

Centre de Nantes
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais Cedex

Site Web : www.lcpc.fr

MACS

Géolocalisation

Contribution du LCPC (Lot 1) : Algorithme de détection des signaux GPS NLOS (Non Line Of Sight)

Résumé : nous présentons dans ce document la contribution de l'IFSTTAR (ex-LCPC) - lot 1, concernant la partie détection des signaux GPS NLOS. Un satellite NLOS (*Non Line Of Sight*) est un satellite qui peut être vu par un récepteur GPS suite à une réflexion (données reçues) mais qui, selon la position de l'antenne GPS et la configuration de l'environnement (bâtiments), n'est pas en vue directe avec le récepteur.

L'utilisation des données reçues de satellites GPS NLOS, particulièrement fréquentes dans les environnements urbains, impacte de manière non négligeable le calcul des solutions de navigation. Ce document traite donc de la mise en place de l'algorithme d'identification des signaux NLOS à l'aide du modèle Bâti 3D de l'IGN embarqué dans le SIG BeNomad et des résultats obtenus sur les données du benchmark 2009 de la Mairie du XIIème arrondissement de Paris.

Rapport établi le : 26/07/2011

Auteurs : Florian MOUGEL (IFSTTAR)
Relu par : David BETAÏLLE, François PEYRET (IFSTTAR)

Etablissement public
à caractère scientifique
et technologique



Système de management de la qualité
certifié sous le n° 9915173 pour les
sites de Paris et de Nantes

Nomenclature d'activité :
Référence sur Numéro de contrat* :
Confidentialité :

PREDIT : « Transports Sûrs Fiables et Adaptés » projet CityVIP
ANR-07-TSFA-013-06
Non Confidentiel

* le cas échéant

Paris (siège)
58, Boulevard Lefebvre
75732 Paris Cedex 15

Marne-la-Vallée

Satory-Versailles

HEUDIASYC – UMR 6599 – Université Technologique de Compiègne
INRIA – Projet ARoBas – Sophia Antipolis
Institut Géographique National - Laboratoire MATIS – Saint Mandé
IRISA – Projet LAGADIC – Rennes
LASMEA – UMR 6602 CNRS – Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand
LCPC – Nantes
Société BeNomad – Villeeneuve Loubet
XLIM – UMR 6172 – Université de Limoges

Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

Département Mesure Auscultation et Calcul Scientifique

Groupe Géolocalisation

Centre de Nantes - Route de Bouaye - BP 4129

44341 Bouguenais cedex

Téléphone : 02 40 84 58 00 – Télécopie : 02 40 84 59 99

SOMMAIRE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction..... | 5 |
| 1.1 | Rappels sur le calcul d'une position par GNSS | 5 |
| 1.1.1 | Les mesures GNSS | 5 |
| 1.1.2 | Les méthodes de résolution | 5 |
| 1.1.3 | La Qualité de service : précision, intégrité et disponibilité | 5 |
| 1.1.4 | Comment obtenir une bonne solution... .. | 6 |
| 1.2 | Principe de l'algorithme NLOS..... | 7 |
| 1.3 | Principe de l'intégration de la brique NLOS dans les logiciels de positionnement CityVIP .. | 7 |
| 2 | Présentation de l'algorithme NLOS..... | 8 |
| 2.1 | Description générale de l'algorithme | 8 |
| 2.2 | Les données satellitaires extraites du récepteur | 8 |
| 2.3 | L'utilisation du SDK BeNomad..... | 8 |
| 3 | Validation de l'algorithme NLOS..... | 11 |
| 3.1 | Validation au niveau de la visibilité satellitaire | 11 |
| 3.1.1 | Le logiciel Satellite Tool Kit d'AGI | 11 |
| 3.1.2 | Comparaison de la visibilité extraite des trames des récepteurs à la visibilité théorique calculée par STK 12 | |
| 3.1.3 | Impact sur la détermination des NLOS | 14 |
| 3.1.4 | Masque d'élévation des récepteurs | 15 |
| 3.1.5 | Rapport signal sur bruit des récepteurs | 15 |
| 3.2 | Validation par comparaison avec le logiciel Ergospace® | 16 |
| 4 | Impact de la détection des NLOS sur la position GPS calculée | 20 |
| 4.1 | Calcul LMS sur des données GPS filtrées NLOS à partir d'une trajectoire de référence LandINS | 20 |
| 4.2 | Calcul EKF sur des données GPS filtré NLOS à partir d'une trajectoire de référence LandINS | 22 |
| 4.3 | Calcul EKF en exécution temps-réel avec un filtrage NLOS à partir d'une solution GPS estimée..... | 23 |
| 4.3.1 | Les limites de notre algorithme de détection des NLOS | 23 |
| 4.3.2 | Les perspectives envisagées | 24 |

Table des figures :

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Elévation critique (Elc) et Azimut (Az)..... | 7 |
| Figure 2 : Description générale de l'algorithme de détection des NLOS pour l'instant k..... | 8 |
| Figure 3 : Illustration des fonctions getDepth et getDistance..... | 9 |
| Figure 4 : Aperçu d'un rendu visuel..... | 9 |
| Figure 5 : Calcul de l'élévation critique..... | 10 |
| Figure 6 : Calcul plus général de l'élévation critique..... | 10 |
| Figure 7 : Scénario STK..... | 11 |
| Figure 8 : Disponibilité satellitaire théorique..... | 12 |
| Figure 9 : Constellation satellitaire théorique..... | 12 |
| Figure 10 : Comparaison position PRN 10 - PolaRx..... | 13 |
| Figure 11 : Comparaison position PRN 27 - LEA4T..... | 13 |
| Figure 12 : NLOS théorique..... | 14 |
| Figure 13 : NLOS Expérimentaux..... | 14 |
| Figure 14 : Masque d'élévation des récepteurs GPS..... | 15 |
| Figure 15 : SNR du Satellite PRN 28 vu par les récepteurs Applanix..... | 15 |
| Figure 16 : SNR des récepteurs AP20 M et S pour la boucle n°1 de Mairie XII..... | 16 |
| Figure 17 : Espace libre de Mairie XII..... | 17 |
| Figure 18 : Illustration du logiciel Ergospace®..... | 17 |
| Figure 19 : Visibilité satellitaire vue par Ergospace®..... | 18 |
| Figure 20 : Comparaison de l'algorithme NLOS aux sorties d'Ergospace®..... | 19 |
| Figure 21 : Fonction de distribution cumulée des HPE et VPE sur un calcul LMS filtré NLOS et non filtré..... | 21 |
| Figure 22 : VPE sur un calcul de type LMS avant et après filtrage NLOS..... | 21 |
| Figure 23 : Fonctions de distribution cumulées des HPE et VPE sur les calculs LMS et EKF filtré NLOS et non filtré à partir des données acquises sur Nantes..... | 22 |
| Figure 24 : Résultat d'une détection d'NLOS déterminée à partir d'un filtre EKF – Boucle 1..... | 23 |
| Figure 25 : Estimation de l'altitude sur la boucle n°1 de Nantes..... | 24 |

Table des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Rappel sur la précision et l'indisponibilité des récepteurs GPS sur la boucle n°1..... | 11 |
| Tableau 2 : Comparaison algorithme NLOS et Ergospace®..... | 20 |

1 Introduction

1.1 Rappels sur le calcul d'une position par GNSS

1.1.1 Les mesures GNSS

Le calcul d'une solution de navigation (communément appelée PVT pour Position, Vitesse et Temps) par GNSS s'effectue à partir des **mesures brutes** (observables) fournies par les récepteurs GNSS en sortie de l'étape de traitement numérique des signaux où s'effectuent les corrélations.

Les mesures brutes disponibles dépendent du type de récepteur. Pour les récepteurs GPS standard actuels, quand les mesures brutes sont disponibles, il s'agit généralement uniquement des **pseudo-distances** et quelquefois des **Dopplers** (composante de la vitesse relative satellite-récepteur projetée sur le rayon vecteur), sur la porteuse L1. Pour beaucoup de récepteurs bas-coûts dédiés au marché grand public (navigation automobile ou LBS sur *smartphones*), les mesures brutes ne sont pas disponibles et seules les sorties PVT sont fournies.

1.1.2 Les méthodes de résolution

A partir de ces observables, le calcul de la position GNSS (sans autres capteurs) peut s'effectuer de plusieurs façons, les deux grandes familles étant les méthodes dites *snapshot* de type **moindres carrés (LMS)** et les méthodes par filtrage, généralement filtre de Kalman étendu (**EKF**).

Les méthodes **LMS** résolvent à chaque époque de mesure le système non linéaire ayant pour inconnues les 3 coordonnées du récepteur et le terme d'horloge (décalage entre horloge récepteur et temps GPS) et pour observations toutes les pseudo-distances disponibles. Il faut donc au moins 4 mesures exploitables pour calculer la solution par pseudo-inversion, certains algorithmes pouvant fixer la composante altitude (pouvant être connue de façon approchée a priori) pour pouvoir calculer une solution avec uniquement 3 mesures.

Les méthodes **EKF** utilisent généralement un modèle d'évolution relativement simple, de type vitesse constante ou accélération constante et utilisent les mesures de pseudo-distances comme observations pour corriger l'état prédit par le modèle d'évolution. Quand on dispose des Dopplers, il est intéressant d'enrichir le vecteur d'état que l'on cherche à estimer avec les vitesses, les accélérations et la dérivée du terme d'horloge pour les exploiter. Par rapport à une solution LMS, la solution EKF est généralement plus lissée et présente moins d'erreurs importantes, mais peut diverger dans certains cas difficiles. De plus, les réglages de ces méthodes sont souvent délicats et peuvent difficilement être optimaux pour tous les cas de figure.

Le formalisme LMS étant plus simple à décrire et moins sujet à des réglages délicats, c'est celui qui a été choisi par les spécifications standard MOPS¹ qui normalisent l'utilisation des systèmes d'augmentation SBAS² (tel EGNOS) pour l'aviation civile. Dans ce cas, les observables utilisées sont les pseudo-distances corrigées par le système SBAS, et la méthode LMS préconisée est une méthode aux moindres carrés pondérés.

1.1.3 La Qualité de service : précision, intégrité et disponibilité

La précision d'une solution GNSS n'est pas le seul indicateur de qualité à prendre en compte. L'**intégrité** est aussi très importante pour les applications réglementaires ou sécuritaires. Pour faire simple, disons que l'intégrité est la mesure de la **confiance** que l'on peut placer dans la solution estimée, par exemple sous la forme d'une borne d'erreur maximale (niveau de protection) de cette solution associée à la probabilité que l'erreur réelle excède cette borne.

Par exemple, le **MOPS** spécifie une méthode simple, basée sur la connaissance de la matrice de variance-covariance a posteriori de la solution aux moindres carrés (composée de la matrice géométrique et la matrice des variances des erreurs sur les pseudo-distances, estimées par le SBAS et des modèles standard) et des

¹ RTCA DO 229C : MOPS Standards for GPS/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment

² SBAS = Satellite Based Augmentation System

probabilités cibles de non-intégrité, le tout s'appuyant sur des hypothèses gaussiennes blanches et centrées en ce qui concerne toutes les lois de distribution des erreurs. Cette méthode est bien adaptée au contexte d'un aéronef, dans un environnement relativement dégagé, et après l'hypothèse que les « gros défauts » éventuellement présents (un seul à la fois) dans les mesures GPS ont été détectés et éliminés par le SBAS. Elle est mal adaptée aux environnements terrestres très contraints occasionnant de nombreux trajets multiples qui invalident totalement les hypothèses statistiques qui sous-tendent le calcul. En effet, les trajets multiples, le plus souvent simultanés, sont à l'origine de biais qui peuvent être importants, en contradiction avec les hypothèses sur les bruits gaussiens.

Une autre approche développée par l'aéronautique, indépendante de l'approche SBAS, mais qui peut être complémentaire, consiste à jouer uniquement sur la redondance des mesures et sur des tests d'hypothèses probabilistes. Cette approche consiste à détecter et exclure les défauts dans les mesures et peut être prolongée par une estimation d'un niveau de protection à partir de l'impact que pourrait avoir sur la position le « plus gros défaut » qui n'aurait pas été détecté par les tests. On parle alors de **FDE** (*Fault Detection and Exclusion*) ou de **RAIM** (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) quand on se limite à la détection du défaut.

Quand on calcule la position par un EKF, il est possible d'appliquer une méthode équivalente à partir de la matrice de variance-covariance de la position estimée, mais ce type de méthode est encore mal documenté dans la littérature.

L'intégrité est une notion complexe, surtout en environnement terrestre et les concepts développés pour l'aviation civile, déjà relativement compliqués avec des hypothèses simplificatrices et de bonnes conditions de réception, deviennent inefficaces ou simplement inapplicables dans les conditions urbaines, qui cumulent toutes les difficultés :

- faible disponibilité des satellites, donc très peu de redondance, quand ce n'est pas l'impossibilité de calculer une solution autonome,
- très mauvaise configuration géométrique due aux canyons urbains, qui se traduit par un mauvais conditionnement du système à résoudre (HDOP élevé),
- présence fréquente de trajets multiples, souvent de type NLOS, qui se retrouvent sous forme de biais importants sur les pseudo-distances.

1.1.4 Comment obtenir une bonne solution...

En fait, quelle que soit la méthode utilisée, la qualité finale de la position calculée dépend avant tout de la **qualité** et du nombre des mesures brutes.

Dans l'environnement urbain très contraint de Paris XIIème, chercher à obtenir une position précise et intègre uniquement avec GPS s'avère être « mission impossible »... Il a été montré dans le rapport technique [1] *Données Lot 1 du benchmark CityVIP autour de la mairie du XIIème arrondissement de Paris* que les conditions de réception satellitaire étaient très mauvaises et que le calcul autonome (de type LMS) d'une solution GPS) partir des récepteurs qui ont été embarqués pour le benchmark donnait des solutions :

- soit relativement disponibles mais très peu précises quand on exploite les mesures du récepteur haute sensibilité (u-blox) qui privilégie la quantité par rapport à la qualité et exploite tous les signaux reçus,
- soit plus précise mais très peu disponible quand on exploite les données des autres récepteurs, qui effectuent un tri plus sévère sur les signaux.

Il est clair que la stratégie à adopter dans CityVIP est de fusionner TOUTES les mesures et sources d'informations disponibles pour atteindre les exigences requises en termes de disponibilité, précision et intégrité :

- les méthodes locales/globales Lot 2, basées sur la vision, devraient apporter la précision,
- les capteurs, l'espace roulant et l'exploitation du Bâti 3D associés à la méthode de fusion globale Lot 1 devraient apporter l'intégrité.

L'idée sous-jacente à la méthode NLOS faisant l'objet de ce rapport est d'exploiter la spécificité de CityVIP qui est de disposer dans le véhicule d'un SIG embarqué contenant un **modèle géométrique 3D précis** de l'environnement pour **améliorer l'intégrité des mesures GPS**.

1.2 Principe de l'algorithme NLOS

Dans les environnements urbains très contraints, les masques et les trajets multiples créés par les immeubles et éventuellement la végétation dégradent de façon significative les performances des récepteurs GNSS.

Il existe plusieurs stratégies pour lutter contre ces perturbations : au niveau des antennes et corrélateurs d'une part, et au niveau de l'exploitation des observables d'autre part, c'est-à-dire du calcul PVT. C'est ce que font par exemple les algorithmes de RAIM quand ils détectent un défaut sur une pseudo-distance. Quand on n'a pas connaissance de la géométrie des satellites par rapport aux obstacles, il faut prendre des décisions basées sur des tests statistiques, ou appliquer un seuillage sur le rapport signal sur bruit, ce qui s'avère souvent hasardeux, surtout quand on a très peu de satellites.

Le principe de notre algorithme est extrêmement simple ; il consiste à utiliser la connaissance de la géométrie environnante pour :

- d'abord détecter les NLOS et exclure les satellites correspondants dans le calcul de la position ;
- éventuellement identifier les satellites rasants (dont les signaux sont diffractés par les bâtiments) pour leur affecter un σ_{URE} proportionnel à la dégradation correspondante sur la pseudo-distance, pour améliorer la pondération des observables dans le calcul.

1.3 Principe de l'intégration de la brique NLOS dans les logiciels de positionnement CityVIP

L'algorithme NLOS n'est pas prévu pour calculer une position GNSS, il ne s'agit pas d'un solveur. Il doit être utilisé comme une ressource au profit d'un logiciel de calcul de position, en couplage lâche ou couplage serré.

Il peut être considéré comme un simple filtre ou un étage intermédiaire entre les sorties observables d'un récepteur et le solveur de position. Différentes stratégies ont déjà été étudiées lors du séminaire Lot 1 organisé à Nantes du 3 au 5 novembre 2010 (voir [2] la fiche de synthèse, séminaire Lot 1).

Le principe consiste à :

- récupérer la meilleure estimée possible de la pose du récepteur à l'instant de réception des données GPS,
- déterminer la position dans le ciel de tous les satellites (élévation et azimut : Ei et Az) dont les signaux sont reçus par le récepteur,
- calculer, à partir des données du Bâti 3D contenu dans le SIG embarqué, par des requêtes appropriées au SDK BeNomad, l'angle de hauteur correspondant à la limite entre le ciel (élévation critique : Eic) et les bâtiments environnants, pour les angles d'azimut correspondant à tous les satellites en vue,
- comparer les deux angles Ei et Eic pour :
 - o détecter et exclure les satellites NLOS,
 - o éventuellement mesurer la distance du rayon vecteur aux bâtiments pour affecter des σ_{URE} ajustés.

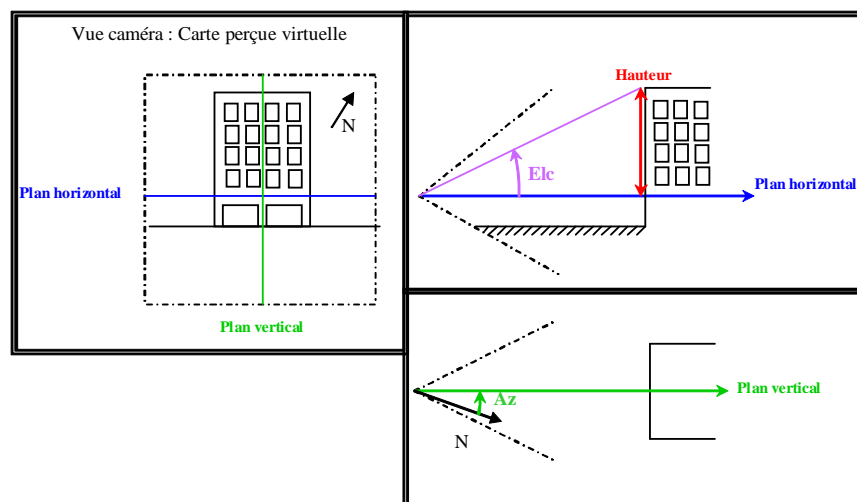


Figure 1 : Elévation critique (Eic) et Azimut (Az)

2 Présentation de l'algorithme NLOS

2.1 Description générale de l'algorithme

L'algorithme de détection des NLOS se compose uniquement des 6 fonctions que l'on retrouve sur la figure 2 :

- LECTURE TRAME NMEA (GGA-GSV) : extraction des données contenue dans les trames NMEA GGA (date de validité des données GPS et positionnement géographique en longitude, latitude, hauteur) et GSV (élévation et azimut des satellites identifiés par leur PRN) ;
- CONVERSION ENU2LAMBERT93 : la pose CityVIP étant établie dans un système de référencement géographique de type ENU local tangent et le SDK BeNomad utilisant le système Lambert 93 + Altitude, il faut effectuer une conversion des données de localisation ;
- CORRECTION de la convergence des méridiens : les azimuts des satellites issus des trames GSV sont calculés par rapport au nord géographique qui diffère du nord Lambert : il faut donc appliquer la correction d'orientation décrite dans [3] ;
- GetCartePercueVirtuelle : projection de la BD géographique sur le capteur d'une caméra virtuelle (définie par des paramètres intrinsèques ($mFocale$) et extrinsèques ($x, y, z, m\Psi, m\theta, m\Phi$)) ;
- GetDepth : fournit la profondeur d'un pixel de la carte perçue virtuelle projetée ;
- GetDistance : fournit la distance 3D séparant 2 pixels identifiés sur la carte perçue virtuelle projetée.

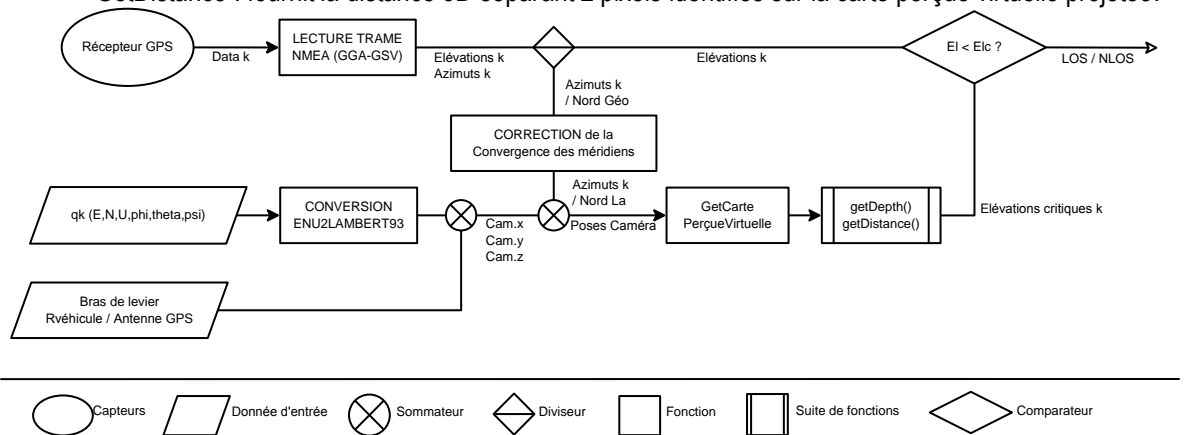


Figure 2 : Description générale de l'algorithme de détection des NLOS pour l'instant k

Parmi les fonctions précédentes, GetCartePercueVirtuelle est décrite dans [4] « Définitions générales pour la navigation autonome de robots mobiles » et est identifiée comme étant la combinaison de deux fonctions définies par le SDK BeNomad (SetCameraParameters et Redraw). Les 2 dernières fonctions (GetDepth et GetDistance) sont elles aussi définies par le SDK.

De manière plus détaillée, nous nous intéresserons d'abord aux données satellitaires extraites du récepteur GPS puis aux différents traitements effectués à l'aide du SDK.

2.2 Les données satellitaires extraites du récepteur

C'est une simple lecture des données issues des trames NMEA du récepteur avec une remise en forme des données au format adéquat :

- Data → Temps de référence : datation au format temps de référence définit dans [1]
- Data → Elévations : passage au Système d'unités International ($\text{deg} \rightarrow \text{rad}$) définit sur $[0 \pi/2]$ (référéncé sur le plan horizontal et $\pi/2$ au zénith)
- Data → Azimuts : passage au SI et définition trigonométrique de l'angle définit sur $[0 2\pi]$ (référéncé sur le nord géographique)
- Data → PRN : identifiant des satellites reçus

2.3 L'utilisation du SDK BeNomad

Une conversion préalable des données d'entrée est nécessaire pour dialoguer avec le SDK (coordonnées en Lambert 93 et angles d'orientation : voir à ce sujet la note technique [5]). Cette conversion est effectuée par la

fonction `CONVERSION ENU2Lambert93`. La pose `CityVIP` q définit la position du centre du Repère Véhicule dans un repère local tangent. Nous souhaitons positionner le centre optique de la caméra virtuelle au centre de réception du signal des antennes GPS. Si le centre du repère véhicule n'est pas le point de réception de l'antenne GPS, il faut effectuer un calcul de changement de point à l'aide du bras de levier `Rvéhicule/AntenneGPS` pour définir la position de la caméra virtuelle. Quant à son orientation, elle est définie de manière à avoir l'axe optique à l'horizontale pointant vers l'azimut du satellite souhaité.

Le SDK `BeNomad` est disponible sur <ftp://bnd-01.dnsalias.com> en version 32 et est fourni avec quelques exemples. Les exemples `glRendering` et `glRenderingQt` sont particulièrement intéressants dans notre cas, car ils illustrent parfaitement les fonctions utiles au développement de notre algorithme. Ces fonctions décrites dans la documentation du SDK sont les suivantes :

- **GetCartePercueVirtuelle** (c'est la projection de la BD géographique dans un capteur virtuel.)
 - o `TBbool SetCameraParameters` (const `TB_VIEW_CAMERA` &inCamera)
Sets view's camera parameters.
 - o virtual void **Redraw** (`TBbool inDrawTexts=true`)
Redraws the whole content of the view.
- `TBdouble GetDepth` (`TBuint16 inPx`, `TBuint16 inPy`)
Returns the depth of a given pixel in the current OpenGL view.
- `TBdouble GetDistance` (`TBuint16 inPx1`, `TBuint16 inPy1`, `TBuint16 inPx2`, `TBuint16 inPy2`)
Returns the distance between two points in the current OpenGL view.

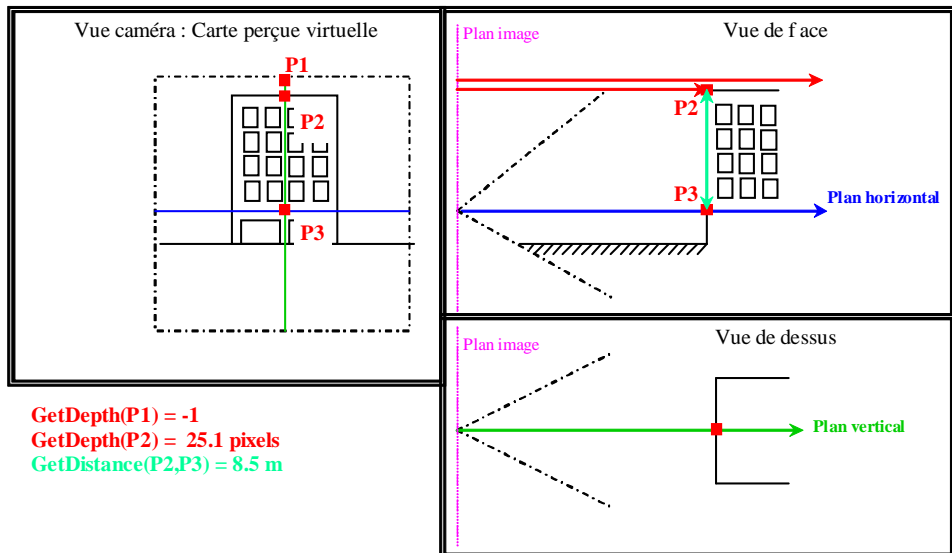
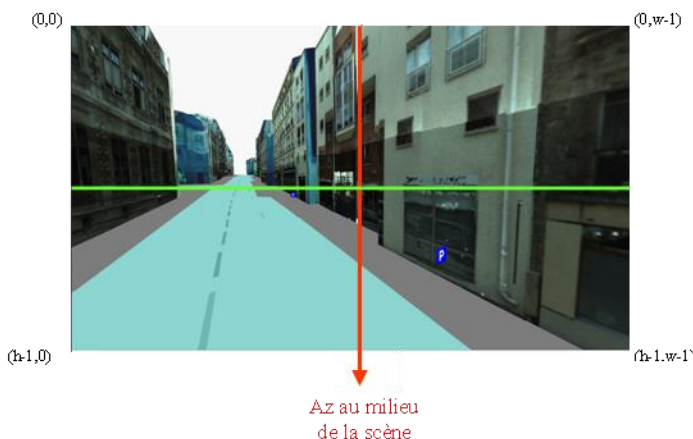


Figure 3 : Illustration des fonctions `getDepth` et `getDistance`

Voici un exemple de ce que nous retourne la fonction `GetCartePercueVirtuelle` :



l'image est de largeur w horizontale et de hauteur h verticale ; les coordonnées en pixels sont définies comme étant nulles dans le coin supérieur gauche et de valeur $(h-1, w-1)$ dans le coin inférieur droit. Le pixel central $(h-1/2, w-1/2)$ est sur l'axe optique de la caméra virtuelle.

Figure 4 : Aperçu d'un rendu visuel

A partir de la carte perçue virtuelle, on identifie le pixel à la frontière bâtiment/ciel dans la direction de chaque satellite reçu (Az). Cette identification s'effectue à l'aide de la fonction GetDepth (illustrée sur la figure 3) qui retourne la distance en pixels séparant le plan image contenant le centre optique de la caméra virtuelle au pixel appartenant à l'environnement ; si le pixel n'appartient pas au bâti 3D, la fonction retourne -1. Enfin, si la focale est insuffisante pour détecter la frontière, on redessine la vue courante avec un paramètre mFocale plus petit.

Une fois le pixel frontière localisé (P2), on utilise la fonction getDistance entre le pixel au centre de l'image (P3) et le pixel frontière. La distance séparant les deux pixels s'apparente à la hauteur déterminée figure 1. Le théorème de Pythagore nous permet de calculer la distance séparant le centre optique de la caméra au pixel frontière (DistCenter2Pix) et il ne reste plus qu'à effectuer un calcul d'arcsinus du rapport hauteur sur distance (centre optique, pixel frontière) pour connaître l'élévation critique Elc.

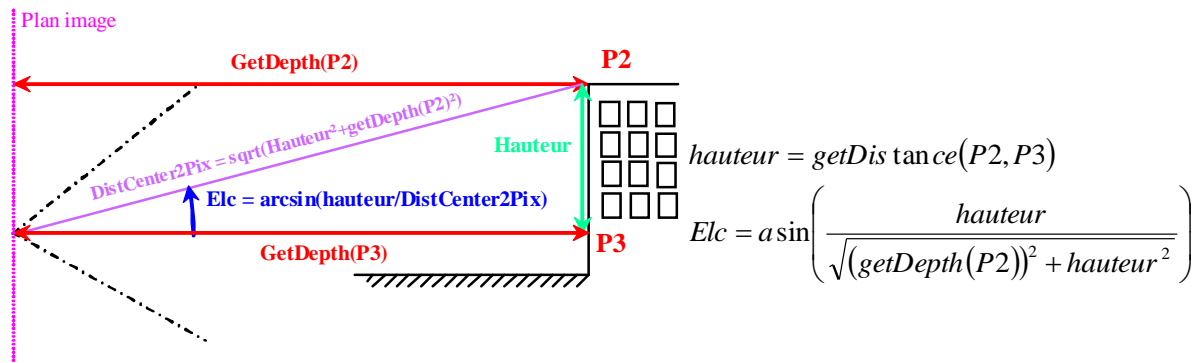


Figure 5 : Calcul de l'élévation critique

Remarque : afin de connaître la profondeur d'un pixel exprimé en distance métrique, il suffit de connaître le ratio mètre/pixel rendu par une fonction du SDK intitulée **MetersPerPixel** :

TBdouble **MetersPerPixel** (void)

Returns the number of meter(s) per pixel with respect to the current projection scale.

Et, afin de prendre en compte le fait que des bâtiments plus éloignés que le premier bâtiment visible au voisinage du centre optique de la caméra peuvent gêner la visibilité satellitaire, on modifie la formule de calcul de l'élévation critique par la suivante :

$$hauteur = \sqrt{(getDis \tan ce(P2, P3))^2 - (metersPerPixel * (getDepth(P2) - getDepth(P3)))^2}$$

$$Elc = a \sin \left(\frac{hauteur}{\sqrt{(getDepth(P2))^2 + hauteur^2}} \right)$$

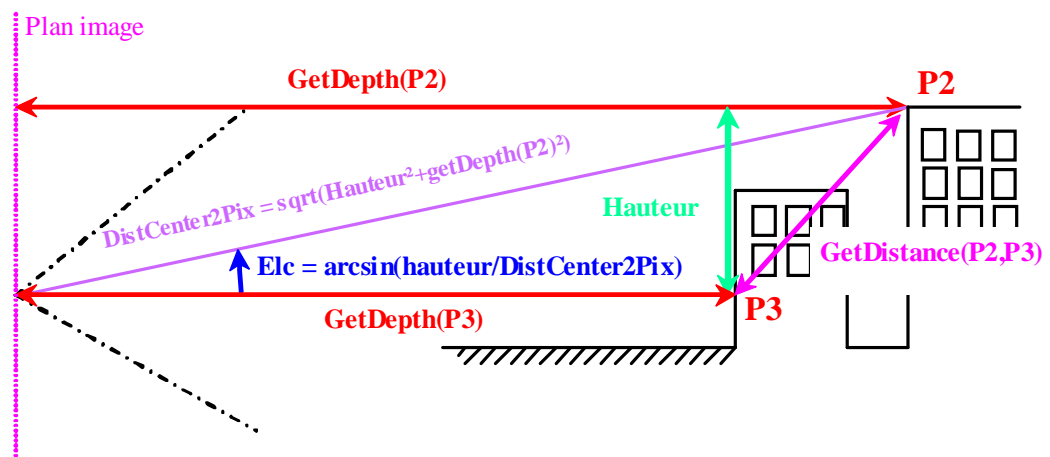


Figure 6 : Calcul plus général de l'élévation critique

3 Validation de l'algorithme NLOS

Plusieurs récepteurs GPS ont été embarqués sur Stéréopolis pour effectuer une campagne d'acquisition les 8 et 9 juillet 2009. Parmi ces récepteurs dont les données ont été analysées dans le document [1] nous retiendrons :

- L'Ashtech AC12 cadencé à 1 Hz
- L'Ublox LEA-4T cadencé à 0.2 Hz
- Le Septentrio PolaRx 2^e cadencé à 10 Hz

Dans le rapport précédemment évoqué, il a été montré que le récepteur LEA-4T disposait de la meilleure disponibilité de part sa grande sensibilité, mais était à contrario le moins précis des trois. Et que le PolaRx était le récepteur le plus précis des trois mais avec une faible disponibilité satellitaire (≥ 4 satellites en vue).

| | Systèmes GPS | Moyenne | Médiane | Quantile à 95% | Ecart type | Disponibilité (%) |
|-----|--------------|---------|---------|----------------|------------|-------------------|
| HPE | AC12 | 2,624 | 1,921 | 6,058 | 2,009 | 20,43 |
| | LEA4T | 8,571 | 6,604 | 20,388 | 6,365 | 95,31 |
| | PolaRx | 3,072 | 2,841 | 5,663 | 1,216 | 26,86 |
| VPE | AC12 | 43,382 | 39,346 | 86,079 | 30,545 | 20,43 |
| | LEA4T | 19,019 | 13,620 | 57,383 | 20,521 | 95,31 |
| | PolarRx | 5,693 | 4,332 | 18,611 | 5,349 | 26,86 |

Tableau 1 : Rappel sur la précision et la disponibilité des récepteurs GPS sur la boucle n°1

Nous souhaitons dans un premier temps effectuer la validation du développement de notre algorithme. Pour ce faire nous allons nous intéresser :

- à l'extraction des informations satellitaires des récepteurs par rapport aux calculs du logiciel STK (Satellite Tool Kit) ;
- aux sorties NLOS de notre algorithme vis-à-vis des sorties du logiciel Ergospace®.

3.1 Validation au niveau de la visibilité satellitaire

3.1.1 Le logiciel Satellite Tool Kit d'AGI

A l'aide du STK d'AGI (<http://www.stk.com>) nous avons reconstruit le scénario de Mairie XII afin de recréer la constellation satellitaire vue par un récepteur GPS placé au niveau du centre du parcours le 8 juillet 2009 aux heures des expérimentations Stéréopolis. Cette constellation théorique a la particularité d'être celle que devrait voir tout récepteur GPS placé à cet endroit fixe sans aucun masque d'élévation présent (d'environnement ou logiciel), comme si le récepteur était placé dans un désert plat. Etant donné que le parcours Mairie du XII^{ème} s'étale sur un rayon de moins de 500 m, et que les satellites sont en orbite à plus de 20 000 km, on considère que le calcul des positions satellitaires (élévations et azimuts) fourni par le logiciel est applicable en tout point du parcours.

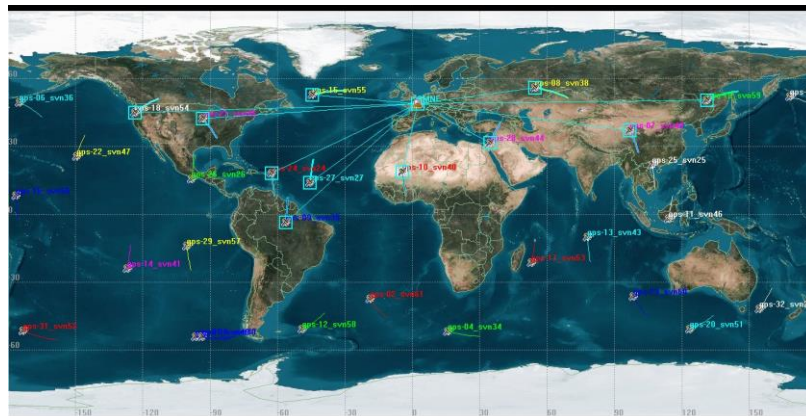


Figure 7 : Scénario STK

Sont présents sur le planisphère :

- les 32 satellites GPS identifiés par leur numéro PRN et SVN (du type: *gps-[PRN]_svn[SVN]*)
- la station réceptrice Mairie_XII (ENU Saint Mandé {-2450 ; -450 ; -25})

Les satellites encadrés en bleu cyan depuis la station réceptrice sont les satellites visibles à la date correspondant au début des acquisitions CityVIP. De plus la trace laissée par chaque satellite est la trajectoire suivie sur l'échelle de temps de l'expérimentation, c'est-à-dire : le mercredi 8 juillet 2009 de 10 h 51mn à 11 h 17mn.

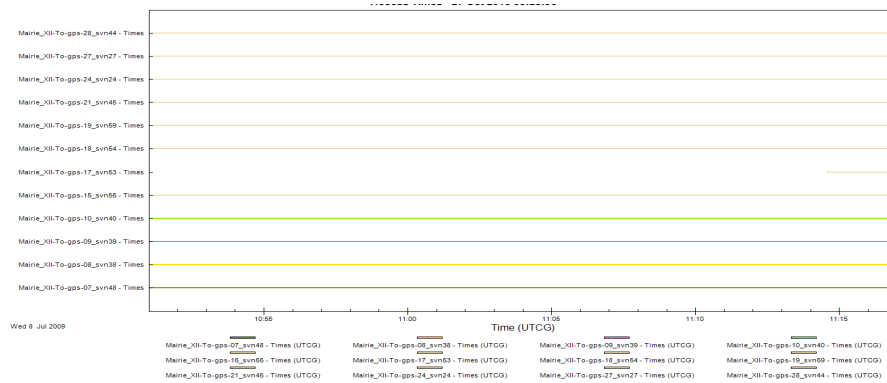


Figure 8 : Disponibilité satellitaire théorique

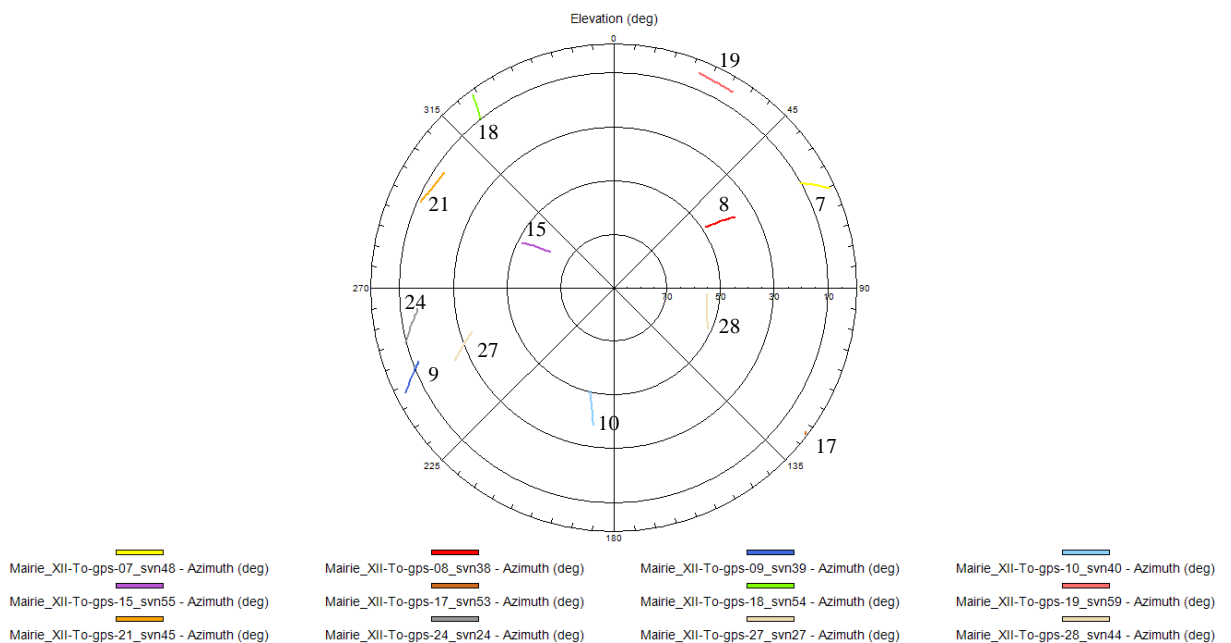


Figure 9 : Constellation satellitaire théorique

Suivant la figure 8, nous devrions théoriquement avoir une constellation composée de 11 satellites entre 10h 51mn et 11h 14mn 30s puis 12 satellites de 11h 14mn 30s à 11h 17mn. Seulement à l'aide de la figure 9 on peut constater que les satellites ayant pour PRN le n° 7, 9, 17, 18 et 19 sont sous la barre des 10° d'élévation. Ces satellites à basse élévation ne seront donc probablement pas reçus lors des expérimentations, d'autant plus que nous sommes en centre urbain et que les bâtiments gênent grandement la visibilité.

Si on se reporte au document [1] dans lequel il est stipulé que le récepteur LEA4T est le plus sensible des récepteurs embarqués, les satellites 17 et 19 ne sont d'ailleurs jamais reçus.

3.1.2 Comparaison de la visibilité extraite des trames des récepteurs à la visibilité théorique calculée par STK

La constellation satellitaire déterminée par STK est calculée à partir du fichier d'almanachs du 189^{ème} jour de l'année 2009 (soit le 8 juillet 2009) et téléchargé sur <http://www.navcen.uscg.gov> le site navigation center de l'U.S. coast guard. Notre solveur LMS nous permet quant à lui de déterminer la position des satellites et d'en

déduire les élévation et azimuth des satellites présents à chaque époque où la disponibilité est supérieure ou égale à 4 satellites. Il est donc intéressant de comparer les calculs des positions « théoriques » des satellites effectué par le logiciel STK (rouge) et le calcul des positions « expérimentales » effectué par le solveur LMS (bleu) à partir des mesures réelles :

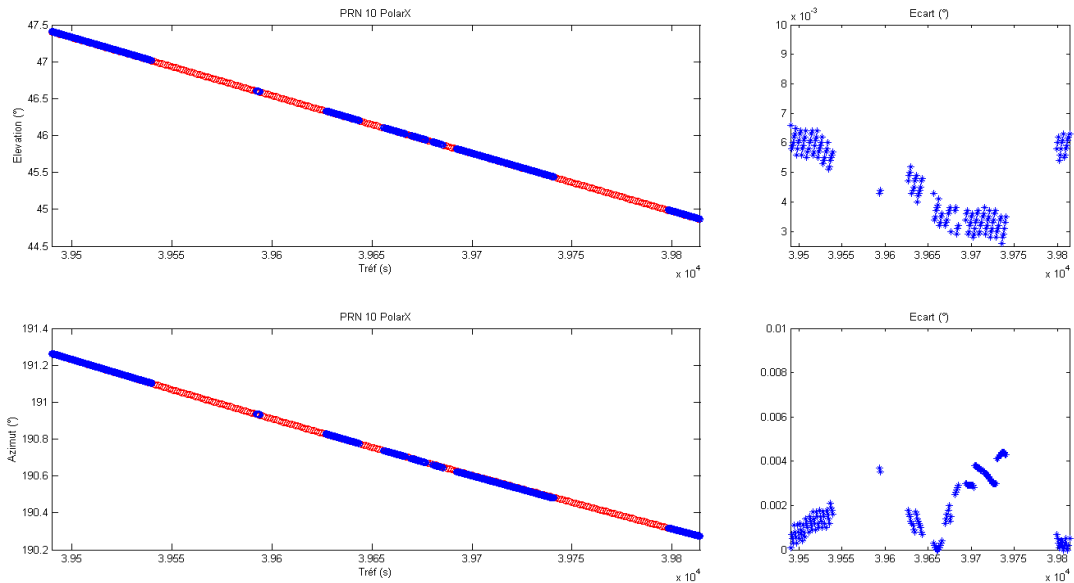


Figure 10 : Comparaison position PRN 10 - PolarX

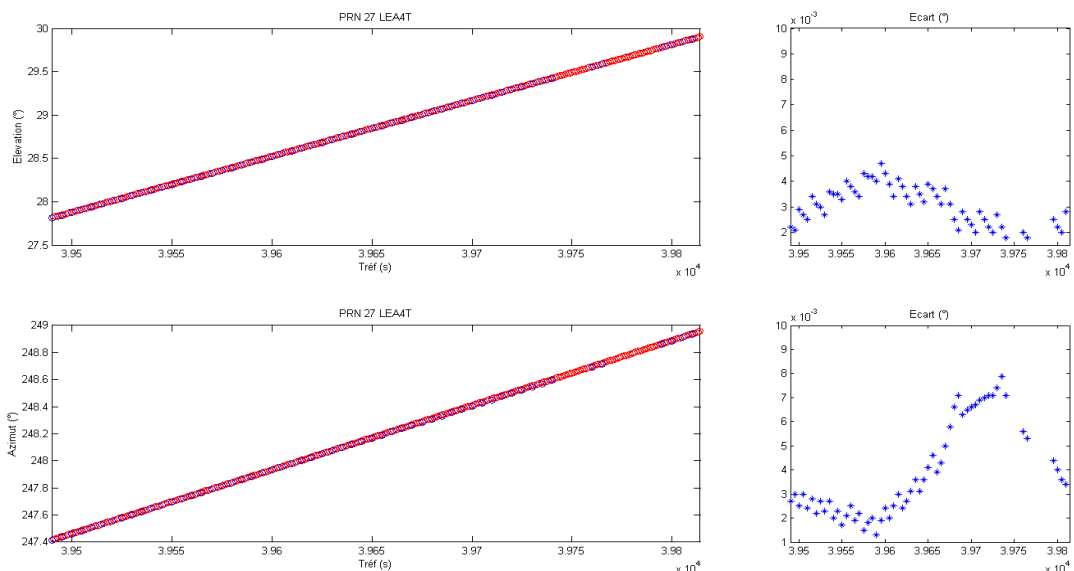


Figure 11 : Comparaison position PRN 27 - LEA4T

Les erreurs maximales constatées entre positions théorique et expérimentale sont de l'ordre du dixième de degré en élévation et azimuth pour l'ensemble des récepteurs sur le parcours Mairie XII. Ces écarts sont essentiellement dus aux imperfections des fichiers d'almanachs.

La connaissance de la constellation satellitaire théorique nous permet de connaître l'impact de l'environnement (le bâti) sur la réception des données GPS à chaque époque :

- si un satellite faisant partie de la constellation théorique est détecté comme LOS, c'est qu'il n'y a pas d'obstacle de type bâtiment entre l'antenne GPS du véhicule et le satellite. Le récepteur GPS devrait donc lire le signal en provenance du dit satellite ;
- si un satellite faisant partie de la constellation théorique est détecté comme NLOS, c'est qu'il y a un obstacle de type bâtiment entre l'antenne GPS du véhicule et le satellite :
 - o Aucun signal du dit satellite ne devrait pouvoir être lu par le récepteur GPS ;
 - o Si un signal est reçu c'est qu'il est transmis par un chemin détourné : il y a multi-trajet.

Les trois règles simples évoquées ci-dessus peuvent nous permettre de valider la détection de signal satellitaire de type NLOS. Mais les écarts en position des satellites (fig. 8 et 9) nous obligent à ne pas considérer ces trois règles comme suffisantes.

3.1.3 Impact sur la détermination des NLOS

Un message en provenance d'un satellite théorique, identifié par son PRN i , à l'instant t peut être :

- Détecté LOS : Point bleu
- Détecté NLOS : Point rouge

Traçons donc la visibilité théorique des satellites (en ordonnées $i \in [1 ; 32]$) en fonction du temps t (Tréf en abscisses) pour les 3 boucles du parcours de la Mairie du XII^{ème} :

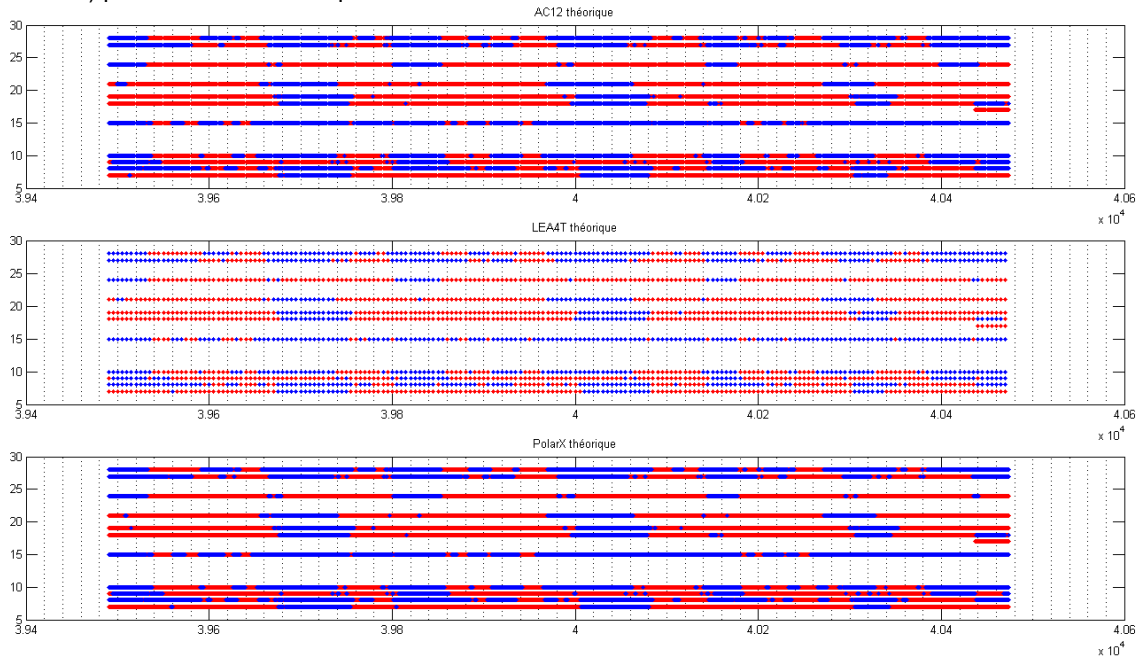


Figure 12 : NLOS théorique

De même, pour la constellation expérimentale, un message en provenance d'un satellite réel, identifié par son PRN i , à l'instant t peut être :

- Lu par le récepteur : présence d'un point
 - Détecté LOS : couleur du point bleue
 - Détecté NLOS : couleur du point rouge
- Non lu par le récepteur : non présence de point

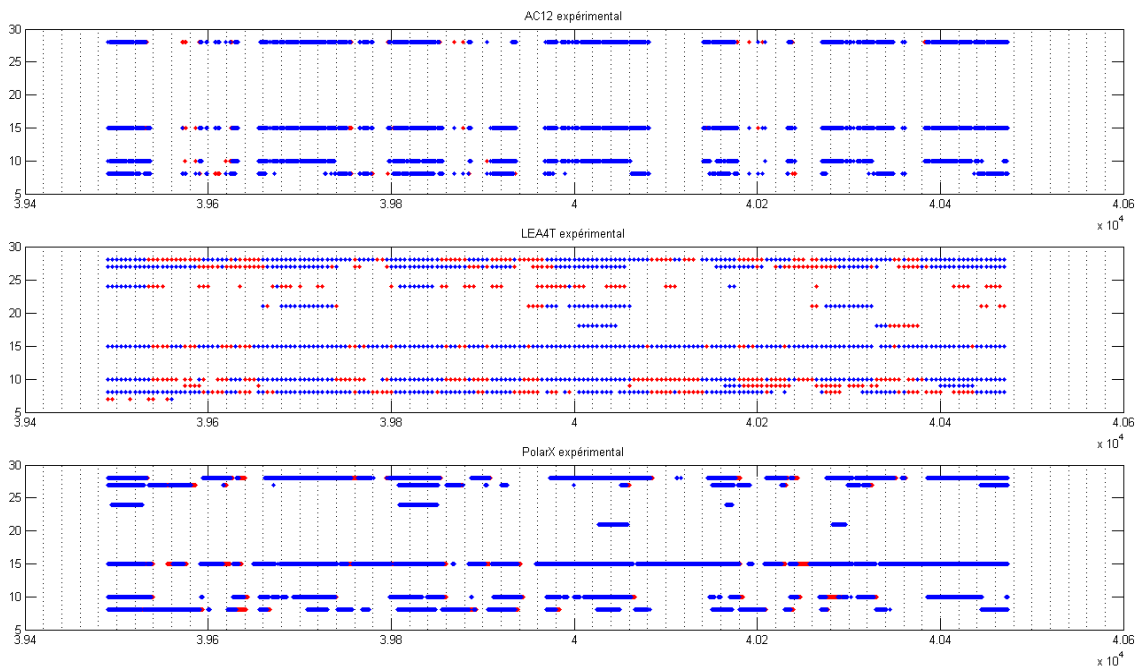


Figure 13 : NLOS Expérimentaux

La figure 13 montre clairement que le récepteur LEA-4T qui a une très bonne disponibilité, reçoit en fait beaucoup de signaux détectés comme NLOS (rouge). En revanche peu d'époques sont impactées pour l'AC12 et le PolaRx qui filtrent en amont les signaux reçus.

Si on compare les détections LOS/NLOS entre les données théoriques et expérimentales il n'y a des différences (dues aux positions des satellites qui sont légèrement différentes) que dans le cas du PolarX. Voir la figure 1 en annexe à ce sujet. Et cette différence est minime, puisqu'elle correspond à 0.2 ‰. Par conséquent la constellation théorique des almanachs donne les mêmes résultats en termes de détection des NLOS que la constellation expérimentale aux masques d'élévation près.

3.1.4 Masque d'élévation des récepteurs

En visualisant les élévations théorique et expérimentale, on peut approcher la valeur du masque d'élévation imposé par le constructeur ou définie par l'utilisateur.

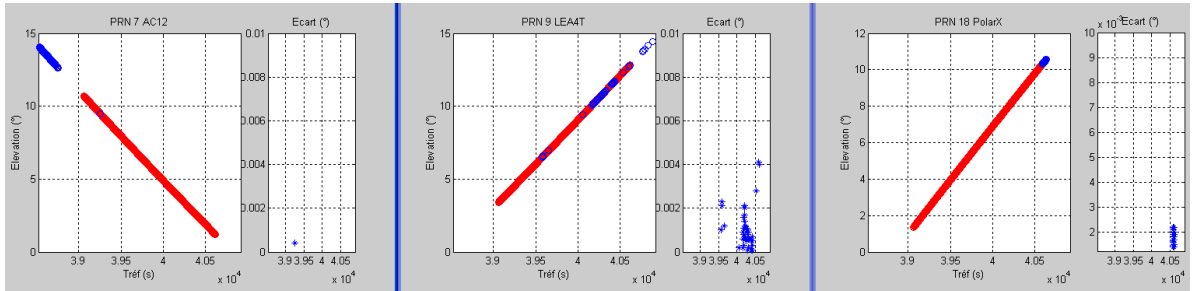


Figure 14 : Masque d'élévation des récepteurs GPS

A partir de la figure 12, on estime les masques d'élévation suivant :

- AC12 : 9 °
- LEA4T : 6 °
- Polax : 10 °

Ces valeurs ne sont pas certaines, car elles se basent sur des données GPS reçues en centre urbain. Et malheureusement nous ne disposons pas de la valeur du masque utilisé lors du Benchmark. Par contre il est intéressant de noter que le récepteur U-Blox LEA4T possède un masque d'élévation inférieur aux autres récepteurs.

3.1.5 Rapport signal sur bruit des récepteurs

Dans certains fichiers RINEX, nous pouvons obtenir une information correspondant au SNR (*Signal to Noise Ratio*) en fonction de chaque satellite reçu.

« Le codage du rapport signal sur bruit prend une valeur comprise entre 1 et 9. La valeur 1 correspond au niveau minimum du rapport signal sur bruit. La valeur 9 au niveau maximum. On considère que l'on a un bon rapport signal/bruit lorsque la valeur est au moins de 5. Lorsque la valeur n'existe pas où est nulle, cela signifie en théorie que l'on ne connaît pas le rapport signal sur bruit. Cependant, certains traducteurs RINEX mettent la valeur 0 pour indiquer une donnée mauvaise. » [6]

Remarque : l'AC12 et les récepteurs Trimble AP20M et AP20S du système Applanix fournissent cette information. Seulement pour l'AC12 la valeur peut monter jusqu'à 18 et seules les données provenant des récepteurs de l'Applanix semblent être utilisables.

Juste pour illustrer le paragraphe, nous allons regarder le SNR associé au satellite 28 vu par les récepteurs AP20 M (vert) et S (bleu), sur la boucle n°1 de Mairie XII^{ème}.

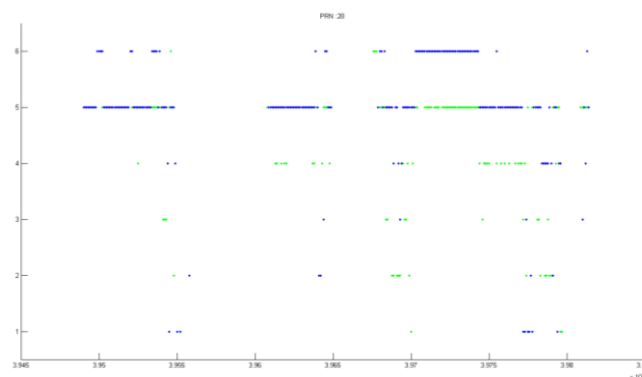


Figure 15 : SNR du Satellite PRN 28 vu par les récepteurs Applanix

Remarque : Les points bleus de l'AP20 S peuvent écraser la donnée du récepteur AP20 M. Seulement sur cette figure 15 la comparaison et tout de même plus rapide que sur deux graphes séparés.

Les récepteurs n'étant pas les mêmes et n'étant pas placés au même endroit sur le véhicule, il y a des différences. Par contre pour les deux récepteurs le SNR oscille entre les valeurs 1 et 6 avec une grande majorité de points situés sur un SNR de 5. On reçoit donc le satellite PRN 28 de manière assez propre sur la boucle n°1 du parcours.

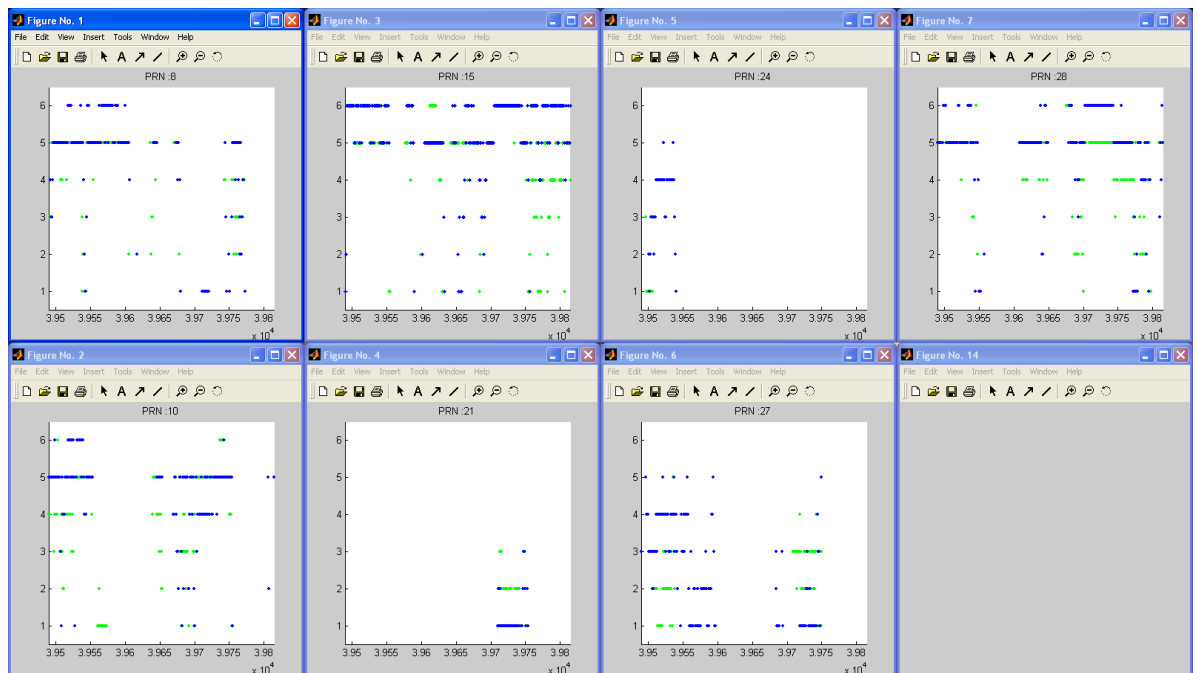


Figure 16 : SNR des récepteurs AP20 M et S pour la boucle n°1 de Mairie XII

En traçant les SNR de l'ensemble des satellites en vue sur la boucle n°1, on s'aperçoit que les satellites 21, 24 et 27 ont un SNR plus faible que les autres satellites. Ces satellites sont identifiés figure 9 comme étant à basse élévation ($< 30^\circ$). Etant à basse élévation les signaux diffusés ont donc plus de chemin à parcourir dans l'atmosphère et les SNR sont donc réduits. Ce qui pourrait expliquer pourquoi on ne les voit pas avec l'AC12 si un filtre sur le SNR est installé par le constructeur.

Remarque : Il aurait été intéressant de comparer l'évolution du SNR en fonction de la présence ou non d'NLOS, mais ce travail est resté en suspens.

Les études réalisées sur les constellations théorique et expérimentale ont permis de mettre en évidence que l'utilisation des fichiers d'almanachs pour connaître la position des satellites vis-à-vis du calcul de position de notre solveur de type LMS n'était pas parfaite. En revanche les écarts de position sont négligeables dans l'utilisation du SDK BeNomad et d'une détection des NLOS dans le cas où on utilise le bon fichier d'almanachs (jour des acquisitions) et qu'on utilise le STK à bon escient (la base fixe centrée sur terre placée au centre de la zone des acquisitions). De plus le réglage des masques d'élévation et l'analyse du rapport signal/bruit nous permettent d'en savoir un peu plus sur les conditions de réception des données satellitaires acquises lors du benchmark CityVIP.

3.2 Validation par comparaison avec le logiciel Ergospace®

Ergospace® est un logiciel de simulation de propagation d'ondes électromagnétiques en environnement 3D complexe. Il utilise une méthode de tracé de rayons et analyse aussi bien les signaux directs, réfléchis, diffractés que diffusés en mettant ainsi en évidence les masquages induits par l'environnement. Pour connaître le fonctionnement du logiciel Ergospace®, le lecteur est invité à consulter la documentation fournie avec le logiciel :

Manuel Technique Ergospace ed12 - Février 2008.pdf

Manuel Utilisateur Ergospace ed12 - Février 2008.pdf

Avant d'utiliser le logiciel il a fallu convertir le Bâti 3D de la Mairie du XII^{ème} dans un format lisible sous Ergospace®. Un import des fichiers 3DS sous Google SketchUp a été effectué :

- mairieXII_terrestre_v2.0.3ds

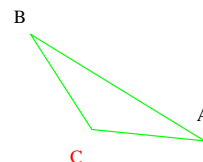
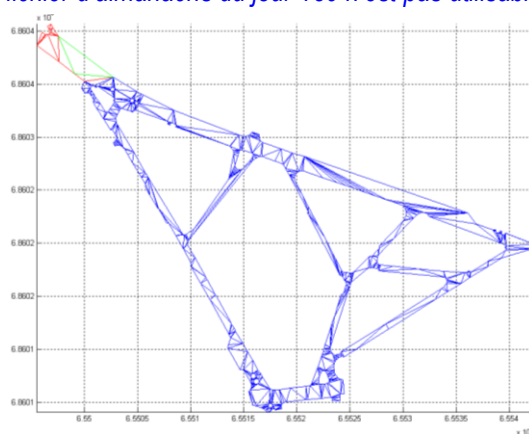
- espace_libre_mairie_xii_centered.3ds

Cependant le fait d'importer le modèle sous Google SketchUp nous a fait perdre la géo-localisation du bâti. En effet SketchUp tout comme Ergospace® référence la position des nœuds constituant le bâti de manière locale et non globale. C'est-à-dire que chaque point du bâti est référencé à partir d'un point d'accès précis. Ce point est le centre du repère de travail du logiciel SketchUp. Afin de pouvoir géo-référencer le bâti il faut donc connaître de manière précise la géo-localisation de ce point de référence.

Nous avons donc choisi un point commun aux deux fichiers 3DS (bâti et sol) et placé ce point au centre du repère de SketchUp avant d'exporter les données dans un format lisible par Ergospace® (dxf). Ce point est le point C de la facette verte figure 18. Les coordonnées de chaque point de la facette ont été retrouvées en exploitant les données recueillies dans le document espace_libre_mairie_xii.txt et à l'aide du rapport [7]. De plus le bâti a subi une rotation d'un angle correspondant à la différence de convergence des méridiens [3], puisque le Nord Lambert utilisé dans la géo localisation du bâti, diffère du Nord géographique utilisé par Ergospace®.

Concernant la constellation satellitaire tout comme pour le STK, nous avons utilisé un fichier d'almanachs. Le fichier utilisé est celui du 186^{ème} jour de l'année 2009 (soit le dimanche 5 juillet 2009).

Remarque : les fichiers d'almanachs sont calculés et distribués pour être valides environ 2 jours plus tard, et le logiciel refuse d'utiliser des fichiers d'almanachs dont la date de validité est postérieure à celle des simulations. Ainsi le fichier d'almanachs du jour 189 n'est pas utilisable...



Est Lambert : 654990.78 (m)
 Nord Lambert : 6860359.94 (m)
 Altitude : 37.203 (m)

Latitude : 48.84171498 (°)
 Longitude : 2.38674489 (°)
 Hauteur : 81.003 (m)

Figure 17 : Espace libre de Mairie XII

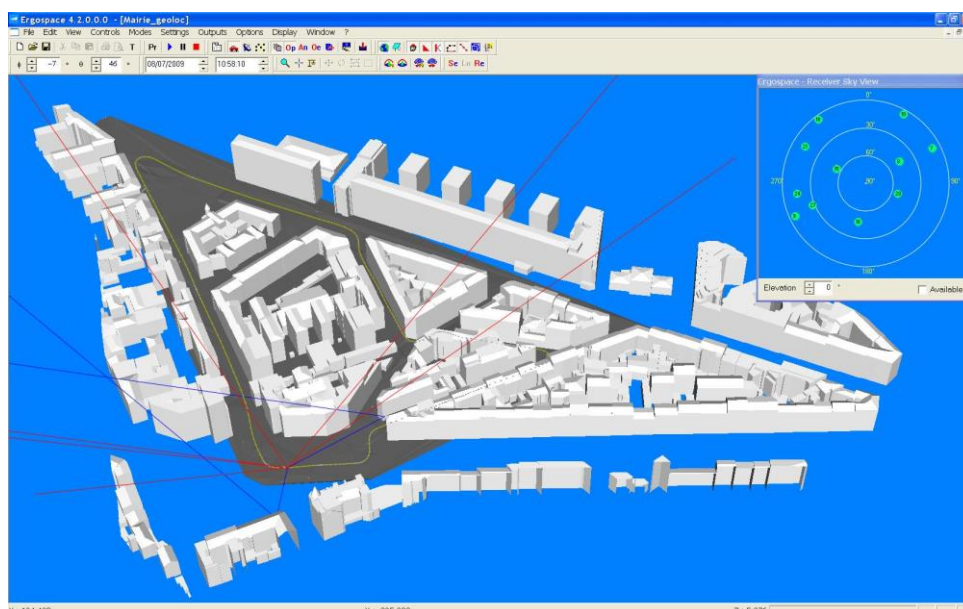


Figure 18 : Illustration du logiciel Ergospace®

Une fois le travail d'export des fichiers au format dxf effectué sous SketchUp, nous pouvons importer notre modèle sous Ergospace®. Ce modèle, après mise en forme (textures) et import du fichier d'almanachs, est présenté figure 18. Sur cette illustration le tracé des rayons rouges correspond à la visibilité directe d'un satellite de la constellation et le tracé de lignes bleues correspond à la visibilité d'un satellite de la constellation après 1 réflexion possible (paramètre configurable).

Les bâtiments sont considérés comme étant entièrement constitués de béton (réflexion possible), et nous avons modifié la texture du sol de manière à ce qu'il soit considéré comme une route non réfléchissante. Nous considérons qu'il ne peut y avoir qu'une seule réflexion sur le trajet Satellite-Mobile. Et on considère les antennes GPS réglées avec un masque d'élévation nul.

Nous avons échantillonné les trajectoires des 3 récepteurs à 10 Hz à partir de la trajectoire de référence LandINS génération 3 et des bras de levier associés à chaque antenne. Utilisons la légende suivante pour présenter les résultats de la simulation sous Ergospace® sur les 3 boucles du parcours :

- 1 point vert pour un satellite visible directement ;
- 1 point magenta pour un satellite reçu après 1 réflexion.

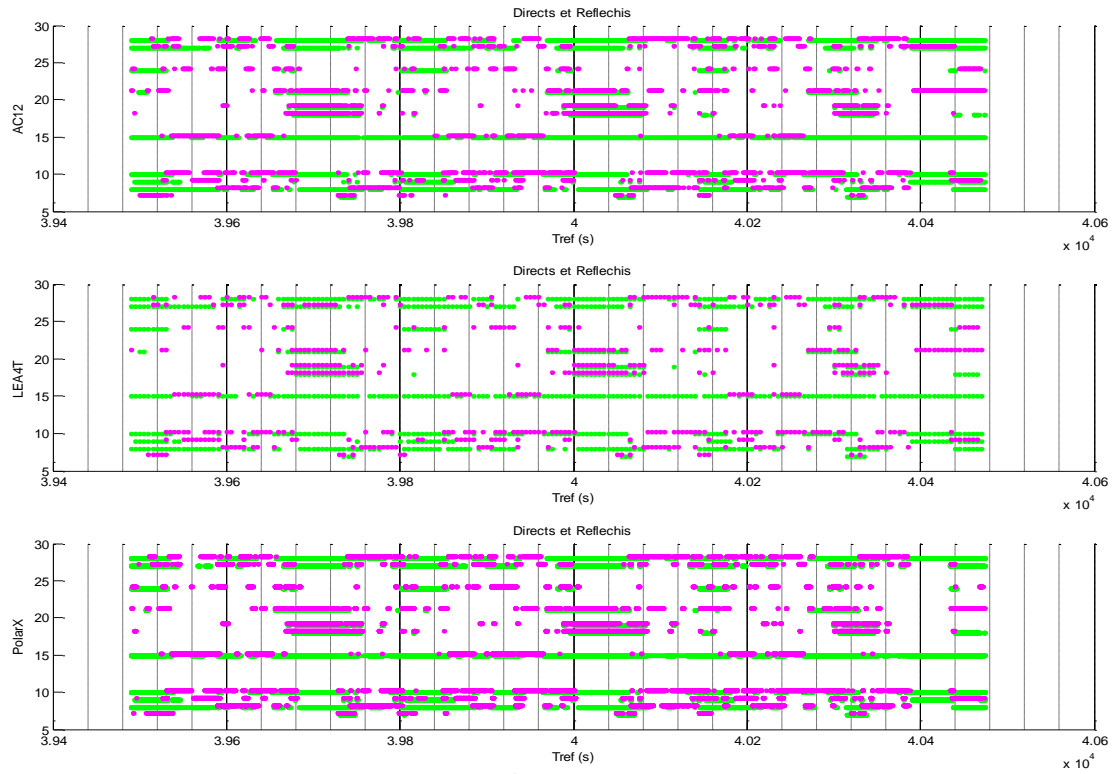


Figure 19 : Visibilité satellitaire vue par Ergospace®

On peut alors comparer les sorties de notre algorithme avec celle d'Ergospace® :

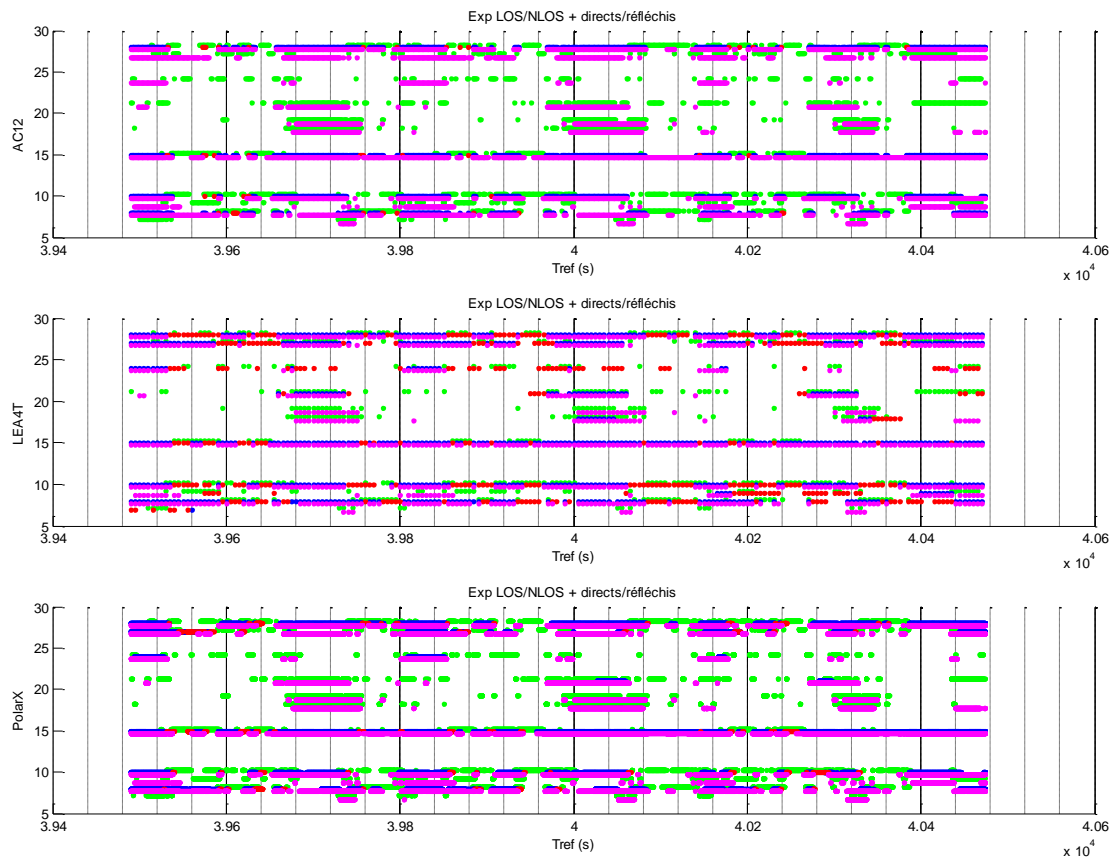


Figure 20 : Comparaison de l'algorithme NLOS aux sorties d'Ergospace®

Les figures correspondant au découpage par boucle du parcours sont données en Annexe 2.

Appliquons la nomenclature suivante :

- LOS : Satellite vu de manière directe par notre algorithme
- NLOS : Satellite vu de manière indirecte par notre algorithme
- D = DIRECT : Satellite vu de manière directe par Ergospace®
- ND = NON DIRECT : Satellite non vu de manière directe par Ergospace®
- R = REFLECHI : Satellite vu après 1 réflexion possible
- NR = NON REFLECHI : Satellite non vu après 1 réflexion possible

Pour l'ensemble des cas de comparaison à effectuer, il est possible de regrouper les différents cas présents sur la figure 20 comme suit :

(DR, DNR, NDR, NDNR) : groupe non utile car pas de comparaison possible avec notre algorithme

(DRLOS, DNRLOS, NDRNLOS, NDNRNLOS) : groupe de cas où la détection est valide

(DRNLOS, DNRNLOS, NDRLOS, NDNRLOS) : groupe de cas où la détection est non valide

En appliquant le regroupement ci-dessus on obtient les résultats suivant :

| | AC 12 | | LE A-4T | | PolarX | |
|------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | Théo | Exp | Théo | Exp | Théo | Exp |
| DR LOS | 12,17% | 16,65% | 12,79% | 17,94% | 10,88% | 15,66% |
| DNR LOS | 27,38% | 80,52% | 27,32% | 47,79% | 27,40% | 76,07% |
| NDR NLOS | 12,69% | 1,80% | 12,51% | 15,51% | 12,59% | 3,97% |
| NDNR NLOS | 45,22% | 0,98% | 45,08% | 18,12% | 46,97% | 3,15% |
| | | | | | | |
| DR NLOS | 0,11% | 0,00% | 0,05% | 0,00% | 0,08% | 0,12% |
| DNR NLOS | 0,08% | 0,05% | 0,23% | 0,27% | 0,06% | 0,04% |
| NDR LOS | 0,27% | 0,00% | 0,46% | 0,00% | 0,23% | 0,16% |
| NDNR LOS | 2,08% | 0,00% | 1,56% | 0,36% | 1,79% | 0,84% |
| | | | | | | |
| Valide | 97,46% | 99,95% | 97,70% | 99,37% | 97,84% | 98,84% |
| Non Valide | 2,54% | 0,05% | 2,30% | 0,63% | 2,16% | 1,16% |

Tableau 2 : Comparaison algorithme NLOS et Ergospace®

Notre algorithme et Ergospace® sont très proches dans le cas des données expérimentales, et à peine moins dans le cas des données théoriques. Ceci provient encore une fois de la différence des constellations utilisées (fichier d'almanachs). Voir l'annexe 3. Le cas le plus défavorable pour une comparaison sans équivoque à partir des constellations théoriques est le cas où le récepteur reçoit une donnée considérée comme LOS et où Ergospace® ne voit rien (NDNRLOS). Dans ce cas, les constellations différentes peuvent jouer un rôle, mais également la précision de détection de notre algorithme (au pixel près) ainsi que la non prise en compte de multi-trajet avec un nombre de réflexion supérieur à 1 sous Ergospace®.

Ergospace® et notre algorithme sur les données expérimentales acquises par les trois récepteurs sur les trois boucles du parcours de la Mairie du XIIème arrondissement de Paris sont en désaccord dans 1 % de l'ensemble des cas étudiés. On considère donc que notre algorithme est validé.

4 Impact de la détection des NLOS sur la position GPS calculée

4.1 Calcul LMS sur des données GPS filtrées NLOS à partir d'une trajectoire de référence LandINS

A partir d'une solution de type LMS sur les données GPS, on a pu déterminer les erreurs de positionnement horizontales et verticales présentées dans [1]. On retrouvera sur la figure 21 ci-dessous les courbes de distribution cumulée des erreurs en trait pointillé. En trait continu, on représente les mêmes courbes pour le même type de solution mais après filtrage des satellites considérés comme NLOS. Les échantillons considérés sur ce graphique sont les époques pour lesquels la disponibilité est ≥ 4 satellites.

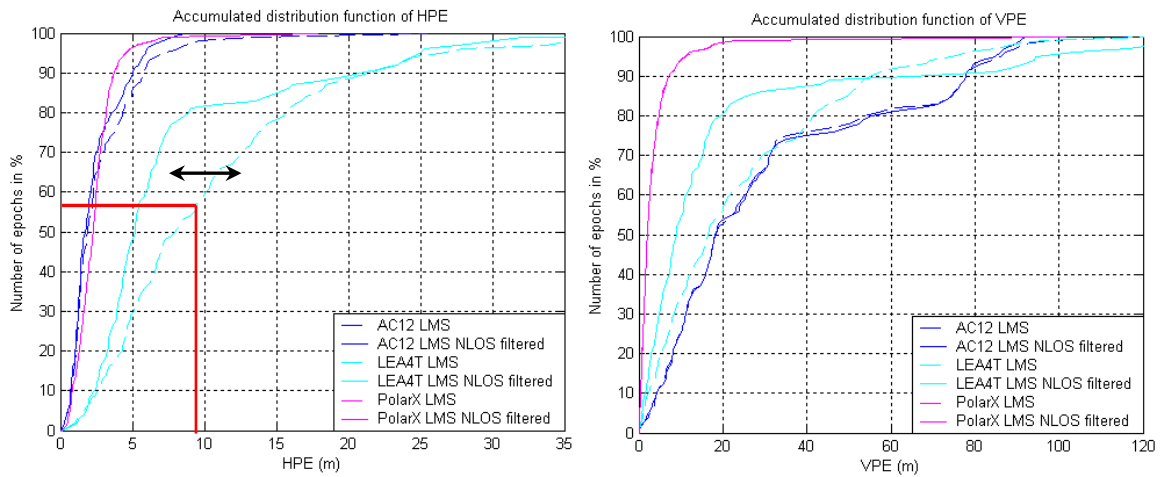


Figure 21 : Fonction de distribution cumulée des HPE et VPE sur un calcul LMS filtré NLOS et non filtré

Remarque : lecture du graphe – Sur les HPE et pour un calcul de type LMS à partir de données GPS non filtré NLOS (légende cyan pointillée : LEA4T LMS), 57 % des échantillons sont à moins de 9 m d'erreur horizontale. Donc plus les courbes atteignent de manière rapide l'asymptote des 100% des échantillons, plus le calcul de positionnement est précis.

En considérant l'écart (flèche noire) entre les deux courbes de même couleur (même récepteur) on constate directement l'apport d'une détection des NLOS sur un calcul de solution de type LMS. Ainsi un filtrage NLOS apporte une précision de 7 m pour 70% des époques où on peut effectuer un calcul de solution GPS pour le LEA-4T. En revanche l'apport est beaucoup moins intéressant pour l'AC12 et est négligeable pour le PolarX. A contrario pour le LEA-4T au niveau des VPE on perd 20 m de précision pour 95 % des échantillons. En effet à partir de 90 % des échantillons, une détection des NLOS dégrade la précision verticale de la solution. Ceci peut être expliqué par le fait qu'on dispose d'un faible nombre d'époques disponible pour le LEA-4T sur le parcours de la Mairie du XIème (2 fois moins d'époques que l'AC12 et 25 fois moins que le PolarX). Le filtre NLOS fait chuter la disponibilité satellitaire à 4 satellites de moins d'un facteur 2, et ajoute également quelques points avec une erreur verticale assez élevée. De ce fait la part d'erreur verticale est plus importante après filtrage NLOS qu'avant. A titre d'illustration, la figure suivante parle d'elle-même :

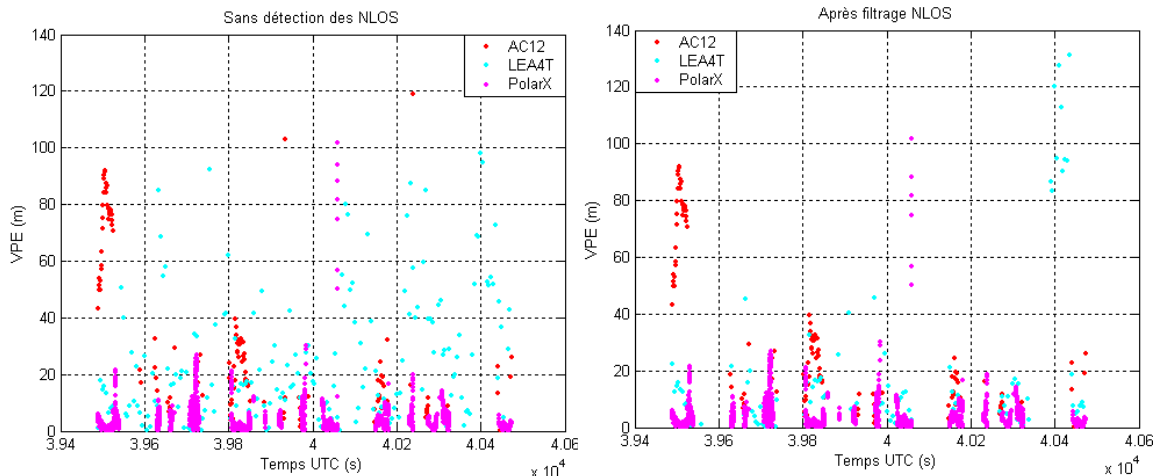


Figure 22 : VPE sur un calcul de type LMS avant et après filtrage NLOS

Une détection des NLOS améliore donc le calcul de positionnement horizontal pour les récepteurs haute sensibilité tels que le LEA-4T, dans le cas d'un calcul par une méthode de type LMS. Une campagne de mesure plus vaste effectuée sur Nantes le 2 mars 2011 (§ 4.2) confortera ces résultats.

4.2 Calcul EKF sur des données GPS filtré NLOS à partir d'une trajectoire de référence LandINS

Un calcul de position par couplage serré EKF a été effectué en utilisant le code de D. Bétaille à partir des fichiers RINEX d'observation filtrés NLOS et non-filtrés. Ce traitement n'a pas été appliqué sur les données du Benchmark CityVIP, mais uniquement sur des données acquises à Nantes le 2 mars 2011.

Le filtre EKF est basé sur un modèle cinématique (position, vitesse horizontale, accélération horizontale, terme d'horloge récepteur et sa dérivée), les mesures sont les pseudos-ranges et les dopplers GPS, un odomètre (odomètre CAN du véhicule VERT) et un gyromètre (KVH RD 2100) en ce qui concerne les capteurs à l'estime. De plus on effectue une FDE (*Fault Detection and Exclusion*) indépendamment sur les pseudos-ranges et sur les dopplers. En outre, on a mis en place un mécanisme de reset du filtre à partir du moment où il y a un rejet trop important de mesures GPS (plus de la moitié des observations pendant 3 secondes) et si on se retrouve face à un saut du terme d'horloge.

Ce filtre et les réglages utilisés sont décrits succinctement dans [8].

Une fois le filtre mis en place, on peut déterminer les HPE et les VPE entre les solutions du filtre EKF et la trajectoire de référence LandINS sur l'ensemble des données acquises à Nantes sous la forme de fonction de distribution cumulée de l'erreur :

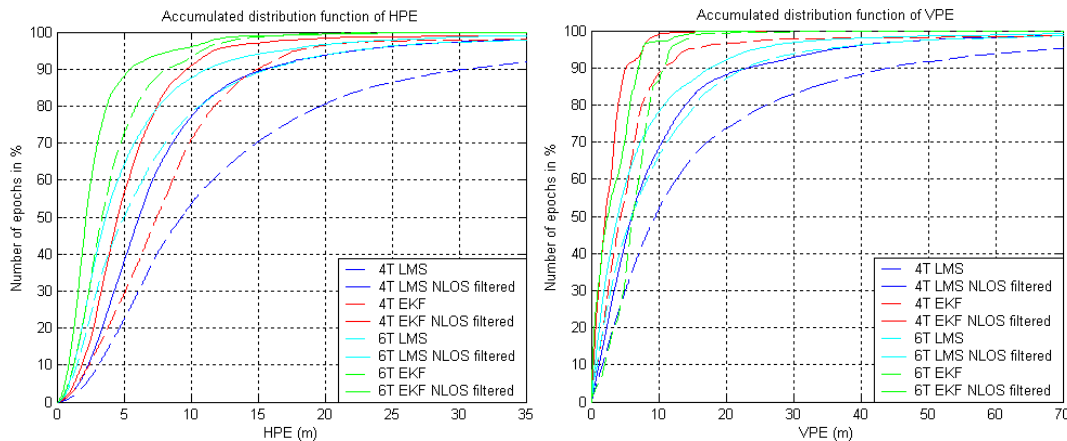


Figure 23 : Fonctions de distribution cumulée des HPE et VPE sur les calculs LMS et EKF filtré NLOS et non filtré à partir des données acquises sur Nantes

Sur les graphiques de la figure 23 sont représentées les fonctions de distribution cumulée des HPE et VPE pour les deux récepteurs utilisés (LEA-4T et 6T) sur l'ensemble des boucles effectuées à Nantes (5 boucles), avec un calcul de solution GPS de type LMS et couplage serré EKF. En pointillé apparaissent les résultats sans filtrage des satellites détectés NLOS et en continu avec filtrage, en utilisant la trajectoire de référence LandINS pour déterminer les NLOS.

Dans un premier temps on constate très clairement que le filtrage des NLOS apporte un gain de précision considérable dans les deux méthodes de couplage (LMS et EKF). Respectivement, pour les récepteurs LEA-4T et 6T, on gagne sur les HPE (à 95%) 25 m et 6 m pour la solution LMS et 5 m et 2 m pour la solution EKF. Sur les VPE le gain est sensiblement du même ordre. Donc, avec un nombre plus important d'échantillons que dans le cas du benchmark et de la Mairie du XIIème, l'apport du filtre NLOS est indiscutable sur la précision d'une solution de navigation.

D'autre part, on confirme également que le filtre EKF aidé par des capteurs à l'estime est plus précis que la méthode de type LMS.

En revanche, dans les résultats présentés plus haut, la détection des NLOS est effectuée à partir de la connaissance de la trajectoire de référence, connaissance dont on ne dispose généralement pas. On s'intéresse donc dans le paragraphe suivant au cas, correspondant à la configuration CityVIP finale, où la détection de NLOS est effectuée à partir de la solution estimée en temps réel par le filtre de positionnement.

4.3 Calcul EKF en exécution temps-réel avec un filtrage NLOS à partir d'une solution GPS estimée

4.3.1 Les limites de notre algorithme de détection des NLOS

Afin de détecter les satellites NLOS à l'aide de notre algorithme, nous avons jusqu'à maintenant utilisé la trajectoire de référence LandINS pour positionner la caméra du SDK BeNomad nous offrant le rendu graphique du monde 3D virtuel. Nous allons donc dans ce paragraphe mettre en place le même filtre EKF qu'au paragraphe 4.2, sans FDE, mais avec une détection des NLOS effectuée en positionnant la caméra virtuelle du SDK sur la position estimée par le filtre.

On retrouvera en annexe 4 l'architecture du programme réalisé à cet effet et qui s'inspire directement du code Matlab développé par D. Bétaille. De plus on y retrouvera la description des fichiers texte *Data.txt* à créer pour faire tourner l'exécutable *RenderingFuse.exe* et la documentation pour lancer cet exécutable.

A l'heure actuelle seules les deux boucles de la matinée acquise sur Nantes le 2 mars 2011 ont été traitées. Mais cela suffit pour se rendre compte des limites de notre algorithme et émettre nos perspectives d'évolution dans le paragraphe suivant. De plus, les fichiers de données *Data.txt* correspondant à chaque boucle effectuée et à chaque récepteur GPS, peuvent présenter un saut de mesure au niveau de l'évolution du terme d'horloge récepteur. Ces sauts d'horloges nécessitent une réinitialisation du filtre EKF qui n'a pas été mise en place. Dans un premier temps, on découpe donc les fichiers de données *Data.txt* de manière manuelle au niveau de l'époque présentant un saut du terme d'horloge, le cas échéant.

Observons alors sur la première boucle, la première partie des fichiers de données ne possédant pas de saut du terme d'horloge récepteur et associée aux récepteurs LEA-4T et 6T. Sur les figures ci-dessous on représente en vert la trajectoire de référence LandINS, en bleu la solution EKF sans effectuer de filtrage NLOS (ni de FDE), et en rouge la solution EKF avec un filtrage NLOS (et toujours sans FDE). Le repère de travail est un repère local tangent centré sur la solution LMS du premier point du parcours.

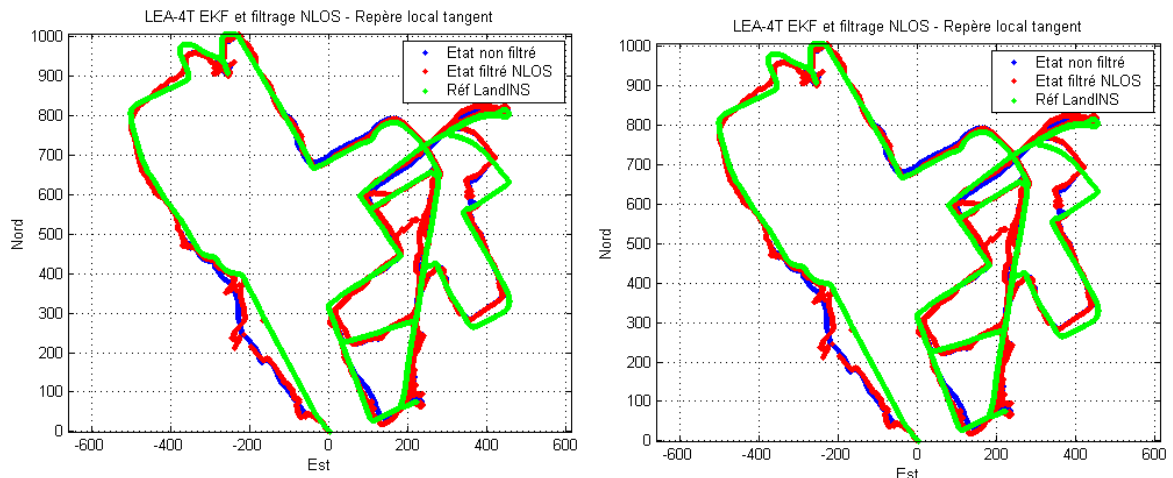


Figure 24 : Résultat d'une détection d'NLOS déterminée à partir d'un filtre EKF – Boucle 1

La position estimée par le filtre EKF après l'élimination des signaux NLOS n'est pas satisfaisante en termes de précision par rapport aux solutions du filtre sans détection des NLOS.

Les seuls cas de NLOS rejetés par le filtre correspondent aux cas suivants :

- Les cas « focales insuffisantes » : où même la plus petite focale disponible ne permet pas de voir la frontière ciel/bâtiment, cas qui peut également apparaître lorsque l'estimation de la position caméra en alti est inférieure à celle du bâti (undermap), ce qui se produit si on est à l'intérieur d'un bâtiment ;
- Cas où l'élévation critique imposée par l'environnement est supérieure à celle du satellite.

Remarque : à partir d'une distance focale inférieure à 200 dans le SDK, des effets de bord peuvent apparaître comme par exemple faire apparaître du ciel alors qu'on est dans un bâtiment... Il faut donc limiter à un minimum de 200 la recherche de la bonne distance focale, paramètre qui jusqu'alors était limité à 5...

Dans tous les autres cas on conserve les données satellitaires :

- Les cas « pas d'obstacle » : aucun pixel appartenant au bâti n'est présent sur la demi-image du rendu graphique de la zone. Ce cas peut également se produire si on est largement au dessus de la carte ;
- Cas où l'élévation critique imposée par l'environnement est inférieure à celle du satellite.

Observons les estimations de position verticale de ces deux boucles :

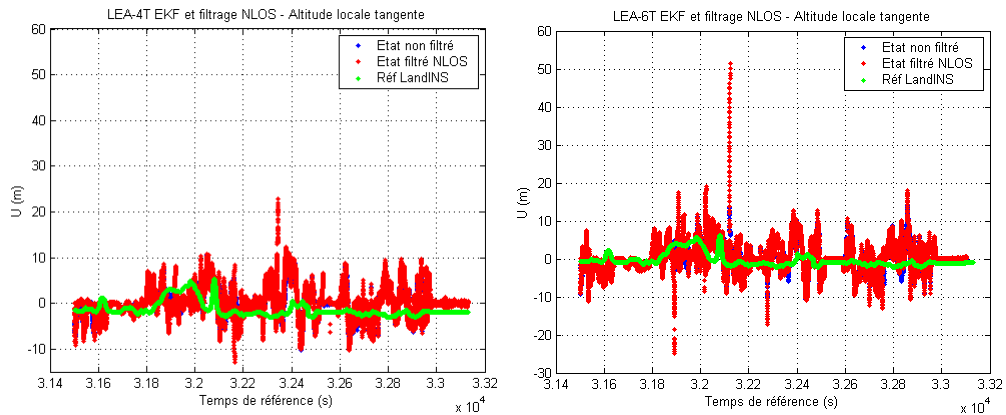


Figure 25 : Estimation de l'altitude sur la boucle n°1 de Nantes

L'estimation du filtre EKF en vertical est assez mauvaise : on se trouve souvent éloigné de plusieurs mètres de la vérité terrain. Ces écarts sont trop importants pour effectuer un bon filtrage NLOS. En effet, en étant à 2 m sous la vérité terrain, on risque de passer sous la modélisation 3D du sol et ainsi rejeter à tort trop de satellites. Dans le cas où on se situerait à 2 m au dessus de la vérité terrain on risque de conserver de mauvaises données satellitaires.

La précision associée au calcul de position GPS proposée par le filtre EKF n'est pas suffisante pour rester proche de la réalité terrain (trajectoire verte sur les figures 24 et 25). Si bien que la détection des satellites NLOS s'en trouve fortement impactée (un satellite qui serait reçu de manière directe peut être détecté comme NLOS et vice-et-versa). Ces mauvaises détections engendrent alors un phénomène de dérive du filtre qu'on ne contrôle pas : estimation de la position trop haute (*upper map*) ou trop basse (*under map*) voir même située à l'intérieur d'un bâtiment de l'environnement 3D. Une première approche de consolidation de l'algorithme consisterait donc à contraindre la solution du filtre à rester sur l'espace roulant.

4.3.2 Les perspectives envisagées

Dans le paragraphe précédent 4.3.1 on c'est rendu compte que la détection des NLOS à partir d'une solution EKF (modèle d'évolution simple, matrice d'état comprenant la position - la vitesse horizontale - l'accélération horizontale - le terme d'horloge récepteur et sa dérivée, pas de FDE) ne permettait pas une localisation aussi précise qu'attendue au paragraphe 4.2.

Les points faibles par rapport à ce qui a été montré en 4.2 sont les suivants :

- Pas de FDE
- Pas d'utilisation de la trajectoire de référence
- Pas de reset du filtre en cas de rejet trop important sur les points GPS

Les différentes pistes d'évolution sont donc les suivantes :

- Mettre en place une FDE sur les pseudos-ranges et les dopplers, qui serait à coupler soit avant filtrage NLOS soit après
- Effectuer du Map-Matching pour contraindre la solution à être sur l'espace roulant
- Ajouter de la précision sur le calcul de la pose GPS à l'aide d'algorithme de vision

Toutes ces perspectives sont envisagées dans le projet CityVIP. En effet, les filtres de positionnement d'Xlim et d'Heudiasyc utilisent l'espace roulant pour contraindre leurs solutions et le Lot 2 fournira au Lot 1 une position issue d'une localisation par vision (méthode E. Royer) qui permettra d'améliorer significativement la précision de la position fusionnée. On espère donc que l'intégration de ces modules permettra de confirmer l'intérêt d'un filtrage des signaux NLOS dans un environnement temps-réel sans système de référence.

Bibliographie

- [1] : F. Mougel, F. Peyret, *Données Lot1 du Benchmark CityVIP autour de la mairie du XIIème arrondissement de Paris*, rapport technique, janvier 2011
- [2] : F. Mougel, D. Bétaille, S. Renault, S. Peyraud, V. Drevelle, Fiche de synthèse Séminaire Lot1, Compte rendu de séminaire, novembre 2010
- [3] : D. Bétaille, B. Cannelle, *CityVIP_note geo4*, rapport technique, février 2011
- [4] : J.P. Derutin, *Définitions générales pour la navigation autonome de robots mobiles* », document collaboratif, stereopolis.ign.fr/CityVIPGoogleGroupPages
- [5] : S. Chau, *Paramètres extrinsèques de caméra dans le SDK BeNomad*, note technique, août 2010
- [6] : IGN, <http://rgp.ign.fr/DONNEES/rinex.php>, 2008
- [7] : M. Geamanu, *Exploitation de bases de données cartographiques 3D surfaciques et précises pour la navigation en milieu urbain*, rapport de stage de Master, UTC – Heudiasyc, juillet 2010
- [8] : F. Peyret, D. Bétaille, F. Mougel, *Non-Line-Of-Sight GNSS signal detection using an on-board 3D model of buildings*, 11th International Conference on ITS Communication – Saint-Petersburg, Russia – August 2011