



Réflectométrie GNSS : modélisation des trajets des signaux réfléchis à la surface de la mer

■ Nicolas ROUSSEL

Les constellations GNSS américaine (GPS) et russe (GLONASS) cumulent actuellement une cinquantaine de satellites opérationnels qui émettent des signaux exploitables en permanence, et ce, pratiquement n'importe où dans le monde. Au vu de l'utilisation actuelle de la technique de positionnement par satellite, et avec l'avènement du système européen Galileo, la pérennité et l'accessibilité du réseau satellitaire GNSS sont assurées.

L'article présente une nouvelle technique de télédétection opportuniste : la réflectométrie GNSS (GNSS-R) qui utilise les satellites GNSS en étudiant la réflexion des ondes sur la surface de la Terre. Au cours de l'étude, un programme informatique a pu être développé, permettant de simuler différentes configurations de réalisation des mesures et d'installation de l'instrumentation, en modélisant la trajectoire des signaux GNSS réfléchis. Les principaux résultats des simulations seront exposés.

MOTS-CLÉS

Réflectométrie GNSS, télédétection, géodésie, modélisation, simulation

Contexte et objectifs de l'étude

La Terre et son champ de gravité subissent des variations au cours du temps qui peuvent être de nature séculaire, périodique ou soudaine et qui se produisent à des échelles globale, régionale ou locale, selon les cas. La mesure de ces variations est primordiale et permet un suivi régulier des masses d'eau, nappes phréatiques et manteau neigeux ou glaciaire par exemple. La géodésie, définie par Friedrich Helmert comme "la science qui mesure et représente la surface terrestre", ainsi que la géophysique et l'océanographie qui utilisent les mesures géodésiques pour appréhender et quantifier les transports des masses d'eau, sont donc des domaines scientifiques qui se situent au centre d'enjeux sociétaux majeurs puisqu'ils permettent de mieux appréhender la planète sur laquelle nous vivons et de comprendre les mécanismes qui en définissent son fonctionnement.

Les premières observations précises de la surface océanographique commen-

cent avec des mesures *in situ* grâce à des bouées GPS ou des radars embarqués. Durant les vingt dernières années, de nouveaux instruments de télédétection ont permis d'améliorer les systèmes de mesures, avec notamment l'apparition de diffusiomètres, de radars à synthèse d'ouverture, ou d'altimètres radar. Mon étude s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre d'une nouvelle technique d'observation : la réflectométrie GNSS (GNSS-R), qui offre un potentiel très important dans ce domaine. Cet outil de télédétection opportuniste, basé sur l'analyse des signaux GNSS réfléchis, est très prometteur puisqu'il permet non seulement d'assurer des mesures altimétriques continues avec une couverture spatiale illimitée mais également d'apporter des informations sur la nature et les caractéristiques de la surface de réflexion : il est ainsi possible de déterminer la rugosité de la surface de la mer par réflectométrie GNSS, ce qui permet de déduire différents paramètres directement corrélés comme la vitesse du vent ou la hauteur des vagues. Une autre illustration des appli-

cations de cette technique est le travail réalisé en 2010 par R. Stosius et ses collaborateurs concernant la détection de tsunamis par GNSS-R (Stosius R. et al, 2010). Mais le potentiel de cet outil ne s'arrête pas au domaine maritime puisqu'il est possible de déduire de l'analyse du signal réfléchi des paramètres tels que l'humidité du sol, en domaine continental.

L'objectif de l'étude est de déterminer les potentialités du GNSS-R pour la "cartographie" des caractéristiques de la surface de réflexion en se basant sur les résultats de modélisations de la trajectoire des ondes GNSS réfléchies à la surface de la Terre, pour différentes configurations (variations de l'altitude du récepteur, effets de masque dus au relief, configuration géométrique des satellites...).

Il s'agit donc de réaliser un simulateur permettant de déterminer les positions des points de réflexion spéculaire au cours du temps afin de tester différentes configurations de réalisation des mesures et d'installation de l'instrumentation.

Télédétection de la surface de la mer par réflectométrie GNSS (GNSS-R)

La réflectométrie GNSS est une méthode de télédétection originale qui consiste à récupérer les signaux électromagnétiques émis en continu par les satellites des systèmes GNSS, puis à analyser la corrélation ou le retard de phase entre les signaux directs et ceux réfléchis sur la surface de la Terre afin d'en déduire un certain nombre de paramètres. On parle de système bistatique passif ; le terme passif indiquant que le système mis en place





n'émet aucun signal, mais se contente "d'écouter", tandis que le terme bi-statique signifie que l'émetteur et le récepteur sont situés à deux endroits différents dans l'espace (Cardellach-Gali, 2001). L'analyse de la différence de trajet entre signaux directs et réfléchis permet d'estimer la hauteur entre la surface réfléchissante et le récepteur et de déterminer la position du point de réflexion au cours du temps (Guo et al., 2012 ; Löfgren et al., 2011). L'analyse des échos radar (ou formes d'onde) réfléchis permet de caractériser la rugosité de la surface et d'en déduire des paramètres tels que l'humidité des sols ou la hauteur des vagues sur l'océan (Ferrazzoli et al., 2010 ; Löfgren et al., 2010). Cette technique s'appuie sur les constellations GNSS sans mettre en œuvre d'autres missions satellitaires. Elle offre de ce fait une certaine pérennité de mesures associée à une couverture dense et continue. La principale limitation d'un tel système réside dans la précision des hauteurs obtenues (< 10 cm), mais cette précision peut être compensée par le cumul des observations.

L'ESA (European Space Agency) proposa le concept de réflectométrie GNSS pour la première fois en 1993 sous la dénomination de PARIS : *P*Assive *R*eflectometry and *I*nterferometry *S*ystem (Rius et al., 2010). Ce concept très prometteur a depuis lors fait l'objet de nombreuses études.

Réflexion des ondes GNSS sur la surface de la mer

Les propriétés électromagnétiques de l'eau de mer sont déterminées par sa permittivité ϵ et sa perméabilité μ .

On peut approximer sa perméabilité à la perméabilité du vide : $\mu = \mu_0$, et une valeur typique de la permittivité relative de l'eau de mer pour un champ magnétique incident de longueur d'onde proche de 19 cm (ondes GNSS L1) est : $\epsilon_r = 73,0 + i 57,5^{(1)}$.

La valeur élevée de la partie imaginaire de la permittivité relative, étroitement

(1) Avec de légères variations en fonction de la salinité et de la température de l'eau.

liée à la conductivité, va amener l'eau de mer à avoir un comportement proche d'un conducteur parfait en ce qui concerne les bandes GNSS. Ceci engendre une forte réflectance ($> 60\%$) : l'océan agit ainsi comme un miroir pour ce type d'onde.

Il est intéressant de noter que les ondes émises par les satellites GPS sont des micro-ondes de type L (L1 : 1575.42 MHz et L2 : 1227.60 MHz), qui sont RHCP, ce qui veut dire que leur polarisation est circulaire droite. Ainsi, une antenne à polarisation circulaire gauche (LHCP) ne sera pas sensible aux signaux GPS RHCP. Cependant, comme stipulé dans le paragraphe précédent, l'interface air/eau présente un fort contraste de conductivité, et la surface de la mer agit comme un miroir pour les ondes GPS. Ceci a pour effet de modifier l'orientation de la polarisation des ondes GPS réfléchies qui ne seront plus RHCP mais deviendront LHCP après réflexion. Ainsi, l'antenne devra être de type RHCP pour recevoir le signal direct, et de type LHCP pour capter le signal réfléchi.

Réflectomètre GNSS

Concept et principe

Un réflectomètre GNSS se compose de deux antennes GNSS montées dos à dos sur un axe horizontal fixé au-dessus de la surface à étudier. Les deux antennes, le centre de la Terre et le satellite sont situés dans un même plan. L'antenne du dessus capte le signal directement émis par le satellite, tandis que l'antenne du dessous capte le signal qui a été réfléchi sur la surface. Comme on peut le voir schématiquement sur la *figure 1*, chaque satellite GNSS émet des signaux qui sont reçus à la fois directement par l'antenne A (de type RHCP) mais également par l'antenne B (de type LHCP) après réflexion sur la surface de la mer au point de réflexion spéculaire P.

Soit $\Delta\delta_{AB}(t)$ la distance supplémentaire parcourue par l'onde émise par le satellite j et réfléchi sur la surface de la mer. Ce retard de l'onde réfléchie revient à considérer une antenne fictive B' située à la verticale de A et de B. Cette antenne virtuelle B' sera située à la même distance h sous la surface de

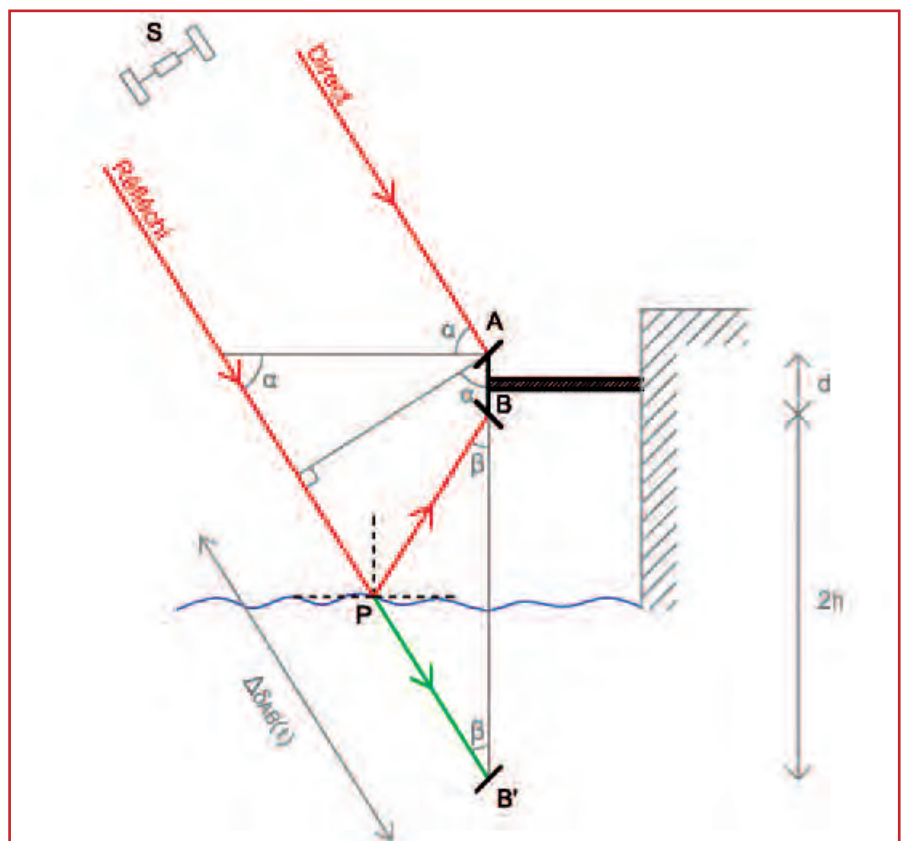


Figure 1. Principe de la réflectométrie GNSS



Figure 2. Réflectomètre Oceanpal de Starlab

l'eau que l'antenne B est située au-dessus de la surface. Un changement de la hauteur de l'eau entraînerait une modification de la distance $\Delta\delta_{AB}(t)$ ce qui provoquerait un décalage vertical de l'antenne virtuelle B'. C'est sur ce principe qu'est calculée la hauteur h.

Calcul de la hauteur du récepteur

Il existe différentes méthodes pour déterminer la hauteur de la surface de la mer par rapport à une surface de référence. Chacune de ces méthodes diffère par le processus de mesure et donnera des résultats plus ou moins précis.

Ces méthodes sont au nombre de trois (Helm, 2008) :

- altimétrie basée sur la mesure de code C/A
- altimétrie basée sur la fréquence interférométrique
- altimétrie basée sur la mesure de phase

Altimétrie basée sur la mesure de code C/A (Helm, 2008)

Cette méthode est la même que celle utilisée pour déterminer la pseudo-distance dans une réception GNSS classique. Le signal réfléchi arrive au récepteur avec un certain retard temporel par rapport au signal direct. De la même manière que pour une réception GNSS classique, la mesure de ce retard temporel s'effectue sur le code C/A de

l'onde L1. Le récepteur RHCP présentera un pic de corrélation entre l'onde reçue et la réplique connue du code PRN à un certain instant t_0 tandis que le récepteur LHCP présentera le pic de corrélation à un instant $t_0 + \tau$. Il suffira de mesurer τ pour connaître la différence temporelle. Connaissant avec précision la vitesse de l'onde porteuse on peut traduire ce retard temporel en terme de distance : $\Delta\delta_{AB}(t)$.

On peut ensuite en déduire la hauteur h du récepteur par rapport à la surface de réflexion par la relation suivante, avec α l'élévation du satellite, $\Delta\delta_{AB}(t)$ la distance supplémentaire parcourue par l'onde réfléchie et d la base verticale séparant les centres de phase des deux antennes A et B :

$$\Delta\delta_{AB}(t) = (2h + d) \cdot \sin(\alpha) \quad [2.1]$$

De la même manière que pour la réception GNSS classique, cette méthode est grossière et la précision que l'on peut escompter est limitée à quelques mètres.

Altimétrie basée sur la fréquence interférométrique (Helm, 2008)

Lorsque des ondes électromagnétiques sont cohérentes, on peut observer des interférences. La cohérence est la mesure de la capacité d'ondes à donner naissance à des interférences du fait de l'existence d'une relation de phase définie. Dans le cas qui nous intéresse, l'onde GNSS directe et

l'onde GNSS réfléchie peuvent être considérées comme cohérentes puisqu'il s'agit en fait de la même onde déphasée. Étant donné que la position du satellite (et éventuellement du récepteur) varie au cours du temps, le retard de l'onde réfléchie va légèrement varier au cours du temps. Au niveau du récepteur, les deux signaux se superposent l'un l'autre et des interférences constructives ou destructives vont avoir lieu en raison de la propriété de cohérence qui les lie. Soit f_i la fréquence d'interférence du signal réfléchi, λ_{L1} la longueur d'onde, ϕ le déphasage entre le signal direct et le signal réfléchi et N l'ambiguïté entière. On a :

$$\delta(t) = \lambda_{L1} \times \phi(t) + \lambda_{L1} \times N \quad [2.2]$$

En dérivant cette équation [2.2] par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{d\delta}{dt} = \lambda_{L1} \times \frac{d\phi}{dt} = \lambda_{L1} \times f_i \quad [2.3]$$

De la même manière, en dérivant l'équation [2.1] par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d[(2h+d) \times \sin(\alpha)]}{dt} = (2h+d) \times \cos(\alpha) \times \frac{d\alpha}{dt} \quad [2.4]$$

En égalisant les équations [2.3] et [2.4], on obtient :

$$\lambda_{L1} \times f_i = (2h+d) \times \cos(\alpha) \times \frac{d\alpha}{dt}$$

Et donc :

$$h = \frac{(\lambda_{L1} \times f_i) / (2 \times \cos(\alpha) \times \frac{d\alpha}{dt})}{2} - \frac{d}{2} \quad [2.5]$$

Par une mesure précise du temps et de la position du récepteur et du transmetteur, il est possible de calculer α et $\frac{d\alpha}{dt}$.

La fréquence d'interférence f_i est déterminée par analyse spectrale du signal reçu. On peut donc déduire la hauteur h à partir de l'équation [2.5]. La précision obtenue est seulement métrique en raison de l'estimation de la fréquence d'interférence.

Dans cette démonstration, la Terre était supposée plane. Le principe de calcul est le même en considérant une Terre sphérique.

Altimétrie basée sur la mesure de phase (Löfgren et al., 2011)

De manière similaire à la mesure de phase pour un récepteur GNSS classique,





on peut établir l'équation suivante :

$$\lambda_{L1} \times \Delta\varphi_{AB}(t) = \Delta\delta_{AB}(t) - \lambda_{L1} \times \Delta N_{AB}(t) + c \times \Delta\tau_{AB}(t)$$

Avec $\Delta\tau_{AB}(t)$ le biais d'horloge entre les deux récepteurs.

Les effets troposphériques et ionosphériques sont négligés puisque la ligne de base entre les deux récepteurs est courte et on peut supposer que ces effets sont supprimés par simple différence.

Après détermination de l'ambiguïté entière $\Delta N_{AB}(t)$ et du déphasage $\Delta\varphi_{AB}(t)$, on peut aisément déterminer la distance $\Delta\delta_{AB}(t)$. La détermination de l'ambiguïté entière est ici beaucoup plus aisée qu'en réception GNSS classique, puisque dans notre cas, la position du récepteur est connue et considérée comme fixe.

La suite est alors la même que pour la mesure de code : on utilise la relation [2.1] pour calculer la hauteur de la surface par rapport au récepteur. Connaissant l'altitude de la station, l'obtention de l'altitude de la surface de la mer sera immédiate. La précision de la hauteur obtenue par cette méthode est théoriquement de l'ordre du décimètre.

Modélisation & expérimentations

Pour le développement du simulateur, notre choix s'est porté sur le langage de programmation GNU R, généralement utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique. L'intérêt majeur de ce langage réside dans sa distribution selon les termes de la licence GNU GPL qui font de R un logiciel libre, disponible sous toutes les plates-formes GNU/Linux, FreeBSD, NetBSD, OpenBSD, Mac OS et Windows.

■ Calcul de la position des points de réflexion spéculaire

Trois méthodes différentes permettant de déterminer les coordonnées des points de réflexion spéculaire ont été implémentées. Elles se basent toutes sur l'égalité de l'angle d'incidence avec l'angle réfléchi.

Approximation de la Terre en un ellipsoïde : algorithme proposé par Scott Gleason dans sa thèse (Gleason, 2006). La recherche de la position du point de réflexion s'effectue par itérations en déplaçant le point de réflexion temporaire dans le plan formé par le centre de la Terre, le récepteur et le satellite, jusqu'à trouver l'écart angulaire minimal entre le trajet incident et le trajet réfléchi.

Approximation de la Terre en une sphère : algorithme proposé par Achim Helm dans sa thèse (Helm, 2008). La recherche de la position du point de réflexion s'effectue par résolution d'une équation du quatrième degré donnant directement la position. Un processus itératif (méthode de Newton par exemple) est également nécessaire pour résoudre l'équation.

Prise en compte d'un MNT : la prise en compte d'un MNT permet non seulement d'intégrer les phénomènes de masques, mais également de calculer une position des points de réflexion s'approchant plus de la réalité en intégrant le relief du terrain. La première méthode présentée ici calcule une réflexion sur un ellipsoïde local tandis que la deuxième s'appuie sur une sphère locale. Un algorithme de calcul de réflexion permettant de prendre en compte un MNT de type SRTM par

exemple a donc été développé, en se basant sur une méthode itérative assimilable à celle approximant la Terre en un ellipsoïde.

■ Visualisation des résultats

L'objectif principal du simulateur est de pouvoir déterminer la position des points de réflexion dans différents types de configuration. Le programme développé dans ce projet créant des fichiers au format kml, il est dès lors possible d'utiliser toutes les fonctionnalités de visualisation de Google Earth : il est très pratique par exemple d'utiliser le curseur de sélection du temps de Google Earth, afin de visualiser les résultats de la simulation à certains instants donnés, ou au contraire, en cumulant sur plusieurs heures.

Visualisation de la position des points de réflexion

Les figures 3 et 4 montrent les résultats d'une simulation effectuée sur le phare de Cordouan ($45^{\circ}35'11''N$; $1^{\circ}10'24''O$), en positionnant le réflectomètre à une hauteur de 40 mètres au-dessus du niveau de la mer, avec un pas d'échantillonnage de quinze minutes (éphéméride donnant la position des satellites réactualisée toutes les quinze minutes). On peut premièrement constater que la surface de réflexion s'étend sur un

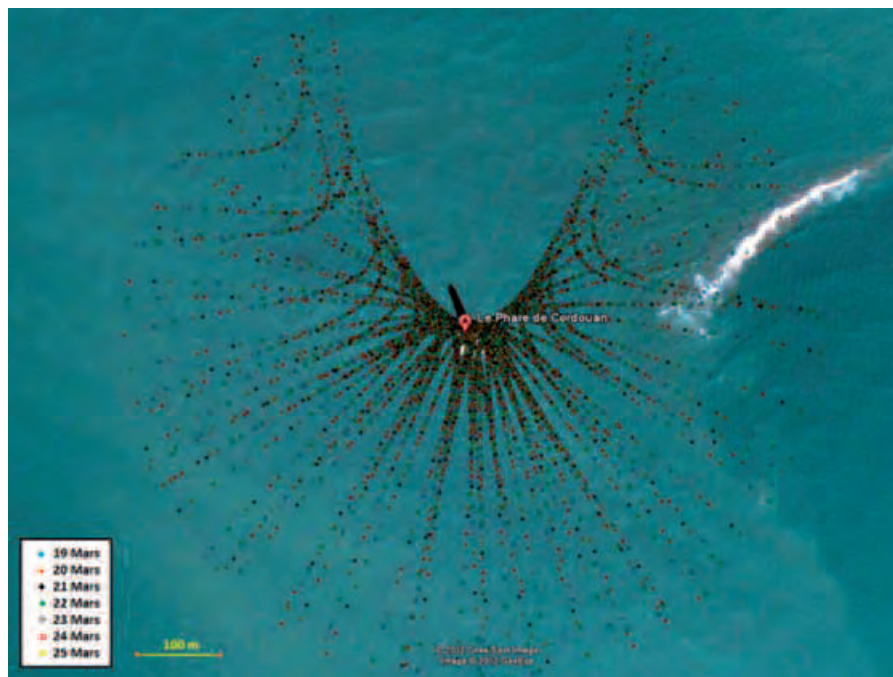


Figure 3. Simulation sur une semaine (19 au 25 mars 2012)



cercle d'un diamètre de l'ordre du kilomètre. On peut également observer l'absence de points de réflexion au Nord : ceci est tout à fait normal étant donné que les orbites des satellites GPS et GLONASS ne passent jamais à la verticale des latitudes élevées. On veillera donc sur le terrain à orienter le réflectomètre vers le Sud pour augmenter les chances de mesurer un maximum de réflexions.

Visualisation des satellites

Le simulateur développé permet également de visualiser les positions des satellites qui ont fait l'objet de mesures au cours du temps. Ainsi, la *figure 5* montre l'ensemble des positions occupées par les satellites visibles par le récepteur (phare de Cordouan), au cours de la journée de simulation (23 mars), avec une fréquence de 15 minutes. Cette visualisation permet de bien se rendre compte de l'orbite des satellites et met bien en évidence l'absence de satellites dans les latitudes élevées.

Visualisation de la trajectoire des ondes

Enfin, il est très intéressant de visualiser la trajectoire des ondes directes et réfléchies. En utilisant les bâtiments en 3D de GoogleEarth, il est possible de parvenir à des résultats visuels tout à fait satisfaisants (voir *figure 6*).

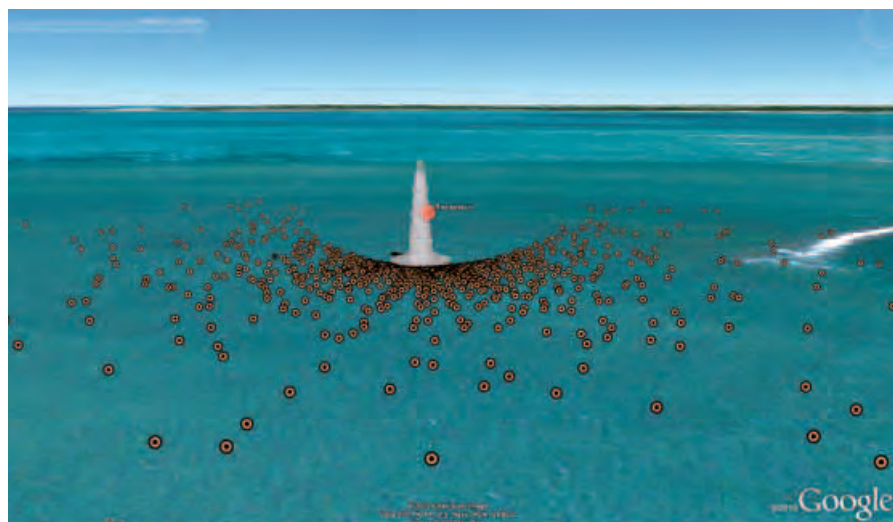


Figure 4. Simulation sur une journée (23 mars 2012)



Figure 5. Visualisation de la position des satellites – simulation sur le phare de Cordouan

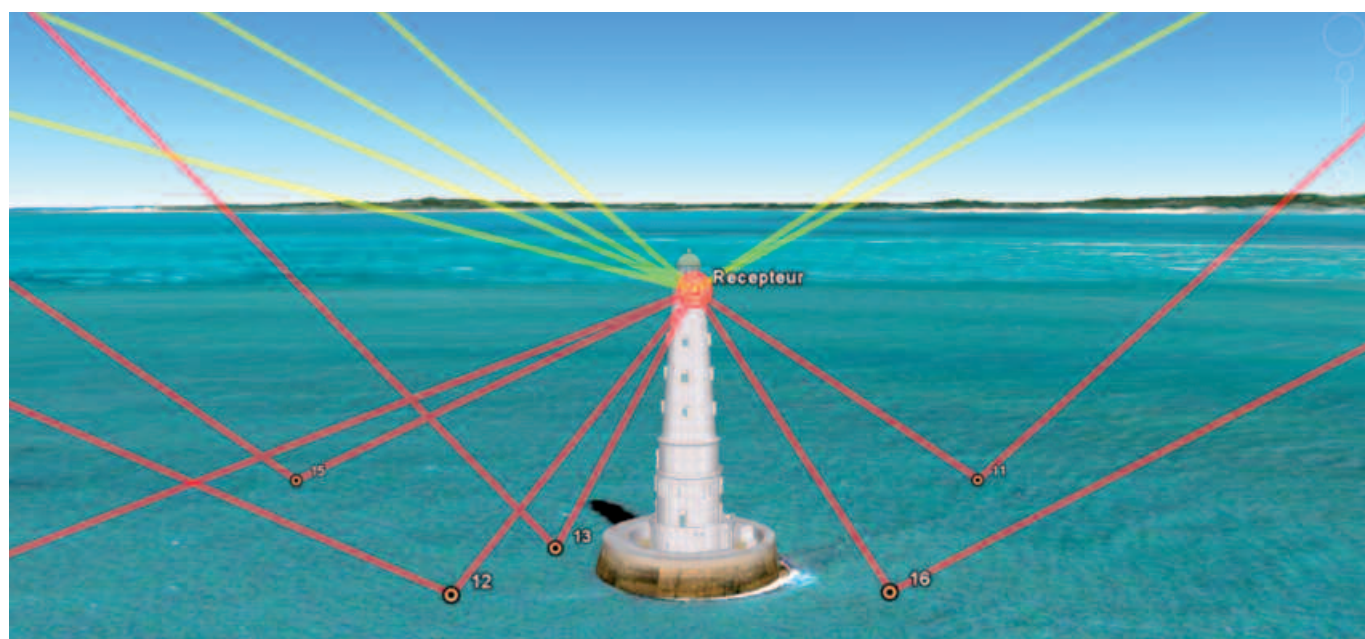


Figure 6. Visualisation de la trajectoire des ondes – simulation sur le phare de Cordouan



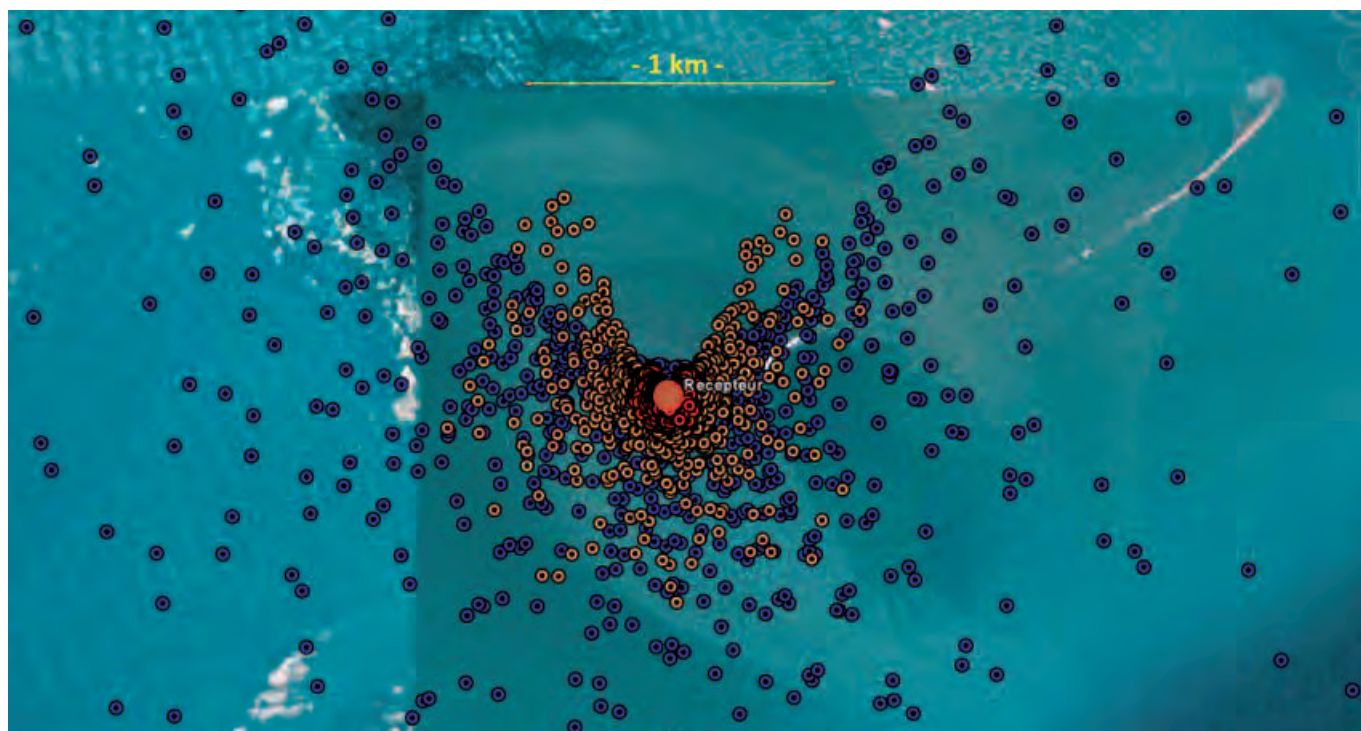


Figure 7. Hauteur du récepteur de 10 mètres (rouge), de 65 mètres (orange) et de 400 mètres (bleu)



■ Influence de la hauteur du récepteur et de l'angle d'élévation du satellite

Trois séries de simulations sur le phare de Cordouan ont été réalisées, en positionnant un réflectomètre fictif à une hauteur respective de 10, 65 et 400 mètres. Ces trois séries ont toutes été réalisées en prenant en compte les satellites GPS, mais également ceux de la constellation GLONASS, en actualisant la position des satellites toutes les quinze minutes, pendant 24 heures (le 23 mars 2012), et en utilisant tour à tour les trois algorithmes de calcul (algo-

rithme approximant la Terre en un ellipsoïde, algorithmes approximant la Terre en une sphère, et prise en compte d'un MNT).

En moyennant les résultats obtenus par les trois algorithmes différents, on peut constater que la distance (longueur d'arc) séparant le récepteur du point de réflexion le plus éloigné est de :

- 110,6 mètres pour une hauteur du récepteur de 10 mètres
- 725,7 mètres pour une hauteur du récepteur de 65 mètres
- 4 354,2 mètres pour une hauteur du récepteur de 400 mètres

Il est bon de remarquer que la carte des points de réflexion obtenue pour une hauteur de récepteur élevée sera en fait la même que celle obtenue pour une hauteur de récepteur plus faible, mais plus étirée : dès lors, plus la hauteur du récepteur sera élevée, plus la taille de la zone "mesurable" sera grande, mais moins la couverture des données au sol sera dense (moins de points de réflexion par unité de surface).

En réitérant de nombreuses simulations de ce type, on a pu parvenir à un résultat graphique permettant de mettre en évidence la variation de l'éloi-

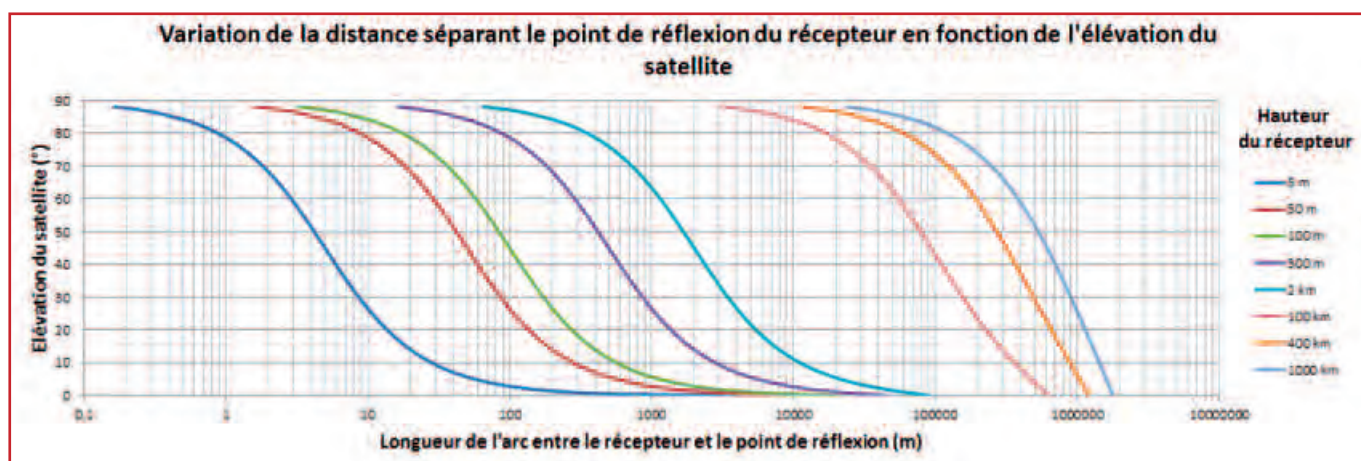


Figure 8. Eloignement des points de réflexion en fonction de l'élévation du satellite, pour différentes hauteurs du récepteur

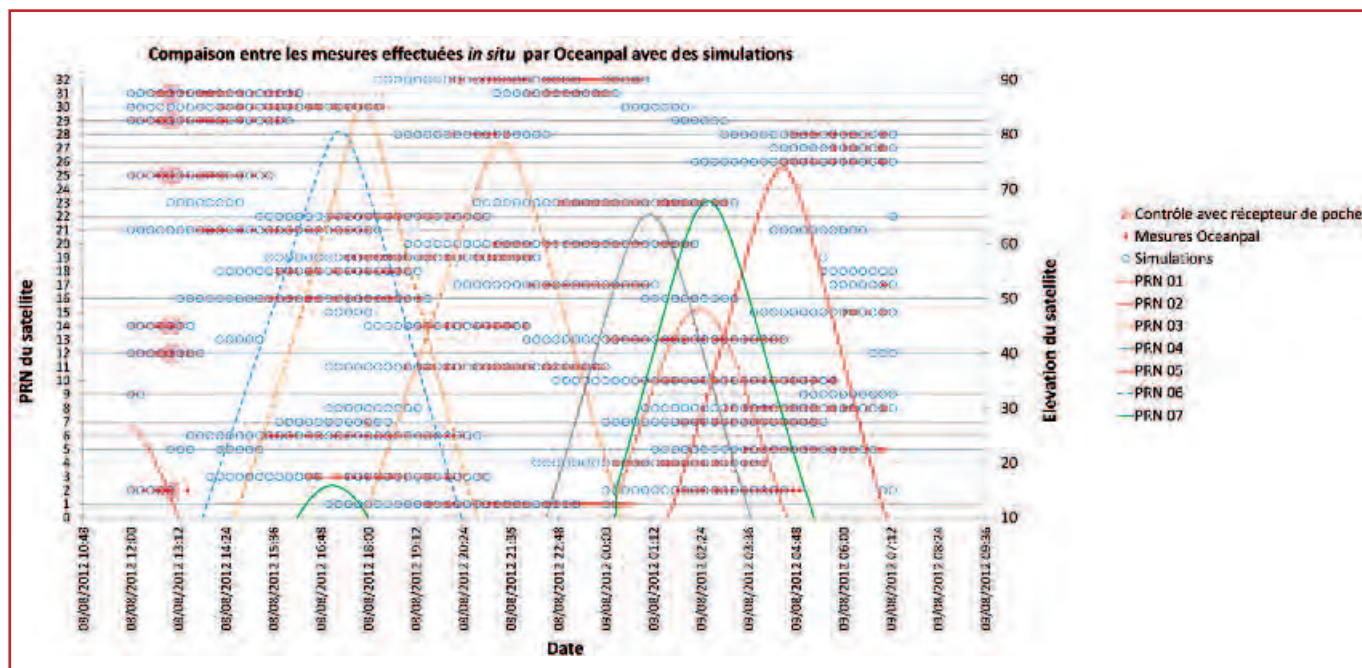


Figure 9. Comparaison des satellites visibles *in situ* avec ceux théoriques issus d'une simulation

gnement du point de réflexion par rapport au récepteur, en fonction de l'élévation du satellite, et pour différentes hauteurs de récepteur (figure 8). On peut constater que plus l'angle d'élévation du satellite est élevé, plus le point de réflexion est proche du récepteur, et inversement.

■ Comparaison des simulations avec une campagne de mesure

Une série d'acquisitions a été réalisée pendant presque 24 heures (entre le 8 et le 9 août 2012) en disposant un réflectomètre de type Oceanpal (développé par la société Starlab) sur le toit de l'Observatoire Midi-Pyrénées à Toulouse à 1,40 mètre au-dessus du sol. La figure 9 montre les satellites ayant fait l'objet d'acquisitions durant cette campagne de mesure, ainsi que ceux pouvant théoriquement être à l'origine de réflexions visibles par le récepteur (résultats issus du simulateur). On a également représenté l'élévation de quelques satellites. L'élévation de tous les satellites n'a pas été tracée afin de ne pas surcharger la figure.

On peut tirer plusieurs conclusions de cette comparaison.

On peut premièrement valider les résultats donnés par le simulateur

étant donné la concordance de ses estimations avec les mesures effectivement réalisées : tous les satellites visibles par le réflectomètre sur le terrain étaient prédits par le simulateur, sauf quelques rares exceptions.

Ces exceptions ne concernent cependant que quelques minutes de mesures avant que le satellite ne soit masqué, et il est tout à fait possible que le multitrajet explique le fait que ces satellites soient visibles sur le terrain, mais non prévus par le simulateur. Cependant, la majorité de ces exceptions est due au masque de visibilité appliqué durant la simulation qui filtre les satellites d'élévation supérieure à 85° ou inférieure à 5° (valeurs par défaut programmées dans le simulateur). Ce graphique montre donc que ce masque est sans doute légèrement trop élevé, puisque des satellites d'élévation en dehors de la plage [5° - 85°] ont fait l'objet de mesures.

On peut également constater la présence de quelques "trous" dans les simulations (par exemple pour le satellite PRN 03) où les satellites apparaissent puis disparaissent quelque temps avant de réapparaître, ce qui pourrait être compréhensible pour des mesures *in situ*, qui ne sont pas à l'abri d'un masque, mais ce n'est pas le cas du simulateur. Les trous de plusieurs

heures sont normaux, et correspondent au fait que les satellites sont visibles plusieurs fois au même endroit dans la même journée. En revanche, les trous plus petits (de quelques dizaines de minutes) sont sans doute dus au masque appliqué lors de la simulation. Comme on peut le voir par exemple pour le satellite PRN 03, le trou coïncide avec le moment où l'élévation du satellite est supérieure à 85°. Cela confirme donc la prise en compte du masque paramétré lors de la simulation : en l'occurrence, ici ce masque n'avait pas lieu d'être puisque le réflectomètre a réussi à acquérir des données de ce satellite même lorsque son élévation était supérieure à 85°.

Concernant l'appareil Oceanpal, on peut observer qu'il prend des mesures de réflexion des ondes de la totalité des satellites disponibles. On constate cependant que de nombreux satellites sont visibles d'après le simulateur, mais n'ont pas fait l'objet de mesures durant une certaine période : ceci est dû au fait que les conditions de terrain ne sont pas celles théoriques du simulateur, et des mauvaises réflexions, des masques ou des multitrajets expliquent le fait que des satellites n'ont pas fait l'objet de mesures à chaque instant théoriquement possible.

Enfin, comme on peut le voir sur la



figure 9, on a également contrôlé les satellites visibles en disposant un récepteur GNSS de randonnée (de type Garmin, précision maximale de 5-6 mètres) au niveau du réflectomètre, et on peut constater que les satellites visibles par ce récepteur à cet instant sont bien les mêmes que ceux ayant fait l'objet de mesures par le réflectomètre.

Conclusion et perspectives

La technique de télédétection opportuniste par réflectométrie GNSS qui se base sur l'analyse de la réflexion des ondes émises par les satellites GNSS a de très nombreuses applications scientifiques : suivi des niveaux d'eau côtier et continental, détermination des propriétés des surfaces maritimes ou continentales, détection de tsunamis, cartographie locale du géoïde, détection d'objets sur la surface océanique, etc. On peut également souligner les nombreux avantages de ce système d'observation par rapport aux techniques plus classiques : suivi spatio-temporel des observations, continuité et pérennité du système assurées, informations sur la nature et les caractéristiques de la surface de réflexion, système passif, etc. Afin d'être complet et objectif, il convient cependant de noter également les réserves émises dans diverses sources bibliographiques concernant la faible précision des résultats altimétriques obtenus (< 10 cm).

Le simulateur développé dans le cadre de cette étude a fait l'objet de nombreux tests, qui n'ont pas pu tous être présentés dans cet article. Une étude comparative des résultats donnés par les différents algorithmes a par exemple mis en évidence le fait que la précision des résultats (dans ce cas, correspondant à l'écart entre les positions obtenues par les différents algorithmes) est étroitement liée à l'élévation du satellite : plus l'élévation est faible, plus l'écart entre les positions obtenues par les différents algorithmes sera important. A titre informatif, en filtrant les satellites d'élévation inférieure à 12 degrés, les écarts moyens sont de l'ordre d'une dizaine de centimètres

pour une hauteur de récepteur de 10 mètres et de 2,5 mètres pour une hauteur de 400 mètres.

D'autres tests non présentés dans cet article ont permis de vérifier la bonne prise en compte du relief lors de l'intégration d'un MNT.

Une comparaison des résultats issus du simulateur avec une campagne de mesure a permis de valider les résultats du simulateur qui apparaissent cohérents par rapport aux mesures effectuées *in situ*. On peut cependant noter que le simulateur ne prend pas en compte la déformation de la trajectoire des ondes lors de la traversée de l'atmosphère. On peut ainsi imaginer intégrer un modèle atmosphérique lors du calcul de la position des points de réflexion dans une prochaine version du simulateur... ●

Contacts

Nicolas ROUSSEL
nicolas.rousseau@get.obs-mip.fr

Frédéric FRAPPART,
Guillaume RAMILLIEN,
Félix PEROSANZ,
Richard BIANCALE

Références bibliographiques

- Cardellach-Gali E., 2001. *Sea surface determination using gnss reflected signals*. Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.
- Ferrazzoli P., Guerriero L., Pierdicca N., et Rahmoune R., 2010. *Forest biomass monitoring with gnss-r : Theoretical simulations*. Advances in Space Research.
- Gleason S., 2006. *Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered gnss signals from low earth orbit*. State University of New York at Buffalo - Stanford University.
- Guo J., Yang D., Ling K., Shao D., et Zhang Y., 2012. *Geometry and accuracy of specular points in gps-reflection altimetry*. Chinese Journal of Electronics, Vol.21, No.1.
- Helm A., 2008. *Ground-based gps altimetry with the L1 open gps receiver using carrier phase-delay observations*

of reflected gps signals. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

Löfgren S., Haas R., et Scherneck H.G., 2010. *Sea-level analysis using 100 days of reflected gnss signals*. Space Reflectometry.

Löfgren J.S., Haas R., Scherneck H.G., et Bos M., 2011. *Three months of local sea level derived from reflected gnss signals*. Radio Science, Vol.46.

Rius A., Cardellach E., et Martin-Neira M., 2010. *Altimetric analysis of the sea-surface gps reflected signals*. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, Vol.48, No.4.

Stosius R., Beyerle G., Helm A., Hoechner A., et Wickert J., 2010. *Simulation of space-borne tsunami detection using gnss-reflectometry applied to tsunamis in the indian ocean*. Natural Hazards and Earth System Sciences.

ABSTRACT

Key words: GNSS reflectometry, remote sensing, geodesy, modelisation, simulation

The American (GPS) and Russian (GLONASS) GNSS constellations are comprised of about fifty operational satellites which send permanently exploitable signals practically anywhere in the world. In light of the importance of the current use of the technique of satellite positioning and the arrival of the European system Galileo, the sustainability and the accessibility of the GNSS satellite network is insured. This article takes part in the development of a new technique of opportunist remote sensing: reflectometry GNSS (GNSS-R) which uses GNSS satellites by studying the reflection of the GNSS wave on the surface of the Earth. During the study, an IT program was developed, simulating various configurations of measurements and the installation of the instrumentation by modelling the trajectory of the reflected GNSS signals. The main results of the simulations will be presented.