en environnement ferroviaire, en raison, d'une part, de la distance plus importante entre le train et les obstacles et d'autre part, de la hauteur de l'antenne de réception (4 m pour un train).

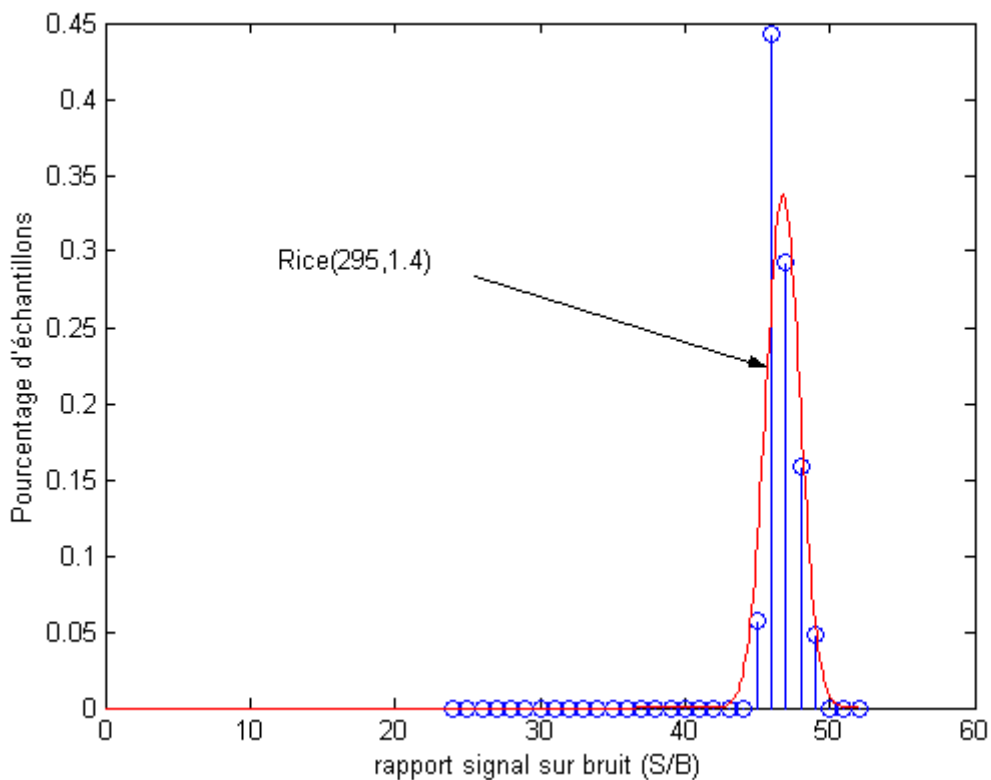
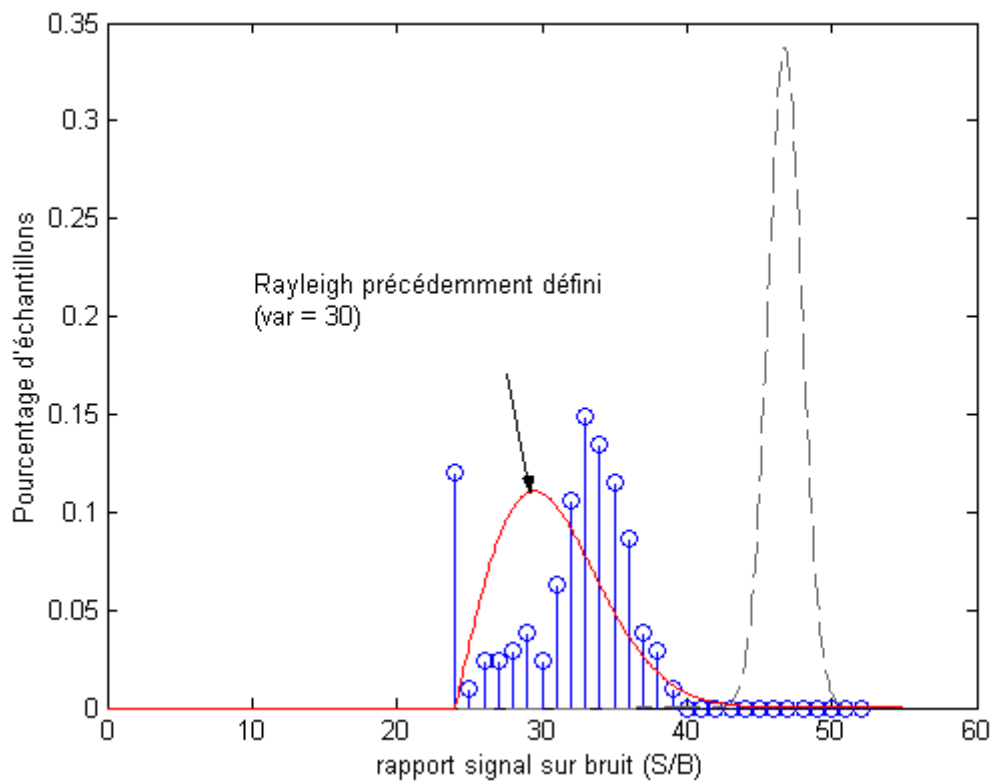


Figure 4.24. Satellite en visibilité directe.



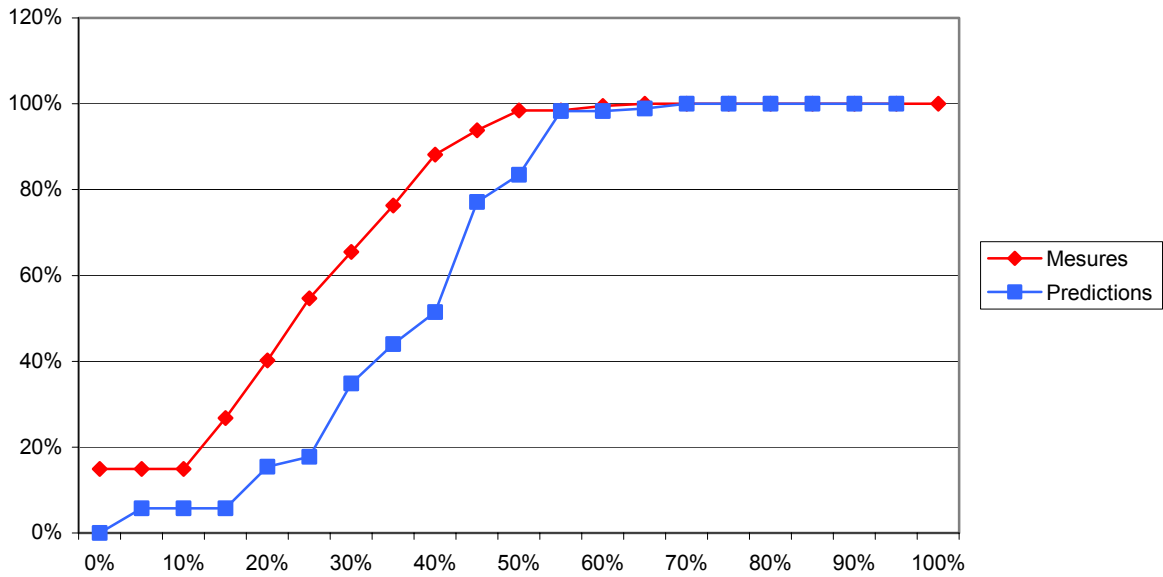
**Figure 4.25. Satellite reçus après une réflexion.**

Nous comparons les prédictions aux mesures par l'intermédiaire de la répartition des « pourcentages de satellites réfléchis par rapport au nombre total reçu ». Soit, pour chaque point de la trajectoire, le pourcentage  $p$  calculé selon l'équation (4.2).

$$p = \frac{\text{nb de satellites réfléchis}}{\text{nb total reçus}} \quad (4.2)$$

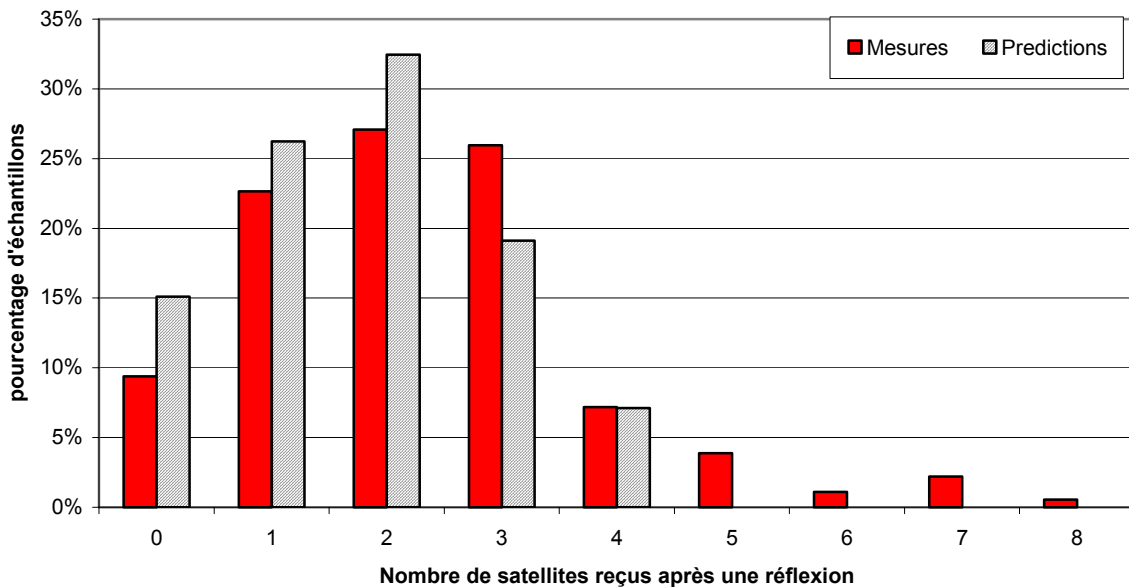
La fonction cumulative (figure 4.26) calculée à partir de ces données permet de constater que la courbe correspondant aux résultats expérimentaux est proche de celle des prédictions. Cependant, les résultats montrent que la proportion de satellites réfléchis sur le nombre total reçu est surestimée par PREDISSAT. Afin de déterminer si l'écart entre les mesures et les prédictions provient d'une erreur d'estimation sur le nombre de satellites visibles ou sur le nombre de satellites en NLOS, on observe, figures 4.27 et 4.28, les répartitions mesurée et prédite du nombre de satellites reçus après réflexion.



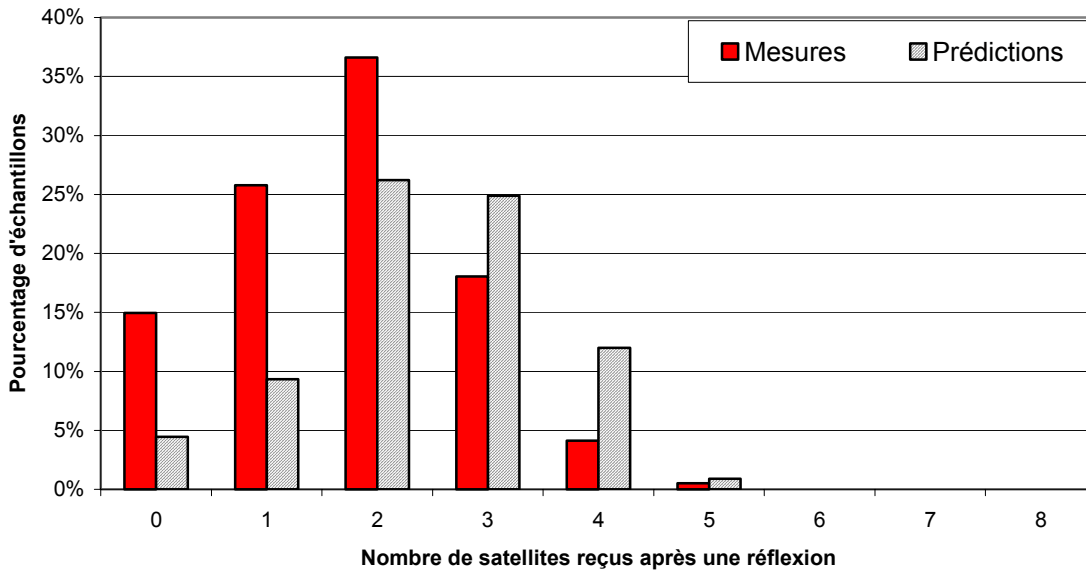


**Figure 4.26. Fonction cumulative de probabilité du pourcentage de satellites reçus après réflexion par rapport au nombre total de satellites reçus (portion D).**

Les histogrammes du nombre de satellites reçus après une réflexion obtenus d'après PREDISSAT sont comparés aux histogrammes du nombre de satellites classés d'après leur S/B, au cours des trajets B et D. Le récepteur peut recevoir entre 1 et 8 satellites réfléchis. On observe que les prédictions le long du trajet B sont assez proches des résultats de mesure et légèrement surestimées le long du trajet D.



**Figure 4.27. Répartition des satellites reçus en un point après réflexion le long du trajet B.**



**Figure 4.28. Répartition des satellites reçus en un point après réflexion le long du trajet D.**

L'observation complémentaire des résultats en nombre de satellites réfléchis et en pourcentage de satellites réfléchis permet de conclure que l'approche adoptée donne une assez bonne évaluation du nombre de satellites reçus par trajets multiples et surévalue légèrement le nombre de satellites visibles optiquement. Afin d'expliquer ces écarts nous proposons les deux hypothèses suivantes : soit le nombre ou les positions des masques sont mal estimés, soit le choix d'un seuil de 40 dBHz pour la classification des rapports S/B n'est pas exact.

Nous avons testé plusieurs valeurs de seuils de 41 à 43 dBHz qui ne modifient pas les écarts les prédictions et les mesures. Dans la quatrième partie de ce chapitre, nous proposons des améliorations de la reconstruction tridimensionnelle.

La courbe de la figure 4.26 montre que, le long du trajet D, la moitié des positions données par le récepteur sur ce trajet sont calculées avec un tiers de satellites réfléchis. Ce chiffre confirme que l'utilisation des satellites reçus après une réflexion augmente considérablement la disponibilité du système de localisation et qu'il convient maintenant d'évaluer l'erreur et/ou l'apport de ces satellites en terme de précision.

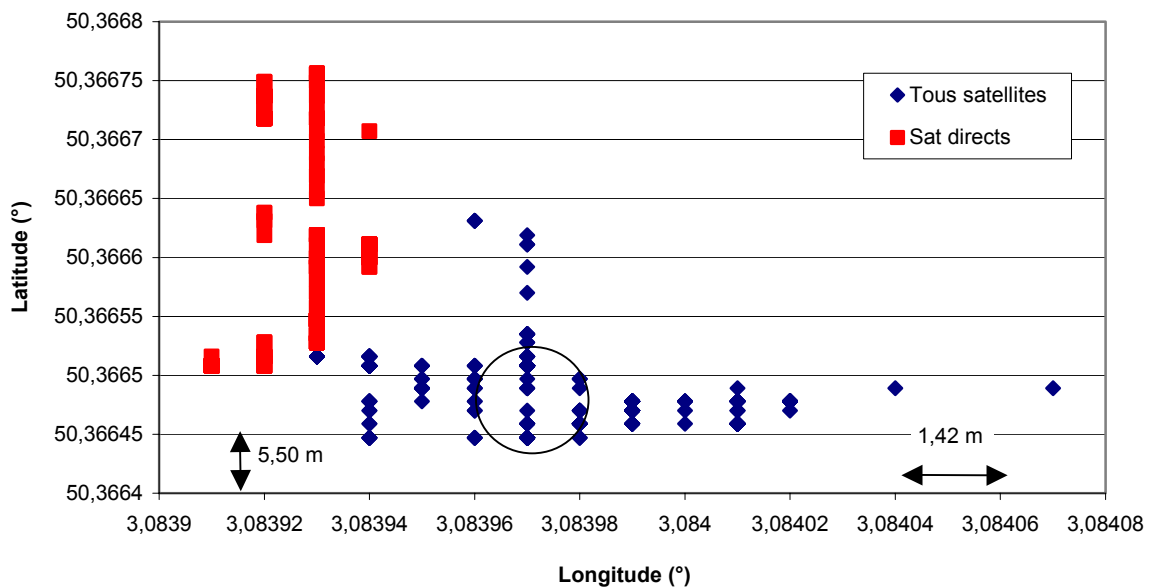
### 3.3.3 L'impact des signaux réfléchis sur la précision de la localisation

Les essais et les simulations ont montré que l'utilisation des satellites reçus après une réflexion est indispensable en environnement très masquant tel que le milieu urbain dense et qu'elle améliore nettement la disponibilité en terme de nombre de satellites reçus et couverture du système.

Nous avons observé que dans les rues très encaissées, le nombre de satellites reçus par trajets multiples peut représenter jusqu'à 50 % du nombre total de satellites reçus et, dans le chapitre 3, nous avons montré sur des cas simples que, plus le nombre de satellites utilisés est important, plus l'erreur de positionnement est faible. Nous vérifions ces conclusions dans un contexte urbain réel.

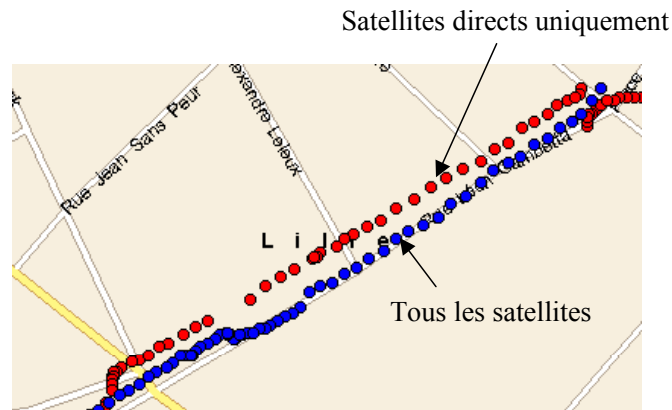
Les mesures ont été réalisées en statique puis en dynamique. Pour cela, deux campagnes de mesures sont réalisées successivement entre deux immeubles. Lors de la première campagne, le récepteur utilise tous les satellites disponibles, quels que soient leur rapport S/B à la réception. Lors de la deuxième, un seuil de réception minimal est imposé au récepteur à 7 AMU soit 40 dBHz. Ce seuil garantit l'utilisation des seuls satellites reçus par trajet direct. Cette bride restreint le nombre de satellites et seuls 3 à 4 satellites sont alors utilisés. Les points obtenus sont présentés et comparés

figure 4.29. Les positions bleues rassemblées dans la zone gauche de la figure sont issues du calcul utilisant les satellites en visibilité directe uniquement. Les rouges ont été calculées d'après tous les satellites disponibles. Les imprécisions actuelles de la mesure GPS ne permettent jamais d'obtenir un point unique par série de mesure. Les points sont donc dispersés « en nuage » autour d'une position moyenne (dont la précision est limitée par le nombre de décimales fournie par notre récepteur). Cependant, une projection des points sur une carte permet de constater que la position la plus juste se situe parmi les positions calculées avec tous les satellites et que les positions exploitant une partie seulement des satellites sont décalées dans l'espace de plusieurs mètres. Nous ne connaissons malheureusement pas la position exacte du récepteur, nous la représentons par une zone d'incertitude sur la figure 4.29.

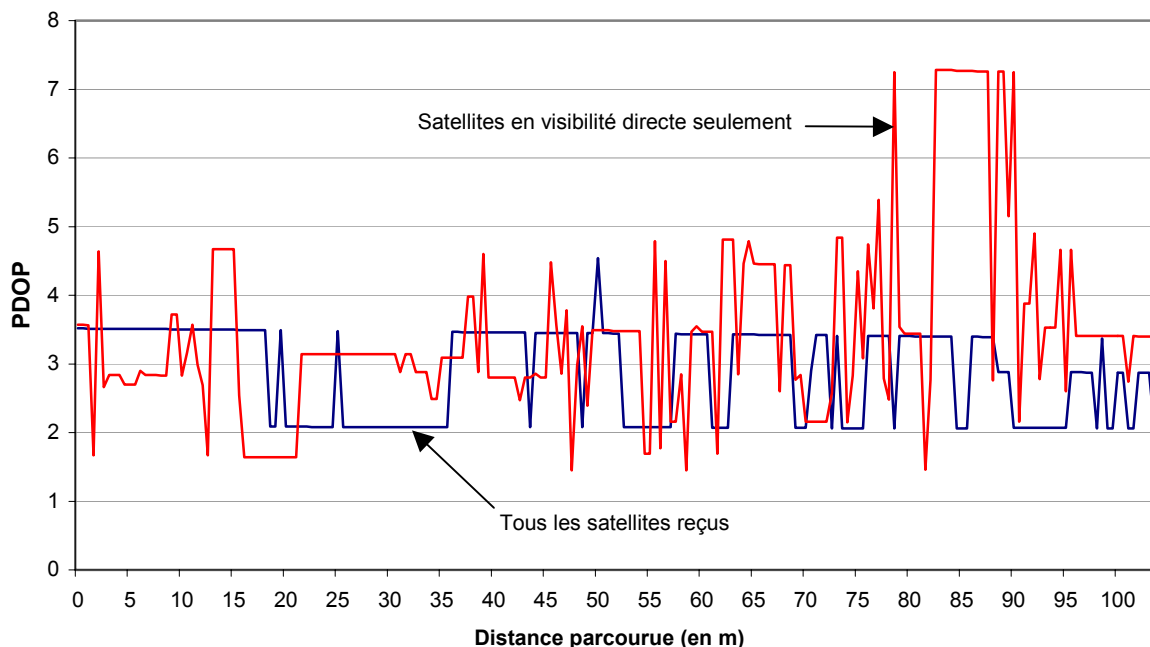


**Figure 4.29. Mesure statique utilisant tous les satellites ou les satellites en visibilité directe uniquement.**

Lors de mesures dynamiques, les points sont placés sur une carte routière afin de comparer leurs positions par rapport à la trajectoire. Le trajet, d'une durée totale d'une quarantaine de minutes, traverse divers types d'environnements essentiellement urbains et suburbains. L'exemple de la figure 4.30 montre, en rouge, les positions mesurées obtenues avec les satellites reçus en visibilité directe et, en bleu, celles calculées avec tous les satellites, placées sur une carte du logiciel MapPoint. Les positions sont fournies par le récepteur et sont filtrées (filtrage de Kalman) comme nous l'avons expliqué dans le premier chapitre de ce mémoire. Ceci explique la linéarité des trajectoires que nous avons obtenues alors que nous nous attendions à obtenir des nuages de points autour de cette trajectoire. La figure 4.30 montre que l'utilisation de tous les satellites donne une trajectoire plus proche de la trajectoire réelle. Ces résultats sont confortés par l'évolution du coefficient de précision géométrique PDOP donnée figure 4.31 en fonction de la distance parcourue le long du même trajet. On constate que le PDOP est beaucoup plus grand lorsque seuls les satellites en visibilité directe sont utilisés, ce qui signifie que la précision géométrique est moins bonne.



**Figure 4.30. Comparaison des précisions avec et sans utiliser les satellites reçus par trajets multiples.**



**Figure 4.31. Comparaisons des valeurs des PDOP avec et sans utiliser les satellites reçus par trajets multiples.**

Il convient maintenant de se poser la question de l'utilisation ou non de tous les satellites reçus dans le contexte transport pour le développement de systèmes « sécuritaires ». En effet, l'approche traditionnellement adoptée dans le domaine ferroviaire consiste à n'utiliser que les satellites reçus en visibilité directe dans le cas de localisation en sécurité. Cependant, les essais réalisés en environnement urbain confirment les résultats de simulation présentés dans le chapitre trois et montrent que la seule utilisation de satellites en visibilité directe conduit à une erreur de positionnement le long d'une trajectoire.

#### 4 Perspectives d'améliorations de l'outil

Nous avons présenté dans ce chapitre l'état de développement de PREDISSAT et les performances obtenues en environnement urbain. Dans cette dernière partie, nous présentons les principaux défauts identifiés lors de la validation de PREDISSAT. Des améliorations pourront être implémentées et

testées afin d'affiner les prédictions de cet outil. Nous proposons ici les pistes envisageables dès à présent.

#### 4.1 Acquisition des images

Les résultats présentés § 3.3 montrent que le nombre de satellites estimés en visibilité directe dans les environnements urbains est plus important que dans la réalité. Nous proposons ici trois hypothèses afin d'expliquer ce résultat.

L'étape de reconstruction de l'environnement autour de l'antenne consiste à déterminer l'azimut et l'élévation de chacun des obstacles à partir des distances et hauteurs respectives  $d$  et  $h$ . Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2,  $d$  et  $h$  sont liées aux caractéristiques du système d'acquisition des images par les grandeurs  $\delta$  et  $\Delta l$ . On rappelle que :

- la disparité  $\delta$ , liée à l'écart entre deux lignes de chaque image utilisées pour la stéréovision, améliore la précision de la mise en correspondance des obstacles lorsque qu'elle augmente mais accroît la difficulté de la mise en correspondance en raison de la déformation plus importante de l'image.
- La valeur du pas d'échantillonnage  $\Delta l$  est conditionnée par la fréquence maximale d'acquisition des images (25 images par seconde) et la vitesse de déplacement du véhicule.

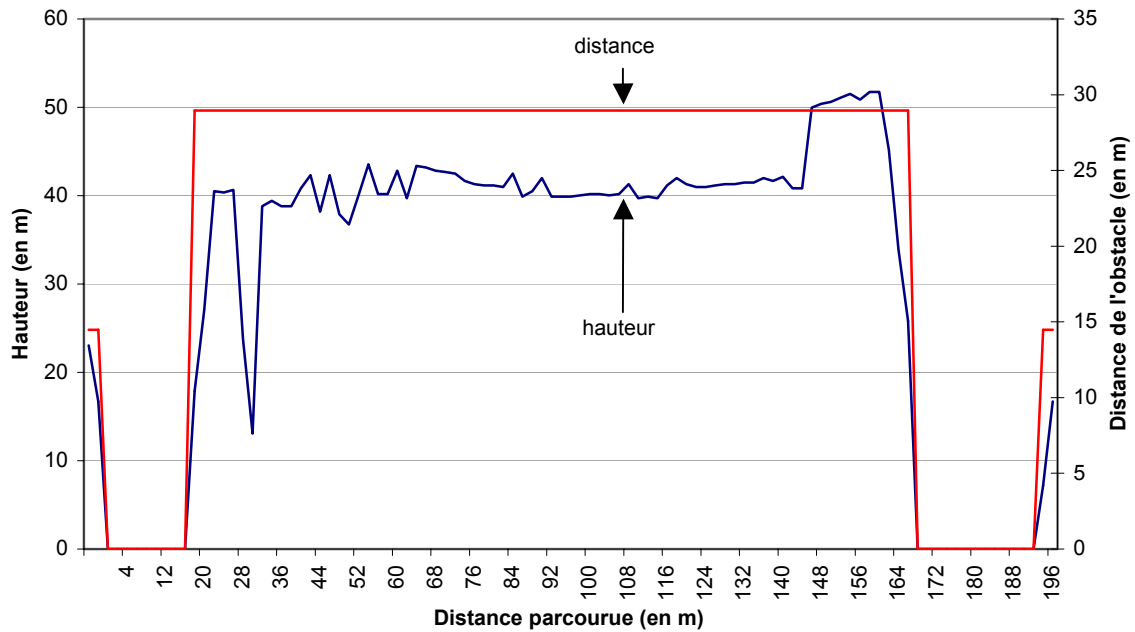
##### 4.1.1 Le réglage du pas d'échantillonnage

L'observation détaillée des enregistrements vidéo et des résultats obtenus dans ce chapitre lors de la reconstruction tridimensionnelle montrent que l'évaluation de la distance récepteur-obstacle par la méthode de stéréovision est largement surestimée. En effet, la figure 4.32 donne  $d = 50$  m et  $h = 40$  m alors que dans la scène réelle  $d = 7$  m et  $h = 15$  m.

Les calculs ont été détaillés dans le chapitre 2. On rappelle cependant que la distance est calculée selon l'équation 4.3. Elle est fonction de la distance  $L$  qui représente la distance parcourue par le véhicule entre deux images contenant le même point de l'environnement. L'erreur minimale sur  $L$  est égale au pas d'acquisition des images. Pour l'exemple présenté figure 4.32, le pas  $\Delta l = 2$  m. D'après l'équation (4.3), l'erreur sur la distance est alors égale à 15,6 m et se répercute sur la hauteur calculée comme selon (4.4).

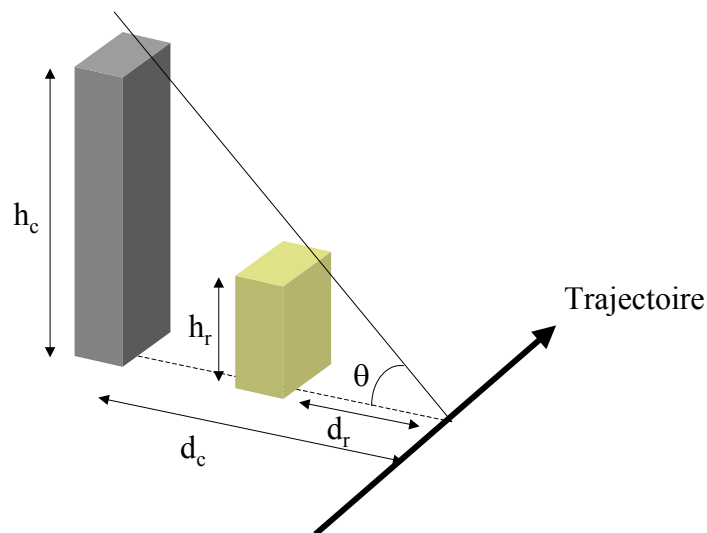
$$d = \frac{L}{\tan \alpha} \quad \text{où } \alpha \text{ est directement liée à la disparité} \quad (4.3)$$

$$h = d \tan el \quad \text{où } el \text{ représente l'élévation du satellite} \quad (4.4)$$



**Figure 4.32. Evaluation de la distance et la hauteur d'un immeuble en urbain d'après l'enregistrement d'une image tous les 2 m.**

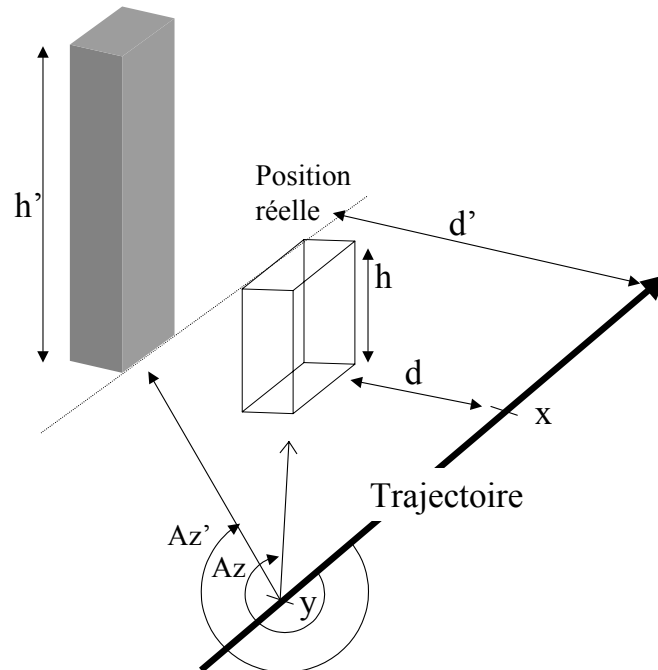
Cependant, cette erreur d'estimation sur la distance  $d$  est en partie compensée dans la suite du traitement. En effet, en chaque point de la trajectoire, l'élévation des masques est calculée tout autour de l'antenne à partir des distances et des hauteurs de chacun des obstacles. Les résultats montrent que la procédure place les obstacles plus loin qu'ils ne le sont dans l'environnement réel et par conséquent plus hauts. Figure 4.33, les obstacles réels et calculés sont repérés respectivement par les distances  $d_r$  et  $d_c$  de la trajectoire à l'obstacle et les hauteurs  $h_r$  et  $h_c$  de l'obstacle. On constate que l'angle d'élévation du masque perpendiculairement à la trajectoire est, dans les deux configuration, égal à  $\theta$ .



**Figure 4.33. Compensation des erreurs.**

Cette erreur d'estimation sur la distance  $d$  possède des répercussions plus importantes sur l'estimation de l'azimut sous lequel est vu l'obstacle. La figure 4.34 donne une illustration simple du problème. L'obstacle à la distance  $d$  et de hauteur  $h$  dans la scène réelle est placé par erreur lors de la

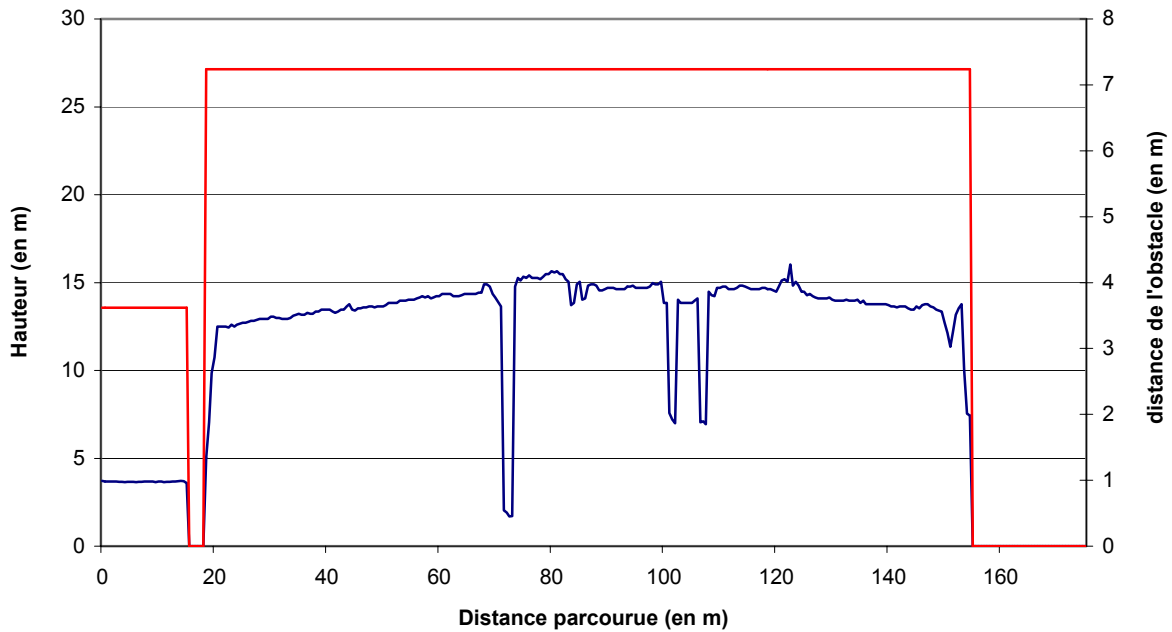
reconstruction à la distance  $d'$ , avec une hauteur  $h'$ . Lorsque le véhicule n'est plus en  $x$  à la perpendiculaire de l'obstacle mais au point  $y$ , l'obstacle reste masquant pour la réception. Dans la scène réelle il masquerait sous un azimut  $Az$ . Dans la scène reconstruite, on considère qu'il masque sous l'azimut  $Az'$ . Un satellite d'azimut  $Az$  sera donc considéré comme visible alors qu'il ne l'est pas et réciproquement.



**Figure 4.34. Masquage manqué causé par une mauvaise évaluation de la distance de l'obstacle.**

Dans le but d'améliorer ces résultats pour les utilisations futures, nous avons effectué un deuxième enregistrement du même obstacle en divisant le pas d'échantillonnage par 4, soit  $\Delta l = 50$  cm.

Nous présentons figure 4.35 les hauteurs et distances évaluées par PREDISSAT sur le même immeuble que celui traité avec un pas d'échantillonnage de 2 m. La distance à l'obstacle est d'environ 7 m et la hauteur moyenne de l'immeuble est estimée à 14 m au-dessus des caméras, soit environ 16 m. Ces résultats correspondent bien aux données réelles.

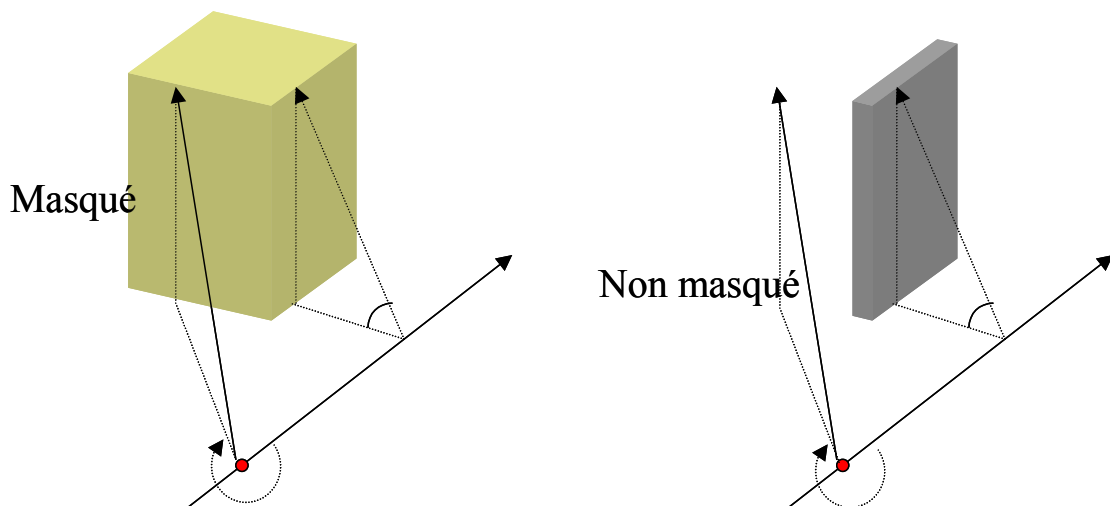


**Figure 4.35. Evaluation de la distance et la hauteur d'un immeuble en urbain d'après l'enregistrement d'une image tous les 50 cm.**

Un tel échantillonnage nécessite une plus grande capacité de stockage des images puisque nous utilisons 4 fois plus de données vidéo que dans la première configuration. Cette condition n'est cependant pas critique dans la mesure où le stockage des données GPS limite encore plus fortement les durées d'enregistrement.

#### 4.1.2 La profondeur d'un obstacle

Les obstacles ont une profondeur que l'image en deux dimensions ne permet pas d'évaluer. La figure 4.36 illustre ce cas particulier où deux obstacles à la même distance et de même hauteur avec des profondeurs différentes conduiraient ou non à masquer le signal.

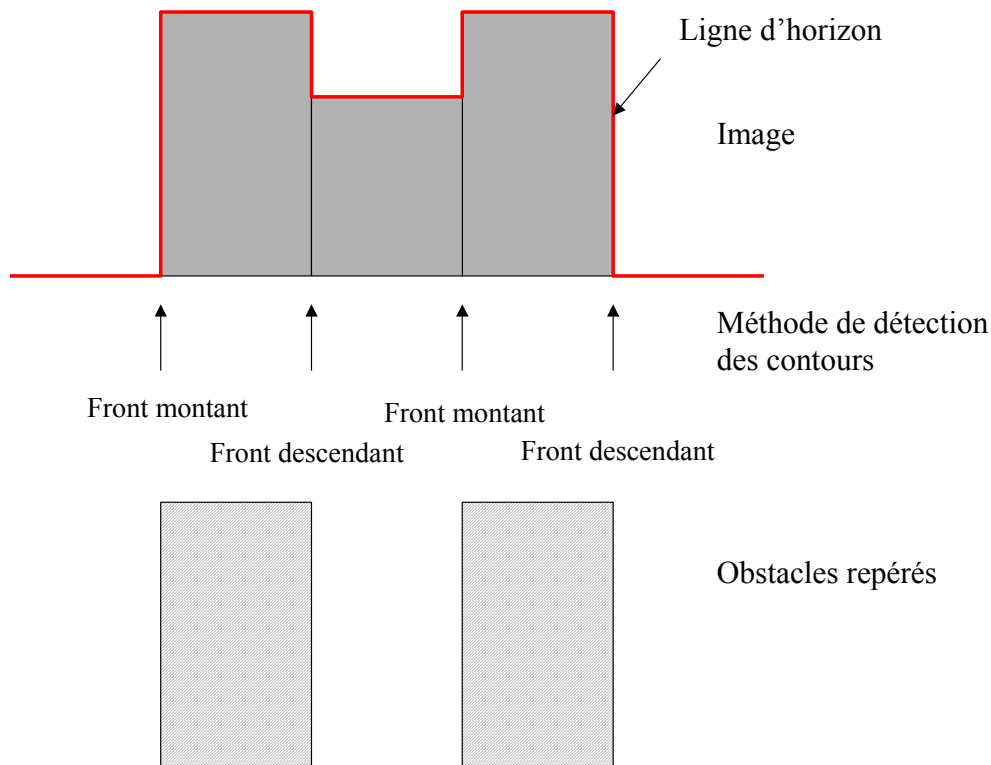


**Figure 4.36. Notion de profondeur d'un obstacle.**



#### 4.1.3 Cas particuliers d'obstacles non isolés

Lorsqu'un obstacle de hauteur faible est encadré par deux obstacles plus élevés (figure 4.37), la méthode de détection des contours implantée dans PREDISSAT ne permet pas de calculer la hauteur de cet obstacle qui n'est donc pas détecté.



**Figure 4.37. Obstacles non détectés par la méthode des contours.**

Cette non-détection peut être résolue en faisant l'hypothèse que le bâtiment central et les deux qui l'entourent sont à égales distances du véhicule. En utilisant l'élévation de ce bâtiment (qui n'est pas nulle) sa hauteur peut être évaluée.

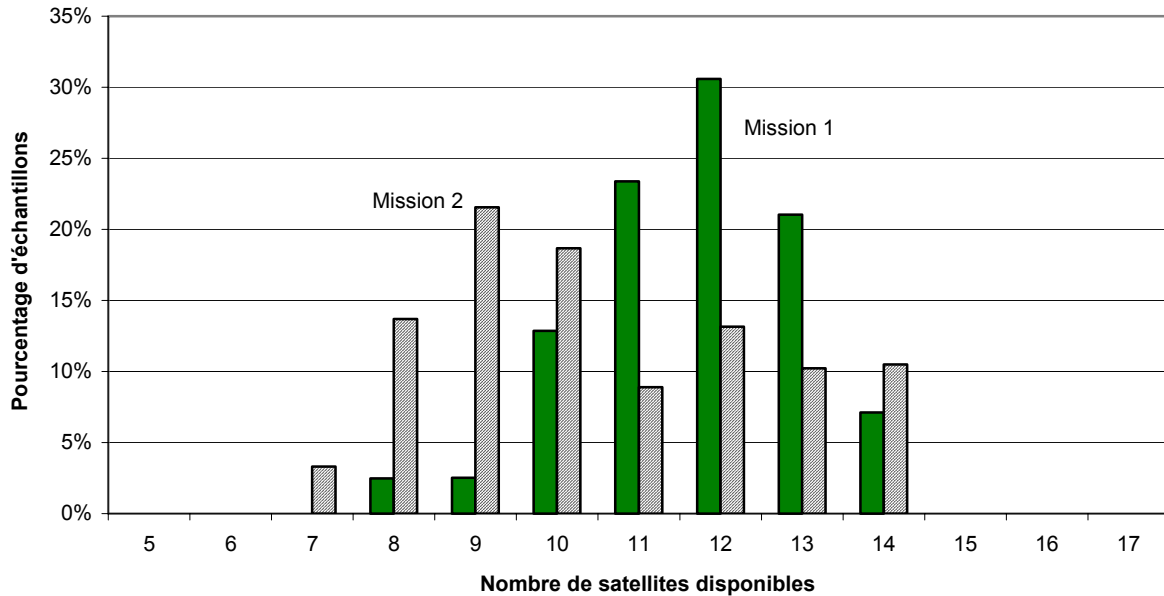
## 4.2 Application dans le contexte ferroviaire

### 4.2.1 La couverture radioélectrique

Dans ce chapitre, nous avons montré que les résultats de PREDISSAT en terme de nombre de satellites reçus étaient proches du nombre effectivement reçu. Nous pouvons désormais appliquer l'outil afin d'obtenir des prédictions pour tout trajet réalisé sur un trajet connu. On parle alors de mission du train caractérisé par des informations telles que l'heure, la date, la trajectoire et les éventuels arrêts du véhicule.

Un passage vidéo permet la reconstruction tridimensionnelle de l'environnement du mobile. Les simulations des positions des satellites autour de l'antenne le long du trajet déterminent l'évolution du nombre de satellites reçus. Ainsi pour une mission donnée, il est possible de définir les éventuelles zones insuffisamment ou non couvertes par la constellation. Ce type d'analyse est d'autant plus intéressant que les premières simulations montrent que les prédictions varient visiblement d'une mission à l'autre. Ce résultat est illustré figure 4.38. Deux missions de trains sur le trajet Bordeaux –

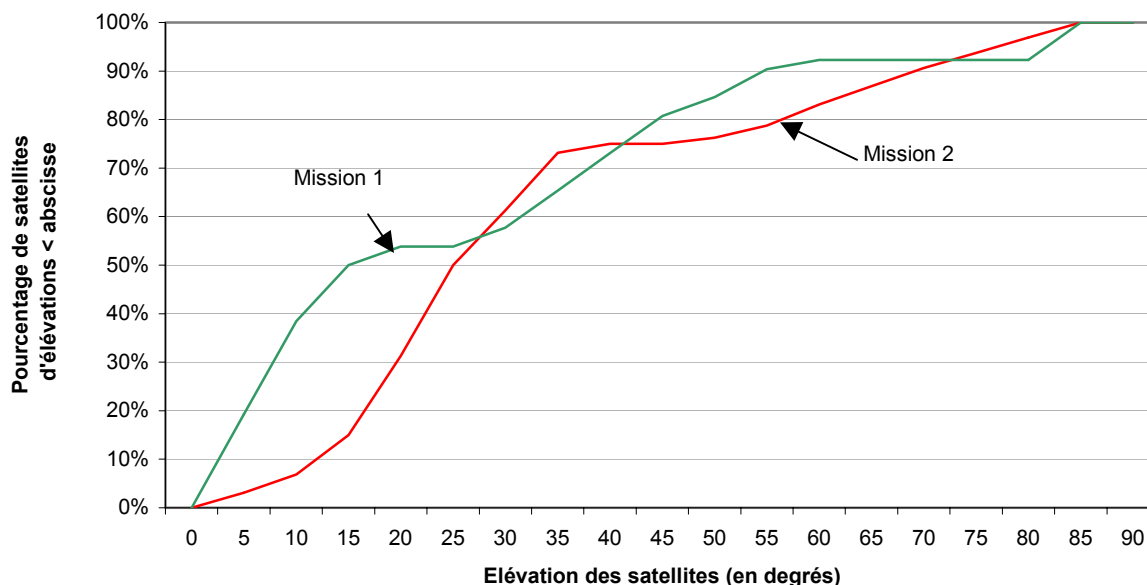
Poitiers ont été simulées. Lors de la mission 1, le train part à 6h34. Dans la mission 2, il part le même jour, deux heures plus tard. La figure 4.38 compare la distribution du nombre de satellites disponibles au cours de la mission 1 à celle de la mission 2. Les répartitions du nombre de satellites visibles sont différentes d'une mission à l'autre. Les allures des deux répartitions sont proches mais ne sont pas centrées sur la même valeur (12 et 9 satellites).



**Figure 4.38. Répartitions du nombre de satellites disponibles lors des missions 1 et 2.**

On observe ensuite les distributions des élévations des satellites disponibles au cours des six heures de trajet du train. Dans le cas où huit satellites sont disponibles, le pourcentage de satellites d'élévations supérieures à X degrés est calculé par pas de cinq degrés. Les résultats sont présentés figure 4.39, sous forme de fonction cumulative pour les deux missions décrites. On remarque ainsi que si l'élévation moyenne du masque le long du trajet est égale à 20°, la disponibilité lors de la mission 1 est meilleure que lors de la mission 2 car 50 % des satellites seront reçus contre seulement 30 % des satellites lors de la mission 2.

L'exploitation de PREDISSAT permet ainsi de trouver les configurations les plus critiques qui ne permettront pas de répondre aux spécifications du système de navigation.



**Figure 4.39. Fonction de répartition des élévations des satellites disponibles, au cours des missions 1 et 2.**

#### 4.2.2 Génération d'une base de données

L'application de PREDISSAT peut servir à la construction d'une base de données contenant des informations sur le mode de réception d'un ou des satellites depuis chaque point de la trajectoire (NLOS, LOS ou bloqué), ou des corrections simples applicables aux résultats lorsque le trajet direct pour la réception n'est pas disponible à l'instar des méthodes appliquées en télécommunications.

On imagine que cette base de données pourrait être embarquée et intégrée à l'outil de navigation comme complémentaire du système. Elle peut contenir :

- des informations sur la visibilité : nombre de satellites visibles, nombre de satellites reçus par trajets multiples (et leurs identités),
- la localisation des « trous » : le système est averti de l'absence de position sur le prochain tronçon,
- des informations quantifiant la précision de la localisation : les DOPs (erreur géométrique), l'erreur induite par les trajets multiples...

En effet, si les deux premières informations citées sont directement extraites de PREDISSAT, il est aisé de calculer les coefficients de précisions de type DOPs (définis dans le chapitre 1) d'après les positions des satellites issues de la simulation.

Dans le cadre du projet européen LOCOPROL (Low Cost satellite base train location system for signalling and train PROtection for Low density traffic railway lines), la connaissance a priori des coordonnées géographiques de la voie permet d'utiliser uniquement des paires de satellites dans le calcul de localisation du mobile. A cet effet, il devient particulièrement important d'utiliser les paires de satellites les plus appropriées, soit les moins affectées par le trajet multiple et aux positions géométriques les plus judicieuses. Toutes les informations nécessaires sont dès à présent disponibles dans l'outil. L'INRETS poursuit, dans le cadre du projet, le développement de PREDISSAT afin d'intégrer cette fonction et d'extraire les couples de satellites optimaux de l'ensemble des satellites prédits au-dessus du masque et de leurs positions autour de l'antenne.

### 4.2.3 Génération de gabarits

Parmi les besoins définis dans le cadre du projet LOCOPROL figure la caractérisation de la disponibilité des satellites le long de voies ferroviaires. Ces besoins se traduisent notamment en termes de probabilités :

- probabilité de masquage en fonction des différents types d'environnements,
- probabilité de durée des masques ou de durée de visibilité,
- probabilité de recevoir x satellites parmi y par trajets multiples...

L'utilisation intensive de PREDISSAT permet l'intersection des données de masquage, statistiques ou réelles, avec les données statistiques de positions des satellites. De cette utilisation, nous pensons pouvoir définir des lois générales ou « gabarits » permettant de mettre en évidence et de comptabiliser l'occurrence des configurations conduisant à une dégradation des performances du système incompatibles avec les exigences de sécurité ferroviaire.

## **5 Conclusion**

Nous avons montré dans le chapitre 2 que l'approche optique implémentée lors d'une première version de PREDISSAT permettait de déterminer efficacement le nombre de satellites reçus en visibilité directe. Cependant, nous avons observé un écart entre les prédictions et les mesures dans les environnements très masquants. Nous avons fait l'hypothèse que les satellites non inclus dans la prédiction étaient les satellites reçus par trajets multiples et en absence de trajet direct. Ceci nous a conduit, dans le chapitre 3, à caractériser la réception de ce type de signaux. Nous avons conclu que seule la prise en compte des satellites reçus après une réflexion est nécessaire dans le contexte de la localisation par satellites. Les expérimentations nous ont aussi permis de distinguer les différents états des satellites reçus (LOS ou NLOS) à partir des rapports S/B.

Partant de ces conclusions, nous avons présenté la méthode simple, implémentée dans PREDISSAT, permettant de considérer l'ensemble des satellites reçus (en LOS ou après une réflexion) dans les prédictions. Les performances de cette deuxième version de l'outil ont été évaluées dans plusieurs environnements de l'agglomération lilloise. Au vu des résultats obtenus, nous avons montré que la prise en compte des satellites reçus après réflexion dans la prédiction est indispensable dans les environnements très masqués et que l'estimation du nombre de satellites réfléchis est proche des valeurs réelles mesurées. Nous proposons pour affiner l'outil, des améliorations des techniques d'acquisition et de traitement des images qui seront rapidement testées.

Nous avons montré que la diminution de la fréquence d'échantillonnage des images permet d'ores et déjà d'améliorer l'estimation des distances et hauteurs des obstacles. A plus long terme, l'utilisation d'un stéréoscope bi-caméras, évoquée dans le chapitre 2, pourra quant à elle permettre une reconstruction tridimensionnelle de chaque point de l'image et donc une précision plus importante de masquage et de profondeur des obstacles. Sa mise en œuvre est cependant plus délicate.

Enfin, nous avons présenté les utilisations de l'outil envisagées à court terme et mises en application dans plusieurs projets en cours au laboratoire. L'utilisation de PREDISSAT peut être étendue à toute constellation de satellites au-delà des seules constellations de satellites de navigation et notamment, cet outil peut permettre la caractérisation des masques afin de prédire la disponibilité des liens de communication satellitaire.

## Conclusion générale

Dans le domaine des transports terrestres, les applications nécessitant la localisation des mobiles sont aujourd'hui au cœur du développement de la mobilité durable. Les solutions techniques existantes ont fait au cours des dernières années des progrès considérables associés à des baisses de coût qui rendent possible des utilisations multiples tant professionnelles que personnelles. Parmi elles, l'utilisation des systèmes spatiaux est la plus prometteuse. Le système GPS domine le marché depuis quelques années, notamment parce que la constellation GPS offre une couverture mondiale, mais aussi pour la précision qu'il offre et son coût relativement faible. Il sera très prochainement complété par un équivalent européen nommé GALILEO. Cependant, l'utilisation de cette technologie pose des difficultés dans les zones masquées pour la réception telles que les tunnels, les milieux urbains et les passages en tranchées ferroviaires. Ces masquages diminuent fortement la disponibilité d'un système de localisation par satellite en environnement transport.

Dans ce mémoire, nous avons présenté les recherches réalisées pendant cette thèse afin de mettre au point un outil de prédiction de la disponibilité d'un système de localisation par satellites le long de la trajectoire d'un mobile. Cet outil, décrit dans le chapitre 2, utilise un système embarqué de deux caméras qui filment, lors d'un passage unique, l'environnement optique de l'antenne de réception. Ces enregistrements sont analysés selon un processus de stéréovision mono-caméra. Les angles d'élévation des obstacles masquant la réception du signal de chaque côté du véhicule sont extraits des images et les distances et hauteurs de chacun des obstacles sont placés dans l'espace le long du trajet, à 360° autour de l'antenne, par des méthodes de stéréovision. Un logiciel de prédiction des positions des satellites est ensuite utilisé afin de simuler quelles que soient la date et l'heure du trajet du véhicule sur cette même trajectoire, le nombre de satellites que le récepteur pourrait recevoir si l'environnement était libre de tout obstacle. L'intersection entre les positions de ces satellites et des masques donne l'évolution du nombre de satellites qui seront effectivement reçus.

Cet outil, nommé PREDISSAT, a été testé et validé lors de campagnes de mesures dans différents environnements : routiers et ferroviaires. Il a montré une bonne concordance entre la prédiction et les mesures. Cependant, les résultats ont fait apparaître les limites d'une première version de l'outil qui ne tenait compte que des satellites dont le signal est reçu en visibilité directe, excluant les quelques satellites reçus alors qu'ils ne sont pas visibles optiquement.

Bien qu'ils ne soient pas en visibilité directe, les satellites sont reçus parce que le signal atteint le récepteur après avoir suivi des chemins multiples. Afin d'intégrer ces satellites dans nos prédictions, il fallait déterminer un critère de sélection de ces satellites qui puisse être implémenté de façon simple dans l'outil. Pour ce faire, nous avons étudié la réception du signal satellite par trajets multiples. Après avoir rappelé les différents phénomènes mis en jeu dans la propagation par multichemins, nous présentons les simulations et expérimentations mises en œuvre pendant ces travaux de thèse et visant à caractériser la réception des signaux optiquement masqués. Les résultats présentés dans le troisième chapitre ont permis de conclure que, dans le contexte de l'utilisation du signal par un récepteur de type GPS pour de la localisation, il n'est pas nécessaire de considérer les rayons diffractés ni ceux ayant subi plusieurs réflexions. En effet, le signal reçu est alors trop atténué pour être exploité par le récepteur.

Cette conclusion nous a permis de développer une méthode géométrique simple de prise en compte des satellites masqués. Dans la configuration de type canyon urbain, nous calculons l'angle d'élévation minimal depuis lequel un satellite est reçu après une réflexion sur le bâtiment qui lui fait face avant d'atteindre le récepteur. Ce calcul a été implémenté dans PREDISSAT et nous avons testé cette deuxième version de l'outil en environnement urbain dense. Les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats de la prédiction dans le chapitre quatre. La comparaison a montré que l'apport des satellites reçus après une réflexion est effectivement indispensable en environnement très dense en raison de l'importance de leur nombre au regard du nombre total de satellites utilisés. Le nombre de satellites dans l'état NLOS estimé est également proche du nombre effectivement reçu. L'application de PREDISSAT aux séries d'enregistrements réalisés a mis en évidence la classification possible des environnements en fonction des élévations de leurs masques (urbain, suburbain, rural...).

L'outil est d'ores et déjà exploitable et est utilisé dans le cadre de deux projets en cours à l'INRETS-LEOST. L'analyse fine des résultats nous a permis de proposer plusieurs évolutions à court terme. L'évaluation des masques à partir de la connaissance optique des obstacles pourra être affinée par la mise en œuvre d'un stéréoscope bi-caméras. L'utilisation d'un tel système serait cependant difficile en raison de l'encombrement du système et surtout des difficultés liées à la calibration. Cette solution sera cependant testée dans les mois à venir. D'autres améliorations peuvent être apportées au système mono-caméra. D'une part, l'optimisation des paramètres d'acquisition des images a montré son efficacité sur la précision de la localisation des obstacles dans la scène et d'autre part, il sera nécessaire d'optimiser les procédés de stockages des informations pour une application sur de longs parcours ferroviaires.

Il convient maintenant d'exploiter l'outil PREDISSAT de façon intensive, afin de bénéficier de résultats statistiques à partir desquels nous pourrions extraire des règles plus générales de probabilités de masquage ou de visibilité en fonction du type d'environnement. Pour cela, certaines des procédures de traitement doivent encore être automatisées. Dans la version actuelle, la correspondance entre les images et les positions des satellites se fait en temps. Les premières utilisations systématiques de l'outil sur une trajectoire ferroviaire ont montré qu'il sera plus efficace de synchroniser l'ensemble des données par l'intermédiaire des coordonnées géographiques de la ligne ferroviaire. Cette modification nécessite l'enregistrement de la vitesse du véhicule.

Nous avons proposé quelques pistes de réflexion relatives à l'impact du trajet multiple sur la mesure de pseudo-distance et sur la précision de la localisation. Il est aujourd'hui difficile de valider de façon expérimentale les simulations présentées car nous ne pouvons pas nous affranchir du traitement effectué par le récepteur lui-même et exploiter les données brutes mesurées. En effet, les récepteurs disponibles sur le marché décrits dans le premier chapitre utilisent un filtre de Kalman sur l'ensemble des mesures qu'ils réalisent avant de donner la position du mobile.

Enfin, dans le quatrième chapitre, des simulations ont montré la grande disparité de la disponibilité de la constellation sur une même trajectoire au cours du temps. Il convient désormais, à partir de PREDISSAT, de concevoir une base de données utilisable directement par le système de localisation embarqué qui permettra de garantir les exigences de sécurité du système complet. Cette base de données doit contenir l'ensemble des informations dont nous disposons grâce à PREDISSAT

(géométrie des satellites, géométrie des masques, utilisation de l'erreur prédite, conséquence sur la précision...) et elle doit être valide quels que soient l'heure et le point sur la trajectoire. Ce travail est déjà en cours dans le cadre du projet LOCOPROL.

## Références bibliographiques :

- [Akturan, 95] R. AKTURAN, W.J. VOGEL, Optically Derived Elevation Angle Dependence of Fading for Satellite PCS, *Proceedings of the Nineteenth NASA Propagation Experimenters Meeting (NAPEX XIX) and the Seventh Advanced Communications Technology Satellite (ACTS) Propagation Studies Workshop (APSW VII)*, Fort Collins, Colorado, June 14-16, pp. 127-132.
- [Heddebaut, 95] M. HEDDEBAUT, J. RIOULT, M. BERBINEAU, Balise de transmission pour système IAGO autorisant la transmission d'informations à grand débit, la détection du sens de marche fournissant un top de passage précis et protégée contre la diaphonie, Dépôt d'enveloppe SOLEAU à l'INPI n °38993 210895 - 08/1995
- [Laoufi, 00] M. LAOUFI, M. HEDDEBAUT, M. CUVELIER, J. RIOULT, J.M. ROUVAEN, Positioning Emergency Calls along Roads and Motorways using a GSM Dedicated Cellular Radio Network, *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2000/Fall)*, Boston Sep. 2000.
- [Marais, 99] J. MARAIS, Etude théorique et expérimentale pour la prévision des phénomènes de masquage dans le cadre de la localisation par GPS en milieu ferroviaire, Rapport de DEA de l'Université de Lille, laboratoire d'accueil INRETS-LEOST, juin 99.

### Chapitre 1 :

- [Abriat, 98] E. ABRIAT, Satellite-based Radiodetermination Techniques & Systems Assesment, Final Report Deufrako – Apendix P, WP 3.1.
- [Botton, 97] S. BOTTON, F. DUQUENNE, Y. EGELS, M. EVEN et P. WILLIS, GPS – Localisation et Navigation, Editions Hermès, Paris, 1997.
- [Brunner, 93] F.K BRUNNER, W. M. WELSCH (1993). Effect of the troposphere on GPS measurements. *GPS World*, January, Vol. 4, No. 1, pp. 42-51.
- [Carle, 00] C. CARLE, Le programme Galiléo – d'EGNOS à Galiléo, *Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, n°8, Sept. 2000.
- [Cottinet, 98] M. COTTINET, Caractéristiques et principales applications des systèmes de localisation des mobiles, *RTS n°61*, Oct-Déc. 1998.
- [Diginext, 96] DIGINEXT, Estimation non linéaire optimale. Filtrage Particulaire, Oct. 1996.
- [Drane, 98] C. DRANE, C. RIZOS, Positioning Systems in Intelligent Transportation Systems, Artech House, Boston, 1998.
- [Hue, 01] C. HUE, J.P. LE CADRE, P. PEREZ, Trajectographie multi-objets par filtrage particulaire, *Actes des journées francophones des jeunes chercheurs en analyse d'images et perception visuelle, ORASIS'2001*, pages 511-520, Cahors, Juin 2001.
- [Jean, 99] B. JEAN, P. BRUNEL, Localisation par satellite pour les véhicules ferroviaires, *Revue Générale des Chemins de Fer*, n°6, juin 1999.
- [Kaplan, 96] E.D. KAPLAN, Understanding GPS – Principles and applications, Mobile Communication Series, Artech House, Londres, 1996.
- [Marais, 98] J. MARAIS, B. MEUNIER, M. BERBINEAU, Utilisation du traitement d'images pour l'évaluation de la disponibilité des satellites GPS le long d'une voie de chemin de fer, *Revue Générale des Chemins de Fer*, n°6, juin 1999.



- [Morioka, 00] Y. MORIOKA, T. SOTA, M. NAKAGAWA, An Anti-Car Collision System Using GPS and 5.8 GHz Inter-Vehicle Communication at an Off-Sight Intersection, *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference VTC'2000*, Boston, 2000.
- [Ostan, 01] L. OSTAN, IENAC L 98, Analyse des performances des systèmes de navigation par satellites en zone urbaine, *Mémoire de fin d'études de l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile*, Toulouse, Juin 2001.
- [Shaw, 00] M. SHAW, K. SANDHOO, D. TURNER, Modernization of the global positioning system, *GPS World*, Oct. 2000.
- [Spilker, 96] J.J. SPILKER Jr., (1996) Tropospheric Effects on GPS, in *Global Positioning System, Theory and Applications, Volume 1. Progress in Astronautics and Aeronautics 163. American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Pp. 517 – 546.
- [Tatkeu, 99] C. TATKEU, Faisabilité de la localisation de mobiles terrestres par radiogoniométrie et à l'aide d'un réseau de radiotéléphonie GSM, *Thèse soutenue à l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, 1999.
- [Yarlagadda, 97] R. YARLAGADDA, I. ALI, N. AL-DHAHIR, J. HERSHEY, Geometric Dilution of Precision (GDOP) : Bounds and properties, General Electric Company, Aug. 1997.

## **Chapitre 2 :**

- [Burie, 95] J.C. BURIE, Mise en correspondance d'images linéaires stéréoscopiques. Application à la détection d'obstacles à l'avant des véhicules routiers, *Thèse soutenue à l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, 1995.
- [Dooze, 01] D. DOOZE, Conception et réalisation d'un stéréoscope bimodal à portée variable. Application à la détection d'obstacles à l'avant de véhicules guidés automatisés, *Thèse soutenue à l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, 2001.
- [Malicorne, 01] M. MALICORNE, Analyse des performances de systèmes de navigation par satellites pour les applications en environnement urbain, thèse de l'ENSAE, Déc. 2001.
- [Ruichek, 97] Y. RUICHEK, Stéréovision linéaire par réseau de neurones de Hopfield. Application à la détection d'obstacles à l'avant des véhicules routiers, *Thèse soutenue à l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, 1997.
- [STK] Logiciel de prédiction de passage des satellites, développé par Analytical Graphics, Inc. [www.stk.com](http://www.stk.com), commercialisé en France par la société Teuchos.
- [Vogel, 95] W.J. VOGEL, G.W. TORRENCE, H. LIN, Simultaneous Measurements of L- and S-Band tree shadowing for space-earth communications, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, Vol. 43, pp 713-719, 1995.

## **Chapitre 3 :**

- [Barts, 92] R. M. BARTS et W. L. STUTZMAN, Modeling and simulation of mobile satellite propagation, *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, Vol. 40. n°4, pp 375-382, avril 1992.
- [Karasawa, 97] Y. KARASAWA, K. KIMURA, K. MINAMISONO, Analysis of Availability Improvement in LMSS by Means of Satellite Diversity Based on Three-State Propagation Channel Model, *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, Vol. 46, No 4, Nov. 1997.
- [Lee, 82] W.C.Y. LEE, *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1982.

- [Malicorne, 01] M. MALICORNE, Analyse des performances de systèmes de navigation par satellites pour les applications en environnement urbain, *thèse de l'ENSAE*, Déc. 2001.
- [Marais, 01] J. MARAIS, Développement d'un outil d'analyse de la couverture radioélectrique d'une constellation de satellites le long d'une trajectoire, *Rapport annuel d'activité déc. 2000-déc. 2001*, décembre 2001.
- [Parsons, 01] J.D. PARSONS, The Mobile Radio Propagation Channel, Ed. Wiley, 2<sup>nd</sup> Edition, 2001.
- [Rappaport, 01] T.S. RAPPAPORT, Wireless Communications : Principles and Practice, Hardcover, 736 pages, 2<sup>nd</sup> edition, 2001.
- [Saunders, 99] S.R. SAUNDERS, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Ed. Wiley, 1999.
- [Vandamme, 96] J. VANDAMME, Modélisation des perturbations engendrées par la présence d'obstacles sur la propagation des ondes hyperfréquences en milieu urbain. Application à la localisation de véhicules et aux télécommunications en tunnel, *Thèse soutenue à l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, 1996.
- [Vogel, 90] W.J. VOGEL, J. GOLDBIRSH, An overview of results derived from mobile-satellite propagation experiments, *Actes de l'International Mobile Satellite Conference*, pp 219-224, Ottawa, 1990.
- [Wang, 00] S.S. WANG et L. HSU, Improved GPS Location Positioning in NLOS Propagation Environments, *AP 2000*, Davos, Suisse, 9-14 avril 2000.

#### **Chapitre 4 :**

- [Saunders, 96] S.R. SAUNDERS, B.G. EVANS, Physical model of shadowing probability for land mobile satellite propagation, *Electronics Letters*, Vol. 32, n°17, 15<sup>th</sup> Aug. 1996.

#### **Annexes :**

- [Lee, 82] W.C.Y. LEE, Mobile Communications Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1982.
- [Mariage, 92] P. MARIAGE, Etude théorique et expérimentale de la propagation des ondes hyperfréquences en milieu confiné ou urbain, *Thèse soutenue à l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, 1992.
- [Saunders, 99] S.R. SAUNDERS, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Ed. Wiley, 1999.

# Glossaire

TOA	Time Of Arrival
GSM	Global System for Mobile communication
GPS	Global Positioning System
GLONASS	GLObal'naya Navigatsionaya Sputnikovaya Sistema
TDOA	Time Difference Of Arrival
AOA	Angle Of Arrival
WGS 84	World Geodetic System 1984
RGF 93	Réseau Géodésique Français
NAVSTAR	Navigation System by Timing And Ranging
Code C/A	Coarse/Acquisition code
Code P	Precision Code
PRN	Pseudo Random Number
PPS	Precise Positioning Service
SPS	Standard Positioning Service
Modulateur BPSK	Binary Phase Shift Keying
RTK	Real Time Kinematic
DOD	Department Of Defense
AS	Anti Spoofing
SA	Selective Availability
URE	User Equivalent Range Error
GDOP	Geometric Dilution Of Precision
PDOP	Position Dilution Of Precision
TDOP	Time Dilution Of Precision
VDOP	Vertical Dilution Of Precision
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed
DGPS	Differential-GPS
LADGPS	Local Area Differential-GPS
WADGPS	Wide Area Differential-GPS
WAAS	Wide Area Augmentation System
GNSS	Global Navigation Satellite System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
MEO	Medium Earth Orbit

LEO	Low Earth Orbit
OA / CA	Open Access / Control Access
DEUFRAKO	Deutsch Französisch Kooperation
PREDISSAT	Predictive Software for Satellite Availability in the field of Transport
LOS / NLOS	Line Of Sight / Non Line Of Sight
STK	Satellite Tool Kit
NORAD	North American Aerospace Defense Command
CCD	Charge Coupled Device
AMU	Amplitude Measurement Unit
S/B	Rapport Signal sur Bruit
NMEA	National Marine Electronics Association
LOCOPROL	LOW COst satellite base train location system for signalling and train PROtection for Low density traffic railway lines
ULCO	Université du Littoral Côte d'Opale
INRETS	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
LEOST	Laboratoire Electronique, Ondes et Signaux pour les Transports
USTL	Université des Sciences et Technologies de Lille
TELICE	Laboratoire Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique
UVHC	Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
IEMN-DOAE	Institut d'Electronique et de Microélectronique du Nord – Département Opto-Acousto-Electronique

# **Annexes**

Annexe 1 : Calcul des points d'impacts

Annexe 2 : Simulation par tracé de rayons 3D

Annexe 3 : L'équipement développé pour les mesures

Annexe 4 : Modèles de canal de propagation de Rayleigh et Rice

## Annexe 1 : Calcul des points d'impacts

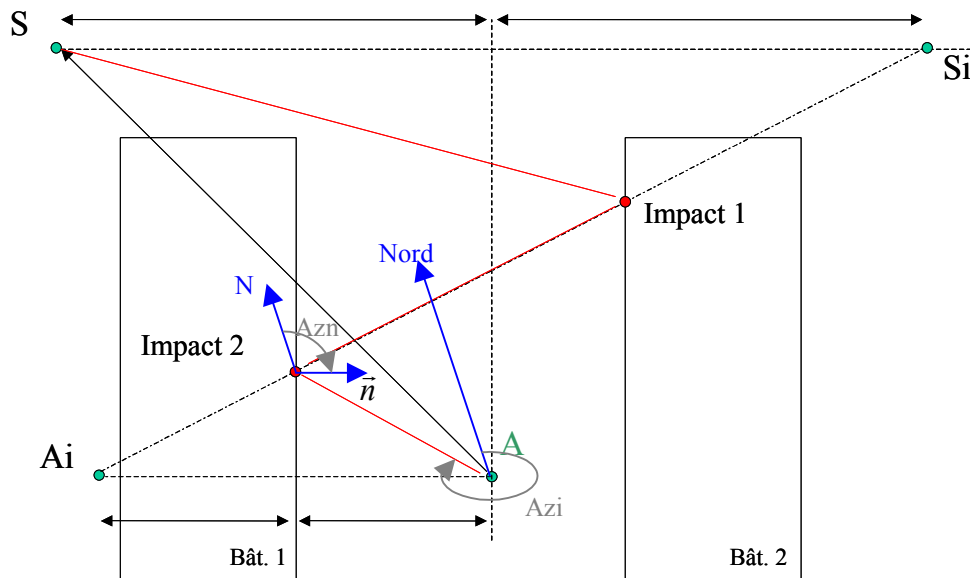
L'élévation du point d'impact est déterminée en faisant l'hypothèse que la distance entre le satellite et le récepteur est très grande. Sachant que l'angle réfléchi est égal à l'angle incident, l'élévation du point d'impact est égale à l'élévation du satellite.

Soient  $Azi$  l'azimut du point d'impact à pointer et  $Azn$  l'azimut du vecteur perpendiculaire à la surface de réflexion.  $Az_M$  et  $Az_m$  sont respectivement les azimuts maximal et minimal vers lesquels pointer l'antenne. Ils correspondent aux extrémités gauche et droite du mur sur lequel le signal se réfléchit.

Pour  $Az_m < Az < Az_M$  :  $Az = 2 * Azn + 180 - Azs$ .

*Calcul des points d'impacts pour deux réflexions :*

On choisit un repère orthonormal  $(O, x, y, z)$  avec  $(Ox)$  dans l'axe de la rue,  $(Oy)$  perpendiculaire aux bâtiments et  $(Oz)$  vertical. Le centre du repère,  $O$ , est placé sur l'antenne, dans la rue. On pose  $\alpha = 360 - Az_s + Az_{rue}$  sachant que  $Az_{rue} = 20^\circ$  dans la configuration choisie représentée figure A.1.



**Figure A.1. Configuration du canyon urbain (vue de dessus).**

La position du satellite dans le repère  $(Oxyz)$  s'écrit :

$$\begin{aligned} x_s &= R \cos el \cos \alpha \\ y_s &= -R \cos el \sin \alpha \text{ ou } R \text{ est la distance satellite-antenne.} \\ z_s &= R \sin el \end{aligned} \quad (A.1)$$

La position de l'image du satellite se calcule d'après les équations (A.2).

$$\begin{aligned} x_i &= x_s = R \cos el \cos \alpha \\ y_i &= R \cos el \sin \alpha + 2d_b \text{ ou } d_b \text{ est la distance antenne-bâtiment 2.} \\ z_i &= z_s = R \sin el \end{aligned} \quad (A.2)$$

De la même façon, la position de l'antenne image est définie par (A.3).

$$\begin{aligned}
x_{ai} &= 0 \\
y_{ai} &= -2d_a \text{ ou } d_a \text{ est la distance de l'antenne au bâtiment 1.} \\
z_{ai} &= 0
\end{aligned} \tag{A.3}$$

La position du point d'impact 1 est régie par les relations (A.4) et (A.5) et la position du deuxième point d'impact par les relations (A.6) et (A.7).

$$\left\{ \begin{array}{l} Az_1 = 90 + Az_{rue} + \arctan \frac{|x_{i1}|}{d_b} \text{ où } x_{i1} = x_i * \frac{2d_a + d_b}{2d_a + y_i} \end{array} \right. \tag{A.4}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{et } el1 = \arctan \frac{z_{i1}}{d_a} \text{ où } z_{i1} = z_i * \frac{2d_a + d_b}{2d_a + y_i}. \end{array} \right. \tag{A.5}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Az_2 = 270 + Az_{rue} + \arctan \frac{|x_{i2}|}{d_a} \text{ où } x_{i2} = 2d_a * \frac{x_i}{2d_a + y_i} \end{array} \right. \tag{A.6}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{et } el2 = \arctan \frac{z_{i2}}{d_a} \text{ où } z_{i2} = d_a * \frac{z_i}{2d_a + y_i}. \end{array} \right. \tag{A.7}$$

Les positions des points d'impacts I1 et I2 respectivement pour une, puis deux réflexions, sont calculées en terme d'azimut et d'élévation par rapport à l'antenne afin de pointer l'antenne parabolique dans ces directions.

## Annexe 2 : Simulation par tracé de rayons 3D

Le logiciel SimuOG exploite les lois de l'optique géométrique et a été développé à l'USTL-TELICE par Ph. Mariage.

Le logiciel SimuOG est un logiciel de tracé de rayons (*ray tracing*), fondé sur l'utilisation de la théorie des images. La méthode des images est l'une des deux techniques utilisant les rayons les plus répandues. L'autre méthode est la méthode de lancer de rayons (*ray launching*).

La méthode des images établit les chemins optiques exacts entre le récepteur et l'émetteur. Le principe utilisé est la création de sources virtuelles dans l'environnement afin de modéliser les réflexions sur les différents plans du milieu considéré. La méthode des images part du récepteur pour aller vers l'émetteur. A contrario, le *Ray launching* « lance » un nombre important de rayons dans toutes les directions à partir de l'émetteur et observe les rayons susceptibles d'arriver à proximité du récepteur.

Dans SimuOG, l'environnement est représenté par une série d'objets géométriques dont un (parallélogrammes...) dans un repère orthogonal (O, x, y, z). Une représentation de canyon urbain est donnée figure A.2. Chacune des faces de ces objets est un plan sur lequel vont rebondir les rayons issus de l'antenne émettrice. La figure A.3 présente un exemple d'application de cette théorie. Le récepteur R est entouré d'immeubles et l'émetteur E est situé à proximité. Selon la théorie des images, les sources virtuelles sont créées symétriquement au récepteur par rapport à chacune des faces qui entourent le récepteur. Les rayons qui atteignent l'émetteur sont les rayons issus des images virtuelles vers R.

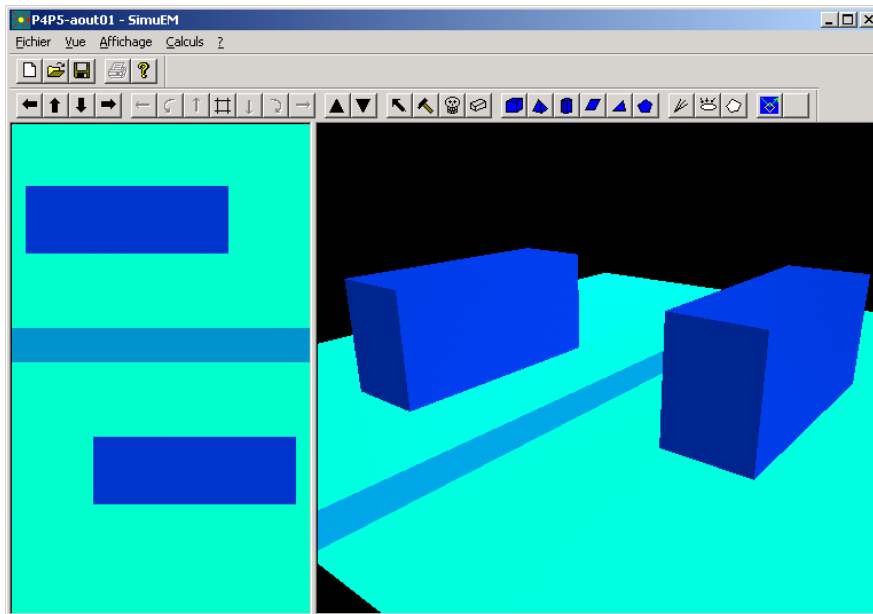
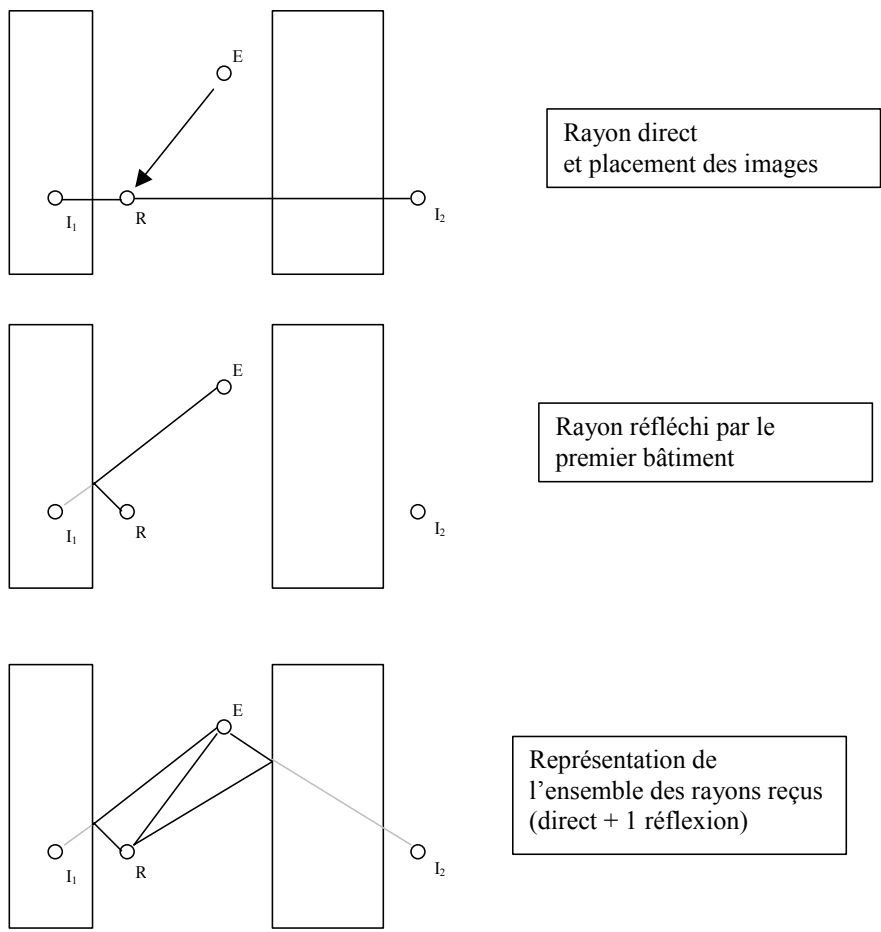


Figure A.2. Modélisation d'un canyon urbain avec SimuOG.





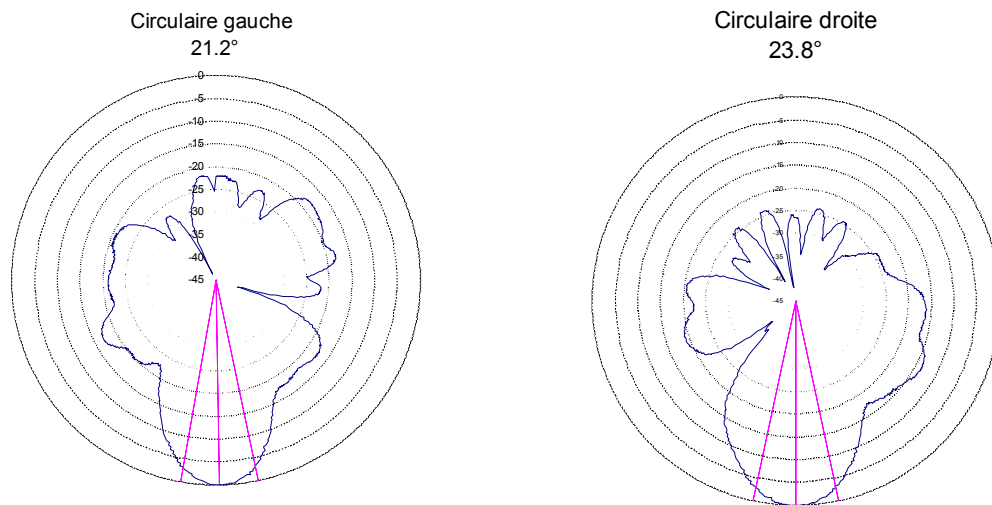
**Figure A.3. Illustration de la méthode des images.**

## Annexe 3 : L'équipement développé pour les mesures

### 1. L'antenne

Les caractéristiques principales de l'antenne réalisée au laboratoire ont été définies au cours du troisième chapitre de ce mémoire. Nous complétons ici la description en présentant les simulations et mesures des paramètres de l'antenne ainsi que le programme de pilotage et de traitement des données.

Les diagrammes de rayonnement des polarisation droite et gauche sont représentés sur les figures A.4 et A.5. Ces diagrammes expérimentaux ont été obtenus dans la chambre anéchoïque du laboratoire TELICE de l'USTL. On note un gain de 18 dB et les ouvertures à 3dB sont respectivement de  $21.2^\circ$  pour la polarisation circulaire gauche et de  $23.8^\circ$  pour la droite.



**Figures A.4 et A.5. Diagrammes de rayonnement de l'antenne.**

Afin d'évaluer les performances théoriques de l'antenne, nous avons utilisé une version de démonstration du logiciel FEKO<sup>1</sup> fondé sur la méthode des moments, pour les calculs du champ électromagnétique. Les éléments du maillage considérés sont de dimension  $\lambda/10$ . L'antenne est modélisée comme illustré figure A.5. Le diamètre de la spire est égal 4 mm et une source de tension est placée sous le plan de masse (figure A.6).

<sup>1</sup> FEKO, v. 40.22 : <http://www.feko.co.za>

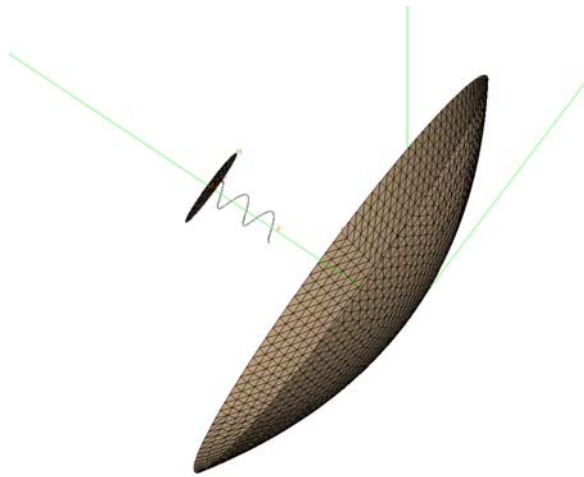


Figure A.5. Antenne simulée.

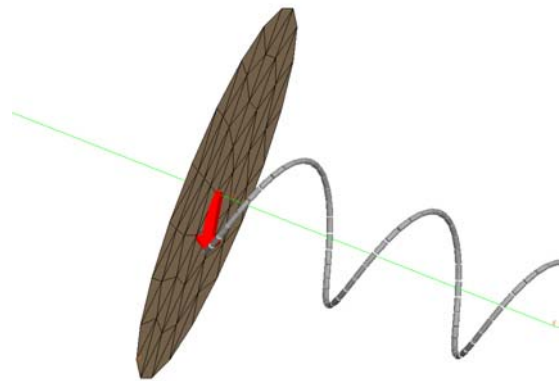
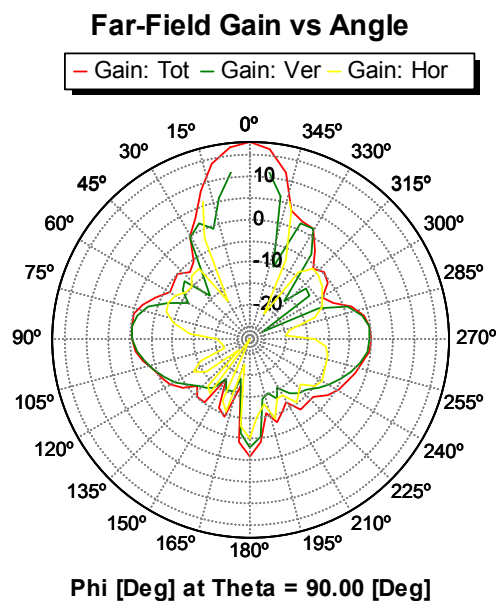


Figure A.6. Source de tension utilisée pour la simulation.

Par la simulation en champ lointain, on trace la courbe de gain de l'hélice polarisée circulaire droite représentée en dB figure A.7. On obtient une ouverture à 3 dB proche de  $17.5^\circ$  (mesurés sur graphique) en polarisation circulaire droite comme en gauche.



WinFEKO Project: AntenneGPS    Date: 31/05/01

Figure A.7. Gain de l'antenne en représentation polaire.

La mesure du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (paramètre S11) montre en simulation une bonne adaptation entre 1.51 et 1.54 GHz. Cependant, la mesure de ce coefficient S11 sur l'antenne réelle a montré une adaptation encore meilleure.

## 2. Codage des données

L'antenne est connectée au récepteur GPS LASSEN SK8 de Trimble du laboratoire avec une antenne patch omnidirectionnelle. Les informations telles que numéro du satellite suivi, rapport signal sur bruit ou position relative du satellite sont enregistrées sur PC portable par l'intermédiaire du logiciel décrit dans le paragraphe suivant. Elles sont reçues au format ASCII (selon le protocole NMEA) par le port 2

du récepteur. Le programme, dont l'interface est figure A.8, est écrit en langage C++. Les données sont enregistrées toutes les secondes dans un fichier texte.

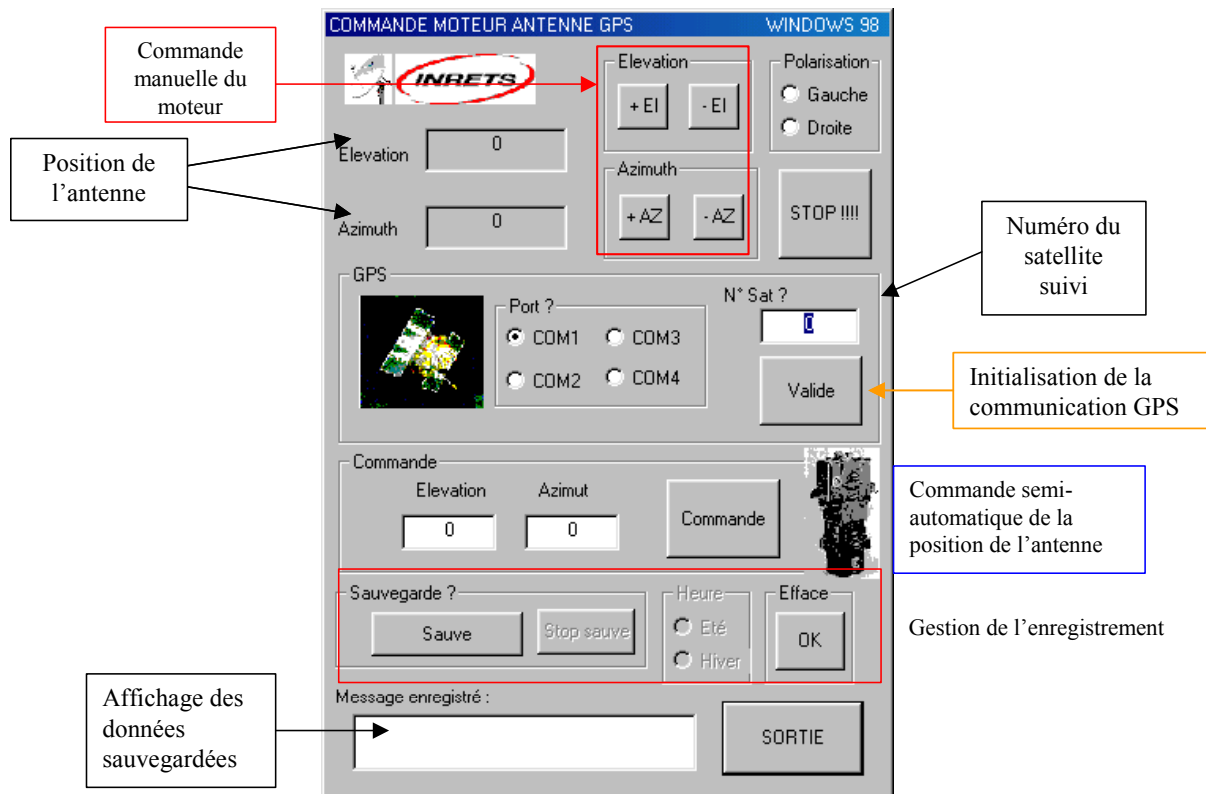


Figure A.8. Interface du logiciel développé pour l'utilisation de l'antenne parabolique.

### 3. Le moteur

#### Description du moteur utilisé

Dans le but d'obtenir un pointage précis vers l'un ou l'autre des satellites disponibles ou vers le point d'impact du signal émis par un satellite GPS sur un obstacle, un moteur pas à pas est utilisé. Ce moteur est un YAESU G-5500 (figure A.9) dont les spécifications sont rassemblées dans le tableau A.10.

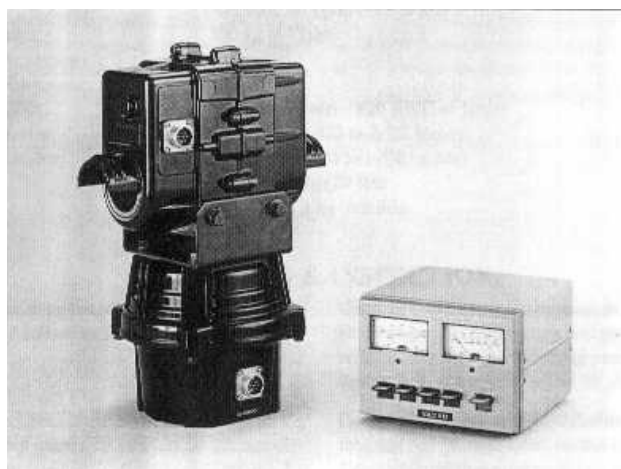


Figure A.9. Photographie du moteur.

	<b>SPECIFICATIONS</b>
<b>Voltage requirement</b>	110-120 or 200-240 VAC
<b>Motor Voltage</b>	24 VAC
<b>Rotation Time (approx., @60Hz)</b>	Elevation (180°): 67 sec. Azimuth (360°): 58 sec.
<b>Maximum continuous operation</b>	5 minutes
<b>Rotation torque</b>	Elevation: 14 Kg-m Azimuth: 6 Kg-m
<b>Braking Torque</b>	Elevation: 40 Kg-m Azimuth: 40 Kg-m
<b>Vertical load</b>	200 Kg
<b>Pointing accuracy</b>	± 4 percent
<b>Wind surface area</b>	1 m <sup>2</sup>
<b>Control cables</b>	2 x 6 conductors - #20 AWG or larger
<b>Mast diameter</b>	38-63 mm
<b>Boom diameter</b>	32-43 mm
<b>Weight</b>	Rotators: 9 Kg Controller: 3 Kg

**Tableau A.10. Spécifications du moteur YAESU G-5500.**

### *Généralités sur le protocole I<sup>2</sup>C*

Le protocole de communication avec le moteur est le protocole I<sup>2</sup>C. Ce protocole a été développé au début des années 80 par Philips semiconductors<sup>2</sup> dans le but de permettre la communication entre des composants électroniques divers par liaison série asynchrone<sup>3</sup>. Il est composé de deux lignes de transmission bidirectionnelles :

- SDA (serial data) pour la transmission des informations
- SCL (serial clock) pour l'horloge de synchronisation (à chaque bit transmis correspond un cycle d'horloge).

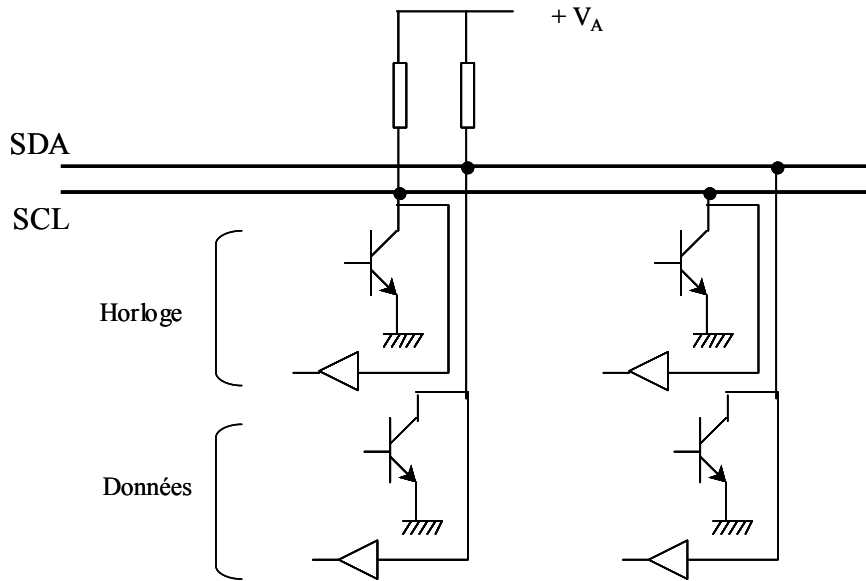
Les données sont transmises en série de 100 Kbits/s en mode standard et jusqu'à 400 Kbits/s en mode rapide.

### *Electronique*

Le bus I<sup>2</sup>C est un bus a deux fils, référencés par rapport à la masse et connectés à une tension positive par une résistance de « pull-up » schématisé figure A.11. Afin d'éviter les conflits électriques, les entrées/sorties sont de type « collecteur ouvert ».

<sup>2</sup> <http://www.planete.net/~surbanov/i2c/intro.html>

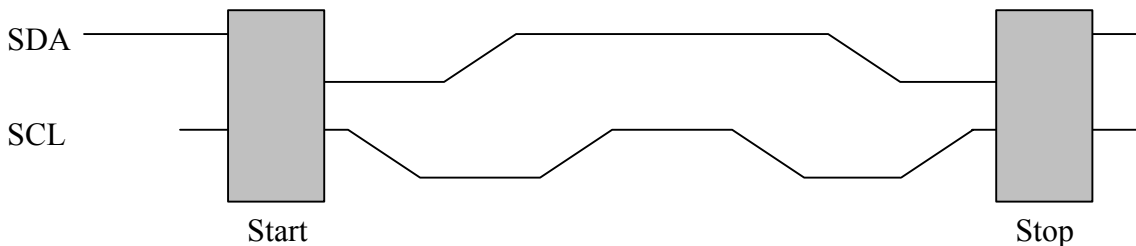
<sup>3</sup> Ref. Informatique Industrielle : Introduction au bus de C. Rousseau, Labo. Radiocommunications, UPRES-A CNRS 6075 – Structure rayonnantes, Univ. De Rennes 1



**Figure A.11. Représentation du bus I2C.**

*Message*

Le message est encadré par une condition de départ (SDA passe de 1 à 0 tandis que SCL reste à 1) et une condition d'arrêt (SDA passe de 0 à 1 tandis que SCL reste à 1) illustrées sur le schéma A.12.

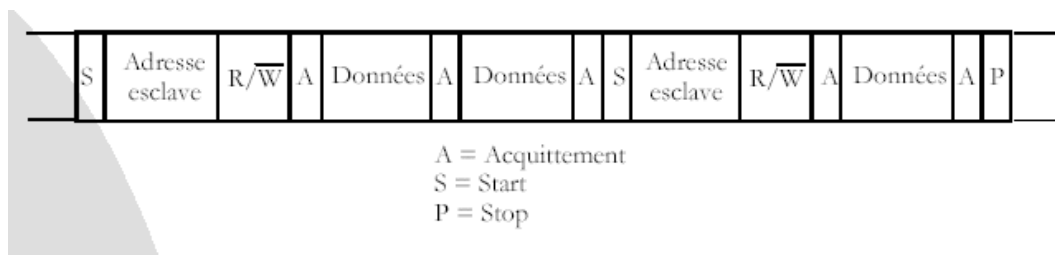


**Figure A.12. Conditions de départ et d'arrêt.**

Le bus est de type maître/esclave : lorsqu'un circuit prend le contrôle du bus, il impose la condition de départ, devient le maître du bus et génère le signal d'horloge. On appelle alors émetteur le composant qui envoie maître et récepteur le composant destinataire du message.

Le transfert de données est réalisé en deux étapes. La première consiste en la diffusion d'une adresse, qui détermine le composant destinataire du message. Une fois l'adresse reconnue et acceptée, l'esclave est prêt à recevoir les données. L'adresse est codée sur 7 bits, suivi d'un bit de R/W (annonce des données en lecture ou en écriture) et d'un acquittement (il impose un niveau 0 pour signaler au maître que la transmission s'est effectuée correctement). Les données sont transférées sur 9 bits : après chaque envoi d'un train de mot (8 bits) de données, le récepteur (l'esclave) envoie un acquittement à l'émetteur sur le neuvième coup d'horloge. L'acquittement autorise la suite de l'envoi des données. Un NACK (« non-acquittement ») signifie que le transfert des données n'est plus autorisé et qu'une condition d'arrêt ou un nouveau départ doit être envoyé.

Pour déterminer le composant destinataire du message, une adresse est définie sur 7 bits, suivis d'un bit correspondant à la lecture (1) ou à l'écriture (0). Le schéma A.13 présente le message complet en lecture.



**Figure A.13. Lecture par le maître du message de l'esclave<sup>4</sup>.**

Dans le cas particulier de la commande du moteur par le bus I2C, les données représenteront les tensions à appliquer pour orienter l'antenne en azimut et en élévation. En écriture, l'opération consistera à piloter l'antenne et en lecture à récupérer l'information position, soit pour continuer l'orientation, soit pour coder l'information position parallèlement au niveau de signal reçu.

<sup>4</sup> [http://maxwell.spm.univ-rennes1.fr/labo/Documents/D010222101205\\_Cours\\_Bus\\_Informatique\\_MEEA.pdf](http://maxwell.spm.univ-rennes1.fr/labo/Documents/D010222101205_Cours_Bus_Informatique_MEEA.pdf)

## Annexe 4 : Modèles de canal de propagation de Rayleigh et Rice

L'environnement de propagation exerce une influence importante sur le niveau de signal reçu dans une transmission de signal par radio. Le résultat est appelé « fading » et consiste en des variations rapides du niveau de signal reçu [Saunders]. En pratique, le fading apparaît dès que le signal rencontre un ou plusieurs obstacles dans l'environnement de sa trajectoire. Les obstacles entraînent une propagation par multichemins. Deux grandes configurations se distinguent : le signal est reçu par trajets multiples en présence ou non du trajet direct. Puisque chacune des réflexions et/ou diffraction sur les obstacles atténue le signal, lorsque le trajet direct est reçu, il est prédominant.

Des descriptions statistiques sont utilisées pour décrire ces phénomènes.

### 1. Modèle de Rayleigh en NLOS

Le théorème centrale limite montre que, dans certaines conditions, la somme de variables aléatoires indépendantes approche d'une distribution normale. Dans le cas du NLOS, les trajets multiples remplissent ces conditions puisque le signal est la somme d'un grand nombre d'ondes. La distribution de Rayleigh est une bonne approximation pour mesurer l'amplitude statistique du fading pour un canal mobile dans le cas d'une situation en NLOS. Ces canaux sont alors appelés canaux de Rayleigh (« Rayleigh channels »).

On utilise généralement la distribution des rapports signal sur bruit  $r$  (A.8).

$$r = \frac{\text{puissance du signal}}{\text{puissance du bruit}} \quad (\text{A.8})$$

La fonction de distribution des probabilités de  $r$  s'écrit, en fonction de la variance  $\sigma^2$  selon (A.9).

$$P_{\text{rayleigh}}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{A.9})$$

La figure A.14 montre la distribution de Rayleigh pour différentes valeurs de  $\sigma$ . Les précisions mathématiques sont disponibles dans [Lee, 82].

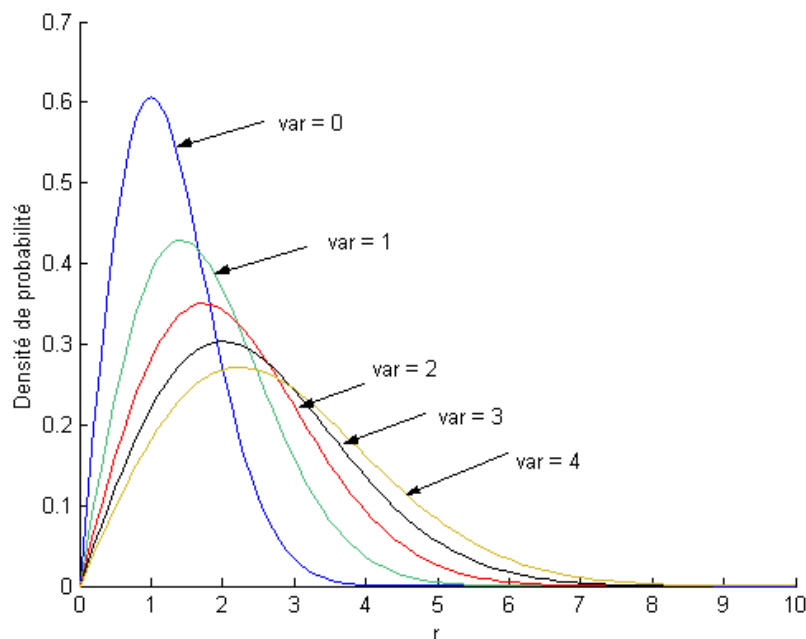


Figure A.14. Distributions de Rayleigh pour différentes valeurs de  $\sigma^2$ .



## 2. Modèle de Rice en LOS

En situation de LOS, le signal reçu est composé d'un grand nombre d'onde reçue par trajets multiples, dont les amplitudes sont décrites par une distribution de Rayleigh, plus la composante directe non atténuée. La puissance de cette composante sera plus importante que la somme des puissances des trajets multiples et constitue une composante significative dans la puissance totale.

Une distribution de Rice est utilisée pour décrire cette situation. Elle exprimée en termes de fonction de densité de probabilité. Cette distribution est fonction de deux coefficients : la variance  $\sigma^2$  et le facteur de Rice  $K$  défini par l'équation A.10.

$$P_{rice}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2 + K}\right) I_0\left(\frac{r\sqrt{2K}}{\sigma}\right) \quad (\text{A.10})$$

où  $I_0$  est la fonction de Bessel modifiée de premier ordre et  $K = \frac{s^2}{2\sigma^2}$  avec  $s$ , l'amplitude de la composante directe.

Figures A.11 et A.12 sont tracées les distributions de Rice respectivement pour différentes valeurs de  $K$  et de la variance  $\sigma^2$ . On remarque que lorsque  $K = 0$ , le modèle de Rice est égal au modèle de Rayleigh.

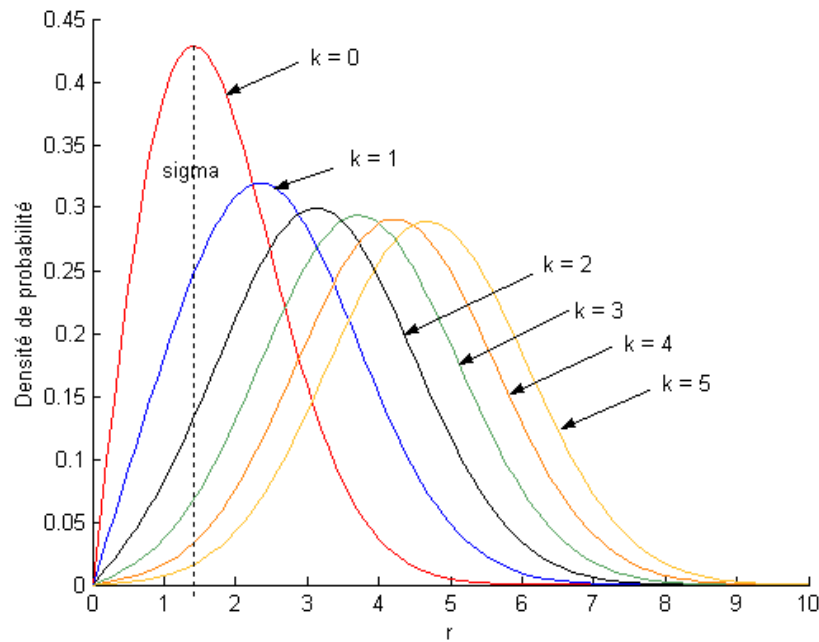


Figure A.11. Distributions de Rice pour différents  $K$  et  $\sigma^2 = 2$ .

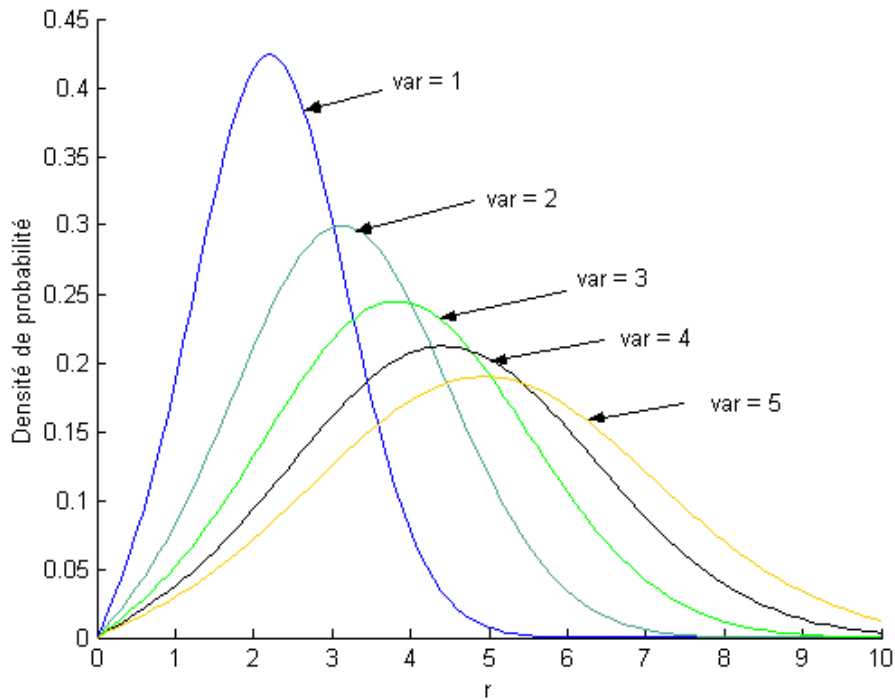


Figure A.12. Distributions de Rice pour différents  $\sigma^2$  et  $K = 2$ .

### 3. La réception du signal GPS

Le niveau de signal GPS traité dans ce mémoire est enregistré via le récepteur GPS. Nous avons expliqué dans le chapitre 1 le fonctionnement du récepteur GPS, qui, compare le signal reçu à une réplique de ce signal et détermine après un calcul de corrélation le temps de propagation du signal depuis son émission. Le récepteur donne en sortie l'identité des satellites reçus et le rapport signal sur bruit enregistré à chaque mesure. Comme dans le contexte du canal radio mobile, ce rapport S/B est perturbé par l'environnement de l'antenne et varie dans le temps tel qu'illustré figure A.13.

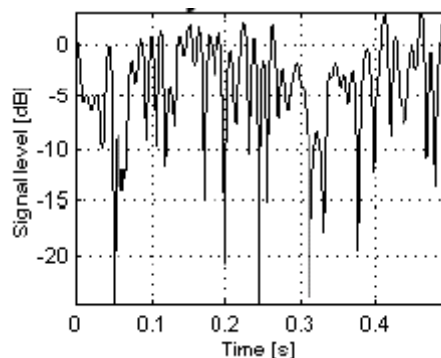
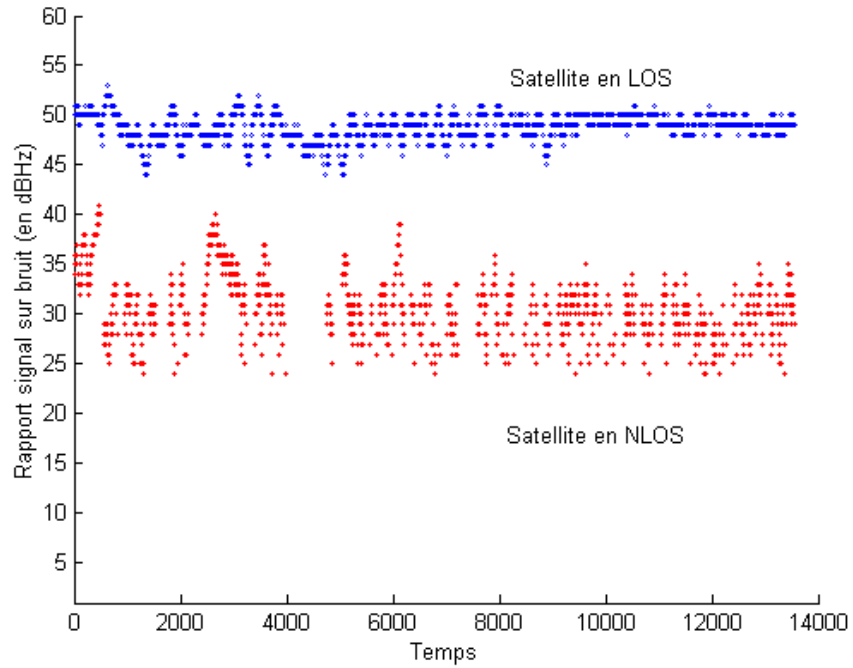
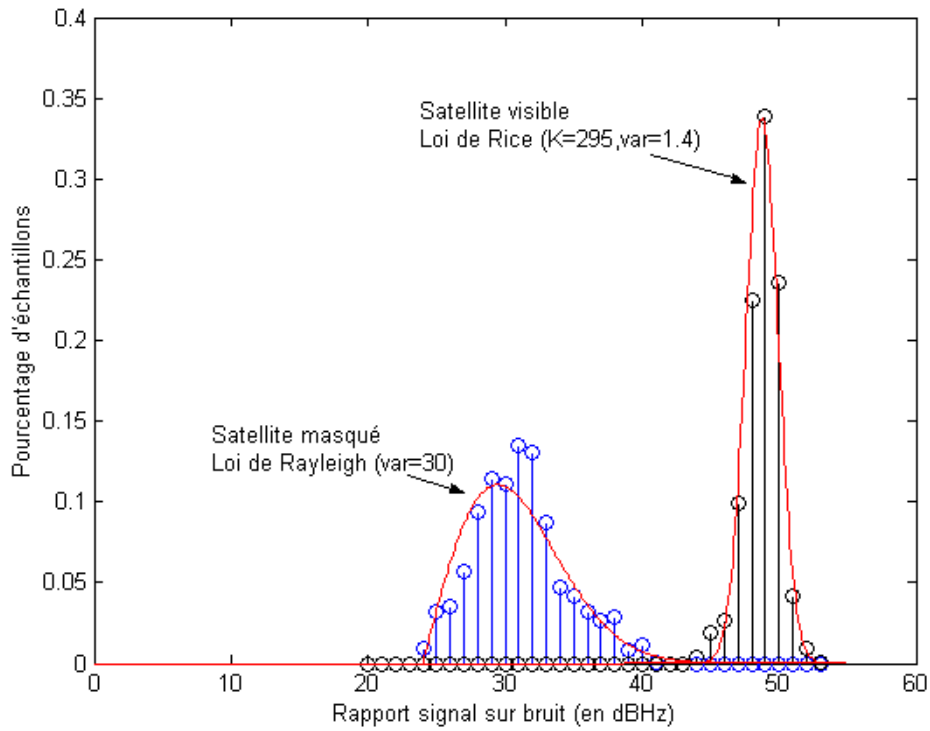


Figure A.13. Variations rapides du niveau de signal reçu en fonction du temps (exemple simulé).

Les mesures présentées dans le chapitre ont montré les fluctuations du signal reçu autour de deux valeurs moyennes selon que le satellite est en situation de LOS ou de NLOS. On applique donc les distributions définies ci-dessus au données de la figure A.14 issues de mesures. Le résultat est illustré figure A.15.



**Figure A.14. Variations du rapport signal sur bruit mesurées.**



**Figure A.15. Comparaison des rapports S/B pour un satellite visible, en noir, et un satellite masqué (reçu après une réflexion), en bleu.**

# Table des illustrations

Tableau 1.1. Différents systèmes de localisation par satellite.....	11
Figure 1.2. Mesure du temps de propagation.....	12
Figure 1.3. Principe de calcul du positionnement d'un mobile par triangulation.....	12
Figure 1.4. Constellation GPS.....	14
Figure 1.5. Schéma de la génération des signaux L1 et L2.....	15
Figure 1.6. Schéma bloc d'un récepteur GPS (Source : ULCO).....	16
Figure 1.7. Principe du pic de corrélation.....	17
Figure 1.8. Schématisation du filtre de Kalman.....	18
Figure 1.9. Précision de localisation du GPS avec et sans la SA (Source : NOAA National Geodetic Survey).....	19
Table 1.10. Classification des erreurs avec et sans la SA (Source : [Shaw, 00]).....	19
Figure 1.11. Illustration des erreurs liées à la géométrie du système.....	21
Figure 1.12. Influence de la géométrie des satellites sur la précision de localisation.....	21
Figure 1.13. Profil de visibilité des satellites GPS (Source : DoD USA).....	23
Figure 1.14. Variation du PDOP avec le nombre de satellites utilisés en fonction du temps (mesure réalisée en environnement urbain sur un véhicule en mouvement).....	23
Figure 1.15. Erreur de localisation en fonction du nombre de satellites reçus [Morioka, 00].....	24
Figure 1.16. Ligne de visibilité directe.....	24
Figure 1.17. Evolution du nombre de satellites visibles pour différents types d'environnements.....	25
Figure 1.18. Evolution du nombre de satellites reçus pour différentes ouvertures du cône de visibilité. .....	26
Figure 1.19. Nombre de satellites reçus et utilisés lors d'une traversée du vieux lille.....	27
Tableau 1.20. Caractéristiques des acquisitions effectuées lors d'une traversée du vieux Lille.....	27
Figure 1.21. Le trajet multiple.....	28
Figure 1.22. Nombre de satellites reçus par trajet direct dans un canyon urbain pendant 30 minutes..	29
Figure 1.23. Evolution des latitude et longitude en fonction du temps.....	29
Figure 1.24. Principe du DGPS.....	30
Figure 2.1. Principe de l'outil.....	35
Figure 2.2. Schéma synoptique des différentes étapes de la méthode développée.....	36
Figure 2.3. Position de 4 satellites autour de l'antenne en un point de la trajectoire.....	37
Figure 2.4. Représentation du système d'acquisition embarqué utilisé pour l'enregistrement des données depuis le train.....	38
Figure 2.5. Choix de la focale pour l'angle d'ouverture.....	38
Figure 2.6. Angles d'ouverture et disposition des caméras.....	39
Tableau 2.7. Paramètres typiques des différents environnements traités.....	39
Figure 2.8. Représentation de deux types d'environnements : urbain et résidentiel.....	39
Figure 2.9. Caméras placées à proximité de l'antenne sur le toit du train.....	40
Figure 2.10. Installation du système d'acquisition à l'intérieur du train.....	40
Figure 2.11. Principe du multiplexeur.....	41
Figure 2.12. Images droite et gauche multiplexées, puis démultiplexées.....	41
Figure 2.13. Principe de stockage des images.....	42
Figure 2.14. Exemple d'une colonne d'un fichier image type.....	43
Figure 2.15. Histogramme d'une colonne de l'image.....	44
Figure 2.16. Représentation du niveau de gris de la colonne et position du pixel horizon.....	44
Figure 2.17. Résultat de la détection avec un seuil de 101.....	45
Figure 2.18. Histogramme de la colonne B.....	45
Figure 2.19. Résultat de la détection avec un seuil de 130.....	46
Figure 2.20. Quelques exemples. En rouge, la ligne d'horizon calculée.....	46
Figure 2.21. Colonne bruitée.....	47
Figure 2.22. Filtrage d'une colonne.....	48

Figure 2.23. Filtrage horizontal.....	48
Figures 2.24 et 2.25. Avant et après le filtrage.....	49
Figure 2.26. Stéréoscope.....	50
Figure 2.27. Configuration générale d'un capteur stéréoscopique.....	51
Figure 2.28. Système stéréoscopique dont les capteurs sont parallèles.....	51
Figure 2.29. Localisation 3D.....	52
Figure 2.30. Utilisation de deux lignes de l'image pour la stéréovision.....	53
Figure 2.31. Exemple typique d'une ligne d'horizon et de sa dérivée.....	54
Figure 2.32. Sélection des extremums.....	55
Figure 2.33. Appariement des contours.....	55
Figure 2.34. Mise en correspondance.....	56
Figure 2.35. Notations géométrique.....	56
Figure 2.36. Notations stéréoscopiques.....	56
Figure 2.37. Calcul de la position et de la hauteur de l'obstacle en utilisant deux lignes.....	57
Figure 2.38. Position des obstacles autour de la trajectoire.....	57
Figure 2.39. Élévation des masques à 360° autour de l'antenne.....	58
Figure 2.40. Notations utilisées dans le calcul du masque à 360°.....	58
Figure 2.41. Reconstruction du masque autour de l'antenne tous les x mètres.....	59
Figure 2.42. Variation de l'erreur relative sur d en fonction de $\delta$ .....	59
Figure 2.43. Variation de l'erreur en fonction du nombre de pas n.....	60
Figure 2.44. Erreur sur la distance en fonction de la distance OP.....	61
Figure 2.45. Erreur sur l'azimut.....	61
Figure 2.46. Procédure de comptage des satellites.....	62
Figure 2.47. En environnement rural (peu de masquages et un pont).....	63
Figure 2.48. En environnement suburbain.....	63
Figure 2.49. En environnement urbain.....	63
Figure 2.50. Exemple de résultats bruts obtenus en essais ferroviaires.....	64
Figure 2.51. Exemple de résultats moyennés obtenus en environnement ferroviaire.....	65
Figure 2.52. Répartition des angles d'élévations des masques en fonction du type d'environnement.....	65
Figure 2.53. Élévation du masque à 360° autour de l'antenne (Source : [Vogel, 95]).....	66
Figure 3.1. Trajets multiples.....	69
Figure 3.2. Représentation géométrique d'une réflexion pour un champ électrique parallèle au plan d'incidence.....	70
Figure 3.3. Polarisation circulaire droite.....	70
Figure 3.4. Evolution du coefficient de réflexion en fonction de l'élévation du satellite.....	71
Figure 3.5. Configuration particulière de l'angle de Brewster.....	72
Figure 3.6. Cône de diffraction.....	72
Figure 3.7. Géométrie de la scène.....	73
Figure 3.8. Evolution du champ reçu en fonction de s.....	73
Figure 3.9. Evolution de s en fonction de $d_2$ .....	74
Figure 3.10. Répartition des satellites autour de l'antenne.....	74
Figure 3.11. Représentation des positions calculées avec les erreurs sur une des pseudo-distances.....	75
Figure 3.12. Evolution de la position des satellites par rapport à la rue.....	76
Figure 3.13. Exemple de réponses impulsionnelles en LOS et NLOS dans un canyon urbain (Source : [Vandamme, 96]).....	76
Figure 3.14. Contributions respectives du champ réfléchi et du champ diffracté dans un canyon urbain. .....	77
Figure 3.15. Configuration expérimentale.....	77
Figure 3.16. Position des satellites par rapport au masque (résultats de mesures).....	78
Figure 3.17. Niveau de signal reçu pour un satellite en fonction de son élévation.....	79
Figure 3.18. Niveau de signal reçu pour un satellite en fonction de son azimut.....	79
Figure 3.19. Point d'impact de la réflexion sur un bâtiment.....	79
Figure 3.20. Zone de réception en NLOS.....	79
Figure 3.21. Schématisation de la zone correspondant à l'état « masqué ».....	80
Photos 3.22. Antenne directive à polarisation circulaire.....	81

Photo 3.23. Equipement expérimental. ....	81
Figure 3.24. Configuration du canyon urbain (vue de dessus). ....	82
Image 3.25. Représentation « approximative » de l'évolution de la position du point d'impact. ....	82
Figure 3.26. Comparaison des rapports signal sur bruit en fonction de l'élévation du satellite. ....	83
Figure 3.27. Elévation des points d'impact « virtuels » du satellite sur les bâtiments par rapport au masque (en noir) dans un cas exploitable. ....	84
Figure 3.28. Dans une configuration de canyon urbain, exemples de rayons reçus après deux réflexions. ....	84
Figure 3.29. Positions des satellites pendant les mesures. ....	85
Figure 3.30. Effet de la polarisation inverse sur le rapport signal sur bruit reçu. ....	86
Figure 3.31. Comparaison des rapports S/B pour un satellite visible, en noir, et un satellite masqué (reçu après une réflexion), en bleu. ....	87
Figure 3.32. variation des rapports signal sur bruit en fonction de l'élévation du satellite. ....	88
Figure 3.33. Mur métallique réfléchissant le signal. ....	88
Tableau 3.34. Tableau récapitulatif de valeurs caractéristiques du rapport S/B en dBHz. ....	89
Figure 3.35. Trajectoire d'essais. ....	89
Figure 3.36. Répartition des angles d'élévation des masques dans les trois environnements considérés. ....	90
Figure 3.37. Proportion moyenne du nombre de satellites reçus par trajets directs sur la globalité du trajet. ....	90
Figure 3.38. Configuration traitée et notations utilisées. ....	91
Figure 3.39. Configuration simulée. ....	92
Tableau 3.40. Exemples de valeurs du retard $r$ sur la pseudo-distance. ....	92
Figure 3.41. Position des satellites utilisés. ....	93
Figure 3.42. Positions des 6 satellites affectés dans la configuration 1. ....	93
Figure 3.43. 1 <sup>ère</sup> configuration : Réflexions des satellites les plus bas. ....	94
Figure 3.44. Choix des 5 satellites affectés dans la configuration 2. ....	94
Figure 3.45. 2 <sup>ème</sup> configuration : Réflexion des satellites depuis une même zone d'azimut. ....	94
Figure 3.46. Positions des 6 satellites visibles (les plus hauts). ....	95
Figure 3.47. 3 <sup>ème</sup> configuration : Réflexion de 1 à 5 satellites parmi 6 (au lieu de 9). ....	95
Figure 4.1. Angles d'élévation des masques optiques. ....	98
Figure 4.2. Détection de la ligne d'horizon optique. ....	98
Figure 4.3. Deux zones de réception fonctions de l'angle d'élévation du satellite. ....	99
Figure 4.4. Calculs des hauteurs relatives $h_r$ . ....	100
Figure 4.5. Représentation tridimensionnelle des hauteurs réelles et relatives des obstacles. ....	100
Figure 4.6. Antenne patch. ....	101
Figure 4.7. Boîtier contenant les deux caméras dos à dos. ....	102
Figure 4.8. Portions de trajets expérimentés. ....	102
Figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12. Photos des environnements A, B, C et D. ....	103
Figure 4.13. Elévations des masques le long de la portion A. ....	104
Figure 4.14. Elévations des masques le long de la portion B. ....	104
Figure 4.15. Elévations des masques le long de la portion C. ....	105
Figure 4.16. Elévations des masques le long de la portion D. ....	105
Figure 4.17. Comparaison des répartitions des élévations selon les zones A, B, C et D. ....	106
Figure 4.18. Résultats obtenus en environnement très dégagé. ....	107
Tableau 4.19. Erreurs moyennes sur chaque trajet. ....	107
Figure 4.20. Résultats PREDISSAT le long du trajet A. ....	109
Figure 4.21. Résultats PREDISSAT le long du trajet B. ....	109
Figure 4.22. Résultats PREDISSAT le long du trajet D. ....	110
Figure 4.23. Résultats PREDISSAT. Extrait du trajet D décalé dans le temps. ....	110
Figure 4.24. Satellite en visibilité directe. ....	111
Figure 4.25. Satellite reçus après une réflexion. ....	112
Figure 4.26. Fonction cumulative de probabilité du pourcentage de satellites reçus après réflexion par rapport au nombre total de satellites reçus (portion D). ....	113
Figure 4.27. Répartition des satellites reçus en un point après réflexion le long du trajet B. ....	113

Figure 4.28. Répartition des satellites reçus en un point après réflexion le long du trajet D. ....	114
Figure 4.29. Mesure statique utilisant tous les satellites ou les satellites en visibilité directe uniquement. ....	115
Figure 4.30. Comparaison des précisions avec et sans utiliser les satellites reçus par trajets multiples. .....	116
Figure 4.31. Comparaisons des valeurs des PDOP avec et sans utiliser les satellites reçus par trajets multiples. ....	116
Figure 4.32. Evaluation de la distance et la hauteur d'un immeuble en urbain d'après l'enregistrement d'une image tous les 2 m. ....	118
Figure 4.33. Compensation des erreurs. ....	118
Figure 4.34. Masquage manqué causé par une mauvaise évaluation de la distance de l'obstacle. ....	119
Figure 4.35. Evaluation de la distance et la hauteur d'un immeuble en urbain d'après l'enregistrement d'une image tous les 50 cm. ....	120
Figure 4.36. Notion de profondeur d'un obstacle. ....	120
Figure 4.37. Obstacles non détectés par la méthode des contours. ....	121
Figure 4.38. Répartitions du nombre de satellites disponibles lors des missions 1 et 2. ....	122
Figure 4.39. Fonction de répartition des élévations des satellites disponibles, au cours des missions 1 et 2. ....	123
Figure A.1. Configuration du canyon urbain (vue de dessus). ....	134
Figure A.2. Modélisation d'un canyon urbain avec SimuOG. ....	136
Figure A.3. Illustration de la méthode des images. ....	137
Figures A.4 et A.5. Diagrammes de rayonnement de l'antenne. ....	138
Figure A.5. Antenne simulée. ....	139
Figure A.6. Source de tension utilisée pour la simulation. ....	139
Figure A.7. Gain de l'antenne en représentation polaire. ....	139
Figure A.8. Interface du logiciel développé pour l'utilisation de l'antenne parabolique. ....	140
Figure A.9. Photographie du moteur. ....	140
Tableau A.10. Spécifications du moteur YAESU G-5500. ....	141
Figure A.11. Représentation du bus I2C. ....	142
Figure A.12. Conditions de départ et d'arrêt. ....	142
Figure A.13. Lecture par le maître du message de l'esclave. ....	143
Figure A.14. Distributions de Rayleigh pour différentes valeurs de $\sigma^2$ . ....	144
Figure A.11. Distributions de Rice pour différents K et $\sigma^2 = 2$ . ....	145
Figure A.12. Distributions de Rice pour différents $\sigma^2$ et K = 2. ....	146
Figure A.13. Variations rapides du niveau de signal reçu en fonction du temps (exemple simulé). ..	146
Figure A.14. Variations du rapport signal sur bruit mesurées. ....	147
Figure A.15. Comparaison des rapports S/B pour un satellite visible, en noir, et un satellite masqué (reçu après une réflexion), en bleu. ....	147