



**HAL**  
open science

# Algorithmes embarqués de localisation outdoor pour les véhicules en milieu urbain et algorithme embarqué de fusion GNSS et carte numérique

Juliette Marais, David Betaille, Cyril Meurie, Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart

## ► To cite this version:

Juliette Marais, David Betaille, Cyril Meurie, Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart. Algorithmes embarqués de localisation outdoor pour les véhicules en milieu urbain et algorithme embarqué de fusion GNSS et carte numérique. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2015, 35p. hal-01663969

**HAL Id: hal-01663969**

**<https://hal.science/hal-01663969>**

Submitted on 14 Dec 2017

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

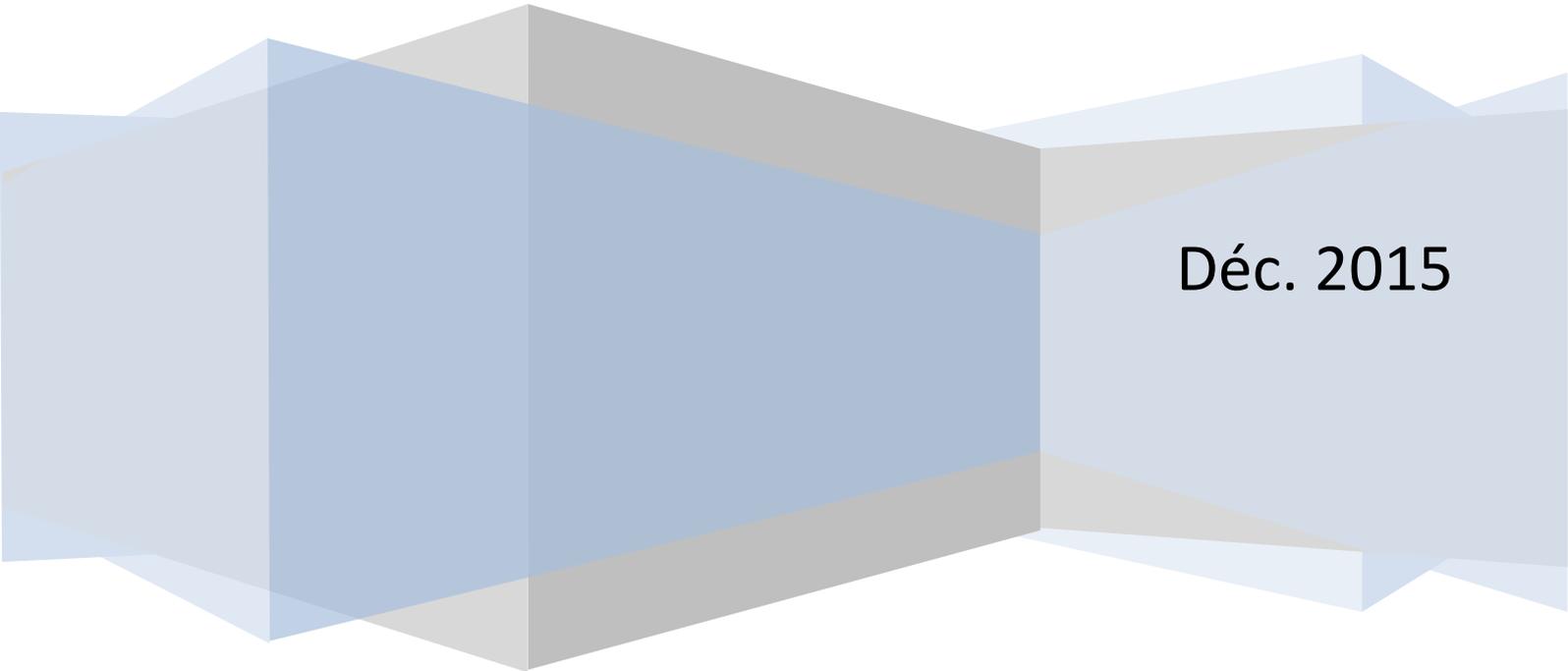
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IFSTTAR

**Algorithmes embarqués de  
localisation outdoor pour les  
véhicules en milieu urbain et  
algorithme embarqué de fusion GNSS  
et carte numérique**

**Projets CAPLOC et INTURB**

**Juliette Marais, LEOST, David Bétaille, GEOLOC**



Déc. 2015

## **Algorithmes embarqués de localisation outdoor pour les véhicules en milieu urbain et algorithme embarqué de fusion GNSS et carte numérique**

**Responsables :** Juliette Marais, LEOST , David Bétaille, GEOLOC

**Autres auteurs :** Cyril Meurie, Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart, LEOST

---

### **Résumé :**

Les nouveaux services de transport intelligent foisonnent. La plupart d'entre eux reposent de façon plus ou moins directe sur une information de localisation, parmi lesquelles les services de navigation bien sûr, mais aussi de l'aide à l'éco-conduite, des assurances « pay as you drive », la limitation de vitesse variable...

Techniquement, la solution la plus répandue aujourd'hui repose sur l'installation de puces GPS à bord des véhicules, agrémentée des équipements logiciels et matériels capables d'exploiter l'information de position pour délivrer un service (calcul d'itinéraire, recalage sur la carte, système de communication etc). Le système de radionavigation par satellites GPS offre en effet le meilleur compromis coût/simplicité/performance aujourd'hui. Il peut être complété par l'utilisation de signaux EGNOS, améliorant ainsi sa précision et sera bientôt compatible avec Galileo. Certains services, tels que la navigation automobile, s'accommodent aujourd'hui assez bien des performances obtenues. Malheureusement, alors que l'utilisateur urbain d'un système de localisation par satellites est le plus demandeur de précision, il dispose d'un service dégradé en raison des conditions de propagation des signaux, fortement liées à la densité des obstacles, qui limitent les performances optimales atteignables.

Pour améliorer les performances, en termes de précision, disponibilité et d'intégrité (c'est-à-dire de garantie de service), les travaux menés dans les laboratoires Leost et Geoloc de l'Ifsttar exploitent la connaissance de l'environnement de réception proche afin de réduire les perturbations sur la localisation GNSS. Dans le projet CAPLOC, cette connaissance est extraite d'une analyse d'images de l'environnement au-dessus du véhicule ; dans INTURB d'une carte numérique 3D.

Ces deux approches innovantes s'inscrivent dans la suite d'un brevet déposé en 2006 pour CAPLOC et dans un courant de propositions utilisant les modèles 3D de plus en plus disponibles et complets. Le rapport proposé en livrable synthétisera l'ensemble des travaux publiés et décrira en particulier les approches suivies dans ces deux projets, illustrées chacune par des résultats expérimentaux.

---

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction.....   | 3  |
| 2. Etat de l'art des solutions de mitigation des satellites NLOS.....  | 5  |
| 3. La solution CAPLOC .....  | 7  |
| a. Simplification d'images et classification pixellaire pour une détection temps réel de l'état de réception des satellites .....        | 7  |
| b. Estimation de la structure 3D de l'environnement urbain.....  | 10 |
| c. Estimation plus précise de la position.....   | 13 |
| Exclusion de tous les satellites NLOS.....   | 13 |
| Pondération des satellites en fonction de leur état de réception, leur niveau de signal reçu et leur élévation.....                      | 15 |
| Utilisation du modèle 3D.....  | 16 |
| 4. La solution INTURB.....   | 19 |
| d. Caractérisation des rues.....   | 19 |
| e. Approche déterministe .....   | 21 |
| f. Mise en œuvre expérimentale .....   | 22 |
| g. Approche probabiliste .....   | 23 |
| 5. Conclusions et perspectives .....   | 27 |
| 6. Références.....   | 31 |
| 7. Annexe : Workshop on INTEGRITY MONITORING FOR TERRESTRIAL USERS 15/12/2015, Ifsttar, 20 rue E. Reclus, Villeneuve d'Ascq, France..... | 33 |

## 1. Introduction

Dans le cadre des objectifs globaux d'amélioration des systèmes de transports, un des objectifs vise à limiter l'impact de l'usage de la voiture, notamment en rendant plus attractifs et plus performants les systèmes de transports publics et en particulier urbains. Dans ce contexte, les nouveaux services de transport intelligents foisonnent. La plupart d'entre eux reposent de façon plus ou moins directe, sur une information de localisation. L'information peut être associée à une personne, à un véhicule, à une flotte. Le panel d'applications est vaste : navigation bien sûr, mais aussi éco-conduite, péage, assurance « pay as you drive », gestion des parkings, limitations de vitesse variables, priorité des bus aux feux...

Techniquement, la solution la plus répandue aujourd'hui repose sur l'installation de puces GPS à bord des véhicules, agrémentée des équipements logiciels et matériels capables d'exploiter l'information de position pour délivrer un service : par exemple calcul d'itinéraire et recalage sur la carte pour le guidage automobile, système de communication lorsqu'il s'agit de suivi de flotte etc. Le système de radionavigation par satellites GPS offre en effet le meilleur compromis coût/simplicité/performance aujourd'hui. Il peut être complété par l'utilisation de signaux EGNOS, améliorant ainsi sa précision.

Certains services, tels que la navigation automobile s'accommodent aujourd'hui assez bien des performances obtenues. Le GPS est, la plupart du temps, fusionné à des informations de capteurs proprioceptifs (capteur de roue par exemple quand une mesure est disponible) ou à la carte numérique et permet le suivi du véhicule sur une route suffisamment précisément pour accompagner le conducteur. Les solutions satellitaires correspondent également bien aux demandes actuelles des opérateurs de flottes de transport (y compris transports guidés). Ceux-ci expriment fortement le besoin d'une réduction de la dépendance à l'infrastructure, en raison de l'augmentation des actes de vandalisme sur l'infrastructure et de la hausse des coûts de maintenance des systèmes.

Malheureusement, si l'utilisateur urbain d'un système de localisation par satellites est le plus demandeur de précision, il dispose d'un service dégradé. En effet, les conditions de propagation des signaux sont fortement liées à la densité des obstacles qui dégradent les performances optimales atteignables. En particulier, EGNOS étant composé de satellites géostationnaires, il est assez peu reçu en canyon urbain (Kovar, 2005). Il est alors difficile de répondre à des besoins exigeants tels que la signalisation d'un tramway, qui nécessite, par endroits, une position précise à 2m ou le positionnement nécessaire aux applications d'aide à la conduite.

Ainsi, il devient nécessaire de proposer des solutions de localisation précise, accessible en tous lieux, dans un contexte de réduction globale des coûts.



Figure 1. Exemple de mesures GPS obtenues avec un récepteur bas coût dans la ville de Belfort.

La plupart des solutions visant à rendre les solutions satellitaires de localisation plus précises et plus robustes reposent sur la multiplication des capteurs embarqués. Les solutions multicapteurs peuvent cependant s'avérer coûteuses si on multiplie le nombre de capteurs. Les solutions développées par les équipes LEOST et GEOLoc de l'Ifsttar et présentées dans ce document proposent, avant de combler les lacunes du GNSS avec d'autres capteurs, d'explorer les performances du GNSS et les enrichir à l'aide de la connaissance de l'environnement de propagation.

## 2. Etat de l'art des solutions de mitigation des satellites NLOS

En environnement urbain, le poste d'erreur de localisation majeur concerne les multitrajets et leur cas particulier : les signaux reçus en NLOS (Non Line of Sight). Les multitrajets sont caractérisés par la réception d'échos multiples en provenance d'un même satellite. On parle en général de multitrajet lorsque le récepteur reçoit ces échos en plus du signal reçu en trajet direct. Le signal NLOS, lui, est un signal reçu après une ou plusieurs réflexions et en l'absence du signal direct.

On trouve dans la littérature plusieurs approches de détection des satellites reçus par multitrajets. En environnement contraint, tel qu'en urbain, les principaux perturbateurs sont les obstacles proches de l'antenne de réception (« proche » étant relatif face aux 20000km d'altitude des satellites). L'impact de ces obstacles est directement visible sur l'amplitude des signaux reçus, répercutée sur la valeur du rapport signal sur bruit (CNO). Dans les travaux de (Viandier 2011), une solution basée sur le seuillage de l'amplitude du signal GNSS reçu a été déjà proposée, ainsi que dans (Marais 2012). La difficulté de la détection des satellites LOS/NLOS sur ce critère réside dans le choix de la valeur du CNO seuil. Ce seuil pourra être sensiblement différent d'un équipement à l'autre. De plus, il est fixé à partir de données statistiques et la dispersion des valeurs autour de ce seuil implique de mauvaises détections. C'est pourquoi d'autres techniques sont aujourd'hui étudiées. L'outil PREDISSAT du LEOST a été développé dans cet objectif en 2002 (Marais 2002) et était fondé sur l'utilisation de caméras classiques et d'un processus de post-traitement. (Meguro 2008) a repris le concept avec une caméra Infra Rouge.

La vidéo, parfois exigeante en capacité de calcul également, présente les avantages suivants :

- La vidéo permet d'avoir une vue de l'environnement toujours à jour et ne souffre pas de retards de mises à jour comme peuvent parfois l'avoir les modèles.
- Il n'est pas nécessaire d'estimer la position du récepteur dans le modèle. La caméra est placée sur le véhicule et la distance obstacles est immédiatement connue.

La solution développée dans le projet CAPLOC et reposant sur le traitement d'images vidéos sera présenté dans la section 3.

Avec le développement des modèles 3D urbains, (Groves 2011), (Bourdeau 2012), (Obst 2012) ou encore (Peyret 2011) ont publié en 2011-2012 des résultats montrant comment ces modèles pouvaient également permettre de déterminer la présence ou non d'un trajet direct en comparant les positions des obstacles modélisés et les positions des satellites.

Les modèles 3D disponibles sont de plus en plus précis et détaillés. Ils permettent l'usage de logiciels de tracé de rayons pour déterminer la visibilité ou les retards des satellites NLOS. Ils sont cependant potentiellement lourds à utiliser, notamment en temps de calcul ou en volume de base de données. Certains auteurs, comme (Groves 2013) font ainsi l'extraction de la ligne d'horizon à partir du modèle 3D (figure 2). Dans le projet INTURB, dont les résultats seront présentés en section 4 de ce document, nous montrerons comment le modèle 3D peut être utilisé pour caractériser les rues et les incertitudes liées à la visibilité satellitaire.

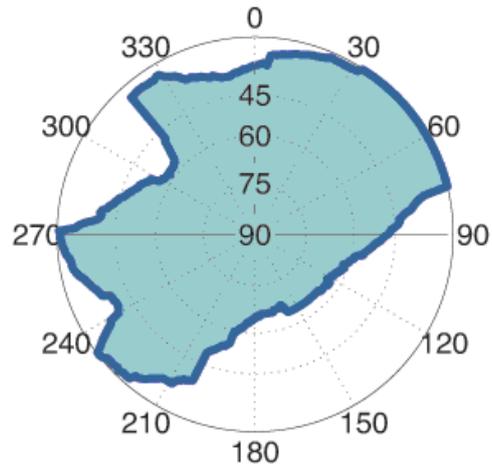


Figure 2. « building boundaries » - lignes d'horizon extraites à partir de modèles 3D (Groves 2013)

Dans ce document, nous présenterons ainsi deux approches développées par l'Ifsttar, utilisant l'image ou un modèle 3D pour la connaissance de l'environnement de propagation des signaux. Si la source d'information est différente, l'objectif est le même dans les deux approches : il s'agit d'identifier les satellites reçus sans trajets directs (NLOS) et d'utiliser cette connaissance pour améliorer la précision de localisation. Le projet INTURB a également utilisé cette connaissance pour évaluer l'intégrité de la solution fournie.

Les deux approches ont été étudiées en parallèle. Dans la conclusion, nous étudierons comment celles-ci peuvent se confronter, et si possible se compléter et s'enrichir mutuellement.

### 3. La solution CAPLOC

L'objectif de CAPLOC est de délivrer une information de localisation précise, accessible en tous lieux, dans un contexte de réduction globale des coûts. CAPLOC est un projet de recherche amont qui apporte une brique technologique innovante de localisation précise. L'approche suivie, brevetée en 2008, repose une connaissance de l'environnement de propagation fournie par une ou plusieurs caméras et des traitements d'images capables de détecter l'état de réception des signaux satellitaires et d'apporter une connaissance des perturbations causées par les obstacles environnants afin de réduire leur effet sur la localisation GNSS. Cette approche est aujourd'hui adaptée dans des systèmes embarquant des cartes numériques 3D avec des objectifs similaires.

Trois axes majeurs ont été développés dans le projet, tous illustrés avec des données réelles et valorisés par des publications scientifiques :

- Techniques de segmentation et de classification d'images fish-eye couleur, comparées aux techniques de la littérature, permettant en temps réel, de détecter l'état de réception des signaux satellitaires reçus en fonction des obstacles rencontrés.
- Estimation de la structure 3D de l'environnement urbain à partir du traitement des images fournies par un système de perception mono et multi caméras fisheye. Positionnement du mobile relativement aux bâtiments pour estimer les retards dus aux réflexions multiples.
- L'utilisation de ces connaissances sur la propagation des signaux reçus pour une estimation plus précise de la position : par détection et exclusion du/des satellite(s) reçu(s) de façon indirecte ; par la pondération de ces satellites pour une solution plus optimale des signaux disponibles et par la correction de l'estimation de la pseudo-distance grâce au modèle 3D.

#### a. Simplification d'images et classification pixellaire pour une détection temps réel de l'état de réception des satellites

La première réalisation de la solution CAPLOC vise à classer en temps-réel l'état de réception de chacun des satellites reçus (soit directement, soit après réflexion) ; sur la base d'un système mono-caméra, les pixels de l'image sont étiquetés en deux classes à savoir : « ciel » et « non-ciel », permettant ainsi, de déterminer si le satellite, dont la position est reprojétée dans l'image, est situé dans une région « ciel » (LOS) ou une région « non-ciel » (NLOS). Dans ce dernier cas, les satellites peuvent être considérés comme reçus après réflexion.

La stratégie permettant d'identifier les satellites situés dans une zone « ciel » et dans une zone « non-ciel » d'une image fisheye est composée d'une étape d'acquisition de données, de quatre étapes de traitement d'images, et d'une étape d'évaluation, comme illustrée sur la figure 3.

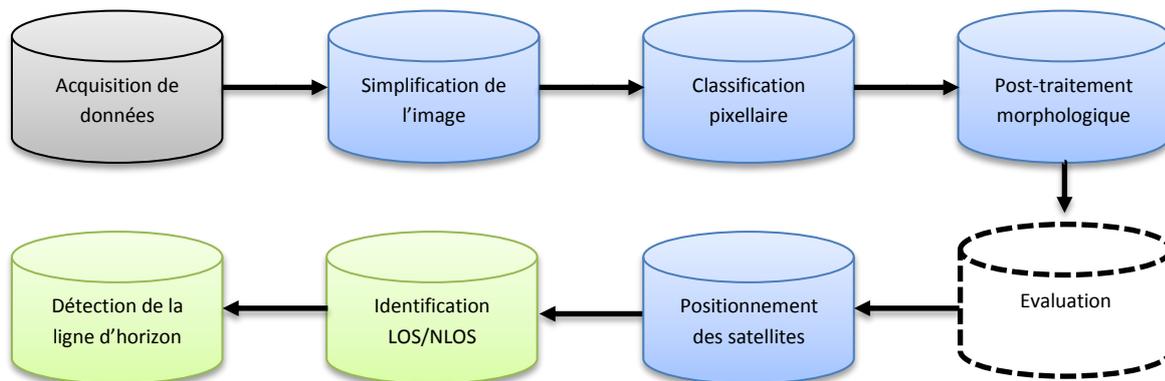


Figure 3. Synopsis de la stratégie de détection de « ciel/non-ciel » proposée.

La première étape de l'approche proposée concerne la phase d'acquisition des données de localisation (à l'aide des récepteurs GNSS embarqués) et images (à l'aide d'une caméra couleur à objectif fisheye installée sur le toit du véhicule et orientée vers le ciel). Pour la partie traitement d'images, nous commençons par simplifier l'image acquise en mobilité à l'aide d'une opération de morphologie mathématique (reconstruction géodésique par dilatation) et à transformer l'image dans une espace de représentation couleur adapté. Ceci a notamment pour effet de réduire les effets de luminosité qui viennent perturber l'étape de classification. Une classification pixellaire est ensuite réalisée afin d'affecter à chaque pixel de l'image une classe d'appartenance parmi les deux classes possibles à savoir : « ciel » et « non-ciel ». Une étape de post-traitement morphologique consistant à reclasser les pixels mal affectés est ensuite réalisée pour optimiser la phase de classification « ciel/non-ciel ». À ce moment de la stratégie, une évaluation des résultats est réalisée par rapport à une vérité terrain (*i.e.* par rapport à une classification de référence faite à la main par un expert, visant à identifier les régions « ciel » des régions « non-ciel » de l'image). Ceci permet d'évaluer le pourcentage de pixels correctement classés (respectivement mal classés) par notre approche par rapport à une classification de référence. Il est donc important de signaler ici que les algorithmes ont été testés sur la totalité des images de la base et évalués par rapport à une vérité terrain. Il en ressort que la stratégie proposée permet d'obtenir un taux de bonne classification de 97,2% pour un temps de traitement par image de 37ms. Une fois les étapes de classification pixellaire et de post-traitement effectuées, nous cherchons à déterminer quels satellites sont situés dans une zone « ciel » (satellites Line-Of-Sight (LOS)) et dans une zone « non-ciel » (satellites Non-Line-Of-Sight (NLOS)). La frontière entre ces deux zones nous permet également de définir la ligne d'horizon. Pour ce faire, nous devons en premier lieu, repositionner les satellites dans l'image classée. La position d'un satellite dans le ciel étant définie par son élévation et son azimuth relatif à un cap, positionner les satellites dans l'image nécessite d'extraire ces informations dans les trames NMEA puis de déterminer une équation de projection de coordonnées du monde réel sur l'image. L'objectif fisheye utilisé dans le cadre de nos expérimentations répond à un modèle de projection équisolide. Cette spécificité nous a permis d'établir l'équation de projection validée par une méthode expérimentale réalisée en laboratoire et ainsi reprojeter les satellites dans l'image fisheye acquise en mobilité. La

figure 4 illustre les résultats finaux de ces traitements sur des images acquises à Belfort dans le cadre du projet CAPLOC. Pour chacune des trois images acquises en mobilité et présentées sur cette figure (images de gauche), nous montrons le résultat de la détection « ciel/non-ciel » avec la position des satellites dans l'image (images du milieu) et la détection de la ligne d'horizon (images de droite). Concernant les résultats de détection « ciel/non-ciel », les zones « ciel » (respectivement « non-ciel ») sont représentées en bleu (respectivement en marron). Les signaux provenant des satellites numérotés en vert sont reçus en directs (LOS) tandis que ceux numérotés en rouge (pour la constellation GPS) ou bleue (pour la constellation EGNOS) sont bloqués ou reçus après réflexion (NLOS).

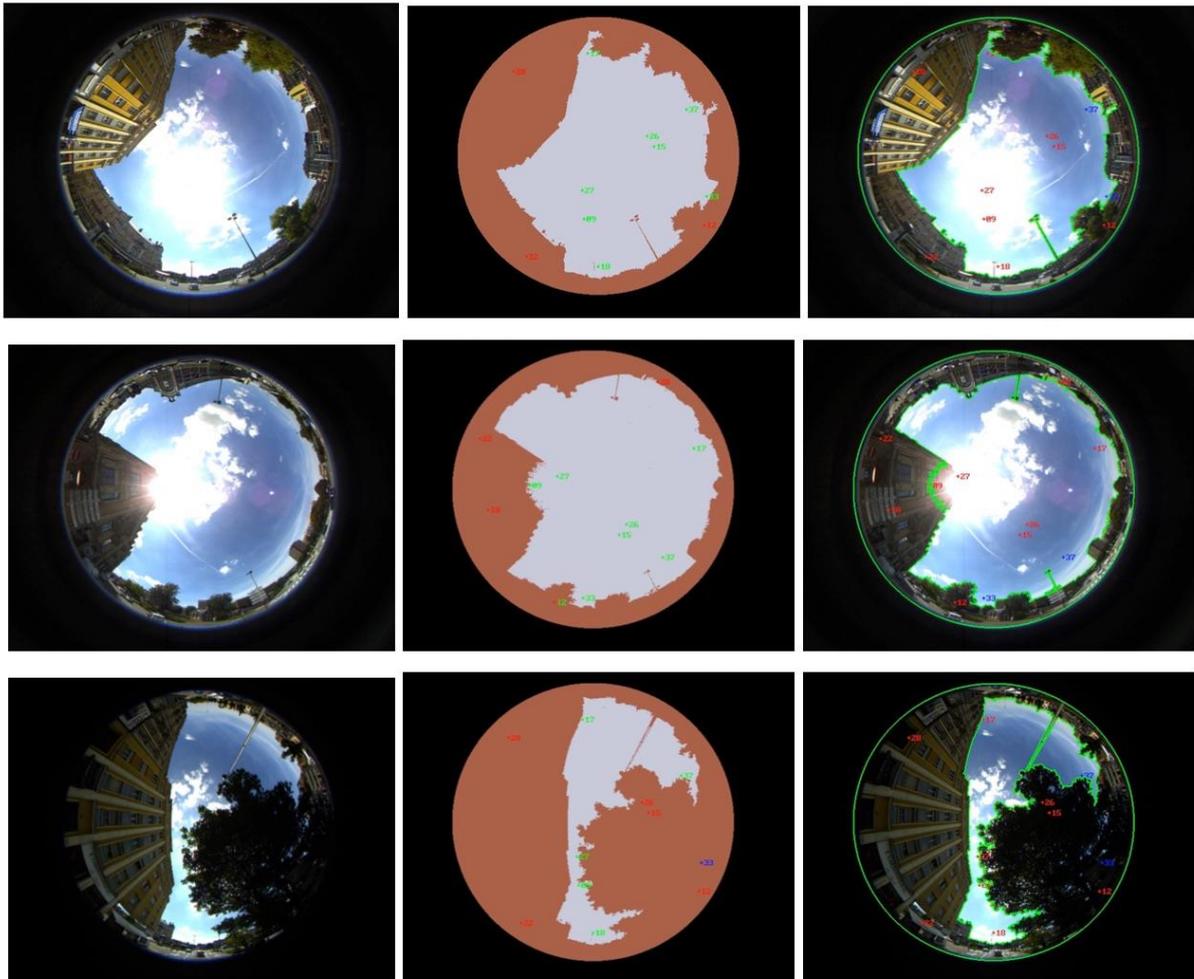


Figure 4. Détection « ciel/non-ciel » et de la ligne d'horizon (de gauche à droite : l'image acquise en mobilité, la détection « ciel/non-ciel » avec le repositionnement des satellites, la ligne d'horizon).

À l'issue de cette dernière étape de traitement, il devient possible de calculer une nouvelle position de localisation en excluant ou pondérant les différents satellites suivant leur classification dans l'image. Le lecteur désireux d'obtenir plus d'informations sur les différents blocs de traitement d'images illustrés en bleu sur la figure 3 pourra consulter (Attia 2010).

Pour faire suite à ces premiers résultats, nous travaillons actuellement à une classification plus fine des éléments d'intérêt constituant l'image fisheye de sorte à identifier les zones « ciel » mais aussi les zones « bâtiment » et « végétation » et ainsi pouvoir pondérer plus finement les signaux rencontrant ces surfaces. Les résultats actuels basés sur une détection de bâtiment et sur une segmentation couleur/texture de l'image sont prometteurs et méritent d'être poursuivis.

## b. Estimation de la structure 3D de l'environnement urbain

La tâche 2 est consacrée à la production d'un modèle 3D de la structure géométrique des bâtiments autour du véhicule. Pour cela, nous utilisons une étape de mise en correspondance stéréoscopique permettant de retrouver l'information de profondeur à partir d'un couple d'images fournies par un système composé de deux caméras. La figure 6 présente un schéma de la plateforme expérimentale conçue. Elle est composée de deux caméras, d'un module d'acquisition et d'un récepteur GNSS. Les caméras, fixées sur le toit selon l'axe longitudinal du véhicule, sont orientées de telle sorte que leurs axes optiques soient verticaux (figure 7).

Le modèle 3D obtenu doit être suffisamment précis pour permettre de corriger, si possible en temps-réel, les pseudo distances entachées d'erreurs dues à la présence de réflexions. Le système de perception est composé de deux caméras hautes résolutions munies d'objectifs fisheye. Grâce à leur champ de vision à 360°, il est possible de repérer les éléments de l'environnement dans le repère du véhicule. Ce repère est sphérique et identique à celui dans lequel les satellites sont positionnés. Il permet donc de relier directement certaines propriétés de propagation des satellites à la structure de l'environnement que le mobile traverse.

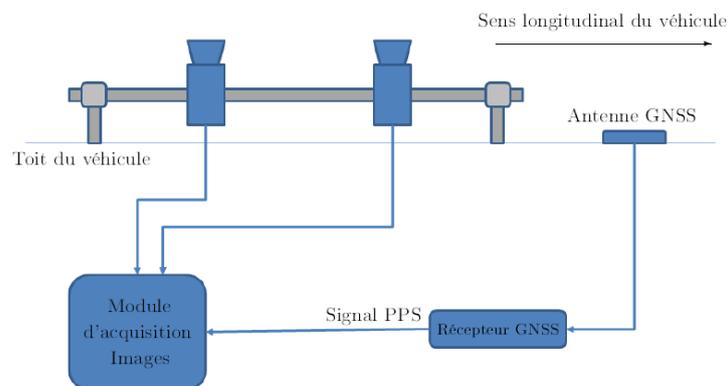


Figure 6. Schéma de la plateforme expérimentale du projet CAPLOC



Figure 7. Caméras utilisées pour le système stéréoscopique et système déployé sur le véhicule

Une procédure d'appariement est appliquée à chaque couple d'images afin d'estimer un nuage de points 3D. Ce nuage est composé des points de l'espace qui se sont projetés sur les images et pour lesquels la position 3D a été estimée : ces points pouvant appartenir à des façades, à du mobilier urbain, à de la végétation, etc. Afin de réduire la complexité de la mise en correspondance et de pouvoir estimer les coordonnées 3D des points de la scène, le système stéréoscopique est calibré. A l'issue de ce calibrage, il est possible de réduire l'espace de recherche des couples de points à deux courbes 2D conjuguées, une dans chaque image. La figure 8 présente, en haut, un couple d'images à apparier dont les courbes épipolaires ont été alignées avec les lignes horizontales des images. L'image située en bas à gauche est la carte des distances obtenues par un algorithme de coupure de graphe. L'image située en bas à droite est une vue partielle du nuage de points correspondant.

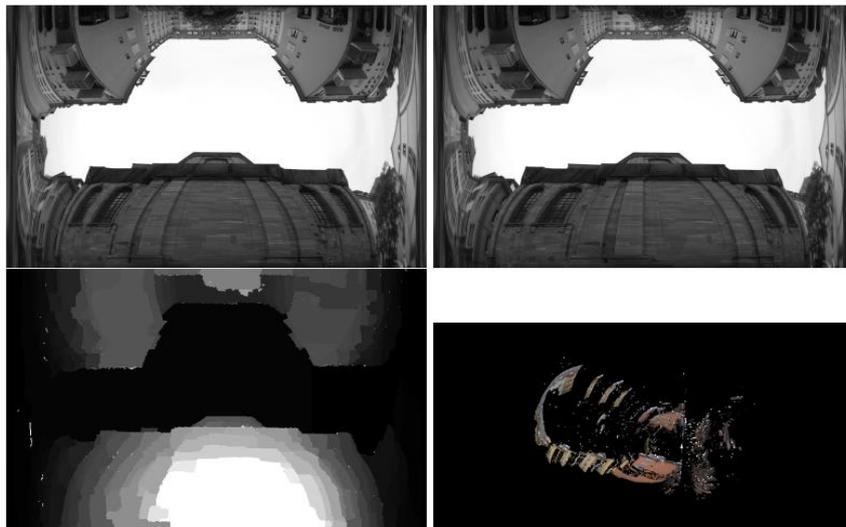


Figure 8. (En haut) un couple d'images à apparier dont les courbes épipolaires ont été alignées avec les lignes des images. (En bas) une carte des distances obtenues par coupure de graphe et une vue partielle du nuage de points correspondant.

En chaque position du mobile, un nuage de points est estimé en consolidant le nuage de points à la position précédente et le nuage de points estimé localement. L'idée est d'extraire à partir de ce nuage de points consolidé des informations sur la structure 3D de l'environnement le long de la trajectoire et de corriger les erreurs de pseudo distance dues aux réflexions multiples des signaux GNSS sur les objets et les façades autour du mobile. Pour cela, nous estimons (1) la position des surfaces réfléchissantes (principalement celles des bâtiments) proche de la position du mobile et (2) la position du mobile par rapport à ces surfaces. Pour y parvenir, nous avons développé une méthode d'extraction de l'empreinte des bâtiments à partir d'un nuage de points. La méthode opère en projetant verticalement les points 3D du nuage sur le plan horizontal. et en comptant le nombre de points d'altitude non nulle projetés sur une grille régulière définie dans le plan horizontal. Le résultat obtenu est similaire à un histogramme 2D du nuage. Pour un élément de la grille, plus le nombre de points est élevé, plus il est certain de l'existence d'une structure à cet endroit. La figure 17 présente un nuage de points et l'empreinte des bâtiments correspondante. Dans cette figure, l'empreinte est représentée par des segments rouges détectés en appliquant une transformée de Hough probabiliste [25]. Une comparaison avec des mesures prises sur le terrain nous permet de conclure que l'empreinte des bâtiments est localisée avec une erreur maximale de 30cm dans des configurations relativement simples. Dans des configurations plus complexes telles que les carrefours, les environnements présentant de la végétation ou les nuages de points présentant des problèmes d'appariements, estimer l'empreinte des bâtiments s'avère plus difficile. Ainsi sur la figure 10, l'image de droite montre le nuage de points reprojété dans l'image du couple servant de référence. Il apparait clairement des points dans les nuages qui pourraient provoquer la fausse détection de segments et par conséquent l'extraction incorrecte d'empreinte de bâtiments. Par ailleurs, cette image présente un bâtiment arrondi pour lequel une transformée de Hough donne de mauvais résultats. La connaissance des matrices de projection estimées lors de l'étape de calibrage nous permet alors de localiser le mobile dans ce nuage et de calculer sa position par rapport à chaque surface de réflexion des signaux GNSS. Sur la figure 9, les deux caméras du stéréoscope sont représentées par deux cercles. L'une des caméras est estimée à une distance de 13,98m et 4,96m de deux bâtiments situés de part et d'autre de la rue.

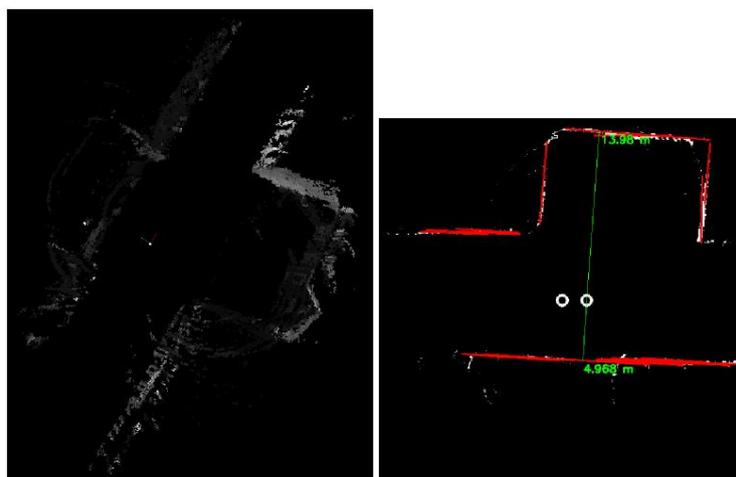


Figure 9. Empreinte de bâtiments extraite d'un nuage de points. L'empreinte est présentée après une rotation.

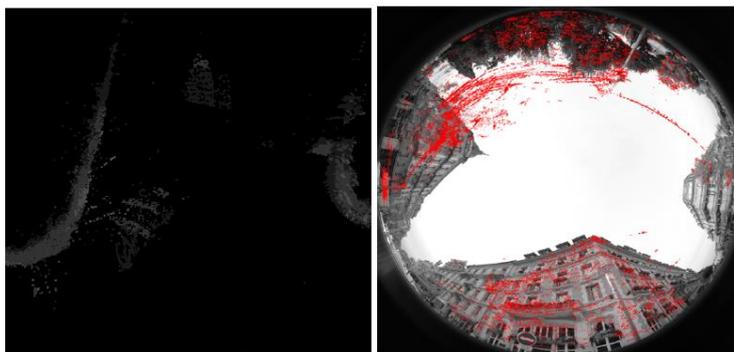


Figure 10. Nuage de points obtenus sur un couple d'images présentant un carrefour avec végétation. A gauche, l'histogramme calculé à partir de ce nuage de points.

### c. Estimation plus précise de la position

La finalité de l'utilisation de l'image dans CAPLOC est l'amélioration de la précision de la localisation dans les environnements fortement perturbés par les multitrajets. Plusieurs méthodes ont été expérimentées que nous résumons ici.

Il existe de nombreuses méthodes de mitigation des multitrajets tout au long de la chaîne de réception et de traitement des signaux GNSS (Lentmaier 2008) : traitement d'antennes, modélisation du canal de propagation, développement de nouveaux corrélateurs, algorithmes de navigation prenant en compte les bruits induits, ajouts de capteurs supplémentaires tels que capteurs inertiels ou même cartographies numériques. Dans le projet CAPLOC, le choix de la méthode s'est porté d'abord sur la détection et l'exclusion des satellites potentiellement perturbateurs de la qualité de la mesure.

#### Exclusion de tous les satellites NLOS

Cette méthode a été réalisée dans le cadre de la thèse de Dhouha Attia et consiste, comme (Obst 2012), à exclure les satellites classés en zone de non-ciel donc considérés en NLOS. Sont exclus les satellites se trouvant dans les régions « non-ciel » afin d'éliminer toutes sources de multitrajets. La technique est donc composée d'une première étape de segmentation de l'image en zones ciel et non ciel, suivie d'une étape de classification des signaux reçus selon leur état de réception (dans la zone ciel : LOS, dans la zone non ciel : NLOS). La position est ensuite calculée à partir d'un filtre de Kalman étendu (EKF) classique avec les satellites LOS uniquement.

Dans les figures qui suivent, la trajectoire de référence, obtenue grâce à un récepteur RTK, est toujours tracée en rouge et permet d'évaluer le gain des différentes solutions testées. Nous avons appliqué cette méthode sur une portion de trajectoire de 171 points RTK dans le centre de la ville de Belfort. La trajectoire en bleue est constituée des positions estimées à partir des signaux reçus depuis tous les satellites disponibles en utilisant une technique basée sur le filtre de Kalman étendu. Les pseudo-distances sont fournies par l'équipement Safedrive et utilisées dans le filtre. La trajectoire entière est formée de deux portions quasiment perpendiculaires reliées par un virage. La première ligne droite du trajet est longue d'environ 81 mètres et comprend 32 points de mesure, soit une vitesse moyenne inférieure à 10 km/heure, qui commence par un temps d'arrêt identifiable parce qu'il forme un amas de points. Sur la deuxième ligne droite, on compte 166 mètres et 26 points soit une vitesse moyenne de 23 km/heure. Les résultats de l'exclusion ont montré qu'en éliminant tous

les satellites NLOS, la précision était améliorée sur la première moitié du trajet ainsi que dans le virage où les positions estimées sont visiblement plus proches de la trajectoire de référence mais que la deuxième partie de la trajectoire était dégradée par rapport à la solution utilisant tous les satellites. Nous avons expliqué ceci par l'impact de la géométrie des satellites utilisés lors du calcul de la nouvelle position. Pour illustrer la relation entre la géométrie des satellites et la précision de la position estimée, nous utilisons le GDOP. Rappelons qu'une valeur de GDOP caractérisant une bonne géométrie est classiquement considérée inférieure à 3. A l'exception de quelques points de GDOP largement supérieur à 2, l'ensemble des points calculés avant  $t = 40s$  bénéficient d'une bonne géométrie, même lorsque les satellites NLOS sont exclus (points de couleur jaune et verte). La situation est clairement dégradée sur la période  $t = [40; 60]$  et l'impact sur la trajectoire est directement visible. Cette configuration montre les limites de notre stratégie : les satellites disponibles, même s'ils sont directs, ne sont pas disposés de façon optimale et la position est plus imprécise que lorsque tous les satellites sont utilisés.

Pour appliquer chaque stratégie de façon optimale, l'approche choisie consiste à alterner entre les deux solutions, c'est-à-dire à choisir la politique d'exclusion des satellites NLOS lorsque le DOP reste suffisamment bon (soit inférieur à un seuil choisi empiriquement - ici 3) et à garder tous les satellites dans le cas contraire. La figure 11 visualise l'ensemble de ces résultats sur des données de mesure réalisées dans la ville de Belfort : en rouge la trajectoire de référence ; en bleu la solution utilisant tous les satellites ; en vert les satellites directs uniquement et en violet la solution combinée.

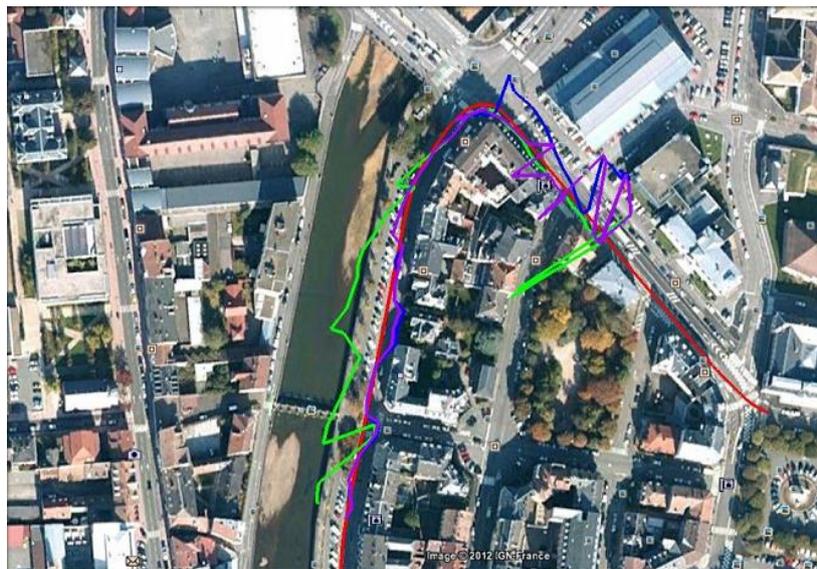


Figure 11. Vue aérienne (Google Earth) des trajectoires obtenues avec les trois solutions (en rouge : la référence, en bleu : tous les satellites utilisés, en vert : les satellites LOS uniquement, en violet : la solution combinée).

L'erreur de localisation est calculée en projetant orthogonalement les points de mesures sur la trajectoire de référence RTK. Nous représentons ces erreurs sous la forme d'une fonction de répartition sur la figure 12 pour les trois solutions : avec tous les satellites, avec les satellites LOS et la solution combinée. Cette représentation met en évidence l'amélioration apportée par les différentes méthodes sur la précision d'origine. On constate par exemple que la médiane de l'erreur passe de 5m

avec tous les satellites à 3 m avec le choix final soit une amélioration de 40% ou encore que 95% des positions sont inférieures à 24m contre 70% seulement des mesures utilisant tous les satellites.

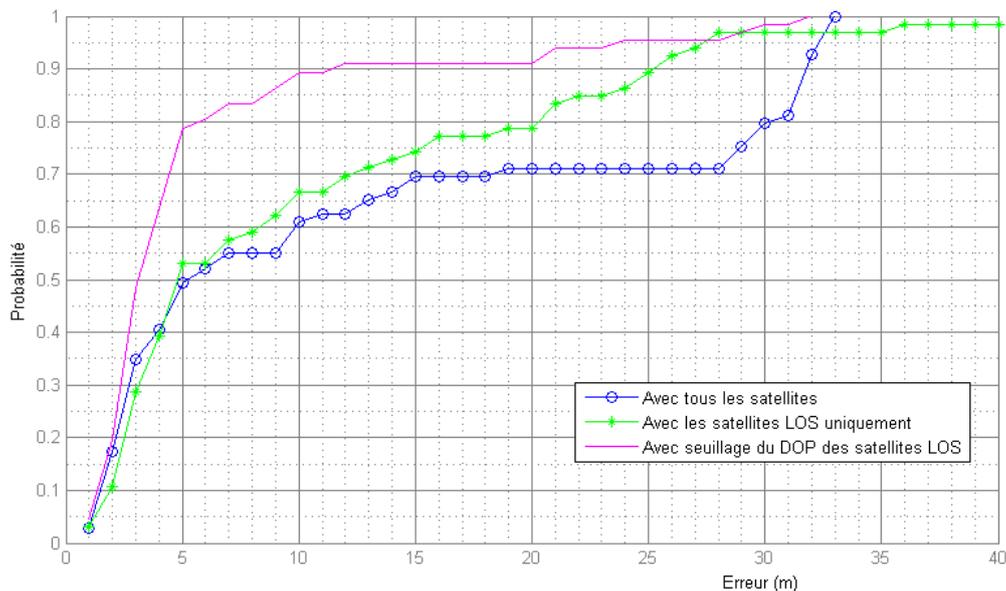


Figure 12. Fonction de répartition de l'erreur de positionnement selon les trois méthodes.

### Pondération des satellites en fonction de leur état de réception, leur niveau de signal reçu et leur élévation

Dans les applications GNSS, le filtre de Kalman est souvent utilisé mais on trouve également les estimateurs par moindres carrés, et moindres carrés pondérés. L'intérêt des moindres carrés pondérés est qu'il permet d'ajuster le poids apporté par chacun des signaux en fonction de la confiance qui leur est accordée.

Dans la littérature, les moindres carrés pondérés sont parfois utilisés pour optimiser l'usage des signaux reçus (ils utilisent tous les signaux disponibles) en attribuant une importance différente aux satellites en fonction de leur niveau de signal reçu et de leur élévation (Hartinger 1999). Le modèle le plus simple utilisant l'élévation exprime la variance comme l'inverse du sinus de l'élévation au carré. D'autres auteurs, comme (Li 2009) considèrent qu'un modèle utilisant le rapport C=N0 permet de prendre en compte autant l'élévation que les conditions de propagation et proposent les modèles suivants. Le modèle Sigma  $\epsilon$  (Wieser 2007) ou encore le modèle de Wieser (Wieser 2000) utilisent la valeur du rapport C/N0 (valeur normalisée du rapport signal sur bruit SNR) des signaux GPS pour estimer les poids à appliquer dans les moindres carrés.

Nous avons adapté ces solutions, en ajoutant une pré-étape de connaissance de l'état de réception des signaux. Nous proposons ainsi d'exprimer la variance comme suit :

$$\sigma_i^2 = k \times 10^{-0,1.CN0_i/\sin(\theta_i)^2}$$

avec k variant en fonction de l'état de réception du signal :

- k = 1 lorsque le satellite est reçu en trajet direct (LOS),
- k = 2 lorsque le satellite est en NLOS.

La valeur de  $k$  a été déterminée de façon expérimentale.

Nous avons comparé notre proposition aux autres modèles de la littérature pour quantifier son apport sur la précision à partir de la base de données expérimentale de Belfort et à un algorithme de moindres carrés non pondérés. L'erreur est estimée par projection des points calculés sur la courbe de référence obtenue grâce aux mesures RTK. Si le modèle simple basé sur l'élévation a légèrement amélioré la précision par rapport aux moindres carrés classiques, les autres modèles de pondération n'ont pas montré de résultats convaincants et nécessiteraient peut être un travail sur le choix des paramètres utilisés. Ici nous noterons que la solution par moindres carrés (MC) dont l'erreur moyenne est de 10,57m sur notre trajectoire a été considérablement précisée avec le poids CAPLOC, qui offre une erreur moyenne de 3,28m et un écart type de 2,5m contre 10,8m avec les MC.

Le tableau 1 résume les résultats.

|                   | Erreur (en $m$ ) avec les Moindres carrés | Erreur (en $m$ ) avec la solution CAPLOC ( $k=2$ ) |
|-------------------|---|--|
| <b>Moyenne</b>    | 10,57                                     | 3,28   |
| <b>Médiane</b>    | 4,33                                      | 2,88   |
| <b>Ecart-type</b> | 10,8                                      | 2,5  |
| <b>RMS</b>        | 15,07                                     | 4,11   |

### Utilisation du modèle 3D

Comme nous le présentions précédemment, nous estimons et consolidons le nuage de points 3D autour du mobile grâce à l'analyse des images fournies par un stéréoscope fisheye. Notre objectif étant de corriger les erreurs sur les pseudo-distances dues aux réflexions multiples sur les bâtiments, notre objectif est d'en extraire leur surface et d'en estimer la hauteur et le vecteur normal. La hauteur des bâtiments est estimée en analysant la distribution des points verticalement au-dessus des empreintes détectées comme nous l'indiquions précédemment. Nous estimons la normale de chaque plan en étudiant l'ensemble des points ayant contribué à la détection de chaque segment composant l'empreinte des bâtiments. La figure 13 illustre le résultat obtenu. Sur cette même figure, nous montrons qu'il est également possible de positionner les satellites grâce aux paramètres orbitaux reçus dans les trames GPS et d'appréhender leur position par rapport aux bâtiments présents dans la scène.

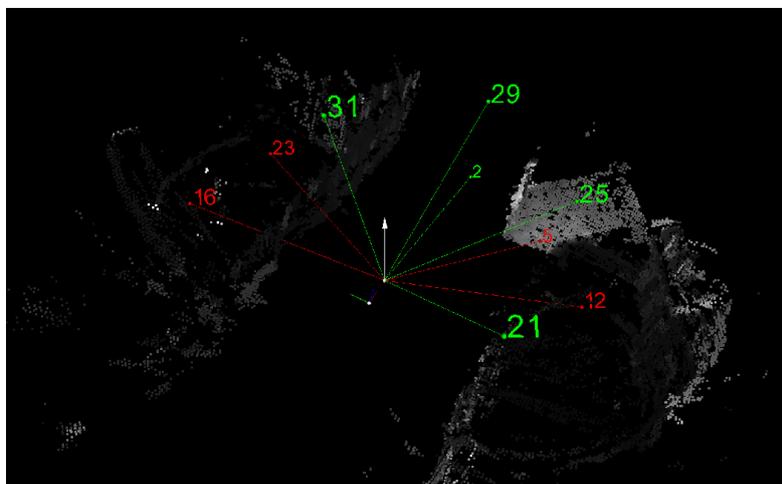


Figure 13. Détection de plan à partir de l’empreinte des bâtiments. Positionnement des satellites à partir des paramètres orbitaux reçus.

En suivant les pistes développées dans [26], nous proposons de corriger le retard  $r$  d’une pseudo-distance  $\rho_{mesurée}$  estimée à partir d’un satellite reçu par réflexion de la manière suivante :

$$\rho_{corrigée} = \rho_{mesurée} - r$$

La figure 14 est la représentation d’un retard lorsque le plan azimuthal du satellite est orthogonal aux bâtiments. La valeur du retard géométrique dépend à la fois de la configuration du canyon et de la position du satellite (azimut et élévation). On peut alors écrire  $r$  selon l’équation suivante dans laquelle  $el$  est l’élévation du satellite :  $r = \omega_i \times \cos el$

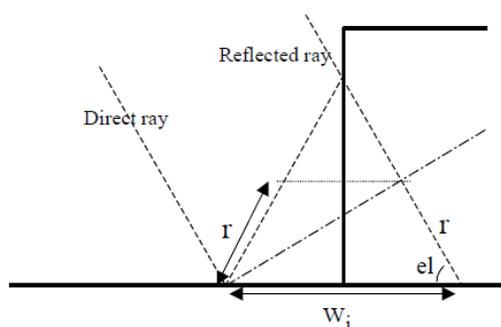


Figure 14 : coupe d’un canyon urbain et retard  $r$  causé par la réflexion 2D

Lorsque l’azimut est quelconque, le retard  $r$  s’exprime par les équations situées à droite de la figure suivante dans lesquelles  $L$  est la largeur de la rue :

$$\begin{array}{ll} el_{th1} = \arctan \left| \frac{H \times \cos(\alpha)}{w_i} \right| & r_{1\ ref} = 2 \times w_i \times \cos(el) \times \cos(\alpha) \\ el_{th2} = \arctan \left| \frac{H \times \cos(\alpha)}{2 \times L - w_i} \right| & r_{2\ ref} = 2 \times L \times \cos(el) \times \cos(\alpha) \\ el_{th3} = \arctan \left| \frac{H \times \cos(\alpha)}{2 \times L + w_i} \right| & r_{3\ ref} = 2 \times (w_i + L) \times \cos(el) \times \cos(\alpha) \end{array}$$

Il est important de noter que le nombre de réflexions subi par le signal d’un satellite est déterminé en comparant son élévation aux trois seuils ( $el_{th1}$ ,  $el_{th2}$ ,  $el_{th3}$ ) définis par les trois équations précédentes. Dans ces équations  $H$  représente la hauteur du bâtiment derrière lequel le satellite est positionné. Ainsi, à chaque intervalle d’élévation correspond une équation permettant de calculer le retard correspondant.

Ainsi, à chaque instant de réception des données GNSS fournies par le récepteur, il est aisé de définir le retard associé à chaque satellite après avoir déterminé la nature de sa réflexion. Nous avons validé cette méthode de correction sur des données acquises sur la ville de Lille. La figure 15 montre le résultat en une position sur le trajet lillois : nous avons superposé la position (GPS position) du mobile donnée par le récepteur Safedrive de M3System (i.e. en considérant tous les satellites comme LOS), la position de référence (Reference position) et la position (PR rectification) après correction

des satellites NLOS. La position de référence est donnée par un récepteur RTK. Elle permet de conclure, dans ce cas de figure, que la correction apporte une amélioration.



Figure 15 : Amélioration de la localisation après correction du retard sur les pseudo-distances NLOS

En mobilité, les résultats obtenus ne sont pas à la hauteur de ce que nous escomptions. La correction que nous appliquons aux pseudo-distances NLOS dégradent souvent la position calculée par le récepteur. La première conclusion serait que le phénomène corrigé par notre méthode n'est pas celui observé par le récepteur. La deuxième conclusion serait de considérer que les pseudo-distances fournies par le Safedrive étant filtrées, nous ne pouvons leur appliquer directement nos corrections.

## 4. La solution INTURB

L'étude INTURB se place dans le contexte de l'utilisation croissante des GNSS dans les services réglementaires de transport routier, pour lesquels l'intégrité est essentielle. C'est l'intégrité qui permet de garantir un niveau de performance en précision de positionnement avec un risque chiffré.

De plus, cette problématique de géopositionnement est ici considérée en milieu urbain.

L'étude porte sur l'amélioration des performances de positionnement en ville par l'exploitation de la connaissance de l'environnement dans le traitement des mesures NLOS (Non-Line-Of-Sight, c'est-à-dire obtenues après réflexion du signal émis de satellites qui sont masqués) : la phase 1 concerne l'amélioration de la précision ; la phase 2 concerne le calcul de l'intégrité (c'est-à-dire la confiance).

L'étude est menée en partenariat entre l'Ifsttar et la SCM, Société de Calcul Mathématique SA, qui agit en tant que coopérateur scientifique en charge des aspects de modélisation probabiliste.

### d. Caractérisation des rues

Dans l'approche INTURB, le problème de la visibilité des satellites est traité selon un axe orienté dans la direction de la rue, et la géométrie des bâtiments est moyennée (la rue est modélisée comme une « tranchée urbaine »), ce qui conduit à considérer deux frontières (ou élévations critiques) à gauche et à droite de la rue pour sélectionner les satellites et corriger les mesures de pseudo-distance. Ainsi, notre « masque de visibilité » ressemble à un ballon de rugby (Figure 16), plus ou moins dissymétrique selon que la rue est circulée de façon plus ou moins centrée par rapport au bâti. La position transversale dans la rue est, par hypothèse, fixée sur l'axe représenté en base de données.

La caractérisation des rues a consisté :

- en une recherche d'une base de données répondant à notre objectif de pouvoir décrire les bâtiments de part et d'autre des rues circulées,
- en la conception et la mise en œuvre d'un algorithme permettant, à partir de cette base, de calculer automatiquement les paramètres du modèle de tranchées urbaines.

La base retenue est BD Topo<sup>®</sup>, base nationale du RGE (Référentiel à Grande Echelle), de précision métrique pour les couches route et bâti qui nous intéressent. C'est un produit de l'IGN.

Les paramètres du modèle sont, pour chaque segment de rue :

- son identifiant;
- sa direction angulaire;
- les coordonnées de ses points initial et final;
- la liste de ses voisins (pour un map-matching rapide);
- la distance moyenne des bâtiments situés à gauche et leur hauteur moyenne (W1, H1);
- la distance moyenne des bâtiments situés à droite et leur hauteur moyenne (W2, H2).

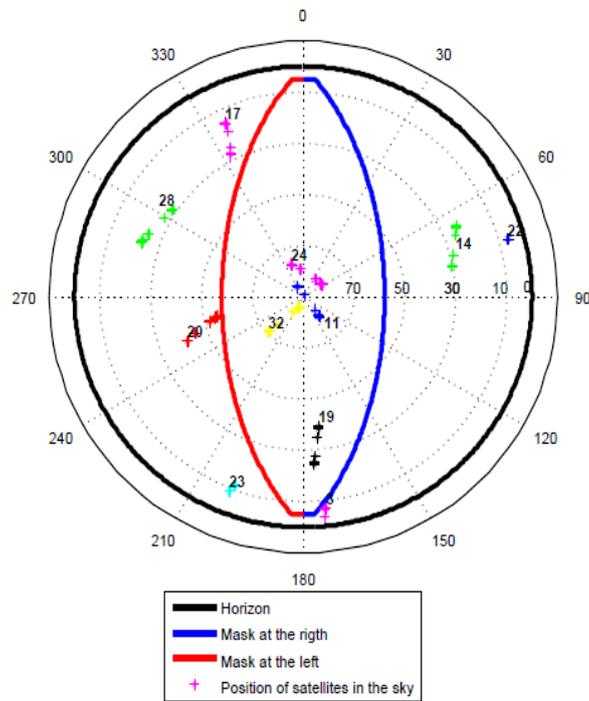
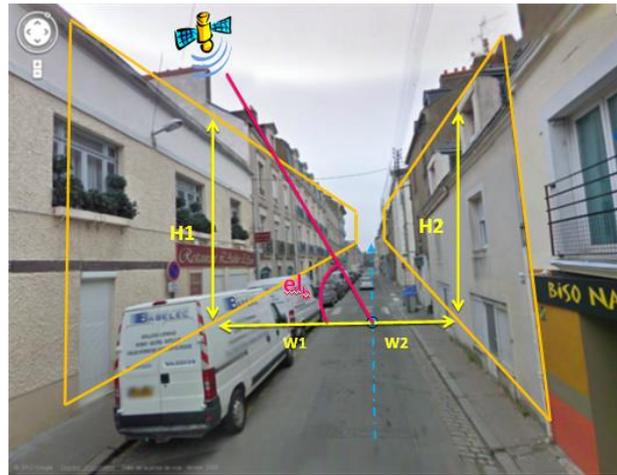


Figure 16. Caractéristiques d'une rue à Nantes, typique d'une tranche urbaine, les couches route et bâti correspondantes dans la BD Topo<sup>®</sup> et le masque de visibilité obtenu.

L'algorithme de caractérisation automatique a été conçu et produit sous Quantum GIS et PostgreSQL & PostGIS, des outils libres de géomatique. Il est illustré Figure 17 et 18.

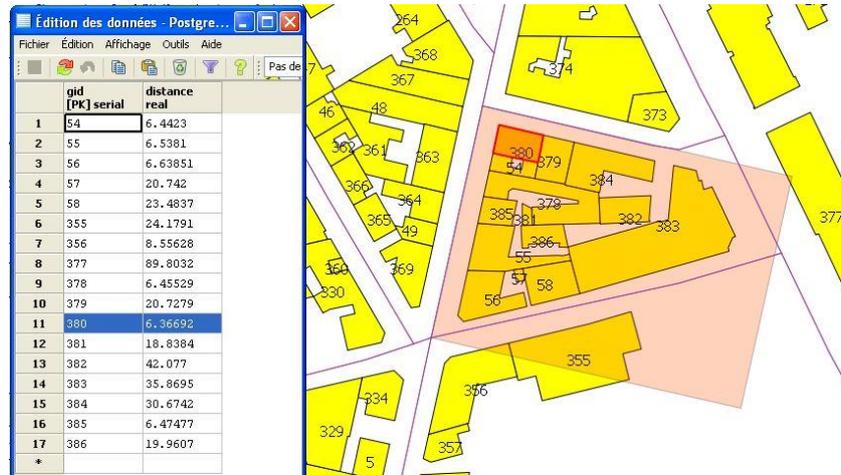


Figure 17. Recherche des bâtiments à droite du segment de rue, jusqu'à 100 mètres, et identification du plus proche.

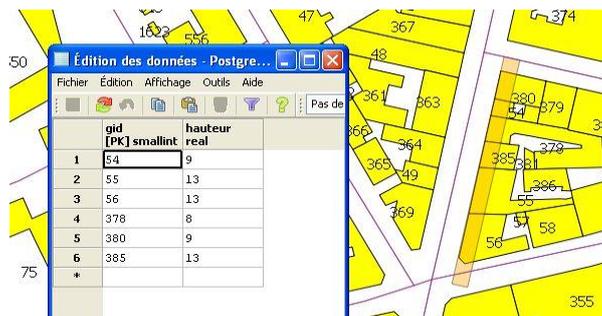


Figure 18. Recherche des bâtiments à droite, à partir du plus proche et jusqu'à 5 mètres, puis moyenne des hauteurs.

### e. Approche déterministe

L'approche initiale (phase 1) est totalement déterministe : en voici un résumé.

Pour un satellite situé du côté gauche de la rue, l'élévation critique au-dessous de laquelle une réflexion spéculaire se produit est donnée par :

$$el_{01} = \arctg \left| \frac{H1}{W1} \sin(\beta) \right|$$

où  $\beta$  mesure la différence angulaire entre l'azimut du satellite et la direction de la rue.

Nous considérons un maximum de deux réflexions spéculaires. Une formule similaire peut être obtenue pour deux réflexions consécutives sur les façades opposées de la rue.

Ces réflexions causent une erreur additionnelle de pseudo-distance, égale, en cas d'une réflexion, à :

$$m_1 = 2W_2 \cos(el) \sin(\beta)$$

où  $el$  représente l'élévation du satellite.

Les tableaux 2 et 3 donnent les élévations critiques et les distances additionnelles pour 1 et 2 réflexions.

| Critical elevation angle  |   |
|---|---|
| Left side   | Right side  |
| $el_{01} = \arctg \left  \frac{H_1}{W_1} \sin(\beta) \right $               | $el_{01} = \arctg \left  \frac{H_2}{W_2} \sin(\beta) \right $               |
| $el_{12} = \arctg \left  \frac{H_1}{W_1 + 2 \cdot W_2} \sin(\beta) \right $ | $el_{12} = \arctg \left  \frac{H_2}{W_2 + 2 \cdot W_1} \sin(\beta) \right $ |

Tableau 2 – Élévations critiques pour la transition LOS à NLOS 1 réflexion ( $el_{01}$ ), et la transition NLOS 1 à 2 réflexions ( $el_{12}$ )

| Number of reflections | Additional distance                                     |  |
|-----------------------|---|--|
|                       | Left side   | Right side   |
| 0                     | $m_0 = 0$   |  |
| 1                     | $m_1 =  2 \cdot W_2 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(el) $  | $m_1 =  2 \cdot W_1 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(el) $ |
| 2                     | $m_2 =  2(W_1 + W_2) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(el) $ |  |

Tableau 3 – Distances additionnelles correspondantes

## f. Mise en œuvre expérimentale

La base de données INTURB1 a été entièrement exploitée grâce à l'algorithme de caractérisation automatique. 10 heures au total ont été couvertes à Nantes, Paris et Toulouse, les 30 janvier 2012, 21, 22 et 23 février 2012 et 10 juillet 2012 respectivement. La vérité terrain était donnée par le VERT équipé de la centrale inertielle LandINS d'Ixsea et d'un récepteur GPS/Glonass cinématique bi-fréquence Novatel en différentiel avec une station permanente locale.



Figure 19. Le VERT.

En conclusion, un gain (entre 30% et 90%) est toujours réalisé dans les tranchées urbaines, malgré divers environnements urbains. Ce gain est moindre (quelques points de moins) lorsque les satellites NLOS sont introduits dans le solveur aux moindres carrés (après correction des pseudo-distances), mais l'amélioration que cette stratégie apporte en termes de disponibilité la rend précieuse de toute

façon. En fait, alors que la disponibilité était réduite de 10% à 30%, la pleine disponibilité est presque récupérée.

La Figure 20 agrège toutes les époques et tous les sites de test (c'est à dire 10h des données). La distribution d'erreur 3D cumulée est affichée, pour l'approche standard tous satellites, pour l'approche utilisant les satellites LOS seulement, et pour l'approche satellites LOS et NLOS pseudo-distances corrigées, grâce à l'application des tranchées urbaines caractérisées automatiquement.

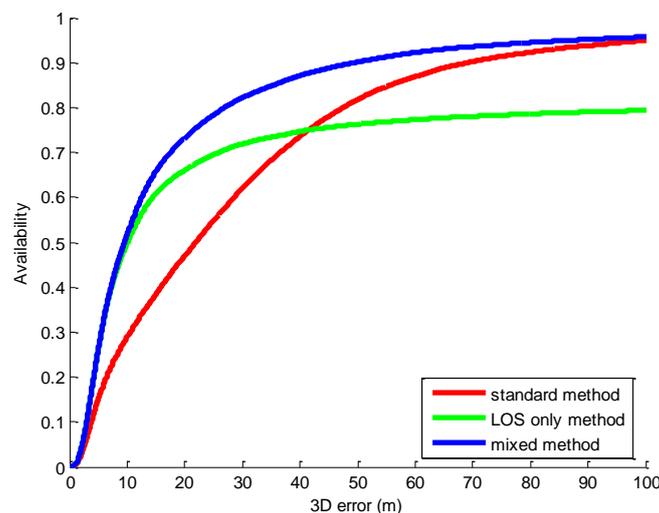


Figure 20. Diagramme d'erreur 3D cumulée (selon 3 modalités de calcul).

10h ont été couvertes en utilisant la base de données BD Topo<sup>®</sup> pour générer automatiquement les tranchées urbaines. La disponibilité est d'environ 80% pour la méthode utilisant seulement les satellites LOS, tandis que les méthodes standard et NLOS pseudo-distances corrigées atteignent près de 100%. L'erreur médiane en 3D a été réduite de 21,7m à 9,4m, soit une amélioration de 56%.

## g. Approche probabiliste

### Loi d'erreur des mesures

Alors que l'approche en phase 1 était totalement déterministe, on présente en phase 2 une modélisation probabiliste. Pour cela, nous avons analysé les incertitudes sur les erreurs de pseudo-distance.

Cette analyse considère la distribution des erreurs de pseudo-distance. Ces erreurs sont les différences entre les distances géométriques et les pseudo-distances mesurées, celles-ci étant corrigées par les retards troposphérique (modèle de Hopfield) et ionosphérique (modèle diffusé), les termes d'horloge des satellites, et le terme d'horloge du récepteur (par le biais du plus satellite par époque, supposé sans multi-trajets). Les distances géométriques sont basées sur la vérité terrain obtenue en utilisant le VERT.

La distribution des erreurs de pseudo-distance, si l'on considère un grand ensemble de données, est gaussienne centrée dans un espace ouvert, mais elle montre un décalage vers les valeurs positives et

une « queue » de grandes valeurs positives dans l'environnement urbain. A des sous-ensembles de données, nous avons cherché à faire correspondre une loi gaussienne multi-modale (voir Figure 21), dont les paramètres dépendent de la géométrie de la rue, et de l'azimut et l'élévation des satellites considérés.

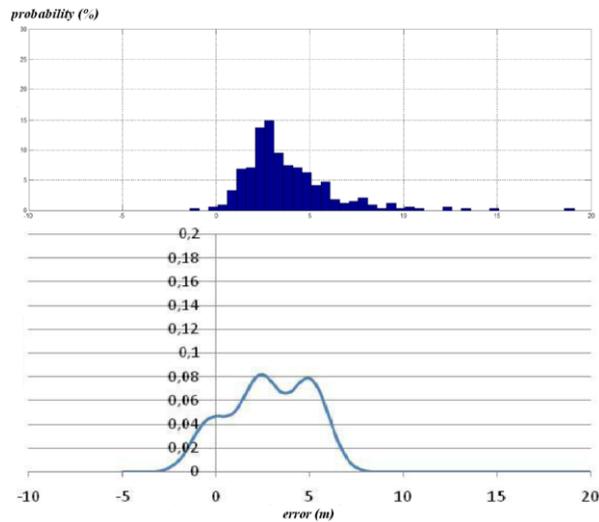


Figure 21. Exemple de sous-ensemble d'erreurs de pseudo-range, pour une configuration géométrique donnée (rue étroite, bâtiments élevés) et des satellites faibles en élévation relativement aux bâtiments; modélisation multi-modale correspondante.

L'analyse a été menée en utilisant principalement des données de Paris enregistrée en phase 1. Dans les rues avec la même configuration géométrique (c'est à dire de largeur et hauteur similaires), la carte du ciel est découpée en bandes de taille égale, chacune correspondant à une zone entre deux élévations, celles-ci étant modulées par l'azimut par rapport à la direction de la rue, pour tenir en compte de la géométrie en tranchée urbaine. Ceci sélectionne des satellites avec une visibilité équivalente par rapport à l'environnement local. La comparaison des erreurs de pseudo-distance aux distances supplémentaires théoriques effectuées en cas de trajets multiples montre qu'une partie des satellites dans une bande n'est pas conforme au modèle. Là où, par exemple, nous nous attendons à une réflexion dans une bande, un certain pourcentage montrera effectivement deux réflexions (ou pas de réflexion). Cela a été modélisé de façon probabiliste. Ainsi, l'incertitude sur le nombre de réflexions sur les bâtiments est considérée comme identique pour tous les satellites dans une bande donnée.

Soit  $P_0$ ,  $P_1$  et  $P_2$  les probabilités d'avoir 0, 1 et 2 réflexions. On a  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ . A partir des mesures recueillies précédemment dans Paris, un modèle est construit. Les probabilités sont exprimées en fonction de l'élévation du satellite par rapport aux élévations  $el_{01}$  et  $el_{12}$  critiques, celles-ci dépendant de la modélisation géométrique localement et la différence d'azimut  $\beta$  (Figure 22). Ce modèle est désigné par le sigle : UTPM pour Urban Trench Probabilistic Model.

Ainsi, la méthode présentée permet de construire automatiquement la loi d'erreur de pseudo-distance en fonction des caractéristiques de l'environnement urbain et de la position du satellite par rapport à la rue.

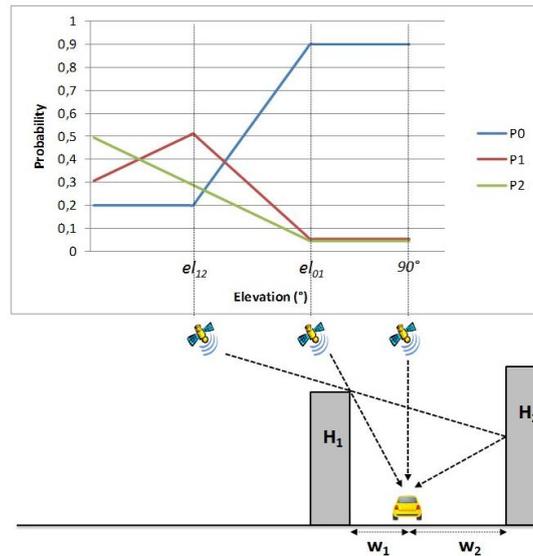


Figure 22 : Modèle de probabilités P0, P1 et P2.

### Calcul de l'intégrité

Une loi gaussienne multi-modale ne permet pas un calcul explicite de la solution de navigation ni de son niveau de protection. Nous avons simplifié la distribution, en ne considérant que ses modes. Ainsi, la loi d'erreur du signal est une distribution de probabilité discrète formée de trois distances additionnelles associées à leur probabilité. Un calcul combinatoire peut alors être mis en œuvre.

Les distances additionnelles  $m_0$  (nulle),  $m_1$  ou  $m_2$  sont soustraites des pseudo-distances. A chaque époque,  $n$  satellites sont détectés. Ainsi,  $3n$  positions du récepteur sont calculées avec un solveur aux moindres carrés, en combinant les trois différents cas possibles de réflexion, associées chacune à une probabilité. La moyenne pondérée de ces positions donne la position corrigée du récepteur. Le grand axe de l'ellipsoïde qui englobe toutes les positions est multiplié par  $K = 6.18$  pour obtenir le niveau de protection (3D Protection Level, noté 3DPL). Ce facteur  $K$  est obtenu dans la table statistique inverse du  $\text{Khi}^2$ , et nous avons repris sa valeur utilisée par l'aviation civile.

De même, mais sans aucune utilisation du modèle urbain 3D local, un niveau de protection 3D au standard de l'aviation civile peut être calculé (MOPS) : celui-ci est basé sur le bruit de mesure des pseudo-distances et sur la matrice de  $H$  qui est utilisée dans le solveur aux moindres carrés, matrice  $H$  qui considère tous les satellites en vue, indépendamment de leur position par rapport au bâti.

### Validation expérimentale

Une nouvelle campagne s'est déroulée sur Nantes les 27 février et 5 mars 2014 et Paris les 28, 29 et 30 avril 2014.

L'objectif de cette campagne était d'acquérir les signaux bruts (pseudo-distances et Dopplers) du récepteur GNSS ublox-LEA-6T (capteur bas coût), et de mettre en œuvre le calcul de position et d'intégrité utilisant les tranchées urbaines.

La trajectoire de référence est, comme pour la phase 1 du projet, déterminée grâce au VERT.

Les résultats présentés reprennent toute la phase 1 (Paris, Nantes et Toulouse) et les mesures du 27 février 2014 à Nantes pour la phase 2 (l'exploitation complète de cette campagne est en cours).

Les résultats sont répertoriés dans les tableaux ci-dessous où sont indiqués :

- les quantiles 5, 50 et 95 de l'erreur 3D en utilisant les signaux bruts de pseudo-distance des satellites (pas de prise en compte de l'environnement urbain) d'une part, et les quantiles 5, 50 et 95 de l'erreur 3D en appliquant l'UTPM d'autre part ;

| 3D Error with all satellites (m) |        |                             | 3D Error with UTPM (m)     |        |                             |
|----------------------------------|--------|-----------------------------|----------------------------|--------|-----------------------------|
| 5 <sup>th</sup> percentile       | median | 95 <sup>th</sup> percentile | 5 <sup>th</sup> percentile | median | 95 <sup>th</sup> percentile |
| 3.3                              | 23.4   | 87.3                        | 3.0                        | 10.7   | 47.9                        |

- les quantiles 5, 50 et 95 du niveau de protection 3D de l'UTPM (3DPL).

| 3D Protection Level (m)    |        |                             |
|----------------------------|--------|-----------------------------|
| 5 <sup>th</sup> percentile | median | 95 <sup>th</sup> percentile |
| 47.2                       | 119.9  | 360.2                       |

Le nombre d'époques non intègres (événements redoutés ou MI « misleading information ») est 994, duquel se déduit le risque d'intégrité : 994 pour 161724 époques, soit un risque d'intégrité de 6.10<sup>-3</sup>.

La médiane de l'erreur de position 3D passe de 23,4m à 10,8m soit une diminution de 54% de l'erreur.

Le 3DPL médian est de 126m avec un risque d'intégrité de 6.10<sup>-3</sup>. Le MOPS (avec 7.8m de niveau de bruit de mesure fixé à partir de l'analyse des résidus du calcul standard tous satellites) donne 86m et un risque de 6.10<sup>-2</sup>, soit un ordre de grandeur plus grand !

Les diagrammes de Stanford du 3DPL et du MOPS (3D) suivent en figure 23. Ils agrègent toute la campagne de la phase 1 (Paris, Nantes et Toulouse) et seulement les données expérimentales du 27 février 2014 à Nantes pour la campagne de la phase 2.

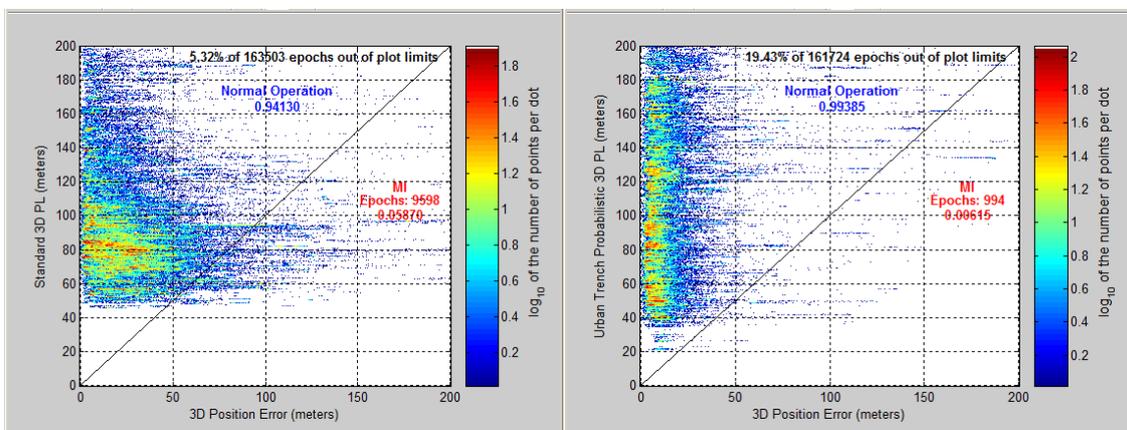


Figure 23. Diagrammes de Stanford **standard aviation civile** et modèle tranchées urbaines.

## 5. Conclusions et perspectives

### CAPLOC

L'objectif de CAPLOC était de délivrer une information de localisation précise, accessible en tous lieux, dans un contexte de réduction globale des coûts. CAPLOC est un projet de recherche amont. L'approche suivie, brevetée en 2008 et présentée dans cette synthèse, repose une connaissance de l'environnement de propagation fournie par une ou plusieurs caméras et des traitements d'images capables de détecter l'état de réception des signaux satellitaires et d'apporter une connaissance des perturbations causées par les obstacles environnants afin de réduire leur effet sur la localisation GNSS. Comme décrit également dans l'introduction, cette approche est aujourd'hui adaptée par plusieurs acteurs de la recherche dans des systèmes embarquant des cartes numériques 3D et avec des objectifs similaires. L'arrivée de ces travaux ne remet cependant pas en cause l'intérêt du projet. En effet, nous reviendrons sur la question de l'équipement à embarquer (volume et coût), mais l'utilisation de l'image présente le double avantage de ne pas dépendre d'un modèle à acquérir et à mettre à jour et de ne pas devoir se positionner dans ce modèle.

- Trois axes majeurs ont été développés dans le projet, tous illustrés avec des données réelles et valorisés par des publications scientifiques : Techniques de segmentation et de classification d'images fish-eye couleurs, comparées aux techniques de la littérature, permettant en temps réel, de détecter l'état de réception des signaux satellitaires reçus en fonction des obstacles rencontrés.
- Estimation de la structure 3D de l'environnement urbain à partir du traitement des images fournies par un système de perception multi caméras fisheye. Positionnement du mobile relativement aux bâtiments pour estimer les retards dus aux réflexions multiples.
- L'utilisation de ces connaissances sur la propagation des signaux reçus pour une estimation plus précise de la position : par détection et exclusion du/des satellite(s) reçu(s) de façon indirecte ; par la pondération de ces satellites pour une solution plus optimale des signaux disponibles et par la correction de l'estimation de la pseudo-distance grâce au modèle 3D.

L'objectif final du projet était l'amélioration de la précision de la localisation, et, sur la trajectoire testée, la meilleure précision obtenue (avec la méthode des moindres carrés pondérés) a permis de localiser le véhicule à 3,28m en moyenne contre 10,57m avec une méthode dite « classique ». Les méthodes développées ouvrent encore des perspectives d'amélioration qu'il faudra poursuivre, en affinant le critère de pondération mais aussi en ouvrant la connaissance a priori de l'état de réception à d'autres algorithmes d'estimation dynamique de l'erreur par exemple. La correction des pseudo-distances en intégrant la connaissance sur la structure 3D des bâtiments alentour a été validée sur certains points d'une zone urbaine. Ce concept reste à améliorer sur un jeu de données dynamique Car il n'offre pas encore d'améliorations significatives en mobilité. Il s'agira également d'étudier les passerelles entre ces méthodes et les méthodes utilisant des modèles 3D embarqués, qui se développent depuis 3 ans.

Les recherches effectuées sur les axes traitements d'images sont également riches de perspectives. La classification des pixels des images fisheye a intéressé les industriels de la simulation GNSS qui y ont vu un outil pour la modélisation de masquages réalistes ou pour le développement de techniques d'intégrité dans des environnements contraints. L'approche de segmentation d'images proposée et

combinant de manière adaptative et non paramétriques les informations de couleur et de texture pourrait par exemple être utilisée dans d'autres applications. En effet, une segmentation fine de l'image faisant ressortir différentes zones d'intérêts est un atout pour le développement d'outils d'aide à la vidéosurveillance intelligente ou encore d'aide au diagnostic dans le domaine de la santé. De plus, les algorithmes de caractérisation fine (ciel/bâtiment/végétation) de l'environnement urbain pourraient être utilisés à d'autre domaine du transport, de la robotique, ou de la défense.

L'idée de corriger les erreurs de pseudo-distance dues aux réflexions des signaux GNSS sur les bâtiments a été validée dans la littérature sur la base de modèles numériques de terrain (MNT) embarqués à bord du mobile. Cette technique nécessite un MNT à jour et la possibilité de pouvoir se localiser assez précisément dans ce modèle à partir des signaux GNSS reçus. Les performances obtenues dépendent donc beaucoup de la précision de la carte et de la position GNSS initiale. CAPLOC propose d'estimer la structure 3D de l'environnement urbain en temps-réel et d'y positionner le mobile. Avec cela nous échappons à la nécessité de connaître avec précision la position absolue initiale du mobile et nous faisons appel à des informations 3D actualisées et produites à partir d'un point de vue plus proche de celui de l'antenne GNSS. En fusionnant les modèles 3D de l'environnement obtenus au cours du déplacement, il est possible de calculer un modèle consolidé et complet du trajet du mobile. Dans le cadre d'une flotte de véhicules munis de système de communication V2V et V2I, l'ambition pourrait être de concevoir de manière collaborative un modèle 3D toujours mise à jour à la dimension d'une ville. Nous développons actuellement un système capable d'estimer les mêmes informations 3D à partir d'une seule caméra HD fisheye afin de réduire son encombrement et de faciliter son intégration. Grâce à ce système, il sera alors possible simultanément d'extraire le surface 3D des objets alentour et d'en renseigner la nature qui régit les propriétés de la réflexion. La solution mono fisheye intégrée est utilisable dans d'autres contextes tels que celui de la robotique mobile et tout particulièrement celui du développement des robots d'assistance. Il est également envisagé de l'exploiter dans le cadre d'une flottille de drones pour des applications de surveillance d'infrastructures terrestres.

Le projet CAPLOC a montré, avec des résultats de recherche amont, que le concept utilisant l'image acquise en mobilité, pour une connaissance de la propagation des signaux GNSS permettait d'améliorer la précision de localisation dans des environnements urbains. A l'origine développé à la demande d'opérateurs de transports publics, le concept a été validé essentiellement sur véhicules routiers dans CAPLOC et partiellement à partir d'images ferroviaires avec quelques images issues du projet européen SATLOC. Le système développé aujourd'hui comporte deux caméras à objectif fisheye placées verticalement sur le toit du véhicule, à proximité d'une antenne GNSS, un récepteur GNSS et un ordinateur pour le stockage et le traitement des acquisitions. Une version mono-caméra sera disponible début 2016. Le système est tout à fait transposable à d'autres modes de transport. Les travaux futurs devront envisager la simplification ou la miniaturisation des équipements pour un embarquement plus facile dans tout type de véhicule. L'implémentation de certaines parties algorithmiques (telle que l'estimation des nuages de points 3D) sur des architectures adaptées permettra de réduire les temps de traitement et de respecter la contrainte temps-réel, requise par les applications.

## **INTURB**

L'étude INTURB, réalisée par l'IFSTTAR et la SCM, a produit les résultats suivants :

- caractérisation automatique des rues : à partir de la BD Topo<sup>®</sup> et au moyen d'un algorithme codé avec des outils libres de traitement de l'information géographique. Le principal avantage de ce modèle est d'ordre structurel: il correspond effectivement à la structure de l'information des données géographiques stockées dans les systèmes de navigation automobile ou les appareils de navigation portables. En conséquence, nous estimons que la capacité de stockage de données requise pour notre méthode de tranchées urbaines afin de fonctionner est compatible avec les limitations des systèmes actuels.
- modélisation probabiliste et calcul d'intégrité : nous prenons en considération les incertitudes quant aux réflexions possibles (zéro, une ou deux) des signaux satellitaires, incertitudes principalement liées à la géométrie approximative et moyennée du bâti et à l'hypothèse de circulation sur l'axe de la rue. L'intégrité prend la forme d'un niveau de protection 3D, calculé en considérant la combinaison de toutes les solutions possibles avec leur probabilité associée, telle que définie par le modèle probabiliste.

La validation expérimentale montre qu'en utilisant l'UTPM (Urban Trench Probabilistic Model) l'erreur de positionnement est réduite de moitié par rapport à un calcul de positionnement standard. Et qu'il est possible de calculer un niveau de protection de dimension raisonnable (la centaine de mètres en 3D) avec un faible risque d'intégrité, à savoir 6.10-3.

En perspectives, il reste à faire une analyse détaillée des situations singulières de modélisation ou d'observation, conduisant aux événements redoutés (MI). Par ailleurs, les logiciels développés pour GPS ont été étendus à Galileo pendant le stage master de Jen-Yu Li, ENAC, été 2014, mais non encore appliqués.

On a aussi pensé à s'attaquer au problème de la gestion des hypothèses de position a priori dans la rue, celles-ci pouvant être multiples, en particulier quand une rue présente plusieurs voies de circulation. Ceci va bien au-delà du projet INTURB, et requiert notamment une couche cartographique des rues précise et enrichie sur laquelle on effectuera le map-matching. La thèse de Ni Zhu à l'Ifsttar commencée en septembre 2015, est en partie consacrée à ce sujet.

Enfin, le couplage de l'UTPM avec un algorithme de localisation par vision partageant les mêmes bâtiments BD Topo<sup>®</sup> et une caméra fisheye comme utilisée dans CAPLOC a commencé d'être étudié lors du stage master de Maria Skryagina, ECN, été 2015. Les résultats encourageants restent toutefois à conforter.

## Conclusion commune

CAPLOC et INTURB ont démarré respectivement en 2010 et 2011 dans deux équipes aujourd'hui réunies au sein de l'Ifsttar mais alors des deux instituts INRETS et LCPC. Les objectifs de ces deux études sont proches : améliorer la précision de la localisation d'un véhicule en environnement urbain, et plus particulièrement en canyon ou tranchée urbain(e) et si possible assurer l'intégrité de cette localisation, c'est-à-dire garantir un niveau de confiance dans le calcul.

Les deux projets partent de la connaissance de l'environnement de propagation mais avec deux sources d'information différentes : la vision pour CAPLOC et une base de données topographique pour INTURB. La vision apporte une certaine complexité à CAPLOC puisqu'il s'agit d'acquérir et d'analyser les images autour de l'antenne mais apporte une vision réelle des alentours. Dans INTURB, les détails offerts par le modèle ont été volontairement simplifiés puisque la géométrie des obstacles a été moyennée de façon à représenter les rues en tranchées homogènes et infinies et le masque en « ballon de rugby ». Dans CAPLOC les masques ont été extraits et utilisés avec leurs variations à 360°. Il n'y a pas avec CAPLOC, contrairement à INTURB, à traiter le problème de l'initialisation, c'est-à-dire de la détermination, par map-matching, de la rue dans laquelle on circule effectivement.

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

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

Des perspectives à ces travaux sont identifiées sur plusieurs sujets :

- Comme évoqué en conclusion d'INTURB, la complémentarité entre l'information fournie par la cartographie numérique et la vision est une première piste. Au moment du développement de CAPLOC, les modèles 3D étaient très peu disponibles. C'est une des raisons du choix de la vision. Aujourd'hui, ces modèles se démocratisent et ne sont pas forcément redondants avec la connaissance vidéo. On notera par exemple que la vidéo peut permettre le recalage dans le modèle ou la mise à jour d'un modèle.
- Dans la suite des premiers travaux sur l'intégrité, la thèse de Ni ZHU, co-encadrée par le LEOST et GEOLoc va explorer les différentes solutions de calcul de l'intégrité de ces nouvelles solutions de localisation en urbain.

Pour faire le point sur les perspectives en matière d'intégrité pour le transport terrestre, nous avons organisé, le 15 décembre 2015, à Villeneuve d'Ascq, un séminaire intitulé « Workshop on integrity monitoring for terrestrial users ». Ce séminaire, qui a rassemblé une vingtaine de participants, a fait intervenir quelques acteurs clés sur le sujet : l'ordre du jour et un compte rendu des discussions est joint à ce document en annexe.

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

## 6. Références

- D. Bétaille, F. Peyret, M. Ortiz, S. Miquel and L. Fontenay, A new modelling based on urban trenches to improve GNSS positioning Quality of Service in cities, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 5, No. 3 – Fall 2013
- D. Bétaille, F. Peyret, M. Ortiz, S. Miquel and F. Godan, Improving accuracy and integrity with a probabilistic Urban Trench modeling, Proceedings of ION GNSS-2014, The Institute of Navigation, Tampa, Florida, 2014
- D. Bétaille, F. Peyret, M. Voyer, Applying standard digital map data in map-aided, lane-level GNSS location, Journal of Navigation, Vol. 68, No. 5 – September 2015
- D. Bétaille, S. Miquel, F. Godan and F. Peyret, 3D-city-model-aided GNSS accurate positioning with integrity provision using simplified geometry of buildings, Coordinates, Vol. 11, No. 9 – September 2015
- Aude Bourdeau, Mohamed Sahnoudi et Jean-Yves Tournet : Constructive use of gnss nlos-multipath : Augmenting the navigation kalman filter with a 3d model of the environment. Information Fusion (FUSION), 2012 15th International Conference on, pages 2271-2276. IEEE, 2012.
- Paul D Groves : Shadow matching : A new gnss positioning technique for urban canyons. Journal of Navigation, 64(03):417-430, 2011.
- H. Hartinger et F.K. Brunner : Variances of gps phase observations : the sigma-  $\epsilon$  model. GPS solutions, 2(4):35-43, 1999.
- Michael Lentmaier, Bernhard Krach et Patrick Robertson : Bayesian time delay estimation of gnss signals in dynamic multipath environments. International Journal of Navigation and Observation, 2008, 2008.
- Jizhong Li et Muqing Wu : The improvement of positioning accuracy with weighted least square based on snr. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom'09. 5th International Conference on, pages 1-4. IEEE, 2009.
- Juliette Marais : Localisation de mobiles terrestres par satellites : mise en œuvre d'outils permettant l'analyse de l'influence des conditions de propagation et des effets de masques sur la disponibilité du service offert. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2002.
- Juliette Marais, Sébastien Ambellouis, Amaury Flancquart, Sébastien Lefebvre, Cyril Meurie et Yassine Ruichek : Accurate localisation based on gnss and propagation knowledge for safe applications in guided transport. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 48(0):796-805, 2012. Transport Research Arena 2012.
- J-I. Meguro, T. Murata, J-I Takiguchi, Y. Amano et T. Hashizume : Gps accuracy improvement by satellite selection using omnidirectional infrared camera. Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, pages 1804-1810. IEEE, 2008.

Marcus Obst, Sven Bauer et Gerd Wanielik : Urban multipath detection and mitigation with dynamic 3d maps for reliable land vehicle localization. Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION, pages 685-691. IEEE, 2012.

M. Ortiz, V. Renaudin, F. Peyret and D. Bétaille, Using a reference vehicle for solving GNSS localization challenges, Inside GNSS, September-October 2013

S. Peyraud, D. Bétaille, S. Renault, M. Ortiz, F. Mougel, D. Meizel and F. Peyret, About Non-Line-Of-Sight Satellite Detection and Exclusion in a 3D Map-Aided Localization Algorithm, Sensors, vol. 13, pp. 829-847, 2013

Francois Peyret, David Bétaille et Florian Mougel : Non-line-of-sight gnss signal detection using an on-board 3d model of buildings. ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on, pages 280-286. IEEE, 2011.

Nicolas Viandier : Modélisation et utilisation des erreurs de pseudodistances GNSS en environnement transport pour l'amélioration des performances de localisation. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.

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

Andreas Wieser et Fritz K Brunner : An extended weight model for gps phase observations. EARTH PLANETS AND SPACE, 52(10):777\_782, 2000.

A Wieser : Weighting gnss observations and variations of gnss/ins integration. Inside GNSS, 2(1):26-33, 2007.

## 7. Annexe : Workshop on INTEGRITY MONITORING FOR TERRESTRIAL USERS

15/12/2015, Ifsttar, 20 rue E. Reclus, Villeneuve d'Ascq, France

### Introduction

With the development of safety critical (as ADAS) and liability critical applications (as Toll collect), the need for integrity monitoring solutions for terrestrial transport users becomes crucial. GNSS integrity has been defined and designed as answers to aeronautical requirements. It requires that the different error sources can be bounded with a very high probability. However, EGNOS or other SBAS solutions, as well as GBAS systems, that integrate integrity information, are not appropriate for terrestrial users as they do not bound local effects properly. Indeed, they are focused on system errors and do not integrate local errors caused by NLOS satellites for example. Multipath are there bounded by a priori values not representative of realistic errors. Furthermore, standard RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) relies on the assumption of single simultaneous failure, not realistic in the case of multipath effects in urban environments, and cannot be used either as developed for aviation. Thus, everybody agrees now that these solutions cannot be used by terrestrial users and that specific mechanisms have to be proposed for these applications.

| <u>Presentations</u>   |   |
|--|---|
| Basics on integrity. Introduction.   | Prof. Letizia Lo Presti, Politecnico di Torino                    |
| Analysis of the existing methods for GNSS integrity: how local effects can be characterized and included in the PL evaluation in specific land applications? | Prof. Letizia Lo Presti and Sabrina Ugazio, Politecnico di Torino |
| Integrity Monitoring of GNSS-aided Positioning in Harsh Environments for Land Applications: Measurements Domaine versus Position Domaine                     | Mohamed Sahmoudi, ISAE  |
| IBPL and KIPL algorithms developed by GMV. Remaining issues  | Joaquin Cosmen-Shortmann, GMV                                     |
| Thales Avionics views on integrity needs   | Philippe Laviron, Thales AVS                                      |

## Conclusions of the workshop

The aim of the workshop was to present some of the issues based on GNSS integrity characterization for terrestrial transport. As mentioned by Joaquin Cosmen-Shortman, integrity has recently become important in the terrestrial transport modes. Indeed, as introduced by Prof. Letizia Lo Presti, if the integrity concept is now well defined for aviation, a huge list of issues has been listed during the workshop before its adoption in land transport. These issues aim to characterize integrity monitoring in particular in urban areas. The presentations performed along the day have shown different approaches but the identified objectives and challenges are shared by the participants. Here above are some of the challenges:

- Concepts are defined for aviation. The work performed is certainly a basis for the beginning of the work. Some of the identified blocks can be reused but most of the parameters have to be refined to take into account the equipment used for example and new blocks will be required to integrate local effects.
- Sabrina Ugazio underlined the necessity of taking into account the specificities induced by urban environment: need for multipath and NLOS detection mechanisms, need for propagation channel models, and characterization of local effects...
- Do we need to work in the position or range domain? Some inputs have been provided by Mohamed Sahmoudi.
- Most of the applications will rely on multi sensor systems and not GNSS-alone. The system is to be studied and not only GNSS.

GMV proposed some solutions for integrity computation but identifies some remaining issues: we still need solution with smaller protection level to answer requirements; continuity could be an issue; as well as integrity of relative positioning.

Finally, with the view of Philippe Lviron (Thales avionics), the question of standardization and certification has also been addressed. How will we make these new concepts certified?

As reminded by Juliette Marais, some of these issues are discussed in the SaPPART COST action for road applications (Politecnico di Torino, GMV and Ifsttar are members of the action). Discussions on railway applications are performed in parallel in other groups or studies (PhD theses).

