

# Amélioration de la position GNSS en ville par la méthode des tranchées urbaines

M. VOYER, D. BÉTAILLE, F. PEYRET  
IFSTTAR NANTES

## Introduction

Le système GPS est opérationnel depuis les années quatre-vingt-dix. Il a bouleversé les méthodes de positionnement statique, et permis à une communauté d'utilisateurs très large de faire du positionnement dynamique. Le laboratoire Géoloc de l'IFSTTAR s'intéresse particulièrement aux besoins de positionnement pour la mobilité, qu'elle soit embarquée dans des véhicules ou piétonne. Les applications visées ressortissent au domaine des systèmes de transport intelligents, utilisant un matériel peu onéreux, essen-

tiellement en milieu urbain qui concentre la majorité des futures applications. Mais ce contexte est propice aux perturbations dans la réception des signaux des satellites, qui compliquent la localisation précise des équipements. L'IFSTTAR s'est engagé dans des projets pluriannuels consacrés à la localisation en ville, tels que *CityVIP* (ANR, 2008-2011) et *Inturb* (MEDDE, DGITM 2012-2014). Cet article s'intéresse aux problèmes de localisation GNSS en milieu urbain où la connaissance *a priori* du bâti est disponible sous la forme d'une base de données numérique.

## Contexte

La principale cause de dispersion des signaux GNSS en milieu urbain est due à la morphologie de l'environnement et notamment la géométrie des bâtiments. Ces derniers non seulement cachent certains satellites, dont le signal n'est plus reçu, mais provoquent également des « multi-trajets » qui, s'ils n'atténuent pas totalement le signal, le retardent et provoquent ainsi une erreur de positionnement.

## Géométrie des bâtiments

Les bâtiments constituent principalement des obstacles (figure 1) qui bloquent le trajet direct du signal en « portée optique » ou, en anglais, *line-of-sight* (LOS), c'est-à-dire sur la droite qui relie le satellite au récepteur. En conséquence, il faut une constellation de satellites suffisamment fournie pour obtenir le minimum de quatre satellites visibles requis pour le calcul de la position.

De plus, le signal étant bloqué de part et d'autre de la rue, on se retrouve à récupérer des signaux uniquement dans le sens des

voies (voir Figure 2). La géométrie de la constellation utile se trouve alors très dégradée. On utilise habituellement comme critère la *dilution of precision* (DOP) pour qualifier cette géométrie, ou, pour une caractérisation plus précise, la matrice  $\mathbf{H}^T\mathbf{H}^{-1}$  où  $\mathbf{H}$  est la matrice des cosinus directeurs récepteurs-satellites. Par exemple, si on roule dans une rue orientée Est-Ouest, l'erreur en longitude reste faible tandis qu'elle augmente fortement en latitude. Statiquement, une étude menée dans les canyons urbains de Londres prouve que, lorsqu'une solution est possible, la DOP perpendiculaire à la rue dépassera 5 dans 22 % des cas, alors que la DOP axiale ne dépassera 5 que dans 12 % des cas.

l'électronique reçoit d'un satellite à la fois des signaux directs et réfléchis, le codage orthogonal (CDMA) utilisé par le système lui permet d'éliminer les multi-trajets. Mais il arrive souvent que seuls les trajets indirects existent (nLOS : *non light-of-sight*), ce qui entraîne une erreur de positionnement considérable. En effet, les signaux nLOS parcourent une distance additionnelle par rapport à la pseudo-distance normalement mesurée entre le récepteur et le satellite. Cette erreur est toujours positive et peut atteindre plusieurs mètres selon la géométrie.

## Les solutions existantes

Des solutions existent pour diminuer les effets des multi-

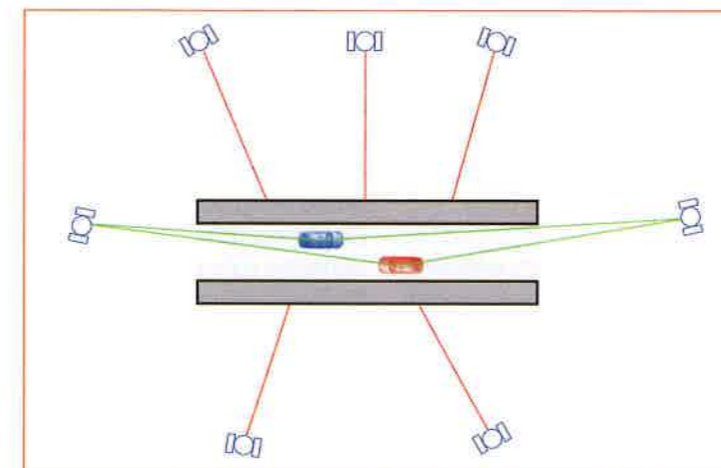


Figure 2 : Biais de positionnement. Les satellites situés dans l'axe de la rue sont reçus préférentiellement par rapport aux autres, qui sont masqués par les bâtiments riverains. Ce biais se retrouve dans la forme de l'ellipse d'incertitude, qui va se trouver étirée dans le sens perpendiculaire à la rue. D'après Groves et al.

## Surface du bâtiment et multi-trajets

En environnement urbain, les façades des bâtiments sont constituées principalement de matériaux réfléchissants pour les microondes : métal, béton armé... Ainsi, en plus des signaux reçus directement, le récepteur capte des signaux réfléchis, parfois plusieurs fois (figure 3) : on parle de multi-trajets (*multipath*). Si

trajets et des satellites nLOS. On peut les classer en trois catégories :

- Les solutions traitées par le récepteur : ce dernier trie les signaux et élimine ceux dont la polarisation est incorrecte ou le niveau de réception (RSSI) trop faible. Cette méthode donne des résultats mitigés ;
- Les solutions sous contraintes :

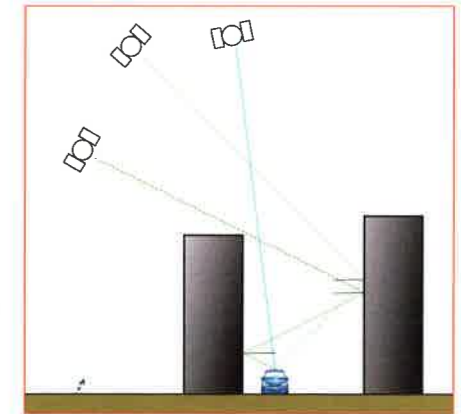


Figure 3 : Exemple typique de réception GPS en canion urbain. Seul le satellite le plus élevé « voit » le véhicule et fournit une indication fiable. Les signaux des autres satellites subissent une ou plusieurs réflexions, selon leur hauteur, ce qui augmente le temps de trajet et provoque une erreur de localisation. D'après Groves et al.

on essaie de réduire l'imprécision en imposant une contrainte, issue généralement d'une base de données spatiales. Par exemple, à bord d'un véhicule, on élimine toutes les positions qui ne correspondent pas à la voirie. L'altitude est ensuite extraite d'un MNT. Cette méthode suppose que les bases de données utilisées sont plus précises que le positionnement temps réel, ce qui se révèle parfois douteux ;

► L'utilisation d'un modèle 3D de la ville : à l'aide de ce modèle, un masque d'élévation détermine une zone de confiance où la visibilité des satellites est bonne (zone bleue sur la figure 4). Pour déterminer quels signaux sont nLOS, il suffit tout simplement de calculer l'élévation de chaque satellite et de décider s'il est contenu dans la zone de visibilité fournie par le masque d'élévation.

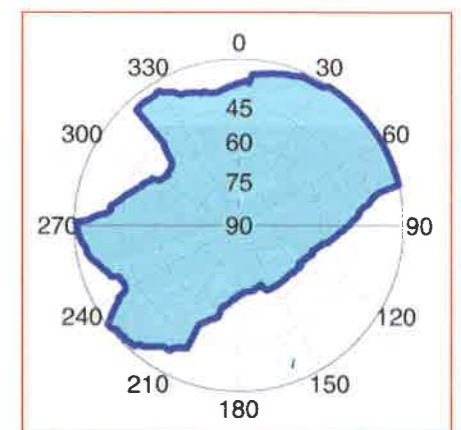


Figure 4 : Exemple de masque d'élévation.

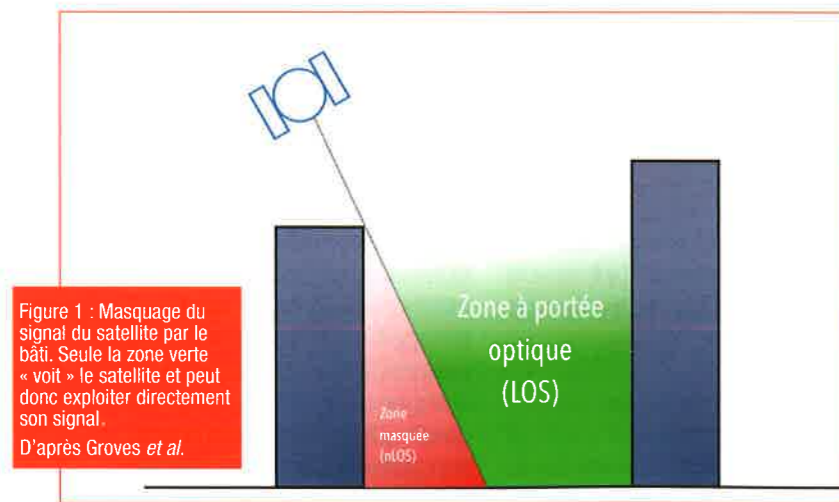


Figure 1 : Masquage du signal du satellite par le bâti. Seule la zone verte « voit » le satellite et peut donc exploiter directement son signal. D'après Groves et al.

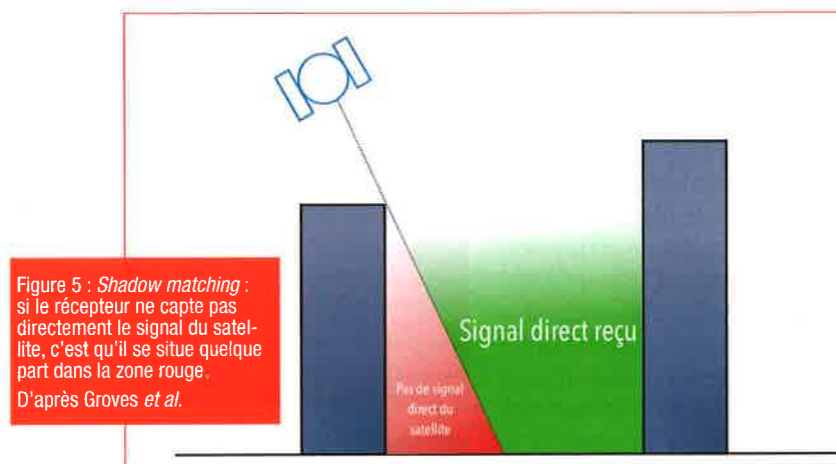


Figure 5 : Shadow matching : si le récepteur ne capte pas directement le signal du satellite, c'est qu'il se situe quelque part dans la zone rouge. D'après Groves et al.

Les caméras embarquées constituent une aide pour caractériser l'environnement et au final déterminer la nature des signaux. En utilisant un objectif panoramique pointé vers le ciel (ou un ensemble de caméras), on peut générer une image représentant la vue du récepteur GNSS. Si l'on connaît l'orientation de la caméra ainsi que la constellation GNSS à l'instant de la prise de vue, on peut alors déterminer les satellites bloqués. Cette technique est utilisable avec des véhicules qui ont la capacité et la taille d'accueillir ce type d'équipement.

Si l'on dispose d'une base de données du bâti, on peut créer un masque d'élévation des bâtiments à partir d'un SIG : tout d'abord, on génère une grille sur le modèle 3D de la ville représentant toutes les positions possibles du véhicule autour d'une

position *a priori*, puis, à chaque maille de cette grille, on calcule le masque d'élévation par lancer de rayons (*ray tracing*). On peut également affiner le calcul grâce au *shadow matching* : il s'agit de restreindre l'espace dans lequel le récepteur peut se situer en identifiant certains satellites fournis par les éphémérides mais pour lesquels le récepteur n'a pas fait de mesure directe (figure 5).

### Le projet CityVIP

CityVIP regroupe huit partenaires universitaires, industriels ou institutionnels dont l'IFSTTAR. Ce projet, qui s'est étalé de juin 2008 à décembre 2011, avait pour objectif de développer des méthodes et systèmes de géolocalisation 3D précis et intégrés pour l'aide à la conduite ou la navigation autonome de véhicules en environnement urbain.



Pour les GNSS, il s'agissait de corriger les perturbations, notamment les multi-trajets ou coupures des signaux possibles en milieu urbain.

Le projet a été divisé en quatre tranches : localisation par GPS aidée par la carte et odométrie ; localisation par vision ; évitement d'obstacles et planification de trajectoire ; bases de données géographiques et images. Cette dernière consistait à utiliser un SIG 3D embarqué permettant ensuite de séparer les signaux LOS des signaux nLOS, afin d'affiner la localisation développée dans la première tranche.

Pour effectuer cette discrimination, on doit connaître les positions du récepteur (position prédite et contraintes en largeur et altitude de la route), des satellites (positions connues) ainsi que l'environnement urbain 3D à l'instant où ces positions sont prises [Peyraud et al., 2012]. Ce dernier dérive de la base de données IGN *Bati 3D™* : les éléments 3D au voisinage du récepteur GNSS sont extraits de la base de données et le SIG 3D embarqué fournit directement une image virtuelle. Ces informations *a priori* sont exploitées par un traitement d'image en temps réel qui fournit la hauteur de la façade, et donc l'élévation critique en deçà de laquelle le satellite disparaît. Si l'élévation, calculée à partir des éphémérides, est inférieure alors on ne tient pas compte des observations de ce satellite dans le calcul.

Figure 6 : Comparaison des méthodes de localisation GNSS. En bleu, méthode de tri des satellites LOS/nLOS par calcul géométrique ; en rouge, discrimination par utilisation du rapport signal/bruit (SNR) ; en vert, trajectoire de référence. À gauche : sans recalage sur la voirie ; à droite, avec recalage

La manière la plus simple d'illustrer l'utilité de cette méthode est d'observer la trajectoire d'un parcours en milieu urbain et de mesurer l'erreur plane de ce parcours sur une vue aérienne. On voit alors (Figure 6a) que les méthodes basées sur la détection de signaux LOS/nLOS (bleu) et sur le rapport signal/bruit (SNR en rouge) sont relativement dispersées par rapport à la trajectoire de référence (vert), quand ces stratégies sont utilisées directement (c'est-à-dire sans contraintes). Ces mêmes méthodes, combinées à des données odométriques et des contraintes de positionnement sur la voirie, fournissent un résultat beaucoup plus satisfaisant avec un avantage pour le tri LOS/nLOS par rapport au tri SNR (Figure 6b).

Le projet *CityVIP* apporte donc une amélioration importante de la précision de la solution de positionnement en environnement urbain grâce à différentes stratégies combinées : la navigation par odométrie, contrainte par recalage sur l'emprise viaire et corrigée par les seules observations des satellites en vue directe. L'utilisation des données géométriques de la base de données *Bati 3D™* est au cœur de cette méthode.

### Le modèle des « tranchées urbaines »

Le modèle dit *tranchées urbaines* a été proposé et développé en 2012 par l'IFSTTAR dans le cadre du projet *Inturb*, en coordination avec la SCM (société de calcul mathématique). Cette proposition et son développement constituent la première étape du projet. Cette méthode permet, grâce à une modélisation de l'environnement urbain *a priori*,

de distinguer entre satellites LOS et nLOS.

Le projet *Inturb* dispose de données de navigation issues de différentes campagnes de mesures menées sur Paris, Nantes et Toulouse à l'aide du véhicule d'essais et de référence trajectographique (VERT) de l'IFSTTAR (voir Figure 7).



Figure 7 : le véhicule Vert de l'IFSTTAR qui a collecté les trajectoires de référence pour le projet Inturb. Cliché IFSTTAR.

► Le calcul du positionnement.

Nous ne prenons en compte que des tronçons de rue homogènes, c'est-à-dire correspondant à une portion de rue possédant approximativement les trois critères suivants :

► Une même hauteur de bâti (identique de chaque côté de la rue) ;

La trajectoire de référence est calculée en post-traitement par couplage de solutions PPK (*post-process kinematic*) Novatel bi-fréquence et de mesures inertielles par l'IMU *IXSEA LandINS*. Cette trajectoire de référence atteint une précision au mieux centimétrique, tout en restant décimétrique en ville [Ortiz et al., 2013]. Le récepteur embarqué au cours de notre étude est un récepteur GPS *uBlox LEA6-T* fixé sur le toit, un modèle bas coût courant en automobile.

La méthodologie consiste en quatre étapes :

- La caractérisation de l'environnement urbain 3D ;
- La détection des satellites LOS ou nLOS ;
- La correction des satellites nLOS en retranchant les distances additionnelles ;

► Une même largeur de rue tout au long du trajet effectué par le véhicule ;

► Une même position du véhicule dans la rue tout au long du trajet (entre 0 et 1 pour une largeur de rue, à partir de 0 pour l'extrême gauche et 1 l'extrême droite).

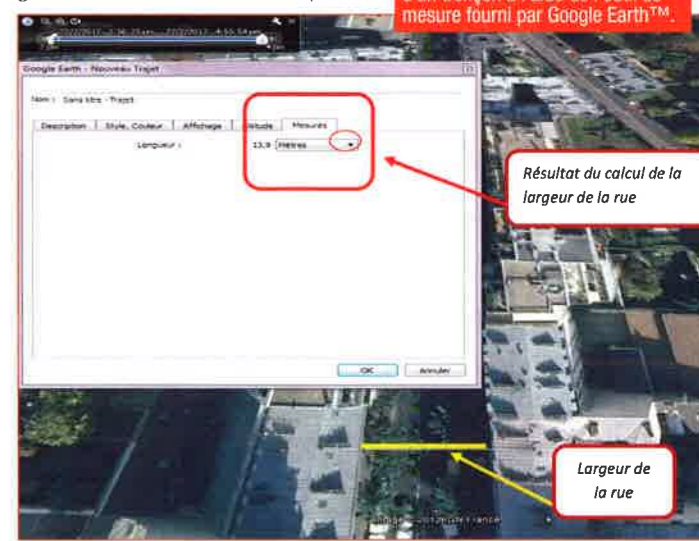


Figure 8 : Calcul de la largeur d'un tronçon à l'aide de l'outil de mesure fourni par Google Earth™.

Pour estimer ces paramètres géométriques, la trajectoire de référence a été intégrée en kmz sous *Google Earth™*. Puis, chaque tronçon ou tranchée urbaine a été examinée et la largeur de la rue estimée grâce à l'outil de calcul de distance de *Google Earth™* (voir Figure 8).

La hauteur des bâtiments est calculée grâce à l'outil *Street View™* en comptant le nombre d'étages de chaque immeuble puis en multipliant par 2,5 à 3 m selon le type de la structure. La position du véhicule est approchée par des valeurs fonction de la description de la rue, décrites dans le tableau suivant :

| Types de position                      |                                           |
|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| Description                            | Indicateur de positionnement du récepteur |
| Sens unique                            | 0,4                                       |
| Sens unique avec chaussée large        | 0,5                                       |
| Double sens                            | 0,6                                       |
| Double sens avec chaussée large        | 0,65                                      |
| Plusieurs voies et terre-plein central | 0,8                                       |
| Plusieurs voies et allée centrale      | 0,9                                       |

Tableau 1 : Valeurs des positions dans la « méthode des tranchées urbaines ».

La création de ce modèle « tranchée urbaine » constitué du triplet (hauteur, largeur et position, voir Figure 9) va permettre d'identifier si les satellites sont LOS ou nLOS.

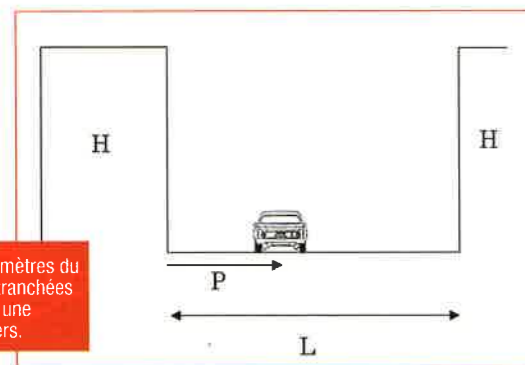


Figure 9 : Paramètres du « modèle des tranchées urbaines » sur une coupe en travers.

### La détection de satellite LOS/nLOS

À partir de la caractérisation de l'environnement urbain, on peut calculer un masque d'élévation (voir Figure 10) pour chaque tranchée urbaine donnée, en supposant celle-ci infiniment longue. Ce masque va représenter les limites d'observation du récepteur à gauche et à droite. On distingue alors facilement les

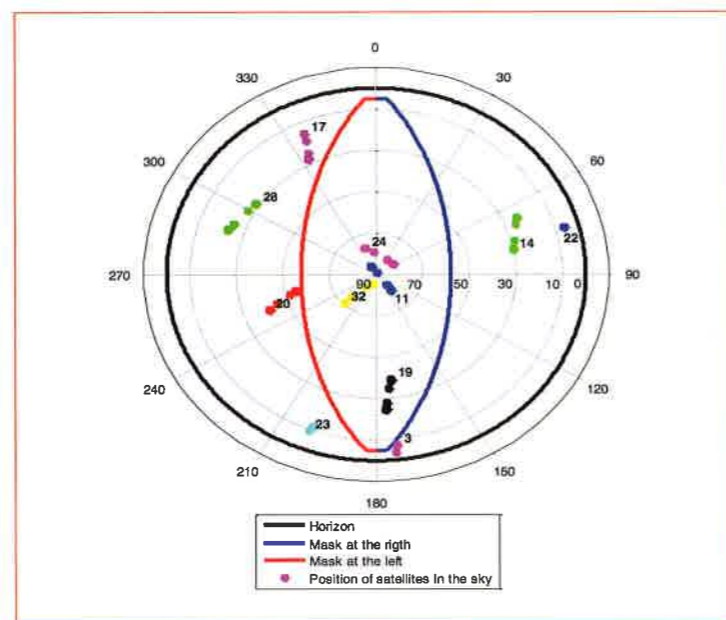


Figure 10 : Exemple de masque d'élévation.

satellites qui ne sont pas masqués – ils se trouvent dans la zone délimitée par le masque gauche et le masque droite – des autres.

Un ensemble de formules permet de déterminer, pour chaque satellite, sa classification LOS/nLOS, et, le cas échéant, le nombre de réflexions (jusqu'à trois) que son signal subit. On insère ensuite dans des flags ajoutés aux données d'entrée les valeurs suivantes :

- ▶ 0/1 pour LOS ou nLOS ;
- ▶ Le nombre de réflexions (1, 2 ou 3) si le satellite est nLOS.

Les signaux des satellites dont les élévations sont supérieures à celles des constructions sont captés directement tandis que les signaux des autres satellites subissent des phénomènes de réflexion à l'origine des multi trajets. En conséquence, la pseudo-distance mesurée est composée de la distance réelle entre le satellite et le récepteur à laquelle s'ajoute une distance liée aux réflexions sur les obsta-

cles environnants : la distance additionnelle (voir Figure 11).

Contrairement à la méthode mise en œuvre dans *CityVIP*, qui supprime les satellites nLOS (avec pour conséquence de diminuer la disponibilité de la solution si quatre satellites en LOS ne sont pas visibles), le calcul du positionnement du récepteur dans *Inturb* peut utiliser des satellites en nLOS une fois la distance additionnelle corrigée.

Le principe d'application de la méthode des tranchées urbaines

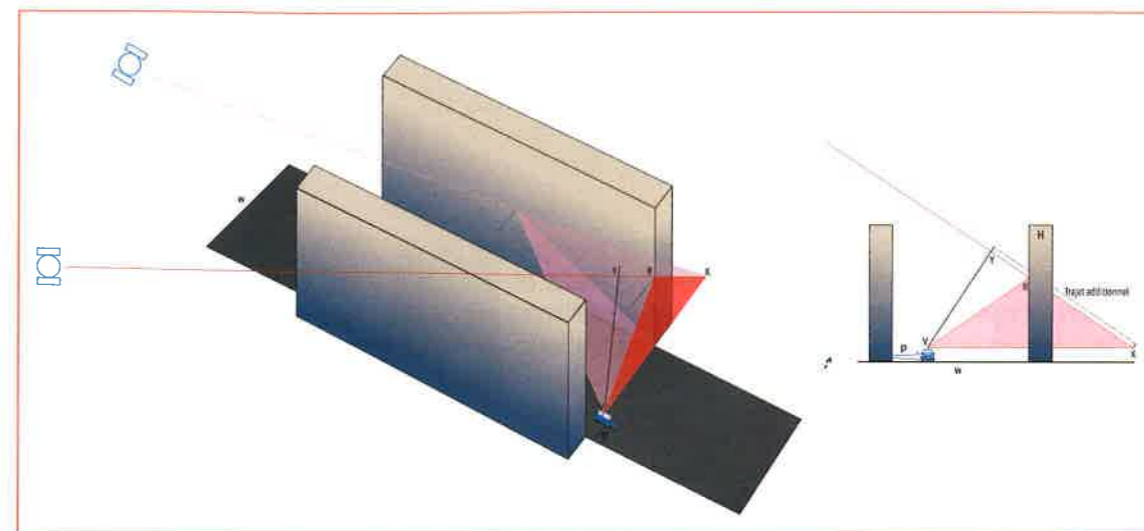


Figure 11 : Cas simple (une réflexion) de détermination géométrique du trajet additionnel dû aux réflexions sur les façades. Ce trajet est égal à  $VK$ , mais comme  $RK = RV$ , c'est aussi la somme  $YR + RV$ . D'après Groves *et al.*

est le suivant : à chaque époque de calcul, on détecte les satellites en LOS ; si on en trouve au moins quatre, alors on les utilise pour le calcul de positionnement ; si la contrainte urbaine est très forte et que les satellites en LOS ne sont pas suffisants, alors on ajoute tous les satellites en nLOS 1 réflexion corrigés. De la même manière, si nécessaire, on ajoute les satellites en nLOS 2 réflexions corrigés puis éventuellement les satellites en nLOS 3 réflexions corrigés.

Le positionnement utilise alors une méthode classique de moindres carrés. On a choisi de ne pas pondérer (par exemple avec le SNR) ni d'utiliser un filtre (ex : Kalman utilisant un modèle cinématique de navigation) pour mieux mettre en évidence l'effet du tri LOS/nLOS par rapport à tout autre effet.

### Résultats

Avec l'application de la méthode des tranchées urbaines sur un récepteur bas coût, la disponibilité est la même qu'en GPS standard (c'est-à-dire sans tri de satellites ou prise en considération de signaux nLOS avec l'ajout de distances additionnelles) : elle atteint 99,8 % pour la campagne de mesures. Le fait que les satellites en nLOS puissent être utilisés avec la méthode des tranchées urbaines permet de garantir une très forte disponibilité contrairement à une méthode qui les éliminerait (ex : *CityVIP*).

Les lois de probabilité et les fonctions de répartition de l'erreur de positionnement sont représentées figures 12 et 13. Elles sont définies entre les quantiles 5 et 95.

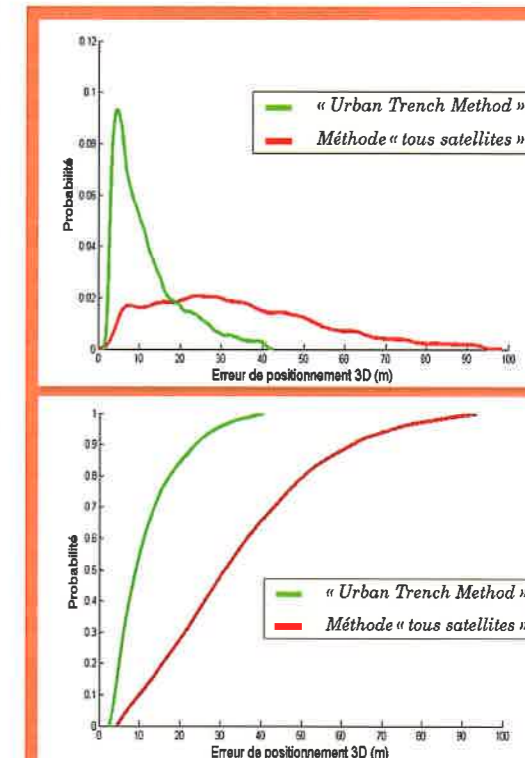
Pour l'ensemble de la campagne Paris-Nantes, la médiane de l'erreur de positionnement passe de 31,1 m pour la méthode tous satellites (courbe en rouge) à 9,2 m pour la « Méthode des tranchées urbaines » (courbe verte) soit une amélioration de 69 % [Bétaille *et al.*, 2013].

### Limites

La constitution du modèle 3D de l'environnement urbain est très simple et délaisse beaucoup dans le calcul de position du récepteur. Dans son élaboration, on omet le fait qu'une tranchée peut être asymétrique, c'est-à-dire avoir une hauteur de bâti différente de chaque côté de la rue (voire nulle d'un côté si la route longe un champ, par exemple). On ne prend en compte qu'une seule largeur et position du véhicule. Or, on peut considérer que sur de grands boulevards, on dispose de plusieurs voies identifiables par sens de conduite et dans lesquelles on peut rouler.

Le masque d'élévation est également touché par ce modèle. En réalité, il ne présente pas la forme d'un ovale : en effet, on considère que les trois paramètres sont valables en tous points

de la tranchée ; or, au début et à la fin du tronçon, logiquement, le masque d'élévation est bien plus ouvert. On suppose, en fait, dans la méthode, que le tronçon est infini.



Figures 12 et 13 : Densité de probabilité de l'erreur du positionnement et fonction de répartition.

Le calcul de la distance additionnelle considère que la surface sur laquelle le signal arrive réfléchit celui-ci sans le diffuser. C'est une approximation physique. En outre, l'environnement proche du véhicule est également idéalisé, puisqu'on ôte :

- ▶ Les obstacles se trouvant dans les zones urbaines tels que les

piétons, les voitures et autres cyclistes passant en mouvements continus à proximité de l'antenne du récepteur ;

- La végétation en général (arbres longeant les tronçons identifiés précédemment par exemple).

Enfin, cette méthode est très couteuse : il faut découper le parcours en tronçons de largeur et hauteur constantes. Pour chaque point de ces tronçons, il faut alors calculer le triplet de valeurs et l'intégrer dans la base de données. Cela prend un temps considérable à mettre en place. On note, pour conclure, que cette méthode utilise plusieurs fois la trajectoire de référence :

- Pour déterminer les rues dans lesquelles on se situe et donc identifier L et H ;
- Pour déterminer la position transversale dans cette rue, à savoir P.

## Automatisation de la méthode

Nous allons maintenant décrire un algorithme qui permettra de renseigner automatiquement les

Elle est disponible sur toute la France (RGE) et offre des hauteurs de bâtiment avec une précision métrique au moins aussi bonne que l'approche précédente (*Inturb*).

Néanmoins, il faut procéder à quelques ajustements préalables. Tout d'abord, chaque arc de la couche route de la *BD Topo*® contient en attribut une largeur d'accotement à accotement : il faut donc y ajouter la largeur des trottoirs, différente suivant les rues. Il vaut mieux calculer directement la distance de bâtiment à bâtiment se faisant face.

La *BD Topo*® 2009 présente un problème de généralisation du bâti (voir Figure 14) : elle rassemble plusieurs bâtiments en un bloc et ne fournit que la valeur maximale de hauteur de celui-ci (ce qui n'est pas le cas de la version de 2012).

On l'a vu précédemment, le modèle des tranchées urbaines se contente du triplet hauteur du bâti (en mètres), largeur de rue (en mètres) et position (variant de 0 à 1, 0 étant l'extrême gauche de la rue). Pour déterminer la hauteur, on exploite l'attribut hauteur de la

homogène de part et d'autre de la rue. Il faudra donc simplifier.

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la largeur de la rue :

- Interprétation à partir d'orthoimages (ce qui suppose un traitement d'images relativement conséquent) ;
- Calcul de la distance minimale entre chaque bâti se faisant face.

La position est plus délicate à déterminer. En effet, la couche route de la *BD Topo*® donne uniquement un ensemble d'arcs dessinés au milieu de la voie carrossable caractérisée sur la couche. On va alors estimer la position en la plaquant sur l'arc situé dans la voie. Il faut ensuite déterminer la largeur à droite (*largeur1*) et la largeur à gauche (*largeur2*), qui correspondent à la distance entre l'arc de la couche de la *BD Topo*® et le bâtiment à gauche (*largeur2*) ou le bâtiment à droite (*largeur1*) le plus proche. Puis on calculera la hauteur moyenne des bâtiments de gauche (*hauteur2*) et de droite (*hauteur1*) (cf. figure 15).

Au final, la position approximative vaut  $\text{largeur2} \div (\text{largeur1} +$

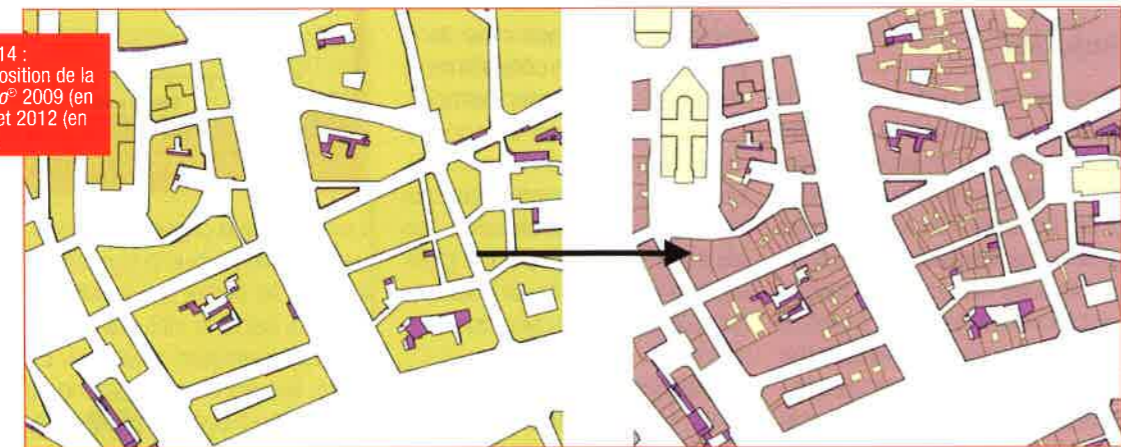


Figure 14 : Superposition de la *BD Topo*® 2009 (en jaune) et 2012 (en violet).

paramètres P, L et H à partir d'une base de données géographiques, à savoir la *BD Topo*® de l'IGN.

couche bâti. Toutefois, le modèle ne prend en compte qu'une seule hauteur en considérant qu'elle est

*largeur2*), la largeur totale correspondant à  $\text{largeur1} + \text{largeur2}$  ; la hauteur *H* du premier modèle



Figure 15 : Changement de paramètres en la méthode manuelle et la méthode automatique.

correspondrait à la moyenne des deux hauteurs soit  $(\text{hauteur1} + \text{hauteur2}) \div 2$ .

On peut dire que le nouveau modèle tranchées urbaines est constitué du quadruplet :

- Largeur à droite de la rue ;
- Largeur à gauche de la rue ;
- Hauteur des bâtiments se situant à gauche ;
- Hauteur des bâtiments se situant à droite.

Ce changement de modèle va permettre de :

- Représenter les tranchées asymétriques : tranchée bordée de bâtiments uniquement sur un côté, ou bien hauteurs de bâti différentes de chaque côté de la rue ;
- Fournir une position *a priori* indépendante de la trajectoire de référence, fixée par hypothèse sur l'arc de route.

## Algorithme de création de tranchées urbaines

L'objectif est d'extraire par un algorithme les valeurs décrites dans le paragraphe précédent,

à savoir les largeurs à gauche et à droite de l'arc, les hauteurs de bâtiment à gauche et à droite de la rue. On devra donc connaître le cap de l'arc afin d'orienter l'objet et déterminer sans ambiguïté le côté gauche ou droit d'une tranchée. On produira, pour chaque arc de la *BD Topo*®, une table « *inturb\_ville\_concernée* » (id, *largeur1*, *largeur2*, *hauteur1*, *hauteur2*, cap). Pour cela nous allons utiliser la base de données spatiale *PostGIS*.

On utilisera les fichiers *shapefile* de la *BD Topo*®, plus précisément les couches *route* et *bâti*. À chaque création de tranchée, on appliquera une zone de sélection sous *Quantum GIS*, logiciel libre. Ces extraits de bases de données seront injectés sous *PostgreSQL* grâce à l'outil *shp2pgsql* de *PostGIS*.

### Détermination des largeurs

La mesure de la distance arc - bâti riverain utilise la fonction *ST\_Distance* de *PostGIS* qui renvoie la distance (soit le minimum des distances) entre deux géométries, qu'elles soient de même nature (ponctuel, linéaire, surfacique) ou non. Il faut

donc auparavant identifier les bâtiments bordant la rue (à gauche ou à droite). Pour cela on va utiliser une zone tampon ou *buffer*.

Le *buffer* prend en entrée une géométrie et une distance donnée par l'utilisateur. Dans notre cas, on va utiliser un *half-buffer*, que l'on pourrait traduire par *zone tampon unilatérale* (ZTU) : c'est une zone tampon située uniquement d'un côté de la géométrie source.

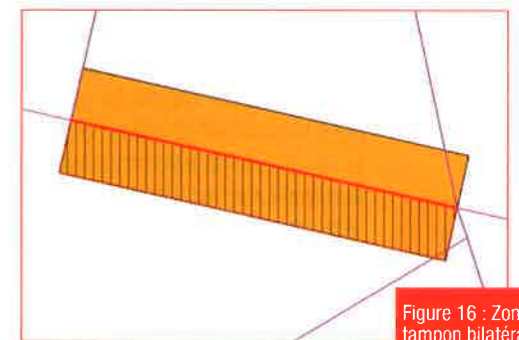


Figure 16 : Zone tampon bilatérale (en orange) et unilatérale (hachurée).

En prenant une ZTU appuyée sur l'arc de la couche route et une distance suffisamment grande entrée en paramètre, on va pouvoir identifier les bâtiments de la couche *bâti* contenus ou intersectés dans la ZTU grâce à la fonction *ST\_Intersects* (figure 17). On va alors stocker dans une table temporaire l'identifiant de chaque bâtiment trouvé ainsi

que sa distance à l'arc que l'on cherche à caractériser en « Tranchées urbaines ».

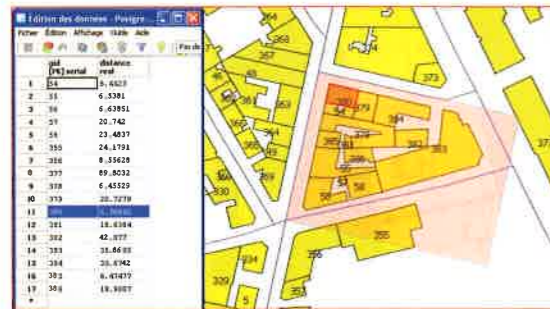


Figure 17 : Résultat de l'intersection de la ZTU (zone tampon unilatérale) avec le bâti proche.

On stocke ensuite le minimum des distances de la table temporaire dans les colonnes « largeur 1 » (pour la largeur à gauche de l'arc) et « largeur 2 » (pour la largeur à droite). Ces colonnes sont de type réel.

### Détermination des hauteurs

La couche bâti de la *BD Topo*<sup>®</sup> contient la hauteur de chaque bâtiment. On connaît également les distances entre l'arc étudié et le bâtiment le plus proche de chaque côté ; on va donc à nouveau utiliser une ZTU pour identifier les bâtiments bordant la rue. Nous allons utiliser cette fois une largeur de recherche correspondant à la largeur de côté déjà calculée à l'étape précédente (largeur 1 pour la gauche et largeur 2 pour la droite) à laquelle on ajoutera quelques mètres pour ne considérer que les bâtiments les plus proches de la rue.

On emploie une nouvelle fois la fonction *ST\_Intersects*, puis on mémorise l'identifiant du bâtiment et sa hauteur dans une table temporaire. Enfin, on calcule la moyenne des hauteurs à l'aide de la fonction *avg* de *PostgreSQL*, pour chaque côté de l'arc, qui sont enregistrées respectivement dans les colonnes « hauteur 1 » (à gauche) et « hauteur 2 » (à droite) de la table finale « *inturb\_ville\_concernée* ».

### Détermination du cap

Dernière donnée à extraire de la base de données cartographiques, le cap, est indispensable au calcul de position *a posteriori*, puisqu'il indique l'orientation de l'arc et fixe la gauche et la droite. Pour cela on utilise les fonctions *ST\_Azimuth*, qui renvoie le cap entre deux points donnés, *ST\_StartPoint* qui renvoie le point de début d'un arc et *ST\_EndPoint* qui renvoie le point de fin. On obtient alors le cap en écrivant *ST\_Azimuth (ST\_StartPoint (geom), ST\_EndPoint (geom))* où *geom* désigne la colonne géométrique (en *PostGIS 2*).

### Réglages de l'algorithme

#### Buffers

Un *buffer* doit contenir tous les points dont la distance à l'arc (dans notre cas) est inférieure ou égale à une distance spécifiée par l'utilisateur : les extrémités se trouvent donc arrondies. Or cette extrémité semi-circulaire ne se conforme pas à l'hypothèse de tranchée de longueur infinie puisqu'il peut empiéter sur des bâtiments situés en bout de rue (impasse). Il faudra donc utiliser des *buffers* strictement rectangulaires pour la recherche, obtenus en ajoutant le paramètre *flat* dans la fonction *ST\_Buffer* de *PostGIS*.

Pour obtenir la largeur de la rue, nous sommes obligés d'utiliser une distance de recherche suffisamment grande. En effet, notre cas d'étude s'applique aux villes et grandes villes (Nantes, Paris et Toulouse) où certains boulevards possèdent des emprises très importantes (allant jusqu'à 60 mètres). Par ailleurs, la

couche *route* de la *BD Topo*<sup>®</sup> représente un axe de rue à l'aide de plusieurs arcs. Si l'algorithme choisit un arc le plus proche du trottoir de droite, par exemple, il faut alors que la ZTU couvre toute la partie gauche de la rue avant d'arriver au pied des bâtiments riverains. Pour cette raison, la largeur de la ZTU est fixée à cent mètres.

Pour récupérer les bâtiments bordant un arc (calcul des hauteurs), on va appliquer une ZTU de cinq mètres le long d'une ligne décalée de la valeur *largeur1* ou *largeur2* déjà récupérées. On obtient alors les bâtiments situés à une distance équivalente à la largeur, et le *buffer* coupe également les bâtiments légèrement renforcés.

#### Échantillonnage des arcs

Les arcs de la couche *route* de la *BD Topo*<sup>®</sup> sont jalonnés de points de formes identifiant un changement de direction. Avant de procéder à l'extraction de données (*largeur1*, *largeur2*, *hauteur1*, *hauteur2*, *cap*), il faut donc procéder à un découpage des arcs en segments pour obtenir une direction uniforme tranchée par tranchée, au prix d'un nombre plus important d'éléments à stocker. Cette segmentation se réalise soit avec l'outil d'édition de *Quantum GIS*, soit avec la fonction *ST\_Dump* de *PostGIS*.

#### Moyenne des hauteurs

On l'a vu précédemment, une hauteur uniforme a été utilisée dans le calcul d'élévations critiques. Cette hauteur s'applique à tout le tronçon, à gauche comme à droite. Le passage à l'algorithme automatique fournit deux hauteurs distinctes : hauteur 1 et hauteur 2.

### Traitement en sortie et calcul de position

Une fois la récupération de données effectuée, on obtient un tableau « *inturb\_ville\_concernée* » avec les colonnes suivantes : *id*, *largeur 1*, *largeur 2*, *hauteur 1*, *hauteur 2*, *cap*. Il reste à déterminer quels tronçons sont traversés par le véhicule lors du parcours : c'est un problème de *map-matching* de la trajectoire sur les segments d'arcs de l'ensemble des tranchées urbaines.

#### Map-Matching et table complète de sortie

Suite à la campagne de mesures en milieu urbain, on dispose de points GNSS avec leurs positions *a priori*. Ces dernières sont très dispersées du fait de l'environnement très dégradé, qui provoque des erreurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres. Cela pose un problème dans la recherche d'appariement de ces points (*map-matching*) qui vise à les ramener dans la tranchée urbaine effectivement psegmentourue (et pas une autre). Le problème (complexe) du *map-matching* dépassant le cadre des présents travaux, nous allons utiliser les trajectoires de référence obtenues grâce aux données du véhicule *Vert* de l'*IFSTAR*, suffisamment précises pour permettre un appariement facile.

Le logiciel de *map-matching* part du fichier des points GNSS et du fichier des segments et produit, pour chaque point, l'identifiant du segment qui lui est associé : une première colonne donne le temps GPS du point et une seconde l'identifiant du segment. Nous convertissons ce fichier texte au format *.dbf* pour l'insérer dans *PostgreSQL* grâce à l'outil *shp2pgsql*.

Il suffit ensuite d'effectuer une jointure sur l'identifiant du segment afin d'obtenir une table de sortie complète (voir Figure 18). Elle affichera alors, pour chaque point, son temps GPS, la tranchée urbaine caractérisée et les colonnes correspondant aux attributs de la tranchée. Cette table de sortie est exportée en *.csv*, puis transformée en *.txt* pour une meilleure utilisation sous *Matlab*, logiciel utilisé pour le calcul de position par moindres carrés.

| id      | n1                   | n2               | n3               | n4               | id      | largeur1 | largeur2 | hauteur1 | hauteur2 | cap     | geom                     |
|---------|----------------------|------------------|------------------|------------------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|--------------------------|
| integer | character varying(8) | double precision | double precision | double precision | integer | real     | real     | real     | real     | real    | geometry(LineStringZM,2) |
| 1       | 1                    | 51401.40         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 2       | 2                    | 51401.40         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 3       | 3                    | 51401.40         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 4       | 4                    | 51401.40         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 5       | 5                    | 51401.40         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 6       | 6                    | 51401.40         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 7       | 7                    | 51401.40         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 8       | 8                    | 51401.60         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |
| 9       | 9                    | 51401.60         | 1                | 8777             | 3945    | 4.39348  | 3.81977  | 17.8125  | 19       | 3.37975 | 01020000E06A08000030     |

Figure 18 : Jointure sous PostgreSQL (n4: identifiant arc pour la table des points map-matched).

#### Ajustement pour les moindres carrés

La méthode des tranchées urbaines se déroule en quatre étapes (détermination de l'environnement 3D du milieu urbain, détection des satellites LOS ou nLOS, calcul de la distance additionnelle et calcul de la position). Jusqu'ici, nous ne nous sommes occupés que de la première étape de caractérisation en tranchée urbaine.

Dans la deuxième et troisième étapes, nous allons modifier les *scripts Matlab* écrits pour le modèle manuelle (avec L, H et P) en fonction du nouveau modèle (avec H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, L<sub>1</sub>, et L<sub>2</sub>). On remplace tout d'abord la valeur du cap ; on poursuit avec la modification des élévations critiques ainsi que des valeurs de distances additionnelles ; il ne faut pas omettre, au passage, d'abaisser les hauteurs de deux mètres, soit la hauteur d'antenne au-dessus à la route.

#### Artefacts

L'algorithme simple de *map-*

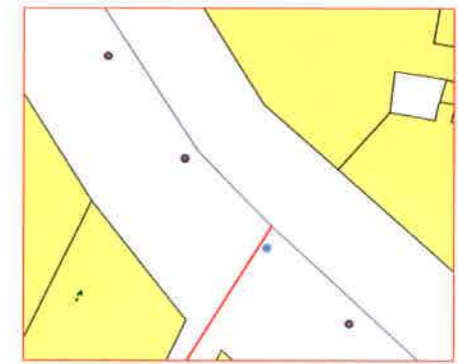


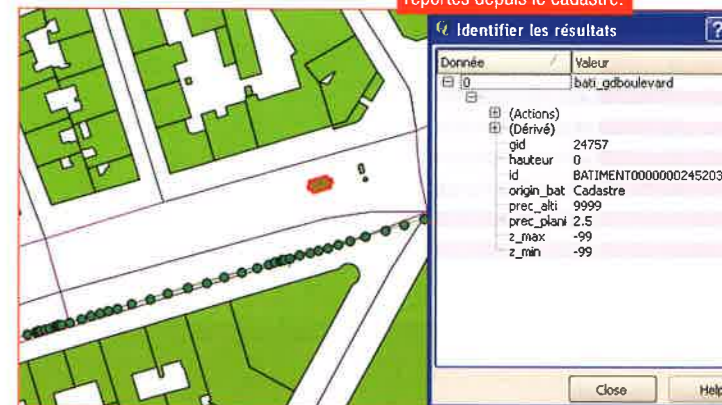
Figure 19 : Artefact de map-matching.

*matching* utilisé ne prend pas en compte certains paramètres (comme le cap). On se retrouve alors, pour certains points, avec un mauvais appariement. Typiquement, sur la figure 19, le point bleu va être associé à un arc

perpendiculaire à la voirie ; celui-ci n'aura pas les bonnes caractéristiques de tranchée, puisqu'on lui attribuera celles affiliées à l'arc en rouge.

Les artefacts de la *BD Topo*<sup>®</sup> concernent la couche *bâti*. Dans certaines zones on observe des « bâtiments », qui seraient plus apparentés à du mobilier urbain (d'origine cadastre), de hauteur nulle (puisque empruntés directement à une source cartographique ne spécifiant pas de hauteur). Sur la Figure 20, l'élément sélectionné (un kiosque) se trouve en milieu de rue ; la

Figure 20 : Artefact de la couche bâti de la BD Topo® dû à la présence de bâtiments de hauteur nulle reportés depuis le cadastre.



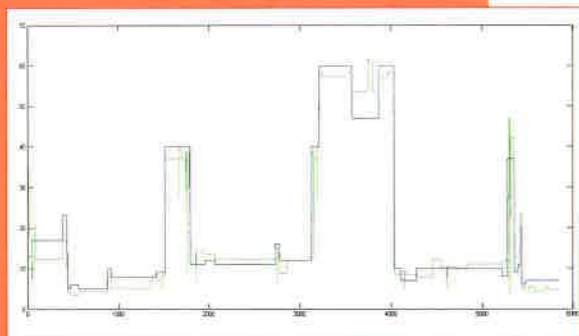


Figure 21 : Evolution de la largeur de rue (m) le long du parcours de Toulouse. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

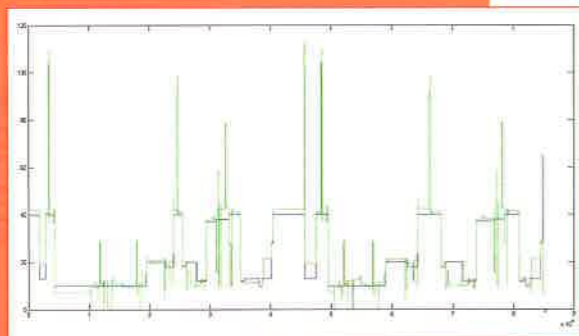


Figure 22 : Evolution de la largeur de rue (m) le long du parcours effectué dans le XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

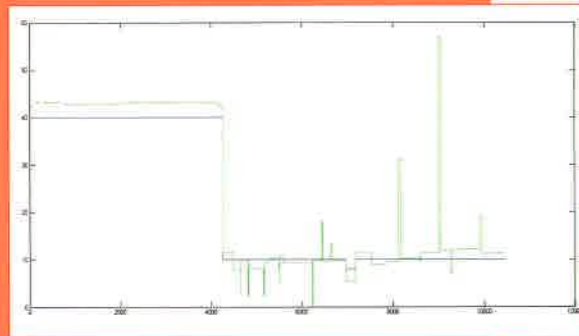


Figure 23 : Evolution de la largeur de rue (m) le long du parcours de Nantes. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

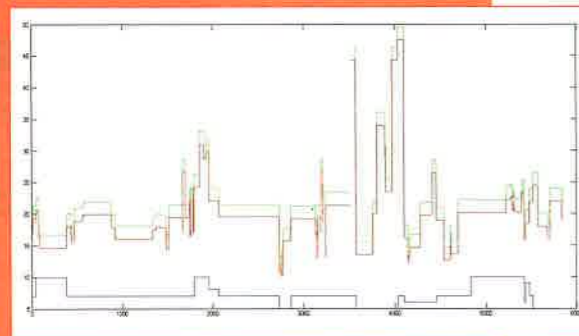


Figure 24 : Evolution de la hauteur (m) des bâtiments le long du parcours de Toulouse. En vert : mesure directe sur la couche bâti de la *BD Topo*, sans correction ; en bleu : *inturb* phase 1 ; en rouge, *inturb* phase 2.

trajectoire de référence figure en points verts. L'arc *map-matched* n'aura pas les bons attributs correspondant à une tranchée urbaine car, si d'un côté les bâtiments sont bien identifiés, de l'autre, la largeur sera trop faible et la hauteur nulle à cause de la présence du kiosque. On décide donc d'éliminer de la couche *bâti* tous les éléments dont la hauteur est nulle avant d'extraire des données de tranchée urbaine.

La couche *route* de la *BD Topo* inclut également des informations supplémentaires, comme des liens entre voies, qui sont figurés sous forme d'arcs perpendiculaires aux axes de circulation. Ces éléments linéaires seront mal caractérisés, puisqu'ils sont placés dans l'emprise de la voie et perpendiculaires à son axe. La recherche de bâti le plus proche renvoie un résultat nul, on considère donc que la visibilité s'étend à tout le ciel. On n'attendra donc aucune amélioration du calcul de navigation dans ces configurations.

### Validation des résultats

Afin de quantifier le gain de précision sur chaque point, on va comparer les erreurs obtenues par la méthode standard à celles obtenues par application du modèle des tranchées urbaines.

Deux modèles de tranchées urbaines existent désormais : le manuel (*Inturb*-Phase 1) et l'automatique (*Inturb*-Phase 2), généré à partir de la *BD Topo*. On comparera dans un premier temps les valeurs attributaires de l'environnement 3D avec celles obtenues manuellement. Puis on comparera les résultats de calculs de position obtenus avec chaque modèle.

### Comparaison attributaire

Cette première comparaison vise à vérifier l'équivalence entre un modèle créé à la main et l'autre à partir de bases de données cartographiques. Nous nous attacherons à comparer les valeurs suivantes :

- ▶ Largeur de tranchée complète ;
- ▶ Moyenne des hauteurs ;
- ▶ Position du véhicule dans la tranchée.

Dans le premier cas, cette comparaison porte sur la valeur calculée manuellement et sur la somme de largeur 1 et largeur 2. On rappelle que la première valeur est issue d'un outil de calcul de distance sous *Google Earth*. On constate que la largeur totale (de bâti gauche à bâti droit) est plutôt cohérente. Sur les trois graphes (figures 21, 22 et 23) on observe tout de même des pics témoignant d'une ouverture assez grande, qui font penser à des ronds-points par exemple. On trouve également des largeurs nulles correspondant aux artefacts présentés précédemment.

On estime donc que la recherche de bâtiments proches d'un côté et de l'autre d'un arc donne un résultat très satisfaisant malgré le problème des bâtiments singuliers : la suppression des éléments de hauteur nulle de la couche *bâti* de la *BD Topo* constitue un traitement simple à effectuer avant le calcul des largeurs.

On estime que la précision du calcul de largeur par un opérateur sous *Google Earth* se situe aux alentours du mètre, du même ordre que la *BD Topo*. L'écart entre les deux valeurs demeure la plupart du temps submétrique ou métrique. Sur la campagne Paris-Nantes, la médiane de cet

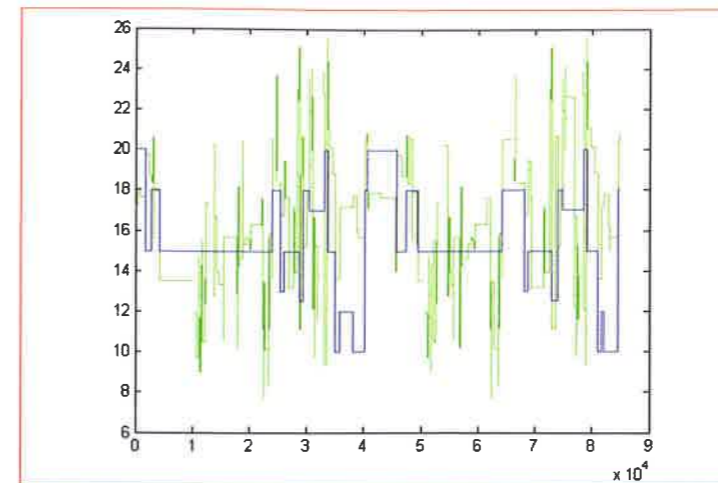


Figure 25 : Evolution de la hauteur des bâtiments le long du parcours effectué sur le XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

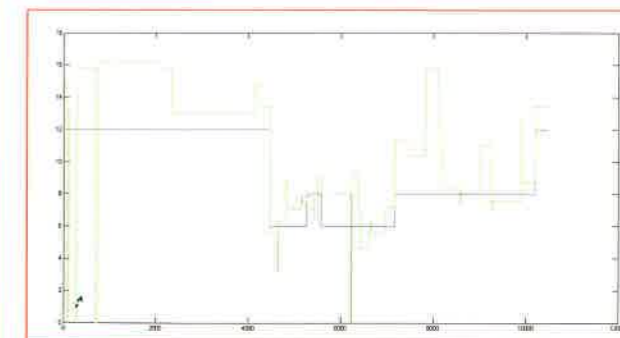


Figure 26 : Evolution de la hauteur des bâtiments le long du parcours effectué sur Nantes. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

écart vaut 1,6 m ; sur Toulouse, cette médiane ne dépasse pas - 0,7 m. 90 % des effectifs ne diffèrent pas de plus de 2,2 m de ces médianes.

Pour effectuer la comparaison de la hauteur des bâtiments, on affiche, pour chaque campagne, la hauteur calculée manuellement, en comptant 2,5 à 3 m par étage, et la moyenne des hauteurs à gauche et à droite trouvées sur la *BD Topo*.

Sur la figure 24, le graphe vert représente les hauteurs obtenues avec la caractérisation automatique. Puisque nous tenons compte de la hauteur d'antenne par rapport au sol, le graphe rouge représente alors la valeur réelle moins deux mètres. Le graphe bleu représente les valeurs de hauteurs retenues pour la phase 1 d'*Inturb*. Les autres figures ne représentent que les valeurs de hauteur retenues pour *Inturb* phases 1 et 2.

On observe que les hauteurs trouvées par la caractérisation sont bien plus élevées que celles trouvées manuellement, ou plutôt estimées. En effet, les campagnes de Paris et de Nantes révèlent un biais moyen positif de 1,6 m. La campagne de Toulouse se caractérise par une différence des hauteurs très élevée (figure 24) : les valeurs de hauteur sont quasiment doublées dans l'extraction de la *BD Topo* ; la hauteur moyenne estimée par comptage d'étages se monte à

7,2 m, alors qu'on observe un écart moyen entre *BD Topo* et méthode manuelle de 12,4 m. La dispersion des écarts sur Paris, Nantes et Toulouse tourne autour de 2,5 m environ.

La hauteur constitue un paramètre très important dans le calcul d'élévations critiques et en l'occurrence dans le calcul de

position par la méthode des tranchées urbaines. Il convient donc de valider les écarts importants trouvés lors de la caractérisation.

Enfin, la position du véhicule, estimée dans la phase manuelle de création de tranchées urbaines, varie entre 0 et 1 (0 à l'extrémité gauche, 1 pour l'extrémité droite). Nous l'estimons

### Validation des hauteurs de la *BD Topo* sur Nantes

On sait que la *BD Topo* garantit une précision métrique dans la détermination des hauteurs de bâtiment de sa couche bâti. D'après l'IGN, l'attribut hauteur correspond « à la différence entre le z le plus élevé du pourtour du bâtiment et un point situé au pied du bâtiment. La hauteur est arrondie au mètre ».

Pour vérifier l'exactitude de ces valeurs, nous nous sommes rendus sur la zone de tranchées urbaines de Nantes et avons calculé les hauteurs de bâtiment par nivellement direct. On compare donc les valeurs dans le tableau 2 :

| Nom de rue                | <i>inturb</i> -phase 1 | Couche bâti ( <i>BD Topo</i> ) | Nivellement direct (terrain) |
|---------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|                           | Hauteur uniforme (m)   | Moyenne des hauteurs (m)       | Moyenne des hauteurs (m)     |
| Fouré                     | 12                     | 15                             | 13,3                         |
| Columelle                 | 6                      | 8,2                            | 9,9                          |
| Baron                     | 6                      | 9,1                            | 8,9                          |
| Olivettes                 | 8                      | 10,5                           | 12,4                         |
| Pehant                    | 6                      | 9                              | 9,7                          |
| Monteil                   | 6                      | 9,1                            | 9,7                          |
| Crucy                     | 8                      | 12,5                           | 11,5                         |
| Fouré 2                   | 8                      | 11                             | 9,6                          |
| Cour des cinquante otages | 12                     | 17,5                           | 17                           |

Tableau 2 : Comparaison des hauteurs obtenues avec trois méthodes différentes.

On peut grâce à ces comparaisons justifier les hauteurs tirées de la *BD Topo* sur la ville de Nantes ; l'écart sur Paris étant le même, on peut aussi valider ces valeurs. Néanmoins, on ne peut comprendre la différence manifeste sur les valeurs de hauteur sur Toulouse, sauf à avancer que le calcul manuel est faux.

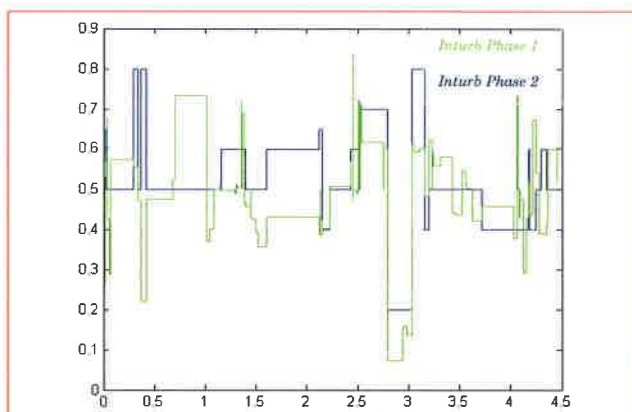


Figure 27 : Evolution de la position du véhicule le long du parcours effectué sur Toulouse. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

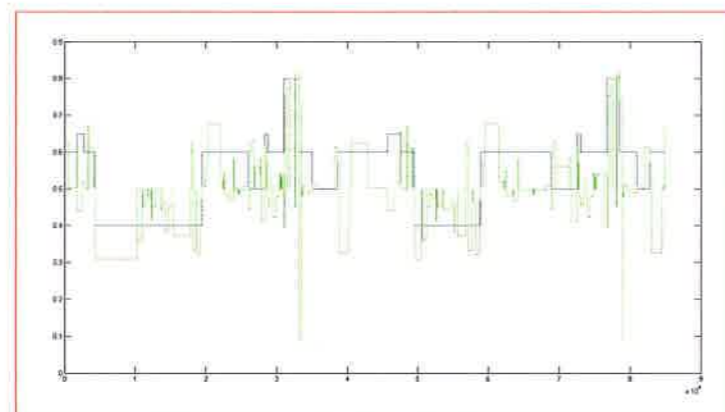


Figure 28 : Evolution de la position du véhicule le long du parcours effectué sur le XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

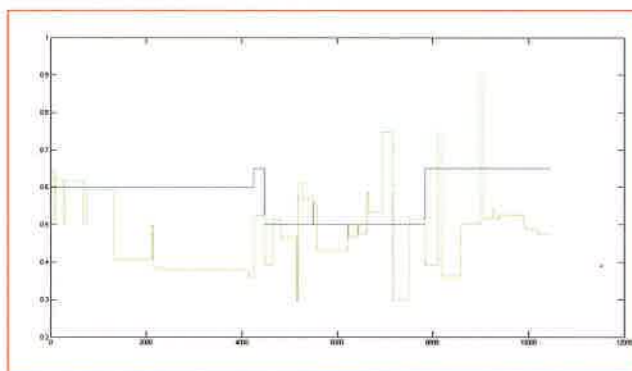


Figure 29 : Evolution de la position du véhicule le long du parcours effectué sur Nantes. En vert : *inturb* phase 1 ; en bleu : *inturb* phase 2.

dans notre modèle par la valeur :

►  $largeur\ 1 \div (largeur\ 1 + largeur\ 2)$  si le cap trouvé par la *BD Topo*<sup>®</sup> est sensiblement le même que dans le tableau modulo  $2\pi$  ;

►  $largeur\ 2 \div (largeur\ 1 + largeur\ 2)$  si le cap trouvé vaut celui fixé manuellement à  $\pi$  près.

On observe beaucoup de bruit sur le calcul de la position transversale avec la caractérisation

automatique ; les écarts sont compris généralement entre 0 et 0,3 pour les deux campagnes. Le fait de *map-matcher* affecte considérablement cette valeur, puisque l'on se cale sur les arcs présents, en l'occurrence le plus proche, alors que précédemment on généralisait beaucoup, et surtout on utilisait la trajectoire de référence. Ces écarts ont un effet sur le tri des satellites LOS/nLOS et donc potentiellement sur les résultats de navigation.

### Comparaison des résultats de position

On prend comme référence les résultats d'*Inturb* [Bétaille et al., 2013].

Pour la campagne de Paris-Nantes, on constate une légère dégradation des résultats par rapport à ceux

obtenus avec la méthode manuelle de caractérisation : on passe de 9,4 m à 10,2 m de précision 3D. Cependant, sur certains tronçons de rue, on arrive à obtenir une précision de cinq mètres, valeur jamais atteinte auparavant. Si l'on compare avec la méthode « *tous satellites* », on observe une amélioration de 66,2 % de la précision, ce qui reste tout à fait encourageant.

Pour la campagne de Toulouse, avec des hauteurs de bâtiment plus importantes en caractérisation automatique, les résultats de navigation sont meilleurs. Effectivement, on obtient une précision 3D améliorée de 1,8 m. Sur l'ensemble on atteint une amélioration de 40 % du positionnement comparée à la méthode de calcul « *tous satellites* » alors que les précédents résultats présentaient une amélioration plafonnant à 32,6 %.

| Phase d'Inturb | Méthode tous satellites |                        |                      |                       |                  | Méthode Inturb Phase 2 |                       |                        |                  |      | Amélioration en % |
|----------------|-------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------|------|-------------------|
|                | Nb d'époques            | Nb moyen de satellites | Nb époques calculées | % d'époques calculées | Précision 3D (m) | Nb d'époques calculées | % d'époques calculées | Nb moyen de satellites | Précision 3D (m) |      |                   |
| 1              | 74442                   | 7.3                    | 74288                | 99.8                  | 30.3             | 74288                  | 99.8                  | 5.1                    | 9.4              | 69   |                   |
| 2              |                         |                        |                      |                       |                  | 74288                  | 99.8                  | 5.3                    | 10.2             | 66.2 |                   |

Tableau 3 : Comparaison entre les résultats obtenus avec une caractérisation manuelle (1) et automatique (2) sur Paris et Nantes.

| Phase d'Inturb | Méthode tous satellites |                        |                      |                       |                  | Méthode Inturb Phase 2 |                       |                        |                  |      | Amélioration en % |
|----------------|-------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------|------|-------------------|
|                | Nb d'époques            | Nb moyen de satellites | Nb époques calculées | % d'époques calculées | Précision 3D (m) | Nb d'époques calculées | % d'époques calculées | Nb moyen de satellites | Précision 3D (m) |      |                   |
| 1              | 5845                    | 7.6                    | 5843                 | 100                   | 23.7             | 5843                   | 100                   | 5.7                    | 16               | 32.6 |                   |
| 2              |                         |                        |                      |                       |                  | 5843                   | 100                   | 5.4                    | 14.2             | 40   |                   |

Tableau 4 : Comparaison entre les résultats obtenus avec une caractérisation manuelle (1) et automatique (2) sur Toulouse.

Globalement, les résultats répondent aux attentes d'amélioration dans le calcul de positionnement. Les améliorations en précision 3D sont d'ailleurs d'ordre décimétrique en médiane. Mais surtout, on conserve un gain de précision équivalent à celui qui avait été obtenu en phase 1 sans recourir à la trajectoire de référence. L'hypothèse que l'on roule sur l'arc n'est, en définitive, pas si mauvaise qu'on aurait pu le penser.

### Conclusion et perspectives

Nous sommes parvenus à automatiser la création de tranchées urbaines à partir de la *BD Topo*<sup>®</sup> en utilisant une approche indépendante de la trajectoire de référence : c'est une évolution majeure par rapport à la phase 1. On positionne désormais le véhicule sur un arc de la couche *route* pour entamer le calcul géométrique des multi-trajets (on ne se sert en fait de la trajectoire de référence que pour déterminer par *map-matching* dans quelle tranchée urbaine on se situe). On peut d'ailleurs affirmer que cette hypothèse est pertinente *a posteriori* puisque les résultats obtenus concordent avec ceux de la phase 1 d'*Inturb*, voire les améliorent.

En perspective, nous pouvons citer quelques pistes de recherche et développement :

- Le calcul des distances additionnelles pour le cas des tranchées asymétriques ;
- Le positionnement *a priori* multi-hypothèses ;
- L'amélioration du positionnement *a priori* pour assurer un *map-matching* correct ;
- Le masque d'élévation caractérisé plus finement.

Une première amélioration du calcul de distance additionnelle consisterait à vérifier que le bâtiment est suffisamment élevé par rapport à celui lui faisant face pour pouvoir réfléchir le signal en multi-trajets.

L'hypothèse de position sur un arc peut être affinée : en effet la couche *route* de la *BD Topo*<sup>®</sup> donne en attribut le nombre de voies. Cette indication peut être traitée en multipliant le nombre de voies, avec des arcs décalés, ce qui compléterait la caractérisation des arcs en tranchée urbaine.

Les solutions de navigation « *tous satellites* » affichent une précision 3D dégradée, ce qui rend le *map-matching* délicat sans capteur supplémentaire ; c'est la raison pour laquelle nous utilisons la trajectoire de référence pour *map-matcher* sur les arcs. On pourrait essayer de résoudre ce problème en appliquant le modèle des tranchées urbaines dans le calcul de navigation en deux étapes : une première étape consisterait à appliquer à toutes les époques une tranchée urbaine « *typique* » valable sur une ville ou un quartier. On obtiendrait alors des solutions moins écartées de la réalité que la solution « *tous satellites* », qui serviraient ensuite dans la phase de *map-matching* pour produire un meilleur appariement. On procéderait alors à un nouveau calcul de navigation, cette fois avec les valeurs affectées à la tranchée urbaine *map-matched*. Cela constituerait une évolution importante puisqu'on n'utiliserait plus du tout la trajectoire de référence.

Enfin, le modèle de tranchée urbaine s'applique sur des voies principalement de type boulevards ou rues : il n'utilise que

des hauteurs à gauche ou à droite d'une voie, et suppose cette dernière infiniment longue. On néglige les cas où des bâtiments font face à la direction de la voie (impasses), ou ceux, en extrémité, pour lesquels le masque d'élévation est ouvert. Il faudrait étudier la création automatique d'un masque d'élévation à partir d'un SIG. Sans développer un calcul de lancer de rayons qui couvrirait tous les azimuts autour du récepteur, on pourrait s'écarter du modèle de tranchée urbaine « *infinie* » et proposer un découpage du masque d'élévation par secteurs d'azimut. |

### Bibliographie

[Peyraud et al., 2013] Peyraud, S., Bétaille, D., Renault, S., Ortiz, M., Mougel, F., Meizel, D., Peyret, F. *About non-line-of-sight satellite detection and exclusion in a 3D map-aided localization algorithm*, *Sensors* 2013, 13, p. 829-847.

[Groves et al., 2012] Groves P. D., Jiang Z., Wang L., & Ziebart M. K. (2012). *Intelligent Urban Positioning using Multi-Constellation GNSS with 3D Mapping and NLOS Signal Detection*. *Proceedings of ION GNSS 2012*.

[Ortiz et al., 2013] M. Ortiz, V. Renaudin, F. Peyret and D. Bétaille. *Using a reference vehicle for solving GNSS localization challenges*, *Inside GNSS*, juillet-août 2013, en cours de lecture.

[Bétaille et al., 2013] 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*, à paraître au vol. 5, n°3 – automne 2013.