

# Validation expérimentale du logiciel de lancer de rayon ergospace et estimation de la précision du MNE requise pour son utilisation

■ Thomas TIRTAINE - Juliette MARAIS

*Plusieurs facteurs d'imprécision nuisent à la réalisation de mesures utilisant le système satellite GPS. L'essentiel d'entre eux peut être corrigé par modélisation (erreur troposphérique,...) ou par l'utilisation de techniques de calcul spécifiques (calcul de ligne de base, calcul en bifréquence). Les erreurs dues aux multitrajets ne peuvent être éliminées par ces méthodes. Leur influence sur la mesure n'est cependant pas négligeable. Leur apparition revêt un caractère aléatoire dans les environnements très masquant (particulièrement en milieu urbain).*

*Pour mieux les appréhender dans le cadre de recherche sur la localisation, les chercheurs de l'INRETS utilisent un logiciel de simulation, Ergospace, ainsi qu'un modèle numérique de l'environnement de la mesure. L'objet de ce rapport porte sur la validation expérimentale d'Ergospace. Cette validation a fait l'objet de plusieurs étapes : vérification des calculs effectués par le logiciel (indices de DOPs et position des satellites), choix d'un modèle de terrain et comparaison entre des mesures effectuées sur site et les simulations.*

## ■ mots clés

Navigation par satellite, Multitrait, Modèle numérique d'élévation, Validation expérimentale, lancer de rayons

Lors de mesures GPS, plusieurs facteurs affectent la précision du calcul de position. La plupart des erreurs peuvent être corrigées grâce à l'utilisation de modèles (erreur troposphérique, ionosphérique...) ou lors du post-traitement des mesures. Il est cependant plus difficile de s'affranchir des erreurs liées aux multitrajets. En effet, ceux-ci apparaissent de manière aléatoire et sont directement fonction de l'environnement de l'antenne. Le LEOST, laboratoire de l'INRETS (l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) à Villeneuve d'Ascq (Nord), étudie les applications des systèmes de navigation à différents types de transport. Les services d'information voyageurs ou de suivi de flotte sont aujourd'hui bien développés ou en cours de déploiement dans les secteurs routiers et ferroviaires. Le futur, avec le développement du système européen Galiléo et l'évolution du GPS, s'annonce riche en nouvelles applications. Cependant, si la plupart des utilisations actuellement développées se contentent du service disponible, l'utilisation du satellite pour des applications telles que le contrôle-commande ferroviaire nécessite davantage de disponibilité, et surtout d'intégrité<sup>1</sup>. La qualité de réception des signaux et leur disponibilité est donc un thème de recherche important dont les résultats devront permettre de franchir ce palier.

Le logiciel de lancer de rayons Ergospace est utilisé dans ce cadre pour simuler le nombre de satellites reçus (il faut s'assurer qu'il reste au moins quatre satellites encore visibles pour obtenir la position du point) et les trajets des signaux issus des

satellites de navigation à partir de la modélisation de la constellation de satellites et du lieu de la mesure à un instant donné.

Utilisé par divers organismes (DGA, CNES,...), Ergospace a fait l'objet de validations statistiques visant à vérifier expérimentalement les résultats obtenus dans des environnements "types" (urbain, suburbain, rural...). L'objet de notre étude est de réaliser une validation expérimentale en environnement connu, c'est à dire, de comparer les mesures réalisées dans un environnement donné avec les simulations correspondantes (même trajectoire et mêmes instants de mesures) à partir d'un modèle de cet environnement le plus réaliste possible. Nous avons étudié l'adéquation des informations fournies par le logiciel Ergospace avec nos mesures à la lumière des besoins des systèmes de transports urbains.

Dans une première partie de cet article, nous décrivons le logiciel Ergospace. Puis, nous présenterons notre campagne de mesures et notre analyse des résultats, avant de conclure et d'introduire quelques pistes à poursuivre.

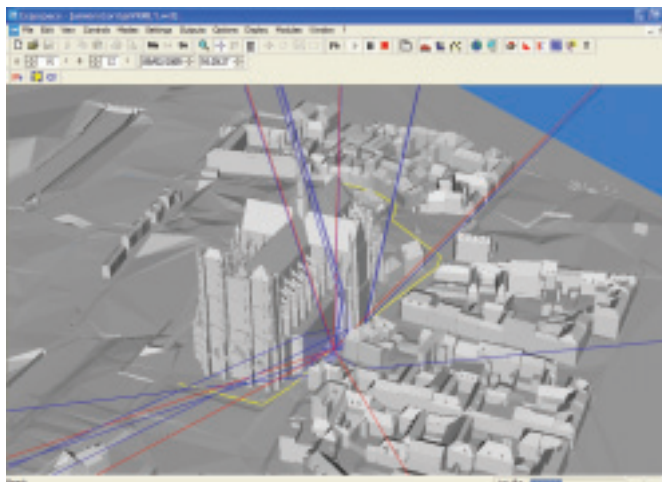
## Fonctionnement du logiciel Ergospace

Ergospace est un logiciel de lancer de rayons destiné aux satellites de navigation. Les lois de l'optique géométrique permettent de tracer, sur des scènes modélisées en 3D, chacun des rayons issus des satellites de la constellation et reçus par le récepteur mobile ou fixe (figure 1).

### ■ La simulation nécessite plusieurs éléments :

- Pour calculer les positions des satellites GPS au moment de la simulation, le logiciel utilise les almanachs (au format

(1) L'intégrité est une mesure de confiance en l'information fournie par le système de positionnement entier. Elle inclut notamment la capacité d'un système à prévenir l'utilisateur à temps que le système ne peut pas être utilisé pour l'opération voulue.



**Figure 1** Interface du logiciel Ergospace

YUMA ou SEM) disponibles sur le site Internet des gardes côtes américains<sup>2</sup>. Ces almanachs doivent être régulièrement importés dans le logiciel pour garantir la fiabilité de leurs informations. Il est également possible de créer des constellations manuellement en paramétrant les satellites un par un avec des informations plus précises que celle des fichiers YUMA ou SEM.

- Pour prédire la visibilité des satellites lors des simulations, il est nécessaire de connaître la position des émetteurs mais également de définir l'environnement de la mesure. Des scènes types peuvent être générées par l'utilisateur. Des scènes réelles géoréférencées peuvent également être importées au format numérique VRML. Dans les deux cas, il est possible d'attribuer à chaque facette du modèle une texture dont les caractéristiques correspondent à des surfaces réelles (bois, brique, ciment,...).
- Enfin, la localisation du lieu de la mesure est réalisable dans la scène en un clic de souris ou encore par l'introduction de coordonnées dans le système géographique du modèle.

Les résultats de simulations (statiques ou dynamiques) sont fournis pour chaque point statique ou chaque point de la trajectoire. Les signaux issus de chacun des satellites disponibles sont observés. Ainsi chaque rayon reçu est décrit par le trajet du signal (direct ou réfléchi) antenne-satellite, les diverses informations relatives à la trajectoire du signal (nombre de réflexions, retard du trajet réfléchi par rapport au trajet direct) ou encore par le niveau de signal reçu (Les pertes causées par les réflexions, la traversée de l'atmosphère,...).

Les simulations fournissent également un certain nombre d'informations quant aux coordonnées des satellites et à la géométrie des satellites reçus (indices de DOP).

Un module cartographique d'Ergospace permet de réaliser des cartes thématiques. Elles illustrent pour un instant donné, la répartition dans la scène du nombre de satellites visibles ou encore des indices de DOP. Elles permettent également d'illustrer des données statistiques calculées à partir de plusieurs cartes instantanées, comme par exemple le pourcentage de temps pendant lequel moins de quatre satellites sont visibles. L'intérêt de l'utilisation d'un tel logiciel dans un environnement réel est d'apporter une connaissance précise de la qua-

lité du service offert dans cet environnement, notamment en terme de nombre de satellites reçus. Nous nous sommes donc attachés à comparer de manière fine les enregistrements réalisés sur le terrain avec ceux des simulations effectuées dans les mêmes conditions.

## Validation en environnement connu

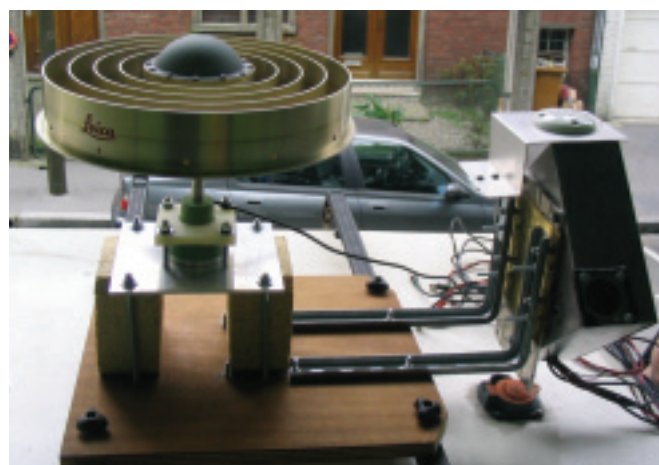
L'étude de l'adéquation des simulations avec les mesures est également l'occasion d'observer dans quelles mesures le modèle influera sur le résultat des simulations et la précision nécessaire pour celui-ci. Le but de cette analyse est de conclure quant à la pertinence des résultats, relativisée en fonction de l'application de l'étude ; en effet, les besoins d'un géomètre ou d'un exploitant d'autobus ne seront pas de mêmes ordres, notamment en terme de précision.

Nous avons utilisé pour cela un modèle 3D urbain issu des travaux de recherche du laboratoire MATIS de l'IGN. Ces travaux couvrent le centre ville d'Amiens. Nous avons donc entrepris notre validation dans ce centre ville, en utilisant un modèle récent et précis (de l'ordre de 25 cm).

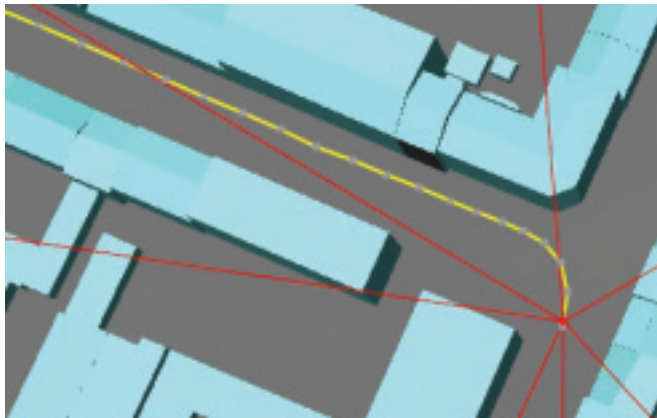
L'ensemble de la validation étant réalisé dans le cadre des études sur les transports menées au laboratoire, nous avons effectué des mesures dynamiques. Le récepteur utilisé est le récepteur PolarX2 de Septentrio, possédant 15 canaux de réception. De plus, nous avons limité notre étude dans un environnement de type urbain propice à la formation de multitrajets.

Dans ce modèle, nous avons sélectionné cinq rues caractéristiques de largeurs variables. Cependant, les mesures réalisées dans les rues étroites ne permettront pas de calculer une position précise car peu de satellites sont reçus et certains signaux auront subi une ou plusieurs réflexions. Les rues plus larges autorisent la réception d'un nombre inférieur de signaux réfléchis (effet moins sensible du canyon urbain) et les positions calculées seront plus précises. C'est pourquoi, les rues choisies sont plutôt larges (10 m environ) et tout en vérifiant que des signaux de puissance faible (considérés comme des multitrajets) ont bien été reçus.

Enfin, la régularité de la hauteur du masque facilitant l'interprétation des enregistrements dans la mesure où elle diminue les variations locales importantes du nombre de satellites



**Figure 2** Dispositif de mesure GPS sur le véhicule



**Figure 3** Implémentation de la trajectoire du mobile en simulation.

■ ■ ■ visibles, nous avons choisi des rues longées par des masques d'élévations constants formés par les bâtiments de part et d'autre de la voie. L'orientation de la rue est un élément secondaire puisque c'est avant tout le masque des bâtiments qui influe sur la visibilité des satellites.

#### ■ Pour réaliser les mesures in situ nous avons utilisé trois ensembles antenne-récepteur GPS (figure 2) :

- Le premier récepteur enregistre les mesures en continu avec une période d'une seconde et délivre en sortie un fichier RINEX indiquant les satellites visibles et le rapport signal/bruit de leur signal. Le seuil de réception du signal est fixé à sa valeur minimale : 19 dB pour la phase et 33 dB pour le code. Le récepteur utilisé (de marque Septentrio) correspond à celui utilisé pour la localisation de véhicule pour la gestion de flotte par exemple (bus, camions).
- Le second enregistre les données en vue du post traitement. Associé à une antenne fixe décrite plus bas, il nous permet de connaître la position du véhicule à quelques centimètres près lorsque les ambiguïtés ont été résolues. Dans le cas contraire, nous conservons les points de précision de localisation inférieure au mètre. Ces positions doivent être relativement précises car elles seront implémentées directement dans le logiciel de simulation et il convient de situer correctement l'antenne dans la scène en 3D. Elles jouent donc un rôle important concourant au réalisme des simulations. Le récepteur est un Leica SR530 bifrédence.
- La station de base (troisième ensemble antenne-récepteur) est placée sur la place face à la cathédrale d'Amiens. C'est un lieu dégagé situé à moins de trois kilomètres des points les plus éloignés de la trajectoire du véhicule lors des mesures. Pour déterminer les coordonnées de ce pivot, nous avons calculé une ligne de base à partir de la station permanente la plus proche située à Creil. Avec une durée d'observation de plus de 4h30, la précision obtenue est largement suffisante (de l'ordre de quelques centimètres).

Nous avons appliqué un masque d'élévation de 0° pour les signaux reçus par l'antenne Septentrio. Le masque d'élévation artificiel du récepteur utilisé pour la localisation du véhicule est fixé à la valeur usuelle de 10°.

Deux séries de mesures ont été réalisées à quelques heures d'intervalle afin de disposer pour chaque rue, de deux confi-

gurations satellitaires différentes. Cette redondance permet d'augmenter les possibilités de résolutions des ambiguïtés et donc de positionnement précis du véhicule.

L'ensemble des données a été analysé a posteriori. Nous présentons ici les principales conclusions.

## Analyse des résultats

Comme décrit précédemment, nous avons retenu les trajectoires dont la précision est meilleure que le mètre. Cette précision est indiquée par le logiciel de post traitement Skipro. Lors de l'implémentation de ces trajectoires sous Ergospace, nous avons remarqué que la position est correcte en planimétrie (la trajectoire calculée correspond à celle parcourue) alors qu'elle accuse un important décalage en altimétrie (figure 3). Celui-ci provient de l'utilisation d'une grille de calcul d'altitude peu précise par Skipro. Pour obtenir une altitude réaliste, nous avons remplacé les altitudes erronées par la somme de la hauteur de l'antenne sur le véhicule et de l'altitude du sol donnée par le modèle pour chaque point.

**Trois parcours ont été étudiés. Le premier a été utilisé pour une étude statistique et les deux autres pour affiner les conclusions par des remarques quantitatives.** Pour chaque trajet retenu, nous avons comparé la visibilité des satellites sur le terrain et en simulation. Nos comparaisons ont porté sur deux types d'informations : le nombre de satellite d'abord (réception ou non), l'état de réception des satellites ensuite (le satellite reçu est-il reçu par trajet direct ou après réflexion ?). Pour comparer les résultats des simulations avec les mesures enregistrées sur le terrain, nous devons distinguer les signaux directs des signaux réfléchis reçus par l'antenne. Une étude préalable a montré qu'un seuil de puissance de 45 dB permet de séparer ces deux états de réception. Ce seuil est cependant à utiliser avec prudence. En effet, les signaux issus de satellites bas sur l'horizon par exemple peuvent atteindre le récepteur par trajet direct avec un rapport signal/bruit relativement faible. De même, il est possible qu'un signal réfléchi ait un rapport signal/bruit supérieur à 45 dB, notamment lorsque l'élévation du satellite est importante ou lorsque le revêtement de la surface de réflexion a une bonne conductivité. Le moyen le plus fiable pour s'assurer d'une éventuelle réflexion du signal et de vérifier que sa polarité est inversée. Malheureusement, cela ne peut être réalisé avec le matériel dont nous disposons.

#### ■ Etude statistique sur une première trajectoire

Pour le premier trajet, composé de 69 points de mesure, seuls les points des portions de départ et d'arrivée du parcours sont calculés précisément. Les positions intermédiaires, dont la précision est moins bonne que le mètre, ont été interpolées en supposant que le véhicule se déplaçait à vitesse constante. Cela était effectivement le cas lors des mesures sur site. Nous avons veillé à conserver le même nombre de points entre la mesure réalisée sur site et la simulation.

Cette étude qualitative a pour but de confronter d'un point de vue statistique les résultats obtenus en simulation avec les mesures effectuées sur le terrain. Si ces résultats sont com-



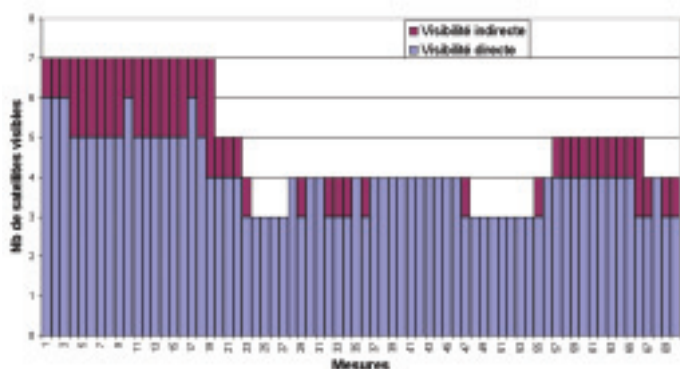


Figure 4 Enregistrée sur site

parables, nous pourrions alors nous livrer à une étude plus fine de la comparaison de ces résultats.

L'étude statistique sur la proportion de signaux reçus après réflexions par rapport à l'ensemble des signaux reçus a montré que le nombre de satellites visibles directement est légèrement plus important en simulation que sur le terrain. En revanche, le taux de satellites visibles indirectement est quasiment identique : 13% en simulation et 17% sur site (figure 4 et 5).

On constate également que le nombre de satellites reçus varie de manière ponctuelle en simulation, alors que sur le terrain, nous observons des plages de mesures consécutives pendant lesquelles la visibilité des satellites ne change pas. Cependant, l'antenne détecte 339 signaux satellitaires sur site, là où seuls 305 sont reçus en simulation. Nous n'avons pas simulé les paramètres de suivi et d'accrochage du récepteur. Sur le terrain, le récepteur mettra un certain temps à traquer les satellites dont la visibilité a été brièvement interrompue. Notre simulation valide la réception d'un signal à l'instant  $t$  si la géométrie est correcte, quelles que soient les conditions de réception à  $t-1$ , et surestime ainsi le nombre total de signaux reçus. La conclusion de cette première partie nous permet d'envisager une étude plus fine des résultats.

#### ■ Etude quantitative

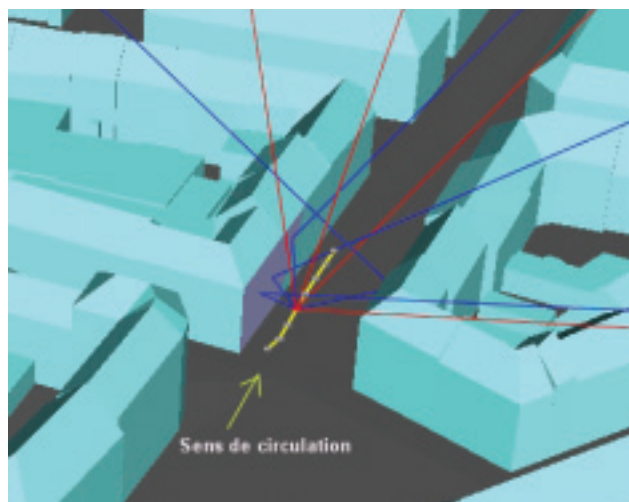


Figure 6 Deuxième trajectoire (9 positions)

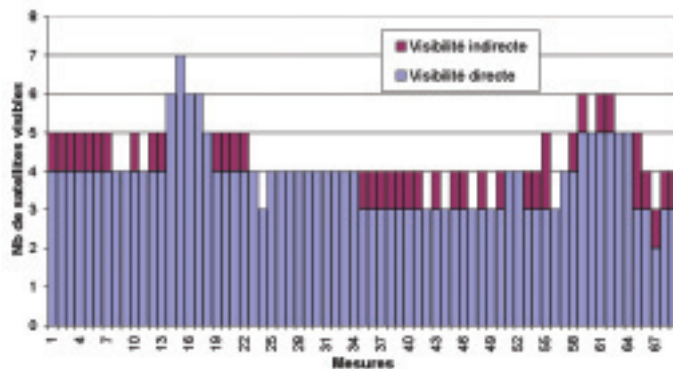


Figure 5 Obtenue en simulation

Les deux autres trajectoires analysées comportent respectivement 8 et 20 points ne nécessitant pas d'interpolation. Elles sont représentées respectivement sur les figures 6 et 7. Les positions des points sont espacées régulièrement, ce qui réduit le décalage de positionnement éventuel entre la mesure réelle et celle simulée. La vitesse de déplacement en simulation est adaptée pour concorder avec les mesures sur site. Leur étude est faite pour chaque position en déterminant l'origine de la visibilité (ou de l'absence de visibilité) des satellites au cas par cas.

On observe que les résultats des simulations du nombre de satellites reçus directement sont proches des mesures. Les différences qui apparaissent ponctuellement (un satellite durant 7 positions de la deuxième trajectoire et un satellite pour la dernière position de la troisième trajectoire) ont pour origine l'imprécision du modèle ou de la trajectoire en simulation.

Par contre, on observe que les satellites dont la visibilité est indirecte en simulation sont peu reçus dans la réalité. Plusieurs hypothèses expliquent ce phénomène : le caractère aléatoire des multitrajets, l'irrégularité des façades où se réfléchissent les signaux (figure 8), l'absence de modélisation de la végétation sur le modèle (figure 9), la diminution de puissance du signal réfléchi, les traitements réalisés par le récepteur,...

#### Conclusion

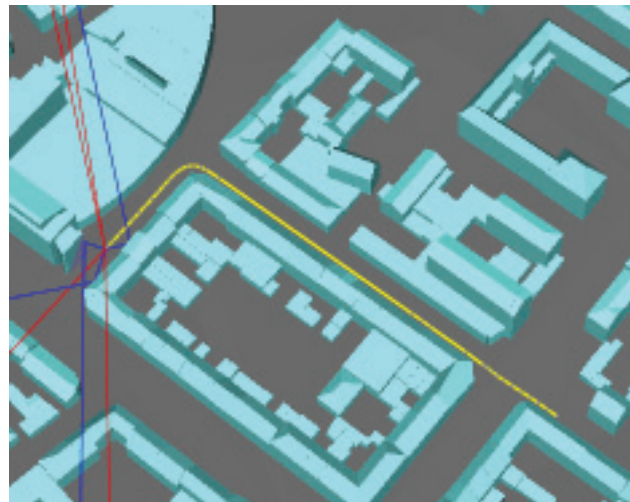


Figure 7 Troisième trajectoire (20 positions)



**Figure 8** Support de la réflexion du signal (coté gauche)

Notre étude a porté sur la validation expérimentale en site connu du logiciel de lancer de rayon Ergospace. Pour cela, nous avons comparé des simulations avec des mesures effectuées sur site à Amiens en implémentant la trajectoire précise du véhicule dans le modèle. Ces comparaisons ont montré que les satellites visibles directement sur le terrain le sont également en simulation. Une surestimation des signaux reçus après réflexion apparaît cependant lors des simulations. Finalement, nous pouvons conclure que les résultats obtenus sont suffisant pour l'utilisation du logiciel qui est faite au laboratoire dans le cadre d'étude sur la localisation et le transport. Ceux ci sont basés sur l'utilisation d'un modèle imparfait (même s'il est très précis) et non texturé, une position de précision métrique dans le cadre de mesures dynamiques. Pour obtenir des résultats satisfaisants dans une gamme d'utilisation plus exigeante en terme de précision (topographie, géodésie,...), il sera alors nécessaire d'utiliser un modèle d'une très grande précision et de paramétrer correctement l'attitude du récepteur lors des simulations.

#### ■ D'autres pistes de recherche permettront d'approfondir cette étude parmi lesquelles :

- une comparaison simulation/réalité sur un site dont la modélisation est très précise et exhaustive,
- une comparaison entre les distances géométriques obtenues en simulation et les pseudo distances correspondantes. Cette étude réalisée notamment sur les trajets reçus après une réflexion permettra de valider les valeurs des retards et donc leur impact sur le calcul de position GPS. Elle sera d'un intérêt majeur pour le laboratoire dans le but d'appréhender de façon très précise les erreurs de localisation en environnement transport. La quantification de ces erreurs permettra d'étudier de nouvelles pistes de recherche d'amélioration des performances de ces systèmes satellitaires.

#### Remerciement

Les auteurs remercient les personnes ayant concourues au bon déroulement de ce projet, notamment M. Martinez, auteur du logiciel Ergospace.

#### Bibliographie



**Figure 9** Support de la réflexion du signal (coté droit)

**Concernant l'INRETS :** [www.inrets.fr](http://www.inrets.fr)

**Concernant le logiciel Ergospace :** [www.ergos-fr.com](http://www.ergos-fr.com)

**Concernant les problèmes de localisation par GPS en milieu masquant :** Localisation de mobiles terrestres par satellites. Mise en œuvre d'outils permettant l'analyse de l'influence des conditions de propagation et des effets de masques sur la disponibilité du service offert Thèse J. Marais juillet 2002

**Concernant la réalisation de modèle numérique de terrain :** Les promesses d'avenir de la télémétrie laser revue Géomètre N. Paparoditis Publi-Topex octobre 2003

**Concernant un projet dont l'INRETS est partenaire :** [www.locoprol.org](http://www.locoprol.org)

#### Contact

**Thomas TIRTAINE**

Elève ingénieur ESGT 2004 - [thomas.tirtaine@laposte.net](mailto:thomas.tirtaine@laposte.net)

**Juliette MARAIS**

Chargée de recherche, INRETS-LEOST  
20, rue E. Reclus - 59650 Villeneuve d'Ascq  
[juliette.marais@inrets.fr](mailto:juliette.marais@inrets.fr)

#### ABSTRACT

*For a better understanding of the multipath errors in GPS measurements within the framework of research in the context of localization applications, the researchers of INRETS use a simulation software (Ergospace) based on a digital elevation model of the environment. This report deals with Ergospace experimental validation. The validation was divided into three steps : checking of the computations performed by the software (DOPs values and satellites position), choice of a digital model elevation and comparisons between measurements on site and simulations.*