



# IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS  
DES SCIENCES  
ET TECHNOLOGIES  
DES TRANSPORTS,  
DE L'AMÉNAGEMENT  
ET DES RÉSEAUX

## Intégrité du positionnement en environnement urbain (INTURB)

### Rapport final – v2

#### Département COSYS / Laboratoire GEOLOC

PEYRET François  
DR1  
Directeur du laboratoire GEOLOC  
Téléphone : 33 (0)2 40 84 59 40  
Télécopie : 33 (0) 2 40 84 59 98  
francois.peyret@ifsttar.fr

Date : 11 juin 2013

Auteurs : François Peyret COSYS/GEOLOC  
David Bétaille COSYS/GEOLOC  
Miguel Ortiz COSYS/GEOLOC

Nomenclature d'activité : RPS3J12506  
Référence sur Numéro de contrat\* : DGITM n° 43-2011  
Confidentialité : Confidentiel

*\* le cas échéant*

**Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) Centre de Nantes**

Route de Bouaye – CS4

44344 – Bouguenais Cedex

# SOMMAIRE

<b>Historique des versions .....</b>	<b>5</b>
<b>Documents applicables et de référence .....</b>	<b>6</b>
1.1 Documents applicables.....	6
1.2 Documents de référence .....	6
<b>Liste des Figures .....</b>	<b>7</b>
<b>Liste des Tableaux .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
1.1 Contexte .....	9
1.2 Rappel des objectifs contractuels de l'étude .....	9
1.3 Découpage en tâches.....	9
<b>2. Déroulement des tâches et principaux résultats.....</b>	<b>11</b>
2.1 Tâche 1 : Caractérisation des erreurs .....	11
2.1.1 Exécution de la 1ère campagne de mesure (tâche 1.1) .....	11
2.1.2 Calcul des erreurs sur les mesures brutes (tâche 1.2) .....	11
2.1.3 Caractérisation de l'environnement (tâche 1.3) .....	12
2.1.4 Discrimination des satellites LOS/NLOS : le « Masque de visibilité ».....	16
2.1.5 Modélisation des lois des erreurs de mesure (tâche 1.4) .....	17
2.2 Tâche 2 : Calcul du PVT.....	19
2.2.1 Estimation des trajets additionnels .....	19
2.2.2 Validation de l'estimation des trajets additionnels .....	21
2.2.3 Calcul du PVT avec la méthode « Tranchée urbaine » .....	22
2.3 Tâche 3 : Validation sur Toulouse .....	25
2.3.1 La base de données.....	25
2.3.2 Les résultats.....	26
<b>3. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>28</b>
3.1 Conclusion.....	28
3.2 Perspectives .....	28

**4. Bibliographie ..... 29**

## Historique des versions

Version	Date	Contenu/modification	Nom
1.0	10/06/13	Création	F. Peyret
2.0	11/06/13	Relecture, validation et compléments	D. Bétaille

# Documents applicables et de référence

## 1.1 Documents applicables

- [DA1] *Etude de l'intégrité du positionnement en environnement urbain*, Convention MEEDDM/DGITM/SAGS/MT avec le LCPC n° 43-2011 – 17 octobre 2011
- [DA2] *Etude de l'intégrité du positionnement en environnement urbain*, Contrat de prestation Ifsttar – SCM, n° 2011 NCT 25.

## 1.2 Documents de référence

- [DR1] *Etude de l'intégrité du positionnement GPS en milieu urbain* – Rapport de stage ECN – août 2011 – Katinka MIRK, François Peyret, David Bétaille
- [DR2] INTURB – *Base de données des erreurs vraies calculées suite à la 1ère campagne* – Livrable L1 – mars 2012 – Miguel Ortiz – Ifsttar ([INTURB\\_Tache12\\_v1.1\\_fp.odt](#))
- [DR3] INTURB – *Caractérisation de l'environnement urbain et identification des lois des erreurs de mesures* – Livrable L2 – Livrable n°2 adressé à l'IFSTTAR – octobre 2012 – Leila Fontenay et Stéphane Miquel – SCM ([SCM\\_IFSTTAR\\_Livrable2\\_2012\\_10\\_05.docx](#))
- [DR4] INTURB – *Mise en place de la « Urbana Trench Method »* – Livrable L3(1) – Livrable n°3 adressé à l'IFSTTAR – octobre 2012 – Leila Fontenay et Stéphane Miquel – SCM ([SCM\\_IFSTTAR\\_Livrable3\\_2012\\_10\\_05.docx](#))
- [DR5] INTURB – *Guide méthodologique* – Livrable L3(2) – Livrable n°4 adressé à l'IFSTTAR – octobre 2012 – Leila Fontenay et Stéphane Miquel – SCM ([SCM\\_IFSTTAR\\_Livrable4\\_2012\\_10\\_05.docx](#))
- [DR6] INTURB – *Validation de la « Urban Trench Method »* – Livrable L5 – Livrable n°5 adressé à l'IFSTTAR – octobre 2012 – Leila Fontenay et Stéphane Miquel – SCM ([SCM\\_IFSTTAR\\_Livrable5\\_2012\\_10\\_05.docx](#))
- [DR7] INTURB – *Résumé opérationnel* – Livrable L6(1) – Livrable n°6 adressé à l'IFSTTAR – octobre 2012 – Leila Fontenay et Stéphane Miquel – SCM ([SCM\\_IFSTTAR\\_Livrable6\\_2012\\_10\\_05.docx](#))

## Liste des Figures

Figure 1 : Rappel des tâches contractuelles .....	10
Figure 2 : Rappel du planning et des livrables.....	10
Figure 3 : Véhicule d'Essais et de Référence en Trajectographie (VERT) .....	11
Figure 4 : Principe des traitements effectués pour calculer les erreurs dus aux trajets multiples .....	12
Figure 5 : Vision 3D du parcours de la campagne « Paris Grands Boulevards » .....	13
Figure 6 : Exemple d'une rue de type 1.....	14
Figure 7 : Exemple d'une rue de type 5.....	14
Figure 8 : Les 3 paramètres de caractérisation des rues : L, H et P.....	15
Figure 9 : Exemple de masque de visibilité pour une configuration urbaine de type 65 .....	16
Figure 10 : Exemple de lois de probabilité des erreurs sur les mesures brutes LOS pour la configuration 54 .....	18
Figure 11 : Exemple de lois de probabilité des erreurs sur les mesures brutes NLOS pour la configuration 54 ....	18
Figure 12 : Illustrations des réflexions simples, doubles ou triples le long des parois de la tranchée .....	20
Figure 13 : Distance additionnelle dans le cas d'une seule réflexion.....	20
Figure 14 : Distance additionnelle dans le cas d'une seule réflexion.....	21
Figure 15 : Représentation graphique de la validation du calcul de distance additionnelle .....	22
Figure 16 : Amélioration de la fonction de répartition de l'erreur apportée par la méthode « Tranchée urbaine » sur Paris et Nantes .....	24
Figure 17 : Amélioration de la fonction de répartition de l'erreur apportée par la méthode « Tranchée urbaine » sur Toulouse.....	27

## Liste des Tableaux

Tableau 1 - Description des sessions réalisées durant les campagnes de mesures.....	13
Tableau 2 – Classification des rues suivant leurs caractéristiques géométriques intrinsèques .....	14
Tableau 3 – Répartition des classes de rue dans la base de données .....	14
Tableau 4 - Classes de position du récepteur dans l'axe de la rue .....	15
Tableau 5 - Répartition des classes de configurations urbaines.....	15
Tableau 6 - Répartition des satellites LOS et NLOS pour les différentes classes de rues .....	17
Tableau 7 – Indicateurs statistiques des erreurs sur les mesures classées LOS pour la configuration 54 .....	17
Tableau 8 – Indicateurs statistiques des erreurs sur les mesures classées NLOS pour la configuration 54 .....	18
Tableau 9 – Indicateurs statistiques des erreurs sur les pseudo-distances LOS et NLOS pour toutes les configurations .....	19
Tableau 10 – Résultats de la stratégie simplifiée "LOS only" de la méthode Tranchée urbaine .....	23
Tableau 11 – Résultats de la stratégie complète de la méthode Tranchée urbaine sur Paris et Nantes .....	24
Tableau 12 – Description et répartition des classes de rue dans la base de données de Toulouse .....	25
Tableau 13 – Classes de position du récepteur sur Toulouse.....	26
Tableau 14 – Les 17 configurations urbaines sur Toulouse.....	26
Tableau 15 – Résultats de la stratégie complète de la méthode Tranchée urbaine sur Toulouse.....	27
Tableau 16 – Synthèse des résultats sur Paris, Nantes et Toulouse .....	28

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte

L'étude INTURB se place dans le contexte de l'utilisation croissante des GNSS dans les services réglementaires de transport routier, tels les systèmes de taxation écologique du type de l'Eco-Taxe Poids Lourds nationale. Pour ces nouveaux services, qui exploitent un terminal de positionnement GNSS embarqué dans les véhicules, la qualité du service de positionnement est essentielle, en particulier l'intégrité, qui permet de garantir un niveau de performance avec un risque chiffré. Ce besoin d'intégrité se fera de plus en plus prégnant étant donné que ce type de services est appelé à se développer dans des environnements urbains, où la qualité de service GNSS est plus difficile à garantir.

Il a donc été proposé à la DGITM, qui abrite la Mission Tarification en charge de la mise en œuvre du système Eco-Taxe PL nationale ainsi que la Mission des Transports Intelligents, qui s'intéresse également à la problématique du géopositionnement en milieu urbain pour les applications de mobilité intermodale, de mener une étude sur l'amélioration des performances de positionnement en milieu urbain par l'exploitation de la connaissance de l'environnement. Cette étude a été menée en partenariat entre l'Ifsttar et la SCM, qui agissait en tant que sous-traitant de l'Ifsttar, en charge des aspects de modélisation probabiliste.

Le présent rapport n'apporte aucun résultat supplémentaire par rapport à ceux qui sont présentés dans les livrables listés dans les documents de référence, mais en constitue une synthèse.

## 1.2 Rappel des objectifs contractuels de l'étude

L'objectif principal se définit comme suit :

**Développement de méthodes d'estimation probabiliste de la position (position 2D des véhicules ou des personnes en milieu urbain) et d'un majorant de l'erreur associée, basées sur la connaissance (a priori et en temps réel) des erreurs de mesure commises par le récepteur.**

Méthodologie : étude s'appuyant sur des données réelles et l'utilisation d'outils spécifiques (trajectomètre de référence + modélisation simplifiée de l'environnement 3D + calculs) permettant de connaître les erreurs vraies commises sur les mesures brutes (pseudo-distances et Dopplers<sup>1</sup>) et sur la position calculée.

L'originalité de l'étude se situe au niveau de la modélisation simplifiée de l'environnement 3D et de l'exploitation de cette modélisation pour caractériser les mesures brutes reçues par le récepteur et ainsi optimiser le calcul de position effectué à partir de ces mesures. Cette approche fait suite à des premiers travaux qui ont été menés par l'Ifsttar dans le cadre du projet ANR CityVIP [Peyraud et al., 2013], qui exploitaient des modèles 3D précis détaillés embarqués dans un SIG dédié et une méthode de caméra virtuelle, et un stage étudiant [DR1] qui avait jeté les bases d'une méthode plus légère exploitant une modélisation simple des rues et qui a servi de point de départ à la présente étude.

## 1.3 Découpage en tâches

La Figure 1 ci-dessous récapitule les tâches contractuelles prévues lors de l'établissement de la convention.

Au cours de l'étude, comme cela sera précisé plus bas, le programme initial a été légèrement modifié de façon à mieux exploiter les résultats obtenus lors de la première campagne de mesure. Ceci s'est traduit par un approfondissement des sous-tâches 1.2 et 1.3 au dépend de l'abandon des sous-tâches 3.1 et 4.1, qui ont été programmées dans une seconde phase de l'étude, et une réallocation de la tâche 1.3 à la SCM du fait de la forte interdépendance entre les tâches 1.3 et 1.4.

---

<sup>1</sup> La pseudo-distance est la distance antenne récepteur – satellite biaisée par une erreur importante due au décalage d'horloge récepteur. Le Doppler est la mesure du décalage entre la fréquence du signal reçu et la fréquence nominale du signal, proportionnel à la vitesse de rapprochement ou d'éloignement du satellite sur l'axe antenne récepteur – satellite.

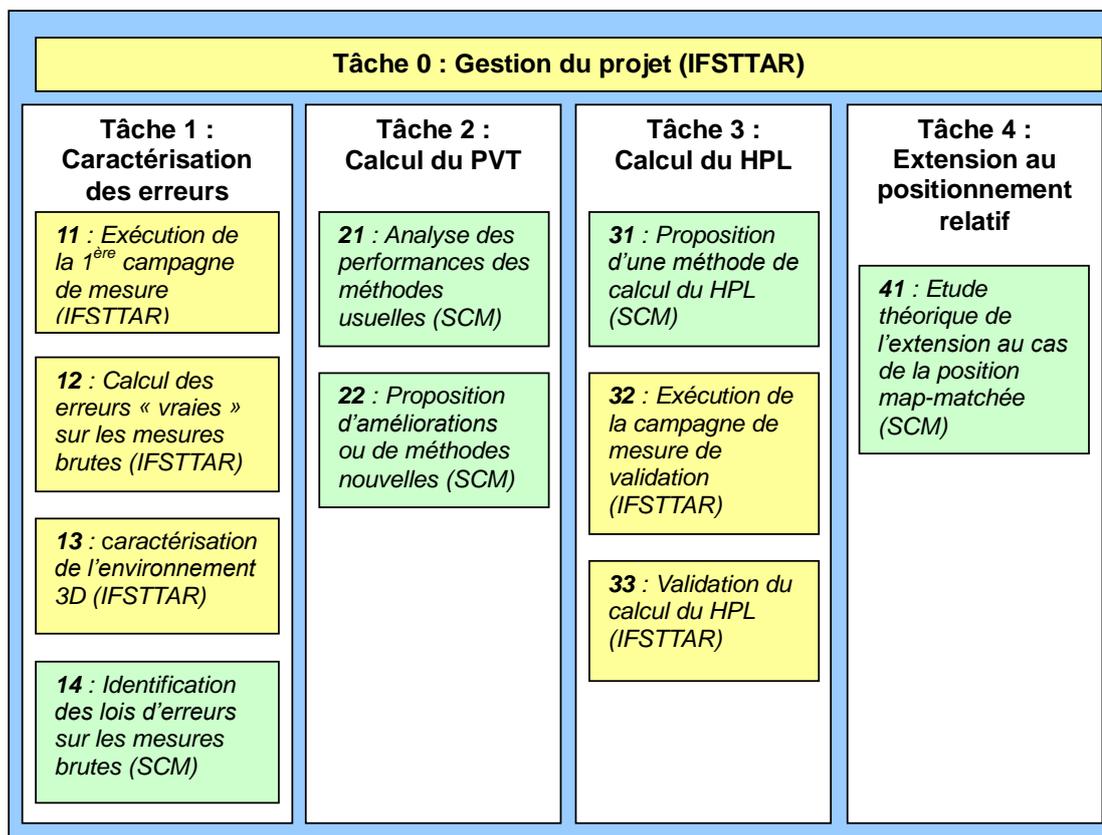


Figure 1 : Rappel des tâches contractuelles

La Figure 2 présente le planning envisagé au démarrage de l'exécution de la convention, ainsi que les livrables prévus à l'issue des tâches principales.

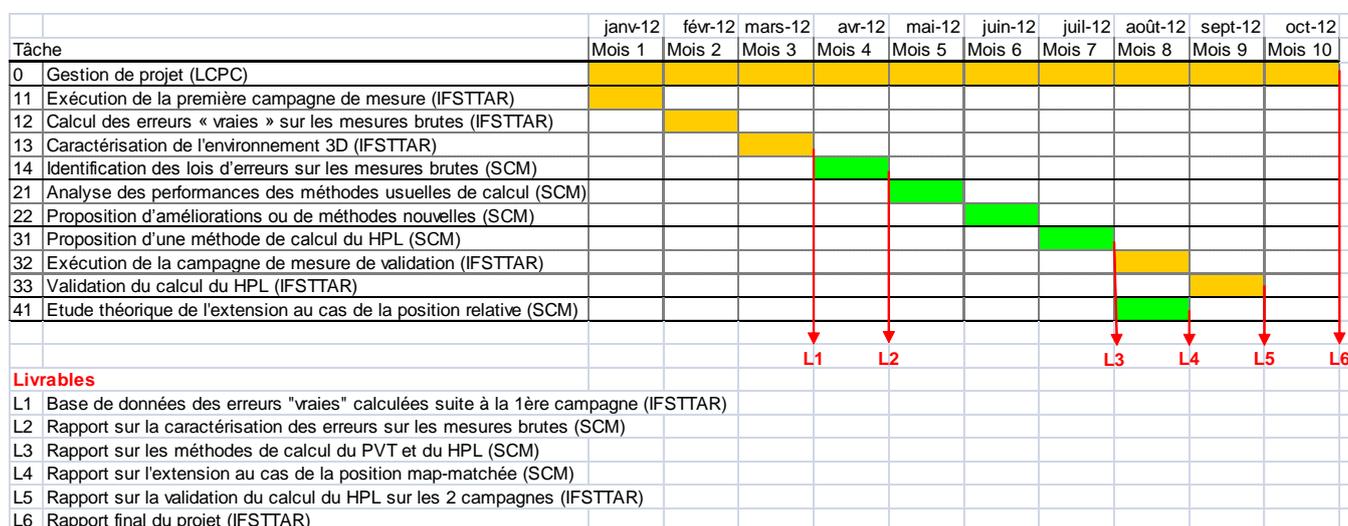


Figure 2 : Rappel du planning et des livrables

Par rapport aux produits prévus au début du projet, une seule modification, discutée et agréée par le client, a été apportée : le Livrable L4 a été remplacé par un deuxième document faisant partie du Livrable L3.

## 2. Déroulement des tâches et principaux résultats

### 2.1 Tâche 1 : Caractérisation des erreurs

#### 2.1.1 Exécution de la 1ère campagne de mesure (tâche 1.1)

Cette campagne s'est déroulée sur 2 sites :

- sur Nantes le 30 janvier 2012,
- sur Paris les 21, 22 et 23 février 2012.

L'objectif de ces campagnes était d'acquérir les signaux bruts (pseudo-distances et Dopplers) de 2 récepteurs **GNSS** : un ublox-LEA-6T (capteur bas coût) et un Novatel-DLV3 (capteur haut de gamme).

Les données brutes du récepteur ublox ont également été post-traitées par le logiciel NavProc (de l'entreprise M3 Systems) afin de leur appliquer les corrections EGNOS correspondantes à leur instant de mesures. Par la suite, les mesures brutes corrigées par EGNOS n'ont pas été utilisées car, après analyse, elles n'apportaient pas de changement significatif par rapport aux mesures GPS seul.

Pour pouvoir déterminer les erreurs locales dues à l'environnement proche sur les données brutes, une référence est nécessaire. Le calcul des pseudo-ranges de référence et des Dopplers de référence est rendu possible grâce au MRT<sup>2</sup> embarqué à bord du VERT<sup>3</sup>. Le MRT est composé d'une centrale inertielle haut de gamme LandINS de marque iXSea associé à un récepteur haut de gamme DLV3 de marque Novatel [Ortiz et al., 2013].



Figure 3 : Véhicule d'Essais et de Référence en Trajectographie (VERT)

#### 2.1.2 Calcul des erreurs sur les mesures brutes (tâche 1.2)

La matière qui a été utilisée dans toute la suite de l'étude était constituée des erreurs calculées sur les pseudo-distances et sur les Dopplers, à partir d'une estimation des pseudo-distances vraies et Dopplers vrais obtenu grâce aux données de la trajectoire de référence.

Le principe général (très simplifié) en est le suivant, pour chaque époque de mesure et pour chaque satellite utilisé par le récepteur (exemple de la pseudo-distance) :

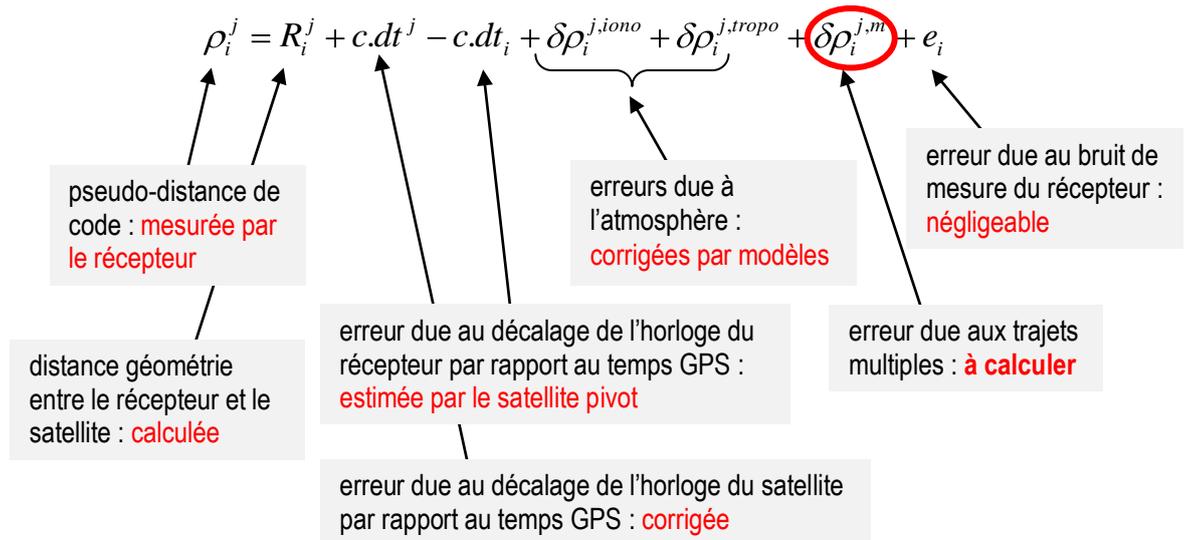
1 – calcul de la distance « vraie » antenne récepteur – satellite à partir de la position du satellite fournie par le récepteur et de la position vraie de l'antenne récepteur calculée par le MRT,

<sup>2</sup> MRT : système de Mesure de Référence en Trajectographie

<sup>3</sup> VERT : Véhicule d'Essai et de Référence en Trajectographie

- 2 – calcul des corrections atmosphériques et horloges satellites, à partir des modèles standard,
- 3 – soustraction de la distance « vraie » et des corrections atmosphériques à la mesure de pseudo-distance, de façon à obtenir une erreur résiduelle composée : des erreurs dues au bruit de mesure, des erreurs dues aux trajets multiples (ce qui nous intéresse pour l'étude) et de l'erreur due au décalage d'horloge entre le temps GPS et le temps de l'horloge du récepteur,
- 4 – estimation du terme de décalage d'horloge par l'erreur résiduelle observée pour le satellite le plus proche du zénith, très peu affecté par les trajets multiples,
- 5 – soustraction du terme d'horloge aux mesures corrigées de façon à ne conserver que l'erreur due aux trajets multiples (au bruit de mesure près).

La Figure ci-dessous, construite à partir du modèle standard de mesure des pseudo-distances « de code », schématise ces traitements :



**Figure 4 : Principe des traitements effectués pour calculer les erreurs dus aux trajets multiples**

A partir de ces traitements, des matrices Matlab ont été constituées, contenant entre autres les erreurs sur les pseudo-distances et les Dopplers, et ont été transmises à la SCM pour traitement.

Le détail des traitements et la visualisation des résultats sont détaillés dans le document de référence [DR2].

Le Tableau 1 ci-après décrit les caractéristiques spatio-temporelles des sessions qui ont été réalisées et post-traitées par l'Ifsttar pendant les 2 campagnes de mesure.

### 2.1.3 Caractérisation de l'environnement (tâche 1.3)

Cette tâche a été menée en parallèle avec la tâche 1.4 par la SCM, à partir des données livrées par l'Ifsttar correspondantes aux sessions décrites dans le Tableau 1.

L'objectif de cette tâche était, comme cela avait été suggéré à la fin du stage de Katinka Mirk, de caractériser de façon simple la configuration géométrique du véhicule dans la rue afin de pouvoir analyser les mesures délivrées par le récepteur à travers cette caractérisation.

Les rues parcourues « physiquement » par le véhicule de mesure ont été parcourues « virtuellement » à l'aide du logiciel Google Earth. Les tronçons de rue ayant des contraintes urbaines homogènes ont été identifiés et un certain nombre de caractéristiques ont été relevées pour chacun des tronçons homogènes identifiés. Globalement, environ 30% de toutes les données acquises dans les 2 campagnes se sont avérées exploitables, au sens où elles concernaient des tronçons de rues homogènes.

Parmi ces caractéristiques se trouvaient en particulier : la hauteur moyenne des bâtiments bordant le tronçon (H), la largeur moyenne du tronçon (L) et l'angle d'élévation calculé au milieu de la rue ( $\alpha = \text{Arctg}(H/(L/2))$ ), qui est en fait une résultante des deux précédentes.

La Figure 5 ci-dessous donne un exemple de vision 3D permettant de procéder à cette collecte de données. Les points verts représentent les positions de la trajectoire de référence importés dans Google Earth.

Numéro de la session de la campagne de mesure	Description de la campagne			
	Lieu	Date	Temps de début de session	Temps de fin de session
1	Paris Grands Boulevards	21-févr.-12	50583 (15h03min03s)	60476 (17h47min56s)
2	Paris Grands Boulevards	22-févr.-12	26402 (08h20min01s)	38511 (11h41min50s)
3	Paris XII <sup>ème</sup>	22-févr.-12	42985 (12h56min25s)	50065 (14h54min25s)
4	Paris XII <sup>ème</sup>	23-févr.-12	26786 (08h26min26s)	34293 (10h31min33s)
5	Paris La Défense	22-févr.-12	50366 (14h59min26s)	55930 (16h32min10s)
6	Paris La Défense	23-févr.-12	34615 (10h36min55s)	39617 (12h00min17s)
7	Nantes	30-janv.-12	37889 (11h31min28s)	42386 (12h46min26s)

**Tableau 1 - Description des sessions réalisées durant les campagnes de mesures**



**Figure 5 : Vision 3D du parcours de la campagne « Paris Grands Boulevards »**

Les tronçons homogènes ont ensuite été classés en fonction des valeurs prises par leurs 3 paramètres caractéristiques H, L et  $\alpha$  (indicateur de contrainte urbaine).

Le Tableau 2 ci-dessous décrit les 7 classes de rues ainsi identifiées.

Le Tableau 3 indique la répartition des mesures qui ont été exploitées dans les différentes classes. On peut ainsi s'apercevoir que ce sont les classes « Avenues », « Grandes avenues » et « Petites rues avec moyens immeubles » qui concentrent la majorité des données.

Cela signifie que les résultats qui vont être obtenus pour ces types de rues seront statistiquement plus significatifs que pour les autres types.

<i>Types de rue</i>		<i>Hauteur des bâtiments (m)</i>	<i>Largeur des rues (m)</i>	<i>Indicateur de contrainte urbaine (en degré)</i>
<i>Classes</i>	<i>Description</i>			
<b>1</b>	Très petite rue et grand immeuble	20	8	80
<b>2</b>	Petite rue et petit immeuble	6-10	8-13	50-60
<b>3</b>	Petite rue et moyen immeuble	12-17	10-13	62-72
<b>4</b>	Moyenne rue et moyen immeuble	13-20	15-20	55-70
<b>5</b>	Avenue	15-20	30-35	45-55
<b>6</b>	Grande avenue	12-20	38-40	45
<b>7</b>	Voie très large	18-20	65	18-20

**Tableau 2 – Classification des rues suivant leurs caractéristiques géométriques intrinsèques**

Les Figures 6 et 7 illustrent des exemples du type 1 et 6.



**Figure 6 : Exemple d'une rue de type 1**



**Figure 7 : Exemple d'une rue de type 5**

<i>Classes de rue</i>	<i>Nombre de mesures</i>	<i>Pourcentage de mesures</i>
<b>1</b>	2 430	3%
<b>2</b>	1 685	2,4%
<b>3</b>	<b>7 824</b>	<b>11,3%</b>
<b>4</b>	2 990	4%
<b>5</b>	<b>36 140</b>	<b>48,1%</b>
<b>6</b>	<b>18 955</b>	<b>26%</b>
<b>7</b>	4 170	6,2%
<b>Total</b>	<b>74 194</b>	<b>100%</b>

**Tableau 3 – Répartition des classes de rue dans la base de données**

Ensuite, une classification plus fine tenant compte de la position relative du véhicule (plus précisément de l'antenne du récepteur embarqué) sur la voie a été faite. Il a été introduit le paramètre P représentant cette position relative, comme cela est illustré sur la Figure 8 représentant le triplet de paramètres retenu pour caractériser la configuration du véhicule dans son environnement proche.

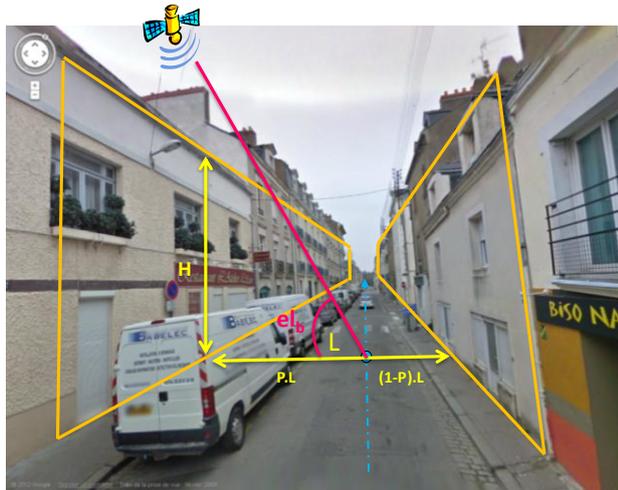


Figure 8 : Les 3 paramètres de caractérisation des rues : L, H et P

Les valeurs pouvant être prises par P sont indiquées dans le tableau suivant :

<b>Types de position relative du récepteur</b>		
<b>Classes</b>	<b>Valeurs</b>	<b>Description</b>
<b>1</b>	0,4	Sens unique
<b>2</b>	0,5	Sens unique
<b>3</b>	0,6	Double sens
<b>4</b>	0,65	Double sens large
<b>5</b>	0,8	Plusieurs voies terre-plein central
<b>6</b>	0,9	Plusieurs voies et allée centrale

Tableau 4 - Classes de position du récepteur dans l'axe de la rue

<b>Classes de configuration urbaine</b>	<b>Nombre de mesures</b>	<b>Pourcentage de mesures</b>
14	2 430	3%
22	900	1%
23	460	1%
24	325	0,4%
31	3 400	5%
32	3 564	5%
33	245	0,3%
34	615	1%
42	955	1%
43	1 490	2%
44	545	1%
52	<b>18 810</b>	<b>25%</b>
53	100	0,1%
54	<b>17 230</b>	<b>23%</b>
63	3 500	5%
65	<b>15 455</b>	<b>21%</b>
73	3 415	5%
76	755	1%
<b>Total</b>	<b>74 194</b>	<b>100%</b>

Tableau 5 - Répartition des classes de configurations urbaines

Finalement, les 7 classes de rues du Tableau 2 ont été raffinées en 18 classes de « configurations urbaines » prenant en compte la géométrie de la rue et de la position relative du récepteur. La répartition des mesures sur ces 18 classes est indiquée dans le Tableau 5 ci-dessus. On peut voir que les classes 52, 54 et 65 regroupent près des  $\frac{3}{4}$  des données.

## 2.1.4 Discrimination des satellites LOS/NLOS : le « Masque de visibilité »

L'étape suivante consistait à utiliser cette classification pour trier les mesures du récepteur entre les mesures provenant de satellites en vue directe (LOS = Line Of Sight) et les mesures provenant de satellites masqués (NLOS = Non Line Of Sight).

Pour ce faire, chaque tronçon de rue homogène appartenant à l'une des 18 classes de configuration a été modélisé par le modèle dit « de tranchée urbaine », illustré par la Figure 8.

Chaque tronçon a été modélisé par une tranchée ouverte de longueur infinie, de largeur L et de profondeur H, le récepteur se trouvant à 2 mètres du fond de la tranchée (sur le toit du véhicule), à la position P.

Ce modèle a ensuite été positionné par rapport à la géométrie des satellites (accessible dans les données de navigation acquises par le récepteur) dans un référentiel appelé *Sky plot* représentant les angles d'azimut (par rapport au Nord) et d'élévation (par rapport à l'horizontale) des satellites visibles à l'instant de la mesure. Pour positionner la tranchée, il est nécessaire de connaître l'angle d'azimut du tronçon, encore appelé « angle de cap de la rue ». Pour simplifier les représentations, toutes les rues ont été orientées vers le nord et les angles d'azimut des satellites ont été traduits d'une valeur égale à :  $(az - cap)$  (az : angle d'azimut du satellite et cap : angle de cap de la rue).

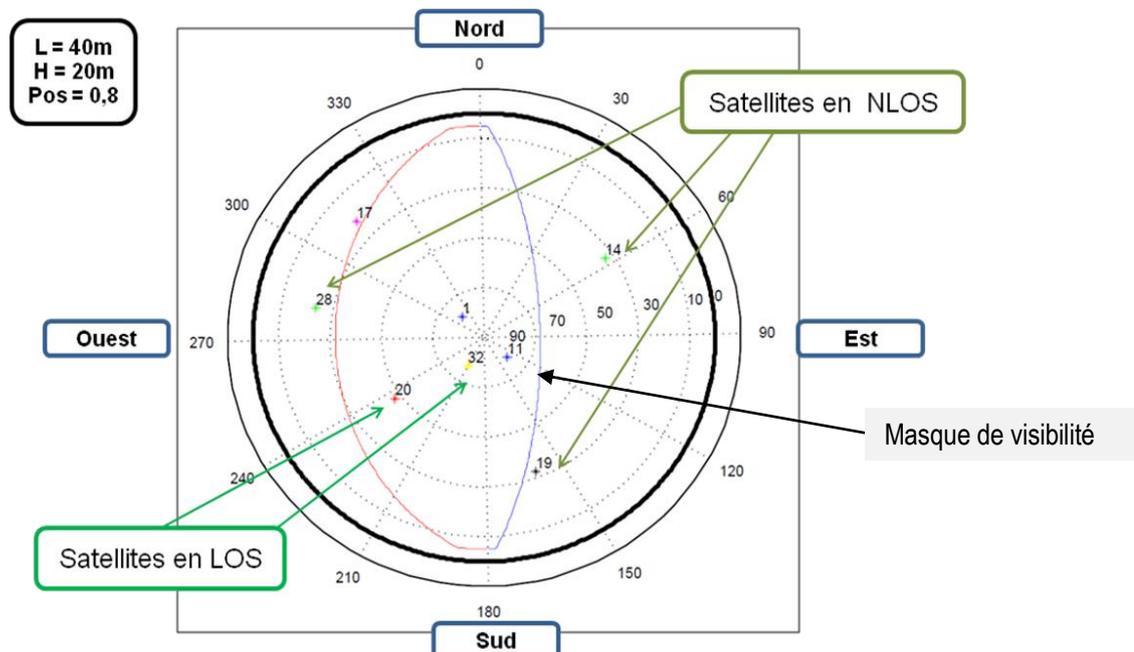
Ensuite, il a fallu représenter les parois de la tranchée sur le *Sky plot*. Pour ce faire, il est nécessaire de calculer pour chaque angle d'azimut l'angle d'élévation des bâtiments  $el_b$ , tel que représenté sur la Figure 8. Les satellites dont l'angle d'élévation est inférieur à cet angle sont considérés comme NLOS.

Les 2 formules [1] et [2] ci-dessous donnent, respectivement pour le côté gauche et le côté droit de la rue, la valeur de cet angle en fonction de l'azimut relatif  $(az - cap)$ .

$$el_b = \arctg \left| \frac{H}{P.L} \sin(az - cap) \right| \quad [1] \qquad el_b = \arctg \left| \frac{H}{(1-P).L} \sin(az - cap) \right| \quad [2]$$

Dans le plan azimut-élévation du *Sky plot*, ces 2 équations sont représentées par 2 courbes limites en forme de « ballon de rugby » plus ou moins déformé, formant ce qu'on appelle le « masque de visibilité ».

La Figure 9 illustre un de ces masques de visibilité pour une configuration urbaine de type 65.



**Figure 9 : Exemple de masque de visibilité pour une configuration urbaine de type 65**

L'interprétation de la méthode de tri proposée est très simple dans le *Sky plot* : les satellites positionnés à l'intérieur du masque de visibilité sont considérés en LOS et ceux à l'extérieur en NLOS.

Après application des masques de visibilité correspondant aux configurations urbaines, pour chaque époque de mesure, les mesures brutes ont été triées en LOS et NLOS.

Pour toutes les données confondues, le tableau suivant donne le pourcentage des satellites triés en LOS ou NLOS pour chaque classe de rue. On remarque que le pourcentage des NLOS peut être très important pour les premières classes mais décroît globalement (et logiquement) quand la largeur des rues croît.

<i>Types de rue</i>		<i>% de satellites en LOS</i>	<i>% de satellites en NLOS</i>
<i>Classes</i>	<i>Description</i>		
<b>1</b>	Très petite rue et grand immeuble	44 %	56 %
<b>2</b>	Petite rue et petit immeuble	60 %	40 %
<b>3</b>	Petite rue et moyen immeuble	39 %	61 %
<b>4</b>	Moyenne rue et moyen immeuble	63 %	37 %
<b>5</b>	Avenue	63 %	37 %
<b>6</b>	Grande avenue	68 %	32 %
<b>7</b>	Voie très large	89 %	11 %

**Tableau 6 - Répartition des satellites LOS et NLOS pour les différentes classes de rues**

### 2.1.5 Modélisation des lois des erreurs de mesure (tâche 1.4)

La dernière étape a été de modéliser les erreurs sur les pseudo-distances et sur les Dopplers en fonction de leur caractère supposé LOS ou NLOS. Cette modélisation statistique a été faite pour chacune des 18 classes de configuration urbaine et toutes classes confondues, sous la forme d'histogrammes et de calcul des quantiles à 0 (min), 2.5, 5, 50 (médiane), 95, 97.5 et 100 % (max).

Le Tableau 7 ci-dessous donne un exemple de résultat pour les satellites LOS et la configuration 54 (L = 30 m, H = 20 m, P = 0,65). On peut remarquer que les indicateurs Moyenne et Ecart type ne sont pas robustes à cause des valeurs aberrantes qui n'ont pas été filtrées. En revanche, l'indicateur Médiane (Q50) est robuste et a été choisi pour le reste de l'étude.

	<b>Quantiles des erreurs des pseudo-distances (en m) et des Dopplers (en Hertz)</b>					<b>Dispersion Q5-Q95</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart type</b>
	<b>2,5</b>	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>95</b>	<b>97,5</b>			
<b>Pseudo distances</b>	-4,1	-3,3	<b>0,5</b>	8,6	13,5	11,9	-1464,6	49892,5
<b>Dopplers</b>	-2,8	-1,8	<b>0,0</b>	1,9	2,9	3,7	0,1	3,0

**Tableau 7 – Indicateurs statistiques des erreurs sur les mesures classées LOS pour la configuration 54**

La Figure 10 présente les histogrammes correspondants au tableau ci-dessus, respectivement pour les pseudo-distances et les Dopplers, entre les quantiles Q5 et Q95. On peut remarquer que la distribution des erreurs s'apparente à une distribution gaussienne normale.

Pour la même configuration, le tableau 8 et la Figure 11 donnent respectivement pour la même configuration urbaine les indicateurs statistiques et les lois d'erreurs pour la population des mesures cataloguées en NLOS par la méthode de tri. On peut vérifier que la distribution des erreurs de pseudo-distances de la population classée en NLOS est très différente de celle classée en LOS, avec une médiane de l'ordre de 16 m, une queue de distribution allant au-delà de 60 m et la présence de plusieurs modes. Cette signature est tout à fait conforme à celle qu'on est en droit d'attendre de mesures correspondantes à des signaux NLOS ; les pseudo-distances NLOS se caractérisant toujours par une erreur positive présentant des modes correspondants aux nombres de réflexions.

Le mode centré sur zéro, qui ne devrait pas apparaître pour des mesures normalement systématiquement décentrées vers les valeurs positives, représentent la population des mesures provenant de satellites en LOS qui ont été classés à tort en NLOS par la méthode de tri. Ces classements à tort proviennent du fait que les tronçons (en l'occurrence ceux classés dans la configuration 54) ne sont jamais parfaitement homogènes et qu'il existe de nombreux « trous » entre les immeubles autorisant le passage de signaux directs, injustement classés NLOS par le masque de visibilité du tronçon.

On remarque également sur ces courbes de la Figure 11 que les mesures Dopplers sont relativement très peu affectées par les effets de réflexions multiples des signaux NLOS, ce qui est également tout à fait conforme à l'interprétation physique des mesures Dopplers (mesure de la vitesse relative satellite-récepteur projetée sur le rayon vecteur satellite-récepteur).

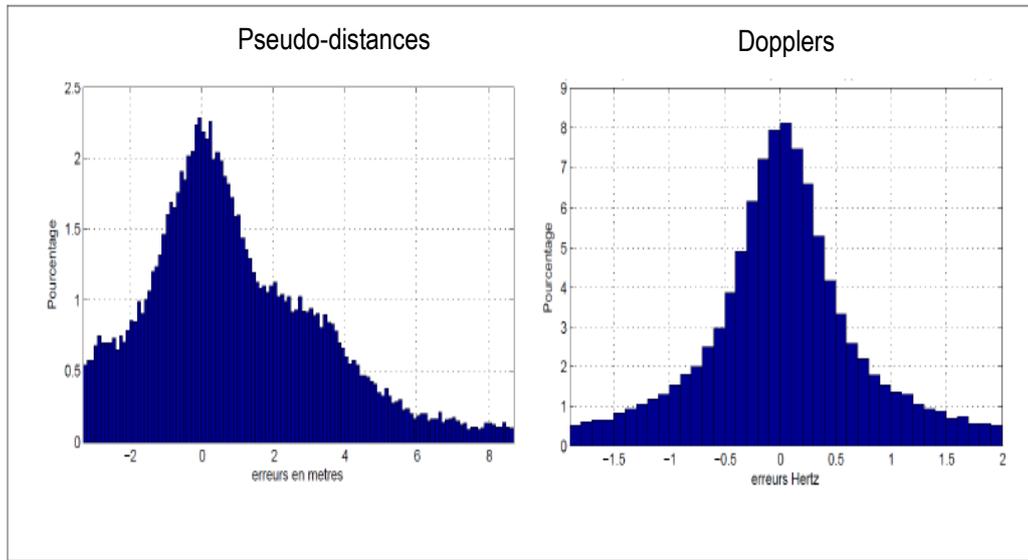


Figure 10 : Exemple de lois de probabilité des erreurs sur les mesures brutes LOS pour la configuration 54

	Quantiles des erreurs des pseudo-distances (en m) et des Dopplers (en Hertz)					Dispersion Q5-Q95	Moyenne	Ecart type
	2,5	5	50	95	97,5			
<b>Pseudo distances</b>	-5,0	-2,6	16,1	61,3	70,2	63,9	-230,1	22547,7
<b>Dopplers</b>	-17,3	-8,3	0,0	11,5	23,1	19,8	1,0	45,5

Tableau 8 – Indicateurs statistiques des erreurs sur les mesures classées NLOS pour la configuration 54

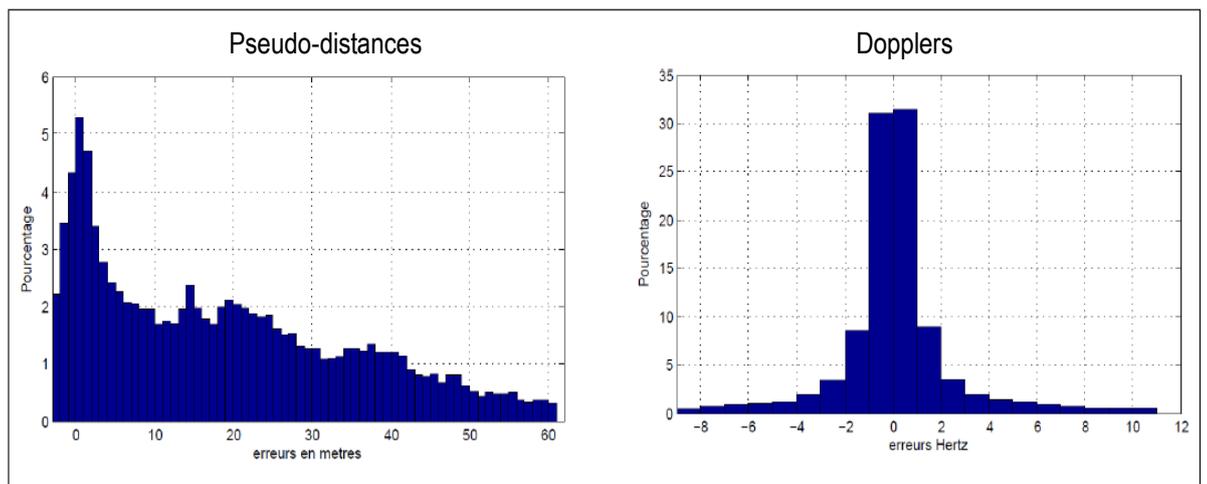


Figure 11 : Exemple de lois de probabilité des erreurs sur les mesures brutes NLOS pour la configuration 54

Le Tableau 9 donne les indicateurs « Médiane » et « Dispersion » pour toutes les configurations, respectivement pour les pseudo-distances classées en LOS et en NLOS de la méthode « Tranchée urbaine ».

Type Configurati on urbaine	Largeur de la rue	Hauteur bâtiment	Position du récepteur	LOS		NLOS	
				Médiane	Dispersion Q5-Q95	Médiane	Dispersion Q5-Q95
14	8	20	0,65	0,2	5,8	9,9	34,9
22	10	10	0,5	0,5	5,3	7,7	26,1
23	13	10	0,6	0,6	4,7	12,0	45,3
24	10	8	0,65	1,4	6,8	4,3	29,3
31	10	15	0,4	1,2	14,8	7,1	28,5
32	10	17	0,5	2,1	5,8	8,9	47
33	12	12,5	0,6	1,5	7,9	12,8	32,6
34	13	15	0,65	1,2	3,8	15,5	29,4
42	15	17,5	0,5	1,9	9,5	11,9	59,8
43	20	15	0,6	1,2	7,3	14,9	41,8
44	15	20	0,65	-1,9	6,5	14,0	33,5
52	30	20	0,5	0,7	7,9;	13,8	53,1
53	30	20	0,6	1,3	5,1	17,5	43,4
54	30	20	0,65	0,5	11,9	16,1	63,9
63	37	18	0,6	0,9	8,7	20,4	59,9
65	40	20	0,8	-0,3	10,7	15,2	94,6
73	65	18	0,6	-0,2	9,6	49,9	121,7
76	65	20	0,9	-1,2	9,6	120,0	149,8

**Tableau 9 – Indicateurs statistiques des erreurs sur les pseudo-distances LOS et NLOS pour toutes les configurations**

On y remarque que :

- les médianes des mesures LOS sont toutes inférieures à 2 m,
- les médianes des mesures NLOS sont toutes supérieures à 4 m et croissent en même temps que la largeur des rues jusqu'à atteindre des valeurs supérieures à 100 m pour la configuration 76.

Là encore, ces résultats sont tout à fait conformes avec la physique des phénomènes et nous confirment que **la méthode « Tranchée urbaine » de tri LOS-NLOS proposée est statistiquement juste.**

## 2.2 Tâche 2 : Calcul du PVT

Une fois les erreurs sur les mesures brutes caractérisées en fonction du caractère supposé LOS ou NLOS du satellite à l'origine des mesures, l'étape suivante a été d'exploiter cette caractérisation pour **améliorer le calcul de la position** (ou PVT pour Position, Vitesse, Temps).

L'idée première a été d'utiliser simplement le filtre du masque de visibilité pour éliminer les mesures classées en NLOS des mesures utilisées pour calculer le PVT, mais ceci risquant de limiter considérablement la disponibilité de la solution (il faut au moins 4 mesures pour calculer une solution), l'idée d'estimer le trajet additionnel biaisant les mesures NLOS pour pouvoir les exploiter dans la solution a ensuite été poursuivie.

### 2.2.1 Estimation des trajets additionnels

Cette estimation est basée sur le constat simple que le nombre des réflexions des trajets des satellites NLOS dans la tranchée peut être connu géométriquement de manière déterministe, en fonction des paramètres de la tranchée (L, H et P) et des angles d'azimut et d'élévation des satellites.

La Figure 12 illustre ces réflexions simples, doubles ou triples.

Les angles limites délimitant les zones du ciel correspondantes à 1, 2 ou 3 réflexions pour la tranchée donnée peuvent être calculés, ainsi que les valeurs des trajets additionnels correspondants.

La Figure 13 illustre le calcul dans le cas d'une réflexion. La distance additionnelle est la différence entre le trajet satellite-récepteur et le trajet satellite-récepteur "image" par rapport au bâtiment considéré comme un miroir.

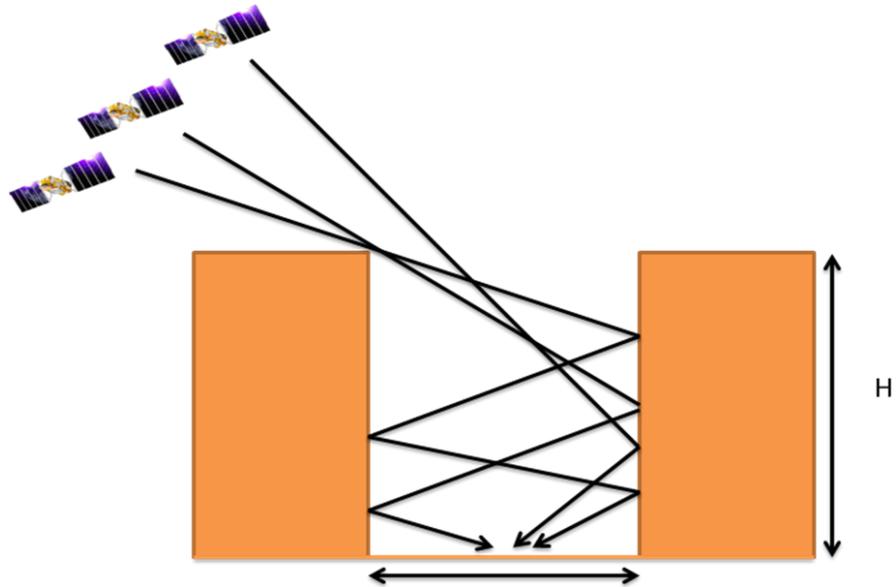


Figure 12 : Illustrations des réflexions simples, doubles ou triples le long des parois de la tranchée

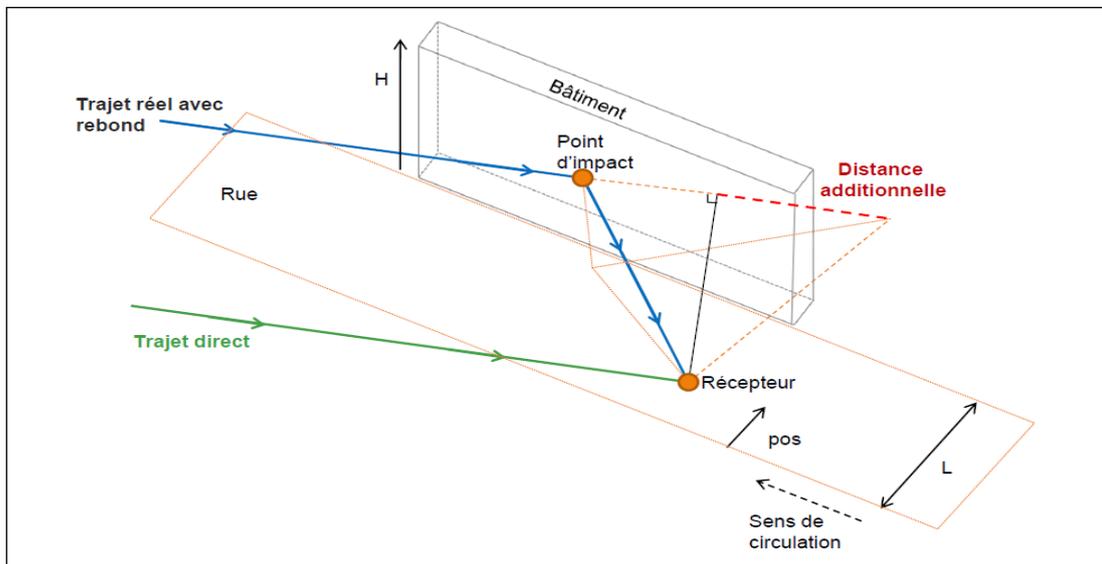


Figure 13 : Distance additionnelle dans le cas d'une seule réflexion

Les distances additionnelles et les angles limites, pour  $n =$  nombre de réflexions, sont donnés par les formules ci-dessous :

- Pour un satellite situé à gauche de l'axe de la rue :

Distances additionnelles :

$$\Delta_{n,g} = \begin{cases} n+1 \cdot L - 2 \cdot \text{pos} \cdot L \cdot |\cos el \cdot \sin az - \text{cap}|, & \text{si } n \text{ est impair} \\ n \cdot L \cdot |\cos el \cdot \sin az - \text{cap}|, & \text{sinon} \end{cases}$$

Angles limites :

$$el_{\min,n,g} = \begin{cases} \arctg \left( \left( \frac{H}{n+1 \cdot L - \text{pos} \cdot L} \right) \cdot \sin az - \text{cap} \right), & \text{si } n \text{ est impair} \\ \arctg \left( \left( \frac{H}{n \cdot L + \text{pos} \cdot L} \right) \cdot \sin az - \text{cap} \right), & \text{sinon} \end{cases}$$

- Pour un satellite situé à droite de l'axe de la rue :

Distances additionnelles :

$$\Delta_{n,d} = \begin{cases} n-1 \cdot L + 2 \cdot \text{pos} \cdot L \cdot |\cos \text{el} \cdot \sin \text{az} - \text{cap}|, & \text{si } n \text{ est impair} \\ n \cdot L \cdot |\cos \text{el} \cdot \sin \text{az} - \text{cap}|, & \text{sinon} \end{cases}$$

Angles limites :

$$\text{el}_{\min,n,d} = \begin{cases} \arctg \left( \left( \frac{H}{n \cdot L + \text{pos} \cdot L} \right) \cdot \sin \text{az} - \text{cap} \right), & \text{si } n \text{ est impair} \\ \arctg \left( \left( \frac{H}{n+1 \cdot L - \text{pos} \cdot L} \right) \cdot \sin \text{az} - \text{cap} \right), & \text{sinon} \end{cases}$$

La Figure 14 illustre graphiquement ce calcul de distance additionnelle sur un exemple de configuration urbaine. Les limites dans le plan du Sky plot correspondantes au changement du nombre de réflexions apparaissent clairement.

Dans notre cas, nous nous sommes limités à 3 réflexions (NLOS1, NLOS2 et NLOS3) étant donné qu'au-delà il est fort vraisemblable que le niveau du signal soit nettement trop faible pour être traité par le récepteur.

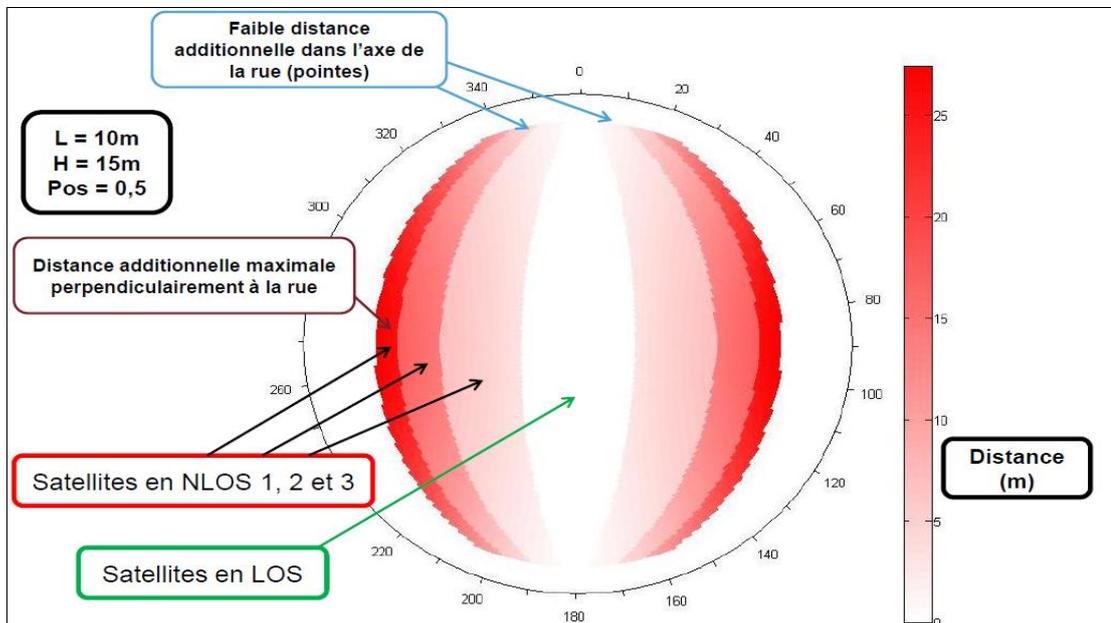


Figure 14 : Distance additionnelle dans le cas d'une seule réflexion

## 2.2.2 Validation de l'estimation des trajets additionnels

Nous avons ensuite comparé ces distances additionnelles théoriques aux médianes des erreurs observées. Nous avons défini un indicateur de correction de l'erreur  $k$  donné par l'expression suivante :

$$k = \frac{|\text{Erreur pseudo distance} - \text{Distance additionnelle}|}{\text{Erreur pseudo distance}}$$

En fonction des valeurs du facteur  $k$ , l'efficacité de la correction peut être évaluée :

- si  $k > 1$  alors la mesure est détériorée ;
- si  $k = 1$  alors aucune correction est effectuée ;
- si  $k = 0,5$  alors l'erreur de mesure est divisée par 2 ;
- si  $k = 0$  alors l'erreur de mesure est totalement corrigée.

La Figure 15 ci-dessous présente de manière graphique la valeur de  $k$ , pour un exemple de configuration urbaine (43) dans 18 zones du Sky Plot.

On peut vérifier que dans la majorité des cas l'erreur sur la pseudo-distance est réduite, ce qui valide le calcul présenté ci-dessus.

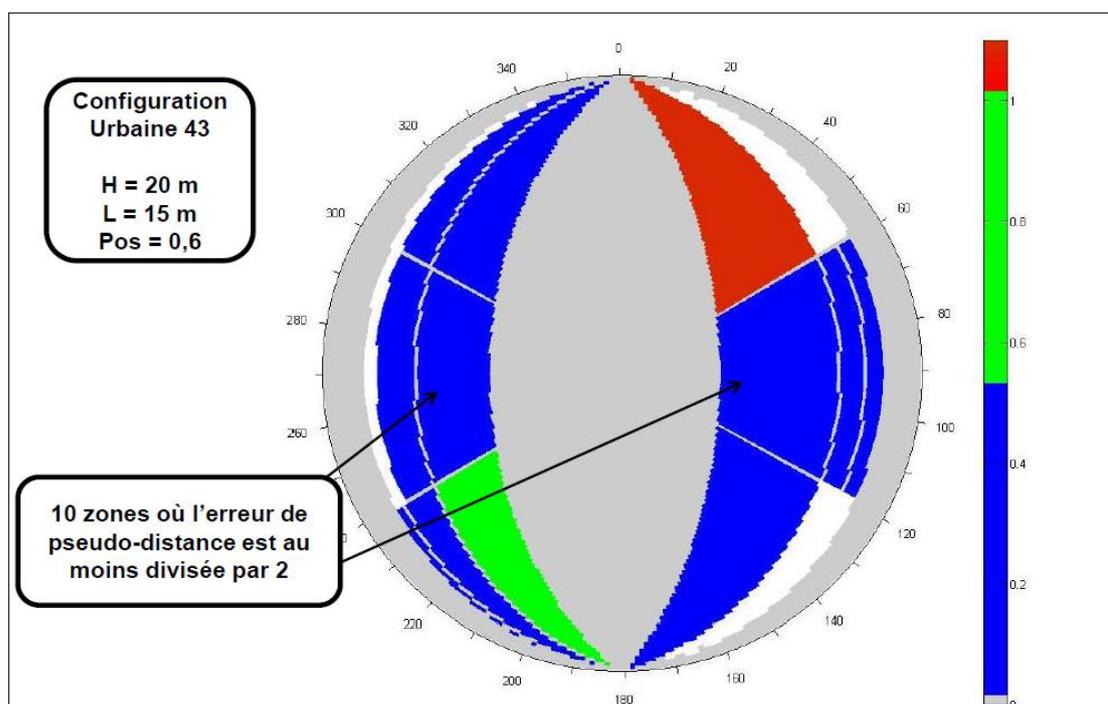


Figure 15 : Représentation graphique de la validation du calcul de distance additionnelle

## 2.2.3 Calcul du PVT avec la méthode « Tranchée urbaine »

### 2.2.3.1 Méthode de calcul

Plusieurs algorithmes peuvent être utilisés pour calculer une position avec des données brutes de pseudo-distances et de Dopplers. Ils se décomposent en 2 grandes familles :

- la famille des algorithmes de type "Snapshot", qui calculent une position indépendante par époque, comprenant les méthodes aux moindres carrés (LMS = *Least Mean Square*) pondérés ou non et les méthodes analytiques comme celle de Bancroft,
- la famille des algorithmes de type "Filtrage", qui utilisent une estimation prédite de l'évolution du mobile, corrigée par des mesures, comprenant les filtres de Kalman et les filtres particulaires.

Dans le projet, nous avons choisi d'utiliser un algorithme de calcul le plus simple et standard possible (LMS = moindres carrés non pondérés à partir des seules pseudo-distances) afin de bien mettre en évidence l'apport de la nouvelle méthode de calcul. Une méthode par filtrage aurait atténué les apports de la méthode « Tranchée urbaine ». L'utilisation des Dopplers ne peut se faire que par l'intermédiaire d'un modèle d'état intégrant les vitesses, et aurait nécessité l'utilisation d'un filtre.

Dans les résultats présentés plus bas sont systématiquement comparées, pour les différents lots de mesures correspondants aux 18 configurations : les solutions en appliquant l'algorithme LMS aux mesures brutes telles que produites par le récepteur aux solutions obtenues en appliquant le même algorithme aux mesures filtrées et corrigées par la méthode « Tranchée urbaine ».

### 2.2.3.2 Stratégie de calcul

La première idée avait été d'exploiter uniquement le tri LOS/NLOS pour n'utiliser que les mesures LOS dans le calcul de position. Cette première méthode donne d'excellents résultats, comme présentés dans le Tableau 10, mais réduit de façon significative la disponibilité de la solution, en particulier dans les configurations de rues étroites.

Totalité configuration	Totalité des satellites	Urban Trench Method	Écart relatif en 3D tout satellites
------------------------	-------------------------	---------------------	-------------------------------------

Configuration	Nombre total époques	Totalité des satellites			Urban Trench Method			Écart relatif en 3D tout
		Disponibilité	Nombre moyen de satellites	Médiane erreur 3D	Disponibilité	Nombre moyen de satellites	Médiane erreur 3D	
14	2 430	99,8%	6,2	34,2	0,0%			
22	900	100,0%	6,6	14,3	75,8%		5,6	-60,7%
23	460	100,0%	7,2	23,2	54,3%		4,6	-80,2%
24	325	100,0%	7,3	9,5	100,0%	4,9	7,9	-16,7%
31	3 401	100,0%	7,2	19,9	20,5%		6,4	-67,9%
32	3 563	97,6%	6,8	31,1	14,2%		8,3	-73,1%
33	245	100,0%	6,6	21,0	99,6%	4,0	6,3	-70,1%
34	615	100,0%	6,8	35,4	17,1%		4,1	-88,4%
42	955	99,6%	7,3	24,0	99,0%	4,3	7,5	-68,5%
43	1 490	100,0%	7,5	22,1	96,2%	5,0	6,1	-72,2%
44	545	100,0%	6,3	20,3	100,0%	4,2	6,9	-66,2%
52	17 885	100,0%	7,8	32,8	93,7%		7,6	-76,8%
53	100	100,0%	6,9	24,5	100,0%	5,5	6,1	-74,9%
54	17 230	99,7%	7,5	31,3	87,4%		9,5	-69,8%
63	3 749	100,0%	7,7	26,0	100,0%	6,0	5,4	-79,1%
65	15 455	100,0%	6,8	45,8	94,7%		10,0	-78,1%
73	3 414	100,0%	7,4	40,3	99,9%	6,6	5,1	-87,3%
76	755	100,0%	5,7	50,2	100,0%	5,0	8,6	-82,9%
	<b>73 517</b>	<b>99,8%</b>	<b>7,3</b>	<b>31,1</b>	<b>81,9%</b>		<b>8,1</b>	<b>-74,0%</b>

**Tableau 10 – Résultats de la stratégie simplifiée "LOS only" de la méthode Tranchée urbaine**

La méthode complète procède de façon à conserver la même disponibilité que dans le cas où on exploite la totalité des satellites mais en améliorant l'exactitude de la solution.

Elle procède de la façon suivante :

Pour chaque époque de mesure :

- les mesures sont triées en mesures LOS et mesures NLOS
- si le nombre de satellites LOS est supérieur ou égal à 4, on calcule la solution avec les pseudo-distances LOS uniquement,
- si le nombre des satellites est inférieur à 4, on introduit successivement et dans cet ordre les pseudo-distances corrigées des satellites NLOS1, puis NLOS2, puis NLOS3.

Le Tableau 11 présente les résultats obtenus avec la méthode complète.

On peut vérifier que la disponibilité est inchangée et que l'exactitude statistique, représentée par la médiane des erreurs reste très nettement améliorée par rapport au calcul standard sur toutes les mesures, le gain moyen étant de l'ordre de – 70 %.

La Figure 16 représente les deux fonctions de répartition de l'erreur de position 3D obtenues d'une part par la méthode « Tous satellites » et d'autre part par la méthode « Tranchée urbaine ». Ces courbes, appelées aussi courbes de disponibilité de la précision, permettent de connaître la probabilité d'obtenir une erreur inférieure à telle valeur.

Totalité configuration	Totalité des satellites	Urban Trench Method	Écart relatif en 3D tout
------------------------	-------------------------	---------------------	--------------------------

Configuration	Nombre total époques	Méthode « Tranchée urbaine »			Méthode « Tous satellites »			satellites
		Disponibilité	Nombre moyen de satellites	Médiane erreur 3D	Disponibilité	Nombre moyen de satellites	Médiane erreur 3D	
14	2 430	99,8%	6,2	34,2	99,8%	4,0	13,0	-62,1%
22	900	100,0%	6,6	14,3	100,0%	5,0	6,7	-53,2%
23	460	100,0%	7,2	23,2	100,0%	5,1	11,0	-52,7%
24	325	100,0%	7,3	9,5	100,0%	4,9	7,9	-16,7%
31	3 401	100,0%	7,2	19,9	100,0%	5,4	15,3	-23,1%
32	3 563	97,6%	6,8	31,1	97,6%	5,0	12,1	-60,9%
33	245	100,0%	6,6	21,0	100,0%	4,0	6,3	-70,1%
34	615	100,0%	6,8	35,4	100,0%	4,9	17,7	-50,1%
42	955	99,6%	7,3	24,0	99,6%	4,3	7,5	-68,5%
43	1 490	100,0%	7,5	22,1	100,0%	5,0	6,3	-71,6%
44	545	100,0%	6,3	20,3	100,0%	4,2	6,9	-66,2%
52	17 885	100,0%	7,8	32,8	100,0%	5,2	8,0	-75,5%
53	100	100,0%	6,9	24,5	100,0%	5,5	6,1	-74,9%
54	17 230	99,7%	7,5	31,3	99,7%	4,9	10,3	-67,2%
63	3 749	100,0%	7,7	26,0	100,0%	6,0	5,4	-79,1%
65	15 455	100,0%	6,8	45,8	100,0%	4,6	10,4	-77,2%
73	3 414	100,0%	7,4	40,3	100,0%	6,6	5,1	-87,3%
76	755	100,0%	5,7	50,2	100,0%	5,0	8,6	-82,9%
<b>73 517</b>		<b>99,8%</b>	<b>7,3</b>	<b>31,1</b>	<b>99,8%</b>	<b>5,0</b>	<b>9,2</b>	<b>-70,5%</b>

Tableau 11 – Résultats de la stratégie complète de la méthode Tranchée urbaine sur Paris et Nantes

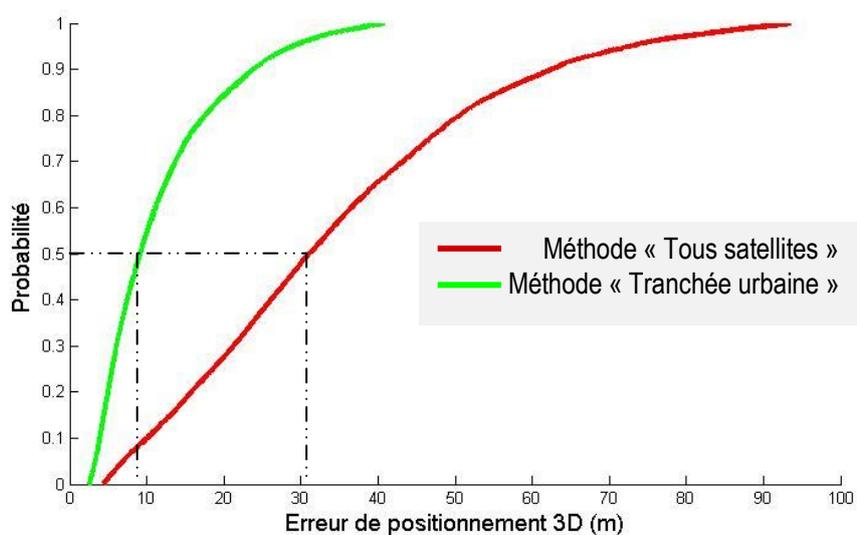


Figure 16 : Amélioration de la fonction de répartition de l'erreur apportée par la méthode « Tranchée urbaine » sur Paris et Nantes

Ces performances ont été comparées avec les performances d'un récepteur haut-de-gamme (Novatel DLV3 utilisé pour la trajectoire de référence et configuré pour sortir les mesures brutes également). Les résultats sont les suivants :

La disponibilité du DLV3 est de 92% quand celle de l'ublox LEA6T est de 99,8 % ;

Pour les époques où il y avait suffisamment de satellites pour calculer une position, le DLV3 apporte un gain de précision de - 79% mais la méthode Tranchée urbaine appliquée sur les mesures du LEA6T est pratiquement aussi bonne (- 70,5%).

**En conclusion, sur la base de données de Paris + Nantes, la méthode développée permet de :**

- **conserver la disponibilité d'un récepteur bas-de-gamme, sensible mais peu précis,**
- **tout en atteignant une précision quasiment équivalente à celle d'un récepteur haut-de-gamme, précis mais peu disponible.**

## 2.3 Tâche 3 : Validation sur Toulouse

### 2.3.1 La base de données

Pour valider la méthode dans un autre environnement que celui sur lequel ont été collectées les données qui ont servi à son développement, il a été décidé d'exécuter une campagne de validation dans une autre ville. Nous avons choisi Toulouse pour profiter d'une autre mission de notre véhicule VERT dans cette ville.

Le Tableau 12 donne la répartition des mesures par classe de rue pour cette campagne. On peut remarquer que, par rapport au Tableau 2 des classes de rues pour Paris et Nantes, nous avons dû ajouter pour Toulouse les 3 classes 8, 9 et 10 et en revanche, nous n'avions pas de rue de classe 1.

Types de rue		Hauteur du bâtiment (m)	Largeur de la rue (m)	Indicateur de contrainte urbaine (en degré)	Pourcentage de mesures
Classes	Description				
2	Petite rue et petit immeuble	6-10	8-13	50-60	45%
3	Petite rue et moyen immeuble	12-17	10-13	62-72	9%
4	Moyenne rue et moyen immeuble	13-20	15-20	55-70	6%
6	Grande avenue	12-20	38-40	45	1%
8	Large rue et petit immeuble	6-10	15-25	36	2%
9	Très étroite rue et petit immeuble	<10	5-8	100	16%
10	Très larges rue et petit immeuble	8-10	>40	13	21%
<b>Total</b>					<b>100%</b>

**Tableau 12 – Description et répartition des classes de rue dans la base de données de Toulouse**

De la même façon, il a fallu ajouter 2 classes de position du récepteur qui ne s'étaient pas rencontrées sur Paris ou Nantes, qui sont les positions 7 et 8 du tableau 13 ci-dessous.

Le Tableau 14 donne la répartition par type de configuration urbaine. Les configurations 22, 23 et 93 concentrent la majorité des données, alors que c'était les configurations 52, 54 et 65 qui étaient les plus fournies pour la campagne sur Paris et Nantes. On est donc en droit de s'attendre à des résultats différents étant donné les configurations urbaines sensiblement différentes.

Types de position du récepteur		
Classes	Position du récepteur	Description
1	0,4	Sens unique
2	0,5	Sens unique
3	0,6	Double sens
4	0,65	Double sens large
5	0,8	Plusieurs voies et allée centrale
6	0,9	Plusieurs voies et terre-plein central
7	0.7	Double sens large
8	0.2	Plusieurs voies et allée centrale

Tableau 13 – Classes de position du récepteur sur Toulouse

Configurations urbaines pour Toulouse	Largeur de la rue (en m)	Hauteur des Bâtiments (en m)	Position dans l'axe de la rue	Pourcentage de mesures
21	8	20	0.4	3%
22	8-13	6-10	0.5	29%
23	8-13	6-10	0.6	11%
24	8-13	6-10	0.65	1%
42	15-20	13-20	0.5	9%
61	38-40	12-20	0.4	6%
83	15-25	6-10	0.6	1%
84	15-25	6-10	0.65	0%
85	15-25	6-10	0.8	1%
91	5-8	<10	0.4	1%
92	5-8	<10	0.5	1%
93	5-8	<10	0.6	13%
95	5-8	<10	0.8	1%
103	>10	8-10	0.6	1%
105	>10	8-10	0.8	7%
107	>10	8-10	0.7	3%
108	>10	8-10	0.2	6%
<b>Total</b>				<b>100%</b>

Tableau 14 – Les 17 configurations urbaines sur Toulouse

### 2.3.2 Les résultats

Les résultats sous forme de tableau et de courbes de disponibilité de précision sont donnés ci-dessous, pour toutes les données et en appliquant la méthode Tranchée urbaine complète. Ils sont à comparer au Tableau 11 et à la Figure 16 déjà présentés.

Totalité configuration		Totalité des satellites			Urban Trench Method			Écart relatif en 3D
Configuration	Nombre total époques	Disponibilité	Nombre moyen de satellites	Médiane erreur 3D	Disponibilité	Nombre moyen de satellites	Médiane erreur 3D	
21	195	99%	7,2	18,9	99%	5,5	13,0	-31,2%
22	1 725	100%	7,6	25,9	100%	5,5	22,6	-12,9%
23	670	100%	7,6	20,0	100%	4,0	47,3	136,1%
24	45	100%	6,6	19,5	100%	4,0	13,7	-29,8%
31	505	100%	7,7	25,4	100%	4,8	8,9	-64,8%
42	340	100%	7,9	28,6	100%	7,3	26,4	-7,7%
61	85	100%	7,4	7,5	100%	7,4	7,5	-0,1%
83	15	100%	8,1	11,0	100%	8,0	10,7	-2,3%
84	45	100%	7,9	14,7	100%	7,0	9,7	-33,5%
85	50	100%	8,4	27,1	100%	5,8	22,5	-16,8%
91	40	100%	6,9	9,1	100%	5,5	6,5	-28,0%
92	765	100%	7,3	28,2	100%	4,8	18,3	-35,0%
93	85	100%	6,1	20,0	100%	4,0	13,2	-34,0%
95	90	100%	6,8	12,3	100%	4,8	6,8	-44,5%
103	365	100%	8,6	27,7	100%	7,6	24,1	-13,1%
105	170	100%	7,4	11,7	100%	7,3	11,4	-3,0%
107	360	100%	8,0	7,2	100%	7,9	7,2	0,0%
108	295	100%	7,9	15,1	100%	6,6	14,7	-3,0%
	<b>5 845</b>	<b>100%</b>	<b>7,6</b>	<b>23,8</b>	<b>100%</b>	<b>5,7</b>	<b>16,8</b>	<b>-29,4%</b>

Tableau 15 – Résultats de la stratégie complète de la méthode Tranchée urbaine sur Toulouse

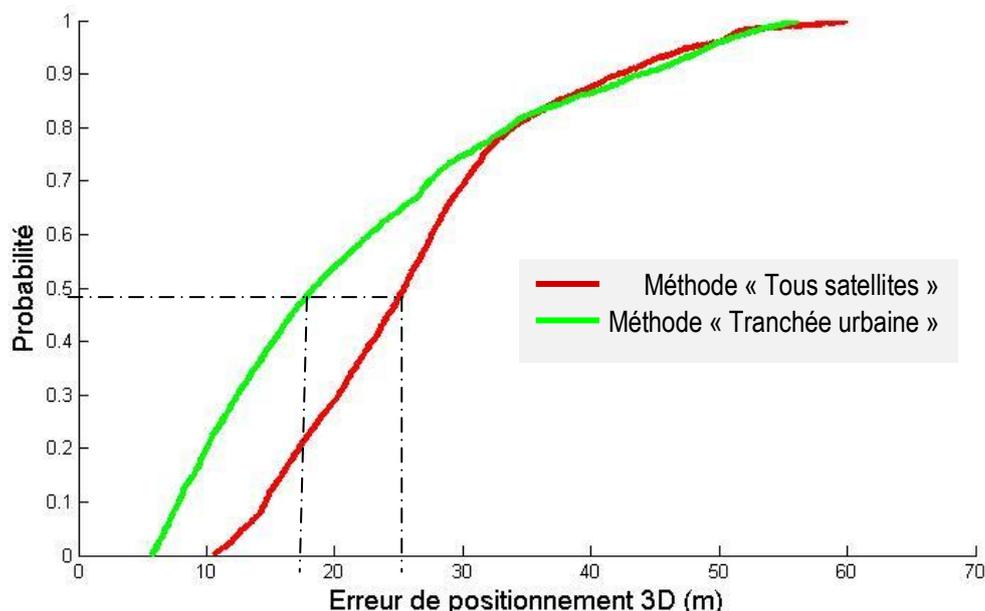


Figure 17 : Amélioration de la fonction de répartition de l'erreur apportée par la méthode « Tranchée urbaine » sur Toulouse

On peut constater que l'efficacité de la méthode est moins nette que sur Paris et Nantes malgré une médiane ramenée de 24 m à 17 m, donc un gain de précision de l'ordre de - 30%, quand même significatif. L'explication à ce gain plus faible est à chercher en particulier du côté de la configuration 23 pour laquelle la méthode semble dégrader la précision. Nous n'avons pas pris encore le temps, dans la période du projet, pour trouver une explication à ces valeurs qui semblent aberrantes.

## 3. Conclusion et perspectives

### 3.1 Conclusion

L'étude INTURB1, réalisée par l'IFSTTAR et la SCM, en 2012 a produit les résultats suivants :

- **caractérisation des erreurs** (Tâche 1) : à partir de campagnes expérimentales en vraie grandeur en villes de Paris, Nantes et Toulouse, des mesures brutes de pseudo-ranges disponibles en sortie de récepteurs « grand public » standard représentatifs du marché, ont été collectées et analysées en fonction des différents facteurs d'influence que sont : la largeur de la rue, la hauteur des bâtiments, et la position a priori occupée par le véhicule dans le profil en travers de la rue.
- **calcul de la position absolue** (Tâche 2) en fonction des caractéristiques géométriques précitées (largeur, hauteur et position a priori) selon plusieurs stratégies :
  - une stratégie où seuls les satellites en vue directe (i.e. dont l'élévation est plus grande que l'élévation critique imposée par la géométrie du bâti) sont utilisés : il s'ensuit une moindre disponibilité car le nombre minimum de 4 satellites n'est pas nécessairement atteint ;
  - une stratégie où les satellites en vue indirecte sont utilisés autant que de besoin, en plus des satellites en vue directe, et une correction (basée sur la géométrie) des mesures indirectes est faite : la disponibilité reste la même qu'en standard (où tous les satellites sont utilisés).

Ces deux tâches ont abouti à des résultats en termes de précision et de disponibilité qu'on peut résumer comme suit [Bétaille et al., 2013] :

	Stratégie LOS seuls	Stratégie LOS&NLOS corrigés
Paris/Nantes	précision améliorée de 75% disponibilité dégradée de 20%	précision améliorée de 70% disponibilité non dégradée
Toulouse	précision améliorée de 40% disponibilité dégradée de 30%	précision améliorée de 30% disponibilité non dégradée

*Tableau 16 – Synthèse des résultats sur Paris, Nantes et Toulouse*

La précision s'entend ici en norme de l'erreur de position en 3D.

En conclusion, la correction des mesures indirectes est pertinente (même si elle n'est pas parfaite), car une amélioration de la précision reste observée, à disponibilité constante (i.e. comme en GPS standard).

### 3.2 Perspectives

Malgré les résultats intéressants produits par cette première phase d'étude, il n'a pas été possible d'atteindre les objectifs envisagés au lancement de l'étude au niveau de **l'intégrité**. Une perspective de prolongement de cette étude devra traiter ce problème en même temps que le problème de **la gestion des hypothèses de position a priori dans la rue**, celles-ci pouvant être multiples, surtout pour les larges rues présentant plusieurs voies de circulation.

De plus, la méthode manuelle de classification des configurations urbaines qui a été pratiquée dans cette première phase n'est manifestement pas adaptée à une généralisation, a fortiori une industrialisation de la méthode. Il serait également nécessaire d'améliorer ce point et de proposer une **méthode automatisée de caractérisation des rues à partir de bases de données industrielles comme celles de l'IGN**.

## 4. Bibliographie

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

M. Ortiz, V. Renaudin, F. Peyret and D. Bétaille, Using a reference vehicle for solving GNSS localization challenges, *Inside GNSS*, July-August 2013, en cours de review

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*, to be published in Vol. 5, No. 3 – Fall 2013