Application de la réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre

Nicolas Roussel

▶ **To cite this version:**

Nicolas Roussel. Application de la réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre. Géologie appliquée. Universite Toulouse III Paul Sabatier, 2015. Français. NNT : . tel-01302838

HAL Id: tel-01302838

https://theses.hal.science/tel-01302838

Submitted on 15 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *Université Toulouse III - Paul Sabatier*
Spécialité : *Télédétection et Géodésie Spatiale*

Présentée et soutenue le *26 novembre 2015* **par :**

NICOLAS ROUSSEL

Application de la réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre

---

JURY

SERGE CHAUZY	Professeur d'Université	Président du Jury
GUILLAUME RAMILLIEN	Chargé de Recherche	Directeur de thèse
FRÉDÉRIC FRAPPART	Physicien Adjoint	Co-Directeur de thèse
ADRIANO CAMPS	Professeur d'Université	Rapporteur
ESTEL CARDELLACH GALI	Chargée de Recherche	Rapporteur
MICHEL KASSER	Professeur d'Université	Examinateur
MAXIMILIAN SEMMLING	Chercheur	Examinateur
JOSÉ DARROZES	Maître de conférences	Invité
RICHARD BIANCALE	Chef de service CNES	Invité

École doctorale :
Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)
Unité de Recherche :
Géosciences Environnement Toulouse (GET - UMR 5563)
Directeur(s) de Thèse :
Guillaume RAMILLIEN et *Frédéric FRAPPART*
Rapporteurs :
Adriano CAMPS et *Estel CARDELLACH GALI*

"Le bruit des uns
est la musique des autres."

— Pascal G.

Résumé

La **réflectométrie GNSS** (ou **GNSS-R**) est une technique de télédétection originale et *opportuniste* qui consiste à analyser les ondes électromagnétiques émises en continu par la soixantaine de satellites des systèmes de positionnement GNSS (GPS, GLONASS, etc.), qui sont captées par une antenne après réflexion sur la surface terrestre. Ces signaux interagissent avec la surface réfléchissante et contiennent donc des informations sur ses propriétés. Au niveau de l'antenne, les ondes réfléchies interfèrent avec celles arrivant directement des satellites. Ces interférences sont particulièrement visibles dans le rapport signal-sur-bruit (SNR, i.e., *Signal-to-Noise Ratio*), paramètre enregistré par une station GNSS classique. Il est ainsi possible d'inverser les séries temporelles du SNR pour estimer des caractéristiques du milieu réfléchissant. Si la faisabilité et l'intérêt de cette méthode ne sont plus à démontrer, la mise en œuvre de cette technique pose un certain nombre de problèmes, à savoir quelles précisions et résolutions spatio-temporelles peuvent être atteintes, et par conséquent, quels sont les observables géophysiques accessibles.

Mon travail de thèse a pour objectif d'apporter des éléments de réponse sur ce point, et est axé sur le développement méthodologique et l'exploitation géophysique des mesures de SNR réalisées par des stations GNSS classiques.

Je me suis focalisé sur l'estimation des variations de hauteur de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante (altimétrie) et de l'humidité du sol en domaine continental. La méthode d'inversion des mesures SNR que je propose a été appliquée avec succès pour déterminer les variations locales de : (1) la hauteur de la mer au voisinage du phare de Cordouan du 3 mars au 31 mai 2013 où les ondes de marées et la houle ont pu être parfaitement identifiées ; et (2) l'humidité du sol dans un champ agricole à proximité de Toulouse, du 5 février au 15 mars 2014. Ma méthode permet de s'affranchir de certaines restrictions imposées jusqu'à présent dans les travaux antérieurs, où la vitesse de variation verticale de la surface de réflexion était supposée négligeable. De plus, j'ai développé un simulateur qui m'a permis de tester l'influence de nombreux paramètres (troposphère, angle d'élévation du satellite, hauteur d'antenne, relief local, etc.) sur la trajectoire des ondes réfléchies et donc sur la position des points de réflexion.

Mon travail de thèse montre que le GNSS-R est une alternative performante et un complément non négligeable aux techniques de mesure actuelles, en faisant le lien entre les différentes résolutions temporelles et spatiales actuellement atteintes par les outils classiques (sondes, radar, diffusiomètres, etc.). Cette technique offre l'avantage majeur d'être basé sur un réseau de satellites déjà en place et pérenne, et est applicable à n'importe quelle station GNSS géodésique, notamment celles des réseaux permanents (e.g., le RGP français). Ainsi, en installant une chaîne de traitement de ces acquisitions de SNR en domaine côtier, il serait possible d'utiliser les mesures continues des centaines de stations pré-existantes, et d'envisager de réaliser des mesures altimétriques à l'échelle locale, ou de mesurer l'humidité du sol pour les antennes situées à l'intérieur des terres.

Mots clefs : GNSS-R, Télédétection, Rapport signal sur bruit, Altimétrie, Humidité du sol, SNR, réflectométrie, Multi-trajets, Niveau de la mer, GNSS, GPS, GLONASS.

Abstract

GNSS reflectometry (or **GNSS-R**) is an original and *opportunistic* remote sensing technique based on the analysis of the electromagnetic waves continuously emitted by GNSS positioning systems satellites (GPS, GLONASS, etc.) that are captured by an antenna after reflection on the Earth's surface. These signals interact with the reflective surface and hence contain information about its properties. When they reach the antenna, the reflected waves interfere with those coming directly from the satellites. This interference is particularly visible in the signal-to-noise ratio (SNR) parameter recorded by conventional GNSS stations. It is thus possible to reverse the SNR time series to estimate the reflective surface characteristics. If the feasibility and usefulness of this method are well established, the implementation of this technique poses a number of issues. Namely the spatio-temporal accuracies and resolutions that can be achieved and thus what geophysical observables are accessible.
The aim of my PhD research work is to provide some answers on this point, focusing on the methodological development and geophysical exploitation of the SNR measurements performed by conventional GNSS stations.
I focused on the estimation of variations in the antenna height relative to the reflecting surface (altimetry) and on the soil moisture in continental areas.
The SNR data inversion method that I propose has been successfully applied to determine local variations of : (1) the sea level near the Cordouan lighthouse (not far from Bordeaux, France) from March 3 to May 31, 2013, where the main tidal periods and waves have been clearly identified ; and (2) the soil moisture in an agricultural plot near Toulouse, France, from February 5 to March 15, 2014. My method eliminates some restrictions imposed in earlier work, where the velocity of the vertical variation of the reflective surface was assumed to be negligible. Furthermore, I developed a simulator that allowed me to assess the influence of several parameters (troposphere, satellite elevation angle, antenna height, local relief, etc.) on the path of the reflected waves and hence on the position of the reflection points.
My work shows that GNSS-R is a powerful alternative and a significant complement to the current measurement techniques, establishing a link between the different temporal and spatial resolutions currently achieved by conventional tools (sensors, radar, scatterometer, etc.). This technique offers the major advantage of being based on already-developed and sustainable satellites networks, and can be applied to any GNSS geodetic station, including permanent networks (e.g., the French RGP). Therefore, by installing a processing chain of these SNR acquisitions, data from hundreds of pre-existing stations could be used to make local altimetry measurements in coastal areas or to estimate soil moisture for inland antennas.

Key words : GNSS-R, Remote sensing, Signal-to-Noise Ratio, Altimetry, Soil moisture, SNR, reflected signals, multipaths, Sea level, GNSS, GPS, GLONASS.

Remerciements

"

J'étais là, l'air aussi nouille qu'une grenouille sur un dromadaire, à regarder la quatrième de couverture de mon manuscrit de thèse. Ce manuscrit m'avait occupé durant de longues journées ces dernières années et gisait maintenant là, apathique et amorphe. Cet esclavagiste des temps modernes me fit à la fois souffrir et trépigner de joie. Maudit et pourtant adulé, aboutissement de trois ans d'efforts et d'autant de sacrifices, Il était enfin là, fini, palpable, à portée de mes doigts tremblants. Je Le pris entre mes mains maladroites et cachait mal l'excitation, qui, subrepticement, s'insinuait en moi. Je Le soupesais, tout fébrile que j'étais, indécis sur la conduite à tenir. Trois ans de hauts et de bas qui se concluaient là, sous mes yeux. Me revinrent alors à l'esprit chaque instant de cette grande aventure que je venais de vivre et qui s'achevait symboliquement avec ce manuscrit. C'est en me remémorant tous ces moments, que, inéluctablement, surgit une envie irrépressible de remercier chaleureusement chaque acteur de cette inoubliable expérience. Faisant alors fi des qu'en dira-t-on et m'armant violemment de ma plus belle plume, je me décidai d'être bref et précis, pour proclamer, en un mot comme en cent : MERCI !

"

Si j'exagère sans doute la forme -hé oui ! les remerciements ne sont-ils pas le seul endroit d'une thèse où on peut briser le carcan de sérieux qui nous bride autrement ?- le fond, lui, est profondément sincère :

Merci tout d'abord à mes deux directeurs de thèse : Guillaume RAMILLIEN et Frédéric FRAPPART qui surent jouer parfaitement leur rôle de tuteurs en veillant au bon déroulement de ma thèse. Ils parvinrent à assurer une rigueur et un sérieux professionnels dans un climat amical et détendu avec une virtuosité déconcertante. Je leur suis très reconnaissant de la grande confiance qu'ils m'ont accordée et des conseils avisés qu'ils ont pu me donner. Je suis également très honoré de l'amitié qu'ils ont su me témoigner. C'est également le cas de José DARROZES, tuteur de monitorat et encadrant/parrain de thèse, sans qui elle ne se serait certainement pas déroulée dans de si bonnes conditions. A tous les trois, je vous adresse mes plus profonds remerciements pour ces trois (et quelques) années.

Pour m'avoir accueilli respectivement au sein du laboratoire GET de l'OMP et de l'équipe du GRGS à Toulouse, je tiens à remercier Michel GRÉGOIRE et Richard BIANCALE.

Je remercie aussi chaleureusement l'ensemble des membres de mon jury de thèse. Serge CHAUZY, pour m'avoir fait l'honneur de le présider, Adriano CAMPS et Estel CARDELLACH GALI pour avoir accepté d'en être les rapporteurs, Michel KASSER et Maximillian SEMMLING pour avoir accepté d'en être les examinateurs, José DARROZES et Richard BIANCALE pour avoir bien voulu en faire partie.

Un très grand merci à tous mes voisins de bureau de l'équipe du CNES/GRGS, pour leur aide, leurs conseils, et surtout leur grande sympathie : Georges BALMINO, Anne BRIAIS, Sylvain BONVALOT, Stéphane BOURGOGNE, Sean BRUINSMA, Thierry FAYARD, Pascal GÉGOUT, Julien LAURENT-VARIN, Jean-Michel LEMOINE, Nicole LESTIEU, Jean-Charles MARTY, Félix PÉROSANZ, Franck REINQUIN, Lucia SEOANE, Gilles WAUTELET...

Toutes les personnes (permanents, CDD, doctorants, stagiaires...) qui contribuèrent à rendre le GET et l'OMP vivants et conviviaux sont trop nombreuses pour être toutes citées. Elles se reconnaîtront et je leur exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements.

Merci tout particulièrement à mes co-bureaux Carly SAKUMURA et Hannah SPANGENBERG et à Damien ROQUES, Arnaud PROIETTI ainsi que tous les autres doctorants et post-doctorants, compagnons de galère irremplaçables !

Et enfin, que dire des amis, colocs (et cousins !) incroyables que j'ai pu rencontrer sur Toulouse ? "Ô mon Pays, Ô Toulouse" vous êtes absolument géniaux. Merci à vous et à mes amis d'ailleurs d'avoir été les gardiens de mon équilibre psychologique durant ces trois ans.

Et enfin, un immense merci à ma famille, pour qui je n'ai pas été aussi disponible que je l'aurais souhaité... Ce manuscrit leur est dédié.

Toulouse, 26 novembre 2015 Nicolas ROUSSEL.

Sommaire

Résumé **vii**

Abstract **ix**

Remerciements **xi**

Sommaire **xiii**

Introduction **1**

1 Le système GNSS : notions fondamentales **7**
1.1 Introduction . . . 8
1.2 Principe du positionnement GNSS . . . 8
1.3 GPS . . . 12
1.4 GLONASS . . . 15
1.5 Galileo . . . 15
1.6 COMPASS-BeiDou . . . 17
1.7 Perspectives . . . 18

2 Réflexion des signaux GNSS **21**
2.1 Introduction . . . 22
2.2 Le multi-trajet . . . 22
2.3 Réflexion spéculaire et diffuse . . . 25
2.4 Caractéristiques du signal GNSS après réflexion . . . 28

3 La réflectométrie GNSS ou GNSS-R **39**
3.1 Introduction . . . 41
3.2 Contexte historique . . . 41
3.3 Réflectomètre à double antenne . . . 42
3.4 Réflectomètre à antenne unique . . . 57
3.5 Plateformes et contraintes . . . 66
3.6 Perspectives . . . 70

4 Modélisation et simulations de la trajectoire des ondes GNSS directes et réfléchies à la surface de la Terre **73**
4.1 Introduction . . . 74
4.2 Principe de fonctionnement du simulateur . . . 75
4.3 Résumé des principaux résultats . . . 80
4.4 Conclusion . . . 86
4.5 ***Article publié*** : GMD 2014 - Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments . . . 88

5 Application de la réflectométrie pour l'altimétrie et l'état de mer : utilisation d'une seule antenne **109**
5.1 Introduction . . . 110
5.2 Etat de l'art . . . 112
5.3 Méthodologie . . . 113
5.4 L'expérience du phare de Cordouan . . . 119
5.5 Résumé des principaux résultats . . . 122
5.6 Conclusions et perspectives . . . 131
5.7 ***Article publié*** : RSE 2015 - Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver . . . 132

6 Application de la réflectométrie pour la mesure des variations de l'humidité du sol : utilisation d'une seule antenne **153**
6.1 Introduction . . . 154
6.2 Etat de l'art . . . 155
6.3 Méthodologie . . . 156
6.4 L'expérience de Lamasquère . . . 159
6.5 Résumé des principaux résultats . . . 162
6.6 Discussion sur l'inversion du signe de la corrélation entre les petits et grands angles d'élévation . . . 166
6.7 Conclusions et perspectives . . . 169
6.8 ***Article sous presse*** : IEEE JSTARS - Detection of soil moisture variations . . . 171

Conclusion et perspectives **187**

Bibliographie **191**

A Présentations du GNSS-R et des travaux de l'équipe du GET dans la revue *Géomètre* **201**

B Article de vulgarisation publié dans la revue XYZ de l'Association Française de Topographie **207**

C Précisions techniques sur le simulateur déterminant la position des points de réflexion **217**

D Optimisation de la durée d'une session et de la fréquence d'acquisition des données SNR pour des applications altimétriques **221**

E Participation à une campagne de calibration des altimètres Jason-2 et SARAL **227**

F Activités d'enseignements et d'encadrement réalisées durant ma thèse **243**
F.1 Enseignements dans le supérieur 244
F.2 Encadrement de stagiaires 245
F.3 Activités de vulgarisation 245

Nomenclature **247**

Table des figures **253**

Liste des tableaux **257**

Table des matières **259**

Introduction

FIGURE 1 – "*Pale Blue Dot*" : photographie de la Terre prise par la sonde Voyager 1 le 6 juillet 1990, à 6,4 milliards de kilomètres de distance.

> *"Regardez encore ce petit point. C'est ici. C'est notre foyer. C'est nous. Sur lui se trouvent tous ceux que vous aimez, tous ceux que vous connaissez, tous ceux dont vous avez entendu parler, tous les êtres humains qui aient jamais vécu. La Terre est une toute petite scène dans une vaste arène cosmique. Il n'y a peut-être pas de meilleure démonstration de la folie des idées humaines que cette lointaine image de notre monde minuscule. Pour moi, cela souligne notre responsabilité de préserver et chérir le point bleu pâle, la seule maison que nous ayons jamais connue."*
>
> Carl Sagan, *Pale Blue Dot : A vision of the Human Future in Space.*

Le 14 février 1990, la NASA commande à la sonde Voyager 1 qui avait terminé sa mission primaire, de se retourner et de photographier les planètes qu'elle avait visitées. La NASA compila 60 images de cet évènement unique en une mosaïque du système solaire. Une des images que Voyager renvoya était celle de la Terre à 6,4 milliards de kilomètres, juste "*un point bleu pâle*" dans la photo granuleuse. Le minuscule point est presque perdu dans la lueur du Soleil et constitue néanmoins notre seule, unique et commune maison à tous. Ce lieu minuscule à l'échelle de l'univers est le théâtre d'une conjonction incroyable de conditions favorables au développement de la vie. Notre planète est actuellement le berceau d'environ 8,7 millions d'espèces vivantes, dont 6,5 millions évoluent sur la terre ferme et 2,2 millions en milieu aquatique, selon l'estimation publiée dans Mora *et al.* (2011). Tous ces êtres vivants sont embarqués dans le même petit bateau bleu pâle. On imagine alors l'extrême complexité d'un tel système, régit par un équilibre très sophistiqué et fragile. Se pose alors la question épineuse de la stabilité d'un tel équilibre et des phénomènes susceptibles de le perturber.
Mieux appréhender la planète sur laquelle nous vivons en comprenant les mécanismes qui en définissent son fonctionnement est donc primordial. Découvrir, observer, et surveiller le système "Terre", l'environnement et sa dynamique à différentes échelles temporelles et spatiales est une mission de la plus haute importance. Les premières observations précises des surfaces océanographiques et terrestres, et de leurs variations, commencèrent avec des mesures in situ. 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, permettant d'avoir accès à des observations systématiques de l'ensemble de la surface de la Terre. Les systèmes de positionnement globaux GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) dont le GPS (*Global Positioning System*) jouent un rôle majeur dans la surveillance de la dynamique terrestre, avec notamment la mesure du déplacement des plaques tectoniques. On observe, ces dernières années, une généralisation des mesures de types GNSS avec la mise en place de réseaux de stations permanentes au sol, et une densification des constellations de satellites.
Mon étude s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre d'une nouvelle technique d'observation et de surveillance de notre environnement terrestre basé sur l'utilisation des mesures GNSS : la réflectométrie GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ou GNSS-R, qui ouvre de nouvelles perspectives dans ce domaine.

Qu'est ce que la réflectométrie GNSS ?

Le GNSS-R est une méthode de télédétection originale qui consiste à enregistrer les signaux électromagnétiques émis en continu par la soixantaine de satellites des systèmes de positionnement GNSS américain (GPS - *Global Positioning System*), russe (GLONASS - *GLObalnaïa NAvigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma*) ou autres (Galileo, QZSS, etc.), puis à analyser la corrélation (ou le décalage) entre les signaux arrivant directement sur une antenne réceptrice et ceux réfléchis sur la surface de la Terre, pour en déduire des paramètres physiques (rugosité, humidité du sol, etc.) et géométriques (e.g., hauteur de l'antenne réceptrice par rapport à la surface réfléchissante). Les ondes électromagnétiques interagissent avec la surface réfléchissante et contiennent donc des informations sur la nature et les propriétés de cette surface. Ainsi, le GNSS-R se propose d'analyser ces ondes GNSS réfléchies en les comparant aux ondes directes pour en déduire des informations sur les caractéristiques du milieu réfléchissant.

On parle de système *bi-statique passif* ; le terme *passif* indiquant que le système mis en place n'émet aucun signal, mais se contente de recueillir les données, tandis que le terme *bi-statique* signifie que l'émetteur et le récepteur sont situés à deux endroits différents dans l'espace (Cardellach, 2001).

Les différentes applications

Cet outil de télédétection opportuniste s'appuie sur les constellations GNSS sans mettre en œuvre d'autres missions satellitaires. Si l'altimétrie est une des applications principales du GNSS-R (e.g., Martin-Neira *et al.*, 2002; Semmling *et al.*, 2012), il est également possible de déterminer la rugosité de la surface de la mer, ce qui permet de déduire différents paramètres directement corrélés comme la hauteur des vagues ou la vitesse du vent à la surface de la mer (e.g., Garrison et Katsberg, 1998). Une autre application de cette technique est la détection de tsunamis par GNSS-R (Stosius *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 (e.g., Katzberg *et al.*, 2005; Larson *et al.*, 2010) ou la biomasse (e.g., Ferrazzoli *et al.*, 1995), en domaine continental. La mesure de la hauteur de neige dans le voisinage de l'antenne réceptrice est également envisageable (e.g., Jacobson, 2010; Gutmann *et al.*, 2012), ainsi que de la topographie de la banquise (e.g., Fabra *et al.*, 2012). Le système de réception peut être fixé au sol ou alors embarqué à bord d'avions, drones, dirigeables ou même à bord de satellites à basse altitude de type LEO (*Low Earth Orbiter*). Le tableau 1 résume les principales applications du GNSS-R en fonction des plateformes à gammes d'altitude différentes (in situ, aéroporté ou satellite).
Les outils de mesures géophysiques classiques sont nombreux et performants (radar, diffusiomètre, etc.). La précision obtenue par ces systèmes d'observation s'améliore de plus en plus dans chaque domaine d'application (altimétrie, rugosité, humidité du sol, etc.). Cependant, les mesures sont généralement soit ponctuelles (e.g., sondes d'humidité), ce qui rend difficile la couverture d'une parcelle entière ; soit, au contraire, elles couvrent une large zone (e.g., mesures satellitaires), mais cela se fait au détriment de la résolution temporelle. La réflectométrie GNSS présente l'intérêt majeur d'apporter des mesures quasi-continues sur une zone dont la taille dépend principalement de la seule hauteur de l'antenne réceptrice au-dessus de la surface de réflexion. A cet égard, le GNSS-R est donc une alternative performante et un complément non négligeable aux techniques de mesure actuelles, en faisant le lien entre les différentes résolutions temporelles et spatiales.

Objectifs de la thèse

L'objectif principal de ma thèse est **la démonstration que cette nouvelle technique permet la détermination des caractéristiques locales de la redistribution des masses d'eau à la surface de la Terre en domaine océanique (altimétrie de la surface marine) et en domaine continental (humidité du sol).**
La réception du signal GNSS réfléchi peut se faire de deux manières distinctes :
– soit grâce à une antenne indépendante ; le système de réception est donc composé de deux antennes, la première orientée vers le zenith pour capter le signal direct, et le seconde dirigée vers le nadir pour le signal réfléchi.

– soit en utilisant la même antenne que celle utilisée pour recevoir le signal direct ; le signal réfléchi est alors capté par l'hémisphère inférieur de l'antenne et est perçu comme du bruit interférant avec le signal direct.

Le premier système est celui susceptible de donner les meilleurs résultats puisque les deux signaux (direct et réfléchi) peuvent être traités indépendamment dans deux circuits différents avant d'être comparés. Cependant, le système à antenne unique présente l'avantage non négligeable d'être applicable à n'importe quel système de réception GNSS classique (utilisé pour le positionnement précis), en n'apportant aucune modification de matériel. Ceci est particulièrement intéressant lorsque l'on considère les centaines d'antennes déjà en place des réseaux GNSS permanents de chaque pays, donnant accès à une très grande base de données de mesures GNSS. En installant une chaîne de traitement de ces acquisitions permanentes en domaine côtier, il serait possible d'utiliser les mesures GNSS de ces stations pré-existantes, et envisager de faire de l'altimétrie locale, ou mesurer l'humidité du sol pour les antennes situées à l'intérieur des terres. L'enjeu majeur est de développer cette technique de télédétection basée sur une antenne unique, au vu : (1) de l'énorme potentiel d'application et (2) du faible investissement pour son développement étant donné que le réseau de satellites est pérenne pour les prochaines décennies et offre une couverture régulière et systématique de la surface terrestre. Cette nouvelle technique peut être mise en œuvre partout dans le monde.

Pour ces raisons, mon travail de thèse s'appuie essentiellement sur le système à antenne unique et j'ai concentré mes efforts sur le **développement méthodologique et l'exploitation géophysique de vraies mesures de réflectométrie réalisées par des stations GNSS classiques**.

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit présente mon travail de thèse, dont le sujet est l'application de la réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre.

Dans la première partie, je présente le système GNSS en passant en revue les notions fondamentales de ce système dédié au positionnement précis. Je décrirais ensuite brièvement les caractéristiques des principales constellations et des signaux qu'ils émettent.

Le deuxième chapitre traite du phénomène de réflexion d'une onde électromagnétique et des caractéristiques du signal GNSS après réflexion sur une surface.

Je présenterai ensuite en détail le principe de réflectométrie GNSS dans le troisième chapitre en distinguant le système à double antennes de celui à antenne unique. Les principales applications émanant des principaux travaux antérieurs seront exposées dans cette partie.

La fin du deuxième chapitre (section 2.4.4) expose une modélisation des coefficients de réflexion d'une onde électromagnétique un peu plus personnelle que ce que l'on trouve dans la littérature. Exceptée cette partie, ces trois premiers chapitres sont principalement bibliographiques et posent les bases de l'étude que j'ai effectuée dans les chapitres suivants.

Les chapitres 4, 5 et 6 exposent ainsi mon travail de thèse à proprement parler. Ces chapitres ont chacun fait l'objet d'une publication dans des revues scientifiques. Ces articles sont présentés en fin de chaque partie, et précédés d'un résumé étendu.

Le chapitre 4 présente une modélisation de la trajectoire des ondes GNSS directes et réfléchies à la surface de la Terre, pour déterminer la position géographique des points de réflexion spéculaire au cours du temps (et les premières surfaces de Fresnel associées), pour

une position de récepteur et une constellation de satellites GNSS données. Ce simulateur que j'ai réalisé est un outil d'aide à la décision permettant de choisir les meilleurs sites de mesures réunissant les meilleures conditions possibles. Grâce à ce simulateur, de nombreuses configurations ont pu être testées et l'influence des principaux paramètres en jeu est analysée (e.g., hauteur de l'antenne, élévation du satellite, etc.). Le modèle prend en compte la présence d'éventuels masques engendrés par la topographie terrestre en intégrant un modèle numérique de terrain, ainsi que les perturbations liées à la traversée de la troposphère. Mon travail de modélisation a fait l'objet d'un article publié dans *Geoscientific Model Developpement*.

Une application majeure du GNSS-R est la mesure des variations locales du niveau de la mer au cours du temps. Si de nombreuses études ont déjà été menées sur ce sujet avec le système à antenne unique (Anderson, 1995, 1996), le domaine d'applicabilité est cependant limité à des surfaces dont la vitesse de variation radiale est négligeable. Dans le chapitre 5, je propose une nouvelle méthode qui permet d'élargir ces conditions de validité, en intégrant la vitesse de déplacement vertical du niveau de la mer dans la détermination altimétrique. Cette méthode a été mise en œuvre in situ durant trois mois d'acquisitions (du 3 mars au 31 mai 2013) en haut du phare de Cordouan (~ 60 m) et les résultats de cette campagne de mesures sont également présentés à la suite de cette partie. Cette étude d'un cas réel a fait l'objet d'un article actuellement en révision dans *Remote Sensing of Environment*.

Enfin, les potentialités du GNSS-R pour la mesure de l'humidité du sol seront démontrées dans le dernier chapitre. Mes résultats ont fait l'objet d'un article actuellement sous presse au journal *IEEE Journal of Selected Topics in Applied earth observations and Remote Sensing (JSTARS)*, où apparaissent les résultats d'une campagne de mesures qui s'est déroulée durant 6 semaines (du 5 février au 15 mars 2014) dans une parcelle agricole à côté de Toulouse.

Pour terminer, cinq annexes viennent compléter ce manuscrit. La première est consacrée à un article rédigé par Marielle Mayo dans la revue *Géomètre* n°2123 paru en mars 2015 qui présente de manière générale et vulgarisée les potentialités du GNSS-R, et s'attarde particulièrement sur les projets réalisés durant ma thèse par l'équipe du laboratoire GET dont je fais partie.

La deuxième annexe est un article de vulgarisation que j'ai rédigé dans la revue XYZ de l'*Association Française de Topographie*, et qui a reçu le premier prix de l'AFT 2012. Mise à part les bases de la technique GNSS-R, il présente aussi premiers résultats des simulations introduites dans le chapitre 4.

Quelques précisions techniques sur le fonctionnement du simulateur sont présentées dans la troisième annexe.

La quatrième annexe est une étude théorique sur l'optimisation de la durée d'une session et de la fréquence d'acquisition des données GNSS-R avec une simple antenne pour des applications altimétriques.

Durant ma thèse, j'ai également eu l'opportunité de participer à une campagne de calibration des altimètres Jason-2 et SARAL. L'exploitation des données GNSS de cette campagne aux Baléares pour le positionnement des balises a fait l'objet d'un article publié dans *Marine Geodesy*, et cet article constitue la cinquième annexe.

Enfin, en parallèle de mes travaux de recherches, j'ai été amené à participer à un grand nombre d'activités d'enseignements et d'encadrement qui sont brièvement résumées dans la sixième et dernière annexe.

TABLE 1 – Récapitulatif (non-exhaustif) des applications du GNSS-R et leur faisabilité en fonction de l'altitude de l'antenne réceptrice.

Source : Zavorotny *et al.* (2014).

Applications	In situ	Aéroporté	Satellite	Références (e.g.)
Altimétrie	Oui	Oui	Oui	Phase : [1], [2], [3] Code : [4], [5], [6]
Rugosité de surface / Diffusiométrie	Oui	Oui	Oui	[7], [8], [9]
Permittivité de l'eau (Salinité/température)	Incertain	Incertain	Incertain	[10], [11]
Humidité du sol / Végétation	Oui	Oui	Incertain	[12], [13], [14]
Neige	Oui	Incertain	Incertain	[15], [16], [17]
Banquise / Glace de mer	Oui	Oui	Oui	[18], [19], [20]
Troposphère / Ionosphère	Non	Non	Incertain	[21], [22]

[1] : Martin-Neira *et al.* (2002) [2] : Semmling *et al.* (2012) [3] : Treuhaft *et al.* (2001) [4] : Carreno-Luengo *et al.* (2014) [5] : Ruffini *et al.* (2004) [6] : Cardellach *et al.* (2014) [7] : Garrison et Katsberg (1998) [8] : Cardellach *et al.* (2003) [9] : Germain *et al.* (2004) [10] : Zavorotny et Voronovich (1999) [11] : Cardellach *et al.* (2006) [12] : Katzberg *et al.* (2005) [13] : Larson *et al.* (2010) [14] : Ferrazzoli *et al.* (1995) [15] : Larson *et al.* (2009) [16] : Gutmann *et al.* (2012) [17] : Jacobson (2010) [18] : Semmling *et al.* (2011) [19] : Fabra *et al.* (2012) [20] : Fabra (2013) [21] : Boniface et Cardellach (2011) [22] : Pallares *et al.* (2005)

Chapitre 1

Le système GNSS : notions fondamentales

Sommaire

1.1 Introduction . . . 8
1.2 Principe du positionnement GNSS . . . 8
1.2.1 Le signal satellite . . . 8
1.2.2 La mesure de code . . . 9
1.2.3 La mesure de phase . . . 11
1.3 GPS . . . 12
1.3.1 Description . . . 12
1.3.2 Structure du signal . . . 13
1.4 GLONASS . . . 15
1.4.1 Description . . . 15
1.4.2 Structure du signal . . . 15
1.5 Galileo . . . 15
1.5.1 Description . . . 15
1.5.2 Structure du signal . . . 17
1.6 COMPASS-BeiDou . . . 17
1.6.1 Description . . . 17
1.6.2 Structure du signal . . . 18
1.7 Perspectives . . . 18

1.1 Introduction

Les systèmes de positionnement par satellites (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) sont basés sur des constellations de satellites assurant une couverture mondiale pour le géo-positionnement. Suite à l'intérêt militaire pour le positionnement précis et la navigation, l'usage civil du GNSS s'est rapidement développé et démocratisé au travers de nombreuses applications. Il n'est pas nécessaire de rappeler l'usage quotidien et maintenant indispensable du - *communément appelé* - GPS dans nos sociétés actuelles pour l'aide à la navigation. De nombreuses autres applications directes ou dérivées on également vu le jour. On évoquera, par exemple, la mesure des déplacements tectoniques, des déplacements de glaciers ou d'icebergs, le suivi du déplacement d'oiseaux ou de mammifères, ou, plus récemment, les systèmes de détection de tsunamis, ou les applications climatologiques ou d'analyses atmosphériques. Enfin, on citera bien évidemment l'application qui fait l'objet de mes recherches de thèse : la réflectométrie GNSS ou GNSS-R (voir chapitre 3, page 39).
Ce furent les américains qui, dès les années 1970, commencèrent à mettre en place la première constellation de satellites GNSS (Seeber, 1993) : le GPS (*Global Positioning System*), qui fut longtemps la seule constellation pleinement opérationnelle, avant l'arrivée de la constellation russe GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) qui assure une couverture globale depuis 2011 (Duquenne *et al.*, 2005). Le réseau GNSS pour le positionnement ne fait maintenant que se densifier avec le développement récent de nouvelles constellations comme le système européen Galileo, le système chinois COMPASS-BeiDou, indien IRNSS ou japonais QZSS.

1.2 Principe du positionnement GNSS

Un système de positionnement GNSS est classiquement composé de trois segments (Duquenne *et al.*, 2005) :
- le **segment spatial** constitué de l'ensemble des satellites (une vingtaine généralement pour une couverture globale) ;
- le **segment de contrôle** permet de piloter le système au travers d'une détermination et d'une prédiction des paramètres d'orbites et d'horloges de chaque satellite. Ces paramètres sont transmis (toutes les 8 h environ pour la constellation GPS) à tous les satellites par un ensemble de stations au sol ;
- le **segment utilisateur** correspond à l'ensemble des utilisateurs civils et militaires du système. On évoquera notamment les organisations nationales et internationales qui maintiennent leurs propres réseaux GNSS permanents constitués de stations au sol, comme l'IGS (*International GNSS Service*) ou le RGP (*Réseau GNSS Permanent*) mis en place et maintenu par l'IGN (*Institut Géographique National*) en France. Ces organismes collectent et traitent les données des différentes constellations GNSS avant de les redistribuer aux utilisateurs.

1.2.1 Le signal satellite

Chaque satellite GNSS émet en continu une micro-onde de type L (gamme de fréquence de 1 à 2 GHz, longueur d'onde de 15 à 30 cm) dont la fréquence fondamentale est modulée. Cette modulation de phase permet au satellite d'envoyer :

– un **message de navigation** qui comporte en particulier les éphémérides du satellites (les paramètres képlériens de l'orbite et leurs dérivées premières par rapport au temps), des coefficients de modèle ionosphériques global simplifié, l'état de santé du satellite et l'écart entre le temps GNSS et l'UTC ;
– un **code pseudo-aléatoire** PRN (*Pseudo Random Noise*) propre à chaque satellite qui permet de l'identifier : c'est le système CDMA (*Code Division Multiple Access*), utilisé par toutes les constellations sauf le cas particulier du système GLONASS qui fonctionne en FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), voir section 1.4, page 15 pour plus de détails.

Il est important de préciser que les ondes électromagnétiques GNSS sont de type RHCP (*Right Hand Circularly Polarized*), ce qui veut dire que leur polarisation dans le plan perpendiculaire à leur propagation est circulaire droite (Stienne, 2013). Ceci signifie que l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ du champ électrique décrit un cercle dans ce plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. On parle de circulation droite si le cercle est décrit au cours du temps dans le sens des aiguilles d'une montre, et de polarisation circulaire gauche si le cercle est décrit dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Dans la pratique, le positionnement par GNSS peut se faire de deux manières différentes : soit par mesure de code (sous-section 1.2.2, page 9) soit par mesure de phase (sous-section 1.2.3, page 11). Ces deux méthodes nécessitent de connaître précisément la position de chaque satellite. Celle-ci est déterminée par le segment de contrôle (éphémérides et almanachs) mais également a posteriori par le segment utilisateur, comme l'IGS par exemple. Pour ce faire, cet organisme combine différentes techniques géodésiques comme la télémétrie laser sur satellite SLR (*Satellite Laser Ranging*) ou le système DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite), ou inverse les mesures acquises par des récepteurs de positions connues.

1.2.2 La mesure de code

Le principe de base du positionnement par la mesure de code repose sur l'observation des distances séparant différents satellites du récepteur (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). Chaque mesure de distance définit une sphère dont le centre est le satellite et sur laquelle se trouve le centre de phase [1] de l'antenne. Ce dernier se trouvera précisément à l'intersection de toutes les sphères ainsi définies. Théoriquement, trois satellites minimum sont donc nécessaires pour obtenir un point d'intersection.

Pour obtenir la distance D_i^s séparant le récepteur i d'un satellite s en vue (qui est aussi le rayon de la sphère), on multiplie la mesure du temps de propagation de l'onde Δt_i^s entre le satellite et le récepteur par la vitesse de propagation de l'onde c (approximativement égale à la vitesse de la lumière). On a donc :

$$D_i^s = c * \Delta t_i^s \tag{1.1}$$

Le temps de propagation Δt_i^s entre un satellite s et un récepteur i est déterminé par l'analyse du décalage entre le signal satellite reçu et une réplique du code pseudo-aléatoire générée par le récepteur (voir figure 1.1). En effet, le code généré par le satellite arrive au récepteur avec un retard Δt_i^s correspondant au temps mis par l'onde pour parcourir le chemin entre le

1. Le système d'acquisition classique des mesures GNSS est constitué d'une antenne et d'un récepteur. Le centre de phase de l'antenne est le lieu où se fait la mesure, tandis que le récepteur qui la traite peut être désolidarisé et relativement éloigné. Par abus de langage, les termes "récepteur" et "antenne" sont souvent confondus dans la littérature.

satellite et le récepteur. La mesure se fait donc en décalant le code du récepteur par rapport au temps jusqu'à ce qu'il se trouve aligné sur le code satellite.

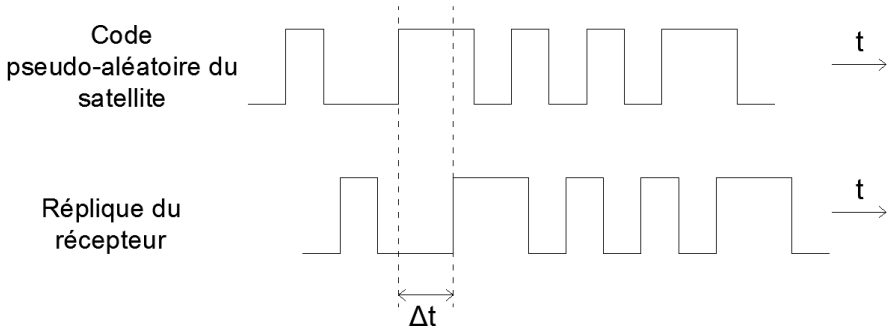


FIGURE 1.1 – Principe de la mesure de pseudo-distances pour le positionnement GNSS.

En pratique, le récepteur et les satellites ne sont pas parfaitement synchronisés et il convient de bien différencier trois échelles de temps différentes :

– le *temps absolu*, dont on connait la synchronisation avec le Temps Universel Coordonné UTC. Par exemple, le temps absolu GPS est référencé par rapport au temps UTC le 06 janvier 1980 à 00 h ;
– le *temps du satellite* mesuré par l'horloge du satellite ;
– le *temps du récepteur* mesuré par l'horloge du récepteur.

Ces trois échelles de temps ne sont pas synchronisées et on mesure donc en pratique (Duquenne *et al.*, 2005) :

$$\Delta t_i^s = t_{Ri} - t_E^s \tag{1.2}$$

où t_{Ri} est le temps de réception en temps récepteur i et t_E^s le temps d'émission en temps satellite s :

$$t_E^s + dt^s = t_E \tag{1.3}$$

$$t_{Ri} + dt_i = t_R \tag{1.4}$$

avec t_E et t_R respectivement les temps d'émission et de réception du signal en temps absolu et dt_i et dt^s le décalage des horloges du récepteur i et du satellite s par rapport au temps absolu.

Ainsi :

$$\Delta t_i^s = t_R - dt_i - t_E + dt^s = t_R - t_E + (dt^s - dt_i) \tag{1.5}$$

La mesure de distance est donc entachée de ces défauts de synchronisation. C'est pourquoi on préfère parler de mesures de pseudo-distances puisqu'on ne mesure pas exactement la distance géométrique séparant les satellites du récepteur.

On a donc pour équation d'observation la pseudo-distance PSD (en m) entre le satellite s et

le récepteur i :

$$PSD_i^s = c\Delta t_i^s = c(t_R - t_E) + c(dt^s - dt_i) = \rho_i^s + c(dt^s - dt_i) \tag{1.6}$$

avec c la vitesse de la lumière dans l'atmosphère, et ρ_i^s la distance géométrique entre le satellite s et le récepteur i à l'instant t_E et le récepteur R à l'instant t_R.
Chaque mesure de pseudo-distance contient donc quatre inconnues : les coordonnées en trois dimensions du récepteur et les erreurs d'horloge. C'est pourquoi, un quatrième satellite est en réalité nécessaire pour résoudre le système d'équations.
Pour atteindre une précision géodésique, il convient également de prendre en compte d'autres corrections. On veillera par exemple à corriger l'allongement apparent de la distance récepteur-satellite dû à la traversée de la troposphère (noté d_{tropo}), et la perturbation du signal dû au caractère dispersif de la ionosphère (noté $d_{iono}(f)$, dépendant de la fréquence f du signal). Il faut également prendre en compte un terme ϵ_{PSD} contenant l'ensemble des autres facteurs pouvant perturber le signal (effet relativiste, réflexions multiples du signal électromagnétique avant réception, etc.). On a donc :

$$\boxed{PSD_i^s = \rho_i^s + c(dt^s - dt_i) + d_{iono}(f) + d_{tropo} + \epsilon_{PSD}} \tag{1.7}$$

Le positionnement par mesure de code est celui généralement utilisé pour les systèmes de navigations à bord de véhicules ou sur les téléphones mobiles. Il a malheureusement une précision très limitée (quelques mètres, voire quelques dizaines de mètres). Les performances de ce type de mesures sont généralement optimisées par application en aval d'un filtre de Kalman. Ce filtre suppose une corrélation entre les mesures successives et conditionne la position calculée. Ce conditionnement géographique est également basé sur le réseau routier existant et connu.

1.2.3 La mesure de phase

Le principal problème de la mesure de pseudo-distances par le code réside dans la précision nécessaire de la mesure temporelle. Pour une résolution de la mesure de pseudo-distance de l'ordre du centimètre, il faudrait une estimation du temps de propagation à moins d'un dixième de nano-secondes près. C'est pourquoi, pour estimer la distance séparant les satellites du récepteur, les récepteurs GNSS géodésiques préfèrent se baser sur la phase du signal satellite (c'est à dire le nombre de cycles observés par la porteuse depuis l'émission) plutôt que sur le temps de propagation. Malheureusement, s'il est facile de mesurer le déphasage de la porteuse par rapport à une réplique locale générée par le récepteur, il n'est pas possible de mesurer directement le nombre de cycles total qu'elle a observé depuis son émission par le satellite.
On comprend dès lors que l'observation de la distance séparant le récepteur et le satellite est ambigüe d'un nombre entier de longueur d'onde, ou **ambiguïté entière**. Pour obtenir la distance séparant le satellite du récepteur, il faudra alors additionner cette ambiguïté entière au déphasage, et multiplier le résultat par la longueur d'onde. Tout le problème réside donc dans la détermination de cette ambiguïté entière.
Une méthode classique dans le cas d'un positionnement relatif est la double différences de phases, c'est à dire la combinaison des observations de deux récepteurs (dont un de coordonnées connues) observant deux mêmes satellites simultanément. La résolution se fait alors gé-

néralement en deux étapes. Un première étape en considérant les ambiguités entières et les coordonnées du récepteur comme inconnues. On obtient alors, par ajustement au sens des moindres carrés, des valeurs non entières pour les ambiguïtés (on parle de *solution flottante*). Une seconde étape facultative consiste donc à "fixer les ambiguïtés", c'est à dire à attribuer aux ambiguïtés la valeur entière la plus proche puis à faire une nouvelle estimation des coordonnées en considérant les ambiguïtés comme connues (Duquenne *et al.*, 2005). Ceci peut se faire par exemple par la méthode LAMBDA (Teunissen, 1995).
L'ambiguïté entière relative à un satellite, une fois déterminée, reste constante dans le temps dès lors que le récepteur garde une connexion avec ce satellite (*lock*). C'est ce que l'on appelle le *suivi de phase*, c'est à dire que le récepteur tient compte du nombre entier de cycles entre chaque mesure et incrémente d'autant la valeur initiale d'ambiguïté déterminée. Il peut toutefois arriver que l'on perde le signal en raison d'un mauvais fonctionnement du récepteur ou bien encore à cause de la présence d'un masque entre le satellite et le récepteur. La conséquence est l'apparition d'un *saut de cycle*. Dans ce cas, il faudra réaliser une nouvelle détermination de l'ambiguïté entière (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001).
On a donc :

$$\Phi(t) = \Delta\phi(t) + K(t) + N \tag{1.8}$$

avec :
– $\Phi(t)$: phase de battement
– $\Delta\phi(t)$: mesure de la partie décimale de la phase de battement
– $K(t)$: nombre de cycles écoulés depuis la première mesure de phase
– N : nombre entier de cycles entre le satellite et le récepteur : *ambiguïté entière*.
De la même manière que pour la mesure de code (sous-section 1.2.2, page 9), il faut prendre en compte les décalages d'horloges du récepteur et des satellites (dt_i et dt^s) par rapport au temps absolu, les corrections des perturbations dues à la traversée de l'atmosphère et les erreurs résiduelles ϵ_L. En multipliant la mesure de phase par la longueur d'onde λ, on obtient ainsi la distance entre le satellite et le récepteur L_i^s grâce à l'équation d'observation finale suivante :

$$\boxed{L_i^s = c(dt^s - dt_i) + \rho_i^s + \lambda N_i^s - d_{iono}(f) + d_{tropo} + \epsilon_L} \tag{1.9}$$

Le positionnement par mesure de phase est employé dans la plupart des applications scientifiques nécessitant une haute précision. En positionnement relatif (*différentiel*), et en post-traitement, on peut ainsi atteindre des précisions atteignant le centimètre voire mieux (Duquenne *et al.*, 2005). Le positionnement absolu en post-traitement (*PPP : Precise Point Positioning* en ambiguité flottante et le *IPPP : Integer PPP* avec résolution en ambiguïtés entières) commence également à atteindre des précisions quasi-centimétriques (Ge *et al.*, 2008; Laurichesse *et al.*, 2009) notamment grâce à l'utilisation de modèles atmosphériques de plus en plus précis pour corriger les observations.

1.3 GPS

1.3.1 Description

Depuis ses début dans les années 1970, le GPS américain est la constellation GNSS la plus connue et la plus aboutie, et elle est restée longtemps le seul standard permettant le géoposi-

tionnement global, jusqu'à l'aboutissement de la constellation russe GLONASS en 2011. Si le système GPS fut déclaré opérationnel en février 1994 par l'USDoD (*United States Department of Defense*), les premiers satellites furent lancés dès 1978 (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). Les satellites GPS sont sur une orbite quasi-circulaire à une altitude de 20200 km au-dessus de la surface terrestre, avec une période de révolution de 12 h sidérales (soit 11 h 58 min). Chaque satellite fait donc deux fois le tour de la Terre en 24 h sidérales, soit 23 h 56 min. De plus, ils sont répartis de façon homogène autour de la Terre suivant six orbites planes inclinées de 55° par rapport au plan équatorial, décalées de 60° en longitude. La constellation actuelle est constituée de 31 satellites pleinement opérationnels (GPS-World, 2012). Le segment de contrôle de la constellation est constitué de 5 stations au sol situées à Hawaï, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein (Iles Marshall) et Colorado Springs (Master Control Station), comme le présente la figure 1.2. Les 5 stations enregistrent en continu les signaux GPS, effectuent des mesures météorologiques et envoient les données à la station maîtresse de Colorado Springs.

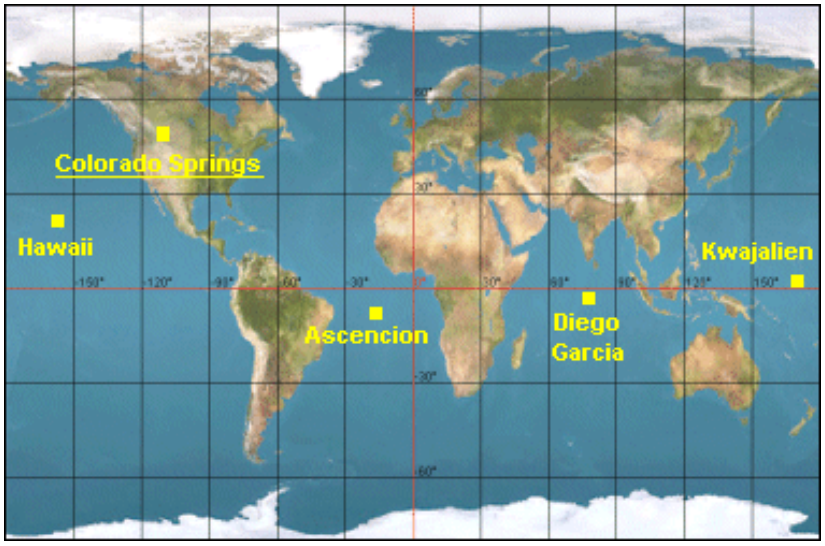


FIGURE 1.2 – Segment de contrôle de la constellation GPS.
Source : http://eduscol.education.fr

1.3.2 Structure du signal

Les satellites GPS émettent un signal qui se composent de deux fréquences porteuses : L1 ($f = 1575,42$MHz, $\lambda = 19,05$ cm) et L2 ($f = 1227,60$MHz, $\lambda = 24,42$ cm). Une troisième porteuse L5 ($f = 1176,45$MHz, $\lambda = 25,48$ cm) est mise en place sur les satellites de la nouvelle génération.

Les porteuses sont modulés en fréquence par différents codes binaires pseudo-aléatoires (*PseudoRandom Noise* PRN) spécifiques à chaque satellites (Duquenne *et al.*, 2005) :

– le **code civil C/A** est une séquence de 1023 bits transmise à une fréquence de 1,023 MHz. En prenant en compte la vitesse de la lumière, on peut en déduire que la longueur d'un

chip[2] est d'environ 300 m. Le code C/A ne module que la fréquence L1.
– le **code militaire P** est une séquence très longue (de l'ordre de 720,213 gigabytes - ce qui correspond à 7 jours de transmission) transmise à une fréquence de 10,23 MHz. Pour des raisons de sécurité militaire, ce code P peut être crypté par l'adjonction d'un code supplémentaire (le code W), qui formera ce que l'on appelle le code Y. Le code P module à la fois la fréquence L1 et la fréquence L2.
– le **message de navigation** est un signal binaire de 50 Hz qui transmet des informations comme les éphémérides, les almanachs, les décalages d'horloges et d'autres paramètres systèmes relatifs au satellite.

Pour répondre aux besoins civils et militaires actuels, les satellites du bloc IIR de la nouvelle génération (depuis 2005) modulent également le signal L1 et L2 par un nouveau code M (pour les besoins militaires), ainsi que le signal L2 par un nouveau code L2C (pour les besoins civils) : Inside-GNSS (2006).
Ainsi, les signaux GPS s_{L1} et s_{L2} respectivement transmis sur L1 et L2 peuvent être décrits par les équations suivantes (Kaplan et Hegarty, 2006) :

$$s_{L1}(t) = A_{L1}P(t)W(t)D(t)cos(2\pi f_{L1}t) + A_{L1}C/A(t)D(t)sin(2\pi f_{L1}t) \tag{1.10}$$

$$s_{L2}(t) = A_{L2}P(t)D(t)cos(2\pi f_{L1}t) \tag{1.11}$$

avec :
– A_{L1} et A_{L2} les amplitudes des ondes porteuses L1 et L2 ;
– f_{L1} et f_{L1} les fréquences des ondes porteuses L1 et L2 ;
– $P(t)$ la modulation du code P ;
– $W(t)$ la modulation du code W (dans le cas où le cryptage est activé) ;
– $D(t)$ le message de navigation ;
– $C/A(t)$ la modulation du code C/A.

La figure 1.3 résume et explicite les différentes étapes de la génération des ondes porteuses L1 et L2 à bord des satellites.

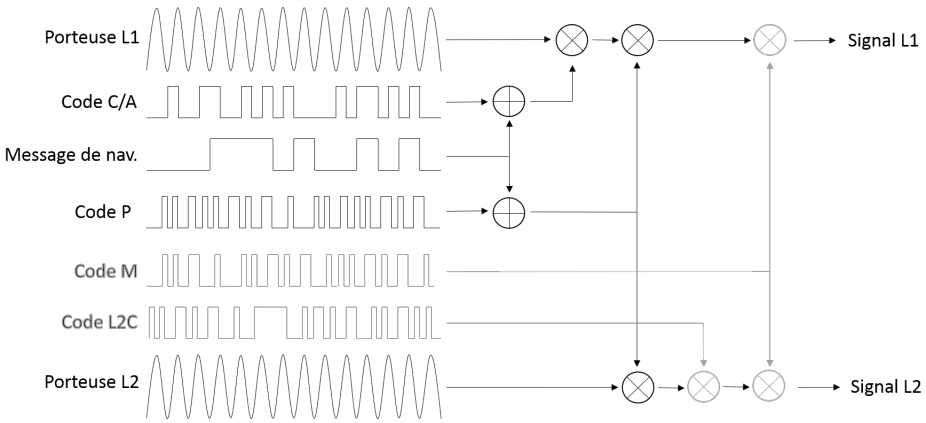


FIGURE 1.3 – Décomposition des éléments constitutifs du signal GPS.

Le tableau 1.2 page 19 résume une comparaison des quatre principales constellations GNSS.

2. Dans le cas de ce type de modulation, on préfère désigner l'unité de pulsation par *chip* plutôt que *bit*.

1.4 GLONASS

1.4.1 Description

Le développement de la constellation GLONASS commença en 1976 dans l'Union Soviétique. Quelques satellites furent lancés dès 1982 et le système fut déclaré opérationnel en 1995. Malheureusement, pour des raisons essentiellement économiques et politiques, la maintenance du système fut réduite jusqu'en 2001, et la constellation atteignit difficilement plus de 10 satellites opérationnels en même temps. Depuis une politique de restauration en 2001, de nombreux nouveaux satellites ont été lancés, et la constellation assure un géopositionnement global depuis 2011 (Polischuk *et al.*, 2002). La constellation russe est actuellement nominale avec 24 satellites répartis sur trois plans orbitaux inclinés de 64,8°. L'inclinaison des orbites, plus élevée que les orbites GPS, permet d'avoir des satellites qui passent un peu plus sur les zones polaires que le GPS (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). Les orbites quasi-circulaires se situent à une altitude de 19100 km au-dessus de la surface terrestre, et leur période de révolution est de 11 h 15 min 44 s. Leur répétabilité est de 8 jours sidéraux.

1.4.2 Structure du signal

La structure du signal GLONASS est différente de celle du signal GPS (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). Si le système GPS utilise le CDMA (*Code Division Multiple Access*) qui permet de différencier les satellites, le système GLONASS utilise le FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Chaque satellite possède ainsi sa propre fréquence :

$$f_{L1} = (1602MHZ + k_{GLONASS} * 0,5625MHz) \tag{1.12}$$

$$f_{L2} = (1246MHZ + k_{GLONASS} * 0,4375MHz) \tag{1.13}$$

avec $k_{GLONASS}$ le canal utilisé. Ce décalage en fréquence par satellite permet une meilleure résistance au brouillage intentionnel pour l'ensemble de la constellation. Le tableau 1.1 présente le canal d'émission associé à chaque satellite GLONASS.
Les codes PRN sont les mêmes pour tous les satellites. Un code C/A est modulé sur la porteuse L1, et un code P est modulé sur L1 et L2. Ces deux codes sont en libre accès. De la même manière que pour la constellation GPS, un message de navigation est transmis toutes les 30 min. (Löfgren, 2014). Une transmission CDMA sur les signaux L1, L2 et L3 (la fréquence f_{L3} n'est pas encore définie et est encore en cours d'étude) voire L5 ($f_{L5} = 1176,45$ MHz, $\lambda = 25,48$ cm) est mise en place sur les nouveaux satellites GLONASS, en plus de la transmission FDMA actuelle sur L1 et L2. (GPS-World, 2011).

1.5 Galileo

1.5.1 Description

Le système Européen de navigation par satellite Galileo est issu de la volonté commune des États membres de se doter d'un système de navigation par satellites indépendant. En juin 2004, l'Union Européenne et les Etats-Unis ont signé un accord sur la compatibilité et l'interopérabilité complète entre le système européen Galileo et le système américain GPS. Galileo est conçu et élaboré sur une base civile tout en intégrant les protections nécessaires en

TABLE 1.1 – Correspondance entre appellation des satellites GLONASS et canal d'émission.

Source : www.glonass-iac.ru/en/CUSGLONASS

Appellation du satellite	Canal de fréquence $k_{GLONASS}$
01	1
02	-4
03	5
04	6
05	1
06	-4
07	5
08	6
09	-2
10	-7
11	0
12	-1
13	-2
14	-7
15	0
16	-1
17	-6
18	-3
19	3
20	2
21	4
22	-3
23	3
24	2

matière de sécurité. Débuté dans les années 1990, le projet commença réellement à se développer à partir du 26 mars 2002, lorsque le Conseil des ministres de Transports de l'Union Européenne valida la phase de développement du programme spatial Galiléo. Le premier satellite de validation GIOVE-A (*Galileo In Orbit Validation Element)* fut mis en orbite dès la fin de l'année 2005, avant d'être rejoint par un second (GIOVE-B) en avril 2008. (Gao *et al.*, 2008). Ces deux satellites permirent de démontrer l'interopérabilité des systèmes Galileo et GPS, c'est à dire la possibilité de substitution, transparente pour l'utilisateur, d'un système par rapport à l'autre. Les quatre premiers satellites opérationnels furent ensuite lancés en octobre 2011 et octobre 2012. Malheureusement, le projet doit actuellement faire face à une série d'imprévus, avec notamment l'échec de la mise en orbite des deux derniers satellites le 22 août 2014, et la panne d'un des quatre premiers satellites opérationnels. Le système Galileo sera à terme constitué d'une constellation de trente satellites placés sur des orbites quasi-circulaires à 23616 km d'altitude, répartis sur 3 plans inclinés à 56°. La période de révolution des satellites est de 14 h 21 min. (Duquenne *et al.*, 2005). En phase opérationnelle, le système Galileo proposera 5 services à accès plus ou moins restreints :

– le **service ouvert** (OS : *Open Service*) est un service gratuit destiné au positionnement pour

le grand public. Ce service correspond à l'utilisation civile du GPS ;
- le **service commercial** (CS : *Commercial Service*) : en échange d'une redevance versée à l'opérateur Galileo, ce service offrira de nombreux services, comme l'accès à une bande de fréquence supplémentaire qui augmentera la précision du positionnement ;
- le **service de sûreté de la vie** (SOL : *Safety Of Life*) délivrera un service sécurisé en vue des applications critiques dédié au transport aérien, maritime et terrestre ;
- le **service de recherche et secours** (SAR : *Search And Rescue*) permettra d'améliorer le système international COSPAR-SARSAT d'assistance et de sauvetage. Il devrait assurer la réception en quasi-temps réel des messages de détresse ;
- le **service public réglementé** (PRS : *Public Regulated Service*) est crypté et il est réservé principalement aux utilisateurs remplissant une mission de service public, comme la protection civile ou la sécurité nationale. Ce service utilise deux signaux à part et dispose de plusieurs systèmes prévenant un brouillage du signal.

1.5.2 Structure du signal

De la même manière que le système GPS, Galileo utilise le CDMA pour distinguer les satellites entre eux, et transmets également en bande L sur les porteuses principales suivantes :
- E1 (=L1) : $f = 1575,42$ MHz, $\lambda = 19,03$ cm ;
- E5a : $f = 1176,45$ MHz, $\lambda = 25,48$ cm ;
- E5b : $f = 1207,14$ MHz, $\lambda = 24,83$ cm ;
- E6 : $f = 1278,75$ MHz, $\lambda = 23,44$ cm.

A l'instar du GPS, ces porteuses sont modulées par la phase par des codes pseudo-aléatoires identifiant les satellites, et permettant également de faire passer le message de navigation.

1.6 COMPASS-BeiDou

1.6.1 Description

Souhaitant eux aussi s'affranchir de la dépendance au GPS américain, les autorités chinoises mirent très rapidement en place un système de géopositionnement régional : BeiDou-1. Ce système, initié dès le début des années 1990, s'est réellement concrétisé par le lancement de deux premiers satellites BeiDou-1A et BeiDou-1B en 2000. Ce système présente l'originalité de s'appuyer sur quatre satellites géostationnaires (trois opérationnels et un de réserve) et un mobile en orbite moyenne. Ce système, uniquement régional (i.e., il couvre uniquement la Chine), nécessite une émission de la part du segment utilisateur, et il est donc très vite limité par rapport au système GPS, dont les utilisateurs sont uniquement récepteurs passifs.
Les autorités chinoises décidèrent alors de compléter (pour à terme remplacer) ce système régional limité géographiquement en lançant le projet BeiDou-2 aussi connu sous le nom de COMPASS (Chong, 2009). Cette fois global, ce système étendu prévoit une constellation nominale de 35 satellites :
- 5 satellites géostationnaires GEO (*Geostationary Earth Orbit*) pour une compatibilité rétroactive avec BeiDou-1, a une altitude d'environ 35786 km ;
- 30 satellites non-géostationnaires : 27 en orbite moyenne MEO (*Meidum Earth Orbit*) à une altitude de 21150 km, de la même manière que les autres GNSS, et 3 en orbite géosynchrone inclinée : IGSO (*Inclined GeoSynchronous Orbits*).

La période de révolution des 27 satellites MEO est de 12 h 53 min et leurs plans orbitaux sont inclinés à 55,5° par rapport à l'équateur. (ILRS, 2012).
La constellation actuelle de COMPASS est constituée de 5 satellites GEO, 5 satellites IGSO et 4 satellites MEO (Inside-GNSS, 2013).

1.6.2 Structure du signal

La structure est assez similaire à celle du GPS ou de Galileo, avec une transmission en CDMA. Deux niveaux de service seront accessibles : le niveau ouvert pour les civils, et le niveau restreint et crypté pour les militaires. Le signal est émis sur les bandes L suivantes :
– B1 : $f = 1561,10$ MHz, $\lambda = 19,20$ cm ;
– B1-2 : $f = 1589,74$ MHz, $\lambda = 18,86$ cm ;
– B2 : $f = 1207,14$ MHz, $\lambda = 24,83$ cm ;
– B3 : $f = 1268,52$ MHz, $\lambda = 23,63$ cm.
(Inside-GNSS, 2013)

1.7 Perspectives

Les constellations GNSS américaine (GPS) et russe (GLONASS) cumulent actuellement plus de cinquante satellites opérationnels qui émettent des signaux exploitables en permanence, et susceptibles d'être captés n'importe où dans le monde. Lorsque les constellations Galileo et COMPASS seront opérationnelles, plus d'une centaine de satellites de positionnement graviteront autour de la Terre et émettront en permanence, sans compter l'avènement d'autres constellations. Actuellement, à nos latitudes moyennes, une dizaine de satellites GPS et environ 8 satellites GLONASS sont en vue en permanence. (Dach, 2012).

TABLE 1.2 – Tableau récapitulatif des caractéristiques des quatre principales constellations GNSS actuelles (mis à jour en septembre 2015).

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Affiliation	USA	Russie	Europe	Chine
Sat. opé.	31	22	8	7[a]
Sat. en orbite	33	28	10	7 [a]
Altitude (km)	20180	19140	23222	21150[a]
Plans orbitaux	6	3	3	3[a]
Période orbitale	11 h 58 min	11 h 15 min	14 h 22 min	12 h 53 min[a]
Inclinaison	55°	64,8°	56°	55,5°[a]
Accès multiple	CDMA	FMDA (futur : CDMA)	CDMA	CDMA
Fréq. porteuse (MHz)	L1 : 1575,42 L2 : 1227,60 L3 : 1381,05 L4 : 1379,913 L5 : 1176,45	L1 : 1602 + k*0,5625 L2 : 1246 +k*0,4375 L3 : à définir L5 : 1176,45	E1=L1 : 1575,42 E5A : 1176,45 E5b : 1207,14 E6 : 1278,75	B1 : 1561,10 B1-2 : 1589,74 B2 : 1207,14 B3 : 1268,52
Statut actuel	opérationnel	opérationnel	in-orbit validation	partiellement opérationnel[b]

[a] Les chiffres sont donnés pour les satellites en orbite moyenne (MEO). COMPASS-BeiDou a également 5 satellites géosationnaires (GEO), et 3 satellites en orbite géosynchrone inclinée (IGSO).(Chong, 2009).
[b] La couverture régionale assurée par BeiDou-1 est pleinement opérationnelle ; la couverture globale par COMPASS/BeiDou-2 est en cours de développement.
Tableau inspiré du premier chapitre des travaux de thèse de Löfgren (2014).

Chapitre 2

Réflexion des signaux GNSS

Sommaire

2.1 Introduction 22
2.2 Le multi-trajet 22
2.2.1 Introduction 22
2.2.2 Perturbation de la mesure de phase 22
2.2.3 Perturbation de la mesure de code 23
2.2.4 Comment minimiser l'impact du multi-trajet ? 23
2.2.4.1 Le site de mesure 23
2.2.4.2 Des solutions matérielles 24
2.2.4.3 Des solutions lors du traitement des observations 24
2.3 Réflexion spéculaire et diffuse 25
2.3.1 Introduction 25
2.3.2 Réflexion spéculaire : première surface de Fresnel 26
2.3.3 Réflexion diffuse : *glistening zone* 26
2.3.4 Rugosité de la surface réfléchissante : le critère de Rayleigh 28
2.4 Caractéristiques du signal GNSS après réflexion 28
2.4.1 Polarisation d'une onde électromagnétique 28
2.4.1.1 La polarisation elliptique (cas général) 30
2.4.1.2 La polarisation circulaire 30
2.4.1.3 La polarisation rectiligne (ou linéaire) 30
2.4.2 Décomposition d'une polarisation 31
2.4.3 Effet de la réflexion sur la polarisation 32
2.4.3.1 Coefficients de réflexion de Fresnel pour une polarisation linéaire 32
2.4.3.2 Coefficients de réflexion de Fresnel pour une polarisation circulaire 34
2.4.4 Effet du gain d'antenne sur le signal réfléchi 35

2.1 Introduction

Les éléments naturels (montagnes, arbres, etc.) et artificiels (constructions diverses) à la surface de la Terre peuvent faire obstacle aux signaux électromagnétiques émis par les satellites des différentes constellations GNSS. Suivant la nature des obstacles rencontrés, ils seront alors absorbés, atténués, réfléchis ou réfractés (Andréani, 2001). Dans les deux derniers cas, les signaux réfléchis changeront de direction de propagation (pouvant ainsi être réfléchis plusieurs fois), créant ce que l'on appelle des **multi-trajets**. Le signal mettra donc plus de temps à parvenir à l'antenne et sera bruité et atténué. Dans le cas de l'emploi classique des GNSS pour le positionnement, le retard dans le temps de transmission se traduira automatiquement par une erreur sur la distance satellite-récepteur et donc sur la position déduite des observations. En positionnement classique, le multi-trajet est donc une source d'erreur à supprimer.
La **réflectométrie GNSS** (ou **GNSS-R**) propose une vision alternative : les signaux GNSS réfléchis contiennent une information cruciale sur les milieux réfléchissants. En isolant et analysant ces signaux réfléchis, on peut donc remonter aux propriétés des milieux environnants du récepteur. Cette application *opportuniste* en télédétection est d'autant plus prometteuse que les constellations GNSS ne cessent de se développer et la pérennité et la stabilité du réseau est assurée.
Ce chapitre présente le processus de réflexion et d'analyse des ondes électromagnétiques en vue d'en extraire les caractéristiques du milieu réfléchissant.

2.2 Le multi-trajet

2.2.1 Introduction

Le phénomène de multi-trajet se produit lorsque le signal issu du satellite GNSS arrive au récepteur après avoir suivi un autre chemin que le trajet direct. C'est le cas d'au moins une réflexion sur une surface proche (figure 2.1). Ce phénomène est particulièrement présent en milieu urbain, en raison de la présence de bâtiments. Les signaux réfléchis vont alors perturber le signal total reçu par l'antenne et notamment modifier les mesures de pseudo-distance et de phase réalisées par le récepteur. La perturbation liée aux multi-trajets est à la fois corrélée dans le temps et vis-à-vis des différents signaux satellites. Pour cette raison, on ne peut pas associer cette contribution à un simple bruit blanc (aléatoire), ce qui fausse les algorithmes couramment utilisés en positionnement classique (Sutour et Darrin, 2012).

2.2.2 Perturbation de la mesure de phase

Si l'on considère un signal direct d'amplitude A_d et de phase ϕ_d sous la forme $A_d \cos(\phi_d)$, le signal réfléchi sera :

$$\alpha A_d \cos(\phi_d + \Delta\phi_r) \tag{2.1}$$

avec :
– α : un facteur d'atténuation ($0 \leq \alpha \leq 1$) ;
– $\Delta\phi_r$: le déphasage dû à l'allongement du trajet.
Le signal combiné reçu par l'antenne sera alors de la forme (Duquenne *et al.*, 2005), avec

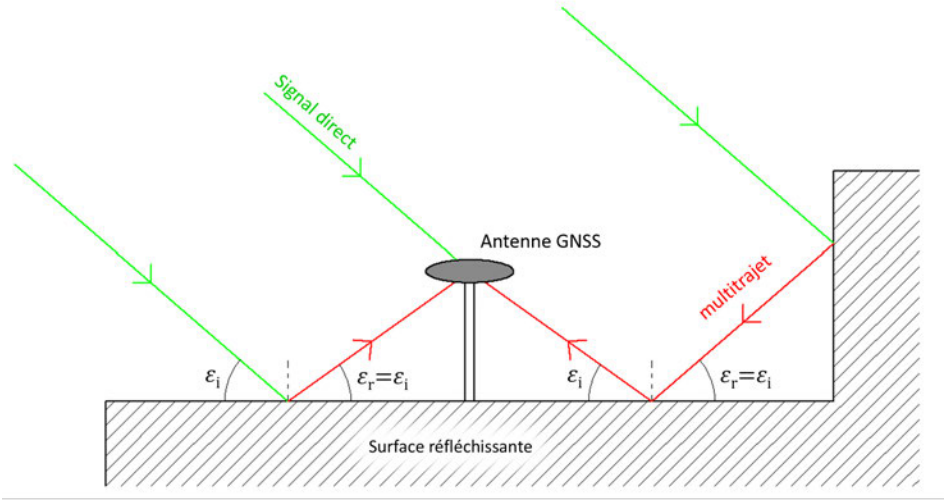


FIGURE 2.1 – Le phénomène de multi-trajet sur les signaux GNSS.
ϵ_i : angle d'incidence. ϵ_r : angle de réflexion.

$\beta = f(\alpha, A_d)$ l'amplitude :

$$\beta \cos(\phi_d + \psi_r) \tag{2.2}$$

ψ_r est la contribution du multi-trajet sur la phase.
Cette contribution est inférieure à un cycle, provoquant donc un rallongement inférieur à la longueur d'onde (~ 20 cm), mais qui peut perturber la résolution des ambiguïtés, et en conséquence provoquer des erreurs de résolution d'un ou deux cycles (Duquenne *et al.*, 2005).

2.2.3 Perturbation de la mesure de code

En ce qui concerne la mesure de pseudo-distance basée sur le code, l'allongement du trajet peut provoquer une erreur qui peut atteindre 10 ou 20 m (dépend de la distance entre l'antenne et le point de réflexion).

2.2.4 Comment minimiser l'impact du multi-trajet ?

On comprend qu'en positionnement géodésique où la précision est de rigueur, il est indispensable de réduire au maximum l'influence du multi-trajet. Cette réduction peut se faire de plusieurs manières.

2.2.4.1 Le site de mesure

Premièrement, on veillera à choisir un site de mesure le plus isolé possible, en évitant les surfaces réfléchissantes trop proches.

2.2.4.2 Des solutions matérielles

Il est possible de s'équiper d'antennes munies d'un plan absorbant sur l'hémisphère inférieur de l'antenne (figure 2.2) pour filtrer les signaux captés. Ce dispositif équipe la majorité des antennes géodésiques.

FIGURE 2.2 – Antenne Trimble Zephyr Geodetic 2 avec plan absorbant.

La meilleure solution pour minimiser l'influence du multi-trajet consiste cependant à utiliser des antennes dites *choke-rings* (figure 2.3), qui piègent les signaux de faible angle d'incidence ayant de fortes probabilités d'avoir subi des multi-trajets.

FIGURE 2.3 – Antenne Trimble *Choke rings*.

2.2.4.3 Des solutions lors du traitement des observations

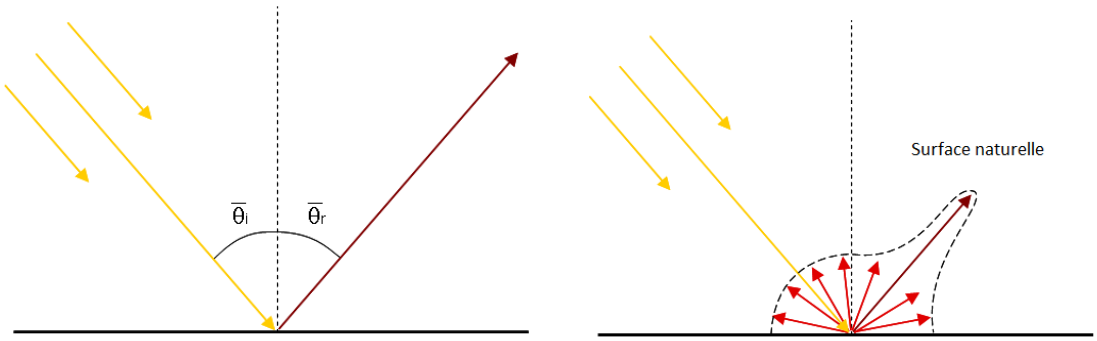
On notera également la possibilité de filtrer les ondes reçues au niveau du récepteur pour éliminer les ondes de faibles incidence au moment du traitement (Andréani, 2001).

Enfin, en temps différé, il est possible d'identifier les multi-trajets en examinant les résidus de chaque satellite sur le positionnement (Duquenne *et al.*, 2005). En effet, la signature du multi-trajet est caractéristique : il y a quelques résidus beaucoup plus forts en un temps restreint, et des observations sur plusieurs jours révèlent que le phénomène se reproduit périodiquement. On peut très bien éliminer ces époques correspondantes du satellite en question et ré-estimer la position du récepteur.
Le multi-trajet a d'autant moins d'effets que le temps d'acquisition est long, car l'écart de quelques centimètres d'époques courtes se trouve moyenné avec un grand nombre d'époques. En d'autres termes, les techniques les plus sensibles au multi-trajet sont celles basées sur les observations rapides ; le cas extrême étant celui où on détermine une position par époque (mode cinématique) (Duquenne *et al.*, 2005).

2.3 Réflexion spéculaire et diffuse

2.3.1 Introduction

Les multi-trajets sont donc les signaux GNSS arrivant à l'antenne après réflexion sur les surfaces avoisinantes. Conceptuellement, il est possible distinguer deux contributions : le terme **spéculaire** ou *cohérent* et la composante **diffuse** ou *non-cohérente* (Cardellach, 2001), comme l'illustre la figure 2.4. La composante spéculaire est issue d'une réflexion en un point unique particulier (appelé le **point spéculaire** dans la suite de ce manuscrit). Il s'agit du point de la surface réfléchissante pour lequel l'onde réfléchie parcourt la plus courte distance. Ce point obéit à la loi de réflexion de Snell-Descartes qui stipule que l'angle de réflexion et l'angle d'incidence sont égaux en valeur absolue. En d'autres termes (cf. 2.4) : $\bar{\theta}_i = \bar{\theta}_r$.



a. Réflexion spéculaire

b. Réflexion diffuse

FIGURE 2.4 – Réflexion spéculaire et diffuse.
Source : http://e-cous.univ-paris1.fr (adapté)

Le terme spéculaire est caractérisé par une haute directivité tandis que la contribution diffuse étale le signal en un large éventail de signaux réfléchis. Dans une réflexion purement spéculaire, il n'est possible de recevoir le signal que dans une seule direction privilégiée, ce qui n'est pas le cas de la composante diffuse.
La figure 4.6 (a) page 82 illustre les positions des points de réflexion spéculaire en fonction de la hauteur de l'antenne réceptrice et de l'angle d'élévation du satellite.

En pratique, un signal réfléchi contient à la fois une composante spéculaire et une composante diffuse, dans des proportions dépendant de l'angle d'incidence et de la rugosité de la surface de réflexion.

2.3.2 Réflexion spéculaire : première surface de Fresnel

Une réflexion spéculaire est généralement décrite en *optique géométrique*, la propagation électromagnétique étant modélisée comme un simple rayon. Un rayon arrivant sur une surface parfaitement plane avec un certain angle d'incidence, engendre un autre rayon avec un azimuth opposé et un même angle d'incidence dans le plan défini par le rayon incident et la normale à la surface au point d'incidence. En utilisant ce modèle simple, le point spéculaire est l'intersection des deux rayons (incident et réfléchi) sur la surface.
Il est également possible de modéliser la réflexion spéculaire avec un modèle plus réaliste en utilisant une *optique ondulatoire*. En suivant les principes de Huygens-Fresnel, chaque point du front d'onde incident agit comme une source potentielle d'une onde sphérique secondaire. Le signal réfléchi sera alors la somme de toutes ces ondes sphériques secondaires et la majeure partie de l'énergie proviendra de points sources localisés sur une surface entourant le point spéculaire : l'ensemble de ces sources définissent la zone spéculaire 2-D ou **surface de Fresnel**.
Chaque point à l'intérieur de la surface de Fresnel est à l'origine d'un signal dont le déphasage est inférieur à une certaine proportion de la longueur d'onde du signal incident. On définit ainsi la première zone de Fresnel comme étant la zone sur la surface de réflexion dont le déphasage du signal est inférieur à la moitié de la longueur d'onde du signal incident.
La première surface de Fresnel peut alors être décrite comme une ellipse centrée sur le point spéculaire et dont le demi-petit axe r_b et demi-grand axe r_a sont égaux à (Larson et Nievinski, 2013) :

$$r_b = \sqrt{\frac{\lambda h}{\sin(\theta)} + (\frac{\lambda}{2\sin(\theta)})^2} \tag{2.3}$$

$$r_a = \frac{r_b}{\sin(\theta)} \tag{2.4}$$

avec λ la longueur d'onde (en m), h la hauteur de l'antenne (en m) et θ l'angle d'élévation du satellite.
La figure 4.6 (b) page 82 présente l'évolution de la taille de la première surface de Fresnel en fonction de la hauteur de l'antenne et de l'angle d'élévation du satellite. Plus d'informations sur la position des points de réflexion spéculaire et les premières surfaces de Fresnel se trouvent dans la section 4 page 73, et dans l'article présenté en sous-section 4.5 page 89.

2.3.3 Réflexion diffuse : *glistening zone*

Une surface de réflexion plane est un cas purement théorique. Lorsque la surface réfléchissante présente une rugosité non nulle (cas réel), la réflexion n'est plus uniquement spéculaire, mais une composante diffuse apparaît.
Tout comme la réflexion spéculaire, la réflexion diffuse peut également être modélisée de deux manières : une modélisation simple en optique géométrique, et une modélisation un

peu plus complexe faite en optique ondulatoire. En optique géométrique, la surface réfléchissante est constituée par une concaténation de petites *facettes* (*scatterer*) de taille et d'orientation différentes. Chacune de ces facettes agit comme un miroir pour le rayon incident. Dans ces conditions, un récepteur R recevra des réflexions de chaque facette ayant une orientation idéale, à savoir une orientation telle que la normale à la facette au point d'impact S du rayon incident soit la bissectrice du rayon incident et de la droite (SR) : voir figure 2.5. On comprend dès lors que pour une onde incidente sur une surface modélisée par des facettes, des réflexions ne proviennent plus uniquement du point spéculaire nominal, mais de multiples points spéculaires, sous réserve que les facettes soient bien orientées. On définit alors la **surface de scintillement** ou ***glistening zone*** qui est la zone dans laquelle il est possible d'avoir des facettes bien orientées, en respectant un seuil de probabilité défini. Plus la rugosité de la surface réfléchissante est grande, plus la probabilité d'avoir des facettes bien orientées loin du point spéculaire nominal sera grande, par conséquent plus grande sera la *glistening zone*.

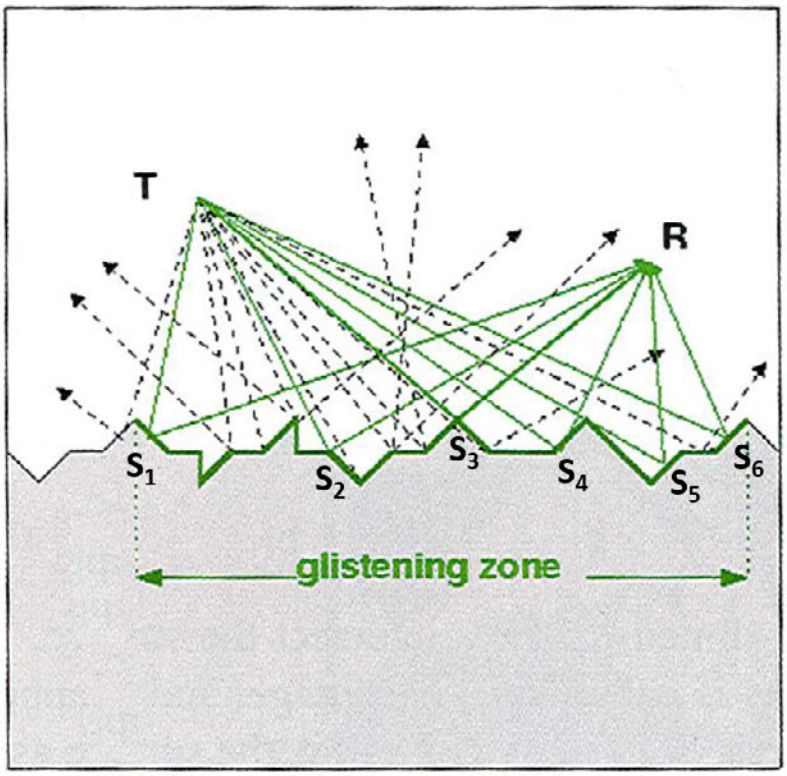


FIGURE 2.5 – Zone de scintillement (glistening zone) : décomposition de la surface réfléchissante en multiples facettes réfléchissantes.
(Adapté de Shuanggen *et al.* (2014).)

Dans une optique ondulatoire, la composante diffuse réfléchie par la surface est égale à la somme des ondes sphériques ré-émises par chaque point de la surface. On définit ainsi un faisceau de diffusion. Le signal reçu après une réflexion diffuse peut alors être considéré comme le cumul de multiples contributions individuelles, chacune introduisant un déphasage différent.

2.3.4 Rugosité de la surface réfléchissante : le critère de Rayleigh

Comme on a vu, si la surface de réflexion était parfaitement plane, il n'y aurait qu'une réflexion spéculaire : la réflexion diffuse est en effet due à la rugosité de la surface (Beckmann et Spizzichino, 1987). La composante spéculaire domine le signal lorsque la surface réfléchissante est suffisamment lisse. Dans ce cas, le processus de réflexion peut être modélisé en multipliant l'onde incidente par les coefficient de réflexion de Fresnel (voir sous-section 2.4.3) et par un facteur d'atténuation qui dépend de la rugosité de la surface (Alonso-Arroyo *et al.*, 2015). A l'inverse, la composante diffuse (ou incohérente) domine le signal lorsque la surface réfléchissante est suffisamment rugueuse. Lorsque la composante diffuse domine, le coefficient de diffusion et la phase sont différents pour chaque facette. La puissance réfléchie totale est la puissance de la somme des champs électriques venant de chaque facette (Alonso-Arroyo *et al.*, 2015). Cette puissance totale est inférieure à celle obtenue lorsque la composante cohérente domine.
Le **critère de Rayleigh** est généralement utilisé pour distinguer une surface lisse d'une surface rugueuse (Beckmann et Spizzichino, 1987). Une surface est considérée lisse si :

$$\sigma_{rms} < \frac{\lambda}{8\sin(\theta)} \tag{2.5}$$

avec λ la longueur d'onde du signal, θ l'angle d'élévation du satellite et σ_{rms} la rugosité RMS (*Root Mean Square*), qui correspond à la moyenne de l'écart géométrique de la surface topographique par rapport à la ligne moyenne de la rugosité.
Ce critère est équivalent à la condition que la différence de phase entre chaque facette soit inférieure à $\frac{\pi}{2}$. Il est possible d'appliquer un critère plus restrictif en remplaçant le facteur 8 dans l'équation 2.5 par 16 ou 32 (Beckmann et Spizzichino, 1987), ce qui signifie que la différence maximale de phase entre chaque facette sera de $\frac{\pi}{4}$, ou $\frac{\pi}{8}$, respectivement. Il est important de souligner ici que la rugosité n'est donc pas une grandeur définie du point de vue de la diffraction, puisque la même surface peut être jugée très lisse à une fréquence et un angle donnés, et très rugueuse pour une fréquence et un angle différents.
La figure 2.6 présente l'angle d'élévation au delà duquel la composante diffuse domine la réflexion, en fonction de la rugosité RMS de surface ou de la hauteur significative des vagues SWH (*Significant Wave Height*) dans le cas d'une réflexion à la surface de la mer. Le SWH est égal à la moyenne du plus haut tiers des hauteurs de vagues (du creux à la crête) mesurées en un point (Brenner *et al.*, 2000). On a $SWH \sim 4\sigma_{rms}$ (Tsai et Gardner, 1982).
Comme on peut le constater sur la figure 2.6, pour une rugosité de surface donnée, plus l'angle d'élévation du satellite sera important, plus la composante diffuse prendra de l'importance par rapport à la composante spéculaire. C'est un phénomène observé également lors d'expériences réalisées en laboratoire (e.g., Carreno-Luengo et Camps, 2015).

2.4 Caractéristiques du signal GNSS après réflexion

2.4.1 Polarisation d'une onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est composée de deux grandeurs vectorielles : son champ électrique $\vec{E}$ et son champ magnétique $\vec{B}$. Considérons une propagation linéaire d'une onde plane progressive monochromatique de pulsation ω selon un axe $\vec{z}$ dans un repère cartésien O_{xyz}. Les évolutions de $\vec{E}$ et de $\vec{B}$ étant liées au cours du temps d'après les équations de

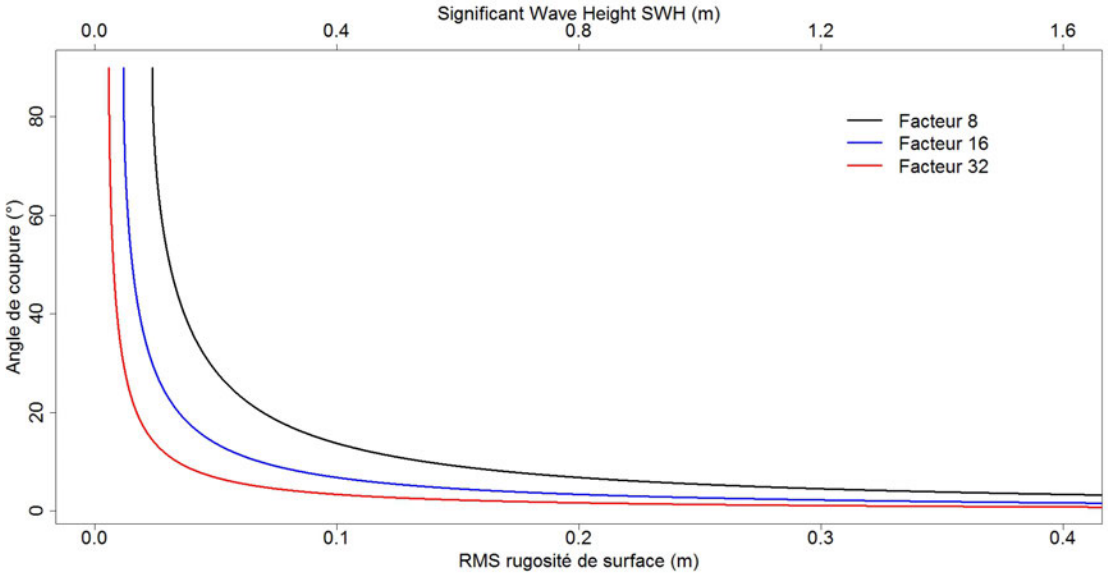


FIGURE 2.6 – Angle d'élévation au-delà duquel la composante diffuse domine la réflexion, en fonction de la rugosité RMS de surface.
Le calcul est basé sur le critère de Rayleigh avec des conditions plus ou moins restrictives.

Maxwell, il suffit de décrire le comportement du champ électrique $\vec{E}$ pour en déduire celui de $\vec{B}$. C'est pourquoi, par la suite, seul l'évolution du champ électrique $\vec{E}$ sera décrite.

L'étude de la polarisation d'une onde électromagnétique consiste à suivre l'évolution du champ électrique dans un plan normal à sa direction de propagation (c'est à dire parallèle à 0_{xy} dans notre exemple). L'observation se fait selon le sens opposé à celui de la propagation, de sorte que l'observateur voit l'onde arriver vers lui. La polarisation est alors définie comme le lieu géométrique qu'occupe l'extrémité du vecteur champ électrique au cours du temps.

Les composantes complexes du champ électrique d'une onde électromagnétique dans le vide sont :

$$\vec{E} = \vec{E_0} e^{j(\omega t - \vec{k}\vec{z})} \tag{2.6}$$

avec $\vec{k}$ le vecteur d'onde (de même sens et direction que $\vec{z}$, avec $\| \vec{k} \| = k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ étant la longueur d'onde) et :

$$\vec{E_0} = E_{x0} e^{-j\varphi_x} \vec{x} + E_{y0} e^{-j\varphi_y} \vec{y} \tag{2.7}$$

où E_{x0} et E_{y0} sont des amplitudes positives, et φ_x et φ_y les phases des composantes suivant l'axe $\vec{x}$ et $\vec{y}$. Par un choix judicieux de l'origine des temps, on aura $\varphi_x = 0$, et on notera $\varphi = \varphi_y$, le déphasage de E_x par rapport à E_y.

Alors, pour la partie réelle :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x & = & E_{x0} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{z}) \\ E_y & = & E_{y0} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{z} - \varphi) \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

Pour définir la polarisation d'une onde plane électromagnétique, on se place toujours dans un plan de côte z_0 donnée, perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, que l'on prendra nulle par exemple. Par conséquent, les coordonnées du champ électrique deviennent :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x & = & E_{x0}\cos(\omega t) \\ E_y & = & E_{y0}\cos(\omega t - \varphi) \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

A partir de ces composantes réelles, on distingue trois types de polarisation.

2.4.1.1 La polarisation elliptique (cas général)

Dans ce cas général, l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ décrit une ellipse dans le plan O_{xy} au cours du temps. La polarisation elliptique est dite *droite* si l'ellipse est décrite au cours du temps dans le sens des aiguilles d'une montre, et *gauche* si l'ellipse est décrite dans le sens trigonométrique. On a donc sous forme mathématique :
– Polarisation elliptique droite :

$$\vec{E} = E_{x0}\cos(\omega t)\vec{x} - E_{y0}\cos(\omega t - \varphi)\vec{y} \tag{2.10}$$

– Polarisation elliptique gauche :

$$\vec{E} = E_{x0}\cos(\omega t)\vec{x} + E_{y0}\cos(\omega t - \varphi)\vec{y} \tag{2.11}$$

2.4.1.2 La polarisation circulaire

C'est un cas particulier de la polarisation elliptique, obtenu lorsque $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$ et $E_{x0} = E_{y0}$, c'est à dire lorsque les deux composantes sont en quadrature temporelle et ont la même amplitude E_c. De même que la polarisation elliptique, la polarisation circulaire peut être droite ou gauche suivant le sens de parcours du cercle dans un plan parallèle au plan O_{xy} (voir figure 2.7). Sous forme mathématique, on aura alors :
– Polarisation circulaire droite (RHCP : *Right Hand Circular Polarization*) :

$$\vec{E} = E_c\cos(\omega t)\vec{x} - E_c\sin(\omega t)\vec{y} \tag{2.12}$$

– Polarisation circulaire gauche (LHCP : *Left Hand Circular Polarization*) :

$$\vec{E} = E_c\cos(\omega t)\vec{x} + E_c\sin(\omega t)\vec{y} \tag{2.13}$$

2.4.1.3 La polarisation rectiligne (ou linéaire)

La polarisation rectiligne correspond au cas où le champ électrique garde une direction constante au cours du temps, que l'on peut choisir parallèle à l'axe $\vec{x}$:

$$\vec{E} = E_r\cos(\omega t)\vec{x} \tag{2.14}$$

L'extrémité du vecteur $\vec{E}$ décrit alors un segment de droite dans le plan perpendiculaire à la trajectoire.

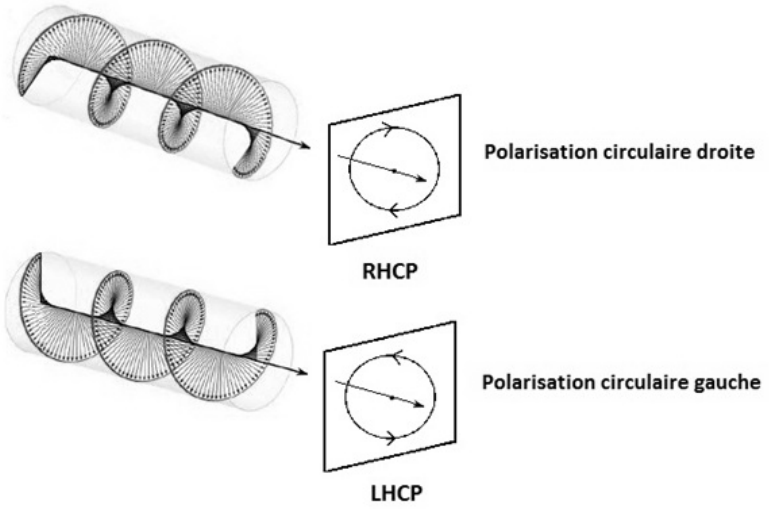


FIGURE 2.7 – Polarisation circulaire droite (RHCP) et gauche (LHCP) d'une onde électromagnétique.

Source : http://najib-spectroptique.yolasite.com et
http://affichagenumerique.e-monsite.com (adapté).

2.4.2 Décomposition d'une polarisation

Décomposons par exemple un champ polarisé elliptiquement sous la forme :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{x0}\cos(\omega t) \\ E_{y0}\cos(\omega t + \varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{x0}\cos(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ E_{y0}\cos(\omega t + \varphi) \end{pmatrix} \tag{2.15}$$

Ainsi, un champ polarisé elliptiquement (ou *a fortiori* circulairement) peut être vu comme la superposition de deux champs polarisés rectilignement, et convenablement déphasé (Izadpanah, 2009). Inversement, on a :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t) \\ E_0\sin(\omega t) \end{pmatrix} + \frac{1}{2}\begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t) \\ -E_0\sin(\omega t) \end{pmatrix} \tag{2.16}$$

Ceci signifie qu'une onde polarisée rectilignement est aussi la superposition d'une circulaire droite (RHCP) et d'une circulaire gauche (LHCP) de même amplitude (Cheng, 1993).

Ainsi, n'importe quel signal elliptique peut être décomposé en une somme de polarisation RHCP et LHCP.

Les ondes émises par les satellites GNSS sont des micro-ondes de la bande L (e.g. $L1_{GPS}$ = $L1_{Galileo}$ = $L1_{GLONASS}$ [1] = 1575.42 MHz, $L2_{GPS}$ = 1227.60 MHz, etc.) et polarisées RHCP (voir section 1.2.1 page 8). Cependant, la polarisation est susceptible de changer au cours d'une réflexion, en fonction du type de réflecteur (coefficient de réflexion) et de l'angle d'incidence comme on va le voir dans la prochaine sous-section 2.4.3.

1. Avec des petites variations fonctions du canal d'émission du satellite GLONASS qui est basé sur un accès multiple FDMA alors que GPS et Galileo utilisent un accès multiple CDMA : voir section 1.2.1 page 8.

TABLE 2.1 – Propriétés électriques de différents types de surface de réflexion (Hannah, 2001).

Surface de réflexion	Conductivité ($S.m^{-1}$)	Permittivité relative
Béton	2.10^{-5}	3
Sol sec	1.10^{-5}	4
Sol humide	2.10^{-1}	30
Eau douce	2.10^{-1}	80
Eau de mer	4	20

2.4.3 Effet de la réflexion sur la polarisation

Pour étudier l'influence d'une surface de réflexion donnée (avec différentes propriétés électriques) sur l'onde GNSS RHCP incidente, on peut utiliser les coefficients de réflexion de Fresnel (Rees, 2003; Hannah, 2001). Ces coefficients supposent une réflexion spéculaire simple sur une surface lisse.

2.4.3.1 Coefficients de réflexion de Fresnel pour une polarisation linéaire

Une onde polarisée circulairement pouvant être décomposée comme la somme de deux ondes polarisées linéairement (voir section 2.4.2 page 31), les coefficients de réflexion sont considérés pour un cas linéaire dans un premier temps. Les coefficients de Fresnel Γ_H et Γ_V pour les composantes horizontale et verticale d'un champ polarisé linéairement s'écrivent :

$$\Gamma_H = \frac{\sin(\theta) - \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}}{\sin(\theta) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}} \tag{2.17}$$

$$\Gamma_V = \frac{\epsilon \sin(\theta) - \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}}{\epsilon \sin(\theta) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}} \tag{2.18}$$

avec θ l'angle d'élévation du satellite et ϵ la constante diélectrique (complexe) de la surface réfléchissante telle que :

$$\epsilon = \epsilon_r + j60\lambda\sigma \tag{2.19}$$

avec ϵ_r la permittivité relative (constante diélectrique), σ la conductivité de la surface réfléchissante (en S/m) et λ la longueur d'onde. La permittivité relative et la conductivité dépendent toutes les deux de la fréquence du signal.
Les figures 2.8 et 2.9 montrent l'amplitude et la phase des coefficients de Fresnel pour la composante horizontale et verticale d'une onde électromagnétique se réfléchissant sur différents types de surface dont les propriétés diélectriques sont détaillées dans le tableau 2.1 (Hannah, 2001).
Comme on peut le constater sur les dernières figures, les variations d'amplitude et de phase sont différentes pour chaque polarisation linéaire (horizontale ou verticale). L'amplitude de la composante horizontale diminue progressivement, étant inversement proportionnelle à l'angle d'élévation du satellite. Par contre la phase reste quasiment constante et proche de 180°. La composante verticale diminue rapidement jusqu'à un certain angle (variant entre 8° et 30° en fonction des propriétés du milieu réfléchissant) puis ré-augmente. Cet angle à partir

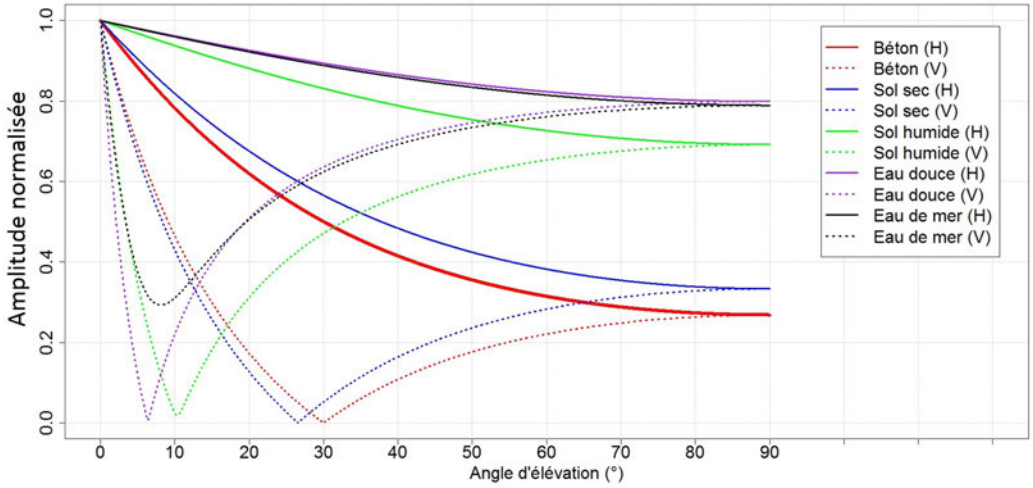


FIGURE 2.8 – Amplitude des coefficients de Fresnel pour la composante horizontale (H) et verticale (V) d'une onde électromagnétique se réfléchissant sur différents types de surface.

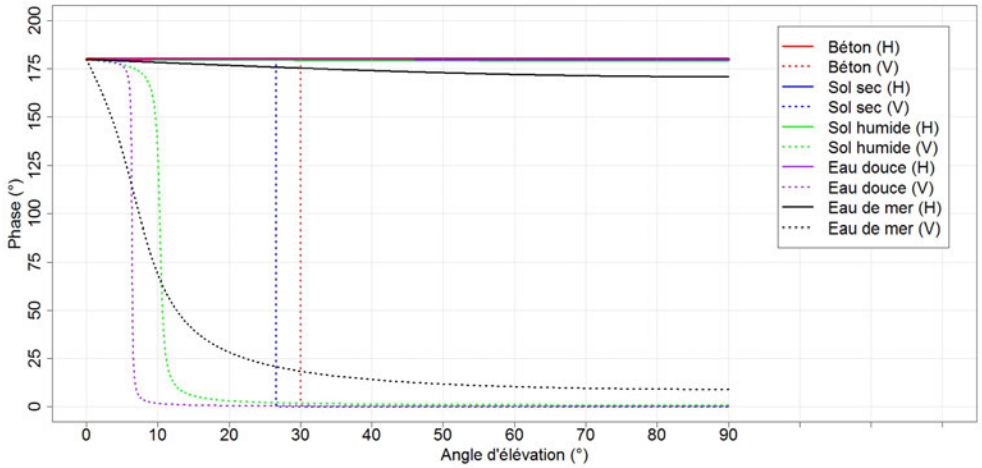


FIGURE 2.9 – Phase des coefficients de Fresnel pour la composante horizontale (H) et verticale (V) d'une onde électromagnétique se réfléchissant sur différents types de surface.

duquel s'opère l'inversion de la tendance s'appelle **l'angle de Brewster** (Brewster, 1815). Il est approximativement égal à 8° pour l'eau de mer et 30° pour du béton. Quant à la phase de la composante verticale, elle est quasi-constante et proche de 180° pour des angles inférieurs à l'angle de Brewster, et nulle pour des angles d'élévation supérieurs.

2.4.3.2 Coefficients de réflexion de Fresnel pour une polarisation circulaire

Puisque les signaux GNSS sont polarisés circulairement (RHCP), il est judicieux d'exprimer les coefficients de réflexion linéaires (équations 2.17 et 2.18) comme des coefficients de réflexion circulaires avec une composante co-polarisée (RHCP) et cross-polarisée (LHCP). On a ainsi, dans l'espace des nombres complexes (Hannah, 2001) :

$$\Gamma_{RHCP} = \frac{\Gamma_H + \Gamma_V}{2} \tag{2.20}$$

$$\Gamma_{LHCP} = \frac{\Gamma_H - \Gamma_V}{2} \tag{2.21}$$

Les figures 2.10 et 2.11 montrent les variations des amplitude et phase des coefficients de Fresnel pour la composante co-polarisée (RHCP) et cross-polarisée (LHCP) d'une onde électromagnétique (RHCP) incidente se réfléchissant sur différents types de surface en fonction de l'angle d'élévation. Les propriétés électriques sont détaillés dans le tableau 2.1.

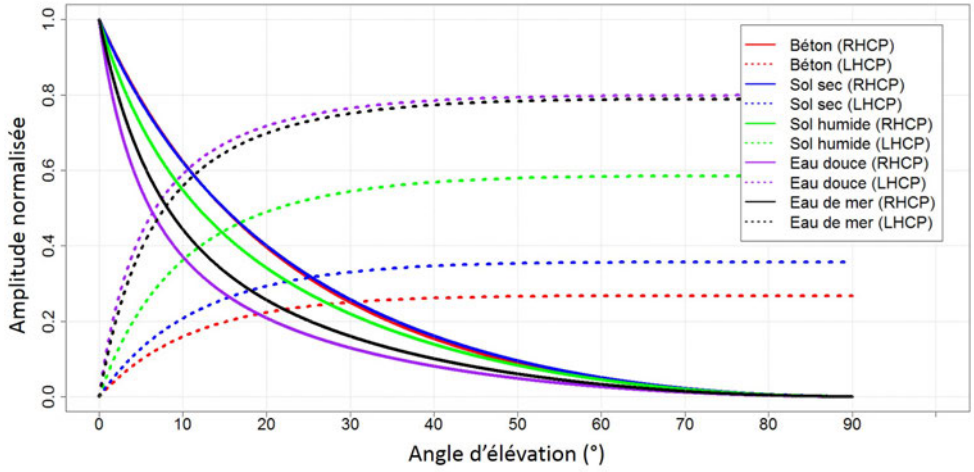


FIGURE 2.10 – Amplitude des coefficients de Fresnel pour la composante co-polarisée (RHCP) et cross-polarisée (LHCP) d'une onde électromagnétique (RHCP) incidente se réfléchissant sur différents types de surface.

Comme on peut le constater sur ces figures, pour un angle d'élévation du satellite égal à l'angle de Brewster, les amplitudes des composantes RHCP et LHCP sont égales. La composante RHCP domine le signal pour des angles d'élévation inférieurs à l'angle de Brewster. Pour des angles supérieurs à l'angle de Brewster, l'amplitude de la composante RHCP sera plus petite que celle de la composante LHCP qui augmentera progressivement jusqu'à dominer complètement le signal. Hormis à l'angle de Brewster, la différence d'amplitude entre la composante RHCP et LHCP se répercute sur le signal résultant qui ne sera plus circulaire, mais elliptique. Le signal sera quasiment linéaire à l'angle de Brewster. Pour des angles supérieurs à l'angle de Brewster (8° pour de l'eau de mer), le signal réfléchi sera donc essentiellement de polarisation elliptique gauche, devenant de moins en moins elliptique

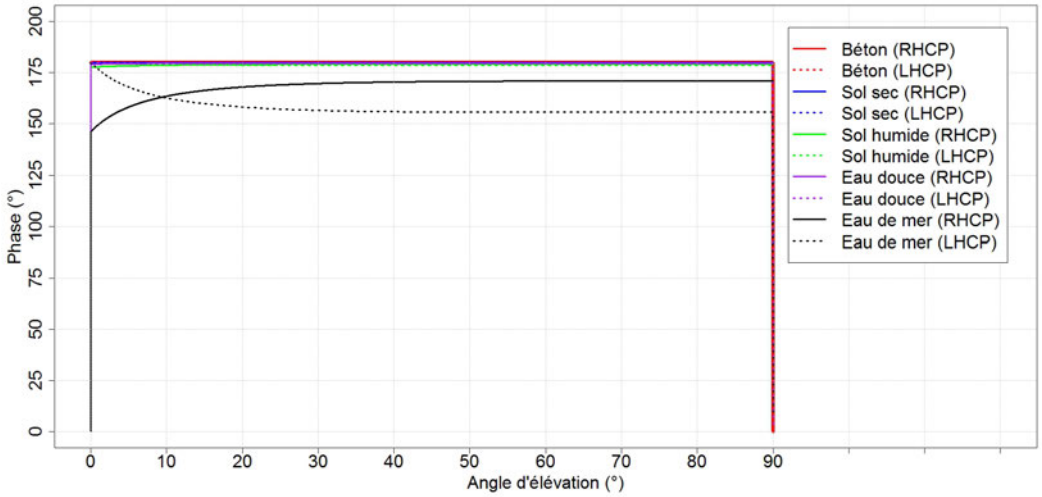


FIGURE 2.11 – Phase des coefficients de Fresnel pour la composante co-polarisée (RHCP) et cross-polarisée (LHCP) d'une onde électromagnétique (RHCP) se réfléchissant sur différents types de surface.

lorsque l'angle d'élévation augmente, jusqu'à devenir totalement circulaire gauche (LHCP) pour un angle d'élévation de 90°. L'inverse est observable pour des angles inférieurs à l'angle de Brewster : le signal réfléchi est totalement RHCP pour un angle d'élévation nulle, et devient de plus en plus "elliptique" jusqu'à devenir quasi-linéaire à l'angle de Brewster, au-delà duquel la polarisation gauche devient dominante.
Ceci signifie que pour observer des signaux GNSS réfléchis sur une surface avec un angle d'élévation inférieur à l'angle de Brewster, l'approche optimale sera d'utiliser une antenne à polarisation RHCP, et LHCP pour des signaux issus de satellites dont l'élévation est supérieure à l'angle de Brewster.
Il est également important de noter que l'amplitude des composantes LHCP du signal réfléchi reste toujours inférieure à l'amplitude du signal RHCP avant réflexion. L'amplitude maximale de la composante LHCP sera donc de 0.7-0.8 pour des angles d'élévation proche de 90° pour des réflexions sur l'eau et de ~ 0.3 pour des réflexions sur un sol sec.

2.4.4 Effet du gain d'antenne sur le signal réfléchi

Comme j'ai pu l'aborder dans la sous-section 2.2 page 22, le multi-trajet perturbe les mesures de code et de phase réalisées pour l'utilisation classique d'une antenne GNSS en positionnement. Les antennes GNSS géodésiques sont donc optimisées pour rejeter le signal réfléchi en étant polarisées RHCP. Plus le taux de réjection LHCP sera élevé plus l'antenne sera considérée comme performante. Ce taux de réjection, directement lié aux gains RHCP et LHCP de l'antenne, vont être dépendant de l'azimuth et de l'angle d'élévation de l'onde incidente. Les constructeurs ont ainsi l'habitude d'annoncer le ratio entre les composantes orthogonales d'un champ électrique telles qu'elles sont perçues au zenith de l'antenne. C'est ce qu'on appelle le ratio axial. Cette valeur, généralement exprimée en décibel, tend idéalement vers 0

dB, ce qui correspondrait à une polarisation purement circulaire. Le ratio axial tend à se dégrader lorsque l'angle d'incidence du signal reçu s'éloigne du zenith de l'antenne.
La figure 2.12 est un exemple de gain RHCP et LHCP pour l'antenne Leica AR10.

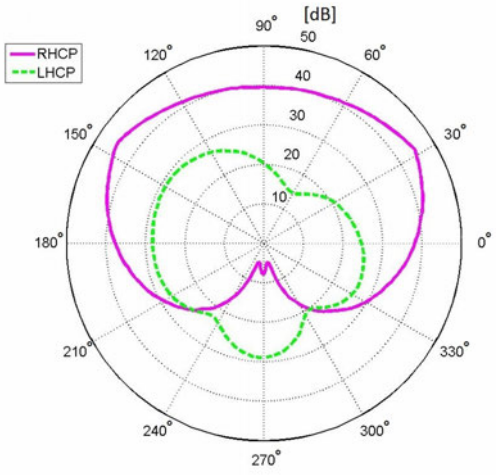


FIGURE 2.12 – Diagramme de gain RHCP et LHCP de l'antenne Leica AR10.

Les unités sont les dB pour le gain, et les degrés pour l'angle d'élévation.

Le signal réfléchi étant majoritairement LHCP (pour des angles supérieurs à l'angle de Brewster), la réjection de la composante LHCP par une antenne GNSS classique a un impact non négligeable sur la détection du signal réfléchi [2].
Hannah (2001) propose de calculer le coefficient de réflexion *effectif* prenant en compte à la fois les coefficients de réflexion de Fresnel, et le taux de réjection de l'antenne.

$$\Gamma_{eff} = (\rho_{RHCP} + 10^{\frac{-K_{LHCP}}{20}} \rho_{LHCP}) e^{-j\pi} \tag{2.22}$$

où ρ_{RHCP} est l'amplitude du coefficient de réflexion RHCP, ρ_{LHCP} l'amplitude du coefficient de réflexion LHCP, et K_{LHCP} le taux de réjection LHCP (en dB) de l'antenne.
Si l'on considère le ratio axial de $R_{axial} = 1.4$ dB annoncé par le constructeur pour l'antenne Leica AR10, le taux de réjection LHCP K_{LHCP} sera :

$$K_{LHCP} = 20log(\frac{r_{axial}+1}{r_{axial}-1}) = 21.9[dB] \tag{2.23}$$

avec $r_{axial} = 10^{R_{axial}/20}$.
Ce taux de réjection est, pour le moment, supposé *indépendant* de l'angle d'élévation et de l'azimuth du satellite. En prenant en compte cette valeur de 21.9 dB dans l'équation 2.22, on obtient les résultats présentés dans la figure 2.13.
Il est cependant très approximatif de considérer le taux de réjection LHCP indépendant de l'angle d'élévation du satellite. En effet, comme on peut le constater sur la figure 2.7, le gain

2. c'est pourquoi la technique IPT se base sur une antenne à polarisation linéaire verticale (idéalement à double polarisation verticale et horizontale) pour optimiser la détection du signal réfléchi, voir section 3.4.1.

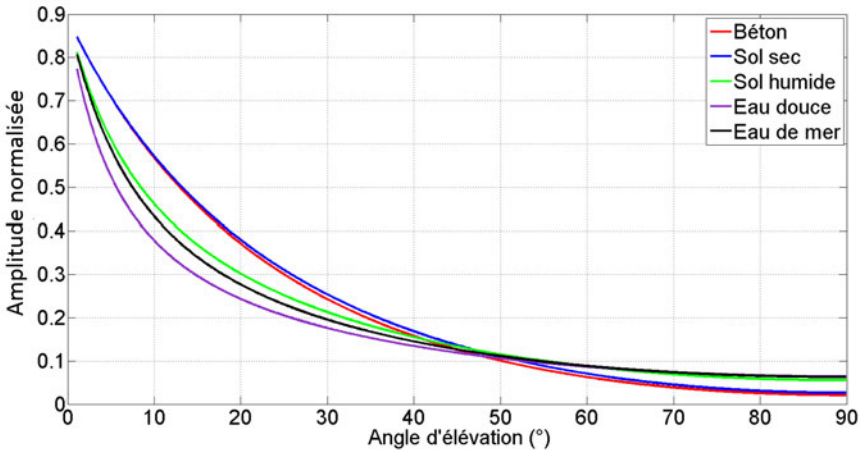


FIGURE 2.13 – Amplitude des coefficients de réflexion *effectifs* pour une onde RHCP se réfléchissant sur différents types de surface, et reçue par une antenne Leica AR10 (ratio axial de 1.4 dB).

LHCP de l'antenne augmente progressivement lorsqu'on s'éloigne du zenith, et devient même supérieur au gain RHCP pour une incidence inférieure à −50° (le signe négatif signifie que le signal est reçu par l'hémisphère inférieur de l'antenne. L'angle d'incidence est mesuré par rapport à l'horizontale). On constate donc que la polarisation de l'antenne ne bloque pas totalement les composantes LHCP, qui, au contraire, les capte même mieux que les composantes RHCP lorsque l'onde vient du nadir.

Pour cette raison, j'ai défini un nouveau coefficient de réflexion effectif prenant en compte non seulement le taux de réjection LHCP K_{LHCP}, mais également le taux de réjection RHCP K_{RHCP}, ainsi que leurs variations en fonction de l'angle d'élévation ϵ. On a ainsi :

$$\Gamma_{eff} = (10^{\frac{-K_{RHCP}(\epsilon)}{20}} \rho_{RHCP} + 10^{\frac{-K_{LHCP}(\epsilon)}{20}} \rho_{LHCP}) e^{-j\pi} \tag{2.24}$$

(Cette modélisation ne prend cependant pas encore en compte la correction en azimuth). Dans le cas d'une réflexion sur les différents types de sol présentés dans le tableau 2.1, et en prenant en compte le diagramme de gain réel de l'antenne Leica AR10 (figure 2.7), l'équation 2.24 donne les résultats présentés dans la figure 2.14. L'onde réflechie est supposée arriver dans le quart Sud-Est du diagramme de gain de l'antenne (figure 2.7).

La figure 2.15 présente les taux de réjection RHCP et LHCP de l'antenne Leica AR10 en prenant en compte leur dépendance avec l'angle d'élévation.

Comme on peut le voir sur la figure 2.14, la variation de l'amplitude du coefficient de réflexion effectif avec l'élévation du satellite émetteur est loin d'être évidente. Pour les surfaces fortement réfléchissantes (sol humide, eau douce, eau de mer), on observe globalement une diminution de l'amplitude avec l'angle d'élévation, jusqu'à une certaine valeur (vers 20°) où la tendance s'inverse. En ce qui concerne les surfaces faiblement réfléchissantes (sol sec, béton), l'amplitude décroit globalement sur toute la gamme d'angle d'élévation, de 0° à 90°. Ainsi, pour une surface faiblement réfléchissante (sol sec, béton), plus l'angle d'élévation du satellite sera élevé, mieux l'antenne rejettera la composante du signal réfléchi. C'est ce qui se

passe dans la plupart des cas d'acquisition. Par contre, dans le cas d'une surface fortement réfléchissante (sol humide, eau douce, eau de mer), la relation entre l'angle d'élévation et l'amplitude du signal effectivement reçu par l'antenne n'est plus linéaire.
Remarque importante : la modélisation présentée dans cette section suppose une réflexion purement spéculaire. Comme on a pu le voir dans la sous-section 2.3, une composante diffuse est également présente après réflexion et cette dernière augmente avec l'angle d'élévation (voir figure 2.6 page 29). L'amplitude du signal réfléchi capté par l'antenne aura donc tendance à diminuer avec l'angle d'élévation. Ceci n'est pas pris en compte dans la figure 2.14, et en pratique, le signal réfléchi n'est presque plus visible pour des angles d'élévation supérieurs à 60°.

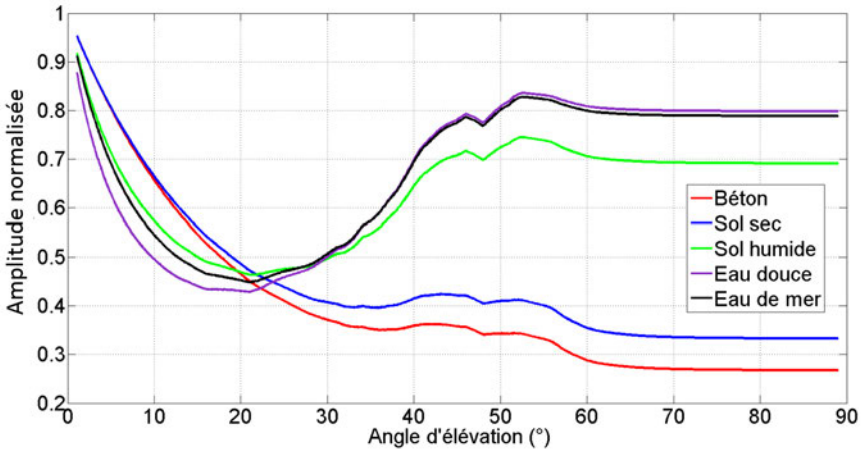


FIGURE 2.14 – Amplitude des coefficients de réflexion *effectif* pour une onde RHCP se réfléchissant sur différents types de surface et reçu par une antenne Leica AR10, en prenant en compte le diagramme de gain réel de l'antenne.

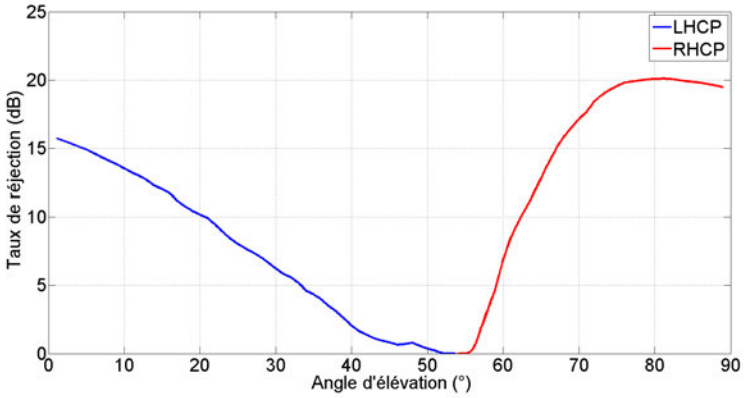


FIGURE 2.15 – Taux de réjection LHCP et RHCP de l'antenne Leica AR10.

Chapitre 3

La réflectométrie GNSS ou GNSS-R

Sommaire

3.1 Introduction . . . 41
3.2 Contexte historique . . . 41
3.3 Réflectomètre à double antenne . . . 42
3.3.1 Géométrie du système multistatique . . . 42
3.3.2 Observables . . . 43
3.3.2.1 Forme d'onde : délai et doppler . . . 43
3.3.2.2 Carte de délai-doppler : DDM . . . 44
3.3.2.3 Mesure sur la phase . . . 50
3.3.2.4 Théorie . . . 50
3.3.3 Applications . . . 52
3.3.3.1 Altimétrie . . . 52
3.3.3.2 État de mer / Rugosité de surface et vents de surface . . . 55
3.3.3.3 Humidité du sol . . . 55
3.3.3.4 Autres données géophysiques observables . . . 56
3.4 Réflectomètre à antenne unique . . . 57
3.4.1 Interference Pattern Technique . . . 57
3.4.1.1 Géométrie du système multistatique . . . 57
3.4.1.2 Observable : le diagramme d'interférence . . . 58
3.4.1.3 Applications . . . 58
3.4.2 Méthode SNR . . . 60
3.4.2.1 Géométrie du système multistatique . . . 60
3.4.2.2 Observable : Signal-to-Noise Ratio SNR . . . 60
3.4.2.3 Applications . . . 63
3.4.3 Conclusion . . . 65
3.5 Plateformes et contraintes . . . 66
3.5.1 Plateformes fixes / in situ . . . 67
3.5.2 Systèmes aéroportés . . . 67
3.5.3 Satellites . . . 68
3.5.3.1 TechDemoSat-1 . . . 68
3.5.3.2 CYGNSS : *Cyclone Global Navigation Satellite System* . . . 69

3.5.3.3 $^{3}CAT-2$ 69
3.5.3.4 PARIS-IoD : *Passive Reflectometry and Interferometry System In orbit Demonstrator* 69
3.5.3.5 GEROS ISS : GNSS REflectometry, Radio Occultation and Scatterometry onboard the International Space Station 70
3.6 Perspectives 70

3.1 Introduction

Introduit il y a une vingtaine d'années, le concept de réflectométrie GNSS, ou GNSS-R, fait aujourd'hui l'objet de nombreux développements prometteurs pour des applications en sciences de l'univers : voir Annexe A, page 202. Ce nouvel outil de télédétection, basé sur l'analyse des signaux GNSS réfléchis à la surface de la Terre, permet le suivi de niveaux d'eau ainsi que la détermination de différentes propriétés des surfaces océaniques et terrestres. Cette technique offre de nombreux avantages, à commencer par la pérennité et la continuité des mesures satellites de type GNSS ainsi qu'une couverture dense et continue partout dans le monde. Elle est vouée à s'améliorer avec l'arrivée de nouvelles constellations GNSS (Galileo, COMPASS-Beidou, etc.) et l'augmentation du nombre de satellites opérationnels. Les applications envisagées sont variées : suivi environnemental, prévisions météorologiques, recherches en climatologie, etc. Les enjeux scientifiques sont donc très importants.
Le concept de réflectométrie GNSS se base sur l'analyse de la différence de trajets entre les signaux directs émis par les satellites des systèmes GNSS et ceux réfléchis sur la surface terrestre, ce qui permet de déduire un certain nombre de paramètres. Le système mis en place est dit passif et opportuniste - il se contente "d'écouter", sans émission de signal, et profite des satellites déjà en fonctionnement (Mayo, 2014).
Les systèmes GNSS-R ont un caractère multistatique : un seul récepteur permet de collecter les informations correspondant à l'émission de signaux par plusieurs satellites. Différentes configurations sont envisageables, le récepteur pouvant être fixé sur un mât ou sur un point haut du sol ou être installé sur une plateforme mobile (avion, ballon, dirigeable), voire embarqué à bord d'un satellite en orbite basse. La zone couverte par les réflexions est d'autant plus vaste que le récepteur est haut, mais le signal est alors plus faible, ce qui impose des antennes de gain important (Mayo, 2014).
Ce chapitre a pour but de présenter le principe de la réflectométrie GNSS et détaille les principales applications de cette technique de télédétection opportuniste. Il résume de manière non exhaustive les principales techniques et applications du GNSS-R dans ses deux configurations possibles : système d'acquisition à double antenne, ou à antenne unique. Dans ce manuscrit de thèse, je m'attarderai principalement sur le système à antenne unique et la méthode "SNR" qui a fait l'objet principal de mes recherches, notamment dans les chapitres 5 page 109 et 6 page 153. Pour plus d'informations, l'article de Cardellach *et al.* (2011) est une très bonne synthèse sur la technique GNSS-R et ses applications, ainsi que le tutoriel réalisé par Zavorotny *et al.* (2014).

3.2 Contexte historique

La première évocation de l'idée d'utiliser les ondes GPS réfléchies sur la surface de la Terre pour des applications de télédétection (diffusiométrie) remonte à 1988 (Hall et Cordey, 1988). Le concept a été démontré accidentellement pour la première fois en juillet 1991, lorsqu'un récepteur GPS à bord d'un avion militaire français se verrouilla sur un signal GPS réfléchi. Cet incident ne fut rapporté pour la première fois qu'en 1994 (Aubert *et al.*, 1994). La réflectométrie GNSS ne commença cependant à attirer l'attention de la communauté scientifique que lorsqu'elle fut réellement mis en application par l'ESA (European Space Agency) en 1993 (Martin-Neira, 1993) sous la dénomination de PARIS (*Passive Reflectometry and Interferometry System*) pour des applications altimétriques. Le GNSS-R fait depuis lors l'objet de très

nombreuses recherches, notamment ces dernières années, avec le développement considérable des puissances de calcul.
Deux perspectives se sont très rapidement distinguées en ce qui concerne le mode d'acquisition des signaux réfléchis, chacune avec son lot d'inconvénients et d'avantages :

– La première consiste à séparer l'acquisition du signal direct et du signal réfléchi au moyen de deux antennes distinctes : la première, orientée vers le zenith pour capter le signal direct, et la seconde, orientée vers le nadir pour capter le signal réfléchi. L'intérêt principal de ce réflectomètre (i.e., système d'acquisition), est la possibilité d'optimiser la réception des deux signaux (direct et réfléchi) indépendamment l'un de l'autre, notamment en terme de polarisation d'antenne. La cross-corrélation des deux signaux est ensuite facilitée par le fait de les avoir séparés. Cette technique d'acquisition est présentée plus en détail dans la section 3.3, page 42.
– La deuxième méthode consiste à utiliser une antenne GNSS unique pour capter conjointement les signaux direct et réfléchi. Une des premières évocations de ce réflectomètre à simple antenne date de 1998 par Kavak *et al.* (1998). Cette technique prit réellement de l'ampleur qu'une dizaine d'année plus tard, lorsque deux groupes de chercheurs développèrent le concept simultanément, mais avec deux approches différentes :
  • la première équipe, menée par le Professeur A. Camps à l'Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) propose d'utiliser une simple antenne GNSS, mais dont la polarisation n'est plus classiquement RHCP, mais linéaire. De plus, l'antenne n'est pas orientée vers le zenith, mais vers l'horizon. Ces deux modifications présentent de très nombreux avantages que je développerai dans la partie 3.4.1, page 57.
  • la seconde équipe, dirigée par le Professeur K. Larson à l'University of Colorado consiste à mesurer les fluctuations du rapport signal-sur-bruit (SNR, i.e. *signal-to-noise ratio*) enregistré par une antenne GNSS classique, en se basant sur le fait que le gain d'antenne n'est pas nul pour des angles d'élévation inférieurs à zéro (i.e., signal réfléchi). Le signal direct et réfléchi interfèrent donc au niveau de l'antenne, et ces interférences cohérentes sont particulièrement visible dans le SNR. Cette technique est généralement désignée comme "technique SNR" par la communauté scientifique, et présente l'avantage majeur de pouvoir utiliser une antenne GNSS classique sans aucune modification matérielle. Ceci est particulièrement intéressant vu le nombre d'antennes des réseaux GNSS permanents. Cette méthode est celle qui m'a principalement intéressée dans le cadre de ma thèse, et est présentée un peu plus en détails à la section 3.4.2, page 60.

3.3 Réflectomètre à double antenne

3.3.1 Géométrie du système multistatique

Le système d'acquisition GNSS-R est constitué de deux antennes GNSS de qualité géodésique montées dos à dos sur un axe horizontal fixé au-dessus de la surface réfléchissante. L'antenne du dessus (A), orientée vers le zénith, capte le signal directement émis par le satellite (configuration classique pour le positionnement), tandis que l'antenne du dessous (B), orientée vers le nadir, capte le signal qui a été réfléchi sur la surface. Comme on peut le voir schématiquement sur la figure 3.1, chaque satellite GNSS émet des signaux qui sont reçus à la fois directement par l'antenne A, mais également par l'antenne B après réflexion sur la surface.

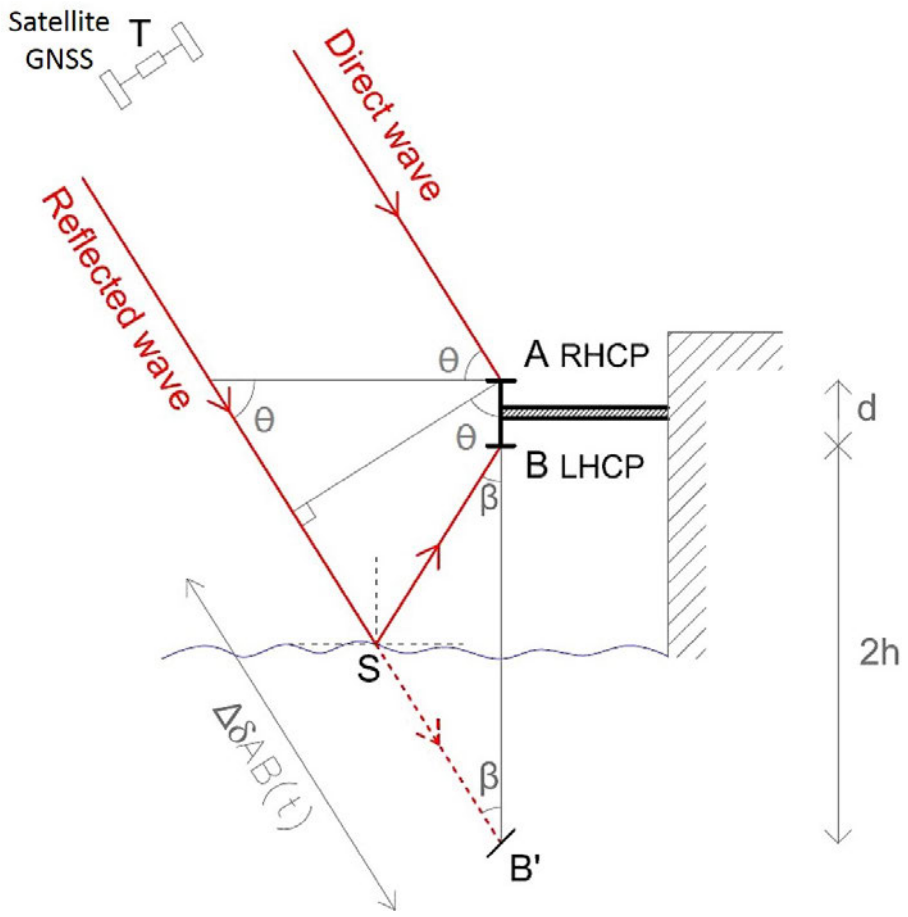


FIGURE 3.1 – Géométrie d'un réflectomètre GNSS à double antenne.

Les signaux réfléchis étant principalement polarisés LHCP (voir section 2.4.3 page 32), l'antenne du bas est généralement également polarisée LHCP, pour optimiser la puissance du signal réfléchi reçu. L'antenne du haut est une antenne GNSS classiquement polarisée RHCP pour capter les signaux directs.

3.3.2 Observables

3.3.2.1 Forme d'onde : délai et doppler

La détection d'un signal GNSS par un récepteur nécessite la mesure de corrélation entre le signal reçu et une réplique connue du code PRN (voir section 1.2.2 page 9). L'amplitude de cette corrélation au cours du temps est alors une forme d'onde théoriquement triangulaire (pic de corrélation) puisque les modulations du code C/A et P sont des trains d'impulsions rectangulaires (voir section 1.2.2 page 9 et figure 3.2). La lecture du pic de corrélation ainsi déterminé est à la base de la détection des satellites en vue, et est à l'origine de la mesure de pseudo-distances (voir section 1.2.2 page 9) dans le cas de l'emploi classique du GNSS pour le positionnement.

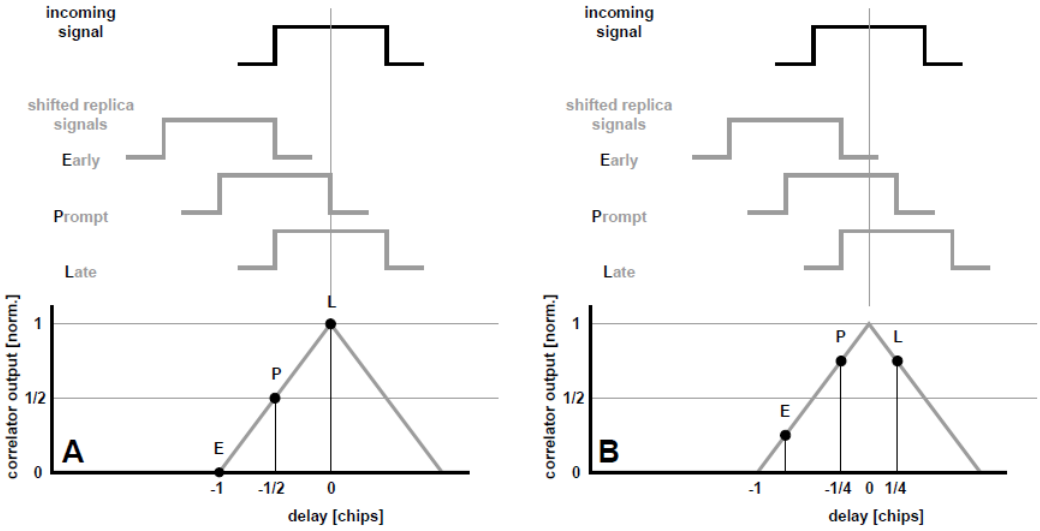


FIGURE 3.2 – Décomposition de la fonction de corrélation du signal direct.
Source : Helm (2008) (adapté)

Si l'on considère une réflexion spéculaire du signal GNSS, l'onde réfléchie parcourt un trajet supplémentaire par rapport à l'onde directe, son pic de corrélation avec la réplique du code sera en retard par rapport au pic de corrélation de l'onde directe. Ce retard, que l'on appelle le **délai**, est directement lié à la hauteur de l'antenne par rapport à la surface de réflexion : voir figure 3.3 (a).

La position du satellite (et éventuellement du récepteur dans le cas d'un LEO (*Low Earth Orbiter*) par exemple), n'étant pas constante, la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps, ce qui se caractérise par un effet Doppler. La corrélation avec une réplique connue du code permet également de déterminer le déphasage fréquentiel du signal reçu (direct ou réfléchi) dû à cet effet Doppler : voir figure 3.3 (b).
L'analyse du *délai* de l'onde réfléchie par rapport à l'onde directe, s'appelle **la réflectométrie GNSS par mesure sur le code**. Elle revient en fait à mesurer la différence des pseudo-distances entre les voies directes et réfléchies.

3.3.2.2 Carte de délai-doppler : DDM

Lorsqu'une onde GNSS se réfléchit sur la surface terrestre, le processus de réflexion n'est pas uniquement spéculaire, mais une composante diffuse apparaît également. Elle est fonction de la rugosité de la surface et de l'angle d'incidence (voir section 2.3 page 25). Cette composante diffuse provient d'une large zone autour du point spéculaire que l'on appelle la zone de scintillement, qui peut être modélisée comme une concaténation de petites facettes engendrant une multitude de réflexions spéculaires autour du point de réflexion spéculaire nominal (voir section 2.3.3 page 26). Le signal provenant de chacun de ces points de réflexion a une trajectoire sensiblement différente de celle du trajet de la réflexion nominale principale,

et sera reçu au niveau de l'antenne avec un retard (ou *délai*) par rapport à cette réflexion spéculaire nominale. Si l'on considère le temps de trajet $\tau(x,y)$ du rayon se réfléchissant sur le point de coordonnées (x,y) de la surface de réflexion, et τ_{spec} le temps de trajet du rayon de réflexion spéculaire nominale, on a :

$$\Delta\tau(x,y) = \tau(x,y) - \tau_{spec} \tag{3.1}$$

Avec $\Delta\tau(x,y)$ le retard (*délai*) entre la réception du rayon réfléchi au point de coordonnées (x,y) et du rayon réfléchi au point de réflexion spéculaire nominal.
Ce retard peut également être exprimé en terme de distance en multipliant l'équation 3.1 par c la vitesse de la lumière :

$$\Delta\rho(x,y) = c\Delta\tau(x,y) \tag{3.2}$$

Un certain nombre de points de réflexion dans la surface de scintillement présenteront les mêmes délais au niveau de l'antenne. Si l'on considère une surface de réflexion plane, ces points d'iso-délai décriront une ellipse centrée sur le point de réflexion spéculaire nominal : voir figure 3.4 (b et c). Ces ellipses ont pour équation (Helm, 2008) :

$$1 = \frac{y^2}{a_{iso}^2} + \frac{x^2}{b_{iso}^2} \tag{3.3}$$

avec

$$a_{iso} = \frac{\sqrt{2H\Delta\rho(x,y)}}{(sin(\theta)^{3/2}} \tag{3.4}$$

$$b_{iso} = \frac{\sqrt{2H\Delta\rho(x,y)}}{(sin(\theta)^{1/2}} \tag{3.5}$$

θ étant l'angle d'élévation du satellite et H la hauteur de l'antenne par rapport à la surface de réflexion.
Chaque point de réflexion de la surface de scintillement augmente la puissance du signal reçu avec le délai correspondant. Ces délais se cumulent et modifient l'amplitude globale de la forme d'onde, comme illustré sur la figure 3.4). La pente descendante de la forme d'onde (bord de fuite ou *trailing edge*) d'un signal réfléchi sera donc moins rapide que dans le cas théorique d'une réflexion purement spéculaire, et l'inclinaison de cette pente dépend directement de la rugosité de la surface de réflexion. On observe, dans ces conditions, une dégradation de la fonction de corrélation qui se caractérise par un étalement de la forme d'onde. Plus la surface est rugueuse, plus la forme d'onde sera étalée (Cardellach, 2001). La forme de l'écho retour est donc directement liée à la surface sur laquelle l'onde se réfléchit : voir figure 3.4.

Par ailleurs, les contributions respectives des différentes zones de la surface de scintillement présentent des fréquences Doppler différentes de celle du point spéculaire nominal, en raison des différences de géométrie et de parcours. De la même manière que pour les délais, une partie des points de réflexion auront la même fréquence Doppler et matérialiseront des courbes d'iso-Doppler (figure 3.4 b et c) qui seront des hyperboles inscrites dans la surface de réflexion. Les tailles et les formes des ellipses iso-retard et des courbes d'iso-Doppler dépendent des géométrie de l'émetteur et du récepteur.
En traçant les formes d'ondes obtenues le long de chaque courbe d'iso-Doppler, on obtient ce que l'on appelle des **cartes de délai-Doppler** (ou DDM : *Delay-Doppler Map*). Ces cartes représentent l'intensité du signal reçu avec en abscisse le délai, et en ordonnées les fréquences Doppler. Les figures 3.5 présentent un exemple de DDM obtenues pour un signal direct (a), et un signal réfléchi sur la surface de la mer 60 m en dessous de l'antenne (b). Comme on peut le constater sur ces figures, la DDM du signal réfléchi apparaît plus bruitée que celle du signal direct. On observe également un déphasage entre les deux, directement lié à la hauteur de l'antenne (60 m) au-dessus de la surface de réflexion. En revanche, la DDM du signal réfléchi n'apparait pas beaucoup plus étalée que la DDM du signal direct, ce qui indique un état de mer très calme au moment des mesures.

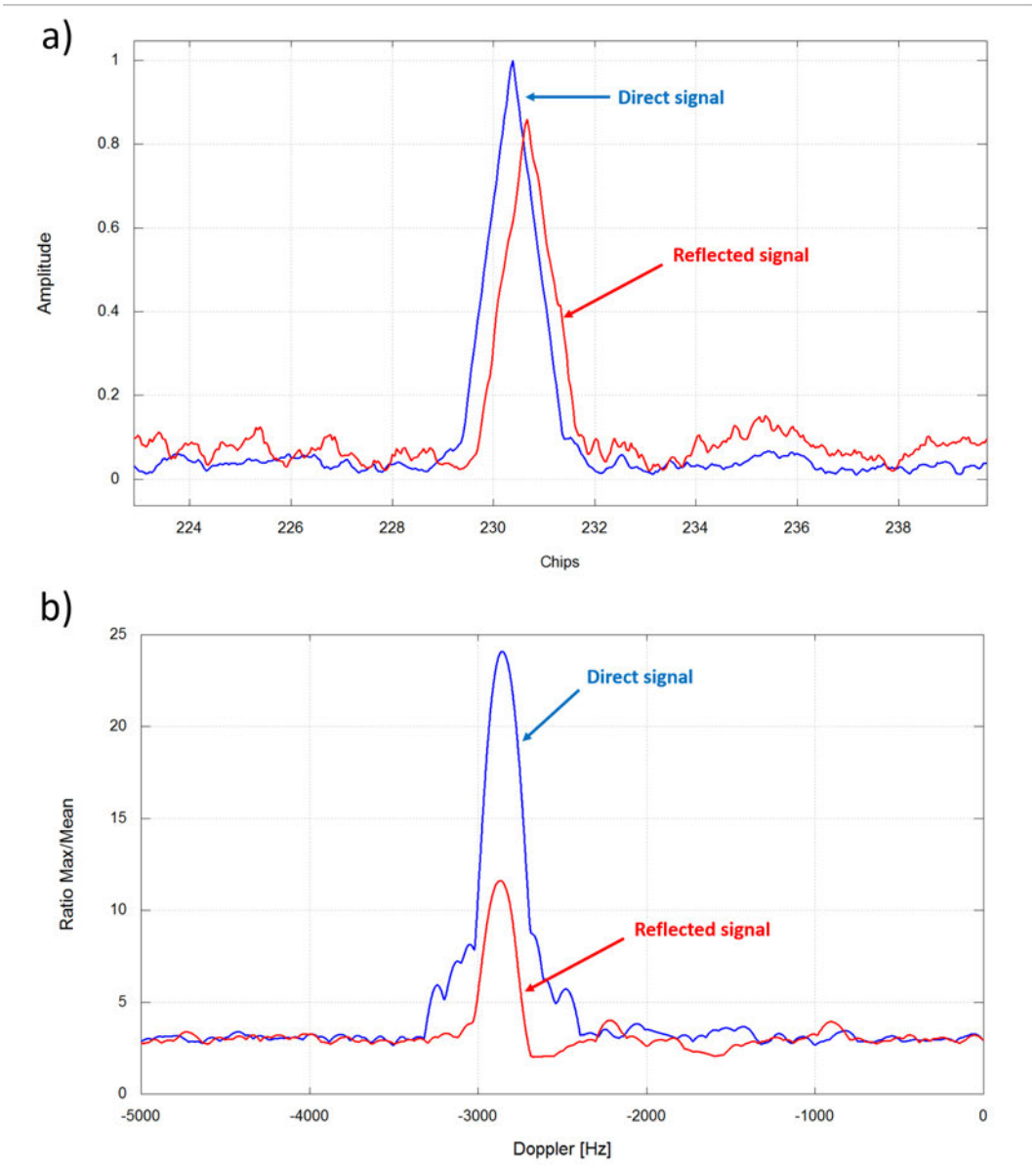


FIGURE 3.3 – Formes d'onde (a) et fréquences Doppler (b) des signaux direct et réfléchi. Les mesures ont été effectuées par une antenne ARINC743A GPS S67-1575 orientée vers le zenith et polarisée RHCP pour capter le signal direct, et une même deuxième antenne orientée vers le nadir et polarisée LCHP pour le signal réfléchi. Les deux antennes étaient placées sur un phare à 60 m au-dessus du niveau de la mer. Les mesures présentées dans cette figure ont été réalisée sur le satellite GPS PRN15, dans la situation d'une mer calme.

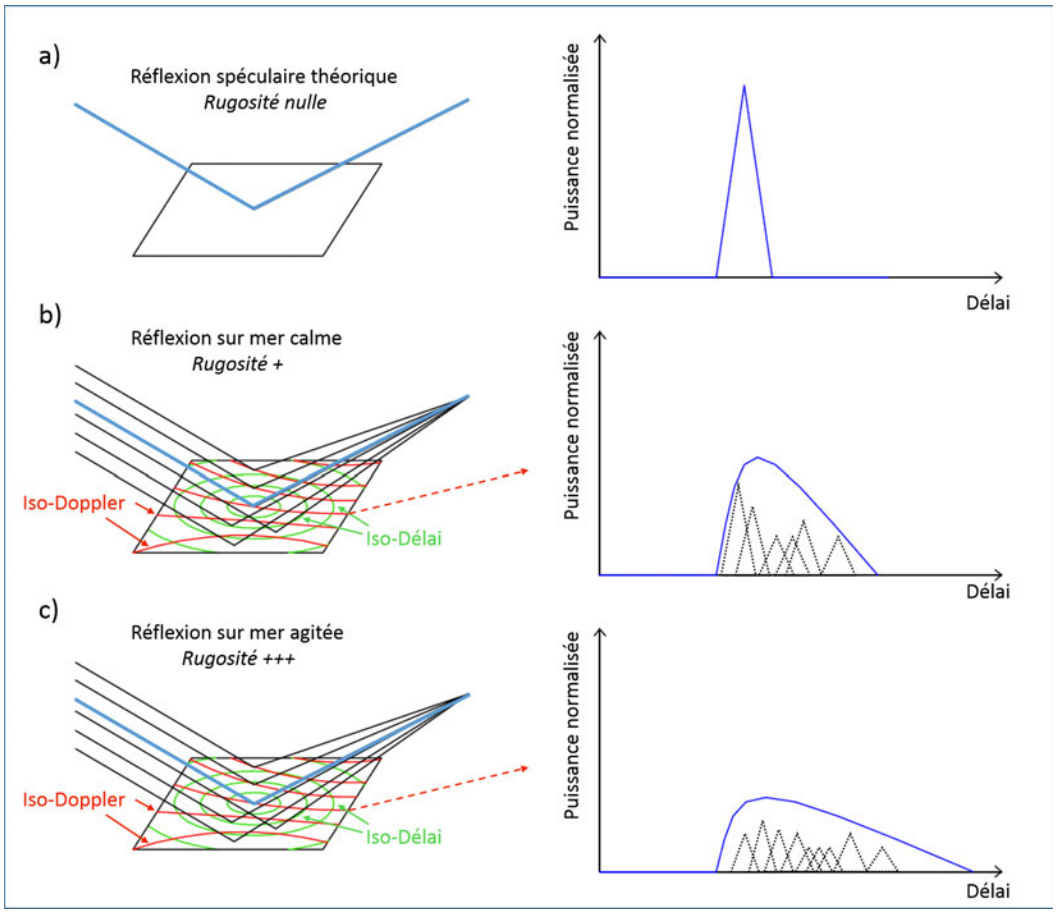


FIGURE 3.4 – Allure des formes d'onde dans le cas d'une réflexion théorique spéculaire (a), sur mer calme (b), sur mer agitée (c).

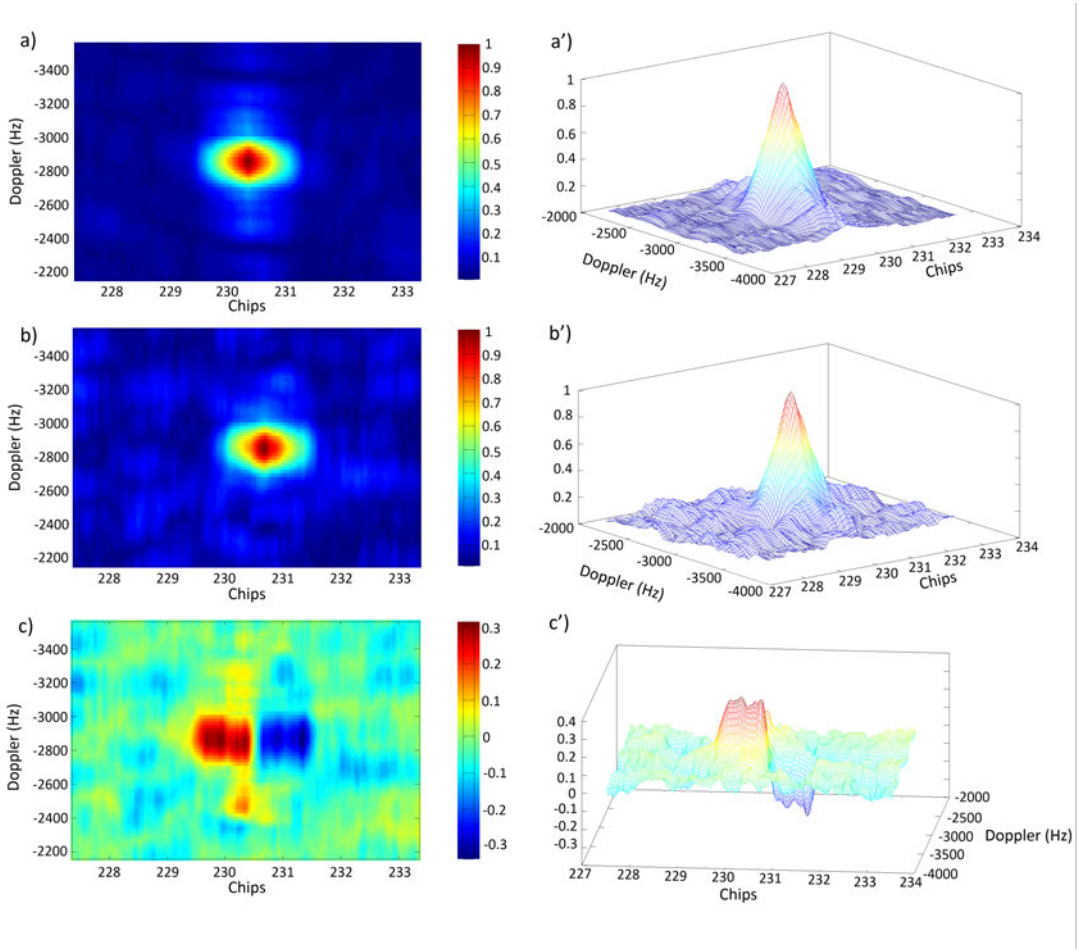


FIGURE 3.5 – Cartes de Délai-Doppler (DDM) obtenues pour un signal direct (a et a') et réfléchi (b et b'), et différence entre les deux (c et c').

Les mesures ont été effectuées par une antenne ARINC743A GPS S67-1575 orientée vers le zenith et polarisée RHCP pour capter le signal direct, et une même deuxième antenne orientée vers le nadir et polarisée LCHP pour le signal réfléchi. Les deux antennes étaient placées sur un phare à 60 m au-dessus du niveau de la mer. Les mesures présentées dans cette figure ont été réalisée sur le satellite GPS PRN15, dans les mêmes conditions de mer calme (cf. figure 3.3).

3.3.2.3 Mesure sur la phase

En positionnement GNSS classique, il existe deux manières de mesurer la distance séparant le récepteur du satellite : la mesure de pseudo-distance sur le code (voir section 1.2.2 page 9) ou la mesure plus précise sur la phase porteuse (voir 1.2.3 page 11). Il en va de même en réflectométrie GNSS où les deux alternatives sont possibles. Les mesures sur le code sont réalisées à travers l'analyse du décalage entre les pics de corrélation des formes d'onde du signal direct et réfléchi (section 3.3.2.1). Ce décalage temporel est ensuite multiplié par la vitesse de propagation des ondes électromagnétique pour obtenir le trajet supplémentaire parcourue par l'onde réfléchie. Connaissant l'élévation du satellite, cette distance supplémentaire peut ensuite aisément être traduite en terme de hauteur verticale du récepteur par rapport à la surface de réflexion (voir section 3.3.3.1).
La méthode de mesure GNSS-R sur la phase consiste à comparer les phases des porteuses des signaux directs et réfléchis (soit directement en asservissant le signal réfléchi sur le signal direct, soit indirectement à travers une corrélation avec des répliques locales). De manière similaire au positionnement GNSS classique, la mesure sur la phase fournit des estimations beaucoup plus précises que la mesure sur le code, mais se présente l'inconvénient de la détermination d'ambiguïté, qui nécessite des mesures en bi-fréquence et l'application de techniques inspirées du PPP classique. Les premières expériences de réflectométrie GNSS sur la phase ont été effectuées par l'ESA avec le projet PARIS (*PAssive Reflectometric Interferometric System*) et les travaux de Martin-Neira (1993). Je citerai également les travaux de Semmling *et al.* (2012) et Treuhaft *et al.* (2001).
L'analyse de la phase en réflectométrie GNSS est la technique présentant actuellement les meilleurs résultats (quelques centimètres de précision en altimétrie), et fait donc l'objet de la majeure partie des recherches dans le domaine, mais comme on l'a souligné, elle nécessite la mise en place d'une chaîne de traitement très lourde et d'un matériel spécifique. Par contre, la méthode basée sur l'analyse du SNR d'une antenne unique est plus simple à mettre en œuvre (voir section 3.4.2.2, page 60).

3.3.2.4 Théorie

La comparaison entre le signal direct et le signal réfléchi peut se faire principalement de deux manières différentes : soit par des récepteurs GNSS-R dits *conventionnels* (cGNSS-R) ; soit par des récepteurs GNSS-R dits *interférométriques* (iGNSS-R).

Récepteurs conventionnels de forme d'onde (cGNSS-R) : de la même manière que pour le signal direct, ces récepteurs cherchent à corréler le signal réfléchi $S_r(t)$ reçu avec une réplique $a^*(t)$ du code C/A générée par le récepteur après compensation du décalage de la fréquence Doppler f_d : voir figure 3.6. Cette intégration cohérente est réalisée pendant un intervalle de temps T_c (généralement > 1 ms). On a ainsi :

$$Y^c(t_0,\tau,f_d) = \frac{1}{T_c}\int_{t_0}^{t_0+T_c} S_r(t)a^*(t-\tau)e^{-j2\pi(f+f_d)t}\,dt \tag{3.6}$$

où t_0 est le temps marquant le début de l'intégration cohérente, et τ est le décalage de la réplique par rapport au signal réfléchi.
Afin de diminuer le bruit (thermique et *speckle*), il est également possible de faire une intégration incohérente (moyenne) sur N_i échantillons. Le signal *amélioré* prend alors la forme

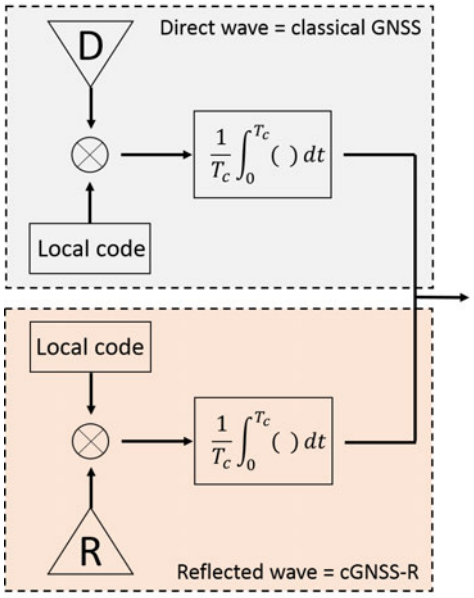


FIGURE 3.6 – Principe de la mesure cGNSS-R.

suivante :

$$\langle |Y^c(\tau, f_d)|^2 \rangle \sim \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} |Y^c(t_n, \tau, f_d)|) \tag{3.7}$$

Ce type de récepteurs cGNSS-R a l'avantage de permettre la séparation des différents satellites par leurs codes, mais nécessite une large bande passante pour obtenir la moyenne quadratique et donc une bonne résolution. Une bonne alternative est alors la technique interférométrique.

Récepteur de forme d'onde interférométrique (iGNSS-R) : Dans ce type de récepteur, le signal réfléchi (enregistré par l'antenne LHCP) n'est plus corrélé à une réplique locale, mais directement au trajet direct (enregistré par l'antenne RHCP) : figure 3.7.

Si l'on reprend ainsi les équations 3.6 et 3.7 et que l'on remplace la réplique $a^*(t)$ par le signal direct S_d, on aura :

$$Y^i(t_0, \tau, f_d) = \frac{1}{T_c} \int_{t_0}^{t_0+T_c} S_r(t) S_d(t-\tau) exp^{-j2\pi(f+f_d)t} dt \tag{3.8}$$

$$\langle |Y^i(\tau, f_d)|^2 \rangle \sim \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} |Y^i(t_n, \tau, f_d)|) \tag{3.9}$$

Avec cette méthode iGNSS-R, il n'y a pas besoin de connaître le code, du fait que le signal direct est lui-même utilisé et directement comparé au signal réfléchi.

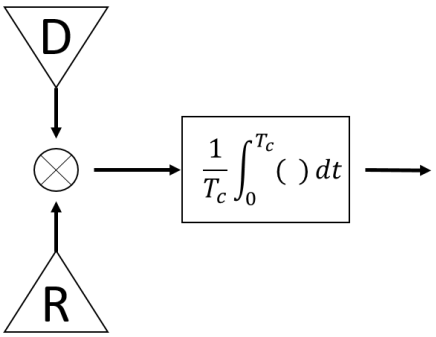


FIGURE 3.7 – Principe de la mesure iGNSS-R.

3.3.3 Applications

3.3.3.1 Altimétrie

La première application historique de la réflectométrie GNSS est l'étude de la hauteur de la surface de réflexion et de ses variations dans le temps. La différence de trajet entre le signal direct et réfléchi est directement liée à la hauteur de l'antenne et il existe différentes manières de la déterminer.

Altimétrie basée sur le positionnement Soit $\Delta\delta^s_{AB}(t)$ la distance supplémentaire parcourue par l'onde émise par le satellite s et réfléchie sur la surface de la mer. Cette distance supplémentaire induit un retard de l'onde réfléchie par rapport à l'onde directe. Ce retard revient à considérer une antenne réceptrice fictive B' située à la verticale de A et de B (voir figure 3.1). Cette antenne virtuelle B' sera située à une distance h sous la surface de réflexion égale à la même distance h séparant l'antenne B de la surface. Un changement de cette hauteur h entraîne une modification de la distance $\Delta\delta^s_{AB}(t)$, ce qui provoque un décalage vertical de l'antenne virtuelle B'. On voit donc dès à présent une première méthode géométrique de détermination de h : il suffit de faire la différence d'altitude ΔH obtenue par un positionnement GNSS classique avec les deux antennes pour obtenir la distance $2h+d$, avec d la base verticale séparant les centres de phase des deux antennes A et B :

$$h = \frac{\Delta H - d}{2} \tag{3.10}$$

Altimétrie basée sur la mesure de code Cette méthode est la même que celle utilisée pour déterminer la pseudo-distance dans le cas de l'emploi classique d'un GNSS pour le positionnement, et nécessite le système réflectomètre à double antenne. 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 PRN de l'onde GNSS. Le récepteur RHCP présentera un pic de corrélation entre l'onde reçue et la réplique connue du code PRN à un certain intant t_0 tandis que le récepteur LHCP présentera le pic de corrélation à un instant $t_0+\tau$: figure 3.8. 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 : $\Delta\delta^s_{AB}$. On peut ensuite en déduire la hauteur h du récepteur par rapport à la surface de réflexion par la relation suivante, avec θ l'angle d'élévation du satellite, et d la base verticale séparant les centres de phase des deux antennes A et B :

$$\Delta\delta^s_{AB}(t) = (2h + d)\sin(\theta) \tag{3.11}$$

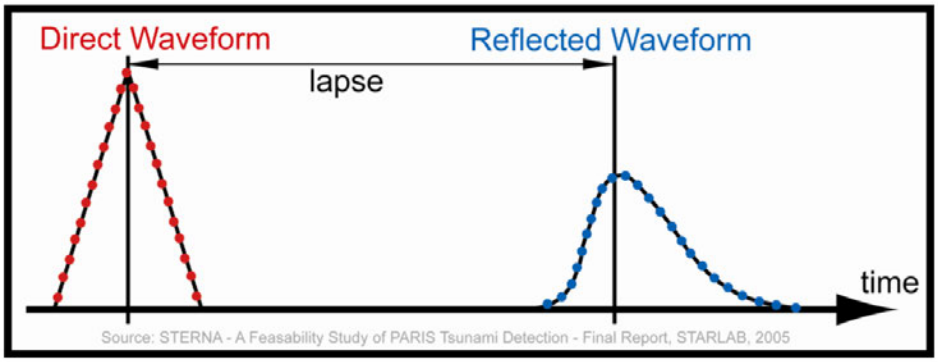


FIGURE 3.8 – Principe de la mesure GNSS-R sur le code.

Comme dans le cas de la mesure classique de pseudo-distances en GNSS, cette méthode est grossière et la précision que l'on peut escompter est métrique.
En guise d'illustrations, j'ai testé cette méthode en positionnant une antenne ARINC743A GPS S67-1575 RHCP et une même antenne orientée LHCP en haut du phare de Cordouan (45°35'11"N ; 1°10'24"O) et installée à ~ 60 m au-dessus du niveau de la mer. Les acquisitions ont été enregistré par un DataLogger [1] développé par la société Silicom, avec une fréquence d'échantillonnage de 25 MHz, et une quantification de 8 bits.
Durant les quelques minutes de données traitées, 6 satellites GPS ont été détectés : PRN12, PRN15, PRN17, PRN24, PRN25 et PRN26. Les différences de pseudo-distance basées sur le code C/A entre les signaux directs et réfléchis ont été déterminées pour chacun de ces satellites, et la figure 3.9 montre l'exemple du satellite PRN12.
Comme on peut le voir sur cette figure, la détermination de cette distance reste très bruitée. La moyenne de cette distance $\Delta\delta^s_{AB}$ a été calculée pour chacun des 6 satellites, et h a été retrouvé en utilisant l'équation 3.11. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.1.
On peut constater que la précision obtenue est métrique (écart-type de 1.92 m).

Altimétrie basée sur la mesure de phase De manière similaire à la mesure de phase pour un récepteur GNSS classique, on peut établir l'équation suivante :

$$\lambda\Delta\psi^s_{AB}(t) = \Delta\delta^s_{AB}(t) - \lambda\Delta N^s_{AB}(t) + c\Delta\tau_{AB}(t) + \Delta Z^s_{AB} - \Delta I^s_{AB} \tag{3.12}$$

Avec $\Delta\psi^s_{AB}$ le déphasage entre le signal direct et le signal réfléchi, ΔN^s_{AB} la différence des ambiguïtés entières entre les deux récepteurs A et B, et $\Delta\tau_{AB}(t)$ leurs biais d'horloge, supposé

1. http ://www.silicom.fr/en/products/gnss/23/echo

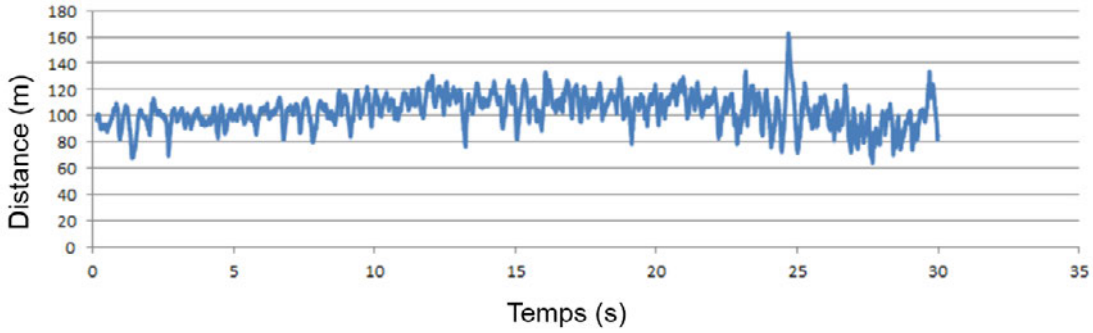


FIGURE 3.9 – Différence de trajet entre les signaux directs et réfléchis pour le satellite PRN12.

TABLE 3.1 – Altimétrie basée sur la mesure de code C/A : résultats d'une campagne de mesure à 60 m au-dessus du niveau de la mer au phare de Cordouan.

Satellite	Hauteur d'antenne h (m)
PRN12	57.47
PRN15	60.47
PRN17	57.75
PRN24	61.98
PRN25	61.66
PRN26	59.46
Moyenne	**59.80 ± 1.92**

nul lorsqu'ils sont synchronisé (cas idéal). ΔZ^s_{AB} est le terme différentiel du rallongement de trajet dû à la traversée de la troposphère, et ΔI^s_{AB} celui dû à la traversée de l'onde électromagnétique dans l'ionosphère. Ces deux termes sont généralement négligés étant donné que les antennes sont très proches l'une de l'autre, et on considère que la différence de trajet entre le signal direct et réfléchi n'engendre pas de grande différence en terme d'erreur troposphérique et ionosphérique. Ceci est vrai seulement si la hauteur d'antenne est suffisamment faible ; dans le cas d'une mesure aéroportée ou embarquée par exemple, le signal réfléchi traversera deux fois les couches basses de l'atmosphère (avant et après réflexion), ce qui n'est pas le cas de l'onde directe.

Il est possible d'estimer le biais d'horloge entre les deux récepteurs par double différence classique, et la résolution d'ambiguïté est similaire à ce qui est effectué en PPP classique. On peut donc déduire h de la mesure du déphasage entre les signaux directs et réfléchis par :

$$h = \frac{c\Delta\tau_{AB}(t) - \lambda\Delta N^s_{AB}(t) - \lambda\Delta\psi^s_{AB}(t)}{2\sin(\theta)} - \frac{d}{2} \tag{3.13}$$

3.3.3.2 État de mer / Rugosité de surface et vents de surface

La caractérisation de la surface des mers ou océans en termes de hauteurs de vagues, et par suite, de la direction et de la vitesse des vents marins fut la seconde application de la réflectométrie GNSS. Les approches pour retrouver l'état de mer ou la rugosité de surface en domaine continental sont globalement similaires. Elles se basent principalement sur l'analyse des DDM.
Puisque les formes d'ondes des signaux réfléchis dépendent de la nature de la surface de réflexion (voir section 3.3.2.1), les DDM des signaux réfléchis sont donc aussi directement liées à l'état de la surface de réflexion. Il est donc théoriquement possible, par inversion des DDM, de déduire différentes caractéristiques de la surface de réflexion. Ceci fait actuellement l'objet de nombreuses recherches (e.g., Cardellach *et al.* (2003); Komjathy *et al.* (2004); Garrison *et al.* (2002)) et il existe un très grand nombre d'approches. Il est par exemple possible de déduire des modèles empiriques en comparant différentes caractéristiques des DDM, comme par exemple la valeur du pic de puissance (*power peak*), la pente du bord de fuite (*trailing edge slope*), le décalage entre les bandes iso-Doppler pour un délai fixé, ou encore le volume de la DDM (Cardellach, 2001). Ainsi, par exemple, d'après les expériences faites par (Marchan-Hernandez *et al.*, 2010), le volume de la DDM montre une très grande dépendance avec la hauteur significative des vagues SWH (*Significant Wave Height*).
De nombreuses études se basent également sur des approches plus théoriques, en modélisant la réflexion pour générer des DDM théoriques. On retiendra par exemple le **modèle de Kirchoff** qui simule la réflexion autour du point spéculaire en approximant la surface en un ensemble de petites facettes d'où le signal est réfléchi de manière spéculaire. Ceci suppose que la surface soit assez plate pour être localement représentée par des plans. En raison de cette approximation, ce modèle permet surtout de prendre en compte la rugosité de la surface à grande échelle, à la différence de la méthode SSM (***Small Perturbation Method***), qui est plus sensible aux variations à petite échelle. Afin de prendre en compte les variations à petite et grande échelles, on peut combiner les deux méthodes précédentes et sommer la contribution de la rugosité à grande échelle avec l'effet à petite échelle du champ réfléchi, au moyen par exemple du **Two-Scale Composite Model** (2SCM), qui donne un modèle plus complet spatialement et plus robuste. Dans le domaine de longueur d'onde des GNSS, l'expérience montre cependant que le modèle de Kirchhoff suffit et permet d'éviter de calculer un modèle à deux échelles (2SCM) qui nécessite une grande puissance de calcul, et c'est donc le modèle habituellement utilisé (Komjathy *et al.*, 2000; Zavorotny et Voronovich, 2000; Lowe *et al.*, 2002a).

3.3.3.3 Humidité du sol

De nos jours, les instruments micro-ondes passifs (radiomètres) et actifs (radars) sont généralement utilisés pour le suivi de l'humidité des sols. Ces techniques ont toutes deux des avantages et des inconvénients. Les mesures effectuées par radiomètres, par exemple, sont peu sensibles à la rugosité de surface, mais sont fortement perturbées par la température environnante ainsi que par les interférences provoquées par les ondes radio artificielles (Shuanggen *et al.*, 2014). La résolution temporelle est bonne et le traitement des données est simple, mais la résolution spatiale est faible : de l'ordre de 100 m pour les radars et supérieure à 10 km pour les radiomètres (Jackson *et al.*, 1996; Masters, 2004). Les radars, quant à eux, sont moins sensibles à l'humidité du sol, et le coefficient de rétrodiffusion est directement lié aux carac-

téristiques du sol et de la végétation telles que la rugosité à l'échelle de la longueur d'onde ou la constante diélectrique. De plus, le traitement est complexe, et la résolution temporelle est généralement faible (Jackson *et al.*, 1996; Masters, 2004).
La réflectométrie GNSS apparaît comme une bonne alternative complémentaire aux techniques actuelles. En effet, les formes d'ondes calculées par le récepteur de l'onde réfléchie sont directement influencée par le taux d'humidité. Ainsi, Zavorotny et Voronovich (2000) ont établi la relation quantitative entre l'humidité du sol et le pic de corrélation de la forme d'onde.
La réflectométrie GNSS est donc perçue comme un excellent outil pour mesurer le taux d'humidité des sols, et cette application originale s'est fortement développée ces dernières années. Utilisée en alternative complète, ou comme outil de calibration et de validation des missions satellites, cette technique présente les avantages suivants, d'après Zavorotny et Voronovich (2000) :
– Les constellations GNSS assurent l'émission de signaux stables, gratuits et pérennes et un récepteur GNSS-R est passif, de petite taille, de faible poids et de faible consommation électrique ;
– Les ondes GNSS sont des ondes de type L (~ 1.5 GHz), parfaitement compatibles pour la mesure de l'humidité des sols ;
– Par rapport aux radiomètres, les variations thermiques de l'environnement ne perturbent que très peu les signaux GNSS ;
– Un récepteur GNSS-R peut recevoir simultanément des signaux provenant de plusieurs satellites, ce qui améliore drastiquement la résolution spatiale et temporelle ;
– Un récepteur GNSS-R peut également être utilisé comme horloge précise et comme récepteur GNSS classique pour le positionnement, ce qui simplifie l'accès aux informations géographiques concernant les données.

Si la communauté scientifique a plutôt l'habitude de privilégier le système à double antennes pour les applications altimétriques, la mesure de l'humidité du sol par GNSS-R se fait généralement plutôt avec le système à antenne unique (voir section 3.4.2.3), bien qu'elle soit possible par l'analyse des formes d'onde (Zavorotny et Voronovich, 2000).

3.3.3.4 Autres données géophysiques observables

Mesure de la biomasse et du couvert végétal : De plus en plus d'études démontrent les potentialités du GNSS-R pour la mesure du couvert végétal et de la biomasse. Par exemple, Ferrazzoli *et al.* (2010) a présenté des simulations théoriques des coefficients de diffusion spéculaires d'une zone forestière pour démontrer les potentialités du GNSS-R pour la quantification de la biomasse forestière.

Mesure de la cryosphère, évolution de la banquise : des travaux de caractérisation des couches supérieures de neige par réflectométrie GNSS ont également été proposés, notamment par Wiehl *et al.* (2003); Botteron *et al.* (2013). Les ondes GNSS pénètrent en effet la neige jusqu'à une profondeur de quelques mètres en étant réfléchi partiellement par chaque couche de neige rencontrée. Les délais de chaque composante résultante dans le signal réfléchi permettent d'estimer la profondeur de chaque couche (Fabra, 2013). On peut également mesurer simplement la hauteur de neige en utilisant les applications altimétriques du GNSS-R et en comparant les mesures effectuées en hiver de celles effectuées en été, sans présence

de neige.

3.4 Réflectomètre à antenne unique

3.4.1 Interference Pattern Technique

3.4.1.1 Géométrie du système multistatique

La méthode appelée *Interference Pattern Technique (IPT)* a été développée et testée durant les dernières années et a fait ses preuves pour l'inversion de nombreux paramètres géophysiques de la surface de réflexion. Parmi ceux-ci, on retiendra par exemple les travaux de Rodriguez-Alvarez *et al.* (2009a) pour l'estimation de l'humidité d'un sol nu, les travaux de Rodriguez-Alvarez *et al.* (2011b) pour l'estimation de la topographie, de l'humidité et de la hauteur de végétation d'un champ de blé et d'orge ou dans un champ de maïs (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2010). Des travaux ont également été réalisé sur l'estimation de la hauteur du couvert neigeux (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2011b). En milieu océanique, on citera les travaux de Rodriguez-Alvarez *et al.* (2011a) pour l'altimétrie ou de Alonso-Arroyo *et al.* (2015) pour l'estimation de la hauteur des vagues.
La méthode se base sur l'analyse du diagramme d'interférences généré entre les signaux GNSS direct et réfléchi reçus simultanément par une antenne unique. Afin de simplifier la modélisation du diagramme d'interférence et d'optimiser la réception, l'antenne réceptrice est orientée vers l'horizon. Cela permet d'avoir un diagramme de gain d'antenne symétrique. Cela signifie donc que la seule différence entre le signal direct et réfléchi réside dans l'interaction de l'onde réfléchie avec la surface.

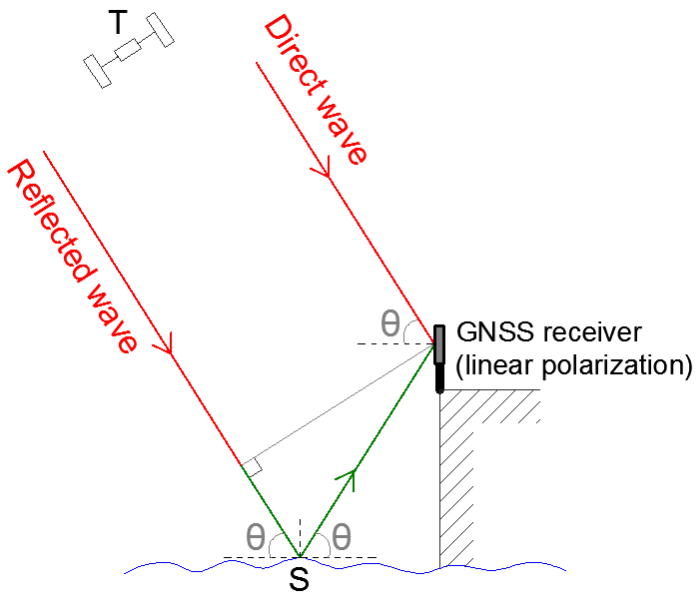


FIGURE 3.10 – Géométrie d'un réflectomètre GNSS à antenne unique - méthode IPT.

Comme on a pu le voir dans la section 1.2.1, les signaux émis par les satellites GNSS sont des signaux de type RHCP, et une antenne GNSS classique est donc elle aussi de type RHCP. Dans le cas du GNSS-R par IPT, l'antenne réceptrice est polarisée linéairement (verticalement) pour plusieurs raisons :

– une simple polarisation linaire peut recevoir simultanément les signaux directs et réfléchis ;
– les composantes horizontales et verticales ont une plus grande variation en fonction de l'angle d'élévation que les composantes RHCP et LHCP. La polarisation linéaire est donc plus sensible à l'interaction entre la surface et l'onde RHCP réfléchie. Comme on peut le voir dans la figure 3.11, l'apport de la polarisation horizontale est très limité, et masque l'information si l'on utilisait une polarisation LHCP.

3.4.1.2 Observable : le diagramme d'interférence

Les signaux électromagnétiques direct et réfléchi s'additionnent au niveau de l'antenne et induisent des interférences constructives et destructives. Le satellite émetteur étant en mouvement, le diagramme d'interférence est donc fonction de l'angle d'élévation du satellite. L'existence de l'angle de Brewster (voir section 2.4.3 page 32) produit une singularité dans le diagramme d'interférence (appelé *notch* par la communauté scientifique), où l'on observe un minimum de l'amplitude des oscillations du signal reçu. La position de cette singularité (i.e., l'angle d'élévation pour lequel on observe le minimum de l'amplitude des oscillations), ainsi que son amplitude sont deux paramètres qui dépendent des propriétés de la surface réfléchissante et qui vont donc pouvoir être utilisés pour l'inversion de certaines caractéristiques. La fréquence des oscillations du signal reçu sera également un paramètre utilisable.

3.4.1.3 Applications

En domaine continental La figure 3.11 montre un exemple de diagramme d'interférence théorique, en fonction de l'humidité du sol réfléchissant et de la polarisation (composantes horizontale et verticale). Comme on peut le constater sur cette figure (tirée des travaux de Rodriguez-Alvarez *et al.* (2009a)), la singularité visible à 30° pour une humidité du sol de 0% (a), est visible à 20° pour une humidité du sol de 20% (c). Cette singularité n'est pas visible pour une polarisation horizontale (b et d). On peut également observer que non seulement la position de la singularité est sensible à l'humidité du sol, mais également son amplitude qui augmente avec l'humidité.
L'amplitude de la singularité est influencée par la rugosité du sol, ce qui n'est pas le cas de sa position (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2009a). La position de la singularité semble donc être une méthode assez robuste pour estimer l'humidité du sol réfléchissant. Il est intéressant de noter qu'en utilisant un réflectomètre IPT à double polarisation (i.e. plus seulement verticale mais également horizontale), il est possible d'estimer l'angle de Brewster de la différence de phase entre les diagrammes d'intéferences obtenus avec les deux polarisations : l'angle de Brewster est identifié lorsque la phase relative des deux diagramme d'interférences est de 90°. L'utilisation d'une double polarisation rend les mesures indépendantes à la rugosité du sol et permet des estimations de l'angle de Brewster (et donc de la singularité) beaucoup plus précises. Ceci est expliqué et étudié dans les travaux de Alonso-Arroyo *et al.* (2014a,b) par exemple.

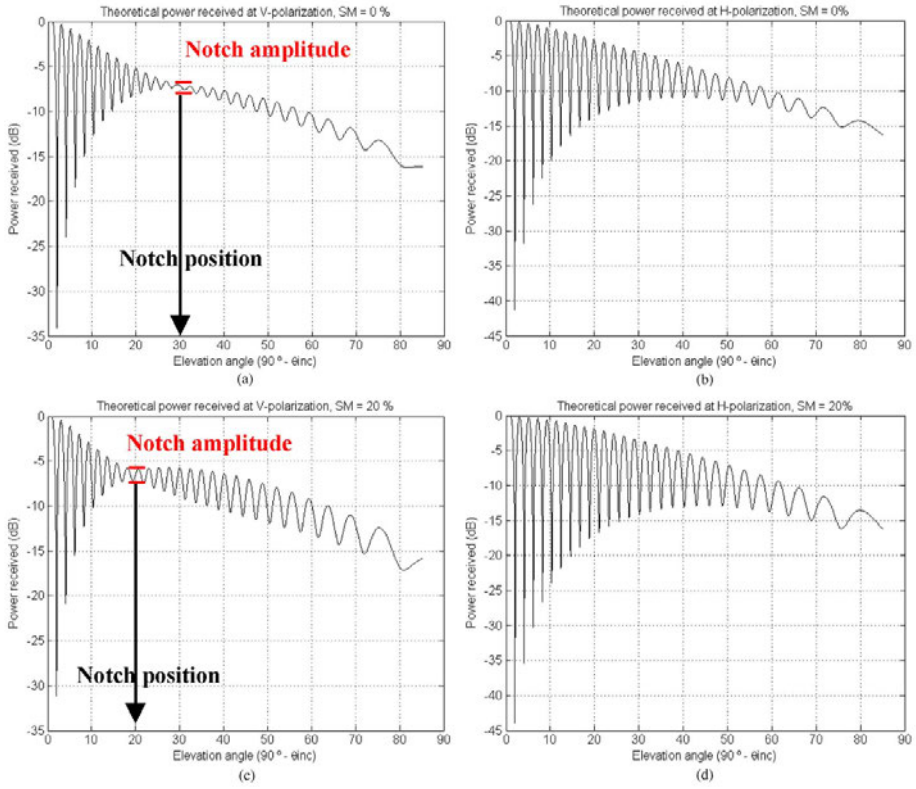


FIGURE 3.11 – Puissance théorique reçue par un réflectomètre de type IPT pour une réflexion sur un sol nu, en fonction de l'angle d'élévation du satellite avec un polarisation verticale (gauche), et horizontale (droite), pour une humidité du sol de 0% (haut), et de 20 % (bas).
Source : Rodriguez-Alvarez *et al.* (2009a).

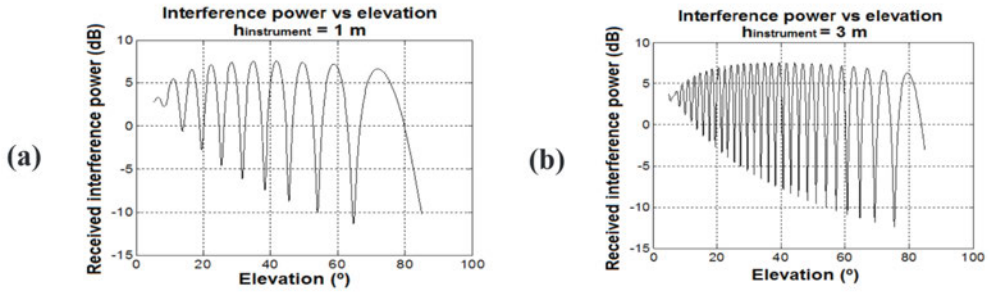


FIGURE 3.12 – Puissance théorique reçue par un réflectomètre de type IPT pour une réflexion sur la mer, en fonction de l'angle d'élévation du satellite pour une hauteur d'instrument de 1 m (a) et 3 m (b).
Source : Rodriguez-Alvarez *et al.* (2011b).

La fréquence des oscillations est liée à la hauteur de l'antenne par rapport à la surface de réflexion, et peut être utilisée pour corriger les irrégularités de la topographie du terrain autour de l'antenne réceptrice (en sectorisant par azimuth).

En milieu océanique La fréquence des oscillations du signal d'interférence reçu est fonction de la hauteur de l'instrument par rapport à la surface réfléchissante et peut donc être inversée. La figure 3.12 (tirée des travaux de Rodriguez-Alvarez *et al.* (2011b)) est un exemple des oscillations du signal d'interférence reçu en fonction de la hauteur de l'instrument par rapport au niveau de la mer. Comme on peut le constater, la fréquence augmente avec la hauteur.
Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'en pratique, pour une certaine valeur de hauteur significative des vagues (*Significant Wave Height* SWH), le critère de Rayleigh n'est plus respecté à partir d'un certain angle d'élévation du satellite, induisant une perte de la composante cohérente de la réflexion (Alonso-Arroyo *et al.*, 2015). Il est donc possible de mesurer l'angle de coupure au-delà duquel la composante incohérente devient plus importante que la composante cohérente. Cet angle de coupure est directement corrélé à la valeur du SWH au moment de la réflexion et peut donc être inversé. Le SWH maximal théoriquement mesurable par cette méthode est de 70 cm. Au-delà, le critère de Rayleigh n'est plus respecté par aucun angle d'élévation, et la composante cohérente de la réflexion disparait.

3.4.2 Méthode SNR

3.4.2.1 Géométrie du système multistatique

Il est également possible de faire des mesures de réflectométrie GNSS en utilisant une seule antenne géodésique, de polarisation *normale* RHCP, et classiquement orientée vers le zénith. Cette méthode est généralement appelée "technique SNR" par la communauté scientifique. Le signal direct est captée par l'hémisphère supérieur de l'antenne, comme pour une réception GNSS classique, tandis que le signal réfléchi est capté par l'hémisphère inférieur : voir figure 3.13.
Le signal réfléchi va donc interférer avec le signal direct au niveau de l'antenne et affecter les mesures réalisées par le récepteur. Ces interférences ont un effet néfaste sur les mesures réalisées pour le positionnement, et on cherche généralement à les supprimer en géodésie classique (voir section 2.2 page 22). En réflectométrie GNSS, au contraire, l'analyse de ces interférences va apporter des informations utiles sur le signal réfléchi, et donc sur les caractéristiques de la surface de réflexion.

3.4.2.2 Observable : Signal-to-Noise Ratio SNR

Le rapport signal sur bruit SNR (Signal-to-Noise Ratio), est l'une des observables classiques d'un récepteur GNSS et sert principalement à quantifier la qualité des mesures GNSS effectuées. Le SNR est généralement enregistré à chaque pas de mesure et pour chaque fréquence mesurée par le récepteur. Certains instruments l'enregistrent sous forme binaire (1 lorsque la qualité des mesure est suffisante pour établir un calcul de position, et 0 lorsque le bruit est trop important), mais la plupart des récepteurs actuels l'enregistre sous sa forme décimale. Le SNR quantifie donc l'amplitude du signal reçu et est généralement dérivé de la boucle de poursuite de la porteuse du signal GNSS au niveau du récepteur. La boucle de poursuite

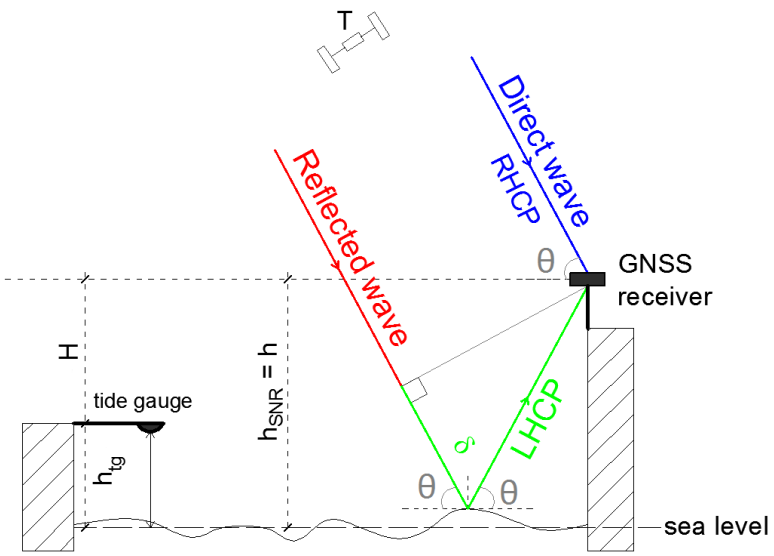


FIGURE 3.13 – Géométrie d'un réflectomètre GNSS à antenne unique.

peut être décrite (Ward, 1996; Georgiadou et Kleusberg, 1988; Bilich et Larson, 2008) comme la relation entre les composante I (en phase) et Q (en quadrature) du signal reçu (voir figure 3.14). Si l'on considère un cas théorique libre de tout multi-trajet, le diagramme de phase de la figure 3.14 contiendrait seulement la contribution du signal direct, c'est à dire, seulement le phaseur d'amplitude A_d, qui est équivalent au SNR. La phase de la porteuse correspond à l'angle ϕ_d.
En revanche, en présence de multi-trajet, un (ou plusieurs) phaseurs d'amplitude A_r sur la figure 3.14 se rajoutent au diagramme. Ce phaseur a une phase relative ψ par rapport à la phase ϕ_d du trajet direct. La boucle de poursuite du récepteur va donc se bloquer sur le signal composite d'amplitude A_c et de phase ϕ_c, qui est le vecteur somme de tous les phaseurs, contenant à la fois le signal direct et réfléchi. Ceci implique que le SNR est équivalent à l'amplitude du signal composite. En considérant le modèle de la figure 3.14, l'erreur de phase $\delta\phi = \phi_c - \phi_d$ sera égale à (Larson *et al.*, 2008) :

$$\tan(\delta\phi) = \frac{A_r \sin(\psi)}{A_d + A_r \cos(\psi)} \tag{3.14}$$

Et on aura (Larson *et al.*, 2008) :

$$SNR^2 = A_c^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos(\psi) \tag{3.15}$$

Les amplitudes A_d et A_r sont bien évidement affectées par le gain d'antenne correspondant. Étant donné que : (i) le signal réfléchi est atténué par la réflexion et (ii) le signal direct est largement privilégié au niveau de l'antenne (voir section 2.2.4 page 23), on peut considérer que $A_d \gg A_r$. La norme du SNR peut être donc être approximée par (Larson *et al.*, 2008) :

$$SNR^2 \simeq A_d^2 + 2A_d A_m \cos(\psi) \tag{3.16}$$

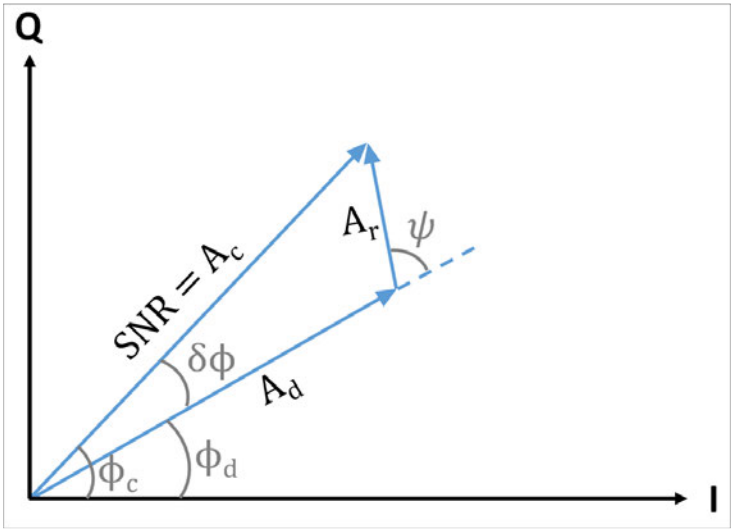


FIGURE 3.14 – Diagramme de phase du signal GNSS reçu illustrant les relations entre les composantes en phase (I) et en quadrature (Q) du signal.
(Figure copiée de Löfgren (2014))

L'équation 3.16 montre que l'allure générale du SNR sera principalement dictée par le signal direct, qui présente des variations uniquement liées à l'angle d'élévation du satellite. Le signal réfléchi, en revanche, produit un signal additionnel à haute fréquence et petite amplitude par rapport au signal direct.

Par ailleurs, si l'on considère l'amplitude des coefficients de réflexion en fonction des différents types de surface présentée dans la figure 2.10 page 34, on constate que la composante RHCP du signal réfléchi est plus importante que la composante LHCP pour les basses élévations et décroit rapidement lorsque l'angle d'élévation augmente. Du fait que le gain RHCP est supérieur au gain LHCP au niveau de l'antenne, les variations à plus haute fréquence induites par le multi-trajet dans le SNR ont une amplitude A_r plus importante pour les faibles angles d'élévation et diminue rapidement lorsque l'angle d'élévation augmente. L'impact du multi-trajet sur le SNR est plus visible aux faibles angles d'élévation. La figure 3.15 présente le SNR mesuré pour le satellite PRN01 sur la fréquence L1 par une antenne Leica AR10 et un récepteur GR25, placée à une hauteur d'antenne de 1.70 m au-dessus d'une surface argileuse. Cette série temporelle révèle la forme parabolique dominante due au signal direct, où viennent s'additionner les oscillations à haute fréquence mais d'amplitudes plus faibles (particulièrement visibles pour les faibles angles d'élévation) dues au multi-trajet.

En supposant une surface de réflexion plane, la différence de phase ψ entre le signal direct et réfléchi peut être dérivé géographiquement de la différence de trajet δ (Bishop et Klobuchar, 1985; Georgiadou et Kleusberg, 1988) :

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{4\pi h}{\lambda}\sin(\theta) \tag{3.17}$$

avec θ l'angle d'élévation du satellite, λ la longueur d'onde du signal GNSS, et h la hauteur

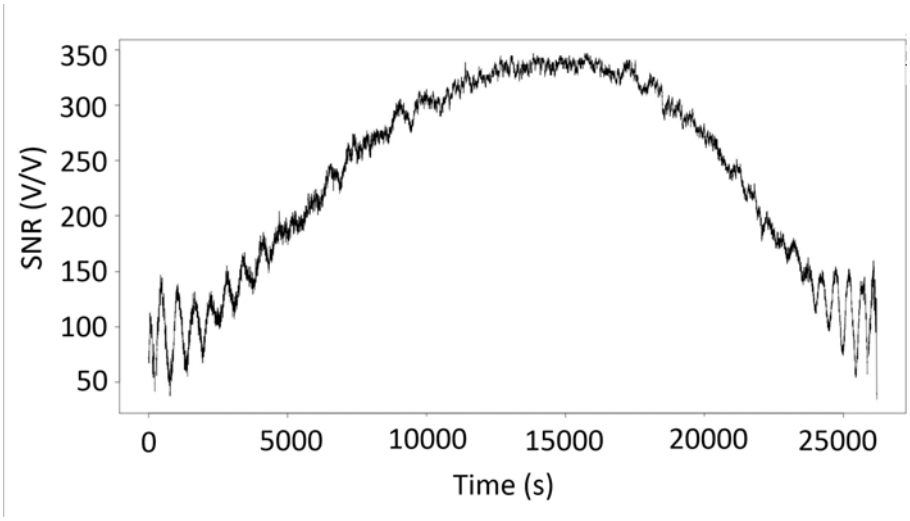


FIGURE 3.15 – SNR mesuré sur la fréquence L1 par une antenne Leica AR10 et un récepteur GR25 (satellite PRN01).
Hauteur d'antenne : 1.70 m au-dessus d'un terrain argileux.

de l'antenne par rapport à la surface de réflexion. De l'équation 3.17, on peut dériver la fréquence des oscillations du multi-trajet par rapport au temps :

$$f_t = \frac{1}{2\pi}\frac{d\psi}{dt} = \frac{2\dot{h}}{\lambda}\sin(\theta) + \frac{2h}{\lambda}\cos(\theta)\dot{\theta} \tag{3.18}$$

$\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ définit la vitesse verticale, et $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ la vitesse de variation de l'angle d'élévation du satellite.
L'équation 3.18 peut être simplifiée en faisant un changement de variable $x = \sin(\theta)$ (Larson *et al.*, 2008). Ainsi apparait $\tilde{f}$, la "fréquence" des oscillations dues au multi-trajet par rapport au sinus de l'angle d'élévation du satellite :

$$\tilde{f} = \frac{1}{2\pi}\frac{d\psi}{dx} = \frac{1}{2\pi}\frac{d\psi}{dt}\frac{dt}{dx} = \frac{2}{\lambda}(\dot{h}\frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}} + h) \tag{3.19}$$

3.4.2.3 Applications

Altimétrie L'équation 3.19 montre que si l'on considère une surface de réflexion et une antenne statiques ($\dot{h} = 0$), on aura $\tilde{f} = \frac{2h}{\lambda}$, et donc la fréquence des oscillations dues au multi-trajet sera directement proportionnelle à la hauteur de l'antenne au-dessus de la surface de réflexion. A partir de l'analyse spectrale de la série temporelle du SNR, il est donc possible de faire des mesures d'altimétrie.
Cette méthode d'altimétrie basée sur l'analyse du SNR a fait l'objet de nombreuses études, principalement américaines (Larson *et al.*, 2008), et est souvent désignée par "technique SNR". La précision altimétrique que l'on peut escompter est meilleure que décimétrique.
Si l'on considère une surface mouvante (surface de la mer par exemple), $\dot{h}$ ne peut pas être

négligé, et la fréquence $\tilde{f}$ dépend donc également de l'angle d'élévation du satellite θ, de sa vitesse de variation $\dot{\theta}$ et de la vitesse de variation de la hauteur de la surface de réflexion $\dot{h}$. Si les deux premiers termes sont connus, la détermination de $\dot{h}$ reste problématique puisque l'équation 3.19 a deux inconnues, h et $\dot{h}$. La plupart des études menées jusqu'à présent sont réalisées dans des conditions où $\dot{h}$ était négligeable (Larson et Nievinski, 2013; Löfgren, 2014). Par exemple, quand Löfgren et Haas (2014) ont comparé des mesures de niveau de la mer obtenues par l'analyse du SNR ou par analyse des formes d'ondes, le changement de hauteur de l'antenne était de l'ordre de quelques dizaines de centimètres sur 3 jours d'observation, et $\dot{h}$ était donc négligeable d'un instant à l'autre. Pourtant, cette approximation n'est pas valable dans de nombreux cas, notamment en présence de fortes vagues lors de tempête par exemple, où la hauteur significative est importante. Elles provoquent des variations rapides de h, et donc de fortes amplitudes de $\dot{h}$.
J'ai consacré une partie importante de ma thèse à l'étude de cette technique, en m'intéressant particulièrement à la résolution de cette équation à deux inconnues. J'ai notamment proposé une méthode basée sur la combinaison de l'ensemble des satellites visibles au même instant pour obtenir un système d'équations surdéterminé. Cette méthode, appliquée à une campagne de mesures in situ, est présentée en détails au chapitre 5 page 109. Différents tests que j'ai effectués durant ma thèse avec cette méthode (section 5.3.5 page 118) montrent que la précision altimétrique obtenue est quasi-centimétrique.

Humidité du sol Si l'on considère une hauteur d'antenne H au-dessus de la surface de réflexion, la contribution du multi-trajet au SNR peut être formalisée de la manière suivante (Larson *et al.*, 2008) :

$$SNR_m = A_m \cos(\frac{4\pi H}{\lambda} \sin(\theta) + \phi_m) \tag{3.20}$$

où l'amplitude A_m varie en fonction de l'amplitude des réflexions, et ϕ_m est la phase. Des études expérimentales ont montré que les deux paramètres A_m et ϕ_m varient en fonction de l'humidité du sol (Larson *et al.*, 2010; Chew *et al.*, 2014; Larson *et al.*, 2008). Les effets de l'humidité superficielle du sol sont généralement plus marqués sur ϕ_m que sur A_m (Chew *et al.*, 2014), comme démontré par Larson *et al.* (2008). En se basant sur des lois d'inversion empiriques, il est donc possible d'estimer les variations d'humidité superficielle du sol à partir des observations de A_m et ϕ_m. Par ailleurs, l'humidité du sol a une influence sur la profondeur de pénétration des ondes GNSS dans le sol (Larson *et al.*, 2010), provoquant de légères variations au cours du temps de la hauteur *effective* h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion. Les variations de h au cours du temps, déterminées à partir des mesures de $\tilde{f}(t)$ (voir §3.4.2.3, page 63) constituent un très bon indicateur des fluctuations d'humidité du sol. Ces applications du GNSS-R basées sur l'analyse du SNR pour la détermination de l'humidité du sol, ainsi qu'une application in situ, sont présentés en détail au chapitre 6, page 153.

Autres données géophysiques observables Tout comme la réflectométrie GNSS appliquée au système à deux antennes, les applications altimétriques de l'analyse du SNR peuvent être dérivées à d'autres applications, comme la mesure de la cryosphère et de hauteur de neige ou même du couvert végétal. Ceci fait actuellement l'objet de nombreuses recherches (Boniface *et al.*, 2014; Nievinski et Larson, 2014; Larson et Nievinski, 2013; Ouelette *et al.*, 2013;

Pierdicca *et al.*, 2013). Ces applications ne seront pas développées dans ce manuscrit.

3.4.3 Conclusion

La réflectométrie GNSS réalisée à l'aide d'une antenne unique s'articule autour de deux techniques principales : l'IPT (*Interference Pattern Technique*), et la méthode SNR. Ces deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients dont les principaux sont synthétisés dans le tableau 3.2.

	IPT	SNR
Gammes d'angles d'élévation pouvant faire l'objet de mesures	0° à 90°	Seuls les faibles angles d'élévation
Diagramme de gain d'antenne	Antenne pointant vers l'horizon donc symétrie entre le signal direct et réfléchi	Doit être pris en compte et corrigé
Topographie	Peut être corrigée	La surface réfléchissante doit être plate
Dissociation des différents facteurs d'influence (végétaton, rugosité, ...)	Facile (antenne à double polarisation)	Difficile
Modifications matérielles	Importantes	Aucune
Réseaux GNSS permanents	Ne peuvent pas être utilisés	Peuvent être utilisés

TABLE 3.2 – Comparaison entre l'IPT et l'analyse du SNR : avantages et inconvénients.

Même si la méthode IPT semble plus prometteuse que l'analyse du SNR, cette dernière présente l'avantage non négligeable de ne nécessiter aucune modification matériel de l'antenne réceptrice. Cette technique ouvre donc de larges perspectives de densification des mesures in situ, notamment par l'utilisation des stations des réseaux GNSS permanents. C'est pourquoi je me suis consacré au GNSS-R basé sur l'analyse du SNR dans les chapitres 5 et 6.
Il est également très important de noter que dans le cas d'une réception avec une antenne unique (que ce soit par la méthode SNR ou IPT), le signal direct et réfléchi doivent produire des interférences cohérentes pour que l'on puisse observer quelque chose. Il faut donc que le déphasage entre les deux signaux soit inférieur à la longueur d'un chip de code si l'on veut garantir la corrélation. Si l'on considère la modulation du code PRN de longueur 1 ms et composé de 1023 chips, la différence de trajet $\Delta\delta^s_{AB}$ entre les deux signaux doit être inférieure à une certaine valeur Δr définie par :

$$\Delta r = c\frac{1ms}{1023} = 3.10^8\frac{1ms}{1023} = 293m \tag{3.21}$$

La différence de trajet entre les deux signaux peut être exprimée en fonction de la hauteur d'antenne h et de l'angle d'élévation du satellite θ (voir section 3.3.3.1) :

$$\Delta\delta^{s}_{AB} = 2h\sin(\theta) \tag{3.22}$$

Pour garantir la corrélation entre le signal direct et réfléchi au niveau de la réception par une antenne unique, il faut donc que $\Delta\delta^{s}_{AB}$ soit inférieur à 293 m.

Ainsi, la cohérence du signal est garantie pour une hauteur d'antenne allant jusqu'à 145 m environ, peu importe l'angle d'élévation du satellite.

Pour une hauteur d'antenne de 300 m, le signal réfléchi et direct ne seront corrélés que pour des élévations inférieures à 30°.

La technique GNSS-R par IPT ou SNR apparait donc limitée à des hauteurs d'antenne ne dépassant par 300 m environ.

3.5 Plateformes et contraintes

Un avantage indéniable de la technique de télédétection par GNSS-R est la possibilité de l'utiliser à différentes échelles, en fonction de la géométrie créée par le vecteur satellite/récepteur et la surface de réflexion. En envisageant des systèmes au sol par exemple, avec une hauteur d'antenne de quelques mètres au-dessus de la surface de réflexion, la zone couverte par les mesures s'étendra sur quelques mètres carrés seulement, mais la densité de points de réflexion sera très importante (voir figure 4.6 page 82). A l'inverse, on atteindra une couverture de quelques dizaines de kilomètres carrés mais une densité de points moins importante en utilisant un système embarqué à bord d'un avion, voire une couverture de plusieurs centaines de kilomètres carrés si le système de réception est installé à bord d'un LEO (*Low Earth Orbiter*). Ainsi, pour optimiser les installations, de nombreuses études théoriques ont été réalisées. Des simulateurs ont été proposées pour modéliser la trajectoire des ondes directes et réfléchies en fonction de la position du récepteur par rapport à la surface de réflexion.

Dans le cadre de ma thèse, j'ai réalisé un simulateur permettant de déterminer la position précise des points de réflexion spéculaire soit en approximant la surface de la Terre à un plan, soit comme une sphère, un ellipsoïde, ou soit en intégrant un modèle numérique de terrain. Ce simulateur, basé sur les éphémérides réelles et précises des satellites mises à disposition par l'IGS, est présenté dans le chapitre 4. Les principaux résultats issus de ce simulateur sont présentés sur la figure 4.6 page 82, et un exemple de sortie est présenté en figure 3.16.

Historiquement, ce sont les vecteurs mobiles, essentiellement des avions, qui ont été les premiers utilisés (Aubert *et al.*, 1994; Martin-Neira, 1993). Depuis, avec l'essor de la technique GNSS-R, de nombreux autres moyens ont été mis en place et vont être présentés sous trois grandes familles :

- les vecteurs fixes, adaptés aux mesures in situ ;
- les systèmes aéroportés pour des cartographies fines des paramètres environnementaux ;
- les systèmes satellites qui devraient permettre à terme d'établir des surveillances globales des réservoirs des masses d'eau (océans, eaux continentales, neiges et glaces) y compris sols et biomasse, et de l'atmosphère (ionosphère, troposphère).

Dans le cadre de cette thèse, je me suis focalisé sur les applications côtières et continentales exclusivement. Pour plus d'informations, le "tutoriel" développé par Zavorotny *et al.* (2014) constitue une source d'informations précieuse.

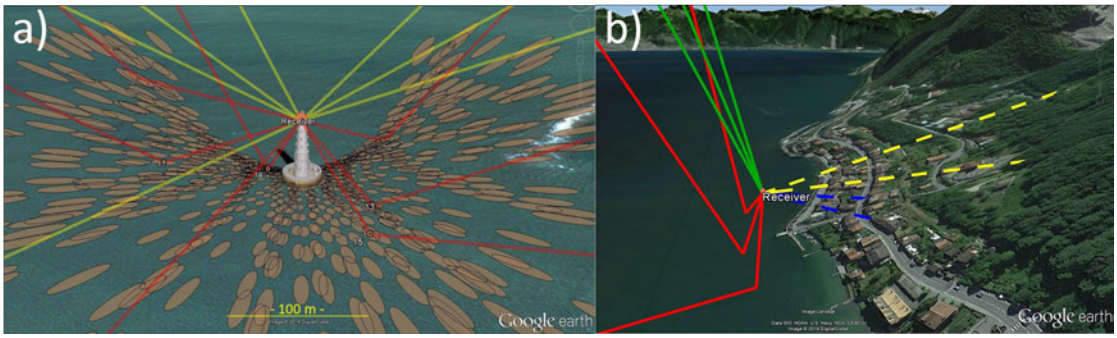


FIGURE 3.16 – Exemple de simulation des points de réflexion et des surfaces de Fresnel associées ; (a) en milieu côtier (phare de Cordouan, France) et (b) en milieu continental (Lac Léman, Suisse), où la topographie influe non seulement sur la position des points de réflexion mais aussi sur l'existence même des points de réflexion (phénomènes de masque).
Adapté de Roussel *et al.* (2014).

3.5.1 Plateformes fixes / in situ

Dans une premier temps, les sites de mesures in situ étaient en grande partie dédiés à l'étude de l'humidité du sol par la méthode d'analyse du SNR (Larson *et al.*, 2008) : figure 3.17. Puis de nombreuses autres applications in situ ont vu le jour :
– mesure de la hauteur de neige (Larson *et al.*, 2009) ;
– mesure de la croissance de la végétation (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2011b) ;
– suivi des marées océaniques (analyse des formes d'onde : Löfgren (2014); Hobiger *et al.* (2014), ou du SNR : Larson *et al.* (2012); Roussel *et al.* (2015)) : figure 3.18.

3.5.2 Systèmes aéroportés

Que ce soit à bord d'avions, ou même de drones RPAS (*Remote Piloted Aircraft Systems*),le vecteur aéroporté est très certainement celui le plus utilisé pour réaliser des mesures de réflectométrie GNSS.
A titre d'exemple, le tableau 3.3 est une compilation des principales missions européennes aéroportées menées entre les années 2005 et 2012, essentiellement axées sur les surfaces océaniques, avec quelques survols au-dessus de zones neigeuses et de glace. Ce tableau est issu du projet GOLD RTR MINING (www.ice.csic.es/research/gold_rtr_mining/), financé par le ministère de la recherche espagnol, qui vise à promouvoir le GNSS-R en fournissant des données gratuites à tout utilisateur désirant travailler sur les formes d'ondes et les DDM.
Je citerai par exemple les campagnes CAROLS, organisées par le CNES, qui ont permis de faire des mesures d'humidité dans la région de Bordeaux, France, ainsi que dans le nord de l'Espagne. Les campagnes du projet européen H2020 MISTRALE (figure 3.19), dédiées aux mesures d'humidité du sol pour aider à l'agriculture raisonnée axée sur la cartographie des zones humides et des zones inondables, devraient apporter de nouvelles données sur ces problématiques environnementales.
Une nouvelle campagne de mesures, financée par l'ESA, devrait avoir lieu en 2015 à bord de la plateforme française SAFIRE et effectuera une des premières missions GNSS-R à partir du

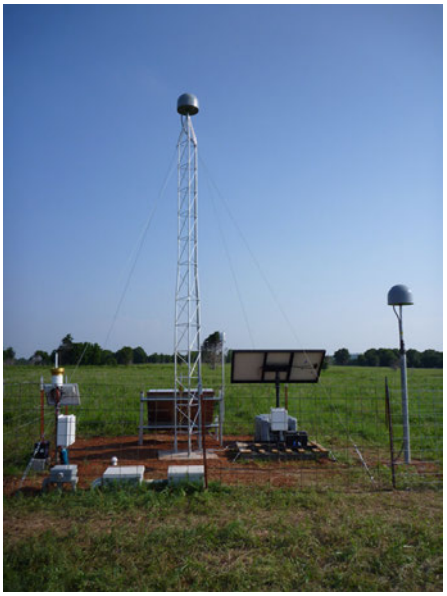


FIGURE 3.17 – Station SMAPSITEA2 dédiée à la mesure de l'humidité par analyse du SNR du réseau PBO H_20 (USA) développé par K. Larson.

récepteur GLORI (Motte *et al.*, 2015) : figure 3.19.
Certaines mesures sont même réalisées à bord de ballons habités à faible altitude de vol, qui présentent le très grand avantage d'avoir des vitesses lentes, ce qui contribue à la stabilité des mesures GNSS. Des essais avec des ballons rapides dans la troposphère haute ont aussi été réalisés en 1999 dans le cadre de l'expérimentation MEBEX. L'altitude de vol était d'environ 37 km et l'objectif de cette expérience était l'étude de la rugosité de la surface marine afin de déterminer la vitesse des vents à la surface de la mer (Cardellach *et al.*, 2003).

3.5.3 Satellites

Les dernières années voient l'émergence d'un grand nombre de satellites, voire de constellations entières, dédiées aux mesures GNSS-R. Je présente brièvement dans cette partie quelques missions parmi les plus connues.

3.5.3.1 TechDemoSat-1

Le récepteur SGR-ReST embarqué sur le satellite TechDemoSat-1 a été lancé le 8 juillet 2014. Il doit être l'instrument de base des futures missions CYGNSS dédiées à la surveillance des cyclones et autres tempêtes. Il travaille en bi-fréquences sur les bandes L1 et L2 et fournit directement des DDM. Son orbite est héliosynchrone et l'altitude de vol est de 635 km. La période de révolution est de 93 min. Plus d'informations sont disponibles sur le site internet de la mission : http://www.sstl.co.uk/Missions/TechDemoSat-1-Launched-2014. Une description des applications GNSS-R sur ce satellite est présentée dans l'acte de conférence suivant : Unwin *et al.* (2011).

FIGURE 3.18 – Marégraphe GNSS-R de l'observatoire spatial de Onsala.
(modifié d'après Löfgren (2014))

3.5.3.2 CYGNSS : *Cyclone Global Navigation Satellite System*

La mission CYGNSS désigne une future constellation de 8 satellites qui devraient être mis en place sur une orbite inclinée à 35° (altitude de 500 km) à partir de 2016. Ils fourniront des DDM de la zone équatoriale et tropicale (équateur ±35°) avec un pas temporel de 1.5 h (médiane) et 4 h (moyenne). Cette mission a pour but d'étudier la ceinture tropicale dans la région de formation de la plupart des cyclones. Elle devrait regarder en détail les variations des vitesses des vents et des états de surfaces des océans, et devrait aussi fournir des données pour les modèles de climat global de la Terre. Cette constellation fournira aussi des informations continentales pour estimer l'humidité des sols. Plus d'informations sont disponibles sur le site internet de la mission : http://clasp-research.engin.umich.edu/missions/cygnss ou dans la présentation de la mission réalisée dans l'article suivant : Ruf *et al.* (2013).

3.5.3.3 $^3CAT-2$

$^3CAT-2$ est un nano-satellite multi-constellations GNSS, bi-fréquences et bi-polarisations basé sur le récepteur PYCARO (*P(Y) and C/A ReflectOmeter*) et devrait être mis en orbite en avril 2016. Il devrait intéresser à l'altimétrie océanique, la biomasse et la cryosphère. Plus d'informations sont disponibles dans cet article : Carreno-Luengo *et al.* (2015).

3.5.3.4 PARIS-IoD : *Passive Reflectometry and Interferometry System In orbit Demonstrator*

Dédié à l'altimétrie océanique à méso-échelle, ce satellite disposera d'une double antenne de plus d'un mètre de diamètre pour mesurer les signaux GNSS directs et réfléchis. Lorsqu'il sera opérationnel, le récepteur sera capable de suivre jusqu'à 20 satellites simultanément, pour une précision altimétrique attendue de 5 cm. Les résultats de simulations de données traitées par ce récepteur sont présentés dans Camps *et al.* (2014).

TABLE 3.3 – Principales campagnes GNSS-R européennes.

(modifié d'après www.ice.csic.es/research/gold_rtr_mining)

Campaign:	Year	Funded by:	Geographic area:	Air/Ground	Applications	LHCP+RHCP reflections:
Gold Test	2005	IEEE/ICC	NW Mediterranean Sea (Spain)	A (3 flights)	Ocean/Land	yes
CoSMOS-OS	2006	ESA	North Sea (Norway)	A (12 flights)	Ocean	yes
CoSMOS-OS	2007	ESA	Baltic Sea (Finland)	A (2 flights)	Ocean	no
CAROLS	2007	CNES	South France, Bay Biscay (France)	A (3 flights)	Ocean/Land	yes
SMOS Calibration Rehearsal Campaign	2008	ESA	Finland to Valencia (Europe)	A (12 flights)	Ocean/Land	no
CAROLS	2009	CNES	South France, Bay Biscay (France), Valencia area (Spain)	A (11 flights)	Ocean/Land	yes
GPS-SI	2008-2009	ESA	Disko Bay (Greenland)	G (7 months)	Ocean/Ice/Snow	yes
GPS-DS	2009	ESA	Dome-C (Antarctica)	G (10 days)	Snow	yes
PIT-POC 2	2011	ESA	Baltic Sea (Finland)	A (2 flights)	Ocean	yes
Begur	2012	ESA	NW Mediterranean (Spain)	G (3 days)	Ocean	yes
Saphire	2015	ESA	SW-France	A (1 flight)	Ocean/Land	yes
Pech Rouge	2015	ESA	Aude-Midi-Pyrénées (France)	A (1 flight)	Land	yes

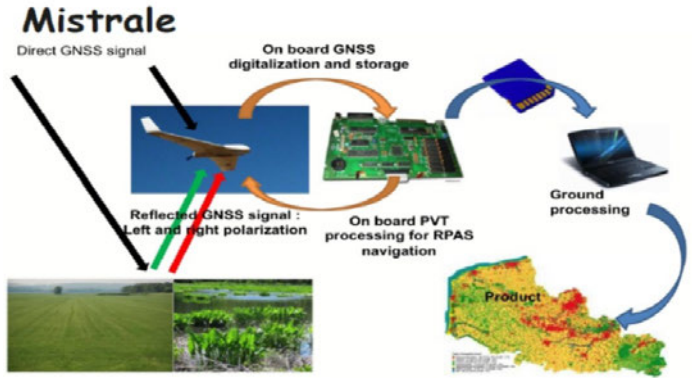


FIGURE 3.19 – Structure du projet H2020 Mistrale visant à faciliter l'agriculture raisonnée et le suivi des zones inondées à partir d'un GNSS-R embarqué sur un RPAS.
(Source : www.mistrale.eu)

3.5.3.5 GEROS ISS : GNSS REflectometry, Radio Occultation and Scatterometry onboard the International Space Station

Ce projet ambitieux est financé par l'ESA et vise une mise en place d'un instrument de mesure GNSS-R sur la station spatiale internationale, en 2019 (voir figure 3.20). Le projet est actuellement en phase d'étude de faisabilité. Il devrait également être utilisé pour faire des mesures de radio-occultation, et de diffusiométrie pour étudier les océans, l'atmosphère terrestre et les continents.

3.6 Perspectives

Les enjeux et les retombées scientifiques du développement de la réflectométrie GNSS sont très importants. Le panel d'applications potentielles de cette technique de télédétection opportuniste est impressionnant :

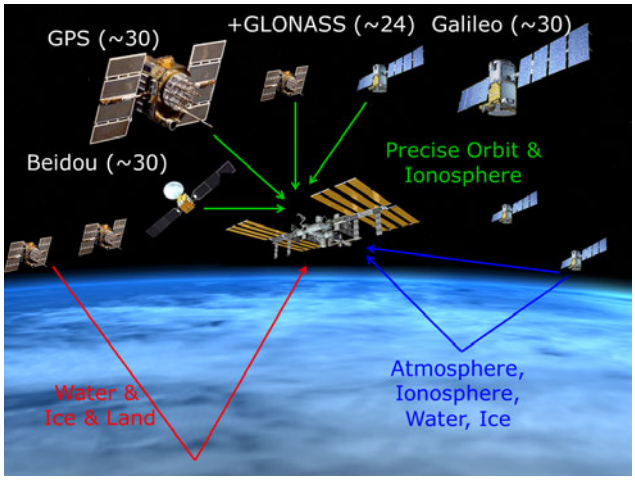


FIGURE 3.20 – Principe du récepteur multi-constellations GEROS embarqué sur la station spatiale internationale.

(source :
www.gfz-potsdam.de/en/section/gps-galileo-earth-observation/projects/geros-iss/)

- suivi altimétrique des eaux océaniques et continentales ;
- détermination des propriétés des surfaces maritimes : rugosité, hauteur de vagues, courants et vents de surface, salinité (Camps *et al.*, 2006), etc.
- détermination des propriétés des surfaces continentales : humidité des sols, hauteur de neige, mesure du couvert végétal, etc.
- cartographie locale du géoïde ;
- suivi des zones inondées ;
- détection d'objets sur la surface océanique ;
- etc.

Utiliser la constellation des satellites de type GNSS pour capter puis analyser leurs signaux réfléchis à la surface de la Terre présente de nombreux avantages par rapport à l'altimétrie radar classique car :

- la configuration de plusieurs satellites offre une couverture spatio-temporelle plus dense, et non plus uniquement le long de traces espacées au sol comme dans le cas de l'altimétrie radar. De plus, les signaux GNSS peuvent être captés n'importe où dans le monde ;
- la continuité et la pérennité du système de positionnement sont assurées, alors que les missions altimétriques ont une durée de vie limitée dans le temps, généralement de l'ordre de la dizaine d'année. Le réseau de satellites disponibles est même amené à de densifier avec l'arrivée des constellations européennes Galileo, chinoise Compass-Beidou, indienne IRNSS, japonaise QZSS, etc.

Certaines études démontrent même la potentialité du GNSS-R pour la détection de tsunamis (Stosius *et al.*, 2010) en mettant en place une constellation de quelques satellites à basse altitude effectuant en continu des mesures altimétriques GNSS-R. Il ne s'agirait donc pas de prédire l'apparition future d'un tsunami mais de le détecter et de mesurer son importance avec une grande rapidité pour avoir le temps d'alerter la côte et de prendre les mesures nécessaires.

Le nombre d'applications du GNSS-R n'a fait que s'agrandir ces dernières années, et de plus en plus d'études scientifiques prouvent l'intérêt d'une telle méthode de télédétection passive, basée sur un réseau déjà existant.

Chapitre 4

Modélisation et simulations de la trajectoire des ondes GNSS directes et réfléchies à la surface de la Terre

Sommaire

4.1 Introduction 74
4.2 Principe de fonctionnement du simulateur 75
4.2.1 Approximation géométrique 75
4.2.2 Jeu de données 75
4.2.3 Algorithmes de détermination des positions des points de réflexion spéculaire 76
4.2.3.1 Approximation en un ellipsoïde local 76
4.2.3.2 Approximation en une sphère locale 77
4.2.3.3 Approximation en un plan local 77
4.2.3.4 Intégration d'un modèle numérique de terrain 77
4.2.3.5 Correction de la réfraction angulaire due à la traversée de la troposphère 78
4.2.4 Sorties des simulations 79
4.3 Résumé des principaux résultats 80
4.3.1 Influence de la constellation 80
4.3.2 Influence de la hauteur du récepteur et de l'élévation du satellite . . . 81
4.3.3 Influence de l'approximation de la surface terrestre 83
4.3.3.1 Comparaison entre les approximations géométriques 83
4.3.3.2 Impact de la topographie sur la visibilité et la position des points de réflexion 84
4.3.4 Réfraction angulaire due à la troposphère 85
4.4 Conclusion 86
4.5 *Article publié* : GMD 2014 - Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments 88

4.1 Introduction

La réflectométrie GNSS est une technique de télédétection opportuniste basée sur l'analyse des signaux GNSS reçus par une antenne après réflexion sur la surface terrestre (Martin-Neira, 1993). Le but de cette analyse est l'estimation de différents paramètres géophysiques concernant cette surface de réflexion. Il faut donc bien distinguer deux choses :

– le *paramètre géophysique* que l'on souhaite déterminer par inversion des signaux GNSS d'une part : humidité (Larson *et al.*, 2008; Chew *et al.*, 2014), rugosité (Cardellach, 2001), distance verticale par rapport à l'antenne (Löfgren *et al.*, 2011), etc. ;
– la *zone géographique* où l'on veut observer ce paramètre géophysique d'autre part.

En effet, de nombreux paramètres sont susceptibles d'influencer la trajectoire des ondes GNSS et donc la position des points de réflexion spéculaire de ces ondes. On comprend dès lors qu'avant même de songer à la chaîne de traitement à mettre en place pour parvenir au(x) paramètre(s) géophysique(s) que l'on souhaite observer, la connaissance des positions des points de réflexion des ondes et des différents paramètres pouvant l'influencer est primordiale. Il serait en effet assez paradoxal d'essayer d'estimer différentes variables géophysiques caractérisant une surface autour d'une antenne GNSS sans savoir véritablement quelle est cette surface analysée. Une détermination robuste de la position des points de réflexion au cours du temps est donc cruciale. Et idéalement, cette détermination doit se faire en amont des campagnes de mesure afin de laisser à l'opérateur la possibilité d'adapter la configuration qu'il mettra en place afin de répondre à ses besoins. C'est dans cette optique que j'ai réalisé un modèle déterminant la trajectoire des ondes GNSS directes et réfléchies, afin d'avoir un outil d'aide à la décision permettant de choisir les meilleurs sites de mesures réunissant les meilleurs conditions possibles. Grâce à ce simulateur, de nombreuses configurations ont pu être testées et l'influence des principaux paramètres en jeu est analysée. On notera particulièrement la prise en compte des éventuels masques provoqués par la topographie terrestre en intégrant un modèle numérique de terrain, ainsi que la prise en compte des perturbations liées à la traversée de la troposphère. Il est très important de noter que les simulations présentées dans ce chapitre s'intéressent uniquement à la position des points de réflexions (et premières surfaces de Fresnel), peu importe le mode de réception du signal (réflectomètre à double antenne ou à antenne unique). C'est pourquoi des tests seront réalisées à des hauteurs d'antennes supérieures à celles que pourraient théoriquement atteindre les réflectomètre à antenne unique (les signaux directs et réfléchis ne sont plus corrélés et ne produisent plus d'interférences cohérentes si le déphasage est supérieur à la longueur d'un chip).

Cette étude a fait l'objet d'un article publié dans *Geoscientific Model Developpement*, présenté dans la section 4.5 :

Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Desjardins C., Gegout P., Pérosanz F., Biancale R. : *Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments*. Geosci. Model. Dev. 7, 2261-2279. doi : 10.5194/gms-7-2261-2014. 2014.

Les sections 4.2 et 4.3 sont une synthèse des principaux points de cet article. *Pour plus de détails, se reporter à l'article lui-même.* Les premiers résultats de cette étude ont également fait l'objet d'une publication de vulgarisation dans la revue XYZ de l'Association Française de Topographie, et a remporté le premier prix de l'AFT 2012 :

Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Pérosanz F., Biancale R. : *Réflectométrie GNSS : modélisation des trajets des signaux réfléchis à la surface de la Mer*. XYZ n°135, 17-24. 2012.

Cette publication est disponible en annexe B page 208.

4.2 Principe de fonctionnement du simulateur

Dans cette section, seuls les points nécessaires à la compréhension des résultats scientifiques seront présentés. Un rapport un peu plus technique concernant le développement du simulateur est disponible en annexe C, page 218.

4.2.1 Approximation géométrique

La réflexion se définit comme un changement de direction du rayonnement électromagnétique quand celui-ci atteint une surface. La direction du rayonnement réfléchi peut varier et dépend de la rugosité de la surface de réflexion. On distingue ainsi principalement deux types de réflexion : la **réflexion spéculaire** (ou cohérente) et la **réflexion diffuse** (ou incohérente) : voir section 2.3 page 25. La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayonnement réfléchi par la surface l'est dans une seule et même direction. Ce type de réflexion est régi par la loi de Snell-Descartes stipulant que l'angle du rayonnement réfléchi est égal à l'angle du rayonnement incident par rapport à la normale. La réflexion spéculaire se produit uniquement sur des surfaces lisses, dont les aspérités ont une taille inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident. Lorsque les surfaces sont rugueuses et qu'elles présentent des aspérités dont la taille est supérieure à la longueur d'onde du rayonnement incident, la réflexion est diffuse. Le rayonnement est réfléchi dans toutes les directions à cause des hétérogénéités du milieu. Dans la réalité, le rayonnement total réfléchi par les surfaces naturelles est la somme de la réflexion spéculaire et de la réflexion diffuse. Cependant, la puissance du signal reçu est majoritairement due à la réflexion cohérente (spéculaire).
Dans le simulateur que j'ai développé, seul le problème purement géométrique est considéré en supposant une réflexion parfaitement spéculaire. L'objectif principal est donc de déterminer les positions des points de réflexion spéculaire au cours du temps, pour une position de récepteur et une constellation satellite donnée.

4.2.2 Jeu de données

Le modèle que j'ai développé prend en compte un grand nombre de paramètres pouvant varier en fonction des conditions expérimentales imposées par l'utilisateur :
- les **coordonnées géographiques du récepteur** et la **hauteur d'antenne** dans le système WGS84 ;
- les **coordonnées des satellites**, soit interpolées des éphémérides IGS (International GNSS Service), soit dérivées des paramètres képlériens des almanachs produits par le NAVCEN (NAVigation CENter) ;
- un jeu de paramètres environnementaux optionnels : Modèle Numérique de Terrain (**MNT**) pour prendre en compte les éventuels masques de la topographie terrestre, **Adaptive Mapping Functions** (Gegout *et al.*, 2011) pour intégrer les délais atmosphériques et les effets de courbure dus à la traversée de la troposphère ;

– un **masque radio-électrique optionnel** pour éliminer les mesures provenant de certains azimuths ou élévations.

Il est primordiale de comprendre, puis de quantifier l'impact que vont avoir ces différents paramètres sur la position des points de réflexion, et c'est l'objet de la section 4.3, page 80.

4.2.3 Algorithmes de détermination des positions des points de réflexion spéculaire

Quatre choix sont proposés à l'utilisateur relatifs à différentes approximations de la surface terrestre (figure 4.1) :

1 approximation de la surface terrestre en un plan local ;
2 approximation de la surface terrestre en une sphere locale ;
3 approximation de la surface terrestre en un ellipsoïde ;
4 intégration d'un MNT.

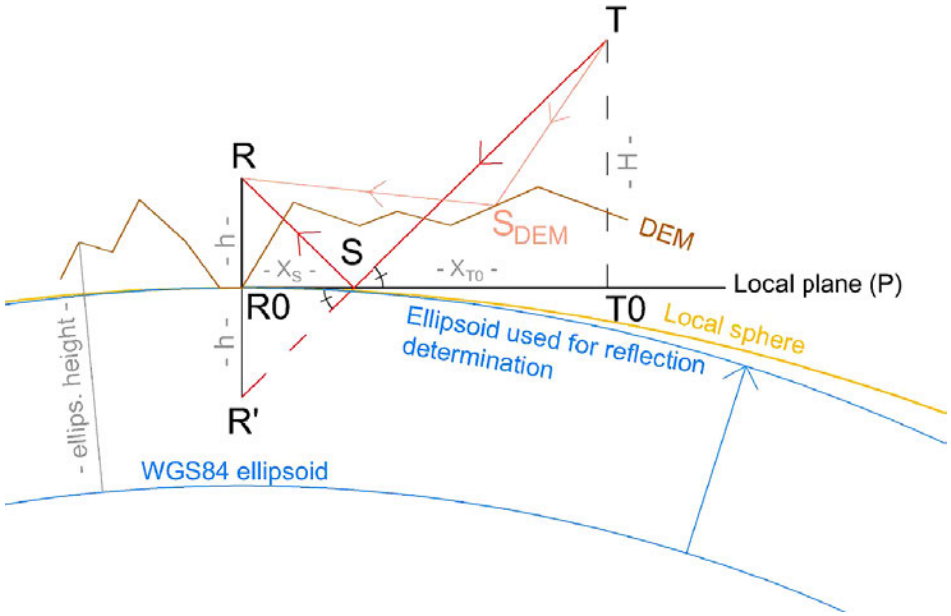


FIGURE 4.1 – Les différentes hypothèses sur la surface de réflexion utilisées dans le simulateur.

S : position du point de réflexion spéculaire, *R* : position du récepteur, *T* : position du transmetteur/satellite, *h* : hauteur du récepteur au-dessus de la surface de réflexion.

Les différentes approximations de la surface terrestre sont brièvement explicités dans les sous-sections suivantes. Pour plus de détails concernant la détermination des coordonnées des points de réflexion sur ces différentes surfaces, se reporter à la section *3 Methodology : determination of the positions of reflections points* de l'article insérés en section 4.5, page 89.

4.2.3.1 Approximation en un ellipsoïde local

Il est possible d'approximer la surface terrestre en celle d'un ellipsoïde. L'ellipsoïde que je considère dans le simulateur est un *agrandissement* de l'ellipsoïde WGS84 dont les demi-

petit et demi-grand axes sont multipliés par une constante de telle manière à ce que l'ellipsoïde ainsi obtenu coïncide avec la surface terrestre au niveau du nadir du récepteur ($R0$ sur la figure 4.1). Ainsi, les coordonnées cartésiennes du point de base sur la surface $R0$ doivent être identiques lorsqu'elles sont calculées à partir des coordonnées géodésiques WGS84 (notées λ_W, ϕ_W, h_W) et des constantes ellipsoïdales (a_W, b_W) d'une part, ou leurs valeurs modifiés dans le nouvel ellipsoïde ($\lambda_e, \phi_e, h_e, a_e, b_e$) d'autre part, avec $\lambda_W = \lambda_e$ la longitude, $\phi_W = \phi_e$ la latitude, et $h_e = 0$. Le nouvel ellipsoïde ainsi définit reste géocentrique, et ses axes sont mis à l'échelle de la manière suivante :

$$a_e = \sqrt{a_W^2 + h_W^2 + h_W M + \frac{a_W^2 h_W}{M}} = a_W \sqrt{1 + \frac{h_W^2}{a_W^2} + \frac{h_W M}{a_W^2} + \frac{h_W}{M}} \tag{4.1}$$

$$b_e = \sqrt{b_W^2 + h_W^2 + h_W M + \frac{b_W^2 h_W}{M}} = b_W \sqrt{1 + \frac{h_W^2}{b_W^2} + \frac{h_{WGS} M}{b_W^2} + \frac{h_W}{M}} \tag{4.2}$$

avec $M = \sqrt{a_W^2 \cos(\phi_W)^2 + b_W^2 \sin(\phi_W)^2)}$

4.2.3.2 Approximation en une sphère locale

Lorsque l'on approxime la surface de la Terre en une sphère parfaite, on considère que cette sphère locale passe par $R0$ et dont la direction radiale coïncide avec la normale à l'ellipsoïde définit en sous-section 4.2.3.1. Le centre de cette sphère est défini de telle manière que sa hauteur ellipsoïdale soit égale à la valeur négative du rayon de courbure gaussien définit par :

$$r_E = \frac{a_e^2 b_e}{a_e^2 \cos^2(\phi_e) + b_e^2 \sin^2(\phi_e)} \tag{4.3}$$

avec ϕ_e la latitude du récepteur, et a_e et b_e les demi-petit et demi-grand axes de l'ellipsoïde définit en sous-section 4.2.3.1. Pour plus d'informations sur ce type de sphère locale, se référer à l'article de Nievinski et Santos (2010).

4.2.3.3 Approximation en un plan local

En se référant à la figure 4.1, considérons $R0$ la projection de la position du récepteur R sur la sphère locale définie dans la sous-section 4.2.3.2. On définit le plan local P comme le plan tangent à la sphere au point $R0$. C'est ce plan P qui est utilisé lorsque l'on approxime la surface terrestre en un plan.

4.2.3.4 Intégration d'un modèle numérique de terrain

Les approches précédentes sont adaptés lorsque le récepteur est isolé et que la surface de réflexion peut être considérée comme infiniment plane. Cependant, dans la plupart des cas, le relief entourant le récepteur risque de masquer certains satellites, et de modifier la position des points de réflexion spéculaire. C'est pourquoi, il est indispensable d'incorporer un modèle numérique de terrain dans les simulations, de manière à prendre en compte non seulement les éventuels effets de masques (par exemple une montagne cachant un satellite

GNSS), mais également pour avoir une détermination plus précise et plus réaliste des positions des points de réflexion (figure 4.2).

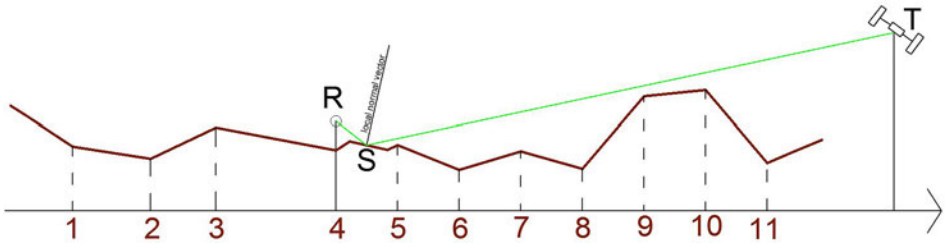


FIGURE 4.2 – Détermination du point de réflexion spéculaire en prenant en compte un MNT
S : position du point de réflexion spéculaire. *R* : position du récepteur. *T* : position du transmitteur/satellite.

Le modèle numérique de terrain utilisé dans le simulateur est la version 4 du MNT SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), qui a une résolution spatiale de 90 m à l'équateur (Jarvis *et al.*, 2008). Les altitudes sont données par rapport au géoïde EGM96. La précision verticale est d'environ 16 m en zone montagneuse (Rodriguez *et al.*, 2005).
Afin de convertir les altitudes données par le SRTM (par rapport au géoïde EGM96) en hauteur ellipsoïdale (par rapport à l'ellipsoïde WGS84), il est nécessaire de connaître l'ondulation du géoïde. Dans le simulateur, j'utilise une grille de 15 x 15 min dérivée du modèle EGM96 délivré par le National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) EGM development team (http://earth-info.nga.mil/GandD/wgs84/gravitymod/). L'erreur d'interpolation en utilisant cette grille est inférieure à 2 cm (NASA et NIMA, 1998).

4.2.3.5 Correction de la réfraction angulaire due à la traversée de la troposphère

L'atmosphère neutre s'étend de la surface du sol jusqu'à environ 85 km d'altitude et regroupe les couches météorologiques suivantes : troposphère, stratosphère et mésosphère. La troposphère constitue la couche la plus basse de l'atmosphère où se trouvent la plupart des phénomènes météorologiques. Son sommet se situe généralement vers 10 km sous nos latitudes. L'atmosphère neutre est souvent appelée troposphère par les géodésiens car, contenant environ environ 80 % de la masse atmosphérique totale (Wallace et Hobbs, 2006), c'est cette couche qui est responsable de la grande majorité des effets de l'atmosphère neutre sur la propagation des ondes électromagnétiques (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007). Dans la suite de ce manuscrit, le terme *troposphère* fera référence à l'atmosphère neutre. Lorsque le signal GNSS se propage dans cette couche d'atmosphère, il y subit l'effet de la variation de l'indice de réfraction, ce qui se traduit par deux phénomènes : le retard de propagation et la courbure de la trajectoire (Tarniewicz, 2001) : figure 4.3.
Ces phénomènes engendrent des erreurs non négligeables dans l'utilisation classique des GNSS pour le positionnement, et font souvent l'objet de corrections via des modèles précis modélisant les couches traversées. En ce qui concerne le GNSS-R, la courbure de la trajectoire va avoir un effet direct sur la position du point de réflexion et doit impérativement être prise en compte si l'on veut obtenir un modèle le plus précis possible.
Habituellement, les délais troposphériques sont modélisés en calculant le délai troposphérique au zénith, et en utilisant des *mapping functions* pour obtenir les délais troposphériques

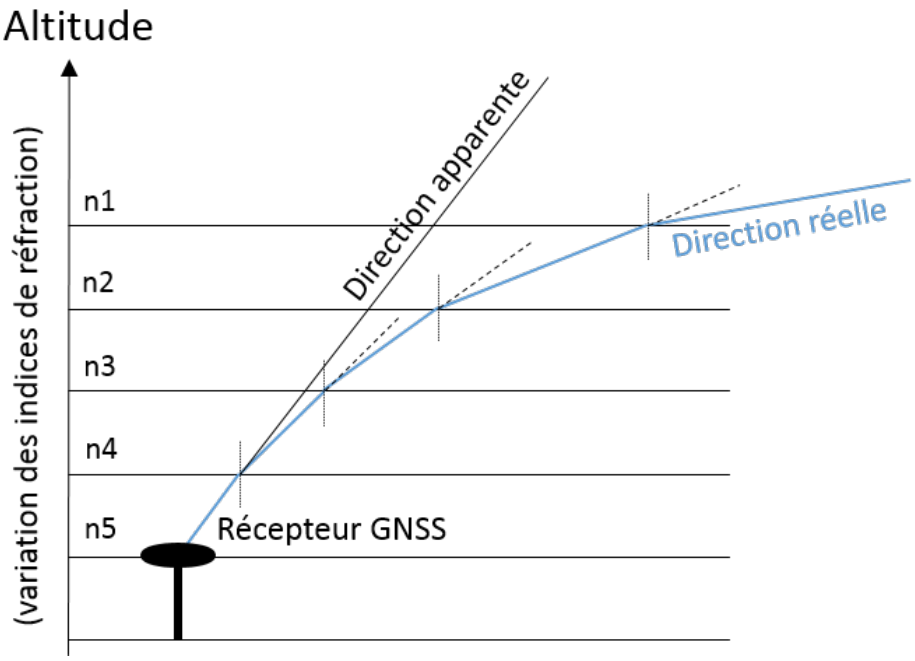


FIGURE 4.3 – Influence de la troposphère sur la propagation : courbure des rayons.

aux autres élévations. Les *mappings functions* récentes comme VMF1 (Boehm *et al.*, 2006) et GPT2/VMF1 (Lagler *et al.*, 2013) sont dérivées de modèles météorologiques numériques (NWM : *Numerical weather models*) et ont améliorées significativement la précision du positionnement géodésique, mais la plupart ignorent la dépendance azimuthal. Une nouvelle classe de *mapping functions* est alors apparue : les *Adaptive Mapping functions* (AMF) qui prennent en compte la plupart des informations issues des NWM, notamment la dépendance azimuthale. Les AMF sont ainsi utilisées pour approximer des milliers de délais atmosphériques le long du tracé de rayon, en utilisant plusieurs dizaines de coefficients avec une précision millimétrique à basse élévation (Gegout *et al.*, 2011).
Dans le cadre du simulateur que j'ai développé, afin de corriger l'anisotropie de la propagation des micro-ondes GNSS, j'utilise des *Adaptive Mapping Function* basées sur les prévisions numériques produites par l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Les corrections troposphériques ont été calculées suivant la méthode proposée par Gegout *et al.* (2011), et seule la réfraction angulaire est prise en compte.
Etant donné les spécificités géométriques dues au phénomène de réflexion, deux trajets sont corrigés dans le simulateur : le premier entre le satellite et la surface de réflexion, et le deuxième entre la surface et le récepteur.

4.2.4 Sorties des simulations

Les sorties du simulateur sont les suivantes :
– les séries temporelles des coordonnées des points de réflexion correspondants aux différents satellites GNSS ;

– les caractéristiques des premières surfaces de Fresnel correspondantes à chaque point de réflexion (voir section 2.3.1) ;
– de nombreux fichiers au format KML (Keyhole Markup Language - le format standard) exploitables sous Google Earth : les positions des satellites et leurs traces au sol, les trajectoires des ondes directes et réfléchies, les premières surfaces de Fresnel, etc.

Grâce à ces fichiers de sortie, l'influence de nombreux paramètres a pu être testées et les principaux résultats sont présentés dans la section suivante.

4.3 Résumé des principaux résultats

4.3.1 Influence de la constellation

A l'issue des différentes simulations que j'ai réalisées au cours de la thèse, un des premiers résultats importants est l'absence totale de points de réflexion au nord de l'antenne pour la constellation GPS. Ceci est particulièrement bien visible sur la figure 4.4 qui présente les positions des points de réflexion GPS (orange) et GLONASS (vert) issus d'une simulation réalisée du 2 au 8 mai 2013 en positionnant une antenne GNSS au sommet du phare de Cordouan (45°35'11"N ; 1°10'24"O), dans l'estuaire de la Gironde, à 65 m au-dessus du niveau de la mer.

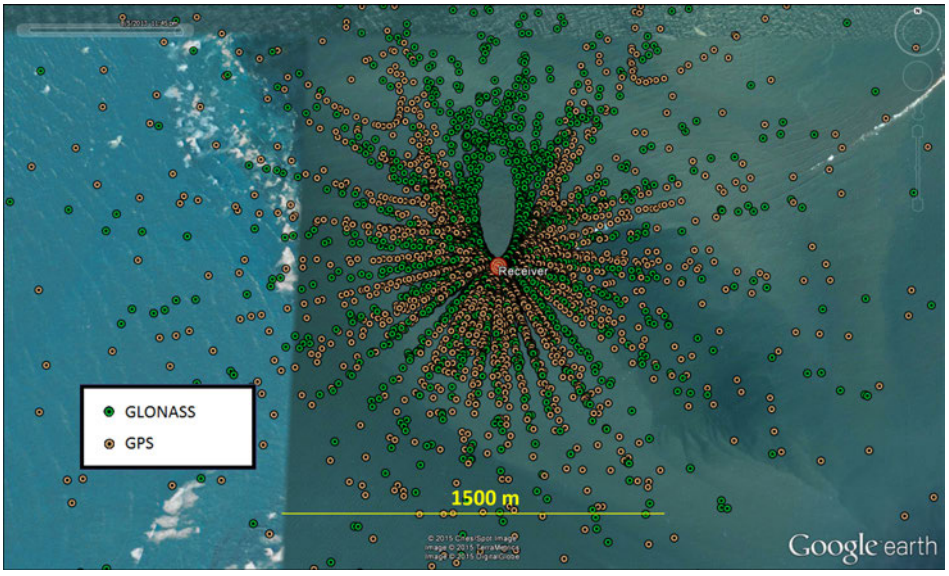


FIGURE 4.4 – Positions des points de réflexion spéculaire GPS (orange) et GLONASS (vert) pour une semaine de simulation au sommet du phare de Cordouan (45°35'11"N ; 1°10'24"O), du 2 au 8 mai 2013.
Résolution temporelle de 15 min (les positions des satellites sont actualisées toutes les 15 min). On remarque un trou au nord de l'antenne sans aucun point de réflexion.

Cette absence de points de réflexion au nord de l'antenne s'explique par le fait que les satellites ne passent jamais à la verticale des latitudes élevées. En effet, l'inclinaison des plans orbitaux des satellites GPS est de 60° (voir section 1.3 page 12). En ce qui concerne les satellites GLONASS, l'inclinaison des plans orbitaux est légèrement supérieure (64,8°, voir section

1.4 page 15) et on retrouve donc de nouveau des points de réflexions GLONASS au-delà d'une certaine distance au Nord de l'antenne.
La figure 4.4 présente la position des satellites GPS et GLONASS actualisée toutes les 15 min durant 24 h, le 8 mai 2013. Cette figure met bien en évidence l'absence de satellites pour les latitudes élevées.
Il est primordial sur le terrain de veiller à positionner l'instrument de mesure GNSS-R le plus au Nord possible de la zone d'étude, pour maximiser le nombre de réflexions dans la zone d'intérêt.

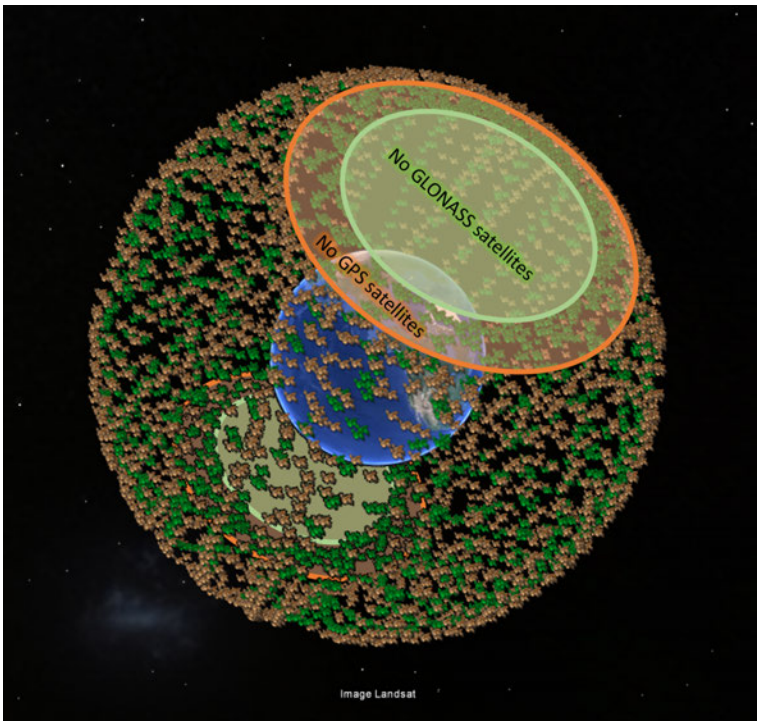


FIGURE 4.5 – Positions des satellites GPS (orange) et GLONASS (vert) durant 24 h (8 mai 2013) avec une résolution temporelle de 15 min (positions des satellites actualisées toutes les 15 min).
On remarque l'absence de satellites dans les latitudes les plus élevées. Pour améliorer la clarté de la figure, les altitudes des satellites ont été divisées par 2.

4.3.2 Influence de la hauteur du récepteur et de l'élévation du satellite

La figure 4.6 présente la variation de la distance entre l'antenne et les points de réflexion et l'aire de la première surface de Fresnel (voir section 2.3.1) en fonction de l'angle d'élévation du satellite et pour différentes valeurs de hauteur de l'antenne au-dessus de la surface de réflexion.
Comme on peut le voir sur cette figure, l'éloignement des points de réflexion de l'antenne augmente de manière quasi-exponentielle en fonction de l'inverse de l'angle d'élévation du satellite et de manière quasi-linéaire en fonction de la hauteur du récepteur. A titre d'exemple, si l'on considère le point de réflexion spéculaire d'un satellite dont l'angle d'élévation est de

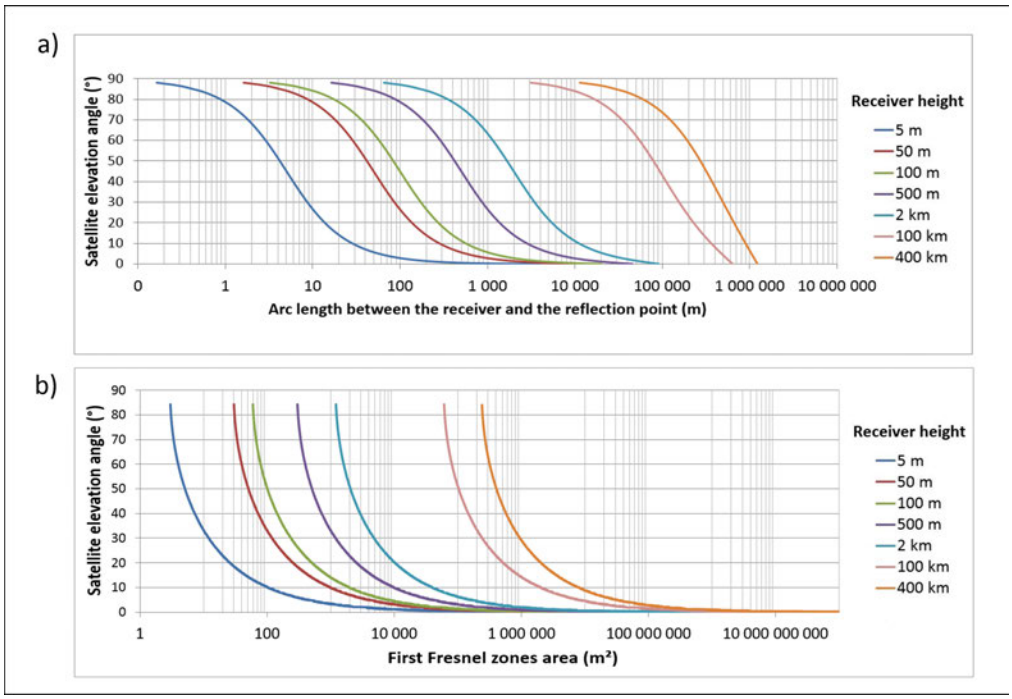


FIGURE 4.6 – Variations de la distance entre l'antenne et les points de réflexion spéculaire (a) et superficie des premières surfaces de Fresnel (b) en fonction de l'angle d'élévation des satellites et pour différentes hauteurs d'antenne.

50°, il sera distant d'environ 4 m de l'antenne si celle-ci est à 5 m de hauteur, alors qu'il sera à environ 300 km si celle-ci est à 400 km de haut. Si l'on considère une hauteur d'antenne de 50 m, le point de réflexion spéculaire d'un satellite d'élévation supérieur à 80° sera à moins de 10 m de l'antenne, et il sera à plus d'1 km dès lors que l'élévation du satellite est inférieure à quelques degrés. Ainsi, plus l'antenne sera haute par rapport à la surface de réflexion, plus la zone couverte et donc *mesurable* sera grande. Cependant, il faut garder à l'esprit que si la taille de la surface sujette à des réflexions augmente avec la hauteur d'antenne, la densité de points à l'intérieur de celle-ci diminuera (moins de points de réflexion et donc de mesures potentielles par unité de surface). En effet, Ainsi, dans le cas d'un seul satellite, les points de réflexion spéculaire qui en seront issus seront plus distants entre eux si l'on augmente la hauteur d'antenne. En revanche, la taille de la première surface de Fresnel sera plus importante pour chacun d'entre eux.

La figure 4.7 met bien en évidence la variation de densité de points mais également de zone couverte lorsqu'on fait varier la hauteur d'antenne.

Il est essentiel de bien définir les objectifs de mesure dans le cadre d'une campagne, afin de pouvoir prévoir à quelle hauteur placer l'antenne. Par exemple : faut-il privilégier l'étendue de la zone couverte au détriment de la densité de mesure par unité de surface ? Ou au contraire, vise-t-on une zone restreinte autour de l'antenne (i.e., spatialisation), auquel cas on ne tiendra compte que des mesures dans cette zone.

Comme expliqué dans l'introduction de ce chapitre, ce simulateur s'intéresse à la position des points de réflexion, peu importe le type de réception (système double ou simple antenne,

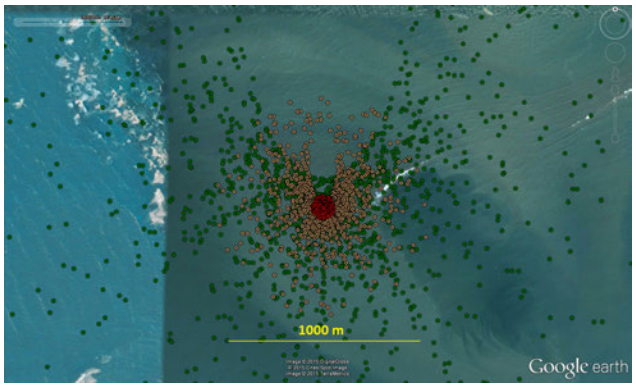


FIGURE 4.7 – Positions des points de réflexion spéculaire (GPS + GLONASS) obtenues lors de 24 h de simulations (19 mai 2013) pour une hauteur d'antenne de 5 m (points rouges), de 50 m (points oranges) et de 300 m (points verts).
Les positions des satellites sont actualisées toutes les 15 min.

voir chapitre 3). Dans le cas d'une réception avec une antenne unique, le signal direct et réfléchi doivent produire des interférences cohérentes pour que l'on puisse observer quelque chose (voir section 3.4.3). Pour une hauteur d'antenne de 300 m comme dans le cas de la figure 4.7, le signal réfléchi et direct ne seront corrélés que pour des élévations inférieures à 30°. Au-delà de 300 m, il apparaît difficile (impossible ?) de réaliser des mesures avec le système à antenne unique (que ce soit par IPT ou par la méthode SNR).

4.3.3 Influence de l'approximation de la surface terrestre

Les positions des points de réflexion spéculaire issues des simulations vont dépendre de l'approximation de la Terre que l'on réalise. Quatre algorithmes différents ont été testés et comparés afin de conclure sur les limites des différentes approximations. Ainsi, de la moins à la plus réaliste, les configurations suivantes ont été évaluées :
– approximation de la Terre en un plan local ;
– approximation de la Terre en une sphère locale ;
– approximation de la Terre en un ellipsoïde ;
– en intégrant un MNT ;

4.3.3.1 Comparaison entre les approximations géométriques

Influence de la hauteur d'antenne Les différences planimétriques et altimétriques entre les positions des points de réflexion obtenus par les différents algorithmes augmentent avec la hauteur de l'antenne. Ceci s'explique par le fait que plus l'antenne est haute, plus les points de réflexion seront éloignés de l'antenne (voir section 4.3.2) et donc plus l'impact de l'approximation de la de la forme de la surface terrestre sera grand. Pour une antenne à 5 m de hauteur, des réflexions ont lieu jusqu'à 60 m environ de l'antenne, alors que pour une hauteur de 300 m, les réflexions ont lieu jusqu'à 3400 m (en considérant les satellites dont l'angle d'élévation est supérieur à 5°). A 5 m de hauteur, la différence planimétrique moyenne entre les positions des points de réflexion obtenus en approximant la Terre en une sphère ou un

ellipsoïde est inférieure à 1,3 cm, et 1,3 mm entre une sphère et un plan. Entre un plan et un ellipsoïde, la différence planimétrique moyenne est inférieure à 1,4 cm. Les différences altimétriques sont négligeables (< mm). En considérant une antenne à 300 m au-dessus du sol, la différence planimétrique (resp. altimétrique) moyenne est de 83 cm (resp. < 1 mm) entre une sphère et un ellipsoïde, 2,19 m (resp. 8 cm) entre une sphère et un plan, et 2,35 m (resp. 8 cm) entre un plan et un ellipsoïde. L'approximation en une sphère est plus proche de l'approximation en un plan qu'en un ellipsoïde lorsque les réflexions n'ont pas lieu trop loin du récepteur (en dessous de 560 m), et inversement si les réflexions ont lieu loin du récepteur (au-delà de 560 m).

Influence de l'angle d'élévation du satellite Comme on peut s'y attendre, les écarts entre les algorithmes augmentent de manière proportionnelle à l'éloignement des points de réflexion de l'antenne. Plus l'angle d'élévation du satellite sera faible (et donc plus les points de réflexion seront loin), plus les écarts entre algorithmes seront importants. Le choix de l'algorithme d'approximation de la Terre est donc très important pour les satellites à faible élévation. Par exemple, en considérant une antenne à 50 m du sol, la moyenne des écarts planimétriques entre les points de réflexion calculés en approximant la Terre en une sphère ou en un ellipsoïde est de 54 cm lorsqu'on considère uniquement des satellites dont l'angle d'élévation est supérieur à 10°, et atteint 83 cm lorsque l'on ajoute les satellites dont l'angle d'élévation est entre 5° et 10°.

Conclusion L'approximation faite en considérant la Terre comme un plan, une sphère, ou un ellipsoïde n'affecte que très peu la précision de détermination de la position des points de réflexion s'ils ne sont pas trop loin de l'antenne. Par exemple, pour une précision de la position des points de réflexion meilleure que 20 cm, le choix de l'approximation de la Terre n'aura d'importance que si les réflexions ont lieu à plus de 125 m de l'antenne environ. Pour avoir des réflexions à moins de 125 m de l'antenne, en considérant des satellites dont l'angle d'élévation est supérieur à 5°, la hauteur d'antenne ne doit pas excéder 25-30 m. Ceci correspondrait à des premières surfaces de Fresnel dont la superficie serait inférieure à 400 m^2.

4.3.3.2 Impact de la topographie sur la visibilité et la position des points de réflexion

L'intégration d'un MNT est indispensable pour des zones montagneuses ou pour n'importe quelle zone dont le relief à proximité du récepteur est non nul (voir sous-section 4.2.3.4). A titre d'exemple, une simulation a été réalisée durant 24 h, le 4 octobre 2012, en positionnant une antenne à 300 m de hauteur, au pied des Alpes, au bord du Lac Léman en Suisse (46°24'30"N ; 6°43'6"E). Ce site est caché au Sud par des montagnes atteignant 2000 m d'altitude, et surplombe le lac à 370 m d'altitude. Deux simulations différentes sont comparées : la première en approximant la surface de la Terre en un ellipsoïde ; la deuxième en intégrant le MNT. Les différences entre les deux simulations atteignent 5.4 km en planimétrie et 1 km en altimétrie. Sur les 905 points de réflexion déterminés durant les 24 h à l'aide du simulateur, 245 ont été supprimés en intégrant le MNT. Ces 245 points venaient d'ondes émises par des satellites cachés par les montagnes au Sud de l'antenne, et donc *visibles* d'après l'approximation en un ellipsoïde, trop lisse, mais *non visibles* en intégrant le MNT. Au nord de la zone, aucun point n'a bougé (voir figure 4.8).

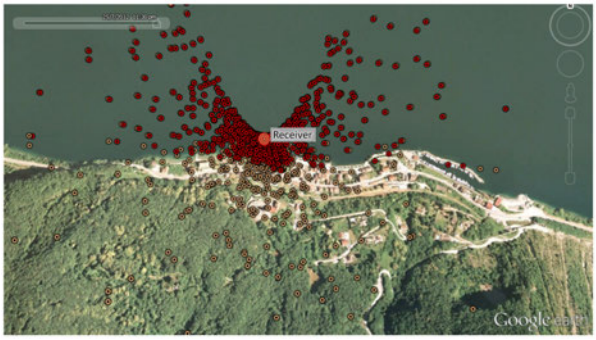


FIGURE 4.8 – Influence du relief - Points de réflexion spéculaires obtenus en intégrant un MNT (rouge) et en approximant la Terre en un ellipsoïde (orange).
Par souci de clarté, les altitudes des points oranges (sans prendre en compte le MNT) ont été mises égales à celles du MNT pour qu'ils soient visibles. Les simulations ont été réalisées avec un récepteur placé à 50 m du sol, au bord du lac de Genève (46°24'30"N ; 6°43'06"E).

4.3.4 Réfraction angulaire due à la troposphère

Les différentes simulations que j'ai réalisées au cours de ma thèse montrent que la réfraction angulaire due à la traversée de la troposphère est négligeable lorsque l'on recherche la position des points de réflexion à une précision centimétrique, et lorsque l'antenne est à moins de 5 m du sol. Si la hauteur d'antenne dépasse 5 m, la prise en compte des perturbations troposphériques est indispensable pour les satellites à faible élévation.
La figure 4.9 illustre les différences entre les positions des points de réflexion obtenues en prenant ou non en compte la correction troposphérique, pour une approximation de la Terre en un ellipsoïde. Ainsi, la différence planimétrique de position peut atteindre 116 m si l'on considère une antenne à 300 m du sol.

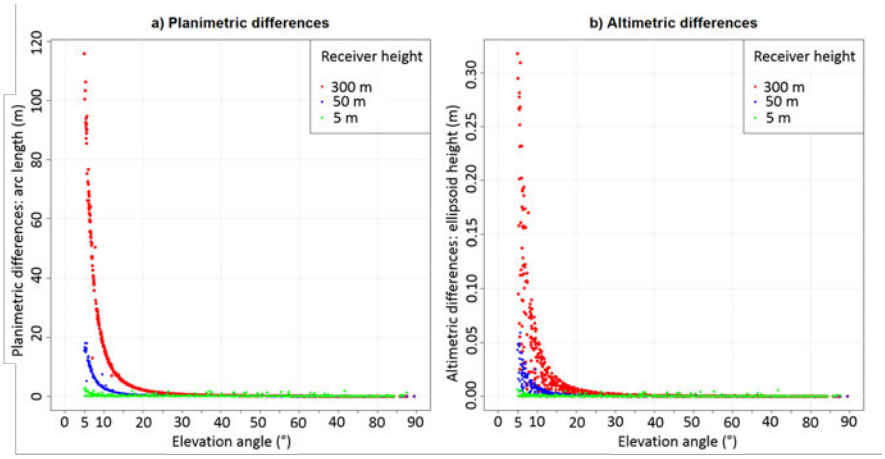


FIGURE 4.9 – Influence de la perturbation troposphérique sur la position des points de réflexion spéculaire. Différences planimétriques (a) et altimétriques (b) entre les positions intégrant ou non la correction de la perturbation troposphérique.

4.4 Conclusion

J'ai réalisé un simulateur qui fournit des estimations réalistes des positions des points de réflexion spéculaire à partir des configurations géométriques des satellites des constellations GNSS et de la position d'un récepteur à la surface de la Terre. Différentes approximations de la surface de la Terre ont été testés : plan, sphère, ellipsoïde ou prise en compte d'un MNT. L'effet des perturbations liées à la traversée de l'onde électromagnétique dans la troposphère est également pris en compte.
Ce simulateur s'est révélé une aide précieuse dans le cadre de missions sur le terrain (e.g., chapitres 5 et 6).
Ce simulateur a été validé en réalisant des inter-comparaisons basées sur différents algorithmes de calculs.
Afin de tester et de valider le simulateur avec des données réelles, une campagne de mesure a été réalisée à l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse avec le système Oceanpal développé par la société Starlab (Ruffini *et al.*, 2003). Le système Oceanpal utilisé est un réflectomètre GNSS classique à deux antennes : la première RHCP orientée vers le zénith, et la seconde LHCP orientée vers le nadir. Une série d'acquisitions a été réalisée pendant presque 24 h entre le 8 et 9 août 2012 en disposant cet instrument à 1,40 m du sol. La figure 4.10 présente 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'angle d'élévation de quelques satellites. L'angle d'élévation de tous les satellites n'a pas été tracé afin de ne pas surcharger la figure. On peut constater la coïncidence des points bleus (sorties du simulateur) et rouges (mesures réelles). Tous les satellites visibles par le réflectomètre sur le terrain étaient prédits par le simulateur. La plupart des débuts de passage des satellites sont prédits par le simulateur, mais ne font pas l'objet de mesures : ceci s'explique très certainement par le fait que l'instrument Oceanpal utilisé nécessite un temps minimal d'observation d'un satellite avant l'acquisition. De plus, les conditions de terrain ne sont pas celles théoriques et parfaites du simulateur et des masques ou des trajets multiples, peuvent expliquer le fait que des satellites n'ont pas fait l'objet de mesures à chaque instant théoriquement possible. Les satellites visibles ont également été contrôlés en disposant un récepteur GNSS de randonnée (de type Garmin, précision maximale de 5-6 m) au niveau du réflectomètre, et on peut constater que les satellites visibles par ce récepteur sont bien les mêmes que ceux ayant été prédits par le simulateur.

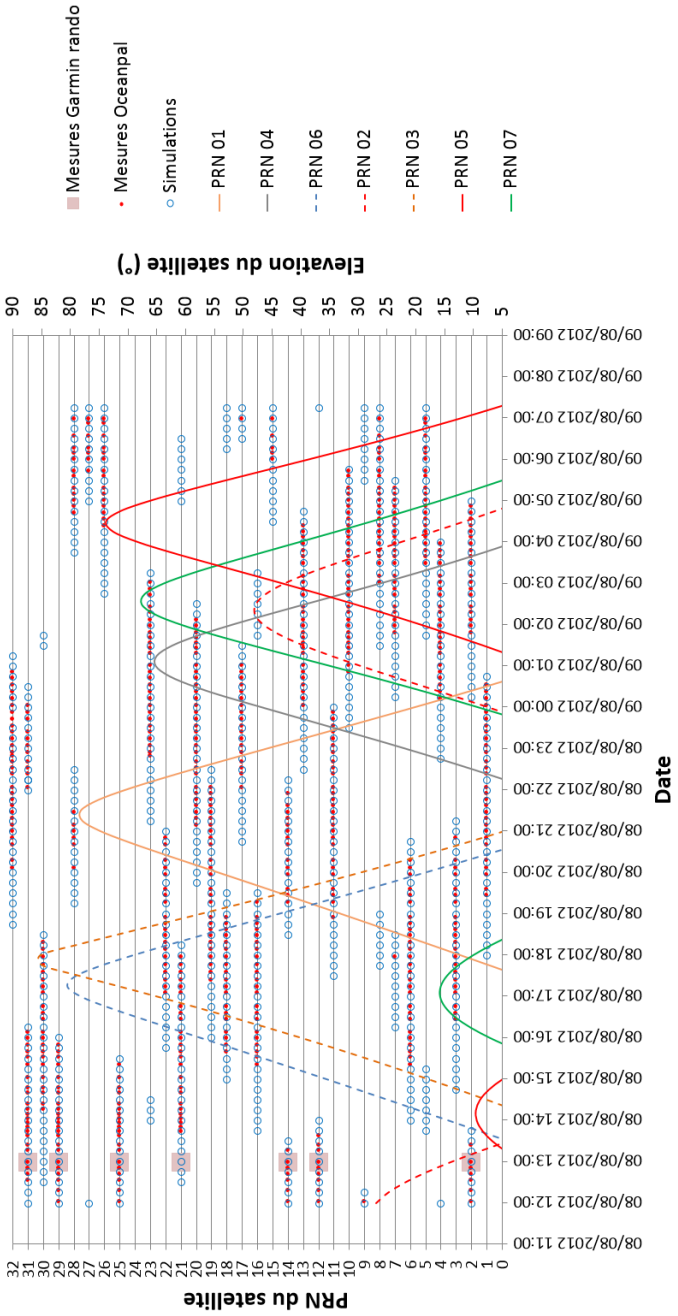


FIGURE 4.10 – Comparaison des résultats du simulateur avec les satellites effectivement visibles in situ lors d'une campagne d'acquisition réalisée à l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse, le 8 et 9 Août 2012.
Les points rouges représentent les périodes pour lesquelles des acquisitions ont été réalisées par le réflectomètre Oceanpal pour les différents satellites. Les points bleus représentent les périodes de visibilité prédites par le simulateur. J'ai également représenté l'angle d'élévation théorique de quelques satellites pour confirmer leurs périodes de visibilité théorique.

4.5 *Article publié* : GMD 2014 - Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments

Geosci. Model Dev., 7, 2261–2279, 2014
www.geosci-model-dev.net/7/2261/2014/
doi:10.5194/gmd-7-2261-2014
© Author(s) 2014. CC Attribution 3.0 License.

Geoscientific Model Development
Open Access

Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments

N. Roussel[1,2], F. Frappart[1,2], G. Ramillien[1,2], J. Darrozes[1,2], C. Desjardins[1,2,3,4], P. Gegout[1,2], F. Pérosanz[1,2,4], and R. Biancale[1,2,4]

[1]Université de Toulouse, CNRS, IRD, GET-OMP, Toulouse, France
[2]Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, Toulouse, France
[3]Collecte Localisation Satellites, Ramonville Saint Agne, France
[4]Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, France

Correspondence to: N. Roussel (nicolas.roussel@get.obs-mip.fr)

Received: 30 November 2013 – Published in Geosci. Model Dev. Discuss.: 24 January 2014
Revised: 12 August 2014 – Accepted: 31 August 2014 – Published: 2 October 2014

Abstract. The detection of Global Navigation Satellite System (GNSS) signals that are reflected off the surface, along with the reception of direct GNSS signals, offers a unique opportunity to monitor water level variations over land and ocean. The time delay between the reception of the direct and reflected signals gives access to the altitude of the receiver over the reflecting surface. The field of view of the receiver is highly dependent on both the orbits of the GNSS satellites and the configuration of the study site geometries. A simulator has been developed to determine the location of the reflection points on the surface accurately by modeling the trajectories of GNSS electromagnetic waves that are reflected by the surface of the Earth. Only the geometric problem was considered using a specular reflection assumption. The orbit of the GNSS constellation satellites (mainly GPS, GLONASS and Galileo), and the position of a fixed receiver, are used as inputs. Four different simulation modes are proposed, depending on the choice of the Earth surface model (local plane, osculating sphere or ellipsoid) and the consideration of topography likely to cause masking effects. Angular refraction effects derived from adaptive mapping functions are also taken into account. This simulator was developed to determine where the GNSS-R receivers should be located to monitor a given study area efficiently. In this study, two test sites were considered: the first one at the top of the 65 m Cordouan lighthouse in the Gironde estuary, France, and the second one on the shore of Lake Geneva (50 m above the reflecting surface), at the border between France and Switzerland. This site is hidden by mountains in the south (orthometric altitude up to 2000 m), and overlooking the lake in the north (orthometric altitude of 370 m). For this second test site configuration, reflections occur until 560 m from the receiver. The planimetric (arc length) differences (or altimetric difference as WGS84 ellipsoid height) between the positions of the specular reflection points obtained considering the Earth's surface as an osculating sphere or as an ellipsoid were found to be on average 9 cm (or less than 1 mm) for satellite elevation angles greater than 10°, and 13.9 cm (or less than 1 mm) for satellite elevation angles between 5 and 10°. The altimetric and planimetric differences between the plane and sphere approximations are on average below 1.4 cm (or less than 1 mm) for satellite elevation angles greater than 10° and below 6.2 cm (or 2.4 mm) for satellite elevation angles between 5 and 10°. These results are the means of the differences obtained during a 24 h simulation with a complete GPS and GLONASS constellation, and thus depend on how the satellite elevation angle is sampled over the day of simulation. The simulations highlight the importance of the digital elevation model (DEM) integration: average planimetric differences (or altimetric) with and without integrating the DEM (with respect to the ellipsoid approximation) were found to be about 6.3 m (or 1.74 m), with the minimum elevation angle equal to 5°. The correction of the angular refraction due to troposphere on the signal leads to planimetric (or altimetric) differences of an approximately 18 m (or 6 cm) maximum for a 50 m receiver height above the reflecting surface, whereas the maximum is 2.9 m (or 7 mm) for a 5 m receiver height above the reflecting surface. These errors

increase deeply with the receiver height above the reflecting surface. By setting it to 300 m, the planimetric errors reach 116 m, and the altimetric errors reach 32 cm for satellite elevation angles lower than 10°. The tests performed with the simulator presented in this paper highlight the importance of the choice of the Earth's representation and also the non-negligible effect of angular refraction due to the troposphere on the specular reflection point positions. Various outputs (time-varying reflection point coordinates, satellite positions and ground paths, wave trajectories, first Fresnel zones, etc.) are provided either as text or KML files for visualization with Google Earth.

1 Introduction

The Global Navigation Satellite System (GNSS), which includes the American GPS, the Russian GLONASS, and the European Galileo (which is getting denser), uses L-band microwave signals to provide accurate 3-D positioning on any point of the Earth's surface or close vicinity. Along with the space segment development, the processing techniques have also improved considerably, with a better consideration of the various sources of error in the processing. Among them, multipaths still remain a major problem, and the mitigation of their influence has been widely investigated (Bilich, 2004). The ESA (European Space Agency) first proposed the idea of taking advantage of the multipath phenomenon in order to assess different parameters of the reflecting surface (Martin-Neira, 1993). This opportunistic remote sensing technique, known as GNSS reflectometry (GNSS-R), is based on the analysis of the electromagnetic signals emitted continuously by the GNSS satellites and detected by a receiver after reflection on the Earth's surface. Several parameters of the Earth's surface can be retrieved either by using the time delay between the signals received by the upper (direct signal) and lower (reflected signal) antennas, or by analyzing the waveforms (temporal evolution of the signal power) corresponding to the reflected signal. This technique offers a wide range of applications in Earth sciences. The time delay can be interpreted in terms of altimetry as the difference in height between the receiver and the surface. Temporal variations of sea (Lowe et al., 2002; Ruffini et al., 2004; Löfgren et al., 2011; Semmling et al., 2011; Rius et al., 2012) and lake levels (Treuhaft et al., 2004; Helm, 2008) were recorded with an accuracy of a few cm using in situ and airborne antennas. Surface roughness can be estimated from the analysis of the delay Doppler maps (DDM) derived from the waveforms of the reflected signals. They can be related to parameters such as soil moisture (Katzberg et al., 2006; Rodriguez-Alvarez et al., 2009, 2011) over land, wave heights and wind speed (Komjathy et al., 2000; Zavorotny and Voronovich, 2000; Rius et al., 2002; Soulat et al., 2004) over the ocean, or ice properties (Gleason, 2006; Cardellach et al., 2012). The GNSS-R technique presents two main advantages: (1) a dense spatial and temporal coverage, not only limited to a single measurement point or a non-repetitive transect as with using classical GNSS buoys, and (2) a guarantee of service for the next decades (because of the strategic role played by these systems). GNSS-R altimetric accuracy is today at the level of a few cm, but this technique will benefit, in the future, from improved processing techniques and from the densification of the GNSS constellation. The commonly used GNSS-R system consists of two antennas (Fig. 1): the first one is right-hand circular polarized (RHCP) and zenith facing to receive the direct waves. The second one is left-hand circular polarized (LHCP) and nadir facing to receive the reflected waves. These reflected waves will predominantly change their polarization from RCHP to LHCP by reflecting at near-normal incidence. The reflected signals have an additional path delay with respect to the direct ones. The analysis of the path difference between these direct and reflected signals is used to estimate the relative height difference between the two antennas. In order to anticipate the impact of the geometric configuration of the experiment, a simulator has been developed to estimate the positions of reflection points using a specular reflection point assumption. Four different methods were implemented: approximating the Earth's surface as a local plane, as an osculating sphere, as an ellipsoid, or integrating a digital elevation model (DEM). In addition, the signal bending due to the neutral part of the atmosphere is taken into account using the adaptive mapping functions (AMF) from Gégout et al. (2011), and made available by GRGS (Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale). Simulations were performed for different configurations: variations in the reflectometer height, mask effects due to terrain, and satellite network geometry.

This article is composed of three main parts following the logical structure of Fig. 2. The first part presents the data sets used for initiating simulations, the second one concerns the methodologies for the determination of the reflection points, while the last one deals with the simulator performances and simulation results.

Design of the simulator

The simulator has been developed in the GNU R language, generally used for data processing and statistical analysis. A user manual and a description of the R language can be found on the website http://www.r-project.org/. The main interest of such a language remains in that it is distributed under a GNU GPL license that does R routines in an open source program, available on various platforms (i.e., GNU/Linux, FreeBSD, NetBSD, OpenBSD, Mac OS and Windows).

The simulator is composed of three main blocks (Fig. 2): an input block that contains the different elements mandatory for the processing, a processing block where the user can choose which algorithm to use, and an output block containing the different results of the simulation.

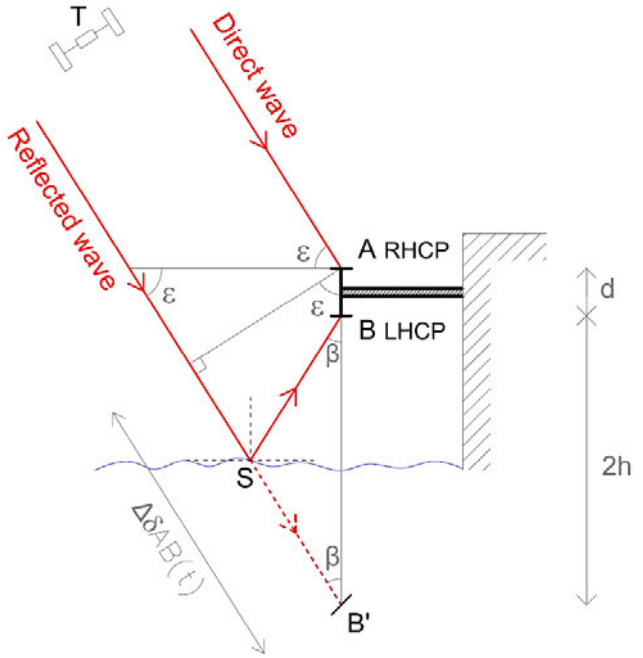


Figure 1. Principle of GNSS reflectometry. T: satellite/transmitter; S: specular reflection point; ϵ: satellite elevation; $\triangle\,\delta\mathrm{AB}(t)$: additional path covered by the reflected wave; d: interdistance between the LHCP and RHCP antennas; and h: height of the receiver above the reflecting surface.

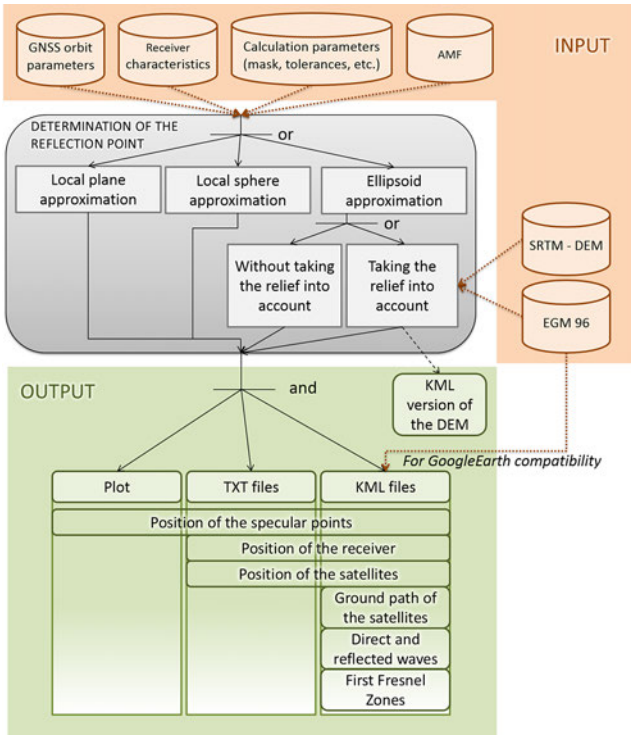


Figure 2. Data flowchart of the simulator. Three main blocks: an input block that contains the different elements mandatory for the processing, a processing block where the user can choose which algorithm is to be used, and an output block containing the different results of the simulation, namely KML files to be opened with Google Earth.

As inputs, this simulator requires the receiver coordinates, the satellite ephemeris and a set of optional environmental parameters such as a DEM in order to take the possible masking of the terrestrial topography into account, as well as adaptive mapping functions to integrate atmospheric delays and bending effects.

As outputs, the simulator provides the time-varying reflection point coordinates, but also various KML (*Keyhole Markup Language* – the standard format used by Google Earth) files such as satellite positions and ground paths, wave trajectories and Fresnel first surfaces that can be opened using the Google Earth visualization tool.

2 Data sets

2.1 GNSS orbit parameters

The simulations are based on the determination of the positions of the specular reflection points, once the receiver and the satellite positions are known. Satellite coordinates can be obtained from the International GNSS Service (IGS) ephemeris final products, which provide GNSS orbit and clock offset data with a temporal resolution of 15 min in the SP3 format for the past epochs, or are derived from the Keplerian parameters (semi-major axis, inclination, and argument of perigee) to predict GNSS satellite positions. Ephemeris products are available on the IGS website (http://igs.org/), and Keplerian parameters, e.g., at http://www.navcen.uscg.gov.

2.2 Radio-electric mask

Simulations are performed for a given receiver position in the WGS84 coordinate system and height above the ground. It is possible to apply an elevation or azimuthal angle mask to the simulations to avoid satellites with low elevation angles, for instance. The elevation angle mask commonly used is set to a 10° minimum and a 90° maximum, and no mask is set in the azimuth.

2.3 SRTM digital elevation model

The most realistic simulation needs the integration of a digital elevation model (DEM) in order not only to take the possible masking of satellites into account, but to get more accurate and exact positions of the specular reflection points as well. The hole-filled version 4 of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM, with a spatial resolution of 90 m at the Equator, is used (Jarvis et al., 2008). The altitudes are given with reference to the EGM96 geoid model. Uncertainty

in altitude is around 16 m over mountainous areas (Rodriguez et al., 2005). It is made available by files of 5° × 5° for land areas between 60° N and 60° S by the Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI; http://srtm.csi.cgiar.org/).

2.4 EGM96 Earth gravitational model

In order to be able to convert between ellipsoidal heights (with respect to the WGS84 ellipsoid) and altitudes (with respect to the EGM96 geoid model) when producing KML files or when integrating a DEM, knowledge of the geoid undulation is mandatory. In this study, we interpolate a 15 × 15 min geoid undulation grid file derived from the EGM96 model in a tide-free system released by the US National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) EGM development team (http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/). The error in the interpolation is lower than 2 cm (NASA and NIMA, 1998).

2.5 Adaptive mapping functions

The neutral atmosphere bends the propagation path of the GNSS signal and retards the speed of propagation. The range between the satellite and the tracking site is neither the geometric distance nor the length of the propagation path, but the radio range of the propagation path (Marini, 1972).

For GNSS-R measurements, the tropospheric effects induced by the neutral part of the atmosphere are an important source of error. Indeed, GNSS-R measurements are often made at low elevation angles, where the bending effects are maximal. Accurate models have to be used to mitigate signal speed decrease and path bending. Modeling tropospheric delays by calculating the zenith tropospheric delay and obtaining the slant tropospheric delays with a mapping function is commonly accepted. New mapping functions were developed in the 2000s (Boehm et al., 2006a; Niell, 2001), and significantly improve the geodetic positioning. Although modern mapping functions like VMF1 (Boehm et al., 2006b) and GPT2/VMF1 (Lagler et al., 2013) are derived from numerical weather models (NWM), most of these mapping functions ignore the azimuth dependency, which is usually introduced by two horizontal gradient parameters – in the north–south and east–west directions – estimated directly from observations (Chen et al., 1997). More recently, the use of ray-traced delays through NWM directly at observation level has shown an improvement in geodetic results (Hobiger et al., 2008; Nafisi et al., 2012; Zus et al., 2012). The adaptive mapping functions (AMF) are designed to fit most of the information available in NWM – especially the azimuth dependency – preserving the classical mapping function strategy. AMF are thus used to approximate thousands of atmospheric ray-traced delays using a few tens of coefficients with millimeter accuracy at low elevations (Gégout et al., 2011). AMF have a classical form, with terms that are functions of the elevation, but they also include coefficients that depend on the azimuth to represent the azimuthal dependency of ray-traced delays. In addition, AMF are suitable for adapting to complex weather by changing the truncation of the successive fractions. Therefore, the AMF are especially suited to correcting the propagation of low-elevation GNSS-R signals. In our study, we use AMF directly provided by GRGS (Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale) and computed following Gégout et al. (2011).

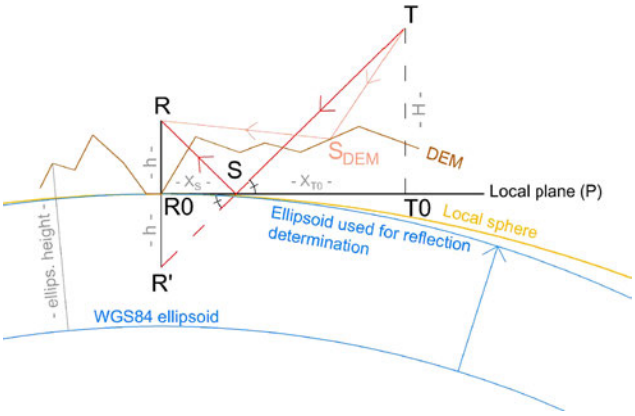


Figure 3. Determination of the specular reflection point in a local plane approximation and local difference with the sphere and ellipsoid approximations and DEM integration. *S*: specular reflection point position. *R*: receiver position. *T*: transmitter/satellite position. *h*: height of the receiver above the ground surface.

2.6 Data used for a simulator usage illustration

In order to assess the ocean tide influence on the positions of the reflection points estimated at an offshore experimental site located at the top of the Cordouan lighthouse (45°35′11″ N; 1°10′24″ W), we use 24 h of REFMAR (*Réseau de Référence des Observations Marégraphiques*) tide gauge observations, with a sampling frequency of 5 minutes. The tide gauge records of the station of Royan (45°37′14.07″ N; 1°01′40.12″, located 12 km from the lighthouse) are the property of MEDDE (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie), and they are available on the REFMAR website (http://refmar.shom.fr).

3 Methodology: determination of the positions of reflection points

The difference in phase between the two antennas (A-RHCP and B-LHCP in Fig. 1) at an epoch t for the ith GNSS satellite can be seen as a classical single difference between two receivers used for relative positioning as follows:

$$\lambda\Delta\phi^i_{\mathrm{AB}}(t) = \Delta\delta^i_{\mathrm{AB}}(t) - \lambda\Delta N^i_{\mathrm{AB}} - c\Delta t_{\mathrm{AB}}, \quad (1)$$

where λ is the wavelength of the GNSS signal, $\Delta\phi^i_{\mathrm{AB}}$ the measured carrier phase difference between the direct and

received signals expressed in cycles, $\Delta\delta^i_{\mathrm{AB}}$ the difference in distance between the direct and received signals, ΔN^i_{AB} is the difference of phase ambiguity between the direct and received signals, c the speed of light in a vacuum, and Δt_{AB} the receiver clock bias difference. As the baseline between the two receivers is short (a few cm to a few tenths of cm), and in the case of low altitude of the receivers, both tropospheric and ionospheric effects are neglected due to the spatial resolution of the current atmospheric and ionospheric models. Besides, when both antennas are connected to the same receiver, the receiver clock bias difference is also cancelled out. In this study, we only consider the difference in distance between direct and reflected signals, as illustrated in Fig. 1.

The processing block contains four algorithms for determining the positions of the specular reflection points: the first considering the Earth as a local plane in the vicinity of the reflection point, the second as an osculating sphere, the third as an ellipsoid that corresponds to the WGS84 ellipsoid, which has been expanded until the ellipsoid height of the receiver equals the height of the receiver above the reflecting surface (see Sect. 3.3), and the last one uses the ellipsoid approximation, but takes the Earth's topography into account: see Fig. 3. Comparisons between the different approximations of the Earth's shape will be performed in Sect. 4.1.

All of them are based on iterative approaches to solving the Snell–Descartes law for reflection: the unique assumption is that the angle of incidence is equal to the angle of reflection on a plane interface separating two half-space media (a locally planar approximation is adopted when the surface is not planar everywhere). In the plane, sphere and ellipsoid approximations, the specular reflection point of a given satellite is contained within the plane defined by the satellite, the receiver and the center of the Earth. With regards to the DEM integration, reflection can occur everywhere. In order to be able to compare the specular reflection point positions obtained by integrating a DEM, and to simplify the problem, we will only consider the reflections occurring within the plane, even while integrating a DEM.

3.1 Local plane reflection approximation

Refering to Fig. 3, let us consider the projection of the receiver $R0$ on the osculating sphere approximation (see Sect. 3.2). We define the local plane P as the plane tangent to the sphere at $R0$. Let $T0$ be the projection of the satellite on P and R' the symmetry of $R0$ relative to P. We look for the positions of the specular reflection points on P. Considering the Thales theorem in triangles $R'SR0$ and $STT0$, we have (see Fig. 3)

$$\frac{X_S}{(X_{T0} - X_S)} = \frac{h}{H}. \tag{2}$$

Thus,

$$X_S = \frac{hX_{T0}}{H+h}. \tag{3}$$

3.2 Local sphere reflection approximation

The model we consider is an osculating sphere. Its radial direction coincides with the ellipsoidal normal, and its center is set at an ellipsoidal height equal to the negative value of the Gaussian radius of curvature defined as

$$r_E = \frac{a'^2 b'}{a'^2 \cos^2(\varphi) + b'^2 \sin^2(\varphi)}, \tag{4}$$

with φ the latitude of the receiver, and a' and b' the semi-major and semi-minor axes of the modified ellipsoid (see Sect. 3.3). Please refer to Nievinski and Santos (2010) for further information on the different approximations of the Earth, particularly on the osculating sphere.

J. Kostelecky and C. Wagner already suggested an algorithm to retrieve the specular reflection point positions by approximating the Earth as a sphere (Kostelecky et al., 2005; Wagner and Klokocnik, 2003). Their algorithm is based on an optimized iterative scheme that is equivalent to making the position of a fictive specular point vary until verifying the first law of Snell and Descartes. A similar approach will be used in this paper in Sect. 3.3 with the ellipsoid approximation. Here, we chose to adopt a more analytical algorithm, first proposed by Helm (2008). In order to validate this algorithm, comparisons between it and the iterative one developed for the ellipsoid approach will be performed, by setting the minor and major axes of the ellipsoid equal to the sphere radius (see Sect. 4.2.1).

Let us consider the vertical plane formed by the transmitter (GNSS) satellite (T), the receiver (R) and O', the center of the Earth (Fig. 4). We assume that the specular reflection point (S) will be included in that plane. Let us consider the following orthonormal reference systems of coordinates:

- $(O, X, Y, Z)_{R1}$: WGS84 Cartesian system (NIMA, 1997), with O the center of the Earth. WGS84 has Z polar and X, Y equatorial. The receiver and transmitter coordinates are known in this system.
- $(O', x, y)_{R2}$: a local 2-D system, obtained by the rotation of the (O, X, Y, Z) system around the Z axis, in such a way that x_{r} equals 0, and a translation $\mathbf{00'}$ with $0'$ the center of the osculating sphere.
- $(S, x', y')_{R3}$: a local 2-D system, obtained by a rotation around the z axis and a r_E translation of the (O', x, y) system in such a way that x' and the local vertical are colinear, and the system origin coincides with the specular reflection point S.

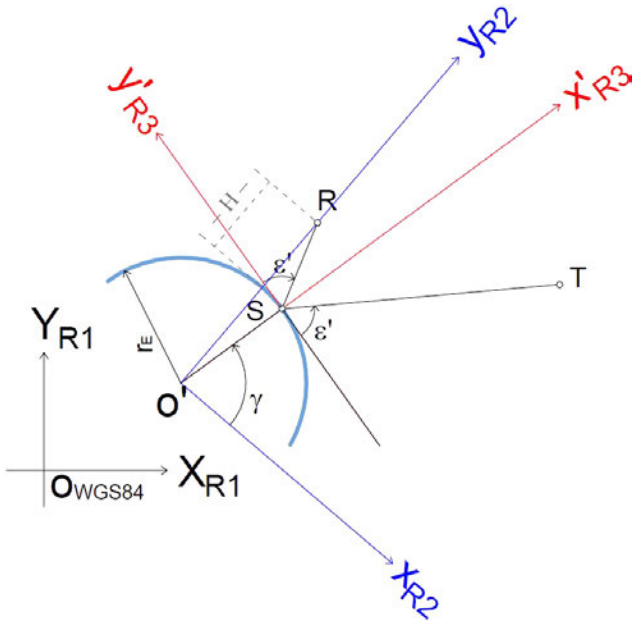


Figure 4. Local osculating sphere approximation: the three different reference systems of coordinates. S: specular reflection point position. R: receiver position. T: transmitter/satellite position. $(0, X, Y, Z)_{R1}$: WGS84 Cartesian system. $(0', x, y)_{R2}$: local 2-D system, centred on the center of the osculating sphere, obtained by the rotation of the $R1$ system around the Z axis, in such a way that x_r equals 0. $(S, x', y')_{R3}$: a local 2-D system, obtained by a rotation around the z axis and a r_R translation of the R2 system in such a way that x' and the local vertical are colinear and the system origin coincides with the specular reflection point S.

If H is the height of the receiver above the ground, the position of the receiver is

$$\boldsymbol{r}_\mathrm{r} = \begin{pmatrix} x_\mathrm{r} \\ y_\mathrm{r} \end{pmatrix}_{R2} = \begin{pmatrix} 0 \\ r_E + H \end{pmatrix}_{R2}, \tag{5}$$

with r_E the Gaussian radius of curvature at the latitude of the receiver φ_r.

The position of the GNSS satellite transmitter considering ε the elevation angle of the satellite (considering the zenith angle reckoned from the ellipsoidal normal direction) and τ the angle $\widehat{RTO'}$ is given by

$$\boldsymbol{r_t} = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix}_{R2} = \begin{pmatrix} r_t \cos(\varepsilon + \tau) \\ r_t \sin(\varepsilon + \tau) \end{pmatrix}_{R2}. \tag{6}$$

Using the trigonometric sine formula in the $R - T - 0'$ triangle,

$$\frac{\sin(\frac{\pi}{2} + \varepsilon)}{r_t} = \frac{\sin(\tau)}{r_E + H}, \tag{7}$$

we finally obtain

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix}_{R2} = \begin{pmatrix} r_t \cos(\varepsilon)\sqrt{1 - \frac{(r_E+H)^2}{r_t^2}\cos^2(\varepsilon)} \\ -(r_E + H)\sin(\varepsilon)\cos(\varepsilon) \\ r_t \sin(\varepsilon)\sqrt{1 - \frac{(r_E+H)^2}{r_t^2}\cos^2(\varepsilon)} \\ -(r_E + H)\cos^2(\varepsilon) \end{pmatrix}_{R2}. \tag{8}$$

The Snell–Descartes law for reflection can be expressed as the ratios of the coordinates of the receiver and the transmitter in (S, x', y'):

$$\frac{x'_t}{y'_t} = \frac{x'_\mathrm{r}}{y'_\mathrm{r}}. \tag{9}$$

The coordinates in $R3$ can be derived from the coordinates in $R2$ from

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}_{R3} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma)) \end{pmatrix}_{R3} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{R2} - \begin{pmatrix} r_e \\ 0 \end{pmatrix}_{R3}, \tag{10}$$

where γ is the rotation angle between the two systems (Fig. 4). Eq. (9) thus becomes

$$\begin{aligned} &2(x_t x_\mathrm{r} - y_t y_\mathrm{r})\sin(\gamma)\cos(\gamma) \\ &-(x_t y_\mathrm{r} + y_t x_\mathrm{r})(\cos^2(\gamma) - \sin^2(\gamma)) \\ &-r_E(x_t + x_\mathrm{r})\sin(\gamma) + r_e(y_t + y_\mathrm{r})\cos(\gamma) = 0 \end{aligned} \tag{11}$$

Following (Helm, 2008), we proceed to the substitution $t = \tan(\frac{\gamma}{2})$, and Eq. (11) becomes

$$\begin{aligned} 2(x_t x_\mathrm{r} - y_t y_\mathrm{r})\frac{2t}{1+t^2}\frac{1-t^2}{1+t^2} - x_t y_\mathrm{r}((\frac{1-t^2}{1+t^2})^2 \\ -(\frac{2t}{1+t^2})^2) - r_E\frac{2t}{1+t^2}(x_t + x_\mathrm{r}) \\ +r_E\frac{1-t^2}{1+t^2}(y_t + y_\mathrm{r}) = 0. \end{aligned} \tag{12}$$

This finally becomes

$$c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c1_t^1 + c_0 = 0, \tag{13}$$

with

$$c_0 = (x_t y_\mathrm{r} + y_t x_\mathrm{r}) - r_E(y_t + y_\mathrm{r}) \tag{14}$$
$$c_1 = -4(x_t x_\mathrm{r} - y_t y_\mathrm{r}) + 2r_E(x_t + x_\mathrm{r}) \tag{15}$$
$$c_2 = -6(x_t y_\mathrm{r} + y_\mathrm{r} x_\mathrm{r}) \tag{16}$$
$$c_3 = 4(x_t x_\mathrm{r} - y_t y_\mathrm{r}) + 2r_E(x_t + x_\mathrm{r}) \tag{17}$$
$$c_4 = (x_t y_\mathrm{r} + y_t x_\mathrm{r}) + r_E(y_t + y_\mathrm{r}). \tag{18}$$

Equation (13) is solved to determine the roots of this polynomial using an iterative scheme based on the Newton method (Nocedal et al., 2006).

3.3 Ellipsoid reflection approximation

We consider an ellipsoid corresponding to the WGS84 one extended such that the ellipsoid height of the receiver is equal to the receiver height above the reflecting surface. In other words, the WGS84 ellipsoid is expanded until its surface coincides with the reflecting surface, at the nadir of the receiver (surface base point). The Cartesian coordinates of this surface base point must remain unchanged when computed either from the original geodetic coordinates $(\lambda, \phi, h)_{\mathrm{WGS84}}$ and the ellipsoid constant $(a, b)_{\mathrm{WGS84}}$ on the one hand, or their modified values $(\lambda', \phi', h', a', b')$ on the other hand, where $\lambda = \lambda'$ is the longitude, $\phi = \phi'$ is the latitude, and $h' = 0$. The ellipsoid thus remains geocentric, and its axes are scaled as follows:

$$a' = \sqrt{a^2 + h^2 + hc + \frac{a^2 h}{c}} = a\sqrt{1 + \frac{h^2}{a^2} + \frac{hc}{a^2} + \frac{h}{c}} \quad (19)$$

$$b' = \sqrt{b^2 + h^2 + hc + \frac{b^2 h}{c}} = b \cdot \sqrt{1 + \frac{h^2}{b^2} + \frac{hc}{b^2} + \frac{h}{c}}, \quad (20)$$

where $c = \sqrt{a^2 \cos(\phi)^2 + b^2 \sin(\phi)^2}$

This ellipsoidal extension is only done once as long as the receiver position remains unchanged with respect to the reflecting surface; it is redone if the reflecting surface changes (e.g., tidal waters), but is not done with changes in the satellite direction.

We define the two normalized anti-incident $\boldsymbol{r}_t$ and scattering $\boldsymbol{r}_s$ vectors. When the Snell–Descartes law is verified, the sum of these two vectors (bisecting vector $\boldsymbol{dr}$) coincides with the local vertical. The determination of the location of the reflection point is based on the iterative process proposed earlier by Gleason et al. (2009), and enhanced with a dichotomy process. Let us consider three points on the ellipsoid:

- $S1$, the projection of the receiver on the ellipsoid.
- $S3$, the projection of the transmitter on the ellipsoid.
- $S2$, the projection of the middle of $[S1S3]$ on the ellipsoid.

We calculate $\boldsymbol{dr}$, the correction in direction, considering the location of each of the three points:

$$\boldsymbol{dr}(t) = \frac{\boldsymbol{r}_s(t) - \boldsymbol{r}_\mathrm{r}(t)}{\|\boldsymbol{r}_s(t) - \boldsymbol{r}_\mathrm{r}(t)\|} + \frac{\boldsymbol{r}_s(t) - \boldsymbol{r}_t(t)}{\|\boldsymbol{r}_s(t) - \boldsymbol{r}_t(t)\|}. \quad (21)$$

We then consider the direction of the correction $\boldsymbol{dr}$. If the correction is in the satellite direction, the sign is considered positive, and negative if the correction is in the receiver direction. If the signs of dr_{S1} and dr_{S2} are different, it means that the specular reflection point is located between $S1$ and $S2$. We thus consider a new iteration with $S1 = S1$, $S3 = S2$ and $S2$ the projection on the ellipsoid of the middle of the new $S1$ and $S3$ points. We thus eliminate the part between the initial $S2$ and $S3$ points, else if the signs of dr_{S2} and dr_{S3} are different, we consider a new iteration with $S1 = S2$ and $S3 = S3$ (and $S2$ the projection on the ellipsoid of the middle of the new $S1$ and $S3$ points). The iterative process stops when the difference between incident and reflected angle (with respect to the local vertical) is close to zero with a fixed tolerance of 10^{-7}°.

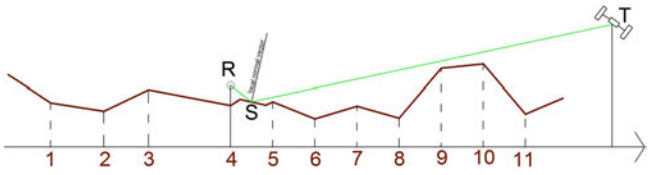


Figure 5. Determination of the specular reflection point integrating a DEM. S: specular reflection point position. R: receiver position. T: transmitter/satellite position. A dichotomous process is applied for each topographic segment of the DEM to find if there is a point where the bisecting angle (equal to the sum of the anti-incident and scattering vectors) is colinear with the local normal vector.

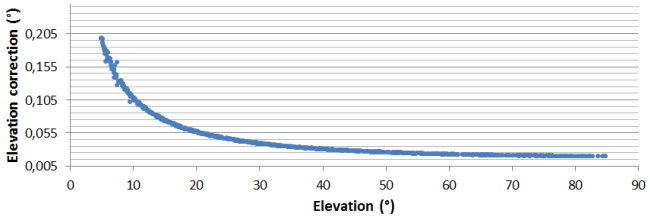


Figure 6. Effect of the neutral atmosphere on the elevation angle. An exponential correction must be made for satellites with low elevation angles.

3.4 Ellipsoid reflection approximation combined with a DEM

The first two approaches presented above are well adapted in the case of an isolated receiver located on the top of a lighthouse, for instance. In most of the cases, the receiver is located on a cliff, a sand dune, or a building overhanging the sea surface or a lake. It can however be really appropriate and necessary to incorporate a digital elevation model (DEM) into the simulations, in order not only to take the mask effects (e.g., a mountain occulting a GNSS satellite) into account, but also to get more accurate and realistic positions of specular reflection points. The method we propose here consists of three steps detailed later in Sects. 3.4.1, 3.4.2 and 3.4.3.

1. A "visibility" determination approach to determine if the receiver is in sight of each GNSS satellite.
2. A determination of the specular reflection point position.

Table 1. Cross-validation between ellipsoid approximation and DEM integration.

		Receiver height (m)		
		5	50	300
Distance to the specular reflection point	Mean	12	122	729
with respect to the receiver: arc length (m)	Maximum	56	557	3349
Position differences (m)	Mean	0/0	0.002/0	0.01/0
(planimetric/altimetric)	Maximum	0/0	0.04/0	0.2/0

3. A "visibility" determination approach to determine if the determined specular point is in sight from both receiver and satellite.

It is important to keep in mind that a DEM gives altitudes above a reference geoid. For consistency purposes, the positions of the receiver, the transmitter, and the DEM grid points all have to be in the same reference system, so it is absolutely mandatory to convert the EGM96 altitudes from the SRTM DEM into WGS84 ellipsoidal heights by adding the geoid undulation interpolated from EGM96.

3.4.1 Visibility of the GNSS satellite from the receiver

This algorithm aims to determine the presence of a mask between the receiver and the satellite. The visibility of the satellite and the receiver, both from the specular point, will be checked once the potential specular point position has been found.

Let R, S, and T be the locations of the receiver, the specular point and the satellite/transmitter on the ellipsoid. We interpolate the ellipsoidal heights along the path $[TSR]$ with a step equal to the DEM resolution, with a bivariate cubic or bilinear interpolation. Cubic interpolation is used when the gradient is big, linear interpolation otherwise. Tests show millimetric differences between cubic and linear interpolation for flat zones but can reach 1 m for mountainous areas. We thus obtain a topographic profile from R to T. For each segment of this topographic profile, we check if it intersects the path $[TR]$. If it does, it means that the satellite is not visible from the receiver. If not, we check the next topographic segment, until reaching the end of the path (i.e., T).

3.4.2 Position of the specular point

Once the satellite visibility from the receiver is confirmed, the next step consists in determining the location of the specular reflection point S along the broken line defined as in Sect. 3.4.1. In order to simplify the process, we only consider the specular points located in the plane formed by the satellite, the receiver and the center of the Earth. The algorithm is similar to the one used for the ellipsoid approximation, and is based on a dichotomous iterative process.

The segments formed by the points of the 2-D DEM (see Fig. 5) are all considered susceptible to contain a specular reflection point. For each of this segment the sign of the correction to apply at each of the two extremities of the segment is checked following the same principle that for the ellipsoid approximation (see Sect. 3.3), but with a local vertical component defined as the normal of the considered segment. If the signs are equal, no reflection is possible on this segment. Otherwise, we apply the dichotomous iterative method presented in Sect. 3.3 until convergence with respect to the tolerance parameter (fixed to 10^{-7}°).

3.4.3 Visibility of the determined specular reflection point from the satellite and the receiver

Once the position of the specular reflection point has been determined, we check if it is visible from the satellite and the receiver thanks to the algorithm presented in Sect. 3.4.1.

3.5 Corrections of the angular refraction due to the troposphere

Our goal is to determine the location of the reflection point. Only the angular refraction will be considered. The reflected minus direct range is left as future work. In order to correct the anisotropy of the propagation of radio waves used by the GNSS satellites, we use AMF calculated from the 3-hourly delayed cut-off in model levels computed by the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). AMF tropospheric corrections were computed following Gegout et al. (2011) and provided by GRGS for this study. Given the geometric specificities of the specular reflection point, two paths have to be checked for propagation error: the first one from the satellite to the surface, and the second one from the surface to the receiver. The main steps of the process are the following:

- we consider the position of the specular reflection point without any correction of the angular refraction;
- we calculate the corrections to apply to this specular point knowing the incident and reflecting angles corresponding to the considered reflection point. We thus obtain a corrected incident angle. Figure 6 shows the correction to apply as a function of the elevation angle;

– from the corrected incident angle, a corrected position of the specular point is calculated, making the reflecting angle equal to the corrected incident angle;

– with the new position of the specular point, and to reach a better accuracy of the point position, a second iteration is performed by computing the corrections to apply to this new incident angle.

3.5.1 Correction of the satellite-surface path

First and foremost, the parallax problem for the wave emitted by a known GNSS satellite is solved. At first sight, the position of the specular reflection point calculated without any correction of the angular refraction is considered, given by the algorithm approximating the Earth's shape as a sphere given in Sect. 3.2. We use here AMF calculated from the projection of the receiver on the surface, considering that the AMF planimetric variations are negligible for ground-based observations (i.e., we consider that we can use the same AMF for every specular reflection points, which is valid only if the specular reflection points are less than few tens of km from the receiver and that the specular points lie on an equal-height surface). We thus obtain the corrected incident angle of the incident wave. Considering the law of Snell and Descartes, the reflecting angle must be equal to the corrected incident angle, for the specular reflection point position.

3.5.2 Correction of the surface-receiver path

The aim here is to adjust the surface-receiver path to accommodate the consequences of angular refraction. With the corrected reflection angle, we can deduce the corrected geometric distance between the reflection point and the receiver, this time using AMF calculated from the receiver, assuming that the AMF altimetric variations are non-negligible (i.e., the part of the troposphere corresponding to the receiver height will have a non-negligible impact on the AMF). Considering the corrected geometric distance between the reflection point and the receiver, the corrected position of the reflection point is obviously determined. It is indeed obtained as the intersection of a circle whose radius is equal to the correct geometric distance, with the surface of the Earth assimilated as a sphere, an ellipsoid, or with a DEM, depending on which approximation of the Earth is taken into account.

The whole process is iterated a second time to reach a better accuracy of the reflection point location. In fact, the first corrections were not perfectly exact, since they were computed from an initially false reflection point location, and the second iteration brings the point closer to the true location. More iterations are useless (corrections to apply are not significant). Figure 6 shows an example of elevation corrections to apply as functions of the satellite elevations. This figure has been computed from simulations done on a receiver placed on the Lake Geneva shore (46°24′30″ N, 6°43′6″ E; 471 m); see Sect. 4.1.

3.6 Footprint size of the reflected signal

The power of the received signal is mostly due to coherent reflection, and most of the scattering comes from the first Fresnel zone (Beckmann and Spizzichino, 1987). The first Fresnel zone can be described as an ellipse of a semi-minor axis (r_a) and a semi-major axis (r_b) equal to (Larson and Nievinski, 2013)

$$r_b = \sqrt{\frac{\lambda h}{\sin(\epsilon')} + \left(\frac{\lambda}{2\sin(\epsilon')}\right)^2} \tag{22}$$

$$r_a = \frac{b}{\sin(\epsilon')}, \tag{23}$$

with λ the wavelength (m), h the receiver height (m) and ϵ' the satellite elevation seen from the specular reflection point (rad) (i.e., corresponding to the reflection angle).

4 Simulator performance and results

4.1 Simulation case studies

Simulations and tests of parameters have been performed on two main sites:

– the Cordouan lighthouse (45°35′11″ N; 1°10′24″ W), in the Gironde estuary, France. This lighthouse is about 60 m high, and it is surrounded by the sea.

– the shore of Lake Geneva (46°24′30″ N; 6°43′6″ E). This site is hidden by mountains in the south (orthometric altitude of up to 2000 m), and overlooks the lake in the north (orthometric altitude of 370 m).

For both sites, precise GPS and GLONASS ephemeris at a 15 min time sampling come from IGS standard products (known as "SP3 orbit").

4.2 Validation of the surface models

Simulations were performed in the case of the Lake Geneva shore, for a 24 h experiment, on 4 October 2012.

4.2.1 Cross-validation between sphere and ellipsoid approximations

Local sphere and ellipsoid approximation algorithms have been compared by putting the ellipsoid semi- major and minor axis equal to the sphere radius. Planimetric and altimetric differences between both are below 6×10^{-5} m for a receiver height above reflecting surface between 5 and 300 m and are then negligible. The two algorithms we compare are completely different: the first is analytical and the second is based on a iterative scheme and both results are very similar, which confirms their validity.

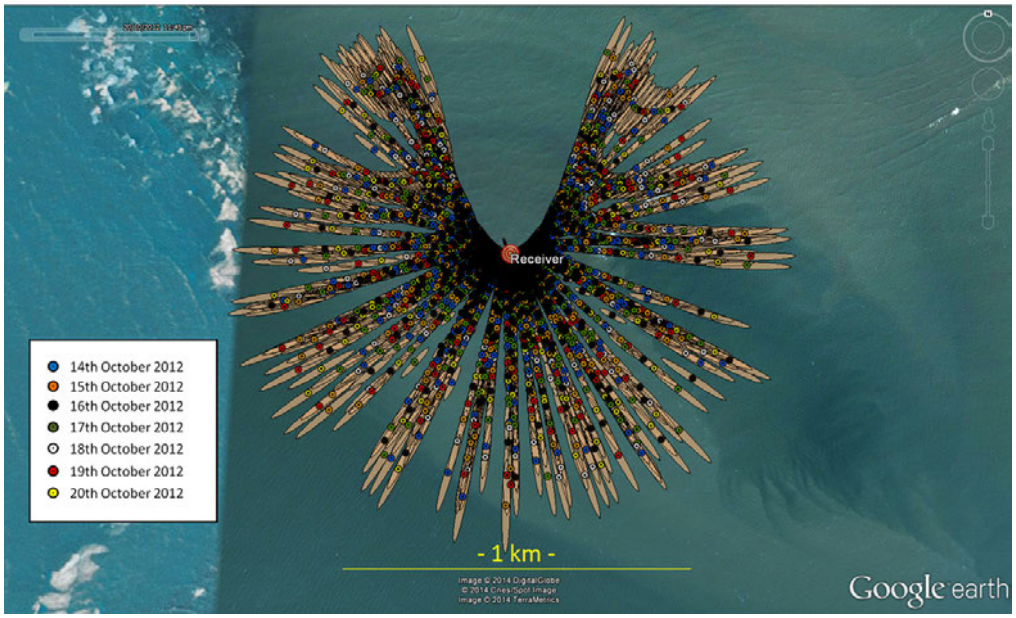


Figure 7. Positions of the specular reflection points and first Fresnel zones for one week of simulation on the Cordouan lighthouse with a 15 min sampling rate (i.e., satellite positions actualized every 15 min). Only GPS satellites with elevation angles greater than 5° have been considered. Note the gap in the northerly direction.

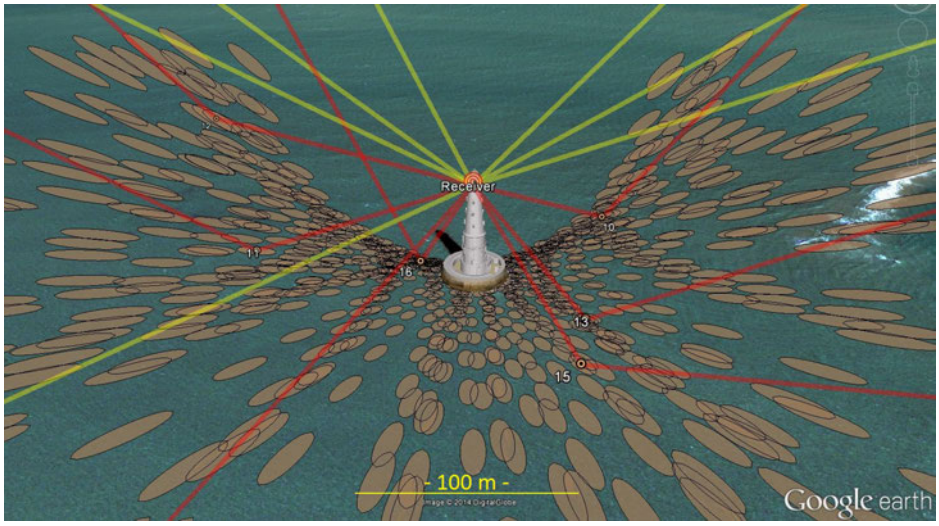


Figure 8. First Fresnel zones and some direct and reflected waves displaying the 24 h Cordouan lighthouse simulation with the GPS constellation.

4.2.2 Cross-validation between ellipsoid approximation and DEM integration

The algorithm integrating a DEM has been compared to the ellipsoid approximation algorithm by using a flat DEM as input (i.e., a DEM with orthometric altitude equal to the geoid undulation). Results for satellite elevation angles above 5° are presented in Table 1.

As we can see in Table 1, planimetric and altimetric mean differences are subcentimetric for a 5 and 50 m receiver height and centimetric for a 300 m receiver height. However, some punctual planimetric differences reach 20 cm in the worst conditions (reflection occurring at 3449 m from the receiver corresponding to a satellite with a low elevation angle), which can be explained with the chosen tolerance parameters but mainly because due to the DEM resolution, the algorithm taking a DEM into account approximating the ellipsoid as a broken straight line, causing inaccuracies. For a

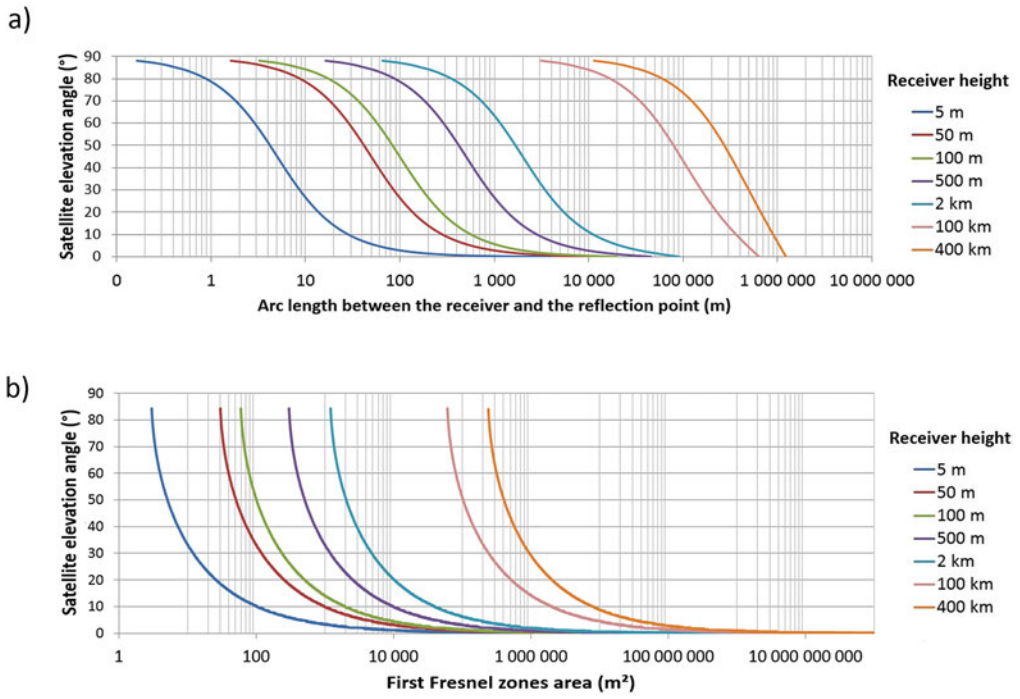


Figure 9. Variation of the distance between the receiver and the specular reflection point **(a)** and the first Fresnel zone area **(b)** as a function of the satellite elevation angle, for different receiver heights.

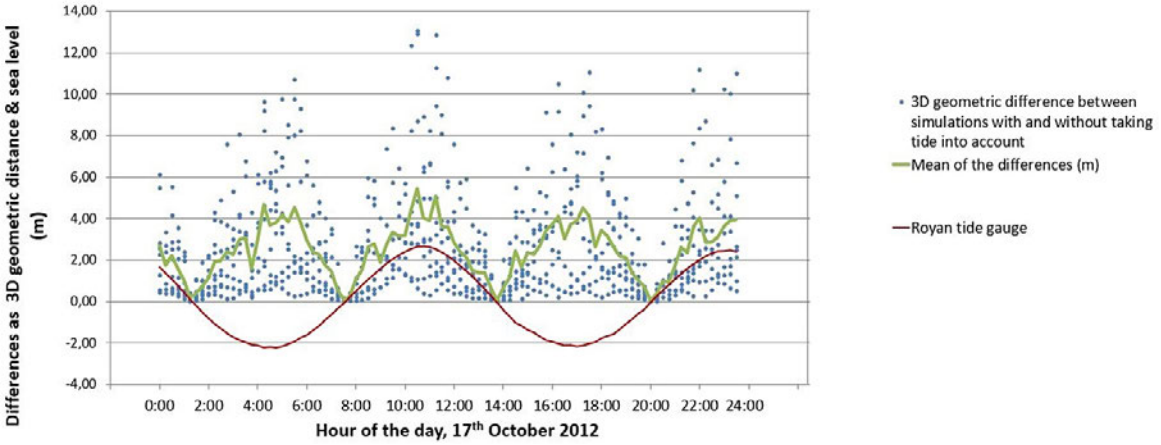


Figure 10. Assessment of the tidal influence. The impact of the tide on the size of the reflecting area is non-negligible (decametric 3-D differences), and it is worth noticing that the gaps would have been even bigger by integrating satellites with low elevation angles. Note also that the periodic variations of the 3-D differences are only linked to the tide, since the mean of the satellite elevation angles does not show periodic variations during the day of the simulation ($43.3 \pm 3.5°$ over the period).

50 m receiver height, planimetric differences are below 4 cm (reflections occurring until 557 m from the receiver). With regards to the altimetric differences, even for reflections occurring far from the receiver, the differences are negligible (submillimetric).

4.3 Results

4.3.1 Cordouan lighthouse

Outputs

Examples of outputs for simulations in the case of the Cordouan lighthouse are presented in Figs. 7 and 8. These

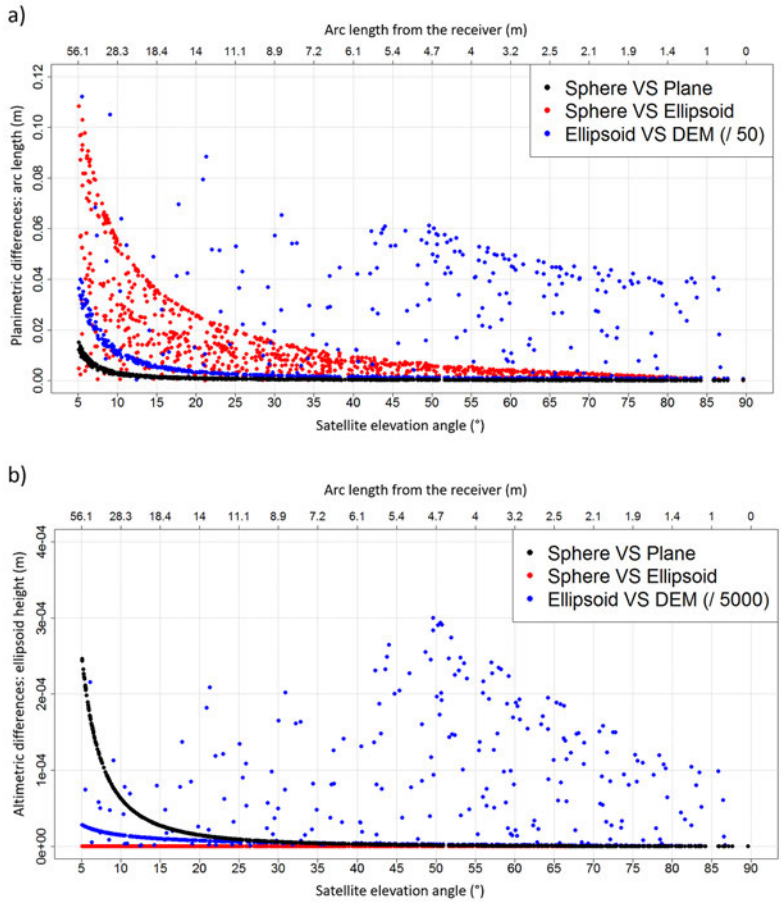


Figure 11. Planimetric and altimetric differences between the specular reflection points obtained with the different algorithms. Receiver height above the reflecting surface: 5 m. **(a)** Planimetric differences as arc length (m). **(b)** Altimetric differences as ellipsoid height (m). Note the dispersion within results for a fixed elevation angle, which is a consequence of the azimuth variability in the ellipsoidal radius of curvature.

simulations were performed considering the sphere approximation algorithm and a 15 min time step.

Figure 9a shows the variation of the distance between reflected points and the receiver, as a function of the satellite elevation angle, and for several receiver heights above the reflecting surface, and Fig. 9b shows the variation of the area of the first Fresnel surface. Such figures have been produced by performing simulations on the Cordouan lighthouse and varying the receiver height above the reflecting surface. The map of the reflected points obtained for a high receiver height above the reflecting surface will in fact be the same as the one obtained for a smaller receiver height, but more stretched. Henceforth, the higher the receiver height, the bigger the "measurable" area, but the less dense the ground coverage of the data (less reflection points per surface unit).

Case study: the influence of tides

As an illustration of a possible application of the simulator, tide influence on the position of the specular reflection points was assessed. Simulations at the Cordouan lighthouse were achieved by integrating the ocean tide from the tide gauge in Royan, and by time-varying the receiver height above the sea surface in order to simulate the tide. The vertical visibility mask was set to 10–90°, in order to avoid the weaker accuracy of determination of the specular reflection point positions for satellites with low elevation angles, as highlighted in Sect. 4.3.2. By comparing the results with simulations made with a fixed-receiver height of 60 m above the sea surface, it appears that the 3-D offsets reach values higher than 12 m for the maximum tide values (< 3 m) (Fig. 10). We can expect even higher discrepancies by taking into account satellites whose elevation angles would be lower than 10°.

4.3.2 Lake Geneva

Three sets of simulation have been performed in the case of the Lake Geneva shore, for a 24 h experiment, on 4 October 2012:

Table 2. Maximum differences between the positions of the specular reflection points obtained with the different algorithms and for different receiver heights above the reflecting surface. For each cell of this table, the first number is the result obtained with the minimum satellite elevation angle set to 5°, and the second number is the result obtained with the minimum satellite elevation angle set to 10°.

Receiver height (m)	Differences (m)	Sphere vs. Plane	sphere vs. ellipsoid	Ellipsoid vs. DEM
5	Arc length	0.015 / 0.003	0.108 / 0.054	14.594 / 4.417
	Ellipsoid height	0 / 0	0 / 0	1.500 / 1.500
	3-D geometric distance	0.011 / 0.002	0.084 / 0.044	10.261 / 3.383
50	Arc length	1.163 / 0.142	1.081 / 0.536	1226.606 / 42.982
	Ellipsoid height	0.025 / 0.006	0 / 0	84.363 / 15.002
	3-D geometric distance	0.823 / 0.107	0.837 / 0.440	1235.834 / 43.755
300	Arc length	41.127 / 5.043	6.438 / 3.215	5429.975 / 5429.975
	Ellipsoid height	0.885 / 0.222	0.001 / 0	897.785 / 897.785
	3-D geometric distance	29.092 / 3.769	4.994 / 2.634	5461.230 / 5461.230

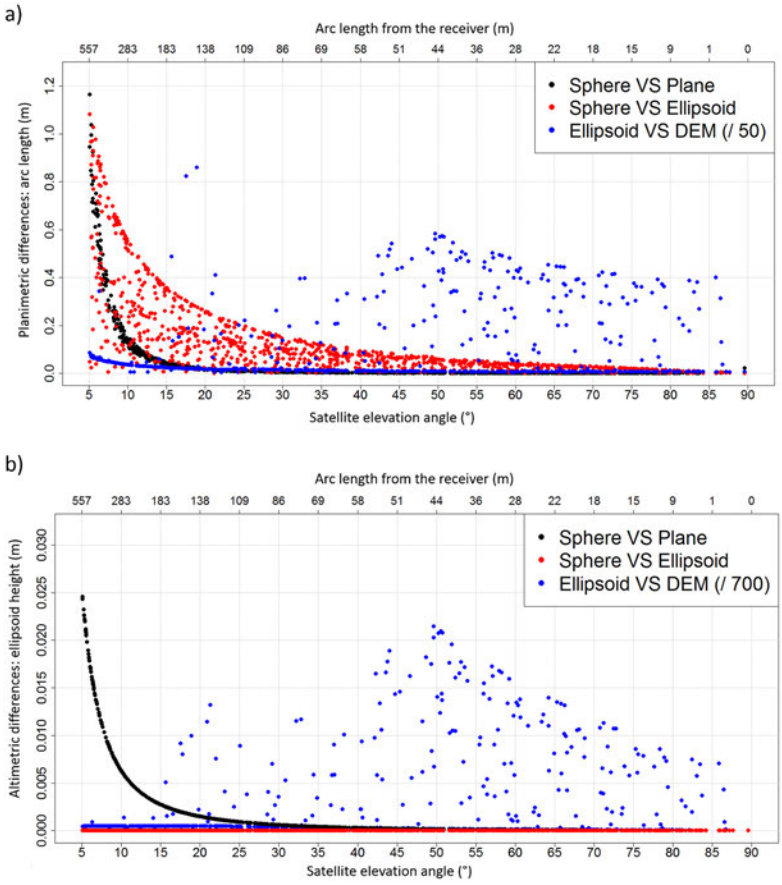


Figure 12. Planimetric and altimetric differences between the specular reflection points obtained with the different algorithms. Receiver height above the reflecting surface: 50 m. **(a)** Planimetric differences as arc length (m). **(b)** Altimetric differences as ellipsoid height (m). Note the dispersion within results for a fixed elevation angle, which is a consequence of the azimuth variability in the ellipsoidal radius of curvature.

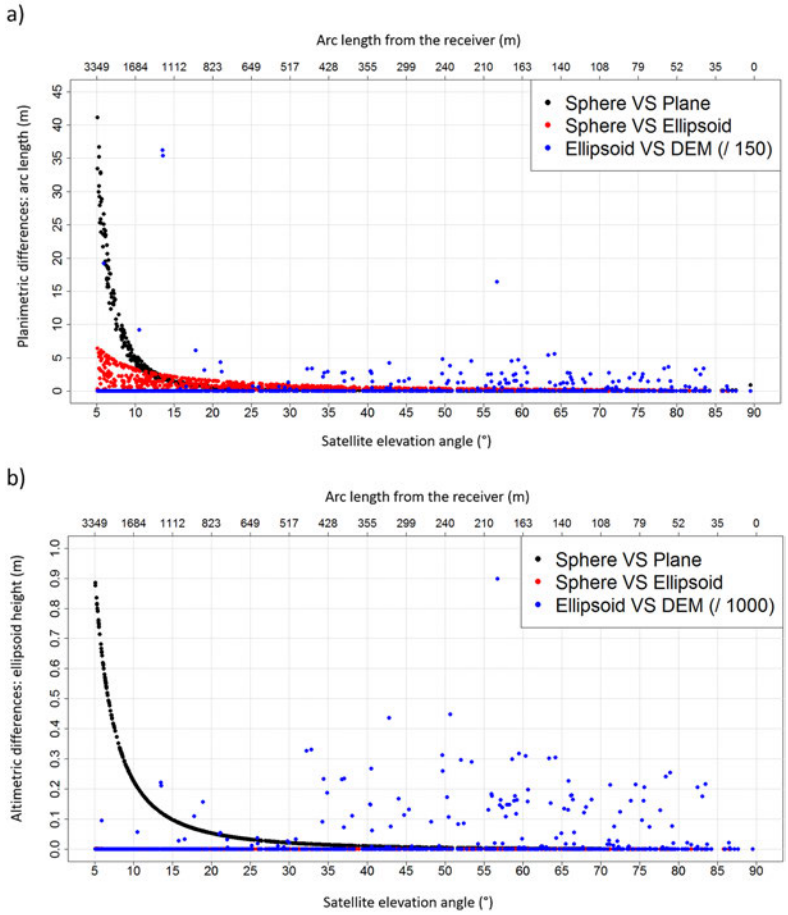


Figure 13. Planimetric and altimetric differences between the specular reflection points obtained with the different algorithms. Receiver height above the reflecting surface: 300 m. **(a)** Planimetric differences as arc length (m). **(b)** Altimetric differences as ellipsoid height (m). Note the dispersion within results for a fixed elevation angle, which is a consequence of the azimuth variability in the ellipsoidal radius of curvature.

– the first configuration, considering a receiver height of 5 m above lake level,

– the second configuration, considering a receiver height of 50 m above lake level,

– the third configuration, considering a receiver height of 300 m above lake level, as for an airborne experiment (e.g., a hovering helicopter).

Each series has been computed using the four algorithms of determination of the reflection points (local planimetric approximation, local osculating sphere approximation, ellipsoid approximation and the algorithm taking a DEM into account). Results are presented in Figs. 11 to 14 and in Table 2. They show the distances between the specular points and the receiver (arc lengths), and the differences between the positions given by each algorithm.

Influence of the receiver height above the reflecting surface

It appears that both planimetric and altimetric differences between the methods used increase with the receiver height above the reflecting surface. This is explainable by the fact that the higher the receiver is, the farther the reflection points will be from the receiver, and the bigger the impact of the Earth approximation will be. For a 5 m receiver height, reflection occurs up to approximately 60 m from the receiver, whereas for a 300 m receiver height, it occurs at up to 3400 m (6700 m when integrating the DEM). It means that, in the second case, reflections occur in the mountains to the south of the receiver; hence big differences between the sphere algorithm and the algorithm, taking the DEM into account. For a 5 m receiver height above the reflecting surface, and considering satellites with elevation angles above 5°, mean planimetric differences are below 1.3 cm between the osculating sphere and ellipsoid approximations, and below 1.3 mm between the sphere and plane approximations. With regards to

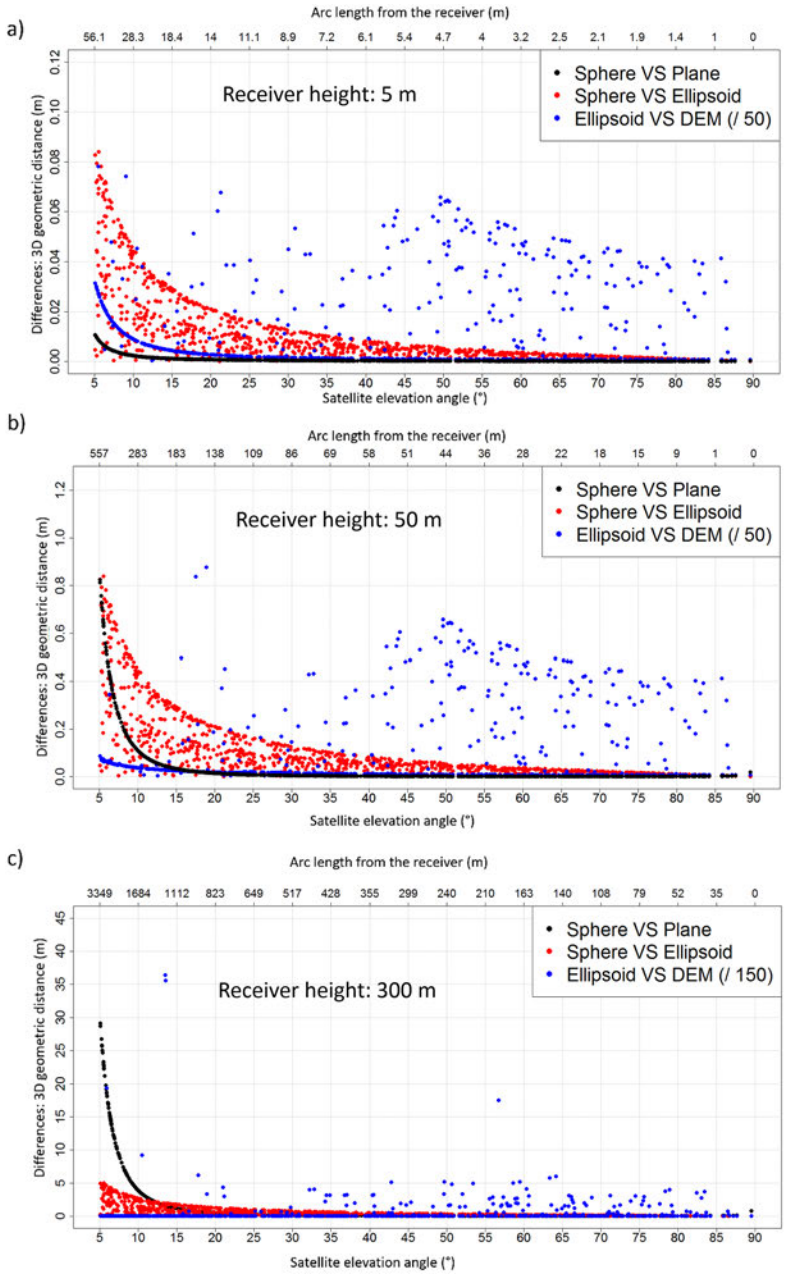


Figure 14. 3-D differences between the specular reflection points obtained with the different algorithms. Receiver heights above the reflecting surface of 5 m **(a)**, 50 m **(b)** and 300 m **(c)**. Note the dispersion within results for a fixed elevation angle, which is a consequence of the azimuth variability in the ellipsoidal radius of curvature.

the comparison between the plane and ellipsoid approximations, the mean planimetric differences are about 1.4 cm. Altimetric differences are negligible for all of them.

With a 50 m receiver height above the reflecting surface, mean planimetric (or altimetric) differences reach 14 cm (or less than 1 mm) between the sphere and ellipsoid approximations, 6.2 cm (or 2 mm) between the sphere and plane approximations, and 15 cm (or 2 mm) between the plane and ellipsoid approximations.

With a 300 m receiver height above the reflecting surface, mean planimetric (or altimetric) differences reach 83 cm (or less than 1 mm) between the sphere and ellipsoid approximations, 2.19 m (or 8 cm) between the sphere and plane approximations, and 2.35 m (or 8 cm) between the plane and ellipsoid approximations.

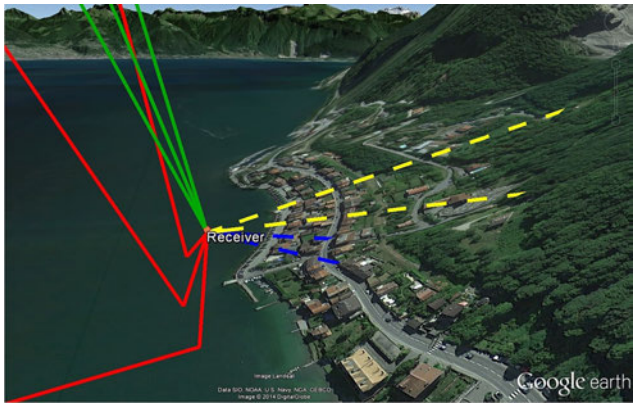


Figure 15. Influence of the topography – direct and reflected waves are displayed (topography amplified by a factor of 3). Yellow lines: direct waves, sphere approximation algorithm; green lines: direct waves, taking a DEM into account; blue lines: reflected waves, sphere approximation algorithm; red lines: reflected waves, taking a DEM into account. It can be noticed that some yellow and blue lines (direct and reflected waves, sphere approximation algorithm) go through the mountain (reflection points having been calculated *inside* the mountain), whereas any red or green lines (direct and reflected waves, integrating a DEM) go through it.

It is worth noticing that the sphere approximation is closer to the plane than the ellipsoid approximation when reflections occur not too far from the receiver (below 560 m), and conversely if reflection occurs far from the receiver.

Influence of the satellite elevation angle

Secondly, by plotting the differences as functions of the satellite elevation angles, we can observe that the lapses between the different algorithms vary in an inversely proportional way to the satellite elevation angle (and so, proportionally to the point distance from the receiver). The lower the satellite elevation angle is, the farther the specular reflection points from the receiver, and the larger the impact of the Earth approximation is. The choice of the algorithm used to perform the simulations thus becomes really important for the farthest reflection points (i.e., for low satellite elevation angles, and high receiver heights above the reflecting surface). For example, mean planimetric differences between the local sphere and ellipsoid approximations with a 50 m receiver height are about 14 cm when considering satellites with elevation angles above 5°, and are about 9 cm when considering only satellites with elevation angles above 10°. With a 300 m receiver height above the reflecting surface, the mean planimetric difference between sphere and ellipsoid approximations is about 83 cm for satellites with an elevation angle above 5°, and 54 cm for a minimum elevation angle set to 10°.

Influence of the DEM integration

For continental surfaces, the full integration of the DEM in the simulation plays a crucial role in a good calculation of the reflection points. The integration of a DEM leads to the suppression of 245 specular reflection points out of the 905 points determined during the 24 h of 4 October 2012 with the sphere approximation algorithm (Fig. 15). These 245 points came from a wave emitted by a satellite hidden by a mountain located in the southern part of the area. In the northern part, any reflection point is valid when taking a DEM into account, because in that direction, the topography is flat over Lake Geneva, and so, the satellites are all visible and reflections are possible. Moreover, the point positions have been rectified while taking a DEM into account, since the other algorithms consider that reflections occur (in first approximation) in a plane around the projection of the receiver, and without integrating the problem of the presence of topography.

Comparison between the different models of the Earth surface

For a 5 m receiver height, and for satellite elevations greater than 10°, the mean planimetric difference between the ellipsoid and the sphere algorithm is equal to 1.4 cm whereas for a 300 m receiver height it is equal to 83 cm. The approximation done by considering the Earth as a sphere, an ellipsoid or a plane does not really affect the precision of the specular reflection point determination when reflections do not occur too far from the receiver, i.e., for low receiver height and high satellite elevation. For example, if we consider that we need an uncertainty on the determination of the specular reflection position below 20 cm, the choice of the approximation of the Earth shape will have no influence if reflections occur until 125 m approximately (Fig. 14b). In order to get reflections below 125 m from the receiver, considering satellites with elevation angle above 5°, the receiver height above the reflecting surface should not exceed 25–30 m (Fig. 9a), which would correspond to a first Fresnel zone area between 300 and 400 m^2.

Concerning the algorithm taking the DEM into account, the differences obtained with respect to the sphere or ellipsoid algorithms are quite big even if the specular reflection point is close enough to the receiver. For instance, the mean planimetric (or altimetric) difference between the ellipsoid algorithm and the one integrating the DEM is equal to 70 cm (or 18 cm) for a 5 m receiver height, and is equal to 78 m (or 25 m) for a 300 m receiver height, and with a satellite elevation angle above 5°. It is worth noticing that these differences will greatly depend on the flatness of the considered area.

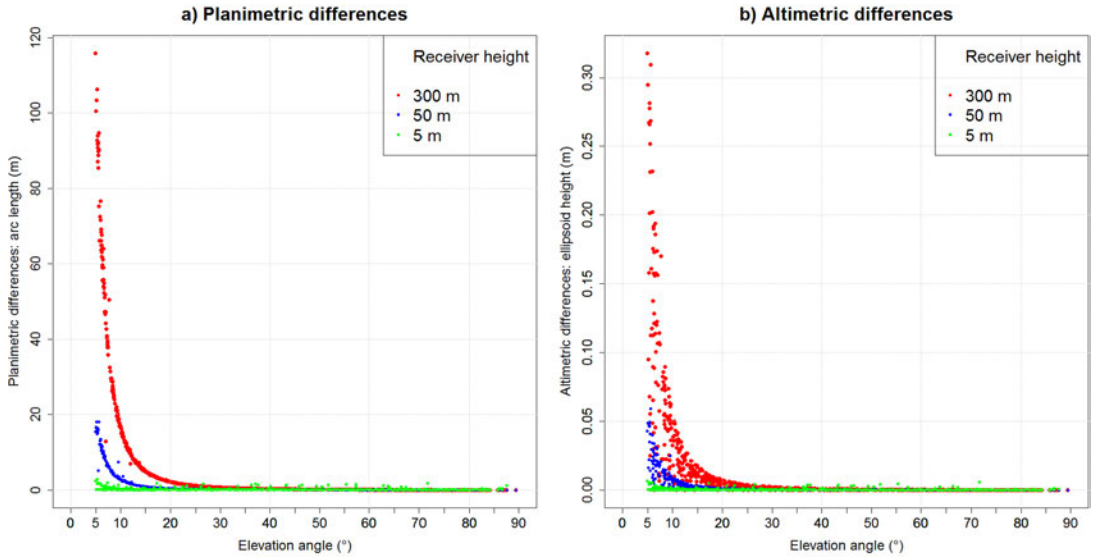


Figure 16. Angular refraction correction as a function of the satellite elevation angle and for different receiver heights above the reflecting surface. **(a)** Planimetric differences as arc length (m). **(b)** Altimetric differences as ellipsoid height (m).

Angular refraction due to the troposphere

Given the geometric configuration of the satellite, the reflection point and the receiver, the same elevation angle correction will have a different effect according to the receiver height above the reflecting surface. It turns out that considering a same satellite at a given time, the corresponding reflection point will be farther for a big receiver height above the reflecting surface than for a smaller one. Consequently, for the same elevation angle correction, the resulting correction of the reflection point position will be higher in the first case than in the second one. Figure 16 shows the differences, in terms of geometric distances, between the reflection points positions obtained with and without correcting the angular refraction and for different receiver heights. It appears that for low satellite elevation angle and high receiver height, the angular refraction has a non-negligible influence on the specular point positions (116 m (or 32 cm) for a 300 m receiver height and satellites elevation angle lower than 10°).

5 Conclusions

In this paper, we presented a simulator based on real GNSS satellite ephemeris, as a user-friendly tool for modeling the trajectories of GNSS electromagnetic waves that are reflected on the surface of the Earth and therefore preparing GNSS-R campaigns more efficiently. The originality of this simulator remains mainly in the integration of a DEM and the correction of the angular refraction due to the troposphere. The results of simulations led us to a better understanding of the influence of some parameters on the reflection geometry, namely by quantifying the impact of the receiver height, but also the influence of the satellite elevations, the natural topography (DEM), and the troposphere perturbation.

The different simulations realized near quite rugged topography lead us to the following conclusions:

– the DEM integration is really important for mountainous areas: planimetric differences as arc length (or altimetric differences as ellipsoid height) can reach 5.4 km (or 1.0 km) for a 300 m receiver height, considering satellite with elevation angle greater than 5°.

– differences between sphere and ellipsoid approximations are negligible for specular reflection points close to the receiver (closer than 50–60 m), i.e., small receiver heights and/or high satellite elevations. For instance, planimetric differences are smaller than 11 cm for a 5 m receiver height, considering satellites with elevation angles greater than 10°. Altimetric differences are negligible.

– sphere and plane approximations show really small differences in the vicinity of the receiver (smaller differences than between the sphere and ellipsoid approximations): maximum differences are about 1.5 cm (or 3 mm), with a 5 m receiver height (i.e., reflections occurring until 56 m from the receiver).

– with regards to the plane and ellipsoid approximations, differences are bigger than between the plane and sphere approximations when reflections occur farther than 550 m from the receiver. For farther reflections, differences between planes and ellipsoids become smaller than between planes and spheres.

– the angular refraction due to troposphere can be negligible with regards to the position of the specular reflection point when the receiver height is below 5 m, but is absolutely mandatory otherwise, particularly for satellites with low elevation angles where the correction to apply is exponential.

As a final remark, it is worth reminding the reader that the farther the specular reflection point is from the receiver, the more important the influence of the different error sources will be: Earth approximation, DEM integration, angular refraction. The farthest specular reflection points will be obtained for high receiver height and low satellite elevation. This simulator is likely to be of great help for the preparation of in situ experiments involving the GNSS-R technique. Further developments of the simulator will be implemented soon, such as a receiver installed on a moving platform in order to map the area covered by airborne GNSS-R measurement campaigns and on-board a LEO satellite.

Acknowledgements. This work was funded by CNES in the framework of the TOSCA project "Hydrologie, Océanographie par Réflectométrie GNSS (HORG)" and by the RTRA STAE foundation in the framework of the "Potentialités de la Réflectométrie GNSS In Situ et Mobile (PRISM)" project. Nicolas Roussel is supported by a PhD granted from the French Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR).

Edited by: R. Marsh

References

Beckmann, P. and Spizzichino, A.: Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Artech House Publishers, ISBN 0-89006-238-2, 1987.

Billich, A. L.: Improving the Precision and Accuracy of Geodetic GPS: Applications to Multipath and Seismology, PhD. B.S., University of Texas at Austin, M.S., University of Colorado, 2004.

Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., and Schuh, H.: Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, Geophys. Res. Lett., 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546, 2006a.

Boehm, J., Werl, B., and Schuh, H.: Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, J. Geophys. Res. Sol.-Earth, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629, 2006.

Cardellach, E., Fabra, F., Rius, A., Pettinato, S., and Daddio, S.: Characterization of Dry-snow Sub-structure using GNSS Reflected Signals, Remote Sens. Environ., 124, 122–134, 2012.

Chen, G. and Herring, T.: Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, J. Geophys. Res. Sol.-Earth, 102, 20489–20502, doi:10.1029/97JB01739, 1997.

Géegout, P., Biancale, R., and Soudarin, L.: Adaptive Mapping Functions to the azimuthal anisotropy of the neutral atmosphere, J. Geodesy., 85, 661–667, 2011.

Gleason, S.: Remote Sensing of Ocean, Ice and Land Surfaces Using Bistatically Scattered GNSS Signals From Low Earth Orbit, Thesis (Ph.D.), University of Surrey, 2006.

Gleason, S., Lowe, S., and Zavorotny, V.: Remote sensing using bistatic GNSS reflections, GNSS Applications and methods, 399–436, 2009.

Helm, A.: Ground based GPS altimetry with the L1 openGPS receiver using carrier phase-delay observations of reflected GPS signals, Thesis (Ph.D.), Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), 164 pp., 2008.

Hobiger, T., Ichikawa, R., Takasu, T., Koyama, Y., and Kondo, T.: Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning, Earth Planet. Space, 60, e1–e4, 2008.

Jarvis, J., Reuter, H., Nelson, A., and Guevara, E.: Hole-filled SRTM for the globe, CGIAR-CSI SRTM 90 m DAtabase, Version 4, CGIAR Consort for Spatial Inf., 2008.

Katzberg, S., Torres, O., Grant, M. S., and Masters, D.: Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: results from SMEX02, Remote Sens. Environ., 100, 17–28, 2006.

Komjathy, A., Zavorotny, V., Axelrad, P., Born, G., and Garrison, J.: GPS signal scattering from sea surface, Wind speed retrieval using experimental data and theoretical model, Remote Sens. Environ., 73, 162–174, 2000.

Kostelecky, J., Klokocnik, J., and Wagner, C. A.: Geometry and accuracy of reflecting points in bistatic satellite altimetry, J. Geodesy, 79, 421–430, doi:10.1007/s00190-005-0485-7, 2005.

Lagler, K., Schindelegger, M., Boehm, J., Krsn, H., and Nilsson, T.: GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques, Geophys. Res. Lett., 40, 1069–1073, doi:10.1002/grl.50288, 2013.

Larson, K. M. and Nievinski, F. G.: GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory, GPS Solut., 17, 41–52, doi:10.1007/s10291-012-0259-7, 2013.

Löfgren, J. S., Rüdiger, H., and Scherneck, H. G.: Sea-Level analysis using 100 days of reflected GNSS signals, Proceedings of the 3rd International Colloquium – Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, 31 August–2 September 2011, Copenhagen, Denmark, (WPP 326) 5 pp., 2011.

Lowe, S. T., Zuffada, C., Chao, Y., Kroger, P., Young, L. E., and LaBrecque, J. L.: 5-cm-Precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections, Geophys. Res. Lett., 29, 1375, doi:10.1029/2002GL014759, 2002.

Marini, J. W.: Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile, Radio Sci., 7, 223–231. doi:10.1029/RS007i002p00223, 1972.

Martin-Neira, M.: A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry, ESA J-Eur. Space Agen., 17, 331–355, 1993.

Nafisi, V., Urquhart, L., Santos, M. C., Nievinski, F. G., Bohm, J., Wijaya, D. D., Schuh, H., Ardalan, A. A., Hobiger, T., Ichikawa, R., Zus, F., Wickert, J., and Gegout, P.: Comparison of Ray-Tracing Packages for Troposphere Delays, Geosci. Remote Sens., 50, 469–481, doi:10.1109/TGRS.2011.2160952, 2012.

NASA and NIMA: The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, NASA/TP-1998-206861, 1998.

Niell, A.: Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models, Proceedings of the First

COST Action 716 Workshop Towards Operational GPS Meteorology and the Second Network Workshop of the International GPS Service (IGS), 26, 475–480, 2001.

Nievinski, F. G. and Santos, M. C.: Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS, Geomatica, 64, 191–207, 2010.

NIMA: National Imagery and Mapping Agency: Departement of Defense Wolrd Geodetic System 1984. NIMA Stock No. DMATR83502WGS84, NSN 7643-01-402-0347, 1997.

Nocedal, J. and Wright, S. J.: Numerical Optimization, Springer, ISBN 978-0-387-30303-1, USA (TB/HAM), 2006.

Rius, A., Aparicio, J. M., Cardellach, E., Martin-Neira, M., and Chapron, B.: Sea surface state measured using GPS reflected signals, Geophys. Res. Lett., 29, 37-1–37-4, doi:10.1029/2002GL015524, 2002.

Rius, A., Noque's-Correig, O., Ribo, S., Cardellach, E., Oliveras, S., Valencia, E., Park, H., Tarongi, J. M., Camps, A., Van Der Marel, H., Van Bree, R., Altena, B., and Martin-Neira, M.: Altimetry with GNSS-R interferometry: first proof of concept Experiment, GPS Solutions, 16, 231–241, doi:10.1007/s10291-011-0225-9, 2012.

Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E., Chapin, E. C., Martin, J. M., Daffer, W., and Hensley, S.: An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report D-31639, JPL/NASA,2005.

Rodriguez-Alvarez, N., Bosch-Lluis, X., Camps, A., Vall-Llossera, M., Valencia, E., Marchan-Hernandez, J. F., and Ramos-Perez, I.: Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques: Experimental results over a bare soil field, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 47, 3616–3624, 2009.

Rodriguez-Alvarez, N., Camps, A., Vall-Llossera, M., Bosch-Lluis, X., Monerris, A., Ramos-Perez, I. Valencia, E., Marchan-Hernandez, J. F., Martinez-Fernandez, J., Baroncini-Turricchia, G., Pérez-Gutiérrez, C., and Sanchez, N.: Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 49, 71–84, 2011.

Ruffini, G., Soulat, F., Caparrini, M., Germain, O., and Martin-Neira, M.: The Eddy Experiment: Accurate GNSS-R ocean altimetry from low altitude aircraft, Geophys. Res. Lett., 31, L12306, doi:10.1029/2004GL019994, 2004.

Semmling, A. M., Beyerle, G., Stosius, R., Dick, G., Wickert, J., Fabra, F., Cardellach, E., Ribo, S., Rius, A., Helm, A., Yudanov, S. B., and d'Addio, S.: Detection of Arctic Ocean tides using interferometric GNSS-R signals, Geophys. Res. Lett., 38, L04103, doi:10.1029/2010GL046005, 2011.

Soulat, F., Caparrini, M., Germain, O., Lopez-Dekker, P., Taani, M., and Ruffini, G.: Sea state monitoring using coastal GNSS-R, Geophys. Res. Lett., 31, L21303, doi:10.1029/2004GL020680, 2004.

Treuhaft, P., Lowe, S., Zuffada, C., and Chao, Y.: 2-cm GPS altimetry over Crater Lake, Geophys. Res. Lett., 28, 4343–4436, 2004.

Wagner, C. and Klokocnik, C.: The value of ocean reflections of GPS signals to enhance satellite altimetry: data distribution and error analysis, J. Geodesy, 77, 128–138, doi:10.1007/s00190-002-0307-0, 2003.

Zavorotny, A. U. and Voronovich, A. G.: Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 38, 951–964, 2000.

Zus, F., Bender, M., Deng, Z., Dick, G., Heise, S., Shang-Guan, M., and Wickert, J.: A methodology to compute GPS slant total delays in a numerical weather model, Radio Sci., 47, RS2018, doi:10.1029/2011RS004853, 2012.

Chapitre 5

Application de la réflectométrie pour l'altimétrie et l'état de mer : utilisation d'une seule antenne

Sommaire

5.1 Introduction . . . 110
5.2 Etat de l'art . . . 112
5.3 Méthodologie . . . 113
5.3.1 Suppression de la contribution du signal direct . . . 113
5.3.2 Discrétisation de la série temporelle $SNR_m(t)$ . . . 115
5.3.3 Détermination de la fréquence f des oscillations du SNR dues au multi-trajet . . . 116
5.3.4 Détermination de la hauteur h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion . . . 117
5.3.5 Validation de la méthode . . . 118
5.4 L'expérience du phare de Cordouan . . . 119
5.4.1 Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales . . . 119
5.4.2 Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS . . . 121
5.4.3 Données utilisées pour la validation . . . 122
5.4.4 Choix des paramètres de calcul . . . 122
5.5 Résumé des principaux résultats . . . 122
5.5.1 Détermination des principales périodes de marées . . . 122
5.5.2 Influence de la constellation GNSS . . . 124
5.5.3 Détection des vagues . . . 125
5.5.3.1 Impact des vagues sur le SSH (*Sea Surface Height*) . . . 125
5.5.3.2 État de mer . . . 129
5.5.4 Comparaison entre les méthodes SNR *statique* et SNR *dynamique* . . . 130
5.6 Conclusions et perspectives . . . 131
5.7 *Article publié* : RSE 2015 - Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver . . . 132

5.1 Introduction

Les littoraux concentrent la majorité des activités économiques et urbaines de la planète. En 1997, 37 % de la population mondiale vivait à moins de 100 km d'une côte (Cohen *et al.*, 1997). Cette proportion est actuellement de 50 % et les projections démographiques prévoient que plus de 75 % de la population globale y vivra d'ici 2035 (Haslett, 2009). Bien qu'ils soient parmi les plus productifs du monde, les écosystèmes côtiers sont également très menacés (Duraiappah *et al.*, 2005). Un certain nombre de facteurs récents, depuis l'activité humaine jusqu'aux changements du climat mondial, causent des dommages structurels majeurs en menaçant la biodiversité végétale et animale qui soutiennent les régions côtières depuis des siècles. La surveillance et le suivi de l'évolution de ces milieux est donc plus que jamais une nécessité. De nombreux outils basées sur des techniques d'observation ont été développés dans ce sens. Les premières observations précises de la surface océanique commencèrent avec des mesures in situ grâce à des marégraphes puis des bouées GPS. Ces techniques d'acquisition, bien que performantes, présentent l'inconvénient majeur d'être ponctuelles ou limitées à la zone de dérive de la bouée. Durant les vingt dernières années, de nouveaux instruments de télédétection ont permis d'améliorer ces systèmes de mesures, avec notamment l'apparition de diffusiomètres, de radars à synthèse d'ouverture, ou d'altimètres radar embarqués. L'altimétrie satellitaire, aujourd'hui au centre de l'activité d'océanographie spatiale, est une technique spatiale permettant de mesurer la topographie dynamique des océans (Ablain *et al.*, 2009) et d'étudier les principaux courants océaniques (Le Traon et Morrow, 2001). Si cette technique est très performante en océan hauturier, son utilisation reste très limitée en domaine côtier. En effet les résolutions spatiales et temporelles sont inadaptées pour observer les variations complexes et rapides de la dynamique de l'océan dans ces milieux (Bouffard *et al.*, 2011). On retiendra par exemple l'inter-trace de 315 km au niveau de l'équateur et une répétivité de l'orbite d'un peu moins de 10 jours pour le satellite Jason-2 et de respectivement 85 km et 35 jours pour le satellite SARAL Altika [1]. Pour la même raison, l'altimétrie radar n'est pas capable de donner une information précise sur la houle et les vagues avec un échantillonnage spatio-temporel suffisant.

La réflectométrie GNSS apparaît donc comme une excellente alternative, ou un complément à l'altimétrie spatiale classique en domaine côtier, puisqu'elle présente une meilleure résolution à l'échelle locale, directement liée à la hauteur du réflectomètre au-dessus de la surface océanique (voir figure 4.6 page 82). Il est possible de faire des mesures GNSS-R de deux manières différentes : soit en utilisant deux antennes distinctes pour distinguer le signal direct du signal réfléchi, soit en utilisant une unique antenne géodésique classique (cf. chapitre 3 page 39). De nombreuses études relatives à la technique à double antennes ont déjà été menées et les variations spatiales et/ou temporelles du niveau de la mer ont été mesurées avec une précision atteignant quelques centimètres en utilisant des systèmes sols ou embarqués à bord d'avions (Lowe *et al.*, 2002b; Ruffini *et al.*, 2004; Löfgren *et al.*, 2011; Semmling *et al.*, 2011; Rius *et al.*, 2012). En ce qui concerne le système à antenne unique, et plus particulièrement la méthode SNR (voir section 3.4.2, page 60), les études démontrent que la précision obtenue est légèrement inférieure, de l'ordre du décimètre (Löfgren, 2014), et que la technique n'est utilisable que lorsque la vitesse de variation du niveau de la mer est suffisam-

1. Dans le cadre de ma thèse, j'ai eu l'opportunité de participer à une campagne de calibration des deux altimètres Jason-2 et SARAL. Cette campagne de mesure a donné lieu à un article publié dans la revue *Marine Geodesy* en 2015, disponible à l'annexe E page 228.

ment faible pour être négligeable. Si cette dernière technique apparait donc moins adaptée que le système double antennes pour des mesures altimétriques, elle présente cependant un avantage considérable : la mise en place de l'instrument est très rapide et peu coûteuse. De plus, la chaîne de traitement en aval est beaucoup plus simple. Par ailleurs, un grand nombre de stations des réseaux GNSS permanents sont installées sur le littoral en Europe et dans le monde, et utiliser celles en bord de mer pour faire des mesures altimétriques par GNSS-R serait tout à fait envisageable : voir figure 5.1. Tout un réseau serait donc déjà en place, et seul l'algorithme de traitement reste à développer. Ceci est particulièrement important à l'heure où il est question de co-localiser des stations GNSS avec des marégraphes.

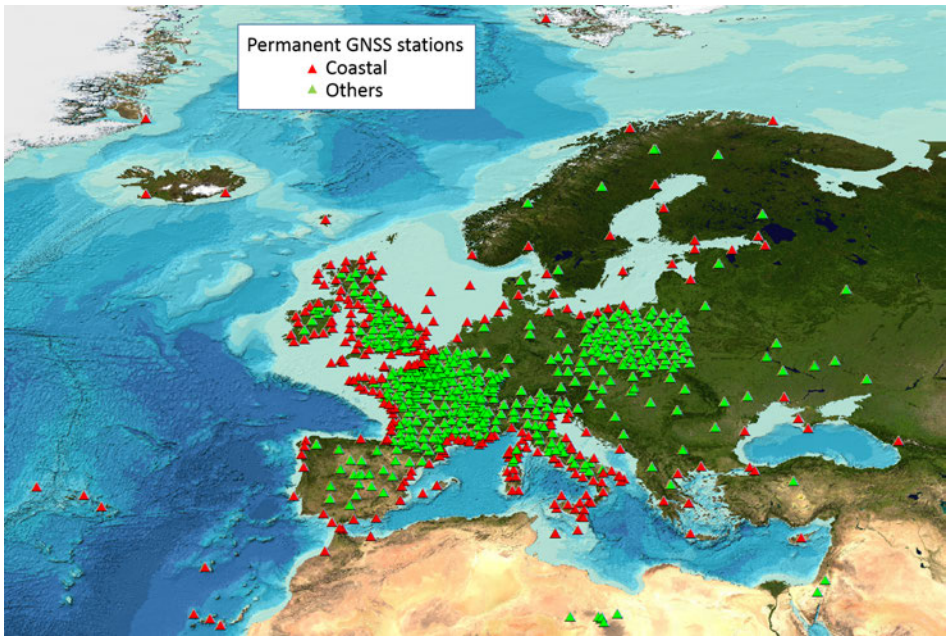


FIGURE 5.1 – Principales stations GNSS permanentes en Europe.
Avec l'altimétrie par GNSS-R, les stations GNSS côtières sont des marégraphes potentiels.

On voit donc dès lors l'intérêt d'étudier en détail les potentialités du GNSS-R pour l'altimétrie en milieu côtier, et particulièrement du système à antenne unique basé sur la méthode SNR. Dans le cadre de ma thèse, je me suis principalement intéressé à cette technique prometteuse, et je propose une nouvelle méthode permettant d'élargir ses conditions de validité en intégrant la vitesse de déplacement vertical du niveau de la mer dans la résolution.
L'étude présentée dans ce chapitre a été publié dans *Remote Sensing of Environment*. Cet article est inséré dans la section 5.7 :

Roussel N., Ramillien G., Frappart F., Darrozes J., Gay A., Biancale R., Striebig N., Hanquiez V., Bertin X., Allain D. : *Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver*. Publié dans *Remote Sensing of Environment*.

Ce chapitre s'articule donc en quatre parties principales **qui seront une synthèse des principaux points de cet article.** ***Pour plus de détails, se reporter à l'article lui-même.*** La pre-

mière partie est un bref rappel de l'état de l'art, déjà abordé dans la section 3.4.2.3 page 63. La deuxième partie présente la méthode que j'ai développée pour inverser les mesures de SNR afin d'estimer les variations du niveau de la mer. Cette méthode a été testée sur des observations in situ acquises durant 3 mois (du 3 mars au 31 mai 2013) et les conditions expérimentales seront décrites dans la troisième section. Enfin, j'analyserai les résultats de cette campagne de mesure dans une dernière section.

5.2 Etat de l'art

Comme expliqué dans la section 3.4.2.2 page 60, le signal direct et le signal réfléchi interfèrent au niveau de l'antenne. Ces interférences sont particulièrement visibles dans le SNR mesuré par l'antenne. L'aspect quasi-sinusoïdal de la série temporelle du SNR est constitué d'une basse fréquence due au signal direct, et d'une haute fréquence due au signal réfléchi (voir section 3.4.2.2 page 60), que l'on note SNR_m. La haute fréquence $\tilde{f}$ des oscillations du SNR dues au multi-trajet (SNR_m) en fonction du sinus de l'angle d'élévation s'exprime sous cette forme (voir section 3.4.2.2 page 60) :

$$\tilde{f} = \frac{4\pi}{\lambda}(\dot{h}\frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}} + h) \tag{5.1}$$

avec λ la longueur d'onde (en m), θ l'angle d'élévation du satellite (en rad), $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ sa vitesse de variation (en rad/s). h est la hauteur de l'antenne par rapport à la surface de réflexion. Si l'on considère l'antenne comme fixe, cette hauteur correspond directement à la mesure du niveau de la mer. $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ est la vitesse de variation verticale de la surface de réflexion (en m/s). Cette équation montre que si l'on considère un cas statique ou quasi-statique ($\dot{h} \simeq 0$), la fréquence (en fonction du sinus de l'angle d'élévation) $\tilde{f}$ de SNR_m est constante et directement proportionnelle à la hauteur de l'antenne au-dessus de la surface de réflexion. Dans ce cas, en déterminant $\tilde{f}$, on peut directement en déduire h, et donc le niveau de la mer. Cependant, si $\dot{h}$ ne peut pas être négligé, $\tilde{f}$ dépend également de l'angle d'élévation θ, de sa vitesse de variation $\dot{\theta}$ et de la vitesse de variation du niveau de la mer $\dot{h}$. Si les deux premiers paramètres sont connus, la détermination de $\dot{h}$ reste très problématique car on a deux inconnues (h et $\dot{h}$) pour une seule observation de $\tilde{f}$ (i.e., cas sous-déterminé).
De nombreuses études menées jusqu'à présent étaient réalisées dans des conditions telles que $\dot{h}$ pouvait être négligé (Larson et Nievinski, 2013; Löfgren, 2014). Par exemple, Löfgren et Haas (2014) ont comparé les estimations de niveau d'eau obtenues par analyse du SNR ou de la phase, les variations de la hauteur d'antenne étaient de l'ordre de quelques dizaines de centimètres maximum pendant 3 jours d'observations, et $\dot{h}$ était donc négligeable d'un instant à l'autre. Pourtant, dans de très nombreux cas, cette hypothèse n'est pas valable, en raison des vagues dont les hauteurs significatives correspondent à une valeur importante de $\dot{h}$.
Quelques propositions ont été faites pour prendre $\dot{h}$ en compte. Löfgren (2014) suggéra par exemple de faire deux itérations : la première approxime $h(t)$ en négligeant $\dot{h}(t)$, et la deuxième intègre une estimation de $\dot{h}(t)$ basée sur une fonction sinusoïdale théorique ajustée aux valeurs $h(t)$ issues de la première itération. L'idée sous-jacente est que, pendant une journée,

le changement de niveau d'eau est principalement dû aux marées diurnes et semi-diurnes, de fréquences connues et on peut donc prédire une fonction sinusoïdale théorique. Cette méthode en deux étapes améliore la précision des résultats, mais nécessite une connaissance préalable des phénomènes susceptibles d'influencer la hauteur d'antenne dans la zone d'étude.
Larson et Nievinski (2013) proposa une méthode similaire, basée également sur deux itérations. La première itération détermine une valeur approximative de $h(t)$ en négligeant $\dot{h}(t)$. La série temporelle $h(t)$ ainsi obtenue est dérivée pour calculer la série temporelle $\dot{h}(t)$. La deuxième itération intégrera ces valeurs de $\dot{h}(t)$ pour déterminer des valeurs plus précises de $h(t)$. Malheureusement, cette méthode ne marche que pour des petites valeurs de $\dot{h}$ et ne pourra pas être utilisées sur des sites de mesures avec de fortes marées par exemple.
Dans ce chapitre, je propose une autre méthode, permettant de déterminer simultanément h et $\dot{h}$. Cette méthode originale sera testée in situ dans des conditions extrêmes où $\dot{h}$ ne peut pas être négligé.

5.3 Méthodologie

La méthode que je présente dans cette section est basée sur la détermination de la série temporelle $\tilde{f}(t)$ de la fréquence des oscillations dues au multi-trajet. En combinant les séries temporelles $\tilde{f}_i(t)$ mesurées pour chaque satellite i visible simultanément, il est possible de construire un système d'équations linéaire sur-déterminé basé sur l'équation 5.1 pour un laps de temps δt, avec seulement deux inconnues : h et $\dot{h}$. Un tel système d'équations peut être résolu en appliquant le formalisme matriciel basé sur le critère des moindres carrés. Les principaux points de cette méthode sont exposés dans cette section, et synthétisé dans la figure 5.2.

5.3.1 Suppression de la contribution du signal direct

Comme expliqué dans la section 3.4.2.2 page 60, le signal direct domine le signal réfléchi, et correspond à la basse fréquence principale de $SNR(t)$, alors que le signal réfléchi provoque des perturbation de basse amplitude mais haute fréquence. Pour isoler ces hautes fréquences $\tilde{f}$ des oscillations dues au multi-trajet, il faut préalablement retirer la contribution du signal direct au SNR pour obtenir le résidu SNR_m. Pour cela, Bilich (2006) propose une modélisation théorique du signal direct et de soustraire les valeurs modélisées à la série temporelle $SNR(t)$. Cette méthode nécessite la connaissance précise des diagrammes de gain de l'émetteur et de l'antenne réceptrice, et ces informations étant compliquées à obtenir, d'autres méthodes de correction ont été proposées. Larson *et al.* (2008) proposent tout simplement de soustraire un polynôme de bas degré ajusté à la série temporelle du SNR. Cette méthode donne de meilleurs résultats que la méthode de modélisation, et elle est plus simple à mettre en œuvre (Bilich, 2006). C'est actuellement la méthode utilisée dans la plupart des études sur le sujet. Pour ces raisons, j'ai décidé moi aussi d'utiliser cette stratégie et d'enlever un polynôme du deuxième degré aux séries temporelles du SNR. La figure 5.3 présente un exemple de cette étape de traitement.

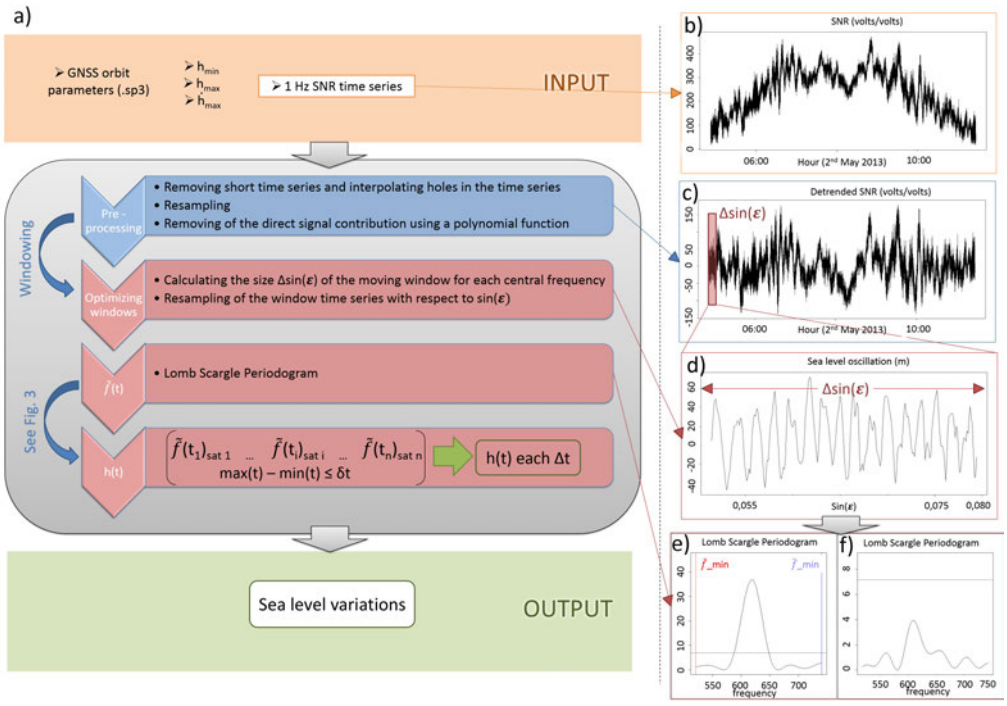


FIGURE 5.2 – Chaîne de traitement des données SNR mise au point durant ma thèse, basée sur un réflectomètre à antenne unique.
(a) Diagramme présentant les étapes de traitement du SNR pour obtenir les changements de hauteur du niveau de la mer. (b) Exemple d'une série temporelle de SNR mesuré sur L1 lors d'un passage du satellite PRN23, le 2 Mai 2013. (c) Isolement de la contribution du multi-trajet (SNR_m). (d) Zoom sur SNR_m ré-échantillonné en fonction du sinus de l'angle d'élévation. (e) et (f) Exemples de périodogrammes de Lomb-Scargle (LSP) de SNR_m. (e) Le LSP présente un pic entre $\tilde{f}_{min}$ et $\tilde{f}_{max}$, atteignant une signification statistique à une erreur de probabilité égale à 0.01 (Ruf, 1999). (f) Le LSP ne présente aucun pic atteignant une signification statistique à une erreur de probabilité égale à 0.01 (Ruf, 1999) et est donc rejeté. Le fenêtrage que je propose (passage entre (c) et (d)), ainsi que la détermination conjointe de h et $\dot{h}$ (dernière étape en rouge sur la figure) constituent ma principale contribution originale à l'état de l'art. La suppression de la contribution du signal direct (par soustraction d'un polynôme du second degrés) et l'utilisation du LSP pour estimer $\tilde{f}$ sont deux étapes classiquement réalisées par la communauté.

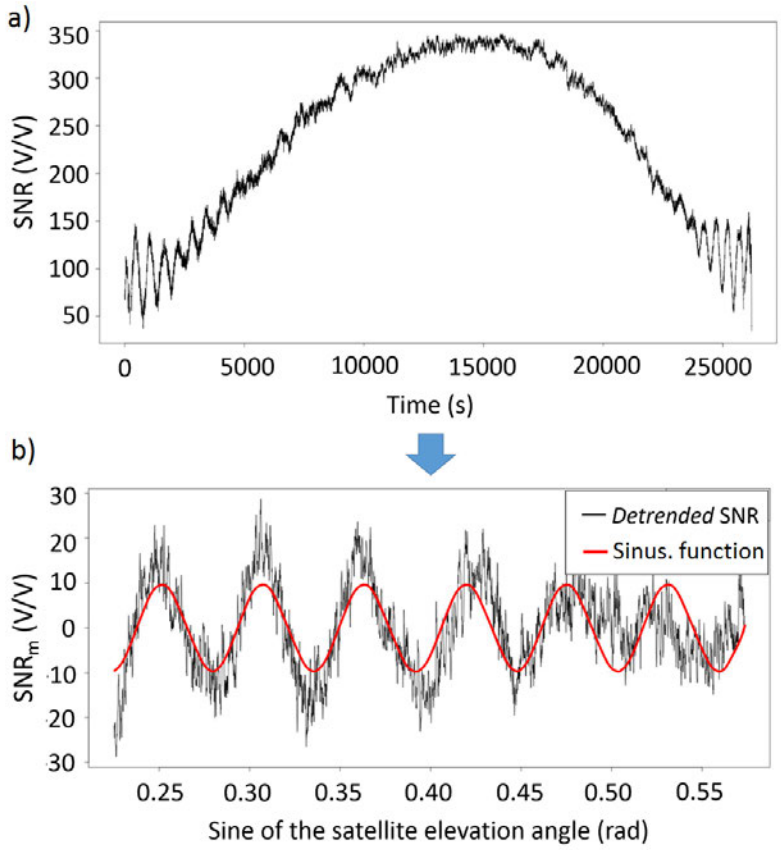


FIGURE 5.3 – Isolement de la contribution du signal réfléchi au SNR (SNR_m) en enlevant un polynôme du deuxième degré.

5.3.2 Discrétisation de la série temporelle $SNR_m(t)$

Le but est de mesurer $\tilde{f}(t)$, la fréquence des oscillations de SNR_m, afin d'en déduire les variations de la hauteur d'antenne $h(t)$ en se basant sur l'équation 5.1. La fréquence $\tilde{f}$ n'étant pas stationnaire, un fenêtrage de la série temporelle $SNR_m(sin(\theta))$ est nécessaire pour déterminer ses variations sur des intervalles de temps. Le choix de la fenêtre glissante est un paramètre critique car il doit répondre à des exigences antinomiques. La fenêtre doit être suffisamment grande pour que l'on puisse identifier précisément la fréquence fondamentale des oscillations, mais elle ne doit pas être trop large pour que les variations de fréquences soient quasi-constantes sur la portion temporelle considérée.
Soit $\Delta(\sin(\theta))$ la taille de la fenêtre glissante. Pour trouver la bonne taille $\Delta(\sin(\theta))$, il est nécessaire d'avoir une estimation des variations que SNR_m est susceptible d'observer à chaque instant. Pour cela, j'ai choisi de considérer les trois paramètres suivants comme connus :

– h_{min} (m) : la distance verticale minimale que l'on est susceptible d'observer entre l'antenne (fixe) et la surface de la mer ;

– h_{max} (m) : la distance verticale maximale que l'on est susceptible d'observer entre l'antenne (fixe) et la surface de la mer ;
– $\dot{h}_{max}$ (m/s) : la vitesse de variation maximale que la surface de la mer est susceptible d'observer durant la période d'observation.

Plus ces valeurs seront connues précisément, plus rapide sera la détermination de $\tilde{f}$.

Connaissant ces trois paramètres, il est possible de calculer la fréquence minimale $\tilde{f}_{min}$ et maximale $\tilde{f}_{max}$ que l'on est susceptible d'observer à un instant donné, en utilisant l'équation 5.1. On choisira alors la taille de la fenêtre glissante $\Delta(\sin(\theta))$ en se basant sur les deux conditions suivantes :

$$\Delta(\sin(\theta)) \leq \frac{p\tilde{f}_{min}}{\Delta\tilde{f}_{max}} \tag{5.2}$$

$$\Delta(\sin(\theta)) > \frac{N_0}{\tilde{f}_{min}} \tag{5.3}$$

avec p (en %) les variations maximales de $\tilde{f}$ que l'on tolère dans la fenêtre et N_0 est le nombre minimum de périodes que l'on souhaite conserver dans la fenêtre glissante pour l'ajustement. $\Delta\tilde{f}_{max}$ est la variation maximale de la fréquence et elle est obtenue de la manière suivante :

$$\Delta\tilde{f}_{max} = \left|\frac{2}{\lambda\dot{\theta}\cos(\theta)}\right|\left(\dot{h}_{max} + \left|\frac{\dot{h}}{\cos^2(\theta)}\right| + \left|\frac{\dot{h}\ddot{\theta}\tan(\theta)}{\dot{\theta}^2}\right|\right) \tag{5.4}$$

Il est important de noter que la taille de la fenêtre $\Delta(\sin(\theta))$ n'est pas constante puisque chaque paramètre dont elle dépend varie au cours du temps, et il faudra donc la ré-estimer à chaque incrément.

Pour information, le fenêtrage que je propose dans cette section n'est pas réalisé dans les travaux antérieurs (e.g., Larson et Nievinski (2013)). En effet, habituellement, les données correspondantes à un angle d'élévation supérieur à 30° ou 40° sont généralement supprimées, et une seule estimation de $\tilde{f}$ est réalisée pour chaque passage de satellite.

5.3.3 Détermination de la fréquence f des oscillations du SNR dues au multitrajet

La fréquence $\tilde{f}$ est estimée pour chaque fenêtre glissante en utilisant un périodogramme de Lomb Scargle (LSP) : Lomb (1976); Scargle (1982), qui est l'outil utilisé dans la plupart des travaux antérieurs. Connaissant les valeurs de $\tilde{f}_{min}$ et $\tilde{f}_{max}$ fixes pour chaque fenêtre (voir section 5.3.2), il n'est pas nécessaire de considérer le spectre complet de fréquences lors du calcul du LSP pour déterminer le pic du spectre qui correspond à la période principale dans la fenêtre. L'annexe D page 222 est une analyse théorique de la période des oscillations observées dans la série temporelle du SNR. Cette étude permet l'optimisation de la durée d'une session et de la fréquence d'acquisition du SNR pour des applications altimétriques.

5.3.4 Détermination de la hauteur h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion

Une fois que $\tilde{f}(t)$ est déterminé pour chaque satellite en vue, $h(t)$ est obtenu en résolvant l'équation 5.1. La solution que je propose consiste à combiner les mesures faites par tous les satellites GNSS en vue à un instant donné, pour déterminer simultanément h et $\dot{h}$ en utilisant une résolution matricielle au sens des moindres carrés, notée LSM (*Least Square Method*) : voir figure 5.4.
Ainsi, si on considère $U = \frac{4\pi\tan(\theta)}{\lambda\dot{\theta}}$ et $V = \frac{4\pi}{\lambda}$, l'équation 5.1 pour un satellite i à un instant t est linéaire pour h et $\dot{h}$:

$$\tilde{f}_i(t) = U_i\dot{h}(t) + V_i h(t) \tag{5.5}$$

En combinant tous les satellites visibles à l'instant t, on obtient un système linéaire d'équations :

$$\begin{pmatrix} \tilde{f}_1(t) = U_1\dot{h}(t) + V_1 h(t) \\ \tilde{f}_2(t) = U_2\dot{h}(t) + V_2 h(t) \\ \tilde{f}_3(t) = U_3\dot{h}(t) + V_3 h(t) \\ \cdots \end{pmatrix} \tag{5.6}$$

ou sous forme matricielle :

$$\tilde{F} = U\dot{h}(t) + V h(t) = AX \tag{5.7}$$

Avec la matrice de configuration $A = (UV)$, et le vecteur contenant les inconnues $X = \begin{pmatrix} \dot{h}(t) \\ h(t) \end{pmatrix}$
La solution au sens des moindres carrés est :

$$X = (A^t A)^{-1}(A^t \tilde{F}) \tag{5.8}$$

Un avantage de la méthode que je propose est qu'elle permet de combiner les différentes constellations (GPS, GLONASS, Galileo, etc.) ainsi que toutes les fréquences d'émission (L1, L2, L5, etc.) dans ce système d'équations sur-déterminé. Le nombre d'observables $\tilde{f}_i$ à chaque instant est donc assez important.
Comme indiqué sur la figure 5.4, on a un incrément Δt entre chaque estimation de h, et une longueur δt de la fenêtre glissante. La valeur de Δt est choisie la plus petite possible pour avoir la meilleure résolution temporelle. Une valeur trop faible engendrera simplement un sur-échantillonnage. En revanche, la valeur de δt doit être choisie avec attention. Il faut qu'elle soit la plus petite possible, afin d'assurer la stabilité de h durant la fenêtre temporelle de mesure, mais il faut également avoir suffisamment d'observables dans le système d'équations. Plus δt sera grand, plus le nombre d'observables sera grand, et donc meilleure sera la détermination de h. La valeur de δt est donc assez délicate à choisir, et devra être adaptée à chaque situation de mesure.
L'étape décrite dans la figure 5.4 constitue ma principale contribution à la méthodologie généralement décrite dans les travaux antérieurs.

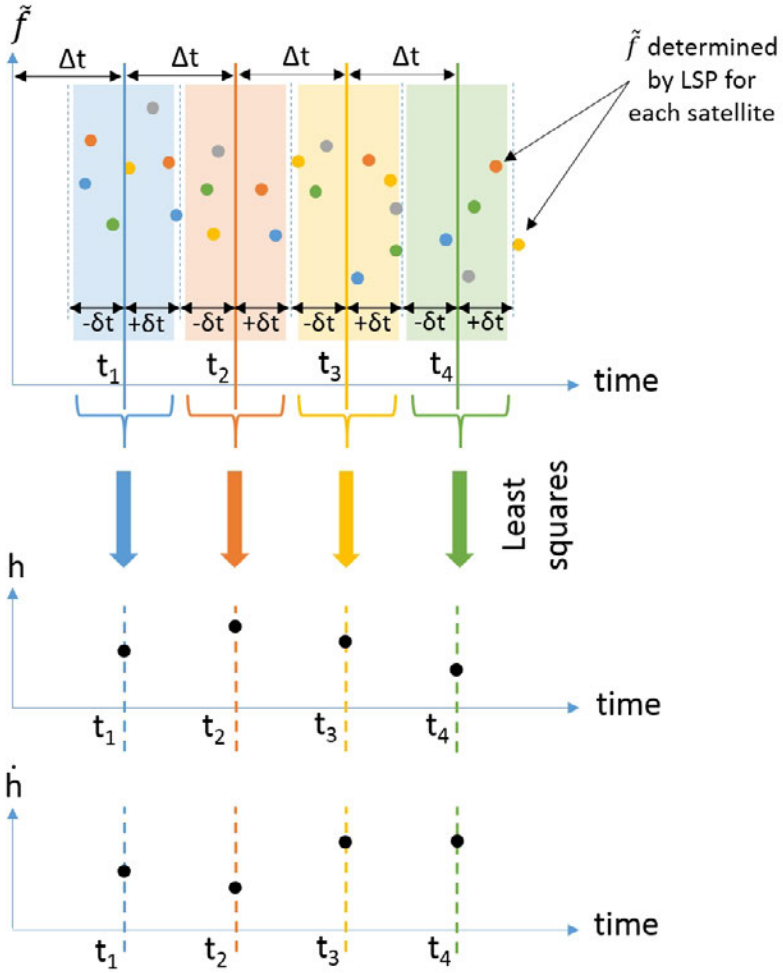


FIGURE 5.4 – Principe de la méthode d'inversion des données SNR par les moindre carrés (LSM).

Pour des raisons de clarté, le chevauchement des fenêtres glissantes n'est pas représenté, même si c'est le cas lorsque $\delta t > \Delta t$.

5.3.5 Validation de la méthode

Avant d'appliquer ma méthode sur de vraies données, il apparaît judicieux de la tester dans un cas plus simple et où les différents paramètres sont connus, afin d'estimer les erreurs. J'ai donc installé un récepteur Leica GR25 avec une antenne AR10 au milieu d'un parking goudronné à l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) de Toulouse, France durant 4 jours consécutifs, du 12 au 15 juillet 2014. Le SNR de la fréquence L1 a été enregistré avec un taux d'échantillonnage d'une seconde. La hauteur d'antenne est constante et égale à 1,60 m durant toute la période d'acquisition. Les mesures ayant été faites durant des jours fériés, le parking était

quasiment vide et la surface réfléchissante de bitume peut être considérée comme homogène et statique ($\dot{h} \sim 0$), à part un trottoir à proximité (correspondant à une hauteur d'antenne de 1,40 m). Les deux méthodes suivantes ont été testées :

- la méthode de détermination classique, négligeant $\dot{h}$, correspondant à l'approche utilisée par Larson et Nievinski (2013). $h(t)$ est donc déduit directement de la série temporelle $\tilde{f}(t)$ en considérant $h(t) = \frac{\lambda f(t)}{4\pi}$ (voir section 3.4.2.3 page 63). Je noterai cette méthode **SNR statique** dans le reste de ce manuscrit ;
- la méthode que je propose dans ce chapitre, et que je noterai **SNR dynamique** dans le reste de ce manuscrit. Les paramètres d'entrée choisis sont les suivants : $h_{min} = 1,4$ m (pour éviter les réflexions sur le trottoir), $h_{max} = 2$ m, et $\dot{h}_{max} = 10^{-6}$ (i.e., 3,6 mm/h).

La méthode SNR statique ($\dot{h} = 0$) donne une hauteur d'antenne moyenne sur toute la période de $(1,61 \pm 0,10)$ m, tandis qu'elle est de $(1,60 \pm 0,06)$ m avec la méthode SNR dynamique. Les incertitudes correspondent à l'écart type ($1\ \sigma$) obtenu sur l'ensemble des estimations sur la période. Les deux résultats sont très proches, et donnent une précision sur la hauteur estimée meilleure que décimétrique. La précision obtenue avec la méthode dynamique que je propose est meilleure que dans le cas statique, avec un écart-type de 6 cm au lieu de 10 cm.

5.4 L'expérience du phare de Cordouan

5.4.1 Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales

La méthode que je propose dans ce chapitre (SNR dynamique) a été testée in situ en inversant les données SNR collectées par une antenne géodésique installée ~ 60 m au-dessus de l'océan Atlantique, au sommet du phare de Cordouan. Les données ont été acquises du 3 mars au 31 mai 2013. Le phare de Cordouan (45°35'11"N ; 1°10'24"O) est situé proche du Verdon, France (figure 5.5), à la sortie de l'estuaire de la Gironde, à environ 8 km des côtes.

L'environnement proche du phare est très hétérogène et variable. Des bancs de sable, submergés à marée haute, apparaissent au pied du phare lorsque la marée descend. La bathymétrie particulière autour du phare, couplée aux effets de courants dus à la proximité de l'estuaire de la Gironde, modifient la dynamique des vagues dans l'environnement proche de l'antenne. Si de grosses vagues apparaissent à marée haute, la mer est quasiment systématiquement calme à marée basse. La figure 5.6 présente une photographie du phare à marée haute (a), et à marée basse (b).

Sur ce site de mesure, les variations du niveau de la mer(i.e., de la hauteur d'antenne) atteignent ±4 m, et la dérive maximale de la marée semi-diurne atteint 0,2 mm/s. A marée haute, des vagues de plusieurs mètres sont régulièrement observées. Dans ces conditions, $\dot{h}$ ne peut pas être négligé, et la méthode classique considérant un cas *statique* ne peut pas être utilisée.

Le matériel utilisé est une antenne Trimble Zephyr Geodetic 2 (avec un gain du LNA de 50 ± 2 dB) et un récepteur Trimble NetR9. Dans mon étude, seul le SNR mesuré sur la fréquence L1 est analysé, car il est susceptible de donner les meilleurs résultats (Löfgren et Haas, 2014) puisque la puissance de la fréquence L2 est plus faible (i.e. SNR plus faible), que celle de la bande L1.

FIGURE 5.5 – Antenne Trimble Zephyr Geodetic 2 et récepteur Trimble NetR9 installés au sommet du phare de Cordouan, à environ 60 m au-dessus du niveau de la mer.
Le phare de Cordouan (45°35'11"N ; 1°10'24"O) est situé dans l'embouchure de l'estuaire de la Gironde, dans le Sud-Ouest de la France. Il culmine à ~ 60 m au-dessus du niveau de la mer.

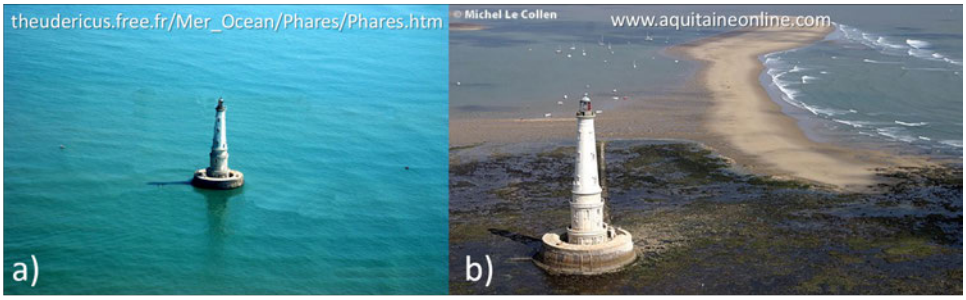


FIGURE 5.6 – Phare de Cordouan à marée haute (a), par mer calme, et à marée basse (b), avec la plupart des bancs de sable émergeant.

5.4.2 Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS

En raison de sa localisation en plein océan, et de sa hauteur au-dessus du niveau de la mer, le phare de Cordouan est un site idéal pour réaliser des mesures de réflectométrie GNSS. La figure 5.7 présente les positions précises des points de réflexion spéculaire sur la surface de réflexion, du 2 au 8 mai 2013. Ces positions ont été obtenues en utilisant le simulateur que j'ai développé et présenté dans le chapitre 4. Les points les plus distants sont situés à 340 m du récepteur si on considère des satellites d'élévation supérieure à 10° (avec une première surface de Fresnel de ~ 2000 m^2), et atteignent 3400 m pour des élévations supérieures à 1° (avec une première surface de Fresnel d'environ 200000 m^2). On met donc déjà en évidence un des grands avantages de l'altimétrie GNSS-R par rapport aux mesures classiquement faites par un marégraphe : les mesures ne sont pas ponctuelles mais couvrent une large zone autour de l'instrument (cercle de rayon ~ 3.5 km dans notre cas).

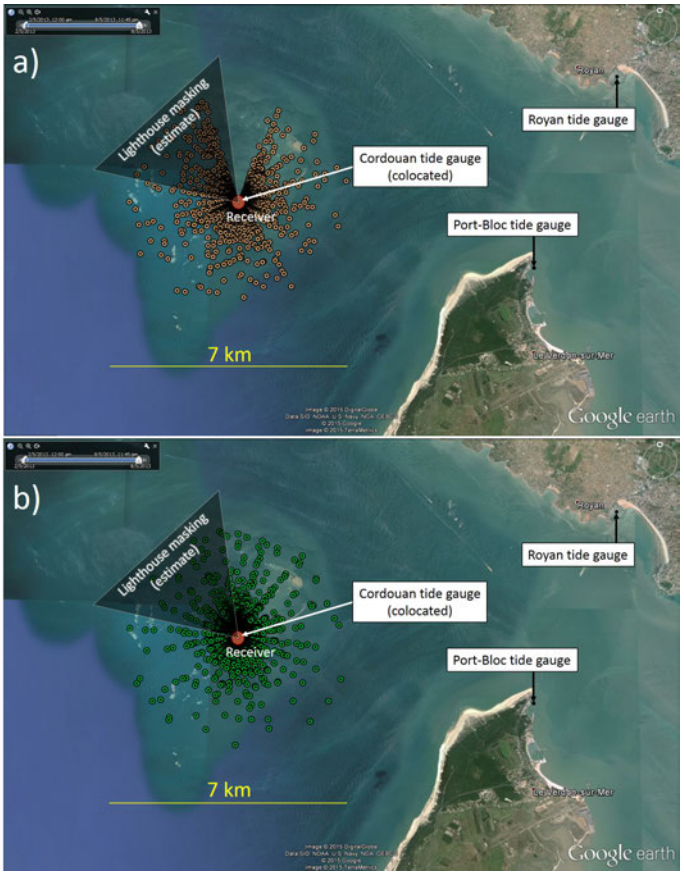


FIGURE 5.7 – Positions des points de réflexion spéculaires des satellites GPS (a) et GLONASS (b) pour un récepteur GNSS localisé en haut du phare de Cordouan, du 2 au 8 mai 2013. Les résultats des simulations sont présentés avec un échantillonnage de 15 min (i.e., la position des satellites est actualisées toutes les 15 min). Seuls les satellites GPS et GLONASS avec un angle d'élévation supérieurs à 1° ont été considérés.

5.4.3 Données utilisées pour la validation

Je note $SSH_{SNR}(t)$ la série temporelle de hauteur de mer (SSH : *Sea Surface Height*) calculée en utilisant la méthode du SNR dynamique. Cette série temporelle sera comparée aux mesures faites par trois marégraphes indépendants :
- le marégraphe de **Port-Bloc** ($SSH_{Port-Bloc}$), situé à 9 km du phare ;
- le marégraphe de **Royan** (SSH_{Royan}), situé à 12 km du phare ;
- le marégraphe de **Cordouan** ($SSH_{Cordouan}$), situé au pied du phare, mais seules deux semaines de données sont disponibles sur les 3 mois d'acquisitions GNSS-R, du 28 avril au 13 mai 2013.

$SSH_{SNR}(t)$ sera aussi comparée aux sorties du modèle des marées astronomiques théoriques **T-UGOm** (SSH_{T-UGO_m}) développé par Lyard *et al.* (2006).
Enfin, nous intègrerons également la hauteur significative des vagues SWH (*Significant Wave Height*) issue du modèle théorique WaveWatch III développé par Tolman (2014). L'amplitude de la corrélation croisée est normalisée entre 0 et 1 pour chaque période.

5.4.4 Choix des paramètres de calcul

Les paramètres d'entrée suivants ont été choisis :
- h_{min} = 50 m ;
- h_{max} = 70 m ;
- $\dot{h}_{max}$ = 5.10^{-4} m/s.

$\dot{h}_{max}$ a été choisi égal à approximativement 3 fois la variation maximale du niveau de la mer observée par un marégraphe indépendant (= 4 m) pendant la plus petite période de marée (= 6 h), i.e., $\sim 3 * 4$ m / 6 h.

5.5 Résumé des principaux résultats

5.5.1 Détermination des principales périodes de marées

Le tableau 5.1 résume les principaux résultats, et le tableau 5.2 est donné pour information, à titre comparatif.
Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant une taille de fenêtre δt = 4000 s. On a ainsi des biais de seulement quelques millimètres entre les estimations basées sur le SNR et les marégraphes indépendants situés à 9 km (Port-Bloc) et 12 km (Royan). La corrélation linéaire est respectivement de 0,96 et 0,95 durant les 3 mois d'acquisition. Elle atteint 0,97 en comparant avec le marégraphe co-localisé de Cordouan mais seulement sur 15 jours d'acquisition (nous n'avions pas accès à plus de 15 jours de données sur ce marégraphe). Le déphasage est de 25 et 29 min respectivement avec les marégraphes de Port-Bloc et de Royan et sont dus à la distance de propagation de la marée vers la côte, à environ 10 km du phare. En ce qui concerne le modèle de marées théorique T-UGOm, la corrélation linéaire est de 0,94 sur les 3 mois d'acquisition, et le déphasage de 4 min. Le biais obtenu de -0,23 m peut s'expliquer par un mauvais calage du modèle en absolu (mais bonne précision du modèle en relatif).
L'erreur quadratique moyenne EQM est de 0.70 m. Cette valeur est très élevée et est expliquée par la présence de vagues qui sont détectées par la méthode basée sur le SNR, mais pas par les marégraphes classiques, qui sont équipés d'amortisseurs : voir section 5.5.3. De plus, le

TABLE 5.1 – Comparaison entre les différents marégraphes et la série temporelle $SSH_{SNR}(t)$ calculée à partir du SNR.

*période de 3 mois **période de 2 semaines

Solution SNR comparée à	Biais (m)	Corrélation R	EQM (m)	Déphasage (min)
T-UGOm* (modèle théorique)	-0,23	0,94	0,71	-4,3
Port-Bloc* (marégraphe, 9 km)	0,02	0,96	0,68	29,0
Royan* (marégraphe, 12 km)	0,00	0,95	0,71	25,0
Cordouan** (marégraphe colocalisé)	**0,06**	**0,97**	**0,63**	**0,0**

TABLE 5.2 – Comparaison entre les données du marégraphe de Port-Bloc avec $T-UGO_m$ et Royan sur les trois mois d'acquisition.

Port-Bloc comparé à	Biais (m)	Corrélation R	EQM (m)	Déphasage (min)
T-UGOm (modèle théorique)	0,26	0,964	0,33	-5
Royan (marégraphe)	0,02	0,996	0,11	-3,9

phare de Cordouan est situé à 7 km des côtes, alors que les marégraphes de Royan et de Port-Bloc sont situés sur le littoral, dans un environnement très protégé.

Pour information, cette valeur d'EQM autour de 70 cm est étrangement proche de la valeur maximale de hauteur significative des vagues mesurable par IPT, comme calculée par Alonso-Arroyo *et al.* (2015) (voir section 3.4.1.3). Au-delà de cette valeur, la composante cohérente de la réflexion disparait. Il serait intéressant d'approfondir le sujet dans une étude ultérieure.

Une corrélation croisée obtenue par analyse en ondelettes de Morlet (Farge, 1992; Grinsted *et al.*, 2004) a été appliquée entre chaque paire de séries temporelles. Le résultat entre le marégraphe de Port-Bloc et $SSH_{SNR}(t)$ est présenté en figure 5.8 (a). A titre de comparaison, la corrélation croisée entre Port-Bloc et Royan est présentée en figure 5.8 (b).

Comme on peut le voir sur cette figure, les principales périodes de marées astronomiques de 12 h et 24 h sont parfaitement décrites par les estimations obtenues par réflectométrie. La période de 6 h est également présente dans les séries de $h(t)$, bien qu'elle apparaisse plus bruitée. On observe aussi l'apparition de périodes communes inférieures à 6 h, qui n'apparaissent pas dans la corrélation croisée entre les marégraphes de Port-Bloc et Royan (figure 5.8 (b)). Il est possible que le marégraphe de Port-Bloc soit localisé dans un environnement moins protégé (ou que les variations très rapides du niveau de la mer soient moins filtrées par l'effet de l'amortisseur) que les autres marégraphes. Ceci expliquerait que des hautes fréquences apparaissent dans ses données, ainsi que dans celles estimées par la méthode SNR dynamique.

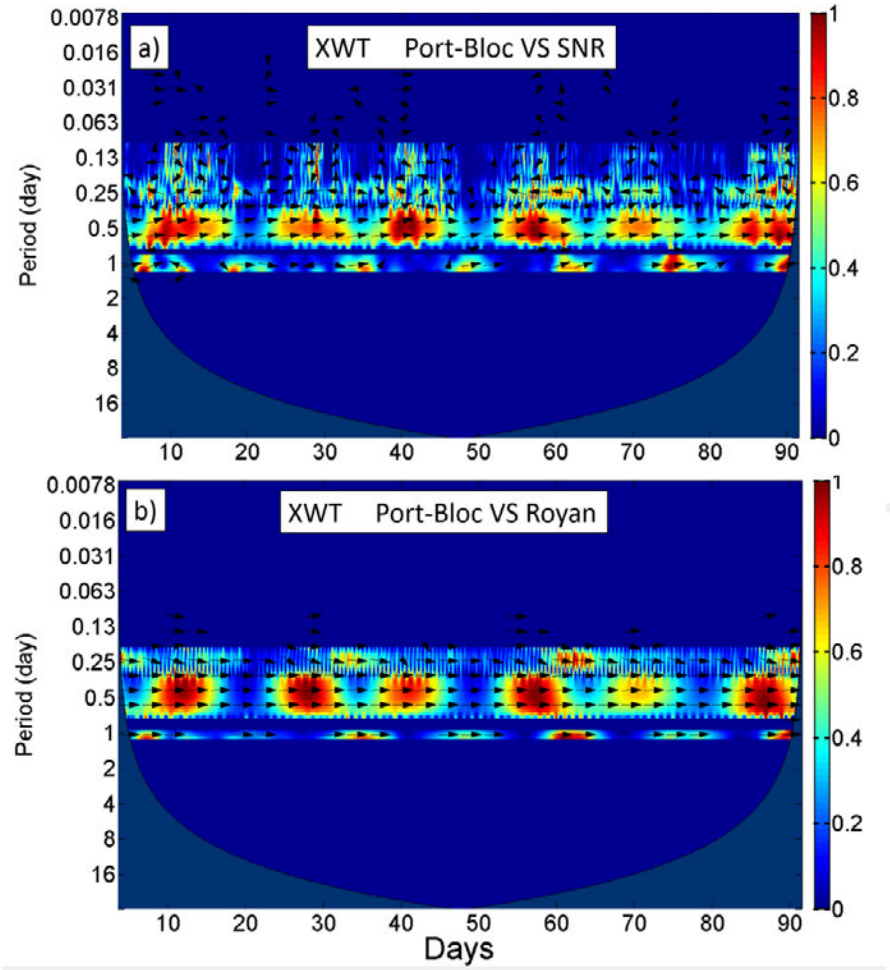


FIGURE 5.8 – Corrélation croisée obtenue par analyse ondelettes entre le marégraphe de Port-Bloc et la série temporelle SSH_{SNR} (a) et entre les marégraphe de Port-Bloc et celui de Royan (b).

Les flèches indiquent le déphasage entre chaque série (pointe vers la droite : en phase, pointe vers la gauche : en opposition de phase. La puissance de la cross-corrélation est normalisée entre 0 et 1 pour chaque période. L'abscisse correspond au jour dans les trois mois d'acquisitions, et l'ordonnée correspond à la période analysée.

5.5.2 Influence de la constellation GNSS

Le tableau 5.3 présente le biais, la corrélation linéaire R et l'erreur moyenne quadratique EQM entre les différents marégraphes et les estimations du niveau de la mer par analyse des données SNR en considérant les 3 cas suivants :

– seuls les satellites de la constellation GPS sont pris en compte ;
– seuls les satellites de la constellation GLONASS sont pris en compte ;
– tous les satellites des deux constellations GPS et GLONASS sont pris en compte (c'est à

TABLE 5.3 – Influence de la constellation GNSS sur la détermination de la hauteur de mer par la méthode *SNR dynamique*.

Les résultats sont présentés de la manière suivante : GPS / GLONASS / **GPS + GLONASS**

Solution SNR	Biais (m)	Corrélation R	EQM (m)
T-UGOm (modèle théorique)	-0,19/-46/-0,23	0,94/0,93/**0,94**	0,76/0,81/**0,71**
Port-Bloc (marégraphe, 9 km)	0,06/-0,21/**0,02**	0,96/0,95/**0,96**	0,72/0,78/**0,68**
Royan (marégraphe, 12 km)	0,04/-0,23/**0,00**	0,95/0,94/**0,95**	0,74/0,80/**0,71**

dire, la configuration utilisée partout ailleurs dans ce chapitre).
Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les données des deux constellations sont incluses dans les calculs. En ne considérant que la constellation GLONASS, les corrélations linéaires diminuent de 0,01 dans tous les cas, et l'EQM augmente de 10 cm en moyenne. La constellation GPS prise indépendamment donne globalement de meilleurs résultats que la constellation GLONASS, ce qui est très certainement dû au plus grand nombre de satellites GPS, et donc d'observations par intervalle de temps.
Au vu des résultats actuels, on peut aisément supposer qu'ils seront améliorés avec l'avènement des nouvelles constellations Galileo, COMPASS-Beidou, etc. qui densifieront les observations à chaque instant. De même, on peut tout à fait envisager l'intégration de tous les canaux de réception (L1, L2, L5, etc.) pour augmenter le nombre d'observables.

5.5.3 Détection des vagues

5.5.3.1 Impact des vagues sur le SSH (*Sea Surface Height*)

Les principales périodes de marées (6, 12 et 24 h) sont correctement estimées par la méthode présentée dans ce chapitre (e.g., corrélation égale à 0.97 avec un marégraphe co-localisé). Cependant, l'erreur moyenne quadratique EQM reste assez élevée (e.g., EQM = 0,63 m avec le marégraphe co-localisé), et l'amplitude de $SSH_{SNR}(t)$ est généralement plus élevée que celle des données provenant des marégraphes indépendants. Ceci est particulièrement visible sur la figure 5.9 (a) qui représente les séries temporelles de SSH_{SNR} et $SSH_{Cordouan}$ sur les 2 semaines d'acquisitions disponibles.

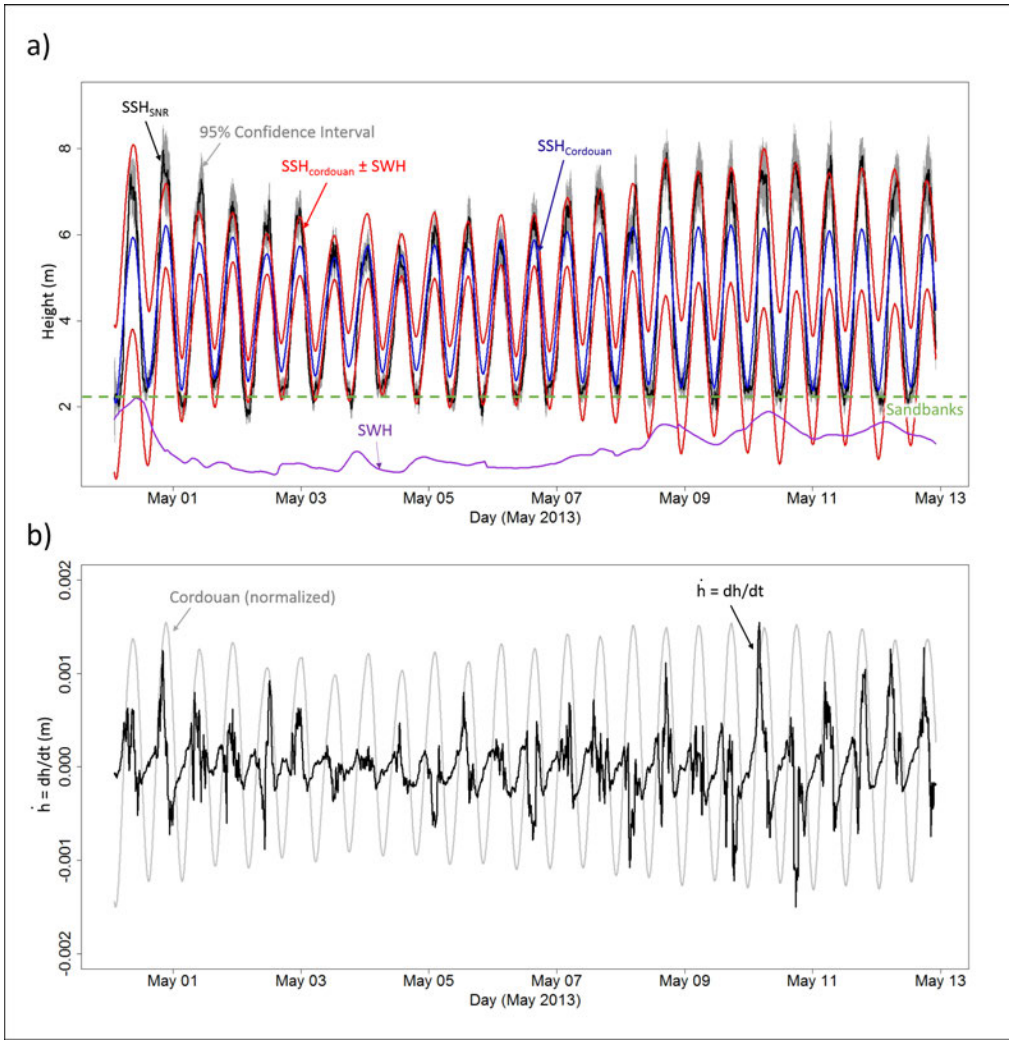


FIGURE 5.9 – a) Niveau de l'eau estimé par la méthode SNR dynamique (en noir) et mesuré par le marégraphe de Cordouan (en bleu) durant 2 semaines d'acquisitions communes. b) Série temporelle de la vitesse de variation de la surface déterminée par la méthode SNR dynamique (en noir) et niveau d'eau (normalisé) mesuré par le marégraphe de Cordouan (en gris).

La hauteur significative des vagues (SWH en violet) est issue du modèle WaveWatch III. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance de 95 %.

Ces écarts d'amplitude s'expliquent par la présence de la houle et des vagues, qui impactent les mesures GNSS-R, mais pas les mesures effectuées par le marégraphe, qui est protégé au port de leur action. Ce biais provoqué par les vagues en pleine mer dans l'estimation du SSH par GNSS-R est un phénomène connu et pris en compte en altimétrie satellite nadir classique (Chelton *et al.*, 2001). C'est ce qu'on appelle habituellement le biais d'état de mer SSB (*Sea State Bias*). Dans le cas de l'altimétrie satellite nadir, la plupart de la puissance reçue vient du creux des vagues où le signal converge, et on a donc tendance à sous-estimer le SSH.

Dans notre cas, les mesures GNSS-R ne sont pas réalisées au nadir, et les résultats les plus significatifs issus du périodogramme sont obtenus pour les satellites à faibles angles d'élévation.

Dès lors, on peut distinguer deux situations sur des considérations géométriques :

- **situation 1 :** *Les vagues sont de fortes fréquence et amplitude* : le phénomène est alors inverse à ce qu'on observe avec des mesures altimétriques nadir : la majeure partie du signal reçu vient des crêtes des vagues qui masquent les creux, comme illustré dans la figure 5.10 (a). Par conséquent, des mesures GNSS-R auront tendance à mesurer les crêtes des vagues quand leur amplitude, et surtout leur fréquence seront élevées. Les biais seront donc proches de la hauteur significative des vagues SWH qui correspond à la moyenne du plus haut tiers de l'amplitude des vagues.
- **situation 2 :** *Les vagues sont de faibles amplitude et fréquence* : les ondes GNSS peuvent alors se réfléchir à la fois dans les creux et sur les crêtes des vagues, et le niveau de mer mesuré sera donc très proche du niveau moyen mesuré par un marégraphe classique, comme illustré sur la figure 5.10 (b). A l'extrême, si l'amplitude et la fréquence des vagues sont suffisamment faibles, les ondes GNSS seront majoritairement réfléchies dans les creux, causant un biais négatif similaire au SSB classique en altimétrie satellite nadir : c'est l'exemple du trajet représenté en noir dans la figure 5.10 (b). Dans ce cas, le niveau de mer déduit par la technique GNSS-R sera inférieur à celui mesuré par un marégraphe classique.

Des cas intermédiaires sont également possible, par exemple en considérant des vagues de faible amplitude mais de haute fréquence. Ce cas conduit à une sur-détermination du SSH, comme illustré sur la figure 5.10 (c).

Afin de vérifier cette hypothèse, j'ai additionné et soustrait la hauteur significative des vagues SWH issue du modèle WaveWatch III aux enregistrement du marégraphe au pied du phare de Cordouan : voir figure 5.9. Ces deux nouvelles séries temporelles sont notées $SSH_{Cordouan} + SWH$ et $SSH_{Cordouan} - SWH$.

On rappelle qu'autour du phare, l'amplitude et la fréquence des vagues sont importantes à marée haute, tandis qu'à marée basse, la surface de l'eau est beaucoup plus calme (en raison de la faible bathymétrie et de l'apparition des bancs de sables qui agissent comme des digues) : voir section 5.4.1 et figure 5.6.

La première situation correspond aux périodes de marée haute et on s'attend donc à ce que le GNSS-R ait tendance à mesurer les crêtes des vagues, avec un SSB positif. C'est effectivement le cas, puisque les séries temporelles de SSH_{SNR} et $SSH_{Cordouan} + SWH$ sont très proches (voir figure 5.9). Les quelques petites différences (e.g., le 28 avril, 4 mai et 6 mai 2013) peuvent s'expliquer (i) par la faible précision du modèle de vague (0.5°) qui n'est pas suffisant pour décrire les zones côtières et les estuaires, et (ii) par le fait que ce modèle n'intègre pas le déferlement des vagues causé par la bathymétrie particulière autour du site de mesure.

Lors des marées basses, la deuxième situation correspond à de faibles vagues, et on s'attend à observer un SSB très faible, ce qui est bien le cas sur une grande partie de la série temporelle.

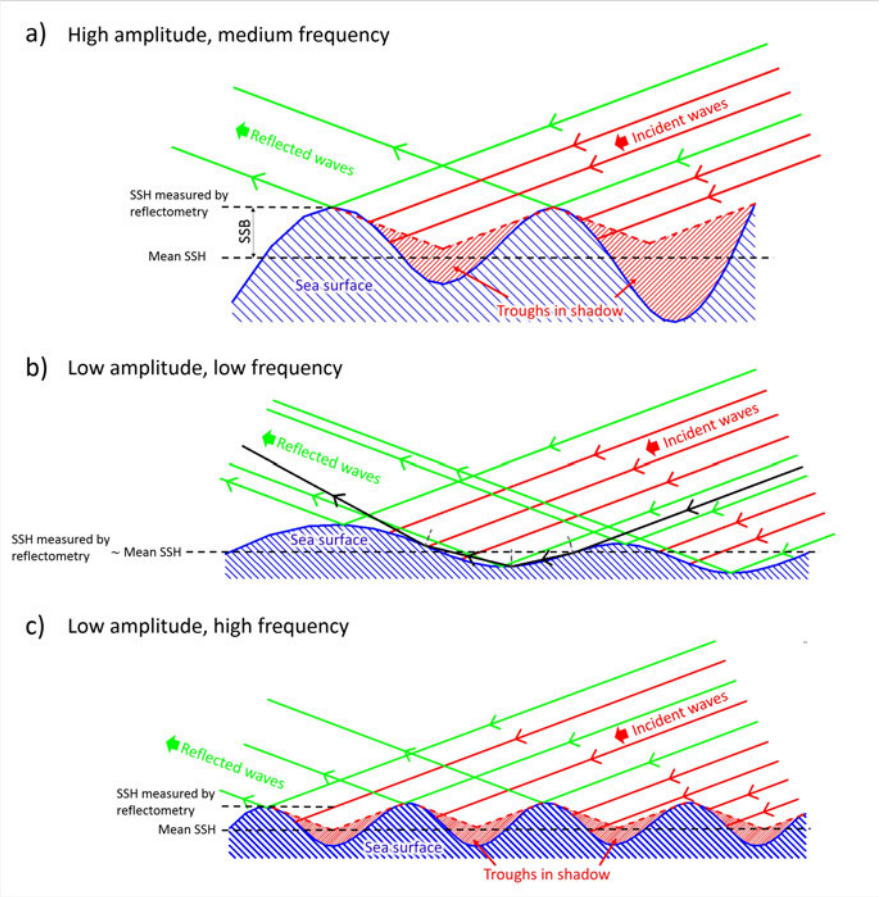


FIGURE 5.10 – Biais d'état de mer SSB induit par les crêtes des fortes vagues qui masquent les creux lorsque les mesures de réflectométrie sont faites off-nadir, à faible angle d'élévation, avec vagues de haute amplitude et fréquence (a), ou vagues de basse amplitude mais haute fréquence (c) ; et convergence du signal lorsque les vagues sont de faibles amplitude et fréquence (b).

Quand l'amplitude des vagues est suffisamment faible (SWH < ~ 1 m), SSH_{SNR} est plus petit que $SSH_{Cordouan}$ et se rapproche de $SSh_{Cordouan} - SWH$. Les ondes GNSS sont majoritairement reflétées par le creux des vagues avec possibilité de plus d'un multi-trajet (représenté en noir sur la figure 5.11 (b)).
On observe également une valeur minimale quasi-constante autour de 2,3 m dans la série temporelle SSH_{SNR}. Ceci est dû aux bancs de sable qui émergent à marée basse (fig. 5.6 (b)) tout autour du phare. Il est intéressant de noter que la morphologie de ces bancs de sables évolue d'une marée à l'autre, d'où de petites variations autour de 2,3 m au cours du temps.
La figure 5.9 (b) représente la série temporelle $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ obtenue par la méthode SNR dynamique lors de la résolution de l'équation 5.8 sur les deux semaines d'acquisitions communes avec le marégraphe de Cordouan co-localisé. La valeur maximale atteinte est $1,5.10^{-3}$ m/s, ce qui est supérieur à la valeur $\dot{h}_{max} = 5.10^{-4}$ m/s estimée pour les calculs (voir section 5.4.4). La valeur moyenne (en valeur absolue) est de 2.10^{-34} m/s

5.5.3.2 État de mer

La série temporelle $SSH_{SNR}(t)$ présente une composante haute fréquence (période < 6 h), que je filtre en appliquant un filtre Butterworth passe-bas.

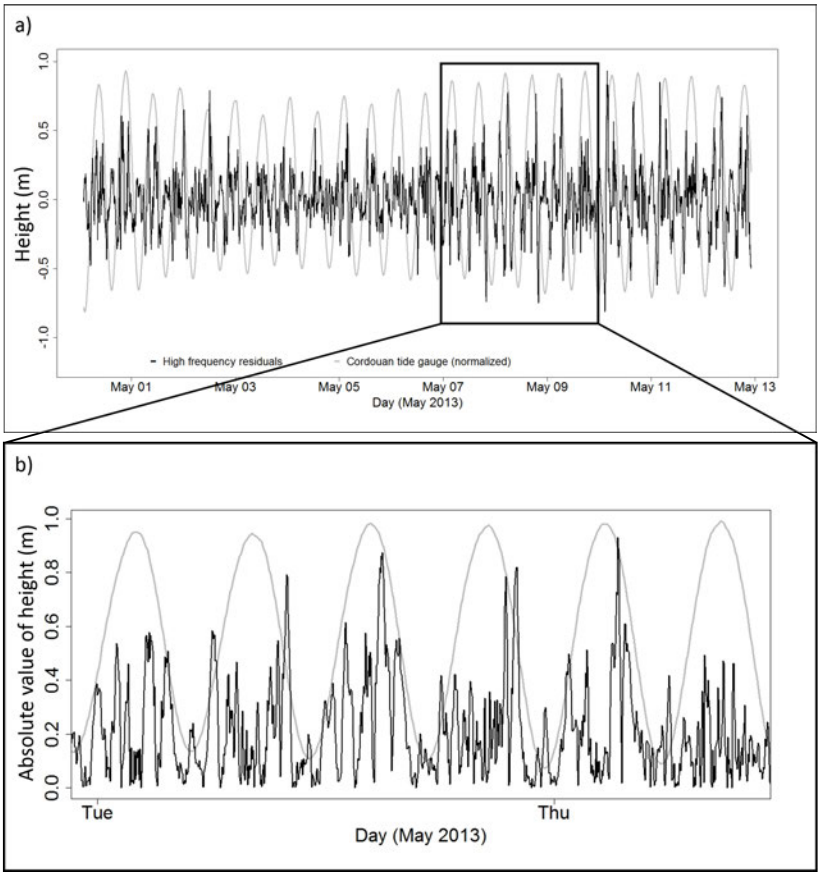


FIGURE 5.11 – Signal haute fréquence (période < 6 h) extrait de l'estimation du niveau d'eau par la méthode SNR dynamique du 28 avril au 13 mai 2013.
Les enregistrements du marégraphe de Cordouan ont été normalisés et sont représentés en gris sur la figure.

Cette composante haute fréquence a une amplitude moyenne de 17 cm, et atteint une valeur maximale de 93 cm : voir figure 5.11. Comme on a pu le voir dans le paragraphe 5.3.5 page 118, la précision altimétrique de la méthode est meilleure que décimétrique. Donc l'origine de ce signal haute fréquence ne peut pas être attribuée uniquement à du bruit, mais plus probablement à un phénomène géophysique. L'amplitude de ce signal est généralement élevée durant les marées hautes, et faible durant les marées basses (< ~ 30 cm), ce qui suggère que la dynamique des vagues est liée à ces perturbations. En effet, comme commenté au paragraphe 5.4.1, les vagues ont de fortes amplitudes à marée haute, et la mer est beaucoup plus plate à marée basse.
Par conséquent, j'ai estimé l'amplitude moyenne $\bar{A}$ du signal haute-fréquence à chaque marée haute (c'est à dire durant les intervalles de temps où les enregistrements du marégraphe

de Cordouan étaient plus hauts que la valeur moyenne sur la période de 2 semaines). La corrélation linéaire entre la série temporelle $\bar{A}(t)$ et la hauteur significative des vagues SWH est de 0.60 sur les 2 semaines d'acquisitions. Cette valeur, bien que relativement faible, laisse supposer que les vagues sont bien liées à cette composante haute fréquence.

5.5.4 Comparaison entre les méthodes SNR *statique* et SNR *dynamique*

Il apparaît intéressant de comparer les résultats obtenus avec la méthode *SNR dynamique* présentée dans ce chapitre, et ceux que l'on aurait obtenu avec l'*SNR statique* classiquement utilisée. Pour rappel :

– l'SNR statique classique néglige $\dot{h}$, les variations de h au cours du temps, dans l'équation 5.1 ;
– dans l'SNR statique, l'inversion est réalisée individuellement pour chaque satellite et un seuil d'angle d'élévation maximum est fixé à 40°.

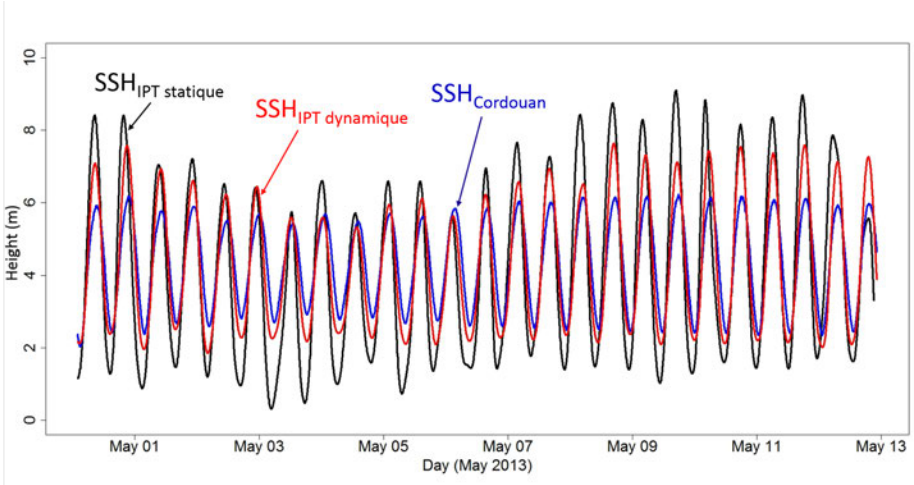


FIGURE 5.12 – Estimations du niveau de la mer calculées par la méthode SNR statique classique (en noir) et par la méthode SNR dynamique (en rouge), comparées aux enregistrements du marégraphe de Cordouan (en bleu).

Afin d'être le plus objectif possible, la méthode SNR statique a été appliquée en utilisant la même taille de fenêtre mobile que pour l'SNR dynamique (à savoir 4000 s) et le même taux d'échantillonnage (à savoir 5 min), et un filtre passe-bas be Butterworth (Butterworth, 1930) à été appliqué dans les deux cas, en supprimant les signaux de périodes inférieures à 6 h.

Le tableau 5.4 et la figure 5.12 montrent les résultats obtenus sur une période de 15 jours d'acquisition.

La corrélation linéaire obtenue entre la méthode SNR statique et le marégraphe de Cordouan est de 0.82, c'est à dire 0,15 de moins qu'avec l'SNR dynamique (0,97), et l'erreur moyenne quadratique est environ 2,5 fois supérieure (1,52 m au lieu de 0,63 m).

TABLE 5.4 – Comparaison des résultats des méthodes *SNR statique* et *SNR dynamique*, par rapport aux enregistrements du marégraphe de Cordouan du 28 avril au 13 mai 2013.

Marégraphe de Cordouan comparé à	SNR statique	SNR dynamique
R	0.82	0.97
EQM (m)	1.52	0.63
Biais (m)	0.22	0.01

5.6 Conclusions et perspectives

J'ai montré dans ce chapitre qu'il est possible d'estimer les variations du niveau de la mer à proximité d'une antenne géodésique en analysant simplement les oscillations du SNR quotidiennement enregistré : c'est l'Interference Pattern Technique. Cette technique, dans sa version classique, est jusqu'à maintenant limitée à des situations où la vitesse de variation $\dot{h}$ de la hauteur de la surface analysée doit être quasi-nulle pour être négligeable. Je propose de prendre en compte ce paramètre $\dot{h}$ dans l'ajustement de la variation de la hauteur de la surface marine. De plus, je propose aussi une amélioration du processus de calcul, basée sur la combinaison des mesures effectuées sur tous les satellites visibles simultanément, qui permet de s'affranchir de cette limite. Les résultats montrent que les périodes de marées astronomiques sont parfaitement retrouvées, et la corrélation avec un marégraphe indépendant passe de 0.82 à 0.97. La hauteur des vagues a également pu être observée par cette technique via le biais qu'elles engendrent sur l'estimation du niveau de la mer. La résolution temporelle des estimations est de 5 minutes et la zone couverte par les mesures est un disque de diamètre d'environ 7 km. La réflectométrie GNSS est donc une alternative performante et un complément non négligeable aux techniques de mesure actuelles puisqu'elle fait le lien entre les différentes résolutions spatio-temporelles actuellement atteintes par les outils classiques (i.e., mesures ponctuelles et continues pour un marégraphe, ou couvrant une large zone mais faible répétitivité pour des altimètres classiques).
La prochaine étape pourrait être la sectorisation des signaux par intervalles d'azimuth, afin de spatialiser les estimations de hauteur d'eau autour de l'antenne. Cette sectorisation a déjà été tentée par, e.g., Rodriguez-Alvarez *et al.* (2009b, 2011b) pour corriger l'effet de la topographie sur les estimations de l'humidité du sol par IPT. La prise en compte de l'ensemble des constellations GNSS en développement, mais également de l'ensemble des fréquences d'émission devrait permettre d'augmenter le nombre d'observations par laps de temps, et donc de compenser le manque de données induit par la sectorisation. Cette spatialisation des mesures pourrait permettre notamment de surveiller le déplacement des bancs de sable à marée basse, ou d'analyser la géométrie des vagues, en déduisant l'orientation de leur front d'onde des mesures SNR.
L'annexe D page 222 est une analyse théorique de la période des oscillations observées dans la série temporelle du SNR. Cette étude permet l'optimisation de la durée d'une session et de la fréquence d'acquisition du SNR pour des applications altimétriques. Elle met également en évidence le fait qu'au-delà de 750 m d'altitude, les oscillations du signal SNR sont trop rapides (période inférieure à la seconde) pour être observées avec une acquisition classique à 1 Hz. L'altimétrie basée sur l'inversion du SNR apparait donc plutôt compromise pour des systèmes embarqués et reste pour l'instant limitée à des mesures in situ.

5.7 *Article publié* : RSE 2015 - Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver

Remote Sensing of Environment 171 (2015) 261–277

Contents lists available at ScienceDirect

Remote Sensing of Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse

Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver

Nicolas Roussel [a,b,*], Guillaume Ramillien [a,b], Frédéric Frappart [a,b], José Darrozes [a,b], Adrien Gay [b], Richard Biancale [a,b,c], Nicolas Striebig [b,d], Vincent Hanquiez [e], Xavier Bertin [f], Damien Allain [g]

[a] Université Paul Sabatier, CNRS, IRD, GET-OMP, 31400 Toulouse, France
[b] Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, 31400 Toulouse, France
[c] Centre National d'Etudes Spatiales, 31400 Toulouse, France
[d] Groupe d'Instrumentation Scientifique, OMP, 31400 Toulouse, France
[e] Université de Bordeaux, CNRS, UMR 5805 EPOC, 33615 Pessac, France
[f] Université de la Rochelle, CNRS, UMR 7266 LIENSs, 17000 La Rochelle, France
[g] Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, OMP, 31400 Toulouse, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 26 May 2015
Received in revised form 8 October 2015
Accepted 21 October 2015
Available online xxxx

Keywords:
GNSS-R
SNR
Multipaths
Remote sensing
Sea level
Wave and tide gauge

ABSTRACT

GNSS-Reflectometry (GNSS-R) altimetry has demonstrated a strong potential for sea level monitoring. Interference Pattern Technique (IPT) based on the analysis of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) estimated by a GNSS receiver, presents the main advantage of being applicable everywhere by using a single geodetic antenna and receiver, transforming them to real tide gauges. Classical SNR analysis method used to estimate the variations of the reflecting surface height $h(t)$ has a limited domain of validity due to its variation rate $\frac{dh}{dt}(t)$ assumed to be negligible. We present here a significant advance in this altimetric methodology using GNSS multipath to conjointly estimate $h(t)$ and $\frac{dh}{dt}(t)$ over areas characterized by high amplitudes of tides and presence of waves. It drastically enhances the temporal and spatial monitoring of tides and waves. Inversion approach is based on a Least Square Method (LSM), combining simultaneous measurements from different GNSS constellations (GPS, GLONASS). Our method is validated with SNR data acquired on an offshore site of 60-meter height, in conditions were assumptions of the classical SNR analysis method are not valid (i.e. with a semi-diurnal tide amplitude of ~4 m, vertical velocity of the sea surface due to tide reaching 0.2 mm/s, and presence of waves with amplitude up to few meters). Linear correlation between the estimates with our method and tide gauges records are better than 0.97, whereas it only equals 0.82 with the classical method over the whole 3 months of acquisition. Our dynamic SNR method allows a very good estimate of the main tide periods and permits to detect swell and waves with realistic amplitudes and periods, which is not the case with tide gauges (located in protected areas) or classical SNR analysis method.
© 2015 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

Coastal areas concentrate most of the economic activities and urbanization around the world. 37% of the world population was living in a band of one hundred kilometer width along the coast in 1997 (Cohen et al., 1997) and the rate of population growth in coastal areas is accelerating and increasing tourism adds pressure on the environment (UN, 2010). Although coastal ecosystems are among the most productive in the world, they are also highly threatened (Duraiappah et al., 2005). Coastal areas will be exposed to increasing natural hazards in the coming years, such as storms and sea level rise that will cause floods, erosion, ecosystem losses, human, social and economic issues (Nicholls et al., 2007). Although radar altimetry is a powerful technique used for the monitoring of the sea surface topography over the open ocean (e.g., Ablain, Cazenave, Valladeau, and Guinehut (2009)) and the study of the ocean circulation (e.g., Le Traon and Morrow (2001)), its use is difficult close to the coasts as its spatial and temporal resolutions are inadequate to observe the complex and fast changing dynamics of the ocean close to the shore (e.g., Bouffard et al. (2011)). For the same reason, radar altimetry is unable to provide information on swell and waves with a sufficient spatio-temporal sampling. A new technique known as GNSS Reflectometry (GNSS-R) and based on the analysis of the GNSS signals reflecting on the sea surface appeared during the last decades. Spatio -and/or temporal- variations of sea levels were recorded with an accuracy of a few cm using such a technique from ground-based or air-borne acquisitions (e.g., Lowe et al., 2002; Ruffini, Soulat,

* Corresponding author at: OMP, Bureau H137 — PAE, 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France.
E-mail addresses: nicolas.roussel@get.obs-mip.fr (N. Roussel), guillaume.ramillien@get.obs-mip.fr (G. Ramillien), frederic.frappart@get.obs-mip.fr (F. Frappart), jose.darrozes@get.obs-mip.fr (J. Darrozes), adrien.gay.3@gmail.com (A. Gay), richard.biancale@cnes.fr (R. Biancale), nicolas.striebig@obs-mip.fr (N. Striebig), v.hanquiez@epoc.u-bordeaux1.fr (V. Hanquiez), xavier.bertin@univ-lr.fr (X. Bertin), damien.allain@legos.obs-mip.fr (D. Allain).

http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.011
0034-4257/© 2015 Elsevier Inc. All rights reserved.

Caparrini, Germain, & Martin-Neira, 2004; Löfgren, Haas, Scherneck, & Bos, 2011; Semmling et al., 2011; Rius et al., 2012).

Interference Pattern Technique (IPT) for altimetric applications have first been reported by Anderson (1995). Cardellach, Ao, de la Torre Juarez, and Haji (2004) also used interferometric patterns to infer surface height from Low Earth Orbiter, based on both phase and Signal-to-Noise Ratio (SNR) measurements. GNSS-R tide gauge is a concept based on the use of either a single antenna which will assess GNSS reflected signals through SNR measurement, or two antennas: the first one up-looking to track the direct signal, and the second one down-looking to record the reflected signal. We propose here a significant improvement of the first method based on the analysis of the SNR of a classical geodetic antenna (Larson et al., 2008), which drastically improves the temporal and spatial monitoring of tides and waves.

Our study is presented in four main parts. The first section is a state of the art of the GNSS-R techniques, mostly focusing on the SNR-based retrieval of sea surface height. A more detailed presentation of the various GNSS-R applications can be found in Cardellach et al. (2011). Section 3 presents the dynamic SNR method we use to retrieve water levels from SNR data in extreme conditions where classical method cannot be used. This dynamic SNR method is tested with in situ data and Section 4 describes the experimental setup and ground truth data generated during the experimental campaign. Last section analyzes the results of this campaign by comparing them to independent data used as validation.

2. State of the art

2.1. GNSS-R techniques

The Global Navigation Satellites System (GNSS) provides autonomous geo-spatial positioning with global coverage thanks to more than 50 satellites from different constellations (the American Global Positioning System GPS, the Russian GLObalnaïa NAvigatsionnaïa Sistéma GLONASS,...) emitting continuously L-band microwave signals. Along with the space segment development (Galileo advent, COMPASS-Beidou development,...), the processing techniques have also been widely improved, with a better understanding and consideration of the various sources of error in the processing. Among them, multipaths still remain one of the major problems that degrade the accuracy of GNSS measurements, and the mitigation of their influence has been widely investigated (e.g., Bilich, 2006). Previous studies show that multipaths can be related to properties of the reflecting surface Martin-Neira, 1993. This opportunistic remote sensing technique, known as GNSS reflectometry (GNSS-R), is based on the analysis of the electromagnetic signals emitted continuously by the GNSS satellites and detected by a receiver after reflection on the Earth's surface. The time delay between the reception of the direct and reflected signals is directly correlated to the difference in height between the receiver and the reflecting surface. This information can be retrieved analyzing the temporal evolution of the reflected signal power known as waveforms through code- (e.g., Carreno-Luengo, Camps, Ramos-Perez, & Rius, 2014; Yu, Rizos, & Dempster, 2014) and phase-delay measurements (e.g., Semmling et al., 2012; Treuhaft, Lowe, Zuffada, & Chao, 2001). One of the major advantage of such a technique is the dense spatial and temporal coverage of the reflection points (e.g., Roussel et al., 2014), which is not only limited to a single measurement point or a non-repetitive transect as what is classically done using GNSS-equipped buoys. With the development of the geo-positioning applications, the GNSS constellations become denser and denser and a guarantee of service is ensured for the next decades.

Previous studies showed that the best accuracy is obtained with the waveforms analysis through phase-delay measurement (e.g., Treuhaft et al., 2001). Nevertheless, phase-delay measurements are only possible if the reflection is coherent. This will not work in general from airborne altitudes (or higher) over the Ocean but only over smooth sea-ice, ice sheets, and some calm water. The inversion algorithms to retrieve the receiver height from waveforms for a given epoch require a significant computing power with a huge amount of data to analyze. Interference Pattern Technique (Anderson, 1995), applied to the SNR analysis, provides, in theory, slightly worse results but the data treatment is simpler and a single classical GNSS receiver and antenna is sufficient for acquisition (Larson, Löfgren, & Haas, 2013; Löfgren, 2014).

2.2. SNR analysis: classical method

While major part of the emitted signal is received directly in the zenith-looking hemisphere of the antenna, a minor part of it comes from below the horizon, after one or several reflections in the surrounding environment (Fig. 1). These so-called multipath signals interfere with the direct wave and affect the GNSS measurements recorded by the receiver by adding new frequencies. Geodetic GNSS antennae are thus designed to reduce the contribution of the multipath which degrade the accuracy of the position determination. A typical example of this type of antenna is the "choke ring" antenna which drastically reduces multipath signals that come from near or below the horizon by reflecting them thanks to frequency-tuned rings.

Classical GNSS antennae also use the polarization properties of the GNSS signals to filter out part of the reflected waves. The waves emitted by GNSS satellites are L-band microwaves (e.g. $L1_{GPS} = 1575.42$ MHz, $L2_{GPS} = 1227.60$ MHz) and Right-Hand Circularly Polarized (RHCP). But its polarization may change upon reflection depending on the reflector type (i.e., reflection coefficient) and the incidence angle (the angle at which the signal reaches the reflector). For satellite elevation angles below a particular value named Brewster angle (8° for sea water according to Hannah, 2001), the predominant signal component after reflection is the co-polar, or the RHCP, and hence the result is right-hand elliptical polarization. Conversely, for elevation angles greater than the Brewster angle, the predominant signal component is the cross-polar, or LHCP, and hence the result is left-hand elliptical polarization. GNSS geodetic antennas are thus designed to attenuate LHCP signals to reduce effects of multipaths. GNSS antennas radiation pattern focuses the antenna gain for RHCP signals towards zenith and decreases the gain with decreasing elevation angle.

These filtering techniques affect the total received signal by reducing the reflected signals amplitude with respect to the direct signal amplitude. It is however well-known that the energy of the reflected signal is not completely dampened. The lower the satellite elevation angle is, the larger the contribution of the reflected signal is.

The effect of multipath reflection clearly affects SNR data recorded by GNSS receivers (Löfgren, 2014) on the different frequencies:

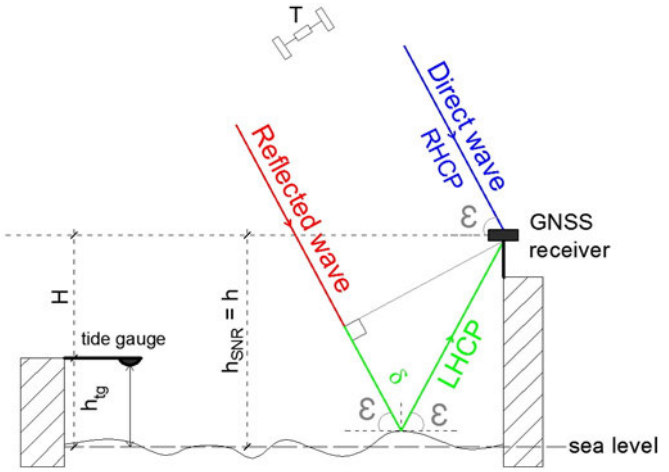


Fig. 1. Principle of GNSS tide gauge using a single GNSS antenna. ε : satellite elevation angle, δ: additional path covered by the reflected way (green line). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

e.g., on L1 C/A code (S1C) or L2 precise code (S2P) for instance. SNR can be related to the coherent addition of direct and reflected GNSS signals in the receiving antenna.

Following Larson et al. (2008), instantaneous SNR is described by:

$$SNR^2 = A_d^2 + A_m^2 + 2A_dA_m\,cos(\psi) \quad (1)$$

where A_m and A_d are the amplitudes of the multipath and direct signal respectively, and ψ the phase difference between the two signals. Since (i) GNSS antennas are designed to filter reflected signals, and (ii) the reflected signal is attenuated upon reflection, we can assume that $A_m \ll A_d$. SNR can thus be approximated by:

$$SNR^2 \approx A_d^2 + 2A_dA_m\,cos(\psi) \quad (2)$$

Eq. (2) shows that overall magnitude of the SNR is large and mainly driven by the direct signal. The reflected signal will affect the SNR by producing a high frequency associated with small amplitude perturbation w.r.t the direct signal. The reflected signal perturbations will mainly be visible for low satellite elevation angles (Löfgren et al., 2011).

According to Bishop and Klobuchar (1985) and Georgiadou and Kleusberg (1988), and assuming a planar reflector which corresponds to sea water, the relative phase angle can be derived geometrically from the path delay δ of the reflected signal:

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{4\pi h}{\lambda}\,sin(\varepsilon) \quad (3)$$

with λ the signal wavelength, ε the satellite elevation and h the distance between the antenna phase centre and the reflecting surface (i.e. the receiver height): see Fig. 1. From Eq. (3) it is possible to derive the frequency of the multipath oscillations:

$$f_\psi = \frac{d\psi}{dt} = \frac{4\pi\dot{h}}{\lambda}\,sin(\varepsilon) + \frac{4\pi h}{\lambda}\,cos(\varepsilon)\,\dot{\varepsilon} \quad (4)$$

$\dot{h}$ $(=\frac{dh}{dt})$ defines the vertical velocity and $\dot{\varepsilon}$ $(=\frac{d\varepsilon}{dt})$ defines the elevation angle velocity. Eq. (4) can be simplified by making a change of variable $x = \sin(\varepsilon)$. We thus obtain:

$$\tilde{f} = \frac{d\psi}{dx} = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\dot{h}\,\frac{tan(\epsilon)}{\dot{\epsilon}} + h\right) \quad (5)$$

Eq. (5) shows that, in a static or quasi- static case ($\dot{h} \simeq 0$), this frequency $\tilde{f}$ of the multipath oscillation is constant and directly proportional to the receiver height above the reflecting surface. Measuring $\tilde{f}$ variations can lead to determine h, the antenna height above the receiving surface, and thus to the sea surface variations for each time interval. Nevertheless, if $\dot{h}$ can not be neglected, the frequency depends on the satellite elevation angle ε, the satellite elevation angle velocity $\dot{\varepsilon}$, as well as the vertical velocity between the antenna and the reflecting surface $\dot{h}$. If the two former terms are known, the knowledge of $\dot{h}$ is an important parameter and must be considered as unknown in most cases. This situation leads to an under-determined system of equations. Most of the SNR studies conducted until now were done in conditions such as $\dot{h}$ could be neglected (Larson et al., 2013; Löfgren, Haas, & Scherneck, 2014). For instance, when Löfgren and Haas (2014) compared sea level solutions from SNR and phase-delay analysis in a fjord where only tides are sensitive, the change in the receiver height was around a few tens of centimeters over 3 days of observation, and $\dot{h}$ was then negligible from an instant to another. However, in many cases, this assumption is not reasonable due to waves with significant height which make $\dot{h}$ drastically increase. High tide amplitudes over a short period of time is also susceptible to produce high $\dot{h}$ values. Löfgren et al. (2014) suggested to take $\dot{h}$ into account by doing two iterations: the first one neglecting it and the second one integrating an estimation of $\dot{h}$ from sinusoidal functions fitted to the reflector height series obtained with the first iteration. The underlying idea was that, during one day, the most significant contribution to the changes in sea level height comes from the diurnal and semi-diurnal tides with known frequencies. This method increased the accuracy of the results, however it needs a previous knowledge of the phenomenon susceptible to influence the receiver height in the region under study. Larson et al. (2013) proposed a similar method, also based on two iterations: the first iteration is done determining h without integrating $\dot{h}$; $\dot{h}$ is then estimated from this coarse $h(t)$ time series to produce height corrections. Unfortunately, this method can only work for small $\dot{h}$ values and not for measurement sites with significant waves for instance (e.g., offshore sea level measurements). In our study, we propose a new method to simultaneously estimate h and $\dot{h}$ (see Section 3): the dynamic SNR method. Our approach will be tested in the conditions of important sea surface variations (i.e., SNR measurements made at the top of an offshore lighthouse), where both tides and waves are present and the assumption of $\dot{h}$ being negligible is not satisfied (see Section 4.1).

3. General form of the dynamic SNR method

This section presents the methodology developed to simultaneously estimate h and $\dot{h}$ when facing important dynamic cases ($\dot{h} \neq 0$). The methodology is based on the determination of the time series $\tilde{f}(t)$ of the frequency of the multipath oscillations from the SNR data of each GNSS satellite. Using the $\tilde{f}(t)$ of several satellites visible at the same time, it is possible to build an over-determined equations system based on Eq. (5) considering only two unknown parameters: h and $\dot{h}$. Such a linear system of equations can be solved using a classical Least Square Method (LSM) adjustment.

This algorithm of estimation is detailed hereafter, and is composed of four main steps presented in a flow chart in Fig. 2:

1. Preprocessing and removal of the direct signal contribution in the raw SNR observations.
2. Windowing and optimization of the moving windows parameters.

Determination of the frequency of the multipath oscillations $\tilde{f}(t)$ from the reduced SNR time series by harmonic analysis.

Determination of $h(t)$ conjointly to $\dot{h}(t)$, that are directly linked to the sea level (Fig. 1).

3.1. Preprocessing and removal of the direct signal contribution

Due to hardware cutoff in conventional geodetic receivers, SNR is not continuously estimated (or not) as the same sampling as the data used for positioning. Hence many records are missing in the SNR time series. To reduce these effects, the following conditions are imposed:

- length of the SNR time series needs to be greater than 300 s.
- SNR data are temporally interpolated when the gaps in the record are lower than 10 s. If SNR values are missing over a longer time period, they are processed as two distinct independent sequences.

These values were adjusted experimentally to provide lowest Mean Squared errors in the results from the LSM resolution criteria (see Section 3.4).

As presented in Fig. 2, the direct signal is more powerful in the SNR time series for a long time period and corresponds to the main low frequency, whereas the multipath signals cause small amplitude perturbations at high and medium frequencies. To determine the frequency

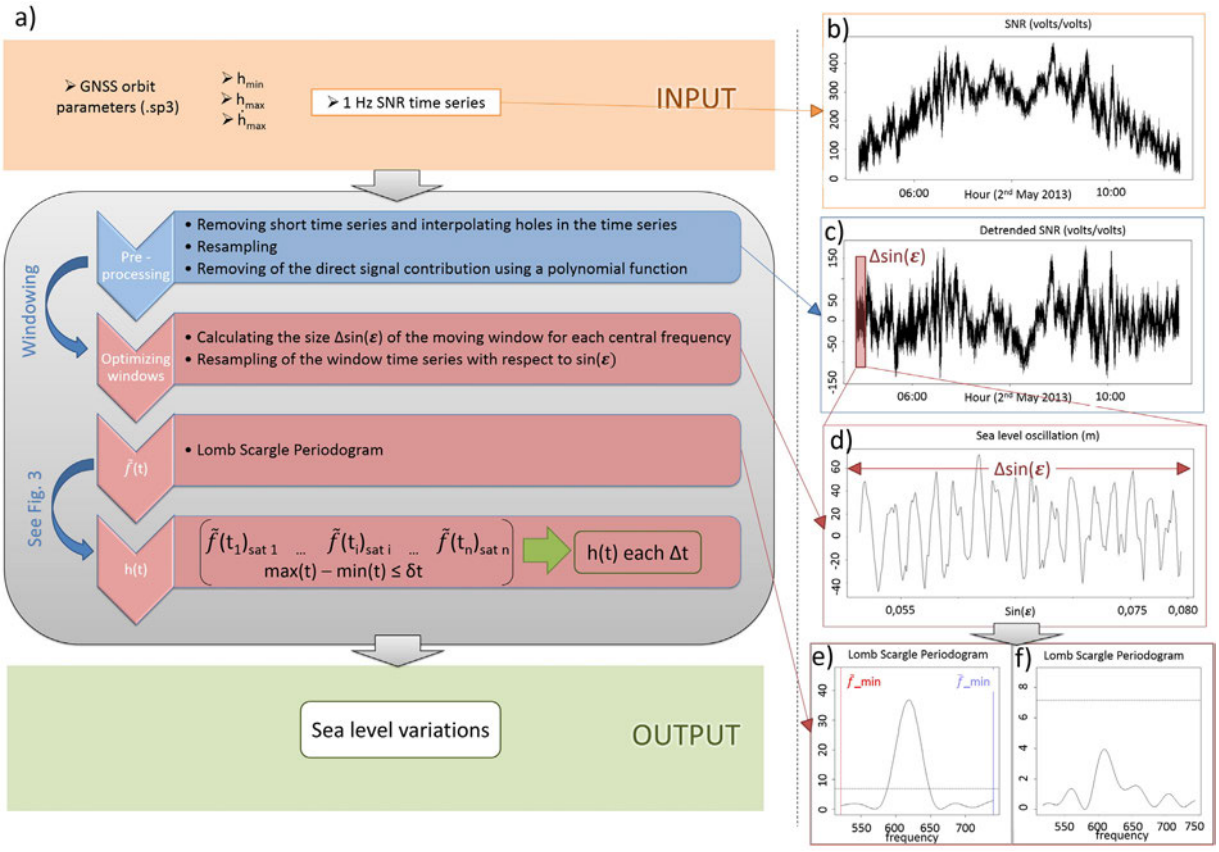


Fig. 2. Processing chain. Time series are from the GPS satellite PRN23 the 2nd May 2013. a) Flow chart presenting the processing of the SNR data: the input, the different steps of the processing, and the output; b) Example of raw SNR data time series (input); c) Example of SNR detrended data time-series; d) Zoom on SNR detrended data against sin(ε); e) and f) Examples of Lomb-Scargle Periodograms of the SNR detrended data. (e) The LSP presents a peak ranging between f_{min} and f_{max} and reaching statistical significance at an error probability equal to 0.01 (Ruf, 1999). (f) The LSP does not present a peak reaching statistical significance at an error probability equal to 0.01 (Ruf, 1999) and is thus rejected.

$\tilde{f}(t)$ of the multipath oscillations necessary to solve Eq. (5), this direct signal contribution must be removed from the raw SNR profile. Bilich (2006) proposed to remove the direct signal effect through gain pattern modeling. This method requires the knowledge of the gain patterns of both the receiving antenna of the GNSS receiver and the emitting antenna of the GNSS satellite. As the information is difficult to obtain, Larson et al. (2008) suggested to fit a simple low-order polynomial to the SNR time series and to substract it from the starting SNR data to isolate the variations due to multipath. As this later method yields better results than the modeling one (Bilich, 2006), we adopted it and removed a second-order polynomial from the SNR time series.

3.2. Windowing of the time series

The frequency of the multipath oscillations $\tilde{f}(t)$ in the SNR time series is determined using a Lomb Scargle Periodogram: LSP (Lomb, 1976; Scargle, 1982) computed with a moving window of 5 min width (see Section 3.3). Five minutes correspond to the classical tide gauges sampling (see §2.4). The analysis is not directly performed on $SNR = f(t)$ but on $SNR = f(\sin(\varepsilon))$ as in Eq. (5).

The choice of the length of the moving window is critical as it should be large enough to get a precise determination of $\tilde{f}(t)$. But the size of the analysis window must not be too large so that the frequency of the oscillations remains quasi-constant over this window. Let $\Delta(\sin\varepsilon)$ be the size of the moving-average window. To find the suited size $\Delta(\sin\varepsilon)$ around each central value, an a priori coarse knowledge of the parameters under determination is mandatory. We choose to consider the following three parameters as known by the user:

- $h_{\min}$: the minimum height above the reflecting surface the receiver is susceptible to reach during the observation period.
- $h_{\max}$: the maximum height above the reflecting surface the receiver is susceptible to reach during the observation period.
- $\dot{h}_{max}$: the absolute maximum vertical velocity of the reflecting surface (rate of change of the receiver height).

The more precise the knowledge of these three values is, the faster the determination of $\tilde{f}$ will be. From these three values, expected $\tilde{f}_{min}$ and $\tilde{f}_{max}$ are estimated for each central value, based on Eq. (5). In order to get the largest moving window through which the frequency could be considered as constant, and to describe enough variations of SNR within the chosen window, the following two conditions are considered:

$$\frac{\Delta\tilde{f}_{max}}{\tilde{f}_{min}} \le p \tag{6}$$

$$\frac{N_0}{\tilde{f}_{min}} < \Delta(\sin(\varepsilon)) \tag{7}$$

With p the maximal variation of $\tilde{f}$ (in %) accepted within the moving window, N_0 the minimal number of observed periods within the moving window (needed to get a good estimate of $\tilde{f}$), and $\Delta\tilde{f}_{max}$ is the

maximal variation over time of the frequency. $\Delta\tilde{f}_{max}$ and $\tilde{f}_{min}$ will be different for each moving window because the mean elevation and elevation rate will differ for each window.

$\Delta\tilde{f}_{max}$ is computed from Eq. (5) as follows:

$$\frac{d\tilde{f}}{dt} = \frac{2}{\lambda}\left(\dot{h} + \frac{\ddot{h}\tan(\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}} + \frac{\dot{h}}{\cos^2\varepsilon} - \frac{\dot{h}\ddot{\varepsilon}\tan\varepsilon}{\dot{\varepsilon}^2}\right) \tag{8}$$

By replacing dt by the variation of the sinus of the elevation angle we obtain:

$$\frac{d\tilde{f}}{d(\sin\varepsilon)} = \frac{d\tilde{f}}{dt}\frac{dt}{d(\sin\varepsilon)} = \frac{d\tilde{f}}{dt}\frac{1}{\dot{\varepsilon}\cos\varepsilon} \tag{9}$$

Considering the maximal value $\dot{h} = \dot{h}_{max}$ and $\ddot{h} = 0$ inside the moving window, we obtain:

$$\frac{\Delta\tilde{f}_{max}}{\Delta(\sin\varepsilon)} \le \left|\frac{2}{\lambda\dot{\varepsilon}\cos\varepsilon}\right|\left(\dot{h}_{max} + \left|\frac{\dot{h}}{\cos^2\varepsilon}\right| + \left|\frac{\dot{h}\ddot{\varepsilon}\tan\varepsilon}{\dot{\varepsilon}^2}\right|\right) \tag{10}$$

We thus estimate an optimized size $\Delta(\sin\varepsilon)$ of moving-average window guaranteeing to have at least ten periods of a quasi-constant frequency. This size is not constant over the whole time series and is re-estimated for each increment.

In most of the previous studies, $\dot{h}$ was negligible and numerically neglected. But if we consider the culmination of a satellite pass, $\dot{\varepsilon}$ will tend to zero, hence the correction term $\frac{\dot{h}}{\dot{\varepsilon}\tan(\varepsilon)}$ tends to infinity, as well as the corresponding frequency $\tilde{f}$ tends to infinity. This issue was not previously settled as the parts of the time series likely to be concerned were removed when the elevation angle was above 30° or 40°. The criteria defined in the present study permits to filter the indeterminable frequencies in a systematic and far much accurate way.

3.3. Determination of the frequency $\tilde{f}$ of the multipath oscillations

After the removal of the direct signal contribution using the polynomial approach defined by Larson et al. (2008), we obtain a signal whose frequency is described by Eq. (5). The precise determination of this frequency is crucial for the determination of the sea level variations. This frequency is not stationary because of the time variations of the parameters h, $\dot{h}$, ε and $\dot{\varepsilon}$. As in recent studies (Larson et al., 2013), this dominant frequency is estimated using the LSP which seems to be a well-adapted solution. A LSP is thus applied for each moving-average window (see Section 3.2). Thanks to the knowledge of h_{min}, h_{max} and $\dot{h}_{max}$, the theoretical value of $\tilde{f}_{min}$ and $\tilde{f}_{max}$ can be determined. It is thus not anymore necessary to consider the whole spectra of the signal under study, but it is sufficient to only consider frequencies between $\tilde{f}_{min}$ and $\tilde{f}_{max}$ to compute the LSP and identify the main peak. Only periodograms peaks reaching statistical significance with an error probability equals to 0.01 (Ruf, 1999) and defining a local maximum between $\tilde{f}_{min}$ and $\tilde{f}_{max}$ are retained.

3.4. Height and height change determination

Once $\tilde{f}(t)$ is accurately estimated for each satellite in sight of the receiver, $h(t)$ can be obtained by inverting Eq. (5). The solution presented in this study is obtained by the combination of the measurements from all the available GNSS satellites insight at a given epoch to determine conjointly $h(t)$ and $\dot{h}(t)$ using a classical LSM resolution.

Let $\tilde{f} = \frac{d\psi}{dx}$, $U = \frac{4\pi\tan(\varepsilon)}{\lambda\dot{\varepsilon}}$, and $V = \frac{4\pi}{\lambda}$. Eq. (5) related to satellite i at the instant t becomes:

$$\tilde{f}_i(t) = U_i\dot{h}(t) + V_i h(t) \tag{11}$$

where $\tilde{f}_i(t)$ is the frequency of the multipath oscillations, with respect to the sine of the satellite elevation angle ε. Combining all the satellites visible at each moment t, a system of linear equations is obtained:

$$\begin{pmatrix} \tilde{f}_1(t) = U_1\dot{h}(t) + V_1 h(t) \\ \tilde{f}_2(t) = U_2\dot{h}(t) + V_2 h(t) \\ \tilde{f}_3(t) = U_3\dot{h}(t) + V_3 h(t) \\ \cdots \end{pmatrix} \tag{12}$$

or equivalently in terms of matrix:

$$\tilde{F} = U\dot{h}(t) + Vh(t) = AX \tag{13}$$

with $A = (U\ V)$ and $X = \begin{pmatrix} \dot{h}(t) \\ h(t) \end{pmatrix}$.

Eq. (13) is solved with the LSM at each time step t for conjoint determination of $h(t)$ and $\dot{h}(t)$ as follows:

$$X = \left(A^t A\right)^{-1}\left(A^t \tilde{F}\right) \tag{14}$$

All GNSS satellites from the different constellations (GPS, GLONASS,...) are likely combined in this over-determined system.

The main challenge is to find the correct time interval Δt between each estimation and also the length δt of the moving window (see

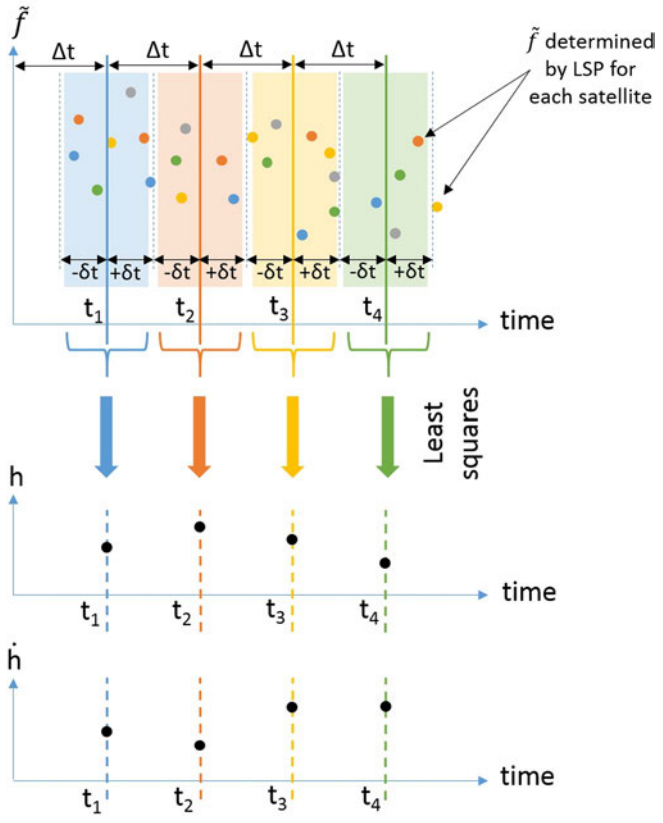


Fig. 3. Principle of the Least Squares inversion Method used to determine h and $\dot{h}$ based on LSP estimates of f. For reasons of clarity, overlapping was not represented in this figure, even if in our case $\delta t > \Delta t$.

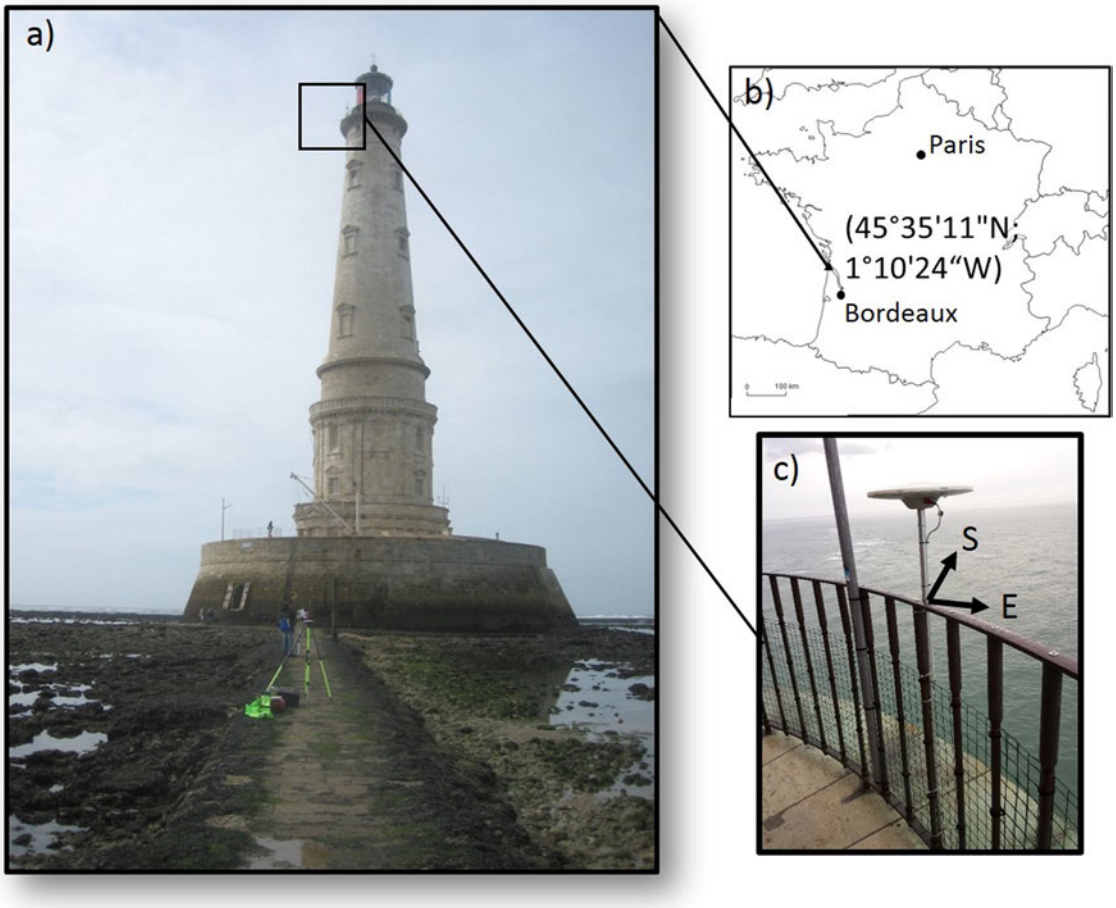


Fig. 4. Trimble Zephyr Geodetic 2 antenna with Trimble NetR9 receiver on top of Cordouan lighthouse at approx. 60 m above sea level (a). The Cordouan lighthouse (45°35′11″N; 1°10′24″W) is located at the mouth of the Gironde estuary in the South West of France (b). A Trimble NetR9 receiver with a Zephyr Geodetic 2 antenna were installed close to the top of the lighthouse (c).

Fig. 3). Δt and δt must be chosen with attention to have a large enough temporal resolution for h and $\dot{h}$.

The number of satellites observations available decreases with δt, the size of the moving window, and so the accuracy of the determination of h and $\dot{h}$ using LSM. Yet, choosing a too large value for δt causes an inaccurate determination of the unknown parameters since the receiver height would have changed during this interval due to the tide variation. The choice of δt depends on the period of the physical parameters assessed and must then be tuned to reach the best results.

3.5. Filtering of the retrieved sea level time series

As the main goal of our study is to retrieve the main astronomical tide periods (i.e., > 6 hours), the time series $h(t)$ obtained with the

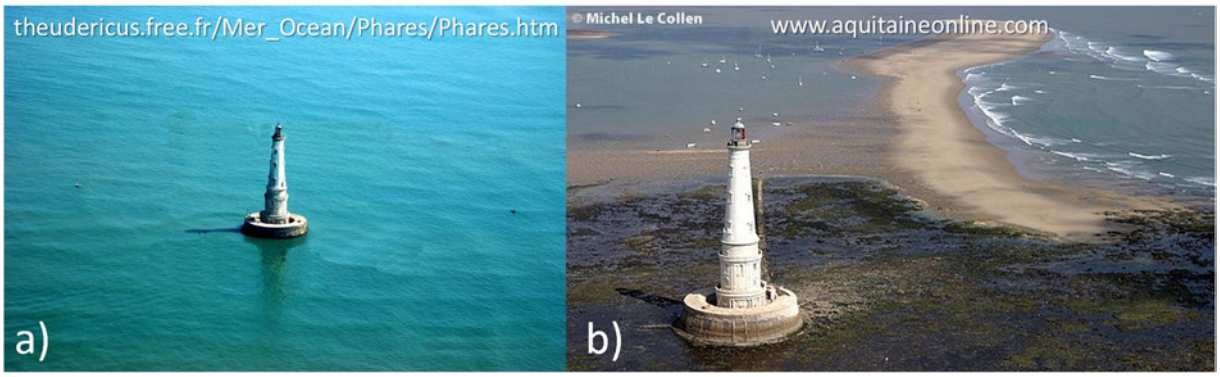


Fig. 5. Cordouan lighthouse at high tide (a) with calm sea, and low tide (b) where main sandbanks are visible.

dynamic SNR method is filtered: all periods below the minimal astronomical tide period (i.e., 6 hours) are considered as noise and removed from the time series. This is achieved by applying a second-order Butterworth low-pass filter (Butterworth, 1930).

3.6. Process validation in a static case

To validate the methodology and to reach the accuracy of the process, a Leica GR25 with an AR10 antenna were installed in the parking

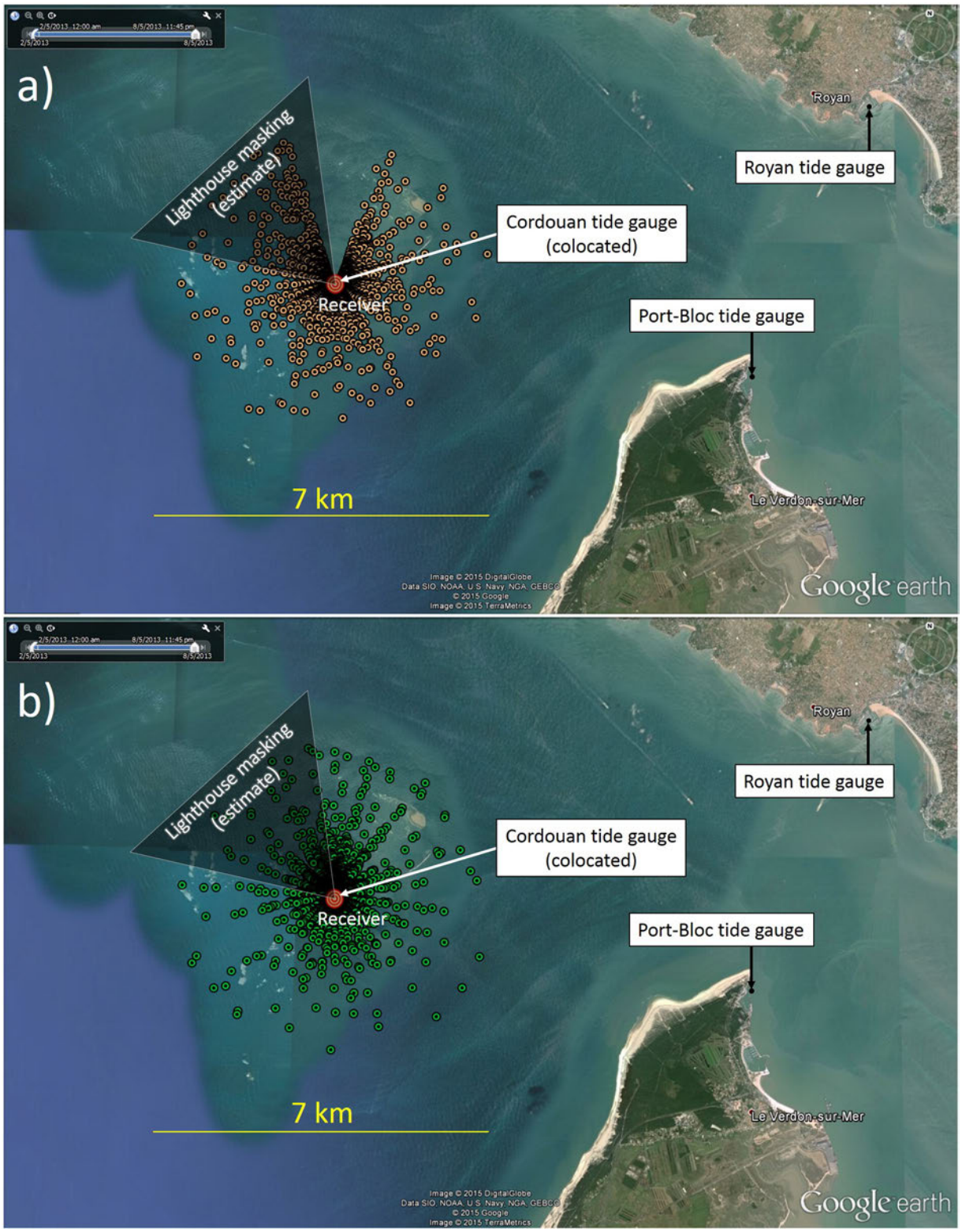


Fig. 6. Locations of the specular reflection points for a GNSS receiver on the top of the Cordouan lighthouse from 2th to 8th May 2013, considering GPS (a) and GLONASS (b) constellations. Simulation results are presented for a 15 min sampling rate (i.e., satellite positions actualized every 15 min). Only GPS (a) and GLONASS (b) satellites with elevation angles greater than 1° were considered.

lot of Observatoire Midi-Pyrénées (Toulouse, France) during four consecutive days from 12 to 15 July 2014. Data were recorded continuously with a 1 Hz frequency, and the S1C SNR data were continuously collected. The receiver height is constant and equal to 1.60 m over the whole period of measurement. Only few cars were parked during the period of acquisition, and except for a small nearby pavement (corresponding to a receiver height equal to 1.40 m), the reflecting asphalt surface can be considered as homogeneous. Only a tree masked the signals coming from the north.

Two different processes were applied to the time series considering:

- a **static SNR method (i.e., the classical method)** neglecting $\dot{h}$ as done by, e.g., Larson et al. (2013). $h(t)$ is directly retrieved from $\tilde{f}(t)$ considering the classical formula $h(t) = \frac{\lambda \tilde{f}(t)}{4\pi}$;
- a **dynamic SNR method (i.e., our new method)**. $h(t)$ is retrieved using the whole methodology presented in §2. As inputs parameters, $h_{\min}$ was set to 1.4 m (to avoid reflections on the pavement), $h_{\max}$ was set to 2 m, and $\dot{h}_{max}$ to 10^{-6} m/s (i.e. 3.6 mm/h).
  The mean receiver height estimated over the whole period and considering the static case ($\dot{h} = 0$) is equal to 1.61 ± 0.10 m and 1.60 ± 0.06 m integrating the $\dot{h}$ determination. The results agree with the given uncertainties.

4. The Cordouan lighthouse experiment

4.1. The measurement site for SNR acquisition

We applied the method presented above to the SNR data acquired with a geodetic antenna set up at ~60 meters above the surface of the Atlantic ocean, at Cordouan lighthouse. Data were continuously acquired from 3 March 2013 to 31 May 2013, i.e. 3 months with the S1C SNR data routinely collected. Satellite coordinates were obtained from the IGS ephemeris final products which provide GNSS orbits with a centimetric precision and clock offset data with a temporal resolution of 15 minutes in the SP3 format for the past epochs (ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/).

The GNSS receiver was installed offshore at the top of the Cordouan lighthouse (45 35′11″N; 1 10′24″W) close to Le Verdon, France (Fig. 4). Cordouan lighthouse is located in the Gironde estuary at 8 km from the shore and is managed by the French "*Subdivision des Phares et Balises*" and the French "*Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde* (*SMIDDEST*)". Typically, variations of the antenna height reached ±4 meters, and the maximum amplitude variation of the semi-diurnal tide reach 0.2 mm/s. At high tides, waves of few-meter high are also susceptible to appear. In such conditions, $\dot{h}$ could not be neglected any more and classical methods neglecting it could not be used.

The close environment around the lighthouse is really heterogeneous and varies drastically with time. Sandbanks around the lighthouse, covered during high tides, emerge as the tides recede. The major one is located between azimuth N50 and N80 s and the second one between N300 s and N330 s. Smaller sandbanks also appears at low tides in the close vicinity of the lighthouse. This particular bathymetry around the lighthouse, coupled with the current effects in the vicinity of the Gironde estuary, modifies the wave behavior around the studied area. If big waves can appear at high tides, the sea surface tends to be really calm as the tide recedes.

Fig. 5 is a photograph of the Cordouan lighthouse at high tide (a), and low tide (b) periods.

4.2. The experimental settings

We use a Trimble NetR9 receiver with a Zephyr Geodetic 2 antennae with a 50 dB ± 2 dB gain (LNA included). The Zephyr Geodetic 2 antenna has a LHCP rejection at boresight of 20 dB minimum. For further information on this Trimble receiver and antenna, please refer to NetR9 User Guide and Zephyr Geodetic 2 datasheet. GPS L1, L2, L2C, L5 frequencies and GLONASS L1 and L2 frequencies were acquired at a 1 Hz frequency with no elevation angle mask. In our study, S1C SNR is used: signal strength on L1 C/A channel (the Coarse/acquisition ranging code, freely available to the public). S1C time series is the one likely to give the best results (Löfgren & Haas, 2014) since the strength of L2 frequency signals are weaker (i.e. lower SNR) than the signals of frequency band L1.

Table 1
Coordinates of the the GNSS antenna and tide gauges used as validation.

(WGS84)	Longitude	Latitude	Ellipsoidal height (m)
GNSS antenna	1°10′24.00″W	45°35′10.66″N	107.376
Cordouan tide gauge	1°10′23.34″W	45°35′11.30″N	44.57
Royan tide gauge	1°01′40.12″W	45°37′14.07″N	43.37
Port-Bloc tide gauge	1°03′41.60″W	45°34′06.53″N	43.45

4.3. Interest of the measurement site for GNSS reflectometry

Due to its location in open ocean and its height above the sea surface (~60 m), the Cordouan lighthouse is a privileged site for GNSS-R measurements.

Accurate locations of the specular reflection points on the reflecting surface and first Fresnel zone area were determined through direct modeling using GNSS Reflected Signals Simulations (GRSS) developped by Roussel et al. (2014).

Fig. 6 shows the theoretical locations of the specular reflection points for both GPS and GLONASS satellites from the 2 May 2013 to the 8 May 2013. Farthest reflection points are a bit more than 3400 m from the receiver for satellite elevations above 1 (with a first Fresnel zone of ~20000 m^2, and reach 340 m for satellite elevations above 10 (with a first Fresnel zone of ~20000 m^2). We already highlight here one major advantage of the SNR analysis to assess the sea level with respect to the classical tide gauges: measurements are not punctual but cover a whole area around the instrument (circle with a radius of ~3.5 km for the Cordouan lighthouse).

4.4. Datasets used for validation

4.4.1. In situ tide gauges

To validate our SNR-based sea level variation estimates, we compared them to in situ records provided by classical tide gauges, all of them protected against wave effects:

- the Royan tide gauge (45 37′14.07″N; 1 01′40.12″W; 43.37 m), located at ~12 km from the Cordouan lighthouse. Records of this tide gauge are the property of MEDDE (*Ministère de l'Ecologie, du*

Table 2
Tides taken into account by the T-UGOm tide model.

Tide	Astronomic potential amplitude (cm)	Period (hours)
N2	0.6	12.9
E2	0.2	13.1
K1	14.1	23.9
K2	3.1	12.0
L2	0.7	12.2
La2	0.2	12.2
M2	24.2	12.4
M4	0.0	6.2
Mu2	0.6	12.9
N2	4.6	12.7
Nu2	0.9	12.7
O1	10.1	25.8
P1	4.7	24.1
Q1	1.9	26.9
R2	0.1	12.0
S2	11.3	12.0
T2	0.7	12.0

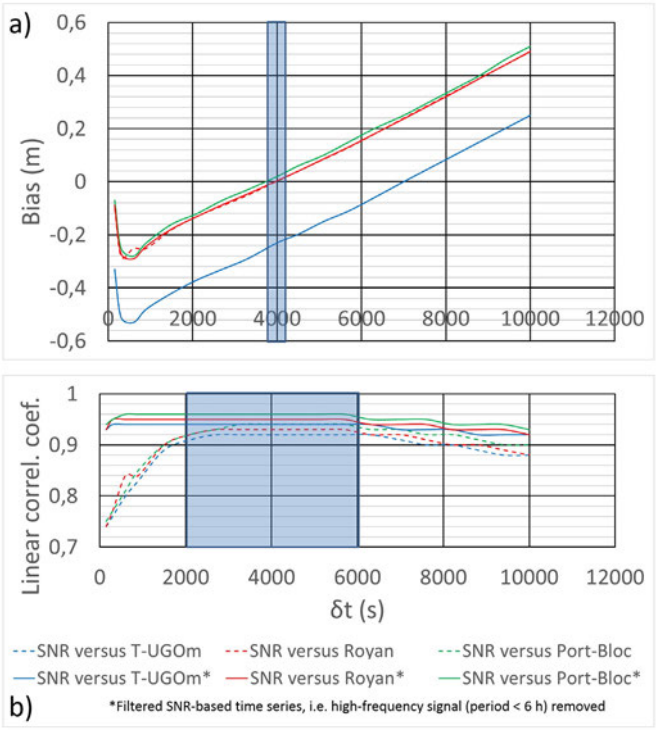


Fig. 7. Comparisons between the raw and filtered SNR-based time series and the three tide gauges over the 3 months time-series. a) Bias against δt. b) Linear correlation against δt. Blue area highlights the best results.

Développement Durable et de l'Energie), and are available on the REFMAR website (http://refmar.shom.fr). Observations are provided with a sampling frequency of 5 minutes.

- the **Port-Bloc tide gauge** (45 34′6.53″N; 1 3′41.60″W ; 43.45 m), located at ~9 km from the lighthouse. Records of this tide gauge are the property of SHOM/Bordeaux GPM. Observations are provided with a sampling frequency of 10 minutes.
- the **Cordouan lighthouse tige gauge**, located at the base of the lighthouse. Records of this tide gauge are the property of SHOM/Bordeaux GPM and we unfortunately had access to only two weeks of measurements from 28 April to 13 May 2013. Due to the absence of digital records for this tide gauge, data were extracted from scansheet scanning with ArcGIS for Desktop software (© Esri), with sampling frequency and temporal resolution of 2 minutes and 20 seconds, respectively. Ellipsoidal height of the GNSS antenna at the top of the lighthouse is 107.376 m, hence there is a height difference of 64.006 m between GNSS antenna and Royan tide gauge, and 63.926 m between GNSS antenna and Port-Bloc tide gauge. Height difference between the antenna and Cordouan tide gauge is 62.802 m.
  Table 1 recapitulates the coordinates of the different points.

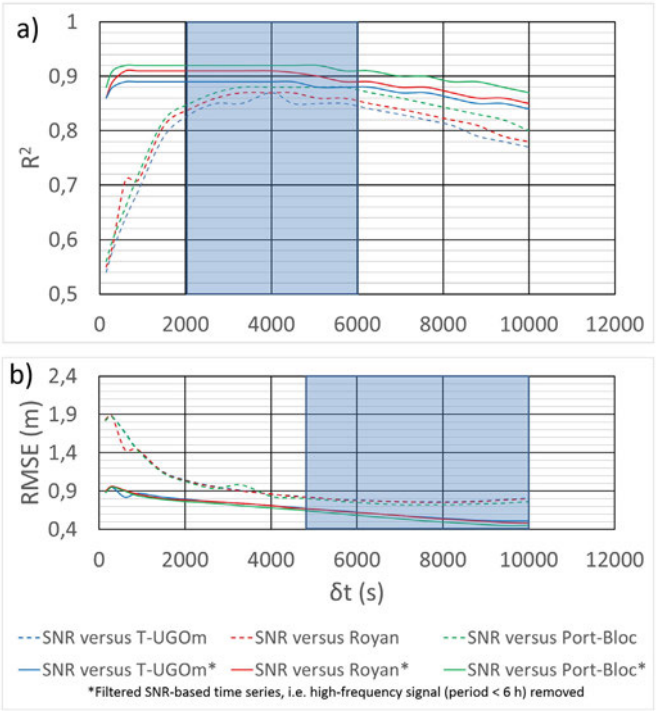


Fig. 8. Comparisons between the SNR-based time series (with and without removing high frequencies) and the three tide gauges over the 3 months time-series. a) R^2 against δt. b) RMSE against δt. Blue area highlights the best results.

Table 3
Comparison between the different tide gauges with the raw and filtered SNR-based time series over the whole 3 months of measurements, with δt = 4000s. Results are given as follows: raw SNR-based time series/filtered SNR-based time series.

SNR w.r.t.	Bias (m)	R	R^2	RMSE (m)	Shift (min)
T-UGOm	−0.23/−0.23	0.92/0.94	0.87/0.89	0.86/0.71	−4.4/−4.3
Port-Bloc	0.02/0.02	0.94/0.96	0.88/0.92	0.83/0.68	29.0/29.0
Royan	0.00/0.00	0.93/0.95	0.87/0.91	0.86/0.71	24.5/25.0

4.4.2. Tide model

The T-UGOm (*Toulouse Unstructured Grid Ocean model*) tide model developed by Lyard, Lefevre, Letellier, and Francis (2006) and based on FES2012 was also used to validate our estimates. FES2012 was used in this study for several reasons. The authors have a direct access to the expertise behind its set-up. Also, this is a coastal study, so resolution is critical. The authors had no choice but to discard really coarse resolution atlases such as 1/2 GOT4.8, so coarse it does not even reach the area of interest. The authors also have access to the original unstructured atlases, when the published FES2012 atlases are a 1/16 interpolation. FES2012 is so fine it covers even the Gironde estuary. Finally, FES2012 has been shown to be the best model over shelf regions (Stammer et al., 2014).

This theoretical astronomical model leads to the characterization of the main constituents of the tidal spectrum i.e. semidiurnal M2

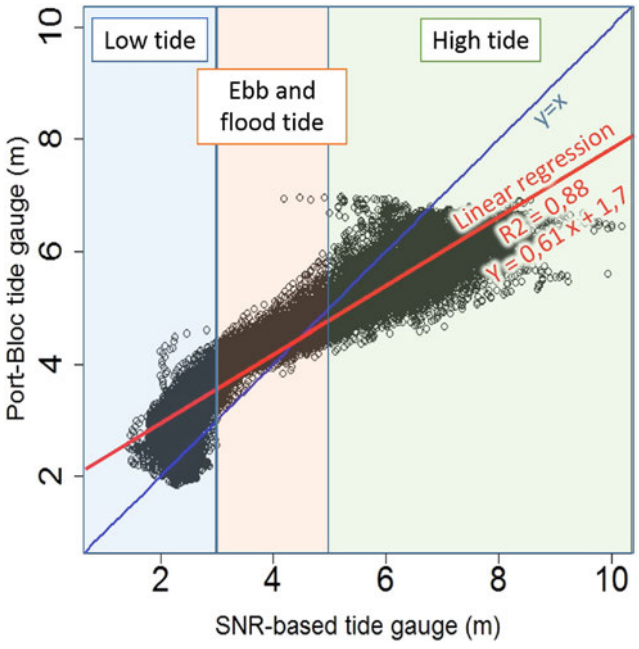


Fig. 9. Scatter plot of the raw SNR-based time series versus Port-Bloc tide gauge.

Table 4
Comparison between the different tide gauges with the raw SNR-based time series calculated with only the GPS constellation/GLONASS constellation/both constellations.

Raw SNR w.r.t.	Bias (m)	R	R^2	RMSE (m)	Shift (min)
T-UGOm	−0.20/−0.47/−0.23	0.91/0.90/0.92	0.84/0.80/0.85	0.93/1.01/0.86	−1.6/−5.0/−4.4
Port-Bloc	0.06/−0.21/0.02	0.93/0.91/0.94	0.87/0.83/0.88	0.91/0.98/0.83	31.7/27.3/29.0
Royan	0.04/−0.23/0.00	0.92/0.91/0.93	0.85/0.82/0.87	0.93/1.00/0.86	27.7/23.1/24.5

(principal lunar), S2 (principal solar), N2 (larger lunar elliptic), K2 (luni-solar); diurnal K1 (luni-solar), O1 (principal lunar) and Q1. Table 2 provides details on tidal components taken into account by the T-UGOm model.

Three main clusters of periods describing the tide are highlighted here: the first and stronger which corresponds to the main amplitude of the tide signal is centered on a period of 12 hours, the second on a period of a bit more than 24 hours, and the last and weaker at 6 hours.

4.4.3. Wave model

We use Significant Wave Height (SWH) time series computed with NOAA Wave Watch III model (Tolman, 2014). Wave Watch III is a third generation global spectral wave model, which provides estimates of wave parameters at 1-hourly intervals. The code computes the evolution of waves in space and time and has been applied at all scales from the global ocean to the coast. It solves the action balance equation as a slowly varying function of space and time and assumes that properties of the medium (like water depth, currents) and the wave energy vary on time- and space- scales much larger than a single wave. This model was used because (i) its data are freely available, and (ii) it has demonstrated its efficiency in coastal areas (e.g., Millar, Smith, & Reeve, 2007).

4.5. Parameters used for sea surface height retrieval

Δt, the time interval between each estimation of h (see Section 3.4) was chosen equal to 5 minutes, which corresponds to the temporal resolution of most of the tide gauges.

Several empirical values for p and N_0 were tested (see Section 3.2) and the values of 0.5% and 10 provide the most robust results. The mean period of the multipath contribution is equal to 32 s (with variations depending on the sinus of the satellite elevation angle). $N_0 = 10$ thus corresponds to a mean time period equal to 5.3 minutes, which is the chosen temporal resolution of the method ($\Delta t = 5$ minutes). With regards to p, values ranging between 0.1% and 5% were tested and 0.5% gives the most numerous estimations of $\tilde{f}$ for each satellite (verifying Eq. 6 and giving best significance result from LSP). With $p > 5\%$, LSP output is only noise and no fundamental frequency can be find in the signal within the moving window. Computation realized with $p = 0.5\%$ and $N_0 = 10$ gives the best linear correlation with tide gauges.

Various values of δt, the size of the moving window used to compute h (see Section 3.4), were tested, and the results are discussed in section Section 5.1.1.

4.6. Extrapolation of missing records

Continuous and regularly sampled time-series are needed to perform a wavelet analysis and for validation purposes. It is the case for the theoretical models (T-UGOm and Wave Watch III) but neither for the in situ tide gauges nor the SNR-based tide time series. Missing records were thus extrapolated using the Data-Based Mecanistic (DBM) model developed by Young (2001) in this scope. This method analyses the frequency content of any time series to extrapolate missing data using a dynamic harmonic regression analysis, with the CAPTAIN Matlab Toolbox developed by Peter Young (Taylor, Pedregal, Young, & Tych, 2006). To validate this extrapolation method, we applied it to a complete part of the Royan tide gauge time series of water level to which we manually removed some data. Results of the interpolation are presented in Fig. S1.

We then used the wavelet cross correlation and wavelet coherence toolbox for Matlab developed by Grinsted, Moore, and Jevrejeva (2004) to compute a wavelet analysis of the extrapolated time series and the original one (Fig. S2). They do not show noteworthy changes on the frequency content. RMSE between the two time series is equal to 0.038 m and maximal difference is equal to 0.28 m. These values are not negligible, but since the frequency content remains almost unchanged, we consider this method to fill the gaps as valuable and we applied it to the time series.

5. Results

5.1. Validation of the proposed inverse method

5.1.1. Comparison with T-UGOm model, port-bloc and Royan tide gauges

The method presented in Section 3.4 was applied to the whole 3-month of SNR S1C measurements from the Cordouan lighthouse for several values of δt and with $h_{min} = 50$ m, $h_{max} = 70$ m (height of the Cordouan lighthouse above sea level ~60 m) and $\dot{h}_{max} = 5 * 10^{-4}$ m/s as inputs. $\dot{h}_{max}$ was chosen approximately equal to 3 times the maximum variation of sea level observed during the lowest tide period (i.e. $\sim 3 * 4$ m/6 h). Waves are likely to induce faster variations of the sea surface level, but the main purpose of our study is the monitoring of the tide. Waves will nevertheless be likely to be detected, as discussed in §4.3. The output time series will be referred as *raw SNR-based time series* in the following. A second-order Butterworth low-pass filter (see Section 3.5) was then applied to the raw SNR-based time series in order to remove noise with a period smaller than the minimum tide period (i.e., 6 h). Residuals will be referred as *filtered SNR-based time series*. The consequences of this filter are discussed in the last subsection 5.5.

We estimated the bias, linear correlation R, determination coefficient R^2, Root Mean Square Error *RMSE* and phase shift between the data used for validation (classical Royan and Port-Bloc tide-gauges and T-UGOm model outputs) and the raw and filtered SNR-based time series computed with several values of δt ranging from 150 to 10000 s. Results are presented in Figs. 7 and 8.

Bias between raw and filtered SNR-based time series and the classical tide gauges is proportional to δt (except for $\delta t < 1500$ s) and reaches zero with $\delta t \sim 4000$ s. T-UGOm theoretical model follows tshe same trend but with an offset of ~23 cm. This offset is due to the model

Table 5
Comparison between the different tide gauges with the filtered SNR-based time series calculated with only the GPS constellation/GLONASS constellation/both constellations.

Filtered SNR w.r.t.	Bias (m)	R	R^2	RMSE (m)	Shift (min)
T-UGOm	−0.19/−0.46/−0.23	0.94/0.93/0.94	0.88/0.86/0.89	0.76/0.81/0.71	−1.5/−5.0/−4.3
Port-Bloc	0.06/−0.21/0.02	0.96/0.95/0.96	0.92/0.89/0.92	0.72/0.78/0.68	31.8/27.4/29.0
Royan	0.04/−0.23/0.00	0.95/0.94/0.95	0.90/0.88/0.91	0.74/0.80/0.71	27.8/23.2/25.0

Table 6
Comparisons between the different tide gauges from 28 April to 13 May 2013. Results are given as follows: raw SNR-based time series/filtered SNR-based time series.

SNR w.r.t.	Bias (m)	R	R^2	RMSE (m)	Shift (min)
T-UGOm	−0.06/−0.06	0.95/0.97	0.91/0.94	0.74/0.60	−4.1/−4.5
Port-Bloc	0.08/0.08	0.96/0.97	0.92/0.95	0.74/0.59	29.2/28.8
Royan	0.06/0.06	0.95/0.97	0.91/0.95	0.74/0.59	25.1/24.5
Cordouan	0.01/0.01	0.96/0.97	0.91/0.95	0.77/0.63	0.0/0.0

which provides accurate relative values but not true absolute ones, whereas Royan and Port-Bloc tide gauges were leveled independently and provide almost the same bias values (±2s cm). The linear variation of the bias with δt could be explained by the positive offset induced by the sandbanks emerging during low tides. The larger the size of the smoving window, the more numerous the estimations of h affected by this offset. Please note that the tropospheric delay induced on the differential path between the direct and reflected signals is neglected in our study. This effect must undoubtedly cause a slight bias on the estimations but its correction is let for further investigation.

Linear correlation is constant when removing the high frequency signal for 600 ≤ δt ≤ 5700 s and decreases for δt < 5700 s. With regard to the raw SNR-based time series, linear correlation coefficient increases with δt and reaches a maximum when δt is around 4000 s and decreases for higher values of δt. Results are obviously similar with R^2 values. With regard to the RMSE, it decreases with increasing values of δt for both raw and filtered SNR-based time series. The lowest values around 0.45 m for the filtered SNR-based time series and 0.72 for the raw SNR-based time series (Fig. 8) are reached for high values of δt (>7000 s). This might be understood with the fact that increasing δt smooths the time series (moving average) which explains lowest RMSE. The high-frequency variations (caused by waves and swell, see Section 5.3.2) are filtered from the SNR-based time series with increasing δt, leading to a better agreement with tidal in situ data.

To conclude, very good agreement is found for δt < 1500 s (=25 min) with a mean linear correlation above 0.92 and bias below 20 cm for both raw and filtered SNR-based time series but lowest differences (i.e. the combined highest R^2, lowest bias and lowest RMSE) are obtained with δt = 4000 s for the three comparisons (i.e. with T-UGOm model, Port-Bloc tide gauge and Royan tide gauge). Exact numerical values of comparison with δt = 4000 s are presented in Table 3. δt = 4000 s (=1.1 h) corresponds approximately to 10% of the main period of the theoretical tide (12 h). We use this value later in the following. Bias are about few millimeters by comparing the raw and filtered SNR-based time series with Royan tide gauge and 2 cm with Port-Bloc tide gauge. An offset of 23 cm is observed with T-UGOm model which is an offset inherent to the model itself. Linear correlations range between 0.94 and 0.96 for the filtered SNR-based time series and lose 0.02 with the raw SNR-based time series. R^2 values rangsse between 0.89 and 0.92 and between 0.87 and 0.88 respectively for the filtered SNR-based and raw SNR-based time series. Mean RMSE is about 0.70 m and 15 cm higher without removing the high frequency signal.

RMSE values are quite high, which might be explained by the presence of the waves detected by the SNR-method, but not by the classical tide gauges which are protected in harbor against wave effects (see Section 5.3). Besides, Cordouan lighthouse is 7 km offshore, whereas Royan and Port-Bloc tide gauges are located near coastal environment hence much sheltered.

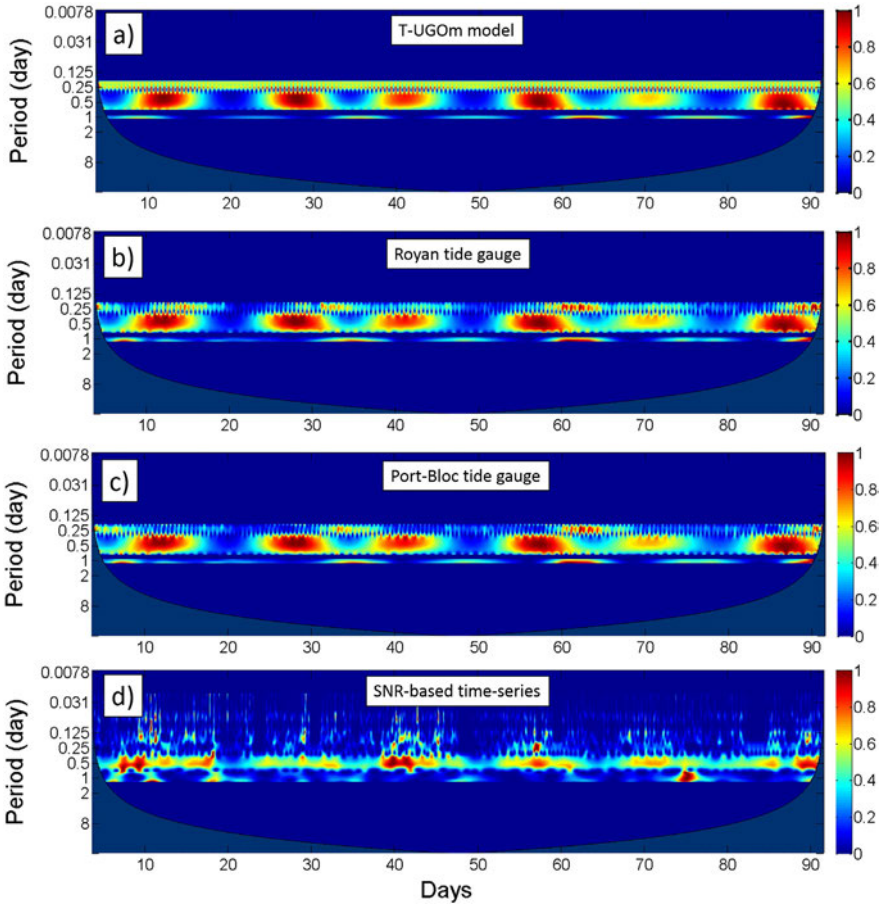


Fig. 10. Continuous wavelet transform maps: a) T-UGOm model time-series b) Royan tide gauge. c) Port-Bloc tide gauge. d) SNR-based time-series. Wavelet power is normalized between 0 and 1 for each period. A 5% significance level was calculated and only the best 99.95% results are represented. The remaining 0.05% with the worst significance level were set to 0. Abscissa is the day over the 3-month period of measurement and ordinate is the period under analysis.

Shift between SNR-based and T-UGOm time-series is about 4 minutes and is mainly due to the typical precision of the model in an estuary area. Between classical and SNR-based time-series, shifts are bigger and reach 25 minutes between SNR-based and Royan tide gauges, and 29 minutes between SNR-based and Port-Bloc tide gauges. These shifts are explained by the time of propagation of the tide covering the distance of about 10 km between them. While shift values were calculated by shifting one of the two time series until reaching best linear correlation, phase shifts will be measured in a more precise way (depending of the wave period) in Section 5.2.

Fig. 9 is the scatter plot of Port-Bloc tide time series versus raw SNR-based time series (with δt equal to 4000 s). Three main clusters appear in this scatter plot: the first one corresponds to low tides (sea level < 3 m), the second one to ebb and flood tide (sea level ranging between 3 and 5 m), and the last part which corresponds to high tides (sea level > 5 m). During high tides, SNR-based tide gauge presents higher values of sea level than Port-Bloc tide gauge. This is likely to be due to the presence of waves that are detected using the SNR-based method (see §4.3) i.e., more periods than only tides, which is not the case using tide gauge records, as they are installed in areas protected from the waves action. At low tides, SNR-based time series exhibits a lower dynamics than the Port-Bloc tide gauge due to the presence of sandbanks around the lighthouse which emerge as the tide recedes. This corresponds to no longer measurable tides (see Section 4.1). During the transition periods, at rising or falling tide, correlation between the two time series is really good and the noise increases progressively as the tides heighten, due to the augmentation of the wave amplitude.

5.1.2. Influence of the GNSS constellation

Tables 4 and 5 present the bias, linear correlation *R*, determination coeffsicient R^2, Root Mean Square Error (*RMSE*) and shifts between the different tide gauges and the raw and filtered SNR-based time series computed in three different cases, by considering separately:

- the satellites from the GPS constellation;
- the satellites from the GLONASS constellation;
- taking satellites from both constellations into account (i.e., the complete configuration used elsewhere in this article).

Best results are obviously obtained when integrating the two constellations in the computations, with a linear correlation equal to 0.92 with the predicted tide (T-UGOm model), 0.94 with the Port-Bloc tide gauge data and 0.93 with the Royan tide gauge data considering the raw SNR based time series, and respectively 0.94, 0.96 and 0.95 considering the filtered SNR-based time series. Only considering GLONASS constellation leads to a decrease of the correlation of 0.01 in the three cases for the filtered SNR-based time series and up to 0.03 for the raw SNR-based time series. We do not note any significant change when only considering GPS constellation in the filtered SNR-based time series, and a decrease of 0.01 with the raw SNR-based time series.

Considering filtered SNR-based time series, RMSE is reduced by approximately 6 cm (7 cm respectively with the raw SNR-based time series) when using only GPS constellation instead of only GLONASS constellation, and approximately 4 cm more (7 cm respectively) when combining both satellite constellations, to reach a RMSE varying between 0.68 and 0.71 m (0.83 and 0.86 m respectively). Bias are almost equal to zero when taking both constellation into account (except for the offset with T-UGOm model), ~0.22 m when only using GLONASS constellation, and ~0.05 m with GPS constellation. If GPS constellation gives better results than GLONASS constellation, results show that the more numerous the satellites are, the better the results. The use of SNR data from both constellations increases the number of available observations to solve the system of equations in (12). It also permits to increase the temporal resolution.

These results will surely improve when new Galileo and COMPASS-Beidou constellations are added for the determination and may be also using all the other wavelengths (L2, L2C, L5, etc.). Our comparisons with independent sources of sea level variations reveal that, concerning the main tide periods, the SNR-based tide gauge provides result of similar quality to the classical tide gauges (linear correlation equal to 0.96 with Port-Bloc tide gauge for the 3-month period of test).

5.1.3. Comparison with co-located Cordouan tide gauge

Cordouan tide gauge is co-located with our GNSS receiver but its measurements are recorded on paper sheets. GPM gave us access to the records from 28 April to 13 May 2013. We thus focused on this two-week time series and compared the SNR-based measurements with the Cordouan tide gauge data over this period. Comparisons were done again during this period with the other tide gauges used as validation. Results are presented in Table 6.

The comparison with the three classical tide gauges and the T-UGOm model provides very similar results, i.e. a correlation equal to 0.97 and a RMSE value around 0.60 m with the filtered SNR-based time series. As expected, results are slightly better when removing the high-

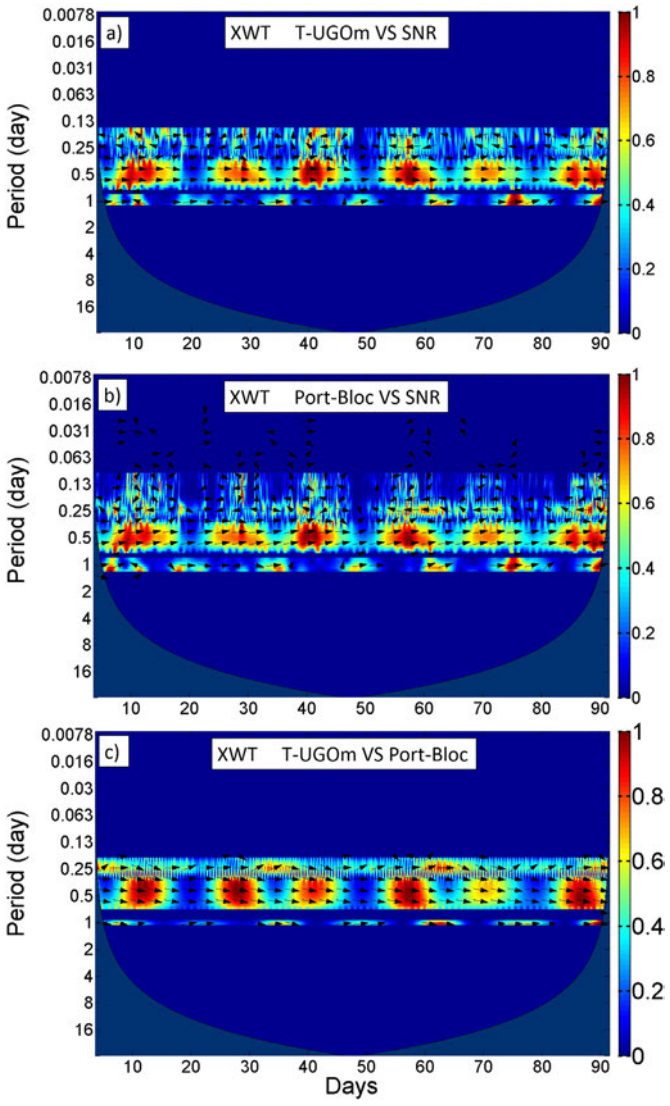


Fig. 11. Wavelet cross correlation maps: a) T-UGOm VS raw SNR. b) Port-Bloc VS raw SNR. c) T-UGOm VS Port-Bloc. Cross wavelet power in units of normalized variance. Phase arrows indicate the relative phare relationship between the series (pointing right: in-phase; left: anti-phase). Wavelet power is normalized between 0 and 1 for each period. A 5% significance level was calculated and only the best 99.95% results are represented. The remaining 0.05% with the worst significance level were set to 0. Abscissa is the day over the 3-month period of measurement and ordinate is the period under analysis.

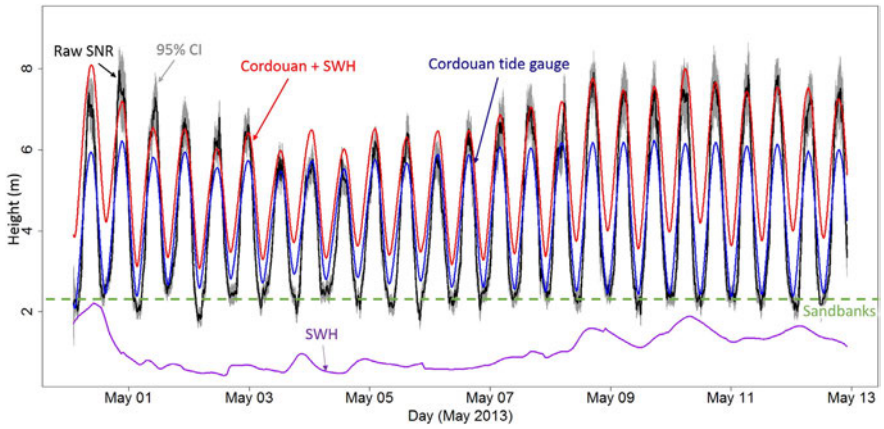


Fig. 12. Raw (black) SNR-based tide measurements compared with Cordouan tide records (blue) *plus* SWH values (red) obtained from WaveWatch III model. Gray area is the 95% Confidence Interval. Sandbanks emerge in the whole area under measurement as the tide recedes hence a minimum level at around 2.3 m. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

frequency signal, with a global increase of the linear correlation of 0.1 and mean decrease of 15 cm of the RMSE. Biases remain unchanged, and shifts almost similar. The quite high values of RMSE are due to the presence of sandbanks that emerge at low tides and of swell and waves at high tides.

5.2. Determination of the tide spectrum

A continuous wavelet transform based on Morlet mother function was applied to Royan, Port-Bloc, T-UGOm, and raw SNR-based 3-month tide time series (Fig. 10) using the wavelet toolbox for Matlab developed by Grinsted et al. (2004).

Three main periods clearly appear in the results of the wavelet transform of the predicted time series from T-UGOm (Fig. 10 a) centered on 6 hours (wave M4), 12 hours (waves N2, E2, K2, L2, La2, M2, Mu2, Nu2, R2, S2 and T2) and 24 hours (waves K1, O1, P1 and Q1) with similar intensities. These three main periods are also clearly visible on Royan and Port-Bloc time series (Fig. 10b and c). The 12-hour period is clearly visible on the raw SNR-based time series (Fig. 10 d). With regard to the 6- and 24-hour ones, they are also detected but appear much noisier than

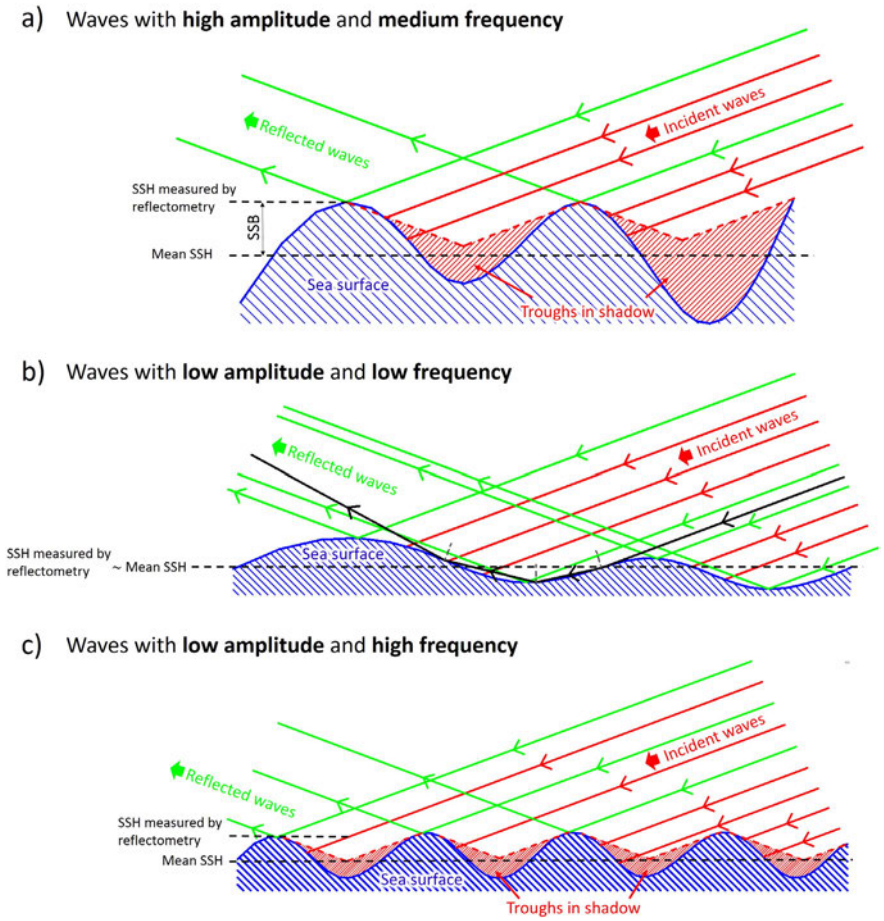


Fig. 13. Sea State Bias (SSB) induced by waves troughs shadowing when measuring off-nadir at low elevation angles with high amplitude and frequency of waves (a) or low amplitude but high frequency of waves (c). Signal convergence in troughs with low amplitude and frequency of waves (b). SSH: Sea Surface Height.

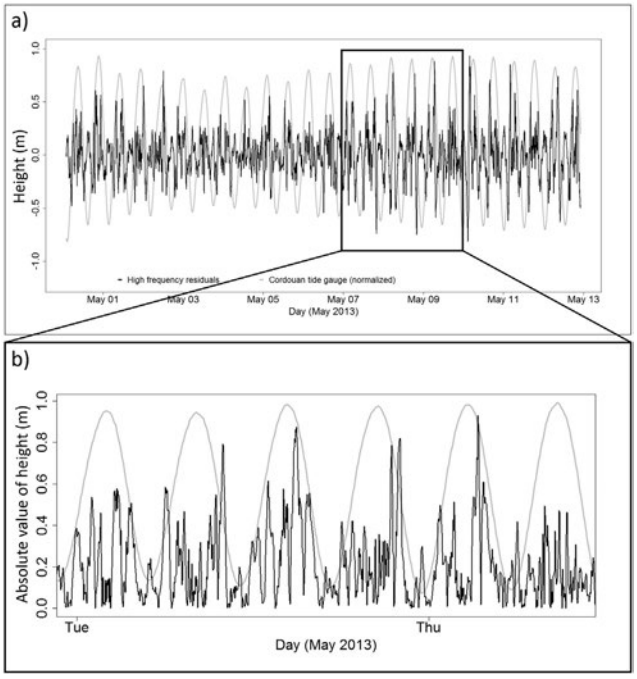


Fig. 14. High frequency signal extracted from raw SNR-based time series and Cordouan tide gauge (normalized), from 29 April to 13 May 2013, with $\delta t = 4000$s.

the series used for validation. Some noisy periods are also visible below 6 hours, particularly at 3 and 1.5 hours.

A wavelet cross correlation was computed between raw SNR-based time series and T-UGOm/Port-Bloc records and results are presented in Fig. 11. The wavelet cross correlation transform was also performed between Port-Bloc and T-UGOm time series in order to validate the comparison with the SNR-based one.

With regard to the T-UGOm versus Port-Bloc time series, the 6-, 12- and 24-hour periods are clearly seen, which is also the case with the comparisons versus raw SNR-based time series. The main astronomical periods are thus perfectly described by the SNR-based tide gauge.

Periods lower than 6 h are also present in the wavelet cross correlation between the classical tide gauge versus the raw SNR-based time series, particularly at 3 h.

The mean time shift for the 12 h-period over the whole period is equal to 3.6 minutes between T-UGOm and SNR time series; 27.8 minutes between Port-Bloc and SNR time series; 31.4 minutes between Port-Bloc and T-UGOm time series; 24.3 minutes between Royan and SNR time series; 27.9 minutes between Royan and T-UGOm time series and 3.5 minutes between Royan and Port-Bloc time series.

Table 7
Comparisons between the classical SNR analysis method and our method with respect to Cordouan tide gauge records from 28 April to 13 May 2013.

Cordouan compared to	Classical method	Our method
R	0.82	0.97
R^2	0.67	0.95
RMSE	1.52	0.63
Bias	0.22	0.01

These values are very close to the shifts obtained previously to reach the best linear correlation (§4.1.1) which was expected by assuming that the 12 h-period is the strongest one (see Table 2).

Fig. S3 presents the wavelet cross correlation between raw SNR-based data/Royan and Port-Bloc tide gauge records.

5.3. Detection of waves

5.3.1. Impact of the waves on the sea surface height (SSH)

If SNR-based time series of water levels provides a very good estimates of the tides (e.g. linear correlation equal to 0.97 with Cordouan tide records), RMSE remains quite high (e.g. 0.63 m with Cordouan tide gauge) and amplitude of the SNR-based time series is generally much higher than the other tide gauge data. This is clearly visible in Fig. 12 for the two-week period of common availability of SNR and Cordouan tide gauge records. As highlighted in this figure, SNR-based sea level variations are higher than Cordouan tide records at high tides but the difference is not constant.

The SNR-based water levels estimates are likely to be impacted by waves, that is not the case for the Cordouan tide gauge which is protected against this effect by the action of a dampener. Interaction between the electromagnetic waves and the waves tend to bias the estimate of SSH. This effect, known as Sea State Bias (SSB), is commonly taken into account when estimating SSH from radar nadir-looking altimetry measurements (e.g. Chelton et al. (2001)). Most of the power received by the altimeter comes from trough hence causing an underestimate of the SSH. In our case, the measurements are off-nadir and more significant results given by LSP are for low satellites elevation angles (reflected signal perturbations are mainly visible for low satellites elevation angles, see Section 2.2). Two extreme scenarios are thus possible:

- *waves with high amplitude and frequency*: the phenomenon is thus inverse to what occurs with nadir measurement: the major part of the received signal comes from the wave crests which hide the troughs,

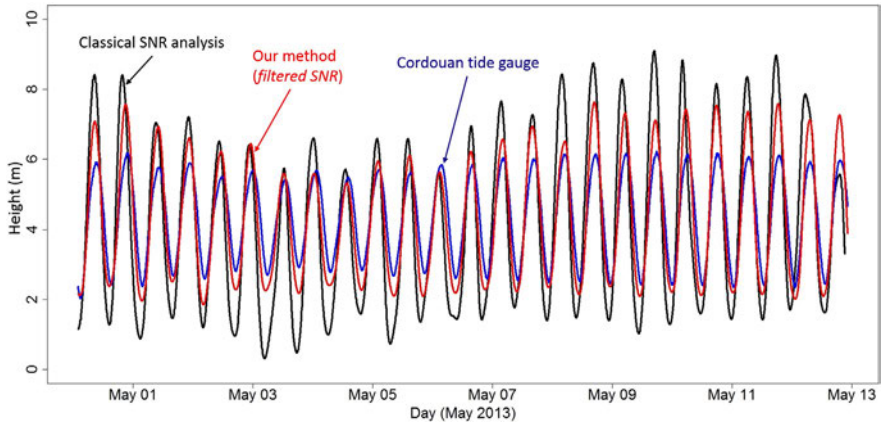


Fig. 15. SNR-based tide measurements obtained with classical SNR analysis (black line) compared with our method (red line) and co-located Cordouan tide gauge (blue line), from 28 April to 13 May 2013. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

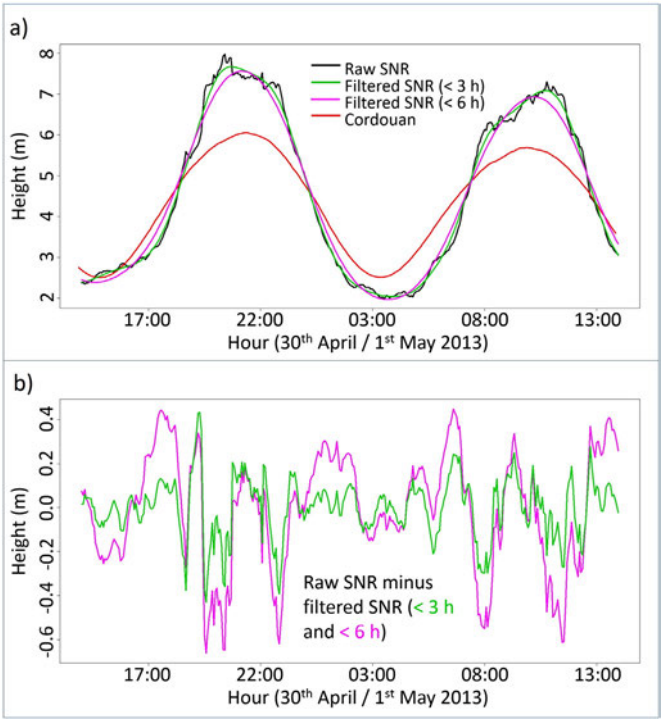


Fig. 16. Effects of the low-pass filtering of the raw SNR-based time series. (a) Zoom on the time series of the Cordouan tide gauge records (red line) and raw SNR-based tide (black line) to which is applied a 3 and 6 h low pass filter (green and purple lines respectively). (b) Differences between raw SNR-based time series and filtered SNR-based time-series.

as illustrated in Fig. 13 a. As a consequence, GNSS-R measurements will tend to measure the wave crests when their amplitude and, above all, frequency are high. Bias will thus be close to SWH which is the average of the highest third of the waves amplitude.

- *waves with low amplitude and frequency*: GNSS waves can reflect both on crests and troughs and measured sea level will be similar to mean sea level measured by classical tide gauge, as illustrated in Fig. 13 b. If waves amplitude and frequency are sufficiently low, the GNSS electromagnetic waves are mostly reflected in the troughs, causing a negative bias similar to the classical SSB in ssnadir-altimetry. In that case, GNSS-R tends to measure troughs and measured sea level will be lower than classical tide gauge records.

  Intermediate cases are also possible, for instance considering waves with low amplitude but high frequency. This case leads to an overdetermination of the SSH, as illustrated in Fig. 13 c.

  To verify our assumption, the SWH from Wave Watch III model was added to the Cordouan tide records compared to the SNR-derived water levels. The result is presented in Fig. 12. During high tides, SNR-based time series and Cordouan tide gauge records plus SWH are generally in very good agreement except for some events during high tides (e.g., the 28 April, 4 May and 6 May 2013), which can be accounted for by the coarse resolution of the wave model (0.5°) that is not adapted for coastal areas and estuaries. Moreover, the Wave Watch III model does not integrate the strong breaking of waves caused certainly by a coarse bathymetry close to the coastal and estuary areas.

Table 8
Comparisons between the filtered SNR-based time series and the Cordouan tide gauge records from 28 April to 13 May 2013.

Threshold of the low-pass filter (h)	Bias	*R*	R^2	*RMSE*
0	0.01	0.956	0.913	0.774
3	0.01	0.962	0.925	0.742
6	0.01	0.972	0.946	0.632

With regard to low tides, SNR-based values and Cordouan tide records are similar when SWH is high (≥1 m). It is explained by the fact that waves amplitude decrease as the tide recedes (see Section 4.1), hence SSB value tends to zero. In this area, wave amplitudes are high during high tides. At low tides, the surface around the lighthouse is less rough due to both the presence of sandbanks and a smoother sea surface (lighthouse guards personal communication). SNR-based SSH is thus equal to tide gauge records. When waves amplitude is sufficiently low (SWH below s ~ 1 m), SNR-based SSH is lower than tide gauge records, which confirms our assumption that GNSS electromagnetic waves are mostly reflected in wave troughs with possibility of more than one multipath (dark path in Fig. 13 b). An almost constant minimal value around 2.3 m can also be observed in the SNR-based time series. It is due to the presence of sandbanks appearing in the whole area covered by reflection at low tides (see Figs. 6 and 5). It is interesting to stress out that sandbanks slightly move between each tide hence little differences over time.

5.3.2. Sea state

The remaining high-frequency signal from the low-pass filter applied to the raw SNR-based time series is plotted on Fig. 14.

Mean amplitude of this high-frequency signal is of 17 cm, and can reach 93 cm. As presented in Section 3.6, altimetric accuracy of the method is better than decimetric. The origin of this high-frequency signal cannot be attributed to noise, but most likely to a geophysical phenomenon. Amplitudes are generally high during high tides and below 30 cm during low tides (Fig. 14 b), which leads us to think that waves are at the origin of these perturbations. Indeed, as discussed in Section 5.3.1, highest amplitudes of waves are reached during high tide periods, and the sea surface is smoother during low tide periods and we recall to the reader that during high tides, the crests of the waves are more likely to be detected (see §4.3.1).

We estimated the mean amplitude of the high-frequency signal during each high tide period (i.e. during the time intervals where Cordouan tide gauge records were higher than the mean tide value over the two-week period). Linear correlation between the resultant time series and SWH from Wave Watch III model outputs is 0.60, which corroborates the assumption that waves are likely at the origin of this high-frequency component.

5.4. Comparison with the classical SNR analysis method

We finally compared the results from the dynamic SNR method with the ones obtained using the classical SNR analysis method. We recall here the major differences between the two methods:

- classical SNR analysis neglects $\dot{h}$, the variations of h against time, in Eq. (5);
- in classical SNR analysis, inversion is performed individually for every satellite data (with elevation angle below 40°);

  We applied classical SNR analysis method over 28 April to 13 May 2013 using the same moving average (4000 s) and sampling rate (5 min) as for the new method, and we filtered out high frequency components (period higher than 6 h) in both cases.

  Fig. 15 and Table 7 show the results obtained over the 15 days period. Linear correlation between classical SNR analysis results and Cordouan tide gauge is 0.82, i.e. 0.15 lower than with the dynamic SNR method (0.97), and RMSE is almost 2.5 times higher.

5.5. Effects of the filtering of the raw SNR-based time series

A low-pass filter was applied to the raw SNR-based time series in order to remove the high frequency signals considered as noise when determining the main astronomical tide periods (see §2.5). The

consequences of such a filtering were tested on the two-week common period of SNR measurements and Cordouan tide gauge records, and results are visible in Fig. 16 and Table 8. By applying a 6 h low-pass filter, bias remains unchanged, and the linear correlation with Cordouan tide gauge records over the two-week period increases from 0.96 to 0.97. RMSE of the raw SNR-based time series is 0.77, while it is 0.74 by applying a 3 h low-pass filter, and 0.63 with a 6 h low-pass filter.

6. Conclusion

In this study, a new inversion technique of the SNR measured using a single geodetic GNSS receiver for retrieving sea surface height and its variations versus time was developed. It offers a significant improvement of the classical SNR analysis method (Larson et al., 2013) by taking the dynamics of the reflecting surface into account. The method proposed in this study allows the use of the SNR-based altimetry even if the variations against time of the reflecting surface are not negligible. Residuals in the altimetric results are related to the changing significant wave height. Our dynamic SNR method was validated with SNR data collected from a GNSS antenna set up at the top of a 60-meter high lighthouse, 8 km from the Shore. Comparisons with in situ data from tide-gauges show a very good agreement: linear correlation versus time with classical tide gauges is better than 0.92 (0.94 when high frequencies caused by waves are filtered out) over a 3-month period of measurement. It reaches 0.97 (0.96 without removing high-frequency signal) with a co-located tide gauge over a 2-week period, while it only reaches 0.82 using the classical method. RMSE is about 0.63 m (respectively 0.77 m) while it is almost 2.5 times higher with the classical method. The high values of RMSE can be explained by the wave signals present in our SNR-based estimates and not in tide gauge records used for validation as they are protected against wave effects by the action of a dampener, and the emergence of sandbanks around the lighthouse as the tide recedes. That affect our determination of sea surface height but not the classical tide gauges. The higher the GNSS receiver is, the larger the study area is. As a consequence, the estimates are also affected by the spatial inhomogeneities of the surface height around the lighthouse.

Our dynamic SNR method of inversion of GNSS SNR data demonstrated a strong potential for the monitoring of SSH in coastal areas especially in areas with high tides and our comparisons with independent sources of tide measurements reveal that, concerning the main tide periods of ~6 h, ~12 h and ~24 h, our SNR-based tide gauge provides results of similar quality to the classical tide gauges.

Our inversion technique being based on the resolution of an overdetermined system, the more satellites in sight, the more accurate the method will be. With the advent of the new GNSS constellations (GALILEO, COMPASS-Beidou, etc.), the accuracy and temporal resolutions of the method is likely to be improved in the future. The dynamic SNR method also demonstrated a strong consistency in the determination of swell as the residuals between our estimates and the tide gauge records exhibit similar temporal variations as the swell from the WaveWatch III model. Its range of applicability should nevertheless be limited to low altitude receivers. First because a too large antenna height above the reflecting surface would induce a too small time period of the SNR variations to be measurable with a classical 1 Hz acquisition. Secondly, because reflections from higher altitudes over open waters might start behaving as mostly diffuse, not coherent. And last, C/A code having ~300 m chip length, any relative reflect-to-direct distance larger than that would not induce interferences. Conversely, the lower the antenna height is, the lower the frequency of the SNR variations is, hence worse temporal resolution in the final sea level determination.

Acknowledgments

This work was funded by CNES in the framework of the TOSCA project “Hydrologie, Océanographie par Réflectométrie GNSS (HORG)” and by the RTRA STAE Foundation in the framework of the “Potentialités de la Réflectométrie GNSS In Situ et Mobile (PRISM)” project. Nicolas Roussel is supported by a PhD granted from Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR). We thank the GPMB, and especially A. Fort, for providing us with the tide gauge records from Cordouan station. Particular thanks are also addressed to the *Subdivision des Phares et Balises* and to the *Syndicat Mixte pour le Développement de l'Estuaire de la Gironde* (SMIDDEST) for having allowed us to install our GNSS receiver at the top of the Cordouan lighthouse and the lighthouse guardians for their kind and useful help. Last, we also thank B. Meyssignac (LEGOS-OMP, CNES) for the fruitful discussions. Crosswavelet coherence software and wavelet coherence software were provided by A. Grinsted.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.011.

References

Ablain, M., Cazenave, A., Valladeau, G., & Guinehut, S. (2009). A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2008. *Ocean Science*, *5*(2), 193–201.

Anderson, K. (1995). A GPS tide gauge. *GPS World Showcase*, *6*.

Bilich, A. (2006). *Improving the precision and accuracy of geodetic gps: Applications to multipath and seismology.* (PhD thesis) University of Texas at Austin. M.S., University of Colorado.

Bishop, G., & Klobuchar, J. (1985). Multipath effects on the determination of absolute ionospheric time delay from GPS signals. *Radio Science*, *20*(3), 388–396.

Bouffard, J., Roblou, L., Birol, F., Pascual, A., Fenoglio-Marc, L., Cancet, L., ... Ménard, Y. (2011). *Introduction and Assessment of Improved Coastal Altimetry Strategies: Case Study Over the Northwestern Mediterranean Sea.* Berlin Heidelberg: Springer, 297–330.

Butterworth, S. (1930). On the theory of filter amplifiers. *Wireless Engineering*, *7*, 536–541.

Cardellach, E., Ao, C., de la Torre Juarez, M., & Haji, G. (2004). Carrier phase delay altimetry with GPS-reflection/occultation interferometry from low earth orbiters. *Geophysical Research Letters*, *31*(10).

Cardellach, E., Fabra, F., Noguès-Correig, O., Oliveras, S., Ribo, S., & Rius, A. (2011). GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the gold-RTR data sets. *Radio Science*, *46*(RS0C04).

Carreno-Luengo, H., Camps, A., Ramos-Perez, I., & Rius, A. (2014). Experimental evaluation of gnss-reflectometry altimetric precision using the p(y) and c/a signals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation Remote Sensing*, *7*(5), 1493–1500.

Chelton, D., Ries, J., Haines, B., Fu, L., Callahan, P., Fu, L. -L., & Cazenave, A. (2001). Satellite altimetry. *Satellite altimetry and the earth sciences: A handbook of techniques and applications* (pp. 1–131). Academic Press.

Cohen, J., Small, C., Mellinger, A., Gallup, J., Sachs, J., Vitousek, P., & Mooney, H. (1997). Estimates of coastal populations. *Science*, *278*(5341), 1209–1213.

Duraiappah, A., Naeem, S., Agardy, T., Ash, N., Cooper, H., Diaz, S., ... Van Jaarsveld, A. (2005). *Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis.* Coastal Systems.

Georgiadou, Y., & Kleusberg, A. (1988). On carrier signal multipath effects in relative gps positioning. *Manuscripta Geodaetica*, *13*, 172–179.

Grinsted, A., Moore, J., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Non Linear Processing Geophysics*, *11*.

Hannah, B. (2001). *Modelling and simulation of gps multipath propagation.* (PhD Thesis) Queensland University of Technology.

Larson, K., Löfgren, J., & Haas, R. (2013). *Journal of Advances in Space Research*, *51*(8), 1301–1310.

Larson, K., Small, E., Gutmann, E., Bilich, A., Axelrad, P., & Braunn, J. (2008). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: Initial results. *GPS Solutions*, *12*, 173–177.

Le Traon, P., Morrow, R., & Cazenave, A. (2001). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. In L. -L. Fu (Ed.), *Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of techniques and applications* (pp. 171–215). San Diego, USA: Academic.

Löfgren, J. (2014). *Local sea level observations using reflected GNSS signals.* (PhD Thesis) Department of Earth and Space Sciences. Chalmers University of Technology.

Löfgren, J., & Haas, R. (2014). Sea level measurements using multi-frequency gps and glonass observations. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, *2014*(1), 1687–6172.

Löfgren, J., Haas, R., & Scherneck, H. (2014). Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world. *Journal of Geodynamics*, *80*, 66–80.

Löfgren, J., Haas, R., Scherneck, H., & Bos, M. (2011). Three months of local sea level derived from reflected GNSS signals. *Radio Science*, *46*(RS0C05).

Lomb, N. (1976). Least-squares frequency analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical and Space Science*, 447–462.

Lowe, S., Zuffada, C., Chao, Y., Kroger, P., Young, L., & LaBrecque, J. (2002). 5-cm-precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections. *Geophysical Research Letters*, *29*(1375).

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, *56*, 394–415.
Martin-Neira, M. (1993). A passive reflectometry and interferometry system (paris): Application to ocean altimetry. *ESA Journal of the European Space Agency*, 331–355.
Millar, D., Smith, H., & Reeve, D. (2007). Modelling analysis of the sensitivity of shoreline change to a wave farm. *Ocean Engineering*, *34*(5–6), 884–901.
Nicholls, R., Wong, P. P., Burkett, J., Codignotto, J., Hay, R., McLean, S., ... Woodroffe, C. (2007). *Coastal systems and low-lying areas. climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernemental panel on climate change.* Cambridge University Press, 315–357.
Rius, A., Noque's-Correig, O., Ribo, S., Cardellach, E., Oliveras, S., Valencia, E., ... Martin-Neira, M. (2012). Altimetry with gnss-r interferometry: first proof of concept experiment. *GPS Solutions*, *16*, 231–241.
Roussel, N., Frappart, F., Ramillien, G., Desjardins, C., Gegout, P., Pérosanz, F., & Biancale, R. (2014). Simulations of direct and reflected waves trajectories for in situ GNSS-R experiments. *Geoscientific Model Development*, *7*, 1001–1062.
Ruf, T. (1999). The lomb-scargle periodogram in biological rhythm research: Analysis of incomplete and unequally spaced time-series. *Biological Rhythm Research*, *30*(2), 178–201.
Ruffini, G., Soulat, F., Caparrini, M., Germain, O., & Martin-Neira, M. (2004). The eddy experiment: Accurate gnss-r ocean altimetry from low altitude aircraft. *Geophysical Research Letters*, *31*(L12306).
Scargle, J. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II — Statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data. *Astronomy Journal*, *263*, 835–853.
Semmling, A., Beyerle, G., Stosius, R., Dick, G., Wickert, J., Fabra, F., ... d'Addio, S. (2011). Detection of artic ocean tides using interfeometric GNSS-R signals. *Geophysical Research Letters*, *38*(L04103).
Semmling, A., Schmidt, T., Wickert, J., Schön, S., Fabra, F., Cardellach, E., & Rius, A. (2012). On the retrieval of the specular reflection in GNSS carrier observations for ocean altimetry. *Radio Science*, *47*(RS6007).
Stammer, D., Ray, R., Andersen, O., Arbic, B., Bosch, W., Carrère, L., ... Yi, Y. (2014). Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models. *Reviews of Geophysics*, *52*(3), 243–282.
Taylor, C., Pedregal, D., Young, P., & Tych, W. (2006). Environmental time series analysis and forecasting with the captain toolbox. *Environmental Modelling and Software*, *22*, 797–814.
Tolman, H. (2014). *User manual and system documentation of wavewatch-III version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB technical note 316.*
Treuhaft, R., Lowe, S., Zuffada, C., & Chao, Y. (2001). Two-cm GPS altimetry over crater lake. *Geophysical Research Letters*, *28*(23), 4343–4346.
UN (2010). Atlas of the Oceans: Human Settlements On the Coast. (available on: www.oceanatlas.org/servlet/CDSServlet?status=ND0xODc3JjY9ZW4mMzM9KiYzNz1rb3M.).
Young, P. (2001). Data-based mechanistic modelling and validation of rainfall-flow processes, model validation: perspectives. *Hydrological Science*, 117–161.
Yu, K., Rizos, C., & Dempster, A. (2014). Gnss-based model-free sea surface height estimation in unknown sea state scenarios. *IEEE Journal of Selected Topics Applied Earth Observation Remote Sensing*, *7*(5), 1424–1435.

Supplementary Data

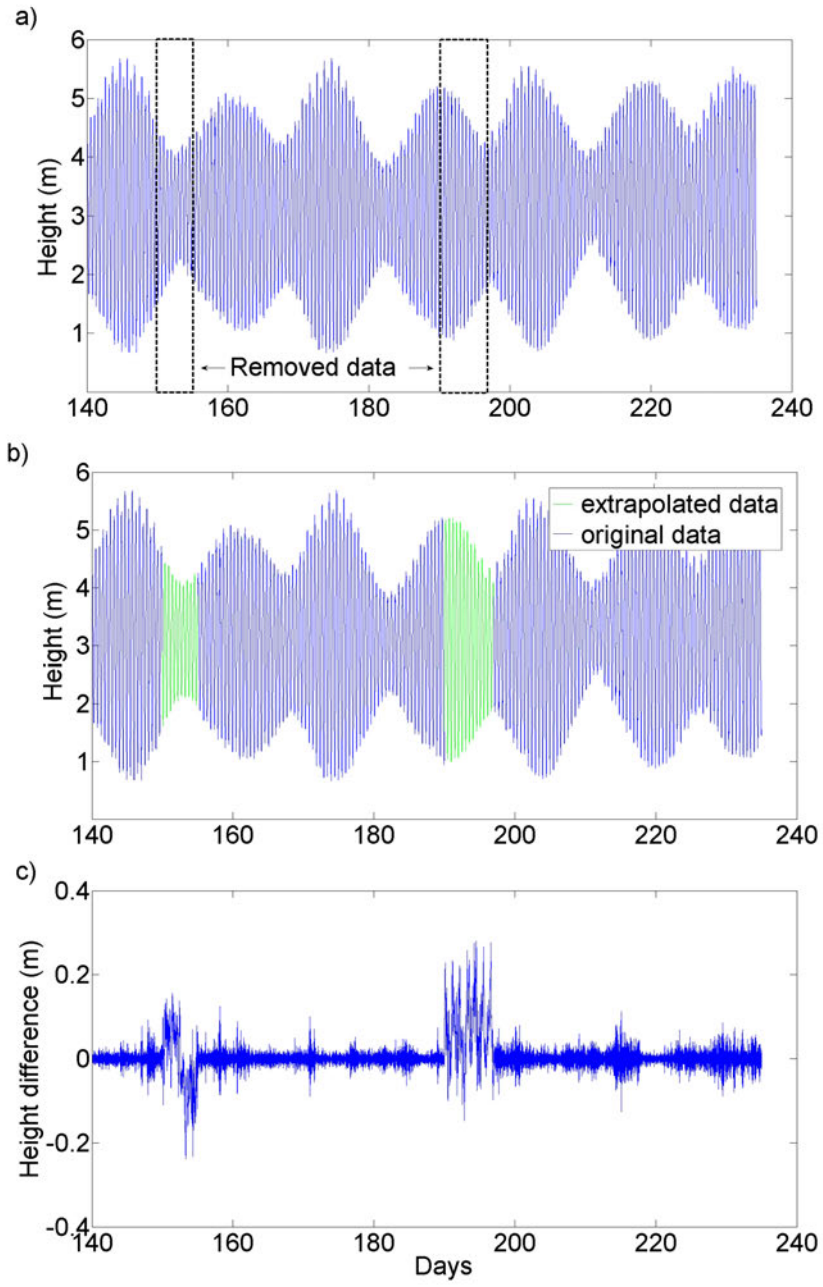


Figure S1: Test of the extrapolation of the gaps on a complete record of Royan time-series of water levelto which parts were manually removed. (a) Original time series. (b) Extrapolated time series. (c) Difference between original and extrapolated time series (RMSE = 0.038 m).

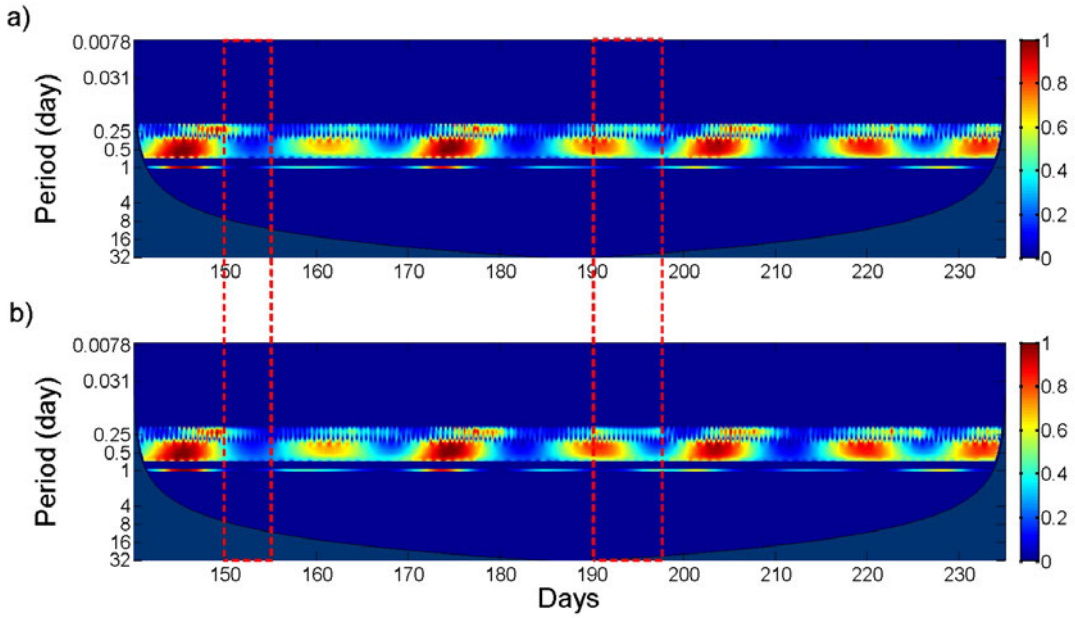


Figure S2: Wavelet analysis of the original full Royan time-series (a) and extrapolated one (b). Wavelet power is normalized between 0 and 1 for each period. A 5% significance level was calculated and only the best 99.95% results are represented. The remaining 0.05% with the worst significance level were set to 0. Abscissa is the day over the 3-month period of measurement and ordinate is the period under analysis.

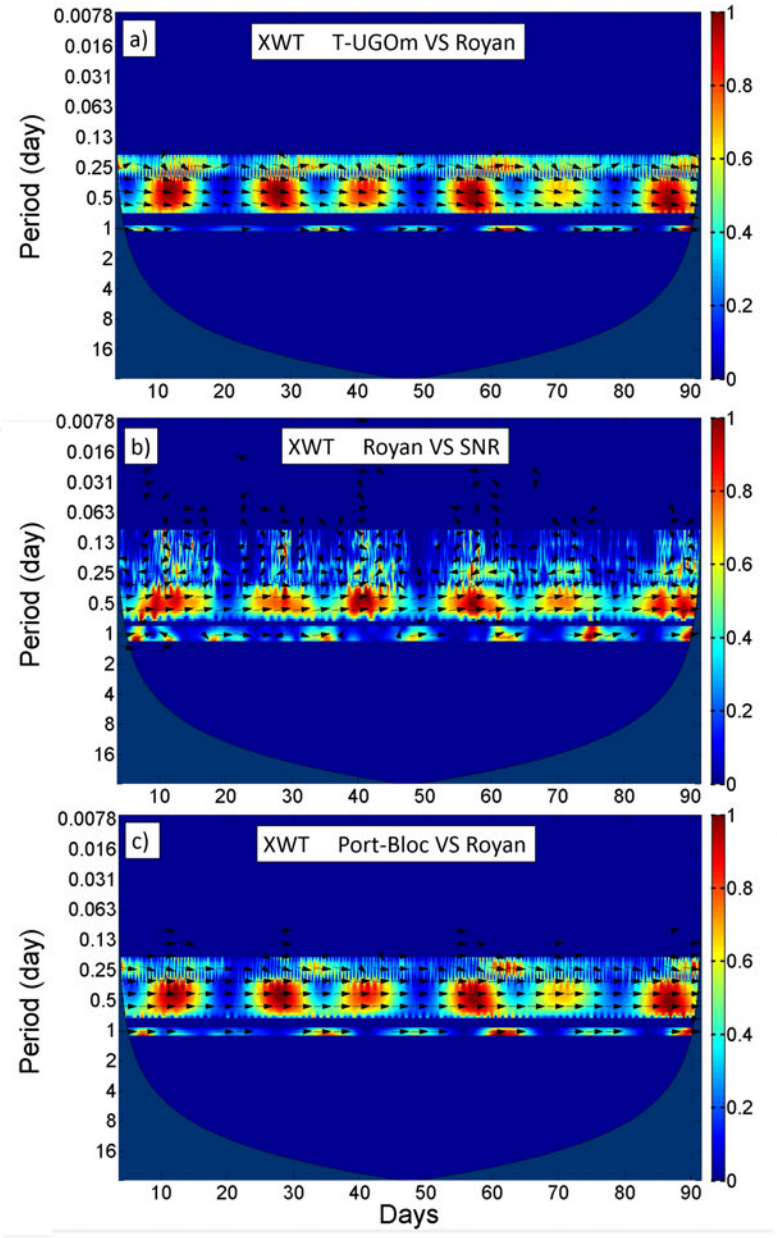


Figure S3: Wavelet cross correlation maps: a) T-UGOm VS Royan SNR. b) Royan VS raw SNR. c) Port-Bloc VS Royan. Cross wavelet power in units of normalized variance. Phase arrows indicate the relative phare relationship between the series (pointing right: in-phase; left: anti-phase). Wavelet power is normalized between 0 and 1 for each period. A 5% significance level was calculated and only the best 99.95% results are represented. The remaining 0.05% with the worst significance level were set to 0. Abscissa is the day over the 3-month period of measurement and ordinate is the period under analysis.

Chapitre 6

Application de la réflectométrie pour la mesure des variations de l'humidité du sol : utilisation d'une seule antenne

Sommaire

6.1 Introduction . . . 154
6.2 Etat de l'art . . . 155
6.2.1 Hauteur *effective* h de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante 156
6.2.2 Amplitude A_m et phase ϕ_m des oscillations du SNR dues au multi-trajet 156
6.3 Méthodologie . . . 156
6.3.1 Détermination de la hauteur effective h . . . 156
6.3.2 Détermination de l'amplitude A_m et de la phase ϕ_m . . . 158
6.4 L'expérience de Lamasquère . . . 159
6.4.1 Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales . . . 159
6.4.2 Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS . . . 161
6.4.3 Données utilisées pour la validation . . . 161
6.5 Résumé des principaux résultats . . . 162
6.5.1 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_s, A_m et ϕ_m . . . 162
6.5.1.1 Faibles angles d'élévation : 2° à 30° . . . 162
6.5.1.2 Angles d'élévation élevés : 30° à 70° . . . 163
6.5.1.3 Combinaison des satellites entre eux . . . 164
6.5.1.4 Conclusion . . . 165
6.5.2 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_d . . . 165
6.6 Discussion sur l'inversion du signe de la corrélation entre les petits et grands angles d'élévation . . . 166
6.7 Conclusions et perspectives . . . 169
6.8 *Article sous presse* : IEEE JSTARS - Detection of soil moisture variations . . . 171

6.1 Introduction

Les mesures d'humidité du sol constituent des observations très importantes pour mener des études sur le climat, les prédictions météorologiques, les analyses des zones inondables et les recharges d'aquifères. En milieu agricole, une analyse en temps réel de l'état hydrique du sol permettrait à l'exploitant d'optimiser la gestion de ses parcelles (travail du sol, traitements, irrigation, etc.). Les différentes techniques de mesure actuelles présentent toutes des caractéristiques différentes en terme de **résolution spatiale** (i.e., la capacité d'un capteur à discerner un détail, ou, en d'autres termes, la plus petite surface représentée par une mesure), de **résolution temporelle** (i.e., la répétitivité de la mesure) et de **précision** (i.e., la qualité de la mesure effectuée). L'optimisation d'un de ces trois paramètres se fait malheureusement souvent au détriment des deux autres.

Ainsi, les sondes d'humidité classiques (de type *Theta probe* par exemple) fournissent uniquement des mesures ponctuelles et très hétérogènes, peu représentatives d'une parcelle entière. En revanche, la précision est plutôt bonne (par exemple, pour les sondes *Theta*, la précision annoncée est de 2 % de volume d'humidité du sol avec des étalons spécifiques au sol), et les mesures peuvent être réalisées en continu. Avec l'avènement des techniques de télédétection, l'humidité du sol peut être mesurée à une échelle globale, mais c'est cette fois au détriment de la résolution temporelle et spatiale. Par exemple, même avec la mission SMOS : *Soil Moisture and Ocean Salinity satellite* (Kerr *et al.*, 2010), la répétitivité est de 3 jours maximum à l'équateur, et le côté d'un élément de surface fait en moyenne 43 km.

Des études récentes proposent d'utiliser la réflectométrie GNSS comme méthode alternative, qui présente un excellent compromis entre résolutions spatiale, temporelle et précision. En utilisant par exemple le réflectomètre SMIGOL à antenne unique, Rodriguez-Alvarez *et al.* (2011b) annoncent une précision de $2,0 \sim 3,2\%$. La résolution spatiale, quant à elle, est uniquement fonction de la hauteur d'antenne au-dessus de la surface de réflexion (pour une constellation de satellites donnée sur un intervalle de temps défini) : voir section 4.3.2 page 81 et figure 4.6 page 82. Une zone autour de l'antenne allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres sera ainsi couverte. En ce qui concerne la résolution temporelle, elle dépend beaucoup de l'algorithme de calcul utilisé pour estimer les variations d'humidité (voir section 6.5 page 162), mais elle est généralement de plusieurs heures voire jours (e.g., Larson *et al.*, 2008).

La technique se base sur l'interaction des signaux GNSS qui se réfléchissent sur le sol et contiennent donc une information sur les caractéristiques de la surface réfléchissante, particulièrement le contenu en eau des premiers centimètres. Les interférences au niveau de l'antenne entre l'onde directe et l'onde réfléchie sont particulièrement visibles dans le rapport signal sur bruit SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) enregistré par le récepteur (voir sections 3.4.2.2 page 60 et 5.2 page 112). Les variations de la nature de la surface et de ses propriétés vont modifier le signal GNSS réfléchi, et donc le SNR, que l'on va pouvoir ensuite analyser pour estimer l'humidité du sol. Cette méthode d'estimation présente l'avantage majeur d'être applicable très aisément en utilisant n'importe quelle antenne GNSS classique (notamment celles des réseaux permanents), sans aucune modification de matériel.

Le réseau américain **PBO H20** a mis concrètement cette technique SNR en application, et traite quotidiennement un ensemble de stations GNSS permanentes pour délivrer des estimations d'humidité du sol (mais également des indices de végétation ou de hauteur de neige). Ce réseau (http://xenon.colorado.edu/portal) est pleinement opérationnel et analyse actuellement plus de 133 stations dédiées à l'estimation de l'humidité du sol. La figure 6.1

illustre le réseau principalement présent en Amérique de l'ouest.

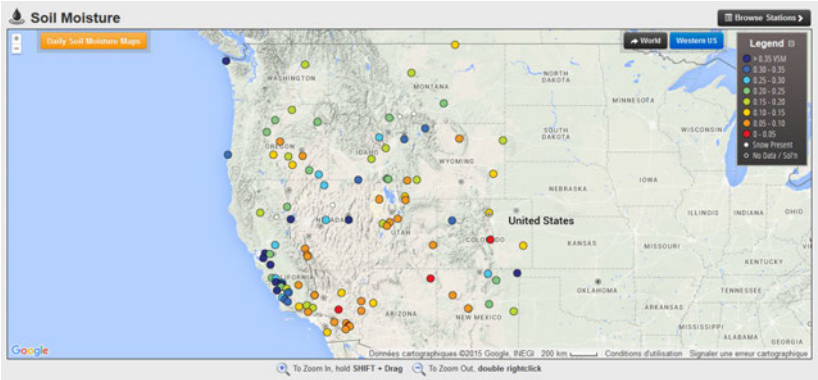


FIGURE 6.1 – Stations GNSS du réseau **PBO H20** analysées par réflectométrie pour estimer l'humidité du sol.

Dans le cadre de ma thèse, je me suis particulièrement intéressé à cette méthode d'inversion du SNR, que j'ai pu mettre en application en estimant l'humidité du sol in situ d'une parcelle agricole durant plusieurs semaines d'acquisitions. J'ai donc été amené à tester les processus de traitement existants, et à apporter quelques modifications permettant notamment d'améliorer la résolution temporelle et la précision. Cette étude a fait l'objet d'un article sous presse dans *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*, qui est inséré dans la section 6.8 :

Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Darrozes J., Baup F., Cuong H. : *Detection of Soil Moisture Variations Using GPS and GLONASS SNR data for elevation angles ranging from 2° to 70°*. Sous presse dans *IEEE JSTARS*.

Ce chapitre s'articule en quatre parties principales **qui sont les principaux points de cet article**. La première partie est un bref rappel des travaux antérieurs sur l'estimation de l'humidité du sol basée sur l'analyse des séries temporelles SNR enregistrées par une station GNSS classique. La deuxième partie présente la méthode que j'utilise pour inverser les mesures de SNR afin d'estimer les variations de l'humidité du sol. Cette méthode a été appliquée à des observations in situ acquises durant 6 semaines (du 5 février au 15 mars 2014) dans un champ agricole. Les conditions expérimentales sont décrites dans la troisième section. Enfin, les résultats de cette campagne de mesure sont analysés dans une dernière section, avant de conclure sur les potentialités de cette technique.

6.2 Etat de l'art

La base théorique utilisée est la même que celle développée dans les sections précédentes 3.4.2.2 page 60 et 5.2 page 112, concernant la contribution de l'onde réfléchie sur la série temporelle du SNR mesurée par une antenne et un récepteur GNSS. Dans ces sections, il est expliqué que l'onde directe et réfléchie interagissent au niveau de l'antenne et que ces interférences constructives sont particulièrement visibles dans la série temporelle du SNR. Il est

possible d'isoler la contribution du signal réfléchi (notée SNR_m) en corrigeant les observations de la composante parabolique dominante, due au signal direct. De plus, la fréquence $\tilde{f}$ des oscillations de SNR_m en fonction du sinus de l'angle d'élévation θ est fonction de la hauteur h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion (équation 5.1 page 112). La mesure puis l'inversion de cette fréquence $\tilde{f}$ permet donc de déduire les variations de distance entre l'antenne et la surface du sol réfléchissante.
Pour des applications continentales de mesure d'humidité du sol, il sera possible d'utiliser trois observables mesurées sur la série temporelle SNR_m : la hauteur h (liée à la fréquence $\tilde{f}$ de la série temporelle), l'amplitude A_m et la phase ϕ_m de SNR_m.

6.2.1 Hauteur *effective* h de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante

Dans le cas d'une réflexion sur une surface continentale, on observe une pénétration des ondes GNSS dans le sol avant réflexion. La profondeur de cette pénétration est directement liée à la nature de la surface réfléchissante, et principalement son contenu en eau (Larson *et al.*, 2010). Les variations de l'humidité du sol vont donc modifier la profondeur de pénétration des ondes, et provoquer ainsi de légères variations temporelles de la hauteur *effective* h de l'antenne mesurée par inversion de $\tilde{f}$.
Les variations temporelles de h estimées grâce au SNR sont donc un très bon indicateur des fluctuations du contenu en eau du sol autour de l'antenne (Chew *et al.*, 2014).

6.2.2 Amplitude A_m et phase ϕ_m des oscillations du SNR dues au multi-trajet

Il existe également d'autres moyens d'inverser la série temporelle du SNR pour en déduire les variations d'humidité du sol. En effet, il est possible d'exprimer la contribution SNR_m du multi-trajet au SNR sous la forme suivante (Larson *et al.*, 2008) :

$$SNR_m = A_m \cos(\frac{4\pi H}{\lambda} \sin(\theta) + \phi_m) \tag{6.1}$$

où l'amplitude A_m varie en fonction de le la réflectivité et du gain de l'antenne, et ϕ_m est la phase. H est la hauteur d'antenne mesurée sur le terrain (e.g., à l'aide d'un mètre-ruban) et est considérée comme fixe. En d'autres termes, H est la valeur de h que l'on obtiendrait théoriquement s'il n'y avait aucune pénétration des ondes GNSS dans le sol.
Différentes campagnes de mesures ont montré que les paramètres A_m et ϕ_m varient tous les deux avec l'humidité du sol (Chew *et al.*, 2014; Larson *et al.*, 2008, 2010), en raison des variations de réflectivité que cette dernière va engendrer. L'impact de l'humidité surfacique sur ϕ_m est plus important que celui sur A_m.

6.3 Méthodologie

L'objectif est d'estimer les variations d'humidité du sol à travers les variations temporelles des trois paramètres h, A_m et ϕ_m, déduits des mesures SNR pour chaque satellite en vue.

6.3.1 Détermination de la hauteur effective h

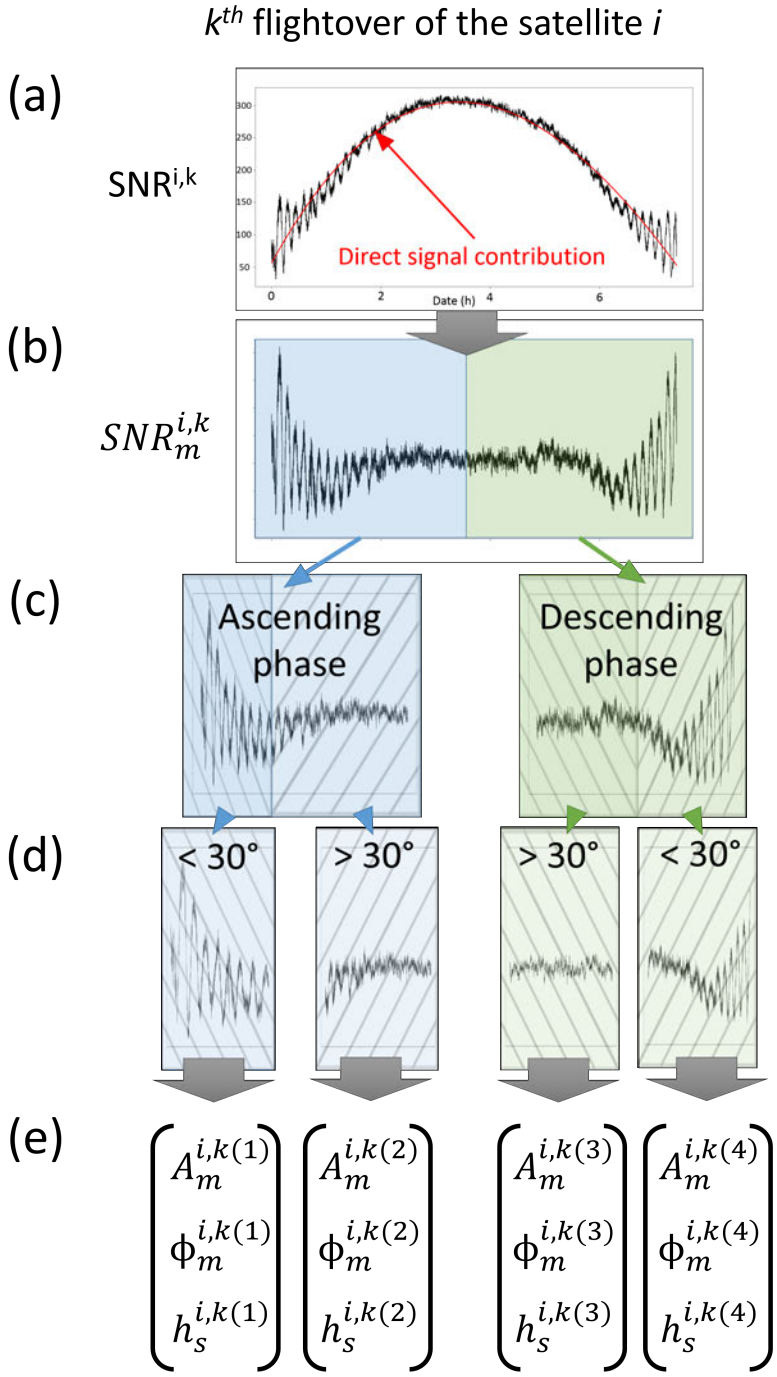


FIGURE 6.2 – Principe de détermination des séries temporelles de la phase ϕ_m et de l'amplitude A_m de la contribution du multi-trajet au SNR (méthode SNR statique).

De la même manière que pour les applications altimétriques présentées en section 5.3 page 113, deux méthodes pour déterminer h peuvent être utilisées :

– la méthode **SNR statique**, où $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ (la vitesse de variation de la hauteur d'antenne) est négligée dans l'équation 5.1. Les variations de $\tilde{f}$ sont alors directement proportionnelles aux variations de h . Je note h_s les hauteurs déterminées par cette méthode (voir figure 6.2).
– la méthode **SNR pseudo-dynamique**, que j'ai développée durant ma thèse (voir section 5.3 page 113). Cette méthode prend en compte le terme $\dot{h}$ dans la résolution de l'équation 5.1, en combinant les mesures SNR relatives aux satellites en vue simultanément. Soit h_d la hauteur effective déduite à l'aide de cette méthode.

6.3.2 Détermination de l'amplitude A_m et de la phase ϕ_m

Les principales étapes de la méthode de détermination des paramètres A_m et ϕ_m en fonction du temps sont illustrées dans la figure 6.2. Il s'agit globalement de la méthode générale proposée par Larson *et al.* (2008).

(a) Chaque passage (numéroté k) du satellite i au-dessus d'un même point (i.e., tous les jours sidéraux pour un satellite GPS) engendre une série temporelle de SNR, notée $SNR^{i,k}$;
(b) La contribution du signal réfléchi est isolée dans cette série en la corrigeant de la basse fréquence (polynôme de degré 2) : on obtient la série résiduelle $SNR_m^{i,k}$;
(c) La série $SNR_m^{i,k}$ est divisée en deux au niveau de l'apogée du passage, pour séparer les phases ascendantes et les phases descendantes. On obtient donc deux séries temporelles par passage de satellite.
(d) Les propriétés réfléchissantes du sol vont être fonction non seulement de son contenu en eau, mais également de l'angle d'incidence de l'onde (voir section 2.4.3.2 page 34). C'est pourquoi A_m et ϕ_m sont aussi amenées à varier en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Il est donc indispensable de décorréler leurs variations avec l'angle d'incidence sur le milieu (i.e., l'angle d'élévation du satellite), pour isoler la seule influence de l'humidité du sol. Pour ce faire, les séries sont divisées en différentes plages d'élévation avant de les analyser séparément. Habituellement, les faibles élévations sont privilégiées puisque plus l'élévation est élevée, plus l'amplitude de la contribution du multi-trajet au SNR sera faible, et donc moins la série SNR sera exploitable. Dans l'exemple de la figure 6.2, deux plages d'élévation sont considérées : la première de 2° à 30° et la deuxième > 30°. Soit N_{elev} le nombre de plages d'élévation que l'on considère ($N_{elev} = 2$ dans l'exemple de la figure). On obtient donc $N_{tot} = 2.N_{elev}$ séries différentes par passage de satellite et par paramètre ; le facteur 2 venant de la division entre arcs ascendant et descendant.
(e) L'amplitude A_m et la phase ϕ_m de ces N_{tot} séries sont calculées en résolvant l'équation 6.1 en utilisant une résolution classique basée sur le critère des moindres carrés. Au final, il y a N_{tot} valeurs de A_m et N_{tot} valeurs de ϕ_m par passage d'un satellite. On peut alors former N_{tot} séries temporelles de A_m et ϕ_m construites à partir des passages successifs d'un seul satellite. Par exemple, la première série temporelle $A_m^{i(1)}$ du satellite i sera constituée des valeurs $A_m^{i,1(1)}$, $A_m^{i,2(1)}$, ..., $A_m^{i,k(1)}$, ... mesurées pour tous les passages du satellite i au-dessus d'un même point d'observation (voir figure 6.2 (e)). La deuxième série temporelle $A_m^{i(2)}$ du satellite i sera constituée des valeurs $A_m^{i,k(2)}$ mesurées pour chaque passage k du satellites i, etc. Le principe est le même pour obtenir les séries temporelles de hauteur effective h_s (méthode SNR statique).

L'échantillonnage maximal (et donc la résolution temporelle maximale possible sur la détermination d'humidité du sol) que l'on peut obtenir avec la constellation GPS est de 23 h 56 min, car les satellites GPS, vus du sol, reprennent la même position dans le ciel au bout d'un jour sidéral, soit 23 h 56 min. Pour la même raison, avec la constellation GLONASS, l'échantillonnage maximal possible est d'environ 8 jours sidéraux.

6.4 L'expérience de Lamasquère

6.4.1 Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales

La méthode présentée dans ce chapitre a été testée in situ en traitant les données SNR collectées par une antenne géodésique installée dans un champs de soja situé près de Lamasquère (43°29'14.45"N ; 1°13'44.11"E) : voir figure 6.3. Lamasquère est une commune située au sud-ouest de la France, près de la ville de Toulouse, dans une zone surveillée par le laboratoire CESBIO (UMR 5126) dans le cadre du projet Sud-Ouest (Baup *et al.*, 2012). Le climat dans cette région est tempéré avec une précipitation annuelle moyenne de 600 mm. La moyenne mensuelle est de 50 mm, avec un maximum de 80 mm au printemps et un minimum de 32 mm en été, d'après les mesures effectuées par la station météorologique n° 3145400 de Météo-France, l'agence Française de Météorologie, située à 15 km du site d'étude.

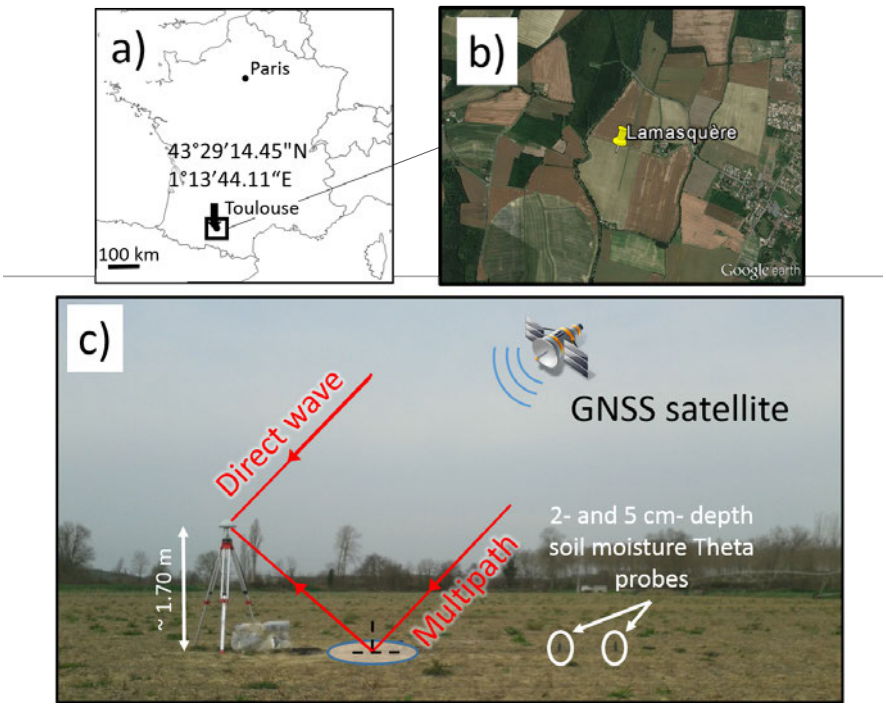


FIGURE 6.3 – Le site de mesure localisé à Lamasquère, dans le sud-ouest de la France (a), avec un récepteur Leica GR25 et une antenne AR10 installés dans une parcelle agricole (b), à côté de deux sondes d'humidité de type *Theta* (c).

Les données SNR ont été acquises du 5 février 2014 au 15 mars 2014 à une fréquence d'1 Hz,

par une antenne Leica AR10 et un récepteur GR25. Le sol autour de l'antenne durant cette période était sans aucune végétation.
Dans mon étude, seul le SNR mesuré sur la fréquence L1 est analysé car c'est celui qui est généralement utilisé pour estimer l'humidité du sol vu que son amplitude est plus élevée que celle du signal de fréquence L2, et engendre donc un signal SNR plus élevé.
La hauteur d'antenne au-dessus du sol varie entre 1,69 m et 1,70 m, avec une rugosité du sol de quelques centimètres, et on considère donc $H = 1,695$ m. Il n'y a aucun masque dans l'environnement immédiat, excepté pour les satellites à très basse élévation où des arbres peuvent perturber le signal reçu par l'antenne (voir figure 6.3 (c)). C'est pour cette raison que seules les mesures issues de satellites d'élévation supérieure à 2° sont considérées dans la suite de mon étude.
Le sol au voisinage de l'antenne est constitué de 18% de sable, 41% d'argile, et 41% de limon (moyennes effectuées sur 5 échantillons pris à proximité de l'antenne) et la capacité au sol est de 48 %. En se basant sur ces teneurs, et en suivant Hallikainen *et al.* (1985), il est possible de calculer de manière théorique la permittivité relative du sol en fonction de l'humidité volumique. D'après Behari (2006), la profondeur de pénétration P_d (en m) de l'onde dans le sol s'écrit :

$$P_d = \frac{\lambda \sqrt{Re(\epsilon_r}}{2\pi Im(\epsilon_r)} \tag{6.2}$$

avec $Re(\epsilon_r)$ et $Im(\epsilon_r)$ les parties réelles et imaginaires de la permittivité relative de la surface de réflexion (calculées d'après Hallikainen *et al.* (1985)).
En utilisant cette équation, la profondeur de pénétration des ondes GNSS (L1) dans le sol autour de l'antenne a été déterminée en fonction de l'humidité volumique (figure 6.4). D'après les valeurs d'humidité à 2 cm de profondeur mesurées sur le terrain par une sonde indépendante (voir section 6.4.3), la profondeur de pénétration des ondes GNSS devrait varier entre 4,6 cm et 5,9 cm durant la période de mesure.

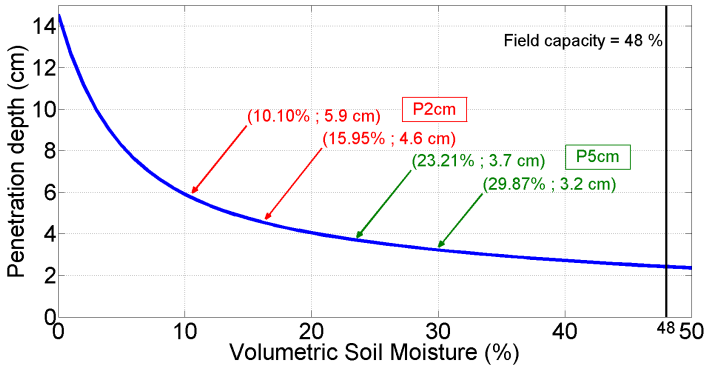


FIGURE 6.4 – Profondeur de pénétration théorique des ondes GNSS dans le sol autour de l'antenne géodésique.
Les valeurs affichées correspondent aux humidités volumiques extrêmes mesurées par deux sondes d'humidité indépendantes plantées dans le sol à proximité de l'antenne, à 2 cm (P_{2cm}) et 5 cm (P_{5cm}) de profondeur.

6.4.2 Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS

La figure 6.5 montre la position des points de réflexion spéculaire ainsi que la première surface de Fresnel obtenues en positionnant un récepteur à 1,695 m du sol à Lamasquère. Les simulations ont été réalisées pour le 1^{er} mars 2014, et pour des satellites dont l'angle d'élévation varie entre 2° et 90° (a) et 30° et 90° (b). Ces simulations ont été réalisées grâce au simulateur que j'ai développé et présenté dans le chapitre 4.

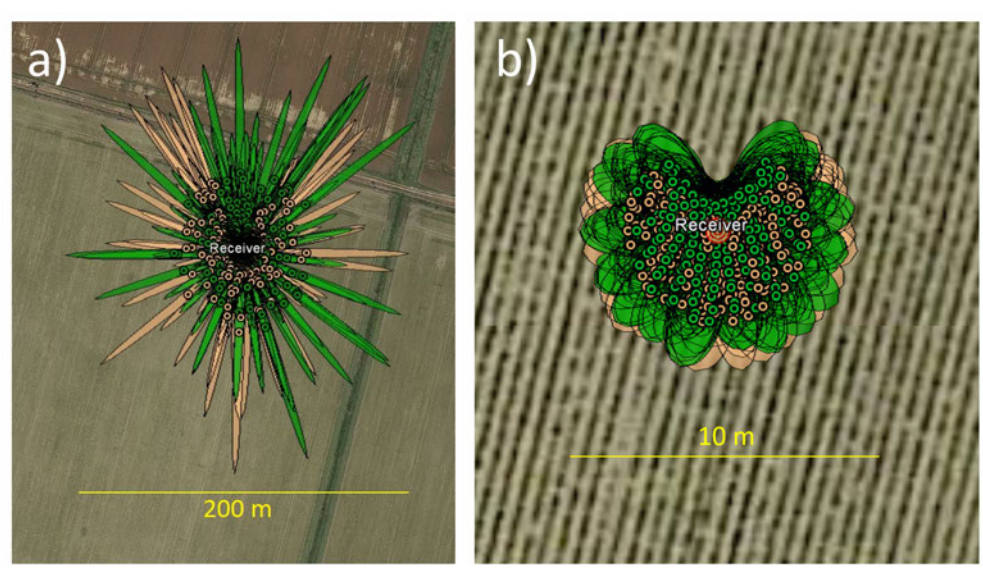


FIGURE 6.5 – Localisation des points de réflexion spéculaires et premières surfaces de Fresnel pour les constellations GPS (orange) et GLONASS (vert), sur le site de mesure de Lamasquère. Les simulations ont été réalisées le 1^{er} mars 2014. Les angles d'élévation des satellites varient entre 2° et 30° (a) et entre 30° et 90° (b).

Le simulateur fournit les informations suivantes : les points de réflexion les plus éloignés de l'antenne sont à environ 3,5 m pour des satellites d'élévation supérieure à 30°, et atteignent ~ 50 m pour des élévations supérieures à 2°. L'aire couverte par la première surface de Fresnel atteint 4 m^2 et 1130 m^2 respectivement.

6.4.3 Données utilisées pour la validation

Le site d'étude est équipé de deux sondes d'humidité de type *Theta*, installées à 2 cm et 5 cm de profondeur, à quelques mètres du récepteur GNSS (figure 6.3 (c)). L'échantillonnage est de 10 min et ces acquisitions ponctuelles servent de référence pour les estimations faites à partir de l'inversion du SNR. Je note P_{2cm} et P_{5cm} les mesures effectuées par les sonde à 2 cm et 5 cm de profondeur respectivement.

6.5 Résumé des principaux résultats

6.5.1 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_s, A_m et ϕ_m

Les différentes séries temporelles A_m^i, ϕ_m^i et h_s^i ont été calculées pour chaque satellite GPS i pendant les 6 semaines d'acquisitions, en considérant deux gammes d'élévation : de 2° à 30° et de 30° à 70° (voir section 6.3.2). Ces deux gammes d'élévation seront respectivement notées I_{2_30} et I_{30_70} dans la suite du texte. Théoriquement, il est donc possible de calculer $N_{tot} = 4$ séries différentes de A_m^i, ϕ_m^i et h_s^i pour chaque satellite i durant toute la période d'acquisition. Le coefficient de corrélation linéaire R est calculé entre chacune de ces séries, et les mesures ponctuelles d'humidité P_{2cm} ($R_{P_{2cm}}$) et P_{5cm} ($R_{P_{5cm}}$). Pour cela, ces dernières sont normalisées sur toute la période à partir des valeurs extrêmes de la série avec laquelle elles sont comparées. La moyenne des corrélations obtenues est présentée dans le tableau 6.1.

TABLE 6.1 – Moyenne des coefficients de corrélation linéaire $\bar{R}$ entre les différentes observables du SNR et P_{2cm}/P_{5cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}) et les angles d'élévation élevés uniquement (I_{30_70}).

	I_{2_30}	I_{30_70}	Résolution temporelle
A_m^i	-0,32/-0,37	0,28/0,29	1 jour
ϕ_m^i	0,84/0,81	-0,45/-0,42	1 jour
h_s^i	-0,57/-0,57	0,03/0,02	1 jour

6.5.1.1 Faibles angles d'élévation : 2° à 30°

Phase ϕ_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles de phase ϕ_m calculées pour tous les satellites GPS est respectivement de $\bar{R}_{P_{2cm}} = 0,84$, et $\bar{R}_{P_{5cm}} = 0,81$: voir tableau 6.1.
La meilleure corrélation est obtenue avec la phase $\phi_{m-I_{2_30}}^{PRN32}$ du satellite PRN32 avec $R_{P_{2cm}} = 0,97$ et $R_{P_{5cm}} = 0,95$. Les différentes séries temporelles utilisées pour ces calculs sont représentées dans la figure 6.6.
Les excellentes corrélations linéaires obtenues entre les variations de phase déduites des mesures SNR et les variations d'humidité mesurées par les sondes suggèrent qu'il existe une relation linéaire simple (et empirique) entre ces deux paramètres (figure 6.7). Je propose donc un modèle linéaire reliant l'humidité volumique (en %) et la phase ϕ_m (en °) dont les coefficients (i.e., pente et ordonnée à l'origine) sont déterminées à partir des observations de ces deux paramètres en minimisant les résidus quadratiques suivant le critère des moindres carrés.
Par exemple, en utilisant P_{2cm} et $\phi_{m-I_{2_30}}^{PRN32}$, les coefficients linéaires ajustés donnent :

$$y(\%) = 0,36x(^\circ) + 87,42(\%) \tag{6.3}$$

Les corrélations obtenues avec les autres satellites sont légèrement moins bonnes qu'avec le satellite PRN 32.

Amplitude A_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles A_m calculées pour tous les satellites GPS est de -0,32 (P_{2cm}) et -0,37 (P_{5cm}). Ces corrélations

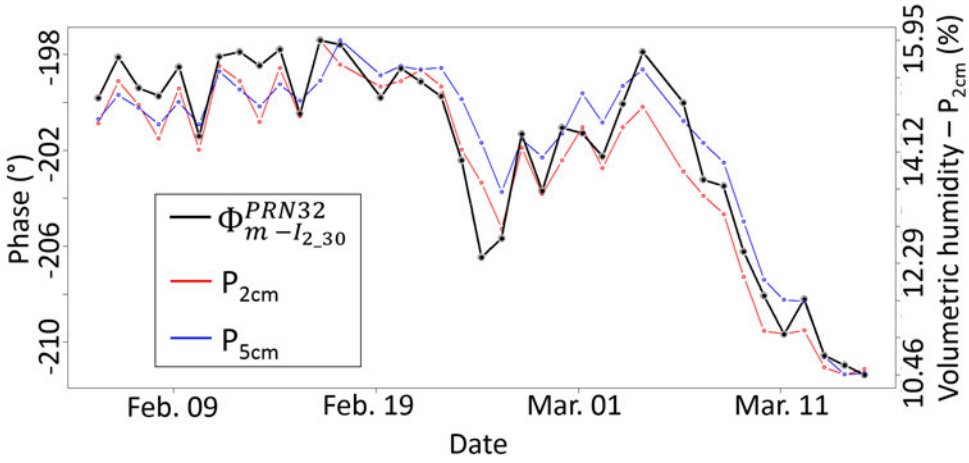


FIGURE 6.6 – Évolution des séries temporelles $\phi^{PRN32}_{m-I_{2_30}}$, P_{2cm} et P_{5cm} du 5 février au 15 mars 2014.

sont négatives et particulièrement faibles. L'amplitude apparaît ainsi être un moins bon indicateur de l'humidité que la phase ϕ_m.

Hauteur effective h_s (méthode SNR statique) : La moyenne des corrélations obtenues pour h_s avec chaque satellite est de -0,57 (P_{2cm}) et -0,57 (P_{5cm}).

Conclusion : Les meilleurs résultats sont obtenus avec la phase ϕ_m, ce qui est cohérent avec les travaux antérieurs, e.g., Chew *et al.* (2014). La phase ϕ_m est corrélée avec l'humidité, alors que A_m et h_s sont anti-corrélées, ce qui est également cohérent avec les études antérieures. Le signe de la corrélation est lié à l'évolution des coefficients de réflexion avec l'humidité (voir section 6.6).

6.5.1.2 Angles d'élévation élevés : 30° à 70°

On considère cette fois uniquement les élévations élevées, entre 30° et 70° (I_{30_70}).

Phase ϕ_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles ϕ_m calculées pour tous les satellites GPS est de -0,45 (P_{2cm}) et -0,42 (P_{5cm}).

Amplitude A_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles A_m calculées pour tous les satellites GPS est de 0,28 (P_{2cm}) et 0,29 (P_{5cm}).

Hauteur effective h_s (méthode SNR statique) : La moyenne des corrélations obtenues pour h_s avec chaque satellite est de 0,03 (P_{2cm}) et 0,02 (P_{5cm}).

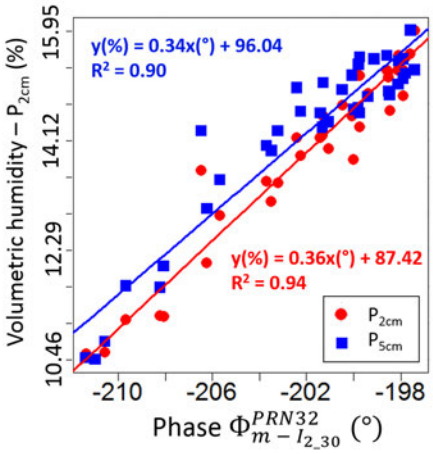


FIGURE 6.7 – Variations de l'humidité volumique P_{2cm} et P_{5cm} sur le site de Lamasquère en fonction de celles de la phase $\phi^{PRN32}_{m-I_{2_30}}$.

Conclusion : Pour les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), on peut constater que :

1. les corrélations entre les observables et les mesures d'humidité des sondes sont moins bonnes qu'avec la gamme d'élévation faible (voir tableau 6.1). On n'observe même aucune corrélation avec $h_s - I_{30_70}$.
2. le signe de la corrélation est inversé par rapport à I_{2_30} : la phase ϕ_m apparait ainsi anti-corrélée avec l'humidité tandis que l'amplitude A_m est corrélée.

6.5.1.3 Combinaison des satellites entre eux

Faibles angles d'élévation : 2° à 30° J'ai combiné les séries temporelles normalisées $A^i_{m-I_{2_30}}$ obtenues pour chaque satellite i en une seule série temporelle $A^{all_sat}_{m-I_{2_30}}$. Pour cela, toutes les séries temporelles $A^i_{m-I_{2_30}}$ obtenues pour tous les satellites i ont été normalisées entre 0 et 1 et associées pour former une série unique à laquelle j'ai appliquée une moyenne mobile de taille δt. J'ai fait de même pour les séries $\phi^i_{m-I_{2_30}}$ et $h^i_{s-I_{2_30}}$.
Les corrélations linéaires obtenues respectivement avec ces 3 séries temporelles "cumulées" et les sondes d'humidité sont largement améliorées et la résolution temporelle finale obtenue est de 10 min (au lieu d'un jour pour les séries prises séparément). Avec P_{2cm}, on obtient ainsi des corrélations respectives de 0,72, 0,95 et 0,90 avec $A^{all_sat}_{m-I_{2_30}}$, $\phi^{all_sat}_{m-I_{2_30}}$ et $h^{all_sat}_{s-I_{2_30}}$. Le tableau 6.2 présente ces différents résultats.

Angles d'élévation élevés : 30° à 70° De la même manière que pour I_{2_30}, les observations relatives à chaque satellite pour les angles d'élévation élevés (I_{30_70}) ont été combinées en 3 séries uniques $A^{all_sat}_{m-I_{30_70}}$, $\phi^{all_sat}_{m-I_{30_70}}$, et $h^{all_sat}_{s-I_{30_70}}$. Une fois encore, les corrélations obtenues et la résolution temporelle sont améliorées, avec $R_{P_{2cm}}$ respectivement égal à 0,91, 0,92 et 0,39 : (voir tableau 6.2).

TABLE 6.2 – Valeur absolue des coefficients de corrélation linéaire R entre les différentes observables du SNR et P_{2cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}), les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), et la combinaison des deux ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$).

δt est la taille de la fenêtre mobile utilisée pour obtenir la meilleure corrélation. all_sat désigne la combinaison des séries temporelles obtenues avec tous les satellites GPS pour obtenir une série temporelle unique de phase, amplitude ou hauteur (la corrélation avec P_{2cm} est alors donnée en valeur absolue).

	I_{2_30}	I_{30_70}	$I_{2_30} \otimes I_{30_70}$	Réso. temporelle
$A_m^{all_sat}$	0,72 ($\delta t = 55$ h)	0,91 ($\delta t = 55$ h)	0,83 ($\delta t = 55$ h)	10 min
$\phi_m^{all_sat}$	0,95 ($\delta t = 8$ h)	0,92 ($\delta t = 25$ h)	0,91 ($\delta t = 11$ h)	10 min
$h_s^{all_sat}$	0,90 ($\delta t = 11$ h)	0,39 ($\delta t = 40$ h)	0,87 ($\delta t = 11$ h)	10 min

Combinaison des deux gammes d'élévation Toutes les séries temporelles $A^i_{m-2_30}$ obtenues avec I_{2_30} pour tous les satellites ont été multipliées par -1 et normalisées entre 0 et 1 pour être combinées avec les séries $A^i_{m-30_70}$ également normalisées. En joignant ainsi les deux gammes d'élévation ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$ dans le tableau 6.2), le coefficient linéaire n'est pas meilleur que si l'on considère uniquement I_{2_30}. J'ai procédé de la même manière avec les séries $\phi^i_{m-2_30}$ et $h^i_{s-2_30}$, et une fois encore, les résultats sont globalement moins bons que si l'on considère uniquement les faibles angles d'élévation. La combinaison des deux gammes d'élévation ne semble ainsi pas améliorer les résultats obtenus en considérant uniquement les faibles angles d'élévation.

6.5.1.4 Conclusion

Pour conclure, les meilleurs résultats -toutes séries confondues- sont obtenus en combinant toutes les séries temporelles $\phi_m(t)$ obtenues avec tous les satellites GPS, à savoir $\phi^{all_sat}_{m-I_{2_30}}$. Cette série finale est présentée dans la figure 6.8 (a).
Une corrélation croisée entre $\phi^{all_sat}_{m-I_{2_30}}$ et P_{2cm}, a été déterminée par analyse en ondelettes de Morlet, et le résultat est présenté dans la figure 6.8 (b). Les plus grandes périodes de variations de l'humidité du sol sont ainsi parfaitement retrouvées sur les 6 semaines d'étude, et des variations journalières sont aussi détectées, avec divers événements ponctuels de pluie.

6.5.2 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_d

TABLE 6.3 – Coefficients de corrélation linéaire R entre $h_d^{all_sat}$ et P_{2cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}), les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), et la combinaison des deux ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$).

δt est la taille de la fenêtre mobile utilisée pour obtenir la meilleure corrélation.

	I_{2_30}	I_{30_70}	$I_{2_30} \otimes I_{30_70}$	Réso. temporelle
$R_{P_{2cm}}$	-0,95 ($\delta t = 55$ h)	0,82 ($\delta t = 55$ h)	0,95 ($\delta t = 33$ h)	10 min

La série temporelle h_d a été calculée en appliquant la méthode SNR pseudo-dynamique (voir section 5.3 page 113), en combinant les satellites GPS et GLONASS, et en différentiant les gammes d'élévation I_{2_30} et I_{30_70}. Différentes tailles de fenêtre glissante δt ont été testées, et les résultats sont présentés dans le tableau 6.3.

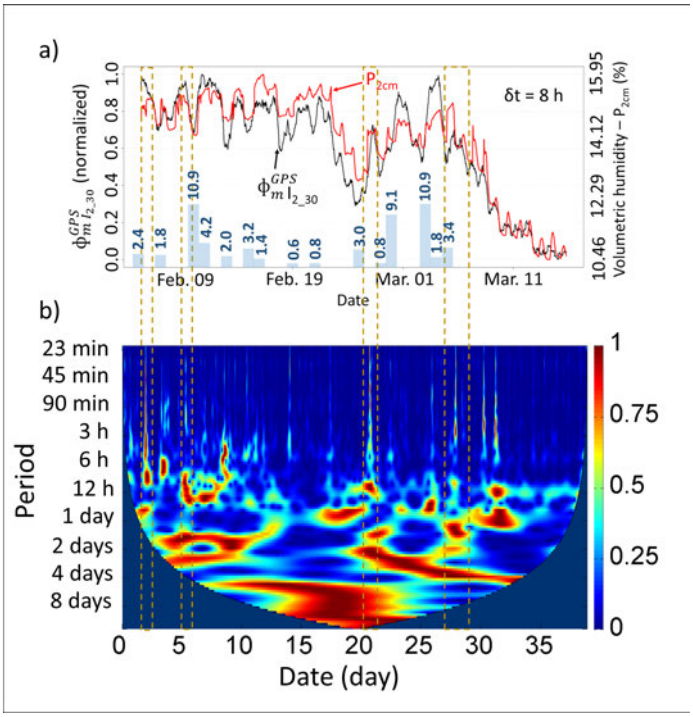


FIGURE 6.8 – a) Évolution de $\phi^{all_sat}_{m-I_{2_30}\otimes I_{30_70}}$ et de P_{2cm} (le coefficient de corrélation linéaire est de 0.95). Les barres bleues sont les événements de pluie (en mm). b) Corrélation croisée entre $\phi^{all_sat}_{m-I_{2_30}\otimes I_{30_70}}$ et P_{2cm}, calculée par analyse en ondelettes de Morlet.
L'amplitude de la corrélation croisée est normalisée entre 0 et 1 pour chaque période. L'abscisse correspond au jour dans les 6 semaines d'acquisitions, et l'ordonnée correspond à la période analysée (i.e., échelle de temps).

On peut constater que la méthode SNR pseudo-dynamique donne de meilleurs résultats que la méthode SNR statique, puisqu'on passe d'une corrélation de 0,90 à 0,95 (I_{2_30}) et de 0,39 à 0,82 (I_{30_70}).
De manière similaire à h_s, la corrélation entre h_d et l'humidité est négative pour les faibles angles d'élévation (I_{2_30}), et positive pour les angles d'élévation élevés (I_{30_70}). Cette inversion du signe de la corrélation est expliquée dans la section 6.6.

6.6 Discussion sur l'inversion du signe de la corrélation entre les petits et grands angles d'élévation

D'après les résultats précédents, le signe de la corrélation entre les trois observables A_m, ϕ_m et h avec l'humidité du sol s'inverse lorsque l'on considère les faibles angles d'élévation (I_{2_30}) et les angles d'élévation élevés (I_{30_70}). La valeur d'angle 30° semble être l'angle de coupure dans notre cas.
Ceci peut s'expliquer par l'effet combiné : (i) des coefficients de réflexion des composantes RHCP et LHCP (qui dépendent de l'angle d'élévation), et (ii) du gain d'antenne qui rejette, à

un certain niveau, les composantes RHCP et LHCP (dépendant également de l'angle d'élévation).

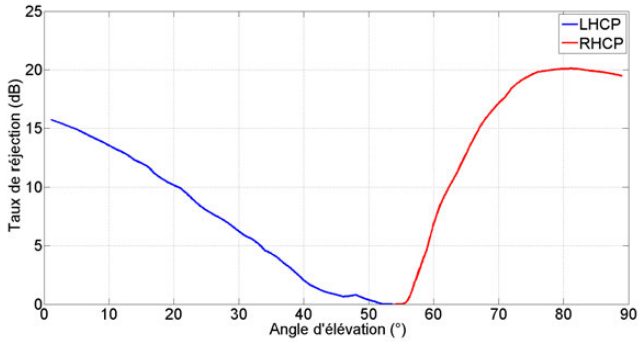


FIGURE 6.9 – Taux de réjection RHCP et LHCP réels de l'antenne Leica AR10 en fonction de l'angle d'élévation.

Le taux de réjection LHCP pour l'antenne AR10 utilisée est de 1,4 dB. En prenant cette valeur en compte, et en considérant un taux de réjection RHCP nul, il est possible de calculer le coefficient de réflexion effectif défini par l'équation 2.23 pour les valeurs minimales et maximales d'humidité mesurées sur le terrain. Comme on peut le constater sur la figure 6.10 (a), le coefficient de réflexion effectif est corrélé à l'humidité du sol pour des faibles angles d'élévation, et anti-corrélé pour des angles d'élévation élevés. L'angle de coupure est égal à $\sim 43°$.
On considère à présent le coefficient de réflexion effectif défini par l'équation 2.24, prenant en compte le diagramme de gain réel de l'antenne AR10 (figure 2.12). L'angle de coupure est cette fois d'environ 20° (6.10 (b)). La figure 6.9 présente les taux de réjection RHCP et LHCP réels de l'antenne AR10 utilisée à Lamasquère.
Cet angle de coupure expliquerait donc l'inversion de corrélation entre les trois observables du SNR (A_m, ϕ_m et h) et l'humidité du sol, dans les cas de petits ou de grands angles d'élévation.
Cependant, une valeur précise de cette angle de coupure n'est pas facile à obtenir, premièrement parce que le gain d'antenne dépend de l'azimuth qui n'est pas connu, et je ne l'ai pas pris en compte dans mon modèle. Deuxièmement, il ne dépend pas uniquement de la différence entre le sol humide et le sol sec, mais également du gradient d'humidité entre les deux, c'est à dire de la vitesse de variation d'un état extrême à l'autre.
La figure 6.11 est un abaque que j'ai calculé en me basant sur le coefficient de réflexion effectif à partir du diagramme de gain réel de l'antenne AR10. Cet abaque permet de déterminer l'angle de coupure théorique en fonction de la permittivité relative du sol à un état 1 (humide ou sec) passant à un état 2 (respectivement sec ou humide).
Ce graphe révèle que l'angle de coupure varie généralement entre $\sim 20°$ et $\sim 30°$. Grâce à un abaque de ce type, on pourrait imaginer mesurer les caractéristiques du sol à un instant donné en observant l'angle à partir duquel les corrélations s'inversent. Cependant, au vu de la faible variabilité de l'angle de coupure avec la permittivité relative, il serait nécessaire de déterminer l'angle de coupure avec une précision qu'il est actuellement difficile d'atteindre.

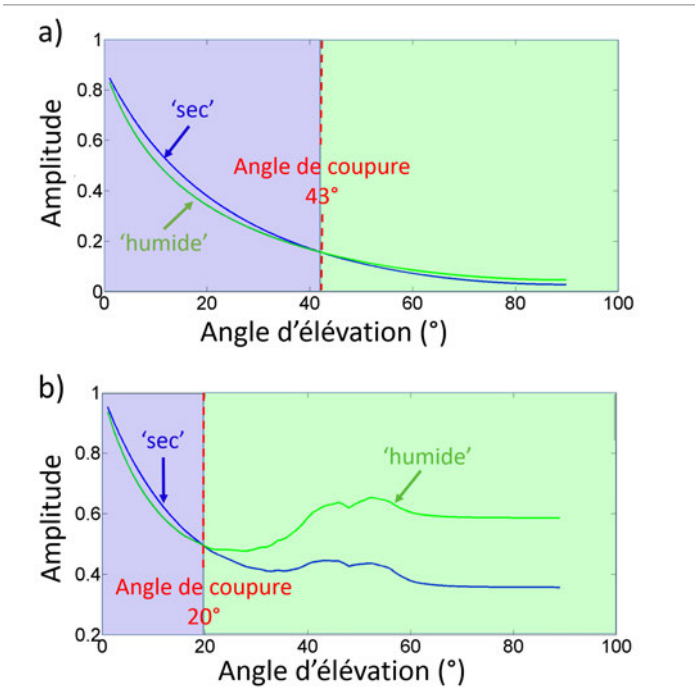


FIGURE 6.10 – Coefficient de réflexion effectif pour une onde incidente RHCP reçue par l'antenne Leica AR10 après réflexion sur un sol humide (29,87%) et sec (10,10%).
Le taux de réjection LHCP est considéré comme constant et le taux de réjection RHCP est considéré comme nul (a), et la dépendance des deux taux de réjection avec l'angle d'élévation est pris en compte (b).

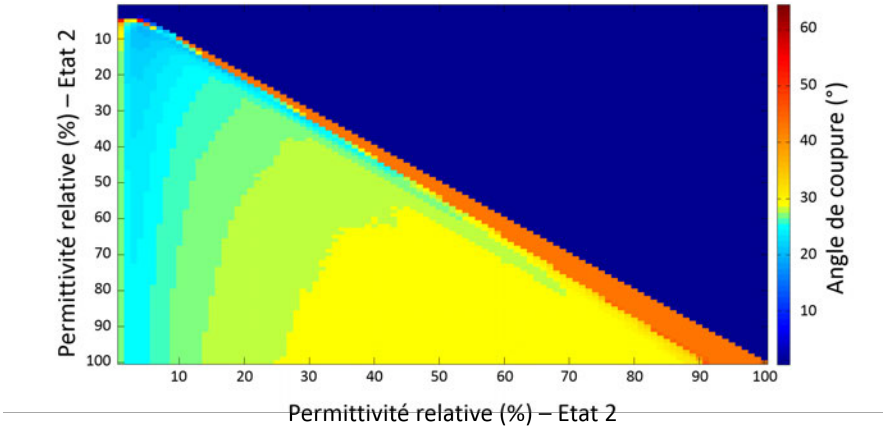


FIGURE 6.11 – Angle de coupure obtenu lors du passage du sol d'un état 1 (humide ou sec) à un état 2 (respectivement sec ou humide).

6.7 Conclusions et perspectives

Dans cette étude, un récepteur géodésique classique et son antenne ont été utilisés pour déterminer les variations d'humidité du sol d'une parcelle agricole à partir de 6 semaines de mesures GNSS. La méthode se base sur l'analyse du rapport signal sur bruit (SNR) enregistré par le récepteur. Le SNR contient des informations sur la nature du sol en raison de l'interaction entre l'onde GNSS et le sol lors de la réflexion, avant d'être captée par l'antenne. Trois observables peuvent être déduites de la contribution du signal réfléchi au SNR : la phase ϕ_m, l'amplitude A_m et la hauteur effective h de l'antenne (liée à la fréquence $\tilde{f}$). Ces trois observables varient en fonction de l'humidité.
J'ai été amené à tester la méthode proposée par Larson *et al.* (2008, 2010) pour extraire ces trois paramètres. Les résultats obtenus sont cohérents avec les travaux antérieurs (e.g., Chew *et al.*, 2014) et la meilleure corrélation avec l'humidité superficielle est obtenue avec la phase ϕ_m. J'ai montré qu'il était possible de combiner les mesures effectuées sur l'ensemble des satellites GPS en vue de produire une seule série temporelle plus précise. Cette combinaison améliore considérablement la corrélation avec l'humidité du sol, ainsi que la résolution temporelle, qui passe alors de 1 jour à 10 min.
Si les études antérieures considéraient uniquement les faibles angles d'élévation (inférieurs à 30° ou 40° généralement), j'ai montré qu'il était possible de traiter les mesures SNR correspondant aux angles d'élévation élevés, en prenant en compte une inversion du signe de la corrélation entre les deux gammes d'élévation. D'une manière générale, les résultats obtenus avec les angles élevés sont moins bons qu'avec les faibles angles d'élévation.
Les résultats obtenus par inversion du SNR ont été comparés à des mesures indépendantes d'humidité réalisées à 2 cm et 5 cm de profondeur. Les résultats tendent à démontrer que la meilleure corrélation avec les mesures GNSS-R est obtenue avec l'humidité à 2 cm.
Les meilleurs résultats sont obtenus avec la combinaison de toutes les séries temporelles ϕ_m de tous les satellites, en considérant uniquement les faibles angles d'élévation (entre 2° et 30°). Dans ce cas optimal, j'ai obtenu une corrélation égale à 0,95 avec l'humidité mesurée indépendamment à 2 cm de profondeur pendant les 6 semaines d'acquisition, avec une résolution temporelle de 10 min.

Dans cette étude, j'ai également proposé une explication à l'inversion du signe de la corrélation entre les observables du SNR et l'humidité autour de 30° d'élévation. Mon explication se base sur le calcul d'un coefficient de réflexion effectif prenant en compte les coefficients de réflexion de Fresnel calculés à partir des taux de réjection des ondes RHCP et LHCP réels de l'antenne réceptrice. En effet, le signe de la corrélation entre l'humidité et ce coefficient de réflexion effectif s'inverse à un angle proche de 30°.

Enfin, j'ai testé deux méthodes différentes de détermination de la hauteur effective h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion. Cette dernière est susceptible de varier en fonction de l'humidité du sol (en raison des changements de profondeur de pénétration des ondes GNSS qui est fonction de l'humidité). La première méthode est celle proposée par Larson *et al.* (2008, 2010), et que j'appelle *SNR statique* dans mon manuscrit. La deuxième, que je propose, est celle présentée au chapitre 5 (*SNR dynamique*) qui combine les mesures effectuées sur les satellites en vue simultanément pour permettre la prise en compte d'un facteur correctif dans la détermination de h (i.e., $\dot{h}$, la vitesse de changement de hauteur de la sur-

face réfléchissante), habituellement négligé. Il apparait que la prise en compte de la pseudo-dynamique de la surface de réflection avec la méthode SNR pseudo-dynamique améliore l'estimation puisqu'on passe d'une corrélation de 0,90 à 0,95 pour les faibles angles d'élévation (2° à 30°), et de 0,39 à 0,82 pour les angles d'élévation élevés (30° à 70°).

Pour conclure, il est tout à fait possible d'utiliser une antenne GNSS classique pour mesurer les variations d'humidité du sol environnant. Aucune modification matérielle n'est à apporter. La précision obtenue est très bonne (corrélation de 0,95 avec des sondes d'humidité classiques implantées à proximité, à 2 cm de profondeur), et la résolution temporelle est excellente (10 min). La résolution spatiale est de quelques dizaines de mètres dans l'exemple de mon étude, mais il est possible de l'améliorer en faisant varier la hauteur de l'antenne ou de déplacer l'antenne pour couvrir une région complète par exemple. Le GNSS-R avec le système à antenne unique est donc une excellente alternative aux moyens de mesures actuels de l'humidité du sol (sondes, télédétection) en faisant le lien entre les différentes échelles spatio-temporelles classiquement atteintes (ponctuelles et continues pour des sondes d'humidité, couvrant une large zone mais faible répétitivité pour des mesures satellites). Pour être totalement objectif, il faut cependant noter que ni la topographie du terrain ni la rugosité du sol n'ont été prises en compte dans cette étude (le sol est considéré comme plat et de rugosité constante). De même, les effets possible de la végétation et de la neige n'ont pas été étudiés. La technique IPT apporte des solutions pour répondre à ces problèmes (voir section 3.4.1 page 57).

6.8 *Article sous presse* : IEEE JSTARS - Detection of soil moisture variations

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

Detection of Soil Moisture Variations Using GPS and GLONASS SNR Data for Elevation Angles Ranging From 2° to 70°

Nicolas Roussel, Frédéric Frappart, Guillaume Ramillien, José Darrozes, Frédéric Baup, Laurent Lestarquit, and Minh Cuong Ha

***Abstract*—We propose a Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R) interference pattern technique method to estimate the temporal variations of the soil moisture content of the ground surrounding a single geodetic antenna. Three parameters can be inverted from GNSS signal-to-noise ratio (SNR) acquisitions: amplitude/phase of the multipath contribution to SNR and effective antenna height. Our method is applied to determine the surface moisture of a bare soil at Lamasquère, France, from February 5 to March 15, 2014. First, only data from low satellite elevation angles ($< 30°$) are taken into consideration and are compared with independent 2-cm depth soil moisture records. The combination of the measurements from all GPS satellites, tested for the first time, improves the quality of the results with a correlation coefficient reaching 0.95, with a 10-min sampling rate. Our study shows that it is also possible to take high satellite elevation angles into account, even if the sign of the correlation appears to be reversed w.r.t. data from low satellite elevation angles. The cut-off angle where the sign of the correlation reverses seems to be around 30°. With regard to the effective antenna height, only a very low correlation is observed for high satellite elevation angles. We propose a new inversion method taking the pseudo-dynamic of the surface into account, which increases the correlation from 0.39 to 0.82. By normalizing and inverting the time series obtained from either low or high satellite elevation angles, it is possible to combine them, which enhances the results (correlation = 0.95).**

***Index Terms*—Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R), multipaths, remote sensing, signal-to-noise ratio (SNR), soil moisture.**

Manuscript received September 14, 2015; revised February 19, 2016; accepted February 22, 2016. This work was supported in part by the CNES in the framework of the TOSCA project "Hydrologie, Océanographie par Réflectométrie GNSS (HORG)" and in part by the RTRA STAE foundation in the framework of the "Potentialités de la réflectométrie GNSS In Situ et Mobile (PRISM)" project and OMP through AO1 UPEE. It is also part of the European H2020 MISTRALE project. The work of N. Roussel was supported in part by a Ph.D. granted from Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR). *(Corresponding author: Nicolas Roussel.)*

N. Roussel, F. Frappart, G. Ramillien, J. Darrozes, and M. C. Ha are with GET, UMR 5563, CNRS/IRD/UPS, OMP, 31400 Toulouse, France (e-mail: nicolas.roussel@get.obs-mip.fr; frederic.frappart@get.obs-mip.fr; guillaume.ramillien@get.obs-mip.fr; jose.darrozes@get.obs-mip.fr; muinhcuong.ha@get.omp.eu).

F. Baup is with CESBIO, UMR 5126, IUTA, 32000 Auch, France (e-mail: frederic.baup@iut-tlse3.fr).

L. Lestarquit is with CNES, 31400 Toulouse, France (e-mail: laurent.lestarquit@cnes.fr).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at http://ieeexplore.ieee.org.

Digital Object Identifier 10.1109/JSTARS.2016.2537847

I. Introduction

SOIL moisture is a key variable of the climate system and plays an integrative role among the various subfields of physical geography [1], [2]. The soil moisture measurements are critical components for climate studies, weather predictions, analysis of flood zones or the recharge of aquifers. In agricultural areas, analyzing in real time the soil water content would allow the farmer to optimize the management of his plots (tillage, treatments, irrigation, etc.). Unfortunately, the measurements from classical humidity probes are punctual and are not representative of the soil moisture of the plot at a local scale, and monitoring an entire parcel is not realistic for operational applications. With the advent of remote sensing, soil moisture can be systematically monitored at the global scale but unfortunately with low temporal resolution. Even with the SMOS satellite mission [3], the repetitivity of the measurements is three days, which is not sufficient to monitor daily variations. Alternatively, recent studies suggested to take advantage of the electromagnetic waves, continuously emitted by the Global Navigation Satellite System (GNSS) satellite constellations, to retrieve different geophysical parameters of the Earth surface. This opportunistic remote sensing technique, known as GNSS-reflectometry (GNSS-R), is based on the analysis of the GNSS waves which reflect upon the Earth surface, and offers a wide range of applications in Earth sciences and particularly in soil moisture monitoring. It also presents the advantage of covering a whole surface around the antenna. The size of the sensing footprint only depends on the height of the antenna above the reflecting surface and the satellite elevation angle (see, e.g., [4]–[6]).

The aim of this article is to demonstrate that previous GNSS-R algorithms based on a single geodetic antenna and receiver to recover the surface moisture of a bare soil can significantly be improved. The method is based on the analysis of the signal-to-noise ratio (SNR) data routinely collected by a geodetic antenna. SNR data incorporate both direct and reflected signals. These latter interact with the ground while reflecting. Variations of the nature of the surface is likely to modify the properties of the reflected waves, hence dependence of SNR on soil moisture content. Three different parameters are under study: the amplitude, the phase, and the frequency of the multipath contribution to SNR. The latter parameter is directly linked to the antenna height above the reflecting surface [7]. Results obtained from the different GPS satellites will be compared between them,

1939-1404 © 2016 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.
See http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

as well as combined into single time series. Previous studies (e.g., [8], [9]) filtered out SNR data from high satellite elevation angles ($>\sim 30^\circ$) as they considered the respective multipath contribution to SNR insufficient to be detected. In the present study, two ranges of satellite elevation angles are tested: the first one from 2° to 30° and the second one from 30° to 70°. We avoid satellites with high elevations because in this case the multipath is highly mitigated by the antenna and cannot be measured with our method. Results of both ranges of elevation angle will be compared and then combined into a single observable. Our study is presented in four main parts. Section II presents the major methods used to estimate surface soil moisture from GNSS-R, focusing on the SNR-based retrieval of the soil moisture changes. Section III details our inversion method which is applied to *in situ* data, collected in Lamasquère, France ($43^\circ 29' 14.45'' \text{N}$; $1^\circ 13' 44.11'' \text{E}$). This observation site is equipped with two humidity probes needed to validate soil moisture retrieved by inversion of the SNR signal. Section IV describes the experimental setup and ground truth data generated during the experimental campaign. Section V analyzes the results of this campaign by comparing them to independent soil moisture records made by ML3 ThetaProbe Sensors used as validation.

II. State-of-the-Art

A. Multipath and Polarization of GNSS Reflected Waves

The GNSS provides autonomous geo-spatial positioning with global coverage thanks to almost 60 satellites from different constellations (GPS, GLONASS, Galileo, etc.) emitting continuously L-band microwave signals (e.g., $L1_{\text{GPS}} = 1575.42$ MHz and $L2_{\text{GPS}} = 1227.60$ MHz). While the emitted signal from GNSS satellites is supposed to be received directly in the zenith-looking hemisphere of a geodetic-quality GNSS antenna, a part of it comes from below the horizon, after one or several reflections in the surrounding environment. These so-called multipath signals interfere with the direct wave and affect the GNSS measurements recorded by the receiver by adding new frequencies.

Geodetic GNSS antennae are designed to reduce the contribution of the multipaths which degrade the accuracy of the position determination [10]. Classical GNSS antennae use the polarization properties of the GNSS signals to filter out part of the reflected waves. The right-hand circular polarization (RHCP) of the GNSS waves is likely to change upon reflection depending on the nature of the reflector (reflection coefficient) and the grazing angle θ that corresponds to the satellite elevation angle.

The reflected signal can be considered as the sum of two circularly polarized signals: one that maintains the *copolarized* (original RHCP) component and a *cross-polarized* (opposite LHCP) one. The copolar (τ_o) and cross-polar (τ_x) reflection coefficients can be expressed as a function of the horizontal (τ_H) and vertical (τ_V) reflection coefficients. Following [11], they are respectively given by

$$\tau_o = \frac{\tau_H + \tau_V}{2} \quad \tau_x = \frac{\tau_H - \tau_V}{2} \tag{1}$$

with

$$\tau_H = \frac{\sin(\theta) - \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}}{\sin(\theta) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}} \quad \tau_V = \frac{\epsilon \sin(\theta) - \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}}{\epsilon \sin(\theta) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}} \tag{2}$$

where $\epsilon = \epsilon_r + j\epsilon_i$ is the complex dielectric constant of the reflecting medium with ϵ_r the relative permittivity, $\epsilon_i = -60\lambda\sigma$ the imaginary part, and σ the conductivity of the reflecting surface medium. λ is the wavelength of the signal (e.g., 19.05 cm with L1).

The nature of the final polarization after reflection is determined by the relative phase relationship of each linear component upon reflection [12]: it will be elliptical when the horizontal and vertical coefficients are different, circular when they are equal, and linearly polarized when the vertical component goes to zero.

For satellite elevation angles below a specific value known as the Brewster angle [13], the predominant signal component after reflection is the copolar (RHCP), and hence the reflected wave is right-hand elliptical polarization. Conversely, for elevation angles greater than the Brewster angle, the predominant signal component is the cross-polar (LHCP), and hence the reflected wave is left-hand elliptical polarization [14]. GNSS geodetic antennae reduce LHCP signals to remove theoretical effects of multipaths in positioning. GNSS antennae radiation pattern focuses on the antenna gain for RHCP signals toward zenith and decreases the gain with decreasing elevation angle.

These filtering techniques of a GNSS antenna based on the signal polarization affect the total received signal by reducing the amplitude of the reflected signals with respect to the direct signal amplitude. But, fortunately for GNSS-R sciences, the energy of the reflected signal is not completely dampened [8].

B. SNR Analysis

1) Reflected Signal Contribution to SNR: The signature of the reflections can be detected in the SNR data recorded by GNSS receivers on the different frequencies. SNR is related to the addition of the powerful direct and weaker reflected GNSS signals in the receiving antenna.

Following [11], SNR at any instant and for a satellite elevation angle θ is

$$SNR^2(\theta) = A_d^2(\theta) + A_{mp}^2(\theta) + 2A_d(\theta)A_{mp}(\theta)cos(\psi) \tag{3}$$

where A_{mp} and A_d are the amplitudes of the multipath and direct signal respectively, and ψ the phase difference between the two signals.

Considering that $A_{mp} < A_d$ due to the reflection process, (3) shows that overall magnitude of the SNR is mainly driven by the direct signal. The reflected signal will affect the SNR by producing a high-frequency oscillation associated with a small amplitude perturbation w.r.t. the direct signal, which depends on the satellite elevation angle [7]. The reflected signal perturbations will mainly be visible for low satellite elevation angles.

In order to analyze the multipath component, first, we must remove the direct signal contribution from the raw SNR profile.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

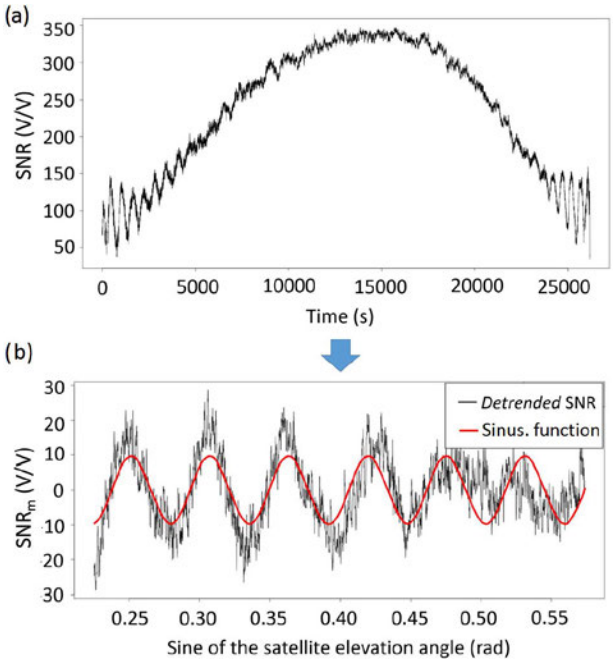


Fig. 1. Example of SNR treatment of GPS PRN-01 satellite. Acquisition realized on March 1, 2014. (a) Raw SNR time-series. (b) Multipath contribution to SNR after removal of the direct contribution and estimates of A_m, ϕ_m, and f from (6) and (7).

[15] proposed to remove the direct signal effect through gain pattern modeling. This method requires the knowledge of the gain patterns of both the receiving and emitting antenna. As the information is difficult to obtain, [8] suggested to fit a simple low-order polynomial to the SNR time series and to subtract it from the starting SNR data to isolate the oscillations due to multipath. As this latter method yields to better results than the modeling one [15], we adopted it and removed a second-order polynomial to our SNR time series. Example of this detrending is presented in Fig. 1(b). Both the contributions of A_d^2 and A_{mp}^2 are removed in (3) with this detrending.

2) Interferogram Metrics:

a) Effective antenna height above the reflecting surface: Assuming a planar reflector, the phase difference between the direct and reflected signals can be derived geometrically from the path delay δ of the reflected signal [16], [17]

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{4\pi h}{\lambda}\sin(\theta) \tag{4}$$

if h is the distance between the antenna phase center and the reflecting surface (i.e., the *effective* antenna height). h is not necessarily equal to the real antenna height because it is likely to change with the penetration depth of the electromagnetic wave and the dielectric properties of the reflecting surface. From (4), we can derive the frequency of the multipath oscillations w.r.t. time f_t

$$f_t = \frac{d\psi}{dt} = \frac{4\pi\dot{h}}{\lambda}\sin(\theta) + \frac{4\pi h}{\lambda}\cos(\theta)\dot{\theta} \tag{5}$$

$\dot{h}\left(=\frac{dh}{dt}\right)$ defines the changes versus time of the effective antenna height and $\dot{\theta}\left(=\frac{d\theta}{dt}\right)$ defines the elevation angle velocity.

Equation (5) can be simplified by making the following change of variable $x = \sin(\theta)$. We thus obtain $\widetilde{f}$, the frequency of the multipath oscillations w.r.t. the sinus of the satellite elevation angle

$$\widetilde{f} = \frac{d\psi}{dx} = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\dot{h}\frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}} + h\right). \tag{6}$$

Soil moisture content has an influence on the penetration depth of the GNSS waves into the ground [18] and on the dielectric properties of the soil, causing slight time variations of the effective height h of the antenna above the reflecting surface. Variations of h against time, retrieved from the measurement of $\widetilde{f}(t)$, are thus an indicator of soil moisture fluctuations [9]. Equation (6) shows that, if $\dot{h}$ is approximated to zero, the frequency of the multipath oscillation is constant and directly proportional to the effective antenna height h above the reflecting surface. If $\dot{h}$ is not neglected, the frequency also depends on the satellite elevation angle θ, the satellite elevation angle velocity $\dot{\theta}$, and the variations of the effective antenna height over time $\dot{h}$. The two former terms are known, but not $\dot{h}$. Many studies consider $\dot{h}$ close to zero and neglect the term $\dot{h}\frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}}$ in (6) while estimating the time series $h(t)$.

In our study, we propose a method to estimate h and $\dot{h}$ simultaneously (see Section III-A2) without neglecting the last. This method was successfully tested for altimetric applications in [19].

b) Amplitude and phase of the multipath oscillations: For a given height H_0 of the antenna above the reflecting surface, the reflected signal contribution to SNR can be formalized as [20]

$$SNR_m(\theta,\epsilon) = A_m(\theta,\epsilon)\cos\left(\frac{4\pi H_0}{\lambda}\sin(\theta) + \phi_m(\theta,\epsilon)\right) \tag{7}$$

where A_m scales with the intensity of ground reflections, and ϕ_m is the phase.

A_m includes both the gain pattern and multipath intensity, which both depend on the satellite elevation angle. Field observations indicate that both A_m and ϕ_m vary with soil moisture [9], [18], [20]. The observed effects on ϕ_m of shallow soil moisture are larger than those on A_m [9], as demonstrated by [20].

A_m, ϕ_m and h (derived from $\widetilde{f}$) are thus three parameters that can be inverted to retrieve soil moisture fluctuations.

III. Methodology: SNR Metrics Retrieval

This section presents the methodology developed to retrieve the time variations of the three SNR metrics: 1) effective height h of the antenna above the reflecting surface; 2) amplitude A_m of the multipath oscillations; and 3) phase ϕ_m of the multipath oscillations. The different time series are supposed to depend on both the soil moisture variations and the satellite elevation angle (see Section II-B2). To remove the elevation angle dependence, different ranges of satellite elevation are considered and time series are cut and analyzed with respect to these ranges.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

The elevation and azimuth angles at any instant are derived from the satellite coordinates, obtained from the IGS ephemeris products which provide GNSS orbits in the final SP3 format with a centimetric precision and clock offset data with a temporal resolution of 15 min for the past epochs (ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/).

A. Retrieval of the Effective Height h Above the Reflecting Surface

Frequency of the multipath oscillations is given by (6). Two cases are tested in this study: a *static case*, neglecting $\dot{h}$ and a *pseudo-dynamic case* without neglecting it (see Section II-B2). The static case corresponds to what has been classically done in previous studies (e.g., [8], [9]).

1) Static Case: After removing the direct signal contribution to SNR [Fig. 2(a) and (b)], the ascending and descending phases of the satellite flight-over are separated [Fig. 2(c)]. Different ranges of satellite elevation angle are then considered: in the example of Fig. 2(d), the cutoff angle was set equal to 30°. The slight variations of soil moisture during the considered portion of the satellite passage are neglected, and h (and so $\widetilde{f}$) is thus assumed to be constant during this time period and is noted h_s [Fig. 2(d)]. Larger timescale soil moisture fluctuations are estimated by comparing the antenna height retrieved from a portion of the satellite passage with its homologs of the following passages (i.e., according to Fig. 2(e), $h_s^{i,1(1)}$ is associated with $h_s^{i,2(1)}$ and with $h_s^{i,3(1)}$ to create a time series).

During the considered time period, the height of the antenna above the reflecting surface is equal to

$$h_s = \frac{\lambda \widetilde{f}}{4\pi} \tag{8}$$

where the frequency of the multipath oscillations $\widetilde{f}$ is determined using a Lomb Scargle Periodogram LSP [21], [22], and λ is the wavelength.

The analysis is not directly performed on $SNR_m = f(t)$ but on $SNR_m = f(\sin(\theta))$ as in (6).

2) Pseudo-dynamic case: In this case, $\dot{h}$ is supposed not negligible and needs to be taken into account during the considered portion of the satellite passage, following Roussel *et al.* (2015). h (and so $\widetilde{f}$) is thus likely to change during this time period and is noted h_d. A correct estimate of the variations of $\widetilde{f}$ over this time period requires a moving windowing of this portion of the signal.

a) Windowing of the SNR_m time series: The choice of the moving window is critical as it should be large enough to obtain a precise determination of $\widetilde{f}$, on the one hand, but it must not be too large so that the frequency of the signal remains quasi-constant over this window, on the other hand. Let $\Delta(\sin\theta)$ be the size of the moving window. To obtain the suited size $\Delta(\sin\theta)$ corresponding to each central value, an *a priori* coarse knowledge of the parameters under determination is necessary. They correspond to boundary conditions in (6):

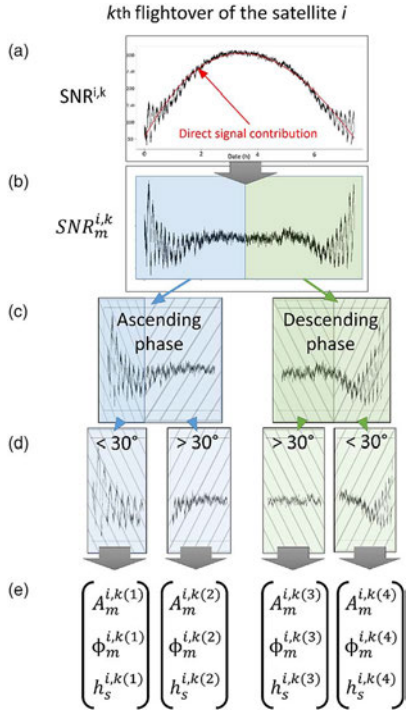


Fig. 2. Determination of the A_m, ϕ_m, and h_s time series from the multipath contribution to SNR (SNR_m). (a) SNR time series collected during the kth flightover of the satellite i. (b) Removing of the direct signal contribution. (c) Separating the ascending and descending phases. (d) Different ranges of satellite elevation angle are considered. (e) The interferogram metrics are calculated from the different time series.

1) $h_{\min}$: the minimum height above the reflecting surface that the receiver is able to reach during the observation period;
2) $h_{\max}$: the maximum height above the reflecting surface that the receiver is able to reach during the observation period;
3) $\dot{h}_{\max}$: the maximum vertical changes against time of the reflecting surface (rate of change of the antenna height).

The more precise the knowledge of these three values is, the faster the determination of $\widetilde{f}$ will be. From these three values, we estimate expected $\widetilde{f}_{\min}$ and $\widetilde{f}_{\max}$ for each central value, based on (6). $T_{\min} = \frac{1}{\widetilde{f}_{\max}}$ and $T_{\max} = \frac{1}{\widetilde{f}_{\min}}$ are the minimal and maximal periods the signal can have consistently with the boundary conditions in (6).

The size of the moving window is chosen as $\Delta\sin(\theta) = N.T_{\max}$, with N the number of observed *maximal* periods within the moving window. This criterion ensures to have at least N periods of the signal within the moving window. N must be as small as possible in order to have a quasi-constant frequency of the signal within the window. The value of N is generally chosen equal to either 2 or 3 in order to keep enough variations of the signal within the window to obtain a good estimation of $\widetilde{f}$ from LSP.

It is worth noticing that $\widetilde{f}_{\min}$ and $\widetilde{f}_{\max}$ will be different for each moving window because the mean elevation angle θ and

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

elevation angle rate $\dot{\theta}$ will differ. For this reason, the size of the window is not constant over the whole time series and is re-estimated for each increment.

b) Determination of the frequency of the multipath oscillation: The frequency f for each moving window is estimated using LSP (as for the static case), which has proven to be a well adapted solution in several previous studies [18], [19]. Only periodogram peaks reaching statistical significance with an error probability equal to 1% [23] and defining a local maximum between $\widetilde{f}_{\min}$ and $\widetilde{f}_{\max}$ are retained.

c) h and $\dot{h}$ determination: Once $\widetilde{f}$ is accurately estimated for each satellite in sight of the receiver, h_d can be obtained solving (6), with two unknowns h_d and $\dot{h}_d$. The solution presented in this paper consists of in combining measurements from all the GNSS satellites in sight at a given time to determine conjointly $h_d(t)$ and $\dot{h}_d(t)$ using a classical matrix least square method (LSM) resolution as detailed hereafter.

Let $\widetilde{f} = \frac{d\psi}{dx}$, $U = \frac{4\pi \tan(\theta)}{\lambda \dot{\theta}}$, and $V = \frac{4\pi}{\lambda}$. Equation (6) thus becomes for a satellite i and for an instant t

$$\widetilde{f}_i(t) = U_i \dot{h}_d(t) + V_i h_d(t) \tag{9}$$

with $f_i(t)$ being the frequency of the multipath oscillations, with respect to the sine of the satellite. Combining all the satellites visible at each time t, we obtain a linear system of equations

$$\begin{pmatrix} \widetilde{f}_1(t) = U_1 \dot{h}_d(t) + V_1 h_d(t) \\ \widetilde{f}_2(t) = U_2 \dot{h}_d(t) + V_2 h_d(t) \\ \widetilde{f}_3(t) = U_3 \dot{h}_d(t) + V_3 h_d(t) \\ \cdots \end{pmatrix} \tag{10}$$

or using matrix notation

$$F = U \dot{h}_d(t) + V h_d(t) = AX \tag{11}$$

with the configuration matrix $A = \begin{pmatrix} U & V \end{pmatrix}$ and the vector of unknown parameters $X = \begin{pmatrix} \dot{h}_d(t) \\ h_d(t) \end{pmatrix}$.

Equation (11) is solved with the LSM at each time step, thus determining conjointly $h_d(t)$ and $\dot{h}_d(t)$ as follows:

$$X = ({}^tAA)^{-1}({}^tAF). \tag{12}$$

All GNSS satellites from the different available constellations are combined in this over-determined system. The main challenge is to find the correct time interval Δt between each estimation and also the length δt of the moving window (see Fig. 3). Δt and δt must be tuned with attention to ensure a large enough temporal resolution for h_d and $\dot{h}_d$ (see Section IV-D).

The number of satellite observations available decreases with δt, and so the accuracy of the determination of h_d and $\dot{h}_d$ using LSM. Yet, choosing a too large value for δt causes a smoothed determination of the unknown parameters since the receiver effective height would have changed during this interval.

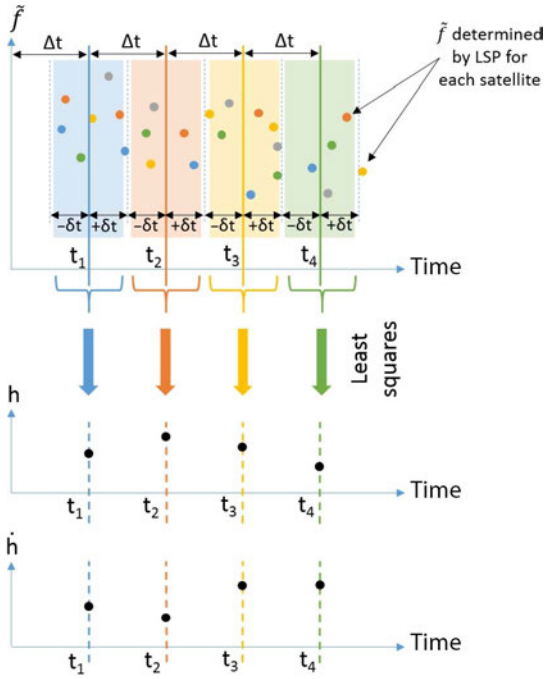


Fig. 3. Principle of the least squares inversion method used to determine h_d and $\dot{h}_d$ based on LSP estimates of $\widetilde{f}$. For reasons of clarity, overlapping was not represented in this figure, even if δt can be higher than Δt.

Instead of the static case providing an estimation of the time series $h_s^i(t)$ for each satellite i, the pseudo-dynamic case method provides a single time series $h_d(t)$ combining all satellites. Besides, the temporal resolution of the static case is limited by the repeatability of the GNSS constellations (i.e., a maximum of two pairs of estimations[1] per day per satellite for the GPS constellation). The pseudo-dynamic case provides a far better temporal resolution (depending on the chosen Δt). Data of the other constellations can also be included in the pseudo-dynamic process. This is not the case in the static case due to the no-repeatability of the constellation from a day to another. When considering ground that is not flat, a possible decrease in the number of available satellites could be mitigated by the use of other frequencies as L2. In addition, in the near future, with the launch of new satellites from other constellations (Galileo, COMPASS, etc.), the number of observables at each instant will increase. However, with rough reflecting ground, only data coming from close azimuth clusters can be combined. Also note that when combining different GNSS constellations, the antenna phase center varies due to the frequency change. In our study, we tested the combination of GPS and GLONASS constellations. We took into account the frequency change (i.e., λ change) in (6) but neglected the possible variation of antenna phase center.

[1]One estimation during the ascending phase and another estimation during the descending phase for each two GPS satellite passages per day.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

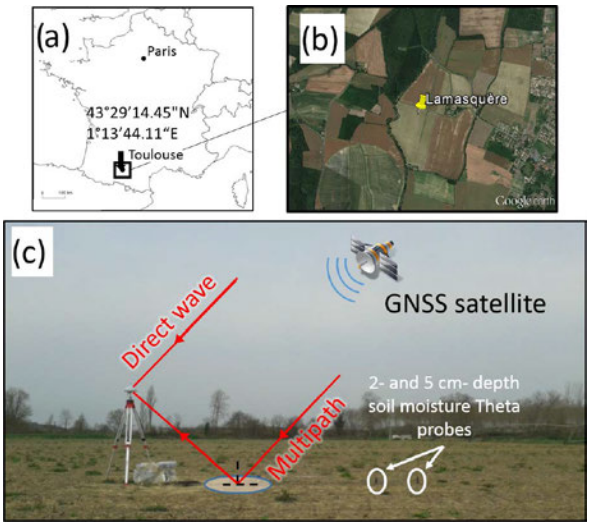


Fig. 4. (a) Measurement site is located in Lamasquère, in the southwest of France. (b) Leica GR25 receiver and AR10 antenna were installed in a soya field in the country side (c) along with two theta probes. Note that during winter, the surface of the field is a bare soil.

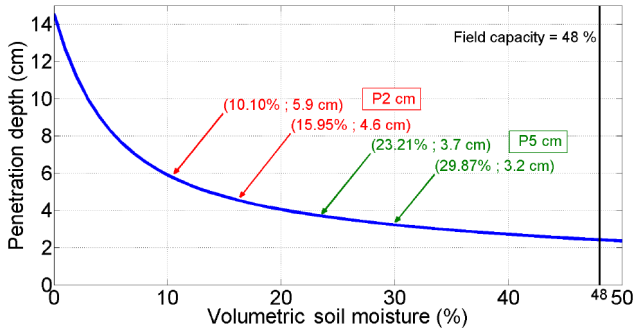


Fig. 5. Theoretical maximal penetration depth of the GNSS waves on the ground around the antenna. Highlighted values correspond to the extreme volumetric wetness measured by two independent theta probes set up next to the GNSS antenna at 2-cm depth ($P_{2\text{ cm}}$) and 5-cm depth ($P_{5\text{ cm}}$). Field capacity is 48%.

B. Retrieval of the Amplitude A_m and Phase ϕ_m of the Multipath Oscillations

A_m and ϕ_m are estimated for each considered portion of the satellite passage solving (7) by applying a LSM resolution, h being considered as constant and equals the measured antenna height H_0. An example of this type of estimate for GPS satellite PRN 1 acquisitions, occurring the 1st of March 2014, is presented in red in Fig. 1(b).

Similarly to the effective height h retrieval in the static case, A_m and ϕ_m are considered as constant during the considered portion of the satellite passage [Fig. 2(d)]. A_m and ϕ_m values estimated from a portion of the satellite passage are compared with the similar parts of the following passages [i.e., according to Fig. 2(e), $A_m^{i,1(1)}$ is associated with $A_m^{i,2(1)}$ and with $A_m^{i,3(1)}$ to create a single time series].

IV. Lamasquère Experiment

A. Measurement Site for Acquisition

A Leica GR25 receiver and an AR10 antenna were installed in a soya field in Lamasquère, France (43°29′14.45″N; 1°13′44.11″E) (see Fig. 4). Lamasquère is located in the southwest of France, close to the city of Toulouse, in a study area monitored by the CESBIO laboratory (UMR 5126) in the framework of the Sud-Ouest project [24]. The area has a temperate climate with a mean annual rainfall of approximately 600 mm. Rainfalls have a monthly mean of 50 mm and a maximum of 80 mm in Spring and a minimum of 32 mm in Summer according to the records from meteorological station no. 3145400 of Météo-France, the French Meteorological Agency (http://www.meteofrance.fr), located 15 km from this test field.

GPS L1, L2, L2C, L5, and GLONASS L1 and L2 frequencies were continuously acquired from the 5th of February 2014 to the 15th of March 2014 at a 1-Hz frequency. The study area was a bare soil during this period (northern hemisphere winter). In our study, we use S1C SNR signal strength on L1 C/A channel (the Coarse/Acquisition ranging code, freely available to the public) as L1 frequency signals are stronger (i.e., higher SNR) than the signals of frequency band L2.

Antenna height above the ground surface, determined with a tape measure, ranges between 1.69 and 1.70 m. If we consider the Rayleigh criterion [25], a surface is considered smooth if

$$\sigma_{rms} < \frac{\lambda}{8\sin(\theta)} \tag{13}$$

with σ_{rms} is the root mean square height of the microrelief, λ is the wavelength, and θ is the satellite elevation angle. Considering $\sigma_{rms}\sim$2 cm (in situ measurement), and $\lambda = 0.1905$ m, the Rayleigh criterion is respected with θ ranging from 2° to 90° and the ground around the antenna can thus be considered as flat.

There is no mask in the close environment around the antenna except for very low satellite elevation angles where trees can hide the antenna [see Fig. 4(c)]. For this reason, only satellites with elevation angles above 2° were considered. Ground in the close vicinity of the antenna consists of 18% of sand, 41% of clay, and 41% of silt (according to averages of five samples taken around the antenna), and field capacity is 48%. Using these values and following [26], it is possible to compute the theoretical relative permittivity of the ground around the antenna, depending on the volumetric humidity. Following [27], the penetration depth P_d (in meters) of a signal coming from the zenith can then be expressed as

$$P_d = \frac{\lambda\sqrt{Re(\epsilon_r)}}{2\pi Im(\epsilon_r)} \tag{14}$$

with $Re(\epsilon_r)$ and $Im(\epsilon_r)$ are the real and imaginary part of the relative permittivity of the reflecting surface.

Based on (14), the theoretical maximal penetration depths of the L1 GNSS waves into the ground around the antenna were calculated for values of volumetric wetness ranging from 0% to 48% (i.e., field capacity). Results are presented in Fig. 5.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

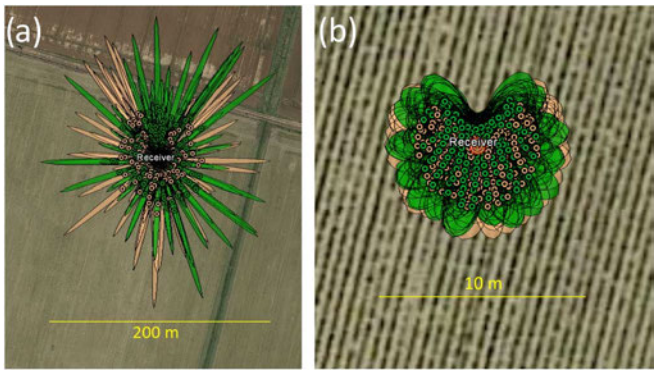


Fig. 6. Locations of the GPS (orange) and GLONASS (green) specular reflection points and first Fresnel surfaces for a GNSS receiver on the Lamasquère measurement site. Simulations done the 1st of March 2014. Satellite elevation angles range from 2° to 90° (a) and from 30° to 90° (b). Sampling rate is equal to 15 min (i.e., satellites positions are actualized every 15 min).

B. Interest of the Measurement Site for GNSS Reflectometry

Accurate locations of the specular reflection points on the surface have been determined through direct modeling using GNSS reflected signals simulations (GRESS) developed by [4]. Fig. 6 shows the theoretical locations of the specular reflection points for both GPS and GLONASS satellites, for the 1st of March 2014. As the antenna height H_0 is 1.70 m above the reflecting surface, farthest specular reflection points are a bit more than 3.5 m from the receiver for satellite elevation angles above 30° and reach $\sim$50 m for satellite elevation angles above 2°.

The power of the received signal is mostly due to coherent reflection, and most of the scattering comes from the first Fresnel zone [28]. In our measurement site, the area of the first Fresnel surfaces reaches 4 m^2 for a satellite elevation angle around 30° and 1130 m^2 for a satellite elevation angle of 2°.

C. Datasets Used for Validation

The test site is equipped with two soil moisture ML3 ThetaProbe Sensors (accuracy of ± 0.01 m^3.m^{-3}), installed at 2 and 5 cm depth, respectively, a few meters away from the GNSS receiver [Fig. 4(c)]. Acquisitions were taken with a sampling frequency of 10 min and these data are used for validation of our SNR-based estimations of soil moisture fluctuations. During the whole 1.5-month period of SNR acquisitions, the 2-cm depth probe records of soil moisture (referred as $P_{2\,\mathrm{cm}}$ in the following) ranged between 10.10% and 15.95% (i.e., a variation of the volumetric soil moisture of 5.85%), and the 5-cm depth probe records (referred as $P_{5\,\mathrm{cm}}$ in the following) were between 23.21% and 29.87% (i.e., a variation of volumetric soil moisture of 6.66%).

D. Parameters Used for Soil Moisture Retrieval

To remove the elevation angle dependence of the three SNR metrics (A_m, ϕ_m, and h), two different ranges of satellite elevation angles are tested: the first one from 2° to 30° (referred as I_{2_30} in the following) and the second one between 30° and 70° (referred as I_{30_70} in the following). 30° was chosen as in, e.g., [8], and satellite elevation angles above 70° were not considered as the amplitude of the multipath contribution to SNR becomes too small to be analyzed.

The limit conditions in (6) were assumed to be

1) $h_{\min} = 1.5$ m;
2) $h_{\max} = 2.0$ m;
3) $\dot{h}_{\max} = 1.10^{-5}$ m.s^{-1}.

$h_{\min} = 1.5$ m and $h_{\max} = 2.0$ m correspond to $\sim H_0 \pm 0.25$ m. 25 cm is 1.7 times the extreme theoretical penetration depth of the GNSS wave equal to 14.6 cm (see Fig. 5), corresponding to a perfectly dry soil. The maximum change rate in soil moisture recorded by the two independent theta probes (see Section IV-C) over the 1.5-month time period was 0.0035%/s. With such speed, $\sim$4 h would be necessary for soil moisture to change from 0% to 48% (i.e., saturation of the ground). A change of volumetric humidity from 0% to 48% corresponds theoretically to a variation of the penetration depth of $14.6 - 2.4 = 12.2$ cm, hence a rate of change of $\sim 1.10^{-5}$ m.s^{-1}. $\dot{h}_{\max} = 1.10^{-5}$ m.s^{-1} thus corresponds to the maximal rate of change of the theoretical penetration depth.

N, the number of observed *maximal* periods (Section III-A2), was set to 3, which is the first number of observed periods above the 1% of error probability.

Δt (see Section III-A2) is set to 10 min, which corresponds to the temporal resolution of the soil moisture probes used for validation (see Section IV-C), and different values of δt will be tested in this study.

V. Results

A. Static Case

$A_m^i(t)$, $\phi_m^i(t)$, and $h_s^i(t)$ were computed for each GPS satellite i more than 1.5 months differentiating the two ranges of elevation angles I_{2_30} and I_{30_70}, as well as the ascendant and descendant phases of the satellite passages. Theoretically, four different time series of A_m^i, ϕ_m^i, and h_s^i can thus be derived from each satellite i over the whole period of measurement. Linear correlation coefficients R are estimated between each SNR-based time series and the variations of soil moisture ($P_{2\,\mathrm{cm}}$ and $P_{5\,\mathrm{cm}}$). Variations of soil moisture are scaled with respect to the minimum and maximum of the SNR-based time series ϕ_m, A_m, and h that they are compared with.

1) Low Satellite Elevation Angles (I_{2_30}): Fig. 7(a) presents one time series $\phi_{m-I_{2_30}}^{PRN32}(t)$ computed from satellite GPS-PRN32 giving R equal to 0.97 with $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and 0.95 with $P_{5\,\mathrm{cm}}$ (Fig. 8). Fig. 7(b) presents the same time series obtained with the high elevation angles (I_{30_70}), giving R equal to -0.87 with $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and -0.84 with $P_{5\,\mathrm{cm}}$. Note the inverse relationship between $\phi_{m-I_{30_70}}^{PRN32}(t)$ and soil moisture. Temporal resolution is 1 day. Empirical laws between I_{2_30} SNR-based and probe time series were computed and can be used to inverse phase values (in °) to obtain corresponding volumetric humidity content (in %) (see Fig. 8). We used a linear relationship similar to the ones that relate surface soil

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

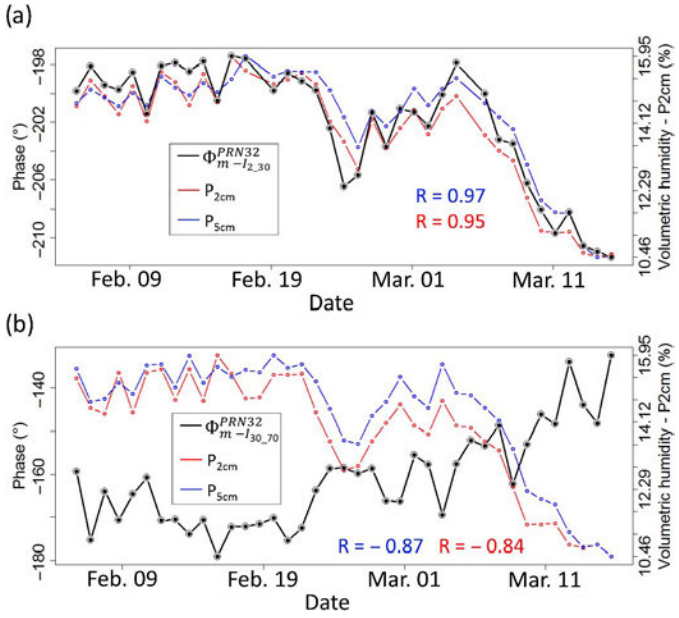


Fig. 7. Evolution of (a) $\phi^{PRN32}_{m-I_{2_30}}$ and (b) $\phi^{PRN32}_{m-I_{30_70}}$ time series with respect to $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and $P_{5\,\mathrm{cm}}$ time series. Note the inverse relationship between $\phi^{PRN32}_{m-I_{30_70}}(t)$ and soil moisture (b).

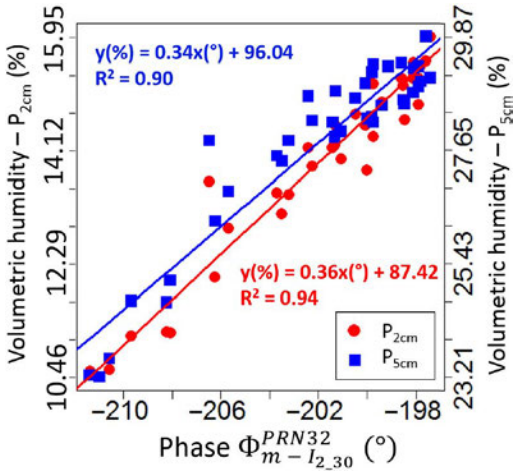


Fig. 8. Scatter plot of $\phi^{PRN32}_{m-I_{2_30}}$ time series and $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and $P_{5\,\mathrm{cm}}$.

moisture to backscattering coefficients using SAR, scaterometer or, more recently, radar altimetry [29]–[32]. For example, in the case of $P_{2\,\mathrm{cm}}$ with satellite PRN 32, the adjusted linear coefficients give

$$y(\%) = 0.36x(^\circ) + 87.42(\%). \tag{15}$$

Note that these empirical relationships are only valid for our test site, and obviously depends on dielectric properties (conductivity, relative permittivity) of the ground, roughness, and antenna gain pattern.

Satellite GPS-PRN32 was the one giving the best correlation. The mean linear correlation coefficients obtained with all GPS satellites for each metric were computed and results are presented in Table I. Note that the correlation coefficient is estimated correlating with the variations of soil moisture, not the absolute measurements.

Best results are obtained with $\phi^i_{m-I_{2_30}}$ (which is consistent with [9]), with a mean value of R ranging from 0.81 ($P_{5\,\mathrm{cm}}$) to 0.84 ($P_{2\,\mathrm{cm}}$). $A^i_{m-I_{2_30}}$ gives the worst results with a mean value of R ranging from -0.32 ($P_{2\,\mathrm{cm}}$) to -0.37 ($P_{5\,\mathrm{cm}}$) and results for $h^i_{s-I_{2_30}}$ are equal to -0.57 for both $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and $P_{5\,\mathrm{cm}}$. As already mentioned by [9], $A^i_{m-I_{2_30}}$ and $h^i_{s-I_{2_30}}$ are anticorrelated with soil moisture, while $\phi^i_{m-I_{2_30}}$ is correlated.

Each time series has a maximal temporal resolution of one day and it is possible to have up to four different time series per satellite and per interferogram metric. To improve the temporal resolution, we combine the normalized time series $A^i_{m-I_{2_30}}(t)$, $\phi^i_{m-I_{2_30}}(t)$ and $h^i_{s-I_{2_30}}(t)$ computed from all the GPS satellites i. The sign of the time series is reversed if the correlation with soil moisture is negative [i.e., for the time series $A^i_{m-I_{2_30}}(t)$ and $h^i_{s-I_{2_30}}(t)$], and normalization is done by scaling the time series between 0 and 1. We then put these normalized time series all together. We thus obtain a global scatter plot for each of the three metrics, to which we apply a moving average. The three respective final time series are noted $A^{GPS}_{m-I_{2_30}}(t)$, $\phi^{GPS}_{m-I_{2_30}}(t)$, and $h^{GPS}_{s-I_{2_30}}(t)$. Fig. 9(a) presents the (absolute) linear correlation coefficient R obtained between $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and the resultant combined time series for different sizes δt of the moving window. Increment between the center of each window is chosen equal to the soil moisture probes resolution, i.e., 10 min. Best results are once again obtained with the phase $\phi^{GPS}_{m-I_{2_30}}$ with $R > 0.9$ when $\delta t > 2$ h and a maximum of 0.95 with $\delta t = 8$ h. R reaches a maximum of 0.90 for $h^{GPS}_{s-I_{2_30}}$ with $\delta t = 11$ h, and 0.72 for $A^{GPS}_{m-I_{2_30}}$ with $\delta t = 55$ h. For this latter parameter, only the long-term trend of soil moisture can be observed.

2) High Satellite Elevation Angles (I_{30_70}): With regard to the high satellite elevation angles, best results are still obtained with the phase $\phi^i_{m-I_{30_70}}$ (mean R ranging between -0.42 and -0.45), then $A^i_{m-I_{30_70}}$ (mean R ranging between 0.27 and 0.29) (see Table I). $h^i_{s-I_{30_70}}$ does not seem to show any correlation with soil moisture (mean R ranging between 0.02 and 0.04).

Compared to the previous case I_{2_30}, there is an inversion of the sign of the correlation which is positive between $A^i_{m-I_{30_70}}$ and soil moisture, and negative with $\phi^i_{m-I_{30_70}}$.

Time series of $A^i_{m-I_{30_70}}(t)$, $\phi^i_{m-I_{30_70}}(t)$, and $h^i_{s-I_{30_70}}(t)$ related to each satellite i were also respectively combined into three resultant time series $A^{GPS}_{m-I_{30_70}}(t)$, $\phi^{GPS}_{m-I_{30_70}}(t)$, and $h^{GPS}_{s-I_{30_70}}(t)$ and results are presented in Fig. 9(b). Results are similar to I_{2_30} with best correlation reached with $\phi^{GPS}_{m-I_{30_70}}$ ($R_{\max} = 0.92$ with $\delta t = 25$ h), followed by $A^{GPS}_{m-I_{30_70}}$ ($R_{\max} = 0.91$ with $\delta t = 55$ h) and $h^{GPS}_{s-I_{30_70}}$ ($R_{\max} = 0.39$ with $\delta t = 40$ h). Note that the time series $A^{GPS}_{I_{30_70}}$ gives better results than $A^{GPS}_{I_{2_30}}$.

3) Combining I_{2_30} and I_{30_70}: All time series $A^i_{m-I_{2_30}}$, $\phi^i_{m-I_{2_30}}$ and $h^i_{s-I_{2_30}}$ obtained with I_{2_30} were multiplied by -1 and normalized between 0 and 1 to be combined with the respective time series obtained with I_{30_70}. Results are

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

TABLE I
LINEAR CORRELATION COEFFICIENTS R BETWEEN THE DIFFERENT TIME SERIES AND $P_{2\,\mathrm{cm}}$ AND $P_{5\,\mathrm{cm}}$ CONSIDERING I_{2_30}, I_{30_70}

		I_{2_30}	I_{30_70}	$I_{2_30} \otimes I_{30_70}$	Temp. reso.
Mean R between each satellite i and $P_{2\,\mathrm{cm}}$ / $P_{5\,\mathrm{cm}}$	A_m^i	–0.32 / –0.37	+0.28 / +0.29	– / –	1 day
	ϕ_m^i	+0.84 / +0.81	–0.45 / –0.42	– / –	1 day
	h_s^i	–0.57 / –0.57	+0.03 / +0.02	– / –	1 day
Combining all satellites (abs. values of R with $P_{2\,\mathrm{cm}}$)	A_m^{GPS}	0.72 ($\delta t = 55$ h)	0.91 ($\delta t = 55$ h)	0.83 ($\delta t = 55$ h)	10 min
	ϕ_m^{GPS}	0.95 ($\delta t = 8$ h)	0.92 ($\delta t = 25$ h)	0.91 ($\delta t = 11$ h)	10 min
	h_s^{GPS}	0.90 ($\delta t = 11$ h)	0.39 ($\delta t = 40$ h)	0.87 ($\delta t = 11$ h)	10 min
	$h_d^{GPS_GLONASS}$	0.95 ($\delta t = 55$ h)	0.82 ($\delta t = 55$ h)	0.95 ($\delta t = 33$ h)	10 min

δt is the size of the moving window (used to obtain the best correlation). Please refer to Fig. 9 for more results.

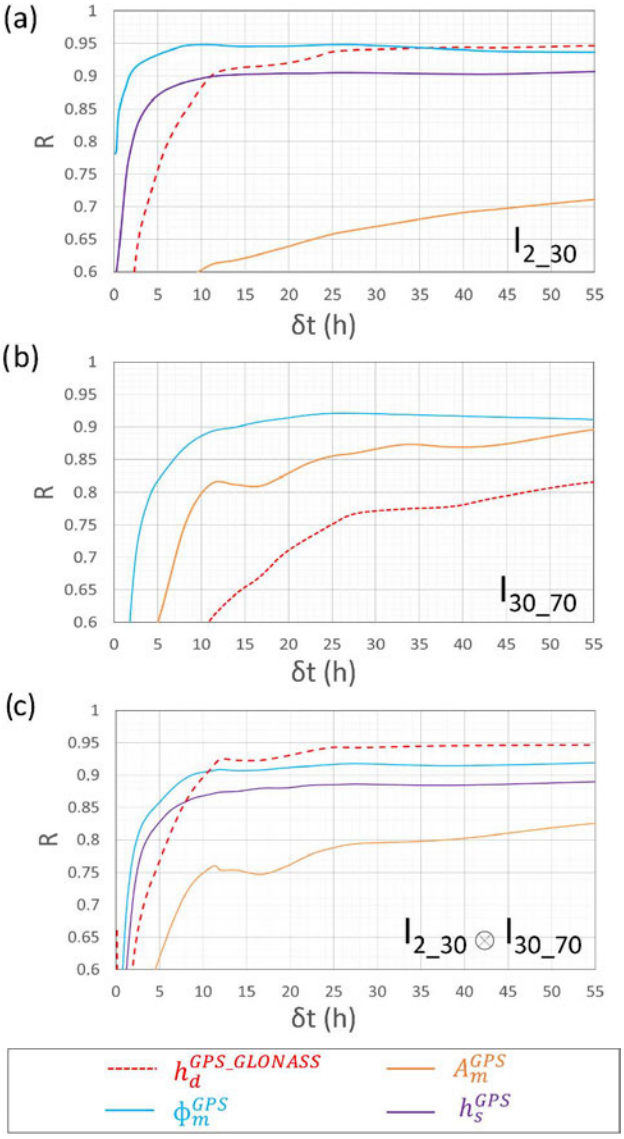


Fig. 9. (Absolute) Linear correlation coefficient R between A_m^{GPS}, ϕ_m^{GPS}, h_s^{GPS}, and $h_d^{GPS_GLONASS}$ with $P_{2\,\mathrm{cm}}$, considering I_{2_30} (a), I_{30_70} (b) and the combination of both $I_{2_30} \otimes I_{30_70}$ (c). R coefficient is below 0.4 for h_s^{GPS}.

presented in Fig. 9(c). By combining the two ranges of satellite elevation angles, the linear correlation coefficient R is not higher than only considering I_{2_30}.

Fig. 10(a) presents the time series giving the best correlation with soil moisture with the smallest moving window, i.e.,

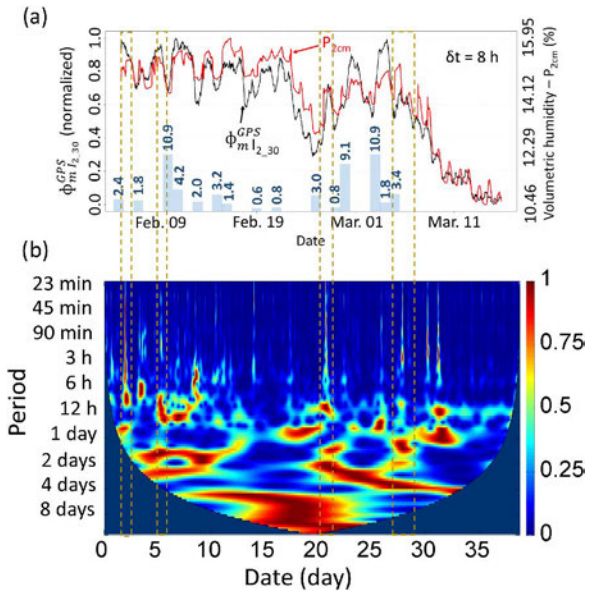


Fig. 10. (a) Evolution of $\phi_{m-I_{2_30}}^{GPS}(t)$ and $P_{2\,\mathrm{cm}}$. Linear correlation coefficient is 0.95. Blue bars are the rain events (in mm). (b) Wavelet cross correlation map: $P_{2\,\mathrm{cm}}$ VS $\phi_{m-I_{2_30}}^{GPS}$. Abscissa is the day over the 1.5-month period of measurement and ordinate is the period under analysis. Cross wavelet power is in units of normalized variance for each period.

$\phi_{m-I_{2_30}}^{GPS}(t)$ obtained with $\delta t = 8$ h ($R = 0.95$). The main trend of soil moisture variations over this 1.5-month time period of measurement is perfectly retrieved, which explains the very good correlation coefficient value. A wavelet cross correlation was computed between this SNR-based time series and $P_{2\,\mathrm{cm}}$, and the results are presented in Fig. 10(b). The wavelet cross correlation is based on Morlet mother function, and we used the wavelet toolbox for MATLAB developed by [33].

The largest periods observed by the variations of soil moisture are perfectly retrieved with $\phi_{m-I_{2_30}}^{GPS}(t)$ and daily changes are also detected. It is worth noticing the correlation between the different periods highlighted by the cross correlation, e.g., between the 25th and 30th day of measurement [Fig. 10(b)], periods ranging from few days to few hours are observed.

4) Conclusion: Best correlation is obtained with ϕ_m as in previous studies [9], [20]. Low satellite elevation angles ($< 30°$) give the best results, even if a correlation is still observed between soil moisture and the metrics with high satellite elevation angles ($> 30°$). The sign of the correlation is reversed between low and high elevation angles, as discussed in Section VI-D. It is possible to combine low and high satellite elevation angles, but it does not improve the results of I_{2_30}.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

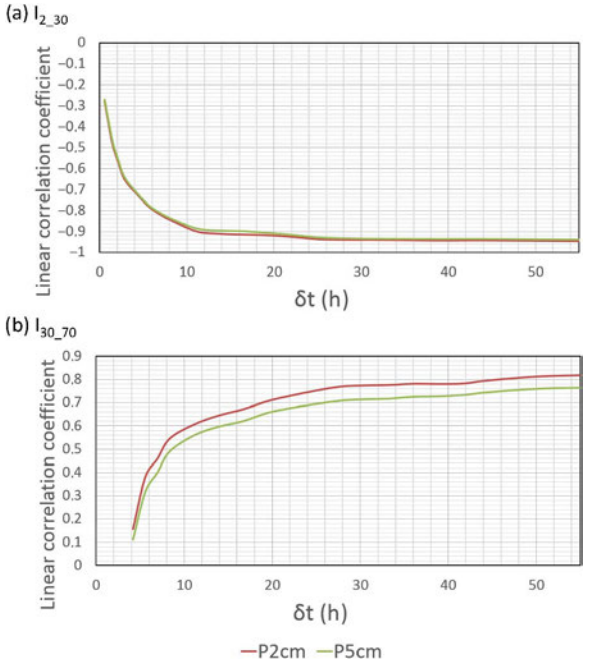


Fig. 11. Linear correlation coefficient between $h_d(t)$ time series and soil moisture as a function of δt.

B. Pseudo-Dynamic Case: Effective Height h_d of the Antenna

We computed the effective antenna height time series $h_d(t)$ following the pseudo-dynamic consideration (see Section III-A2), combining all GPS and GLONASS satellites, and differentiating I_{2_30} and I_{30_70}. Unlike the static case where only GPS constellation could be used, the pseudo-dynamic case can integrate both GPS and GLONASS constellations, which provides better results since more measurements are used for the determination. In this study, we only present the best results obtained by combining both GPS and GLONASS constellations. Note that the GLONASS signals are based on the frequency division multiple access (FDMA) method, and the frequency of each satellite is unique. This results in a modification of the wavelength λ, which must be taken into account in (6). The antenna phase center is also susceptible to vary resulting in a modification of the effective antenna height, but this later issue is neglected in our study. Various values of the size of the moving window δt were tested and results are presented in Figs. 9(a) and (b) and Fig. 11.

1) Low Satellite Elevation Angles (I_{2_30}): $h_{d-I_{2_30}}(t)$ time series shows a very good agreement with $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and $P_{5\,\mathrm{cm}}$ when δt is higher than 12 h with $R > 0.9$ (see Fig. 9). The best correlation is obtained with $P_{2\,\mathrm{cm}}$ with $R = 0.95$.

2) High Satellite Elevation Angles (I_{30_70}): As for the static case, the sign of the correlation changes when considering either the low (I_{2_30}) or the high satellite elevation angles (I_{30_70}). $h_{d-I_{2_30}}(t)$ time series shows a good agreement when δt is higher than 30 h ($R > 0.78$ with $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and > 0.72 with $P_{5\,\mathrm{cm}}$). R is higher than 0.5 when $\delta t > 8$ h (see Fig. 9). The best correlation is equal to 0.82 with $\delta t = 55$ h.

3) Combining I_{2_30} and I_{30_70}: The pseudo-dynamic case only provides two time series $h_{d-I_{2_30}}$ and $h_{d-I_{30_70}}$. Given that correlation between soil moisture and $h_{d-I_{30_70}}$ is worse than with $h_{d-I_{2_30}}$, combining both elevation ranges is not interesting since it would lead to worse results than considering only data of low elevation. Nevertheless, it is possible to combine directly $f(t)$ time series obtained with both high and low satellites elevation ranges, prior to LSM resolution to compute $h_d(t)$ using (12). Results are presented in Fig. 9(c) and Table I. Resultant linear correlation coefficient with soil moisture is better than considering both I_{2_30} and I_{30_70} separately. Best correlation is equal to 0.95 with $\delta t = 33$ h, but correlation is higher than 0.9 with $\delta t > 10$ h.

VI. Discussion

A. Inversion of the Correlation Between Low and High Satellite Elevation Angles

The sign of the correlation between the three metrics A_m, ϕ_m, and h and soil moisture variations changes when considering low (I_{2_30}) or high (I_{30_70}) satellite elevation angles, and $\sim 30^\circ$ seems to be the cutoff angle in our case.

This can be explained by the combined effect of 1) the reflection coefficients of the RHCP and LHCP components (which depends on the satellite elevation angles) and 2) the antenna gain pattern which will reject, at some level, the RHCP and LHCP components (also depending on the satellite elevation angles). Let us consider the Fresnel reflection coefficients defined in (1) considering the two extreme cases recorded by the soil moisture probes, i.e., a volumetric water content equal to 10.10% and to 29.87%. The corresponding relative permittivity are respectively equal to $4.4543 - 1.0905i$ and $14.6123 - 3.5857i$ (estimated following [26]) and conductivity is taken equal to 1.10^{-5} and 0.12 S.m^{-1} (values interpolated from [12]). Fig. 12 shows the corresponding magnitude of the (a) horizontal and vertical and (b) copolar and cross-polar reflection coefficients as a function of propagation angle, for the GPS L1 frequency at 1.575 GHz.

The GNSS antenna is designed in an optimal sense to receive RHCP signals. The antenna thus rejects the LHCP component, at some level. Generally, LHCP rejection ratio is considered as a constant given by the constructor. In our case, data sheet gives an axial ratio R equal to 1.4 dB, which corresponds to a rejection ratio K_{LHCP} equal to

$$K_{LHCP} = 20 \log \left(\frac{r+1}{r-1} \right) = 21.9 \ \ [\mathrm{dB}] \qquad (16)$$

with $r = 10^{R/20}$.

Following [12], an effective reflection coefficient for an incident RHCP signal can be written as

$$\tau_{eff} = \left(\rho_{RHCP} + 10^{\frac{-K_{LHCP}}{20}} \rho_{LHCP} \right) e^{-j\pi} \qquad (17)$$

where ρ_{RHCP} is the copolar (RHCP) circular reflection coefficient magnitude and ρ_{LHCP} is the cross-polar (LHCP) circular reflection coefficient magnitude. The variation of τ_{eff} with θ is presented in Fig. 15(a).

As visible in Fig. 15(a), τ_{eff} is negatively correlated with wetness of the soil for low satellite elevation angles, and positively correlated for high satellite elevation angles. The cutoff

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

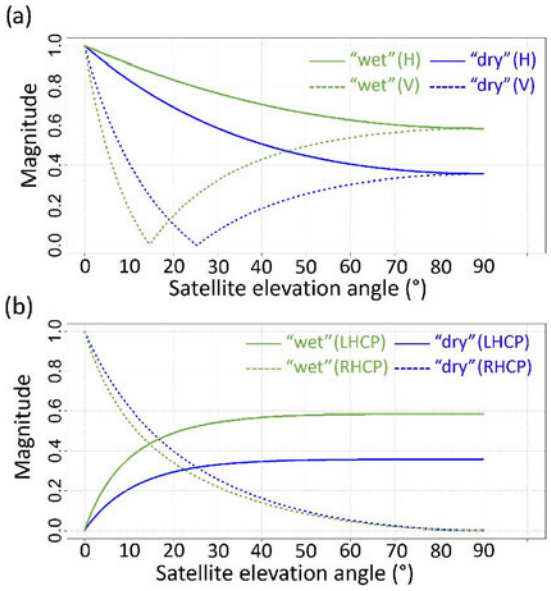


Fig. 12. Amplitude of the horizontal (H) and vertical (V) reflection coefficients (a) and amplitude of the copolar (RHCP) and cross-polar (LHCP) reflection coefficients (b) as a function of the propagation angle. "Wet" series corresponds to the maximum volumetric water content measured by the soil moisture probes during our experiment (29.87%), and "dry" series corresponds to the minimum (10.10%).

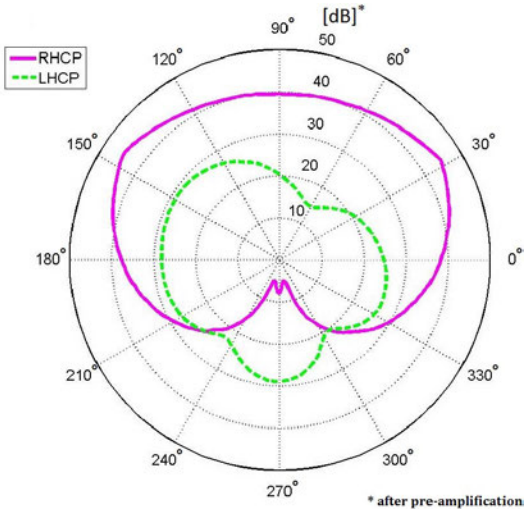


Fig. 13. Leica AR10 antenna gain pattern for RHCP and LHCP polarization.

angle is equal to 43°. This means that for satellites whose elevation angle is below the cutoff angle, received signal by the antenna is stronger when the reflecting soil is dry and lower when the soil is wet. The opposite occurs for satellites whose elevation angle is higher than this cutoff angle.

Nevertheless, taking the LHCP rejection ratio as a constant remains an approximation.

Let us consider the real antenna gain pattern of the Leica AR10 antenna for RHCP and LHCP polarizations given in Fig. 13, where for GNSS waves received by the nadir-looking hemisphere of the antenna, LHCP gain is higher than the RHCP one.

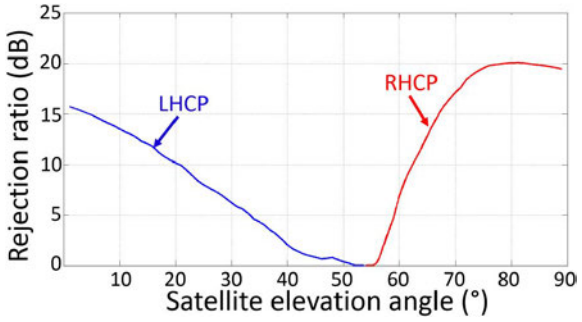


Fig. 14. RHCP and LHCP rejection ratio of the Leica AR10 antenna used in this study.

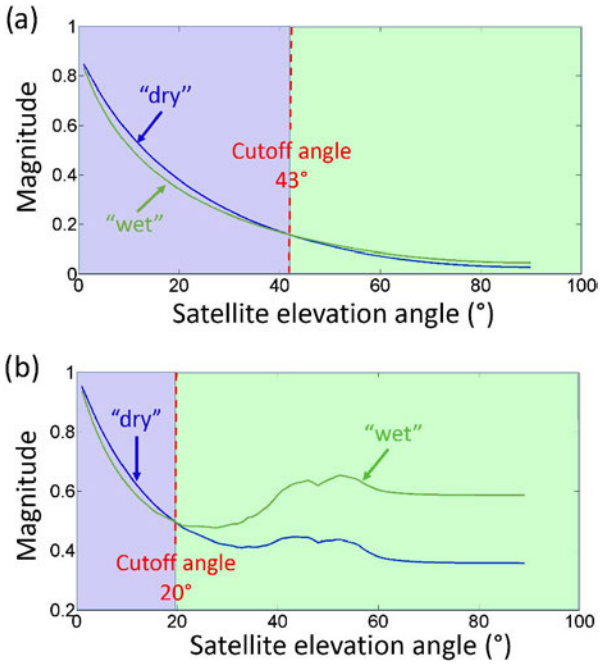


Fig. 15. Effective reflection coefficient for an incident RHCP signal received by a Leica AR10 antenna after reflection on a wet soil (29.87%) and a dry soil (10.10%). LHCP rejection ratio is considered as a constant and RHCP rejection ratio as zero in (a), and dependence of both RHCP and LHCP rejection ratios on the elevation angle is taken into account in (b).

This means that K_{LHCP} is not constant but depends upon the satellite elevation angle, but also that K_{RHCP}, the RHCP rejection ratio, is not zero.

Fig. 14 presents the RHCP and LHCP rejection ratio (in dB) of the antenna as a function of the elevation angle.

By incorporating both K_{RHCP} and K_{LHCP} into the cross-polarized and co-polarized components received by the antenna, an effective reflection coefficient for an incident RHCP signal can be written as

$$\tau_{eff} = \left(10^{\frac{-K_{RHCP}}{20}}\rho_{RHCP} + 10^{\frac{-K_{LHCP}}{20}}\rho_{LHCP}\right)e^{-j\pi}. \quad (18)$$

Fig. 15(b) presents the effective reflection coefficient magnitude considering the real rejection ratios.

The obtained cutoff angle is now equal to 20°. This cutoff angle explains the inversion of the correlation we observe

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

between the three metrics (A_m, ϕ_m, and h) and soil moisture, when considering low or high satellite elevation angles.

The cutoff angle is complex to obtain because 1) the antenna gain pattern dependence in azimuth angle is not taken into account in our model (because it is not known); 2) it does not only depend upon the difference between "dry" and "wet" soil characteristics, but also on the gradient between them, i.e., the speed of variation.

B. Depth of the Soil Moisture Determination

Except for $A^i_m(t)$ time series, all the time series (combining all satellites or not) are better correlated with $P_{2\,\mathrm{cm}}$ than with $P_{5\,\mathrm{cm}}$. This result is in perfect accordance with [9], which stated theoretically that best correlation of the interferogram metrics is obtained with soil moisture near the surface.

C. Static and Pseudo-Dynamic Cases

The static case gives poor results ($R = 0.39$) for soil moisture retrieval, whereas the pseudo-dynamic method gives a very good correlation ($R = 0.95$).

A previous study [19] already compared the static and pseudo-dynamic cases for altimetric purposes, and was realized in conditions where $\dot{h}_{\max}$ was higher and equal to 5.10^{-4} m.s^{-1}. Authors concluded that considering $\dot{h}$ increased the linear correlation with ground truth data from 0.82 to 0.97. In our actual study, $\dot{h}$ can and must also be taken into account for soil moisture retrieval.

Besides, the pseudo-dynamic method can be used with all the GNSS constellations, whereas the static one is limited by the repetitivity of the constellations. With the advent of the new GNSS constellations (Galileo, COMPASS/Beidu, etc.), the results of the pseudo-dynamic method will surely be improved.

D. High Satellite Elevation Angles

Previous studies [8], [9], [18], [20] applying IPT to soil moisture determination are only based on low satellite elevation angles. Our study shows that it is also possible to include high satellite elevation angles in the computation, with attention to the sign of the correlation with soil moisture. In other words:

1) correlation between soil moisture and phase offset ϕ_m is positive with low elevation angles and negative with high elevation angles;
2) correlation between soil moisture and amplitude A_m and effective antenna height h is negative with low elevation angles and positive with high elevation angles.

By separating low and high satellite elevation angles, the sensing zone will differ, and it will thus be possible to assess the heterogeneities of the surface around the antenna, just by selecting the elevation range under assessment. With an unique instrument, it is thus possible to assess the soil moisture close or far from the antenna, just by selecting the right elevation range.

By normalizing and inverting the time series obtained either from low or from high satellite elevation angles, it is possible to combine them. It does not improve the correlation for the three metrics A_m, ϕ_m, and h_s whereas it enhances the results obtained with h_d.

VII. Conclusion

In this study, a single geodetic antenna was used to retrieve the moisture variations of the surrounding soil during a 1.5-month campaign. The method is based on the analysis of the SNR data, routinely collected by the receiver. SNR incorporates both direct and reflected GNSS signals which interacted with the reflecting ground that depends on soil moisture content.

Three different parameters can be computed from the multipath contribution to SNR: the amplitude A_m, the phase ϕ_m, and the frequency $\widetilde{f}$. The frequency $\widetilde{f}$ is used to retrieve the vertical height h of the antenna above the reflecting surface. In many studies, only data from low satellite elevation angles were considered as the multipath contribution becomes weaker with increasing elevation angles. In our study, two ranges of satellite elevation angles were considered: the low elevation angles from 2° to 30° (noted I_{2_30}) and the high elevation angles from 30° to 70° (noted I_{30_70}). The sign of the correlations is reversed when considering high satellite elevation angles I_{30_70}. The cutoff angle where the sign of the correlation between the three metrics and soil moisture variations changes seems to be $\sim 30°$. This can be explained by the combined effect of 1) the reflection coefficients of the RHCP and LHCP components (which depends on the satellite elevation angles) and 2) the antenna gain pattern which will reject, at some level, the RHCP and LHCP components (also depending on the satellite elevation angles). Correlations R between the three estimated parameters and soil moisture are undeniable with, e.g., $R = 0.97$ between the phase $\phi^{PRN32}_{m-I_{2_30}}$ of the GPS satellite PRN32 and the 2-cm depth soil moisture (noted $P_{2\,\mathrm{cm}}$). The phase $\phi^i_{m-I_{2_30}}$ variations computed from all the GPS satellites i gives the best results with a mean linear correlation R with $P_{2\,\mathrm{cm}}$ of 0.84. In this particular case, the effective antenna height $h^i_{I_{2_30}}$ retrieved by SNR analysis gives a mean R equal to -0.57, followed by the amplitude $A^i_{m-I_{2_30}}$ with a mean R equal to -0.32. For high elevation satellites, R equals -0.45, +0.03, and +0.28 with respectively $\phi^i_{m-I_{30_70}}$, $h^i_{I_{30_70}}$, and $A^i_{m-I_{30_70}}$.

Our study shows, for the first time, that it is possible to combine the measurements from all satellites into three resultant time series A^{GPS}_m, ϕ^{GPS}_m, and h^{GPS}, which drastically improves the temporal resolution and the correlation with soil moisture. We also combined the normalized data from low (I_{2_30}) and high (I_{30_70}) satellite elevation angles by multiplying by -1 the time series obtained from high satellite elevation angles, accordingly to the sign change rule at $\sim 30°$.

The best results are obtained with R equal to 0.95 between $P_{2\,\mathrm{cm}}$ and $\phi^{GPS}_{m-I_{2_30}}$, 0.90 with $h^{GPS}_{m-I_{2_30}}$, and 0.72 with $A^{GPS}_{I_{2_30}}$. Temporal resolution of these three final time series is 10 min.

The use, also for the fist time, of the high elevation angles is of high interest. By separating low and high satellite elevation angles, the sensing zone will differ, and it will thus be possible to assess the heterogeneities of the surface around the antenna.

With regard to the depth of the soil moisture determination, we compared the results obtained with a 2- and 5-cm-depth soil

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

moisture probes, and best correlation was obtained, as expected, with the shallowest 2-cm depth humidity probe.

We also tested a multi-GNSS constellations version of the SNR analysis method by combining all the satellites visible simultaneously in order to take the pseudo-dynamic of the surface into account. This clearly betters the correlation with soil moisture, particularly for the high elevation angles. Furthermore, it allows to take into account nonrepeating ground tracks (such as GLONASS), and the results are likely to improve when new Galileo and COMPASS-Beidou constellations are added for the determination.

To conclude, a single geodetic antenna can perfectly be used to retrieve the main periods of the moisture variations of the surrounding soil. We demonstrated, in this study, that single geodetic antenna GNSS-R technique can be used for estimating small variations in surface soil moisture ($\sim 6\%$). In future works, this method will be applied to larger range of surface soil moisture fluctuations. The opportunistic remote sensing tool presented in this study establishes a link between the different temporal and spatial resolutions currently achieved by conventional tools (sensors, radar, etc.) and is thus a powerful alternative and a significant complement to the current measurement techniques.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Mr. Blanquet, owner of the agricultural plot in Lamasquere.

REFERENCES

[1] D. Legates *et al.*, "Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography," *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 35, no. 1, pp. 65–86, 2011.

[2] S. Sneviratne *et al.*, "Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate—A review," *Earth Sci. Rev.*, vol. 99, nos. 3–4, pp. 125–161, 2010.

[3] Y. Kerr *et al.*, "The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle," *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 666–687, May 2010.

[4] N. Roussel *et al.*, "Simulations of direct and reflected waves trajectories for in situ GNSS-R experiments," *Geosci. Model Develop.*, vol. 7, pp. 2261–2279, 2014.

[5] M. Martin-Neira, "A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry," *ESA J.*, vol. 17, pp. 331–355, 1993.

[6] D. Masters, P. Axelrad, and S. Katzberg, "Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02," *Remote Sens. Environ.*, vol. 92, no. 4, pp. 507–520, 2004.

[7] J. Löfgren, "Local sea level observations using reflected GNSS signals," Ph.D. dissertation, Department of Earth and Space Sciences, Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, 2014.

[8] K. Larson, E. Small, E. Gutmann, A. Bilich, P. Axelrad, and J. Braun, "Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: Initial results," *GPS Solutions*, vol. 12, no. 3, pp. 173–177, 2008.

[9] C. Chew, E. Small, K. Larson, and V. Zavorotny, "Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: Development of a retrieval algorithm for soil moisture," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 1, pp. 537–543, Jan. 2014.

[10] M. Braasch, B. Parkinson, P. Axelrad, and P. Enge, "Multipath effects," in *Global Positioning System: Theory and Applications*. Washington, DC, USA: AIAA, 1996, vol. 1, chapitre 14.

[11] V. Zavorotny, K. Larson, J. Braun, E. Small, E. Gutmann, and A. Billich, "A physical model for GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 3, no. 1, pp. 100–110, Mar. 2010.

[12] B. Hannah, "Modelling and simulation of GPS multipath propagation," Ph.D. dissertation, The Cooperative Research Centre for Satellite Systems, Queensland Univ. Technol., Brisbane, QLD, Australia, 2001.

[13] D. Brewster, "On the laws which regulate the polarization of light by reflexion from transparent bodies," *Philosoph. Trans. Roy. Soc. London*, vol. 105, pp. 125–159, 1815.

[14] A. Alonso-Arroyo *et al.*, "Improving the accuracy of soil moisture retrievals using the phase difference of the dual-polarization GNSS-R interference patterns," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 2090–2094, Dec. 2014.

[15] A. Bilich, "Improving the precision and accuracy of geodetic GPS: Applications to multipath and seismology," Ph.D. dissertation, Department of Aerospace Engineering Sciences, Univ. Texas at Austin, Austin, TX, USA/M.S. thesis, Univ. Colorado, Boulder, CO, USA, 2006.

[16] G. Bishop and J. Klobuchar, "Multipath effects on the determination of absolute ionospheric time delay from GPS signals," *Radio Sci.*, vol. 20, no. 3, pp. 388–396, 1985.

[17] Y. Georgiadou and A. Kleusberg, "On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning," *Manuscr. Geod.*, vol. 13, pp. 172–179, 1988.

[18] K. Larson, J. Braun, E. Small, V. Zavorotny, E. Gutmann, and A. Bilich, "GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 3, no. 1, pp. 91–99, Mar. 2010.

[19] N. Roussel *et al.*, "Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver," *Remote Sens. Environ.*, vol. 171, pp. 261–277, 2015.

[20] K. Larson, E. Small, E. Gutmann, A. Bilich, J. Braun, and V. Zavorotny, "Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, no. 24, p. L24405, 2008.

[21] N. Lomb, "Least-squares frequency analysis of unevenly space data," *Astrophys. Space Sci.*, vol. 39, pp. 447–462, 1976.

[22] J. Scargle, "Studies in astronomical time series analysis—Part II: Statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data," *Astro. J.*, vol. 263, pp. 835–853, 1982.

[23] T. Ruf, "The Lomb-Scargle periodogram in biological rhythm research: Analysis of incomplete and unequally spaced time-series," *Biol. Rhythm Res.*, vol. 30, no. 2, pp. 178–201, 1999.

[24] F. Baup *et al.*, "MCM'10: An experiment for satellite multi-sensors crop monitoring from high to low resolution observations," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 2012, pp. 4849–4852.

[25] F. Ulaby, A. Fung, and R. Moore, *Microwave and Remote Sensing: Active and Passive, Vol. 2: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory.* Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1982, vol. 2, p. 1064.

[26] M. Hallikainen, F. Ulaby, M. Dobson, M. El-Rayes, and L. Wu, "Microwave dielectric behavior of wet soil—Part I: Empirical model and experimental observations," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-30, no. 1, pp. 25–34, Jan. 1985.

[27] J. Behari, "Microwave dielectric behavior of wet soils," in *Remote Sensing and Digital Image Processing*. New York, NY, USA: Springer, 2006, ISBN 1-4020-3271-4.

[28] P. Beckmann and A. Spizzichino, *Scattering of Electromagnetic Waves From Rough Surfaces*. Norwood, MA, USA: Artech House, 1987, ISBN 0-89006-238-2.

[29] F. Baup *et al.*, "Mapping surface soil moisture over the Gourma mesoscale site (Mali) by using ENVISAT ASAR data," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 15, pp. 603–616, 2011.

[30] C. Fatras, F. Frappart, E. Mougin, M. Grippa, and P. Hiernaux, "Estimating surface soil moisture over Sahel using ENVISAT radar altimetry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 123, no. 8, pp. 496–507, 2012.

[31] F. Frappart *et al.*, "Radar altimetry backscattering signatures at Ka, Ku, C and S bands over West Africa," *Phys. Chem. Earth, A, B, C*, vols. 83–84, pp. 96–110, 2015.

[32] W. Wagner, G. Lemoine, and H. Rott, "A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data-empirical data and model results," *Remote Sens. Environ.*, vol. 70, no. 2, pp. 191–207, 1999.

[33] A. Grinsted, J. Moore, and S. Jevrejeva, "Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series," *Nonlinear Processes Geophys.*, vol. 11, pp. 561–566, 2004.

Nicolas Roussel received the Ph.D. degree in geodesy and remote sensing at Université Paul Sabatier, Toulouse, France, in 2015. He is an Engineer in topography and land surveying from Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Strasbourg, France since 2012.

He recently joined the MISTRALE project funded by the European GNSS Agency (GSA) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program. His research interests include GNSS-reflectometry, altimetry, and remote sensing.

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

Frédéric Frappart received the Ph.D. degree in geophysics from Université de Toulouse, Toulouse, France, in 2006.

He is an Engineer from Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées Bretagne (ENSTA Bretagne, formerly ENSIETA), Brest, France. He has been a Researcher at Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), Toulouse, France, since 2010, in charge of the scientific applications of radar altimetry over land (hydrology and surface properties) for the Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphre (CTOH), a French Observation Service dedicated to radar altimetry studies, and Member of the Scientific Definition Team of the NASA/CNES InSAR altimeter Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission for land hydrology (2012–2015) and of the SWOT Science Team (2016–2020). He involved in GNSS-R activities in the Geodesy from space team at GET-OMP.

Guillaume Ramillien received the Ph.D. degree in space geophysics from the University Paul Sabatier, Toulouse, France, in 1998, which subject was the 3-D sea floor topography by inversion of radar satellite altimeter data.

Since October 2002, he has been a Researcher with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), and his current investigations are focused on the time variations of the Earth's gravity field measured by the Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) satellite mission, and he is interested in the preparation of the future low-altitude gravity missions. He has been the President of the "Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale" (GRGS) group since May 2015.

José Darrozes received the Ph.D. degree from Montpellier II University, Montpellier, France, in 1997, and the Ph.D. research focused primarily on remote sensing and wavelet signal processing in Earth Sciences.

He recently joined the reflectometry group hosted in the GET laboratory in Toulouse. He has been an Associated Professor with the University Paul Sabatier, Toulouse, France, since 1998 and he has been involved in the reflectometry activities since 2011. During three successive Postdoctoral Fellowships at the "National Institute of Water and Atmospheric Sciences" (NIWA), Wellington, New Zealand, in 1998, the "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA), Silver Spring, MD, USA, in 1999, and the CERFACS, Météo-France (2000–2002), his research interest include the exploitation of remote sensing data for characterizing the Earth's surface (hydrology) and subsurface geophysical processes.

Frédéric Baup received the M.S. degree in microwave and optical telecommunications and the Ph.D degree in microwave remote sensing from University Paul Sabatier, Toulouse, France, in 2003 and 2007, respectively.

Since 2008, he has been a Researcher in microwave remote sensing with the Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) Laboratory, Toulouse, France. His research interests include microwave remote sensing applied to land surfaces and SAR image analysis to monitor spatio-temporal variations of soil (moisture and roughness) and vegetation (biomass) properties over agricultural or natural areas and his education interests are focused on physics and remote sensing sciences.

Laurent Lestarquit is Engineer from Ecole Polytechnique, Palaiseau, France since 1994 and Supaero School, Toulouse, France since 1996 in Space Systems. He has been involved in GNSS-related activities at CNES since 1996 mostly on GNSS signal design, signal processing, and space borne GNSS receivers.

He recently joined, as a GNSS expert, the CNES/GRGS Space Geodesy Team and IGS Analysis Center, Toulouse, France. He is a Former Member of the Galileo Signal Task Force, and Negotiator of the 2004 EU-USA GNSS agreement. He is the Inventor of the constant envelope Alt-Boc modulation and Co-inventor of the CBOC waveform that are used on Galileo.

Minh Cuong Ha received the B.S. degree in Geodesy Engineering from the University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam, in 2005, and received the M.S. degree in cartography, remote sensing and GIS from Vietnam National University, Hanoi, Vietnam, in 2010. Since September 2013, he has been working toward the Ph.D. degree in remote sensing and GIS at the Laboratory GET, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

He recently joined the MISTRALE project funded by the European GNSS Agency (GSA) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program. His research interests include GNSS-reflectometry, altimetry, and remote sensing sciences.

Conclusion et perspectives

La réflectométrie GNSS (ou GNSS-R) se propose d'utiliser l'ensemble des constellations des satellites GNSS pour étudier certaines caractéristiques de la surface terrestre, en se basant sur l'analyse des ondes électromagnétiques réfléchies à la surface de la Terre. La mesure du retard entre l'onde réfléchie et celle arrivant directement du satellite au récepteur permet d'envisager des applications altimétriques en milieu océanique. Les signaux réfléchis, en interagissant avec la surface terrestre lors de la réflexion, contiennent un certain nombre d'informations sur cette surface réfléchissante. Il est ainsi possible, par inversion des mesures de réflectométrie, d'estimer la rugosité de surface et l'humidité du sol.

Mon travail de thèse s'inscrit dans la mise en œuvre de ce nouvel outil de télédétection opportuniste et vise à démontrer que cette nouvelle technique permet la détermination des caractéristiques locales en domaine océanique (altimétrie de la surface marine) et en domaine continental (humidité du sol).

Mon étude a porté essentiellement sur le développement méthodologique et l'exploitation géophysique des mesures de réflectométrie présentes dans le rapport signal-sur-bruit (SNR) enregistrées par une simple antenne GNSS classique.

La première partie de mon travail a consisté à développer un simulateur permettant de modéliser les trajectoires des ondes électromagnétiques directes et réfléchies à la surface de la Terre, c'est-à-dire fournir les estimations les plus précises possibles des positions des points de réflexion en surface à partir des configurations géométriques des satellites des constellations GNSS et de la position d'un récepteur à la surface de la Terre. Différentes approximations de la surface de la Terre ont été testées à travers le simulateur : plan, sphère, ellipsoïde jusqu'à la prise en compte d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). L'effet des perturbations liées à la traversée des ondes électromagnétiques dans la troposphère a également pu être étudié. Les simulations ont permis de calculer la variation de la distance séparant le point de réflexion de l'antenne en fonction de l'élévation du satellite. Par exemple, d'après mes simulations, le diamètre de la surface de réflexion est d'une dizaine de mètres pour une hauteur de l'antenne de l'ordre de 5 m, et d'un millier de kilomètres pour une hauteur de l'ordre de 500 km. Les différents tests que j'ai réalisés prouvent que la prise en compte d'un MNT est essentielle pour obtenir des positions précises des points de réflexion spéculaire. Ainsi, l'erreur planimétrique sur la position des points de réflexion peut atteindre 5,4 km pour une antenne située à 300 m au dessus du sol, si un MNT n'est pas intégré. Les différences entre l'approximation de la Terre en une sphère ou un ellipsoïde sont négligeables si les points de réflexion spéculaire sont à moins de 50-60 m de l'antenne, c'est à dire pour

des antennes à faible hauteur et/ou des grands angles d'élévation des satellites. Au-delà, les erreurs sur la position des points de réflexion deviennent importantes. La réfraction angulaire due à la propagation des ondes électromagnétiques dans la troposphère sur la position des points de réflexion spéculaire peut être négligée lorsque l'antenne est à moins de 5 m du sol, mais il est absolument nécessaire de la prendre en compte lorsque l'antenne est plus haute. Ce simulateur est une aide précieuse dans le cadre de la préparation de campagnes de mesure.

Dans une deuxième partie, j'ai montré qu'il est possible d'estimer les variations du niveau de la mer à proximité d'une antenne géodésique par inversion des oscillations du SNR enregistrées de manière continue. Cette technique, dans les travaux antérieurs, était limitée à des situations où la variation $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ de la hauteur h de la surface réfléchissante en fonction du temps était supposée négligeable. J'ai proposé une amélioration du processus de calcul en prenant en compte ce terme, en combinant des mesures effectuées sur tous les satellites visibles simultanément, ce qui permet de s'affranchir de cette restriction. La validation de la méthode a consisté à estimer la hauteur d'une antenne située au milieu d'une surface bétonnée, et la précision obtenue est centimétrique. Cette méthode a été appliquée à 3 mois d'enregistrements SNR réalisées du 3 mars au 31 mai 2013 avec une antenne située à 60 m au dessus du niveau de l'eau, sur le phare de Cordouan. La corrélation entre les résultats obtenus par inversion des mesures SNR avec la méthode négligeant $\dot{h}$ et les mesures d'un marégraphe indépendant au pied du phare est de 0,82. Elle passe à 0,97 en utilisant la méthode que je propose. La hauteur des vagues a également pu être observée à travers le biais qu'elles engendrent sur l'estimation du niveau de la mer.

Enfin, j'ai utilisé une station GNSS classique pour déterminer les variations d'humidité du sol d'une parcelle agricole à partir de 6 semaines de mesures de SNR. J'ai montré qu'il était possible de combiner les mesures effectuées sur l'ensemble des satellites pour produire une seule série temporelle plus précise de l'humidité superficielle du sol. Cette combinaison améliore considérablement la corrélation avec des mesures indépendantes d'humidité, ainsi que la résolution temporelle qui passe alors de 1 jour à 10 minutes. Si les études antérieures considéraient uniquement les faibles angles d'élévation (inférieurs à 30° ou 40° généralement), j'ai montré qu'il était aussi possible de traiter les mesures SNR correspondant aux angles d'élévation élevés (> 30°), à condition de prendre en compte l'inversion de signe de la corrélation entre les deux gammes d'élévation. D'une manière générale, le cumul d'informations (combinaison des différents satellites) permet d'avoir les meilleurs résultats. Dans ces conditions, la corrélation obtenue est de 0,95 avec l'humidité mesurée par une sonde à 2 cm de profondeur pendant les 6 semaines d'acquisition, avec une résolution temporelle finale de 10 min.

De ces différents travaux, il ressort que la réflectométrie GNSS appliquée à l'analyse du SNR détecté par une antenne GNSS classique est parfaitement utilisable pour estimer les variations du niveau de la mer en milieu océanique. La précision centimétrique obtenue est suffisante pour avoir également une estimation de l'état de mer. Avec l'augmentation du nombre de satellites, on peut envisager de spatialiser les estimations par secteur autour de l'antenne (i.e., par intervalles d'azimuth), à partir des mesures enregistrées, afin d'avoir une cartographie plus précise du niveau de la mer autour de l'antenne, et, pourquoi pas, mesurer l'orientation et le déplacement des vagues.

En domaine continental, le SNR enregistré par une station peut très bien être utilisé pour estimer les variations d'humidité du sol dans les premiers centimètres de profondeur autour

de l'antenne. De manière similaire à l'application altimétrique, il est envisageable de "sectoriser" les mesures par azimuth, afin d'établir une cartographie exacte de l'humidité autour de l'antenne.
Ce genre de traitement pourrait être appliqué aux enregistrements des stations GNSS des réseaux permanents (réseau RGP français par exemple), utilisant celles près des côtes, fleuves ou lacs comme "marégraphes" ou dans les terres comme capteurs d'humidité sans aucune modification de matériel.
Un des grands enjeux pour les années à venir est la réalisation de mesures aéroportées ou satellites à faible altitude où des systèmes de réflectométrie GNSS seraient embarqués. Si la réflectométrie GNSS basée sur l'analyse du SNR d'une station à la surface de la terre offre de bonnes performances, elle apparait malheureusement très vite limitée par la hauteur de l'antenne au-dessus de la surface réfléchissante du fait que les ondes électromagnétiques s'amortissent rapidement avec l'altitude. De plus, au-delà de 700 ou 800 m d'altitude, les oscillations du signal SNR sont trop rapides (période inférieure à la seconde) pour être observées avec une acquisition classique à 1 Hz (voir annexe D qui explique le phénomène de l'augmentation de la fréquence du SNR avec l'altitude).

Bibliographie

ABLAIN, M., CAZENAVE, A., VALLADEAU, G. et GUINEHUT, S. (2009). A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993-2008. *Ocean Science*, 5(2):193–201.

ALONSO-ARROYO, A., CAMPS, A., AGUASCA, A., FORTE, G., MONERRIS, A., RÜDIGER, C., WALKER, J., PARK, H., PASCUAL, D. et ONRUBIA, R. (2014a). Dual-polarization GNSS-R Interference Pattern Technique for soil moisture mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5).

ALONSO-ARROYO, A., CAMPS, A., MONERRIS, A., RÜDIGER, C., WALKER, J., FORTE, G., PASCUAL, D., PARK, H. et ONRUBIA, R. (2014b). The dual polarization GNSS-R Interference Pattern Technique. *Proceedings in IGARSS 2014*.

ALONSO-ARROYO, A., CAMPS, A., PARK, H., D., P., ONRUBIA, R. et MARTIN, F. (2015). Retrieval of significant wave height and mean sea surface level using the GNSS-R Interference Pattern Technique : Results from a three-month field campaign. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6):3198–3209.

ANDERSON, K. (1995). A GPS tide gauge. *GPS World Showcase*, 6.

ANDERSON, K. (1996). Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17(8):1118–1127.

ANDRÉANI, A. (2001). *Le GPS : une révolution.* Editions Jean Jary.

AUBERT, J., BIBAUT, A. et RIGAL, J. (1994). Characterization of multipath on land and sea at GPS frequencies. *Proc. 7th Int. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. (ION GPS)*, pages 1155–1171.

BAUP, F., FIEUZAL, R., MARAIS-SICRE, C., DEJOUX, J., le DANTEC, V., MORDELET, P., CLAVERIE, M., HAGOLLE, O., LOPES, A., KERAVEC, P., CESCHIA, E., MIALON, A. et KIDD, R. (2012). MCM'10 : An experiment for satellite multi-sensors crop monitoring from high to low resolution observations. *Geosci. Remote Sens. Symposium, IEEE International*, pages 4849–4852.

BECKMANN, P. et SPIZZICHINO, A. (1987). *Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces.* Artech House Publishers.

BEHARI, J. (2006). *Microwave Dielectric Behavior of Wet Soils*. Remote sensing and digital image processing - Springer.

BILICH, A. (2006). *Improving the Precision and Accuracy of Geodetic GPS : Applications to Multipath and Seismology*. Thèse de doctorat, University of Texas at Austin, M.S., University of Colorado.

BILICH, A. et LARSON, K. (2008). Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). *Radio Science*, 42(6).

BISHOP, G. et KLOBUCHAR, J. (1985). Multipath effects on the determination of absolute ionospheric time delay from GPS signals. *Radio Science*, 20(3):388–396.

BOEHM, J., NIELL, A., TREGONING, P. et SCHUH, H. (2006). Global Mapping Function (GMF) : A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys. Res. Lett.*, 33(L07304).

BONIFACE, K. Aparicio, J. et CARDELLACH, E. (2011). Meteorological information in GPS-RO reflected signals. *Atmos. Meas. Tech.*, 4:1397–1407.

BONIFACE, K., BRAUN, J., MCCREIGHT, J. et NIEVINSKI, F. (2014). Comparison of SNODAS to GPS reflectometry snow depth in the Western United States. *Hydrological Processes*, 29(10).

BOTTERON, C., DAWES, N., LECLÈRE, J., SKALOUD, J., WEIS, S. et FARINE, P. (2013). Soil moisture and snow properties determination with GNSS in alpine environments : challenges, status, and perspectives. *Remote Sensing*, 5(7):3516–3543.

BOUFFARD, J., ROBLOU, L., BIROL, F., PASCUAL, A., FENOGLIO-MARC, L., CANCET, L., MORROW, R. et MÉNARD, Y. (2011). Introduction and assessment of improved coastal altimetry strategies : case study over the northwestern mediterranean sea. *Springer Berlin Heidelberg*, pages 297–330.

BRENNER, A., JAY ZWALLY, H., BENTLEY, C., CSATHO, B., HARDING, D., HOFTON, M., MINSTER, J., ROBERTS, L., SABA, J., THOMAS, R. et YI, D. (2000). Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analyisis for surface elevations, roughness, slope and vegetation heights. *Geoscience Laser Altimeter System (GLAS). Algorithm Theoretical Basis Document. Version 3.0*.

BREWSTER, D. (1815). On the laws which regulate the polarization of light by reflection from transparent bodies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 105:125–159.

BUTTERWORTH, S. (1930). On the theory of filter amplifiers. *Wireless Engineer*, 7:536–541.

CAMPS, A., PARK, H., VALENCIA, E., PASCUAL, D., MARTIN, F., RIUS, A., RIBO, S., BENITO, J., ANDERS-BEIVIDE, A., SAAMENO, P., STATON, G., MARTIN-NEIRA, M., D'ADDIO, S. et WILLEMSEN, P. (2014). Optimization and performance analysis of interferometric gnss-r altimeters : Application to the PARIS IoD mission. *IEEE JSTARS*, 7(5):1436–1451.

CAMPS, A. Caparrini, M., SABIA, R. et RUFFINI, G. (2006). Sea surface salinity retrieval from space : Potential synergetic use of GNSS-R signals to improve the sea state correction and application to the SMOS mission. *Proc. IEEE Microwave Radiometry Remote Sensing Environment (MicroRad)*.

CARDELLACH, E. (2001). *Sea Surface Determination Using GNSS Reflected Signals*. Thèse de doctorat, Universitat Politecnica de Catalunya (UPC).

CARDELLACH, E., FABRA, F., NOGUÉS-CORREIG, O., OLIVERAS, S., RIBO, S. et RIUS, A. (2011). GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques : Application to the GOLD-RTR data sets. *Radio Science*, 46.

CARDELLACH, E., RIBO, S. et RIUS, A. (2006). Technical note on POlarimetric Phase Interferometry (POPI). *CSIC-IEEC, arXiv :physics/0606099v2*.

CARDELLACH, E., RIUS, A., MARTIN-NEIRA, M., FABRA, F., NOGUÉS-CORREIG, O., RIBO, S., KAINULAINEN, J., CAMPS, A. et D'ADDIO, S. (2014). Consolidating the precision of interferometric gnss-r ocean altimetry using airborne experimental data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 52(8):4992–5004.

CARDELLACH, E., RUFFINI, G., PINO, D., RIUS, A., KOMJATHY, A. et GARRISON, J. (2003). Mediterranean balloon experiment : Ocean wind speed sensing from the stratosphere using GPS reflections. *Remote Sens. Environ.*, 88:351–362.

CARRENO-LUENGO, H. et CAMPS, A. (2015). Empirical results of a surface-level GNSS-R experiment in a wave channel. *Remote Sensing*, 7:7471–7493.

CARRENO-LUENGO, H., CAMPS, A., MUNOZ, J., VIDAL, D., VIA, P., AMÈZAGA, A., BOLET, A., JANÉ, J., OLIVÉ, R., CAROLA, J., CATARINO, N., M., H., PALOMO, P. et CORNARA, S. (2015). $^3cat-2$; an experimental nanosatellite for gnss-r earth observation : mission concept and analysis. *IEEE Journal of Selected Topics on Applied Earth Observation and Remote Sensing - (under review, 2015)*.

CARRENO-LUENGO, H., CAMPS, A., RAMOS-PEREZ, I. et RIUS, A. (2014). Experimental evaluation of gnss-reflectometry altimetric precision using the P(Y) and C/A signals. *IEEE J. Select. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sensing*, 7(5):1493–1500.

CHELTON, D., RIES, J., HAINES, B., FU, L. et CALLAHAN, P. (2001). Satellite altimetry. *In Satellite Altimetry and the Earth Sciences : A Handbook of Techniques and Applications, L.-L. Fu and A. Cazenave, Eds., Academic Press*, pages 1–131.

CHENG, D. (1993). Fundamentals of engineering : Electromagnetics. *Addison-Wesley series in Electrical Engineering, Toronto ON*, pages 154–167.

CHEW, C., SMALL, E., LARSON, K. et ZAVOROTNY, V. (2014). Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data : Development of a retrieval algorithm for soil moisture. *IEEE TGRS*, 52(1):537–543.

CHONG, C. (2009). Status of COMPASS/Beidou development. *Présentation. Stanfords 2009 PNT Challenges and Opportunities Symposium, October 21-22 2009*.

COHEN, J., SMALL, C., MELLINGER, A., GALLUP, J., SACHS, J., VITOUSEK, P. et MOONEY, H. (1997). Estimates of coastal populations. *Science*, 278(5341):1209–1213.

DACH, R. (2012). Localisation précise par moyens spatiaux - satellite geometry in single-GNSS and multi-GNSS scenarios. *Présentation lors de l'école d'été du GRGS à Yverdon-Les-Bains, 3-7 septembre 2012*.

DUQUENNE, F., BOTTON, S., PEYRET, F., BÉTAILLE, D. et WILLIS, P. (2005). *GPS : Localisation et navigation par satellites*. Hermès - Lavoisier.

DURAIAPPAH, A., NAEEM, S., AGARDY, T., ASH, N., COOPER, H., DIAZ, S., FAITH, D., MACE, G., MCNEELY, J., MOONEY, H., OTENG-YEBOAH, A., MIGUEL-PEREIRA, H., POLASKY, S., PRIP, C., REID, W., SAMPER, C., JOHAN-SCHEI, P., SCHOLES, R., SCHUTYSER, F. et VAN JAARSVELD, A. (2005). Ecosystems and human well-being : Biodiversity synthesis. *Coastal Systems. World Resources Institute, Washingtons, DC (2005) ; Millennium Ecosystem Assessment. Current State and Trends Assessment*, 1(19):513–549.

FABRA, F. (2013). *GNSS-R as a source of opportunity for sea ice and dry snow remote sensing*. Thèse de doctorat, UPC - Barcelone.

FABRA, F., CARDELLACH, E., RIUS, A., RIBO, S., OLIVERAS, S., NOGUÉS-CORREIG, O., M., R., SEMMLING, M. et S., D. (2012). Phase altimetry with dual polarization GNSS-R over sea ice. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 50(6):2112–2121.

FARGE, M. (1992). Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, 24:395–457.

FERRAZZOLI, P., GUERRIERO, L., PIERDICCA, N. et RAHMOUNE, R. (2010). Forest biomass monitoring with GNSS-R : theoretical simulations. *Adv. Space Res.*

FERRAZZOLI, P., GUERRIERO, L. et SOLIMINI, D. (1995). Simulating bistatic scatter from surfaces covered with vegetation. *J. Electromagn. Waves Applicat.*, 48(2):233–248.

GAO, G., AKOS, D., WALTER, T. et ENGE, P. (2008). GIOVE-B on the air - understanding galileo's new signals. *Inside GNSS, May/June Issue*.

GARRISON, J. et KATSBERG, S. (1998). Effect of sea roughness on bistatically scattered range coded signals from the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, 25(13):2257–2260.

GARRISON, J., KOMJATHY, A., ZAVOROTNY, V. et KATZBERG, S. (2002). Wind speed measurement using forward scattered GPS signals. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40:50–65.

GE, M., GENDT, G., M., R., SHI, C. et LIU, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *J. Geod.*, 82:389–399.

GEGOUT, P., BIANCALE, R. et SOUDARIN, L. (2011). Adaptive Mapping Functions to the azimuthal anisotropy of the neutral atmosphere. *J. Geodesy*, 85:661–667.

GEORGIADOU, Y. et KLEUSBERG, A. (1988). On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. *Manuscripta Geodaetica*, 13(3):172–179.

GERMAIN, O., RUFFINI, G., SOULAT, F., CAPARRINI, M., CHAPRON, B. et SILVESTRIN, P. (2004). The eddy experiment : GNSSR speculometry for directional sea roughness retrieval from low altitude aircraft. *Geophys. Res. Lett.*, 31(L21307).

GPS-WORLD (2011). GLONASS modernization. *GPS World, November Issue*.

GPS-WORLD (2012). Directions 2013 : Plans set in motion for GPS. *GPS World, November issue*.

GRINSTED, A., MOORE, J. et JEVREJEVA, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Non lin. Process. Geophys.*, 11.

GUTMANN, E., LARSON, K., WILLIAMS, M., NIEVINSKI, F. et ZAVOROTNY, V. (2012). Snow measurement by GPS multipath interferometric reflectometry : an evaluation at Niwot Ridge, Colorado. *Hydrol. Process.*, 26:2951–2961.

HALL, C. et CORDEY, R. (1988). Multistatic scatterometry. *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. Edinburgh, Scotland*, 13-16 Sept.:561–562.

HALLIKAINEN, M., ULABY, F., DOBSON, M., EL-RAYES, M. et WU, L. (1985). Microwave dielectric behavior of wet soil : Part i : Empirical model and experimental observations. *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, GE-30(1).

HANNAH, B. (2001). *Modelling and Simulation of GPS Multipath Propagation*. Thèse de doctorat, Queensland University of Technology.

HASLETT, S. (2009). *Coastal Systems*. Routledge.

HELM, A. (2008). *Ground based GPS altimetry with the L1 open GPS receiver using carrier phase-delay observations of reflected GPS signals*. Thèse de doctorat, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ).

HOBIGER, T., HAAS, R. et LÖFGREN, J. (2014). GLONASS-R : GNSS reflectometry with an FDMA based satellite navigation system. *AGU - doi : 10.1002/2013RS005359*.

HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. et COLLINS, J. (2001). GPS theory and practice - fifth, revised edition. *Springer*.

HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. et WASLE, E. (2007). *GNSS - Global Navigation Satellite Systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer.

ILRS (2012). COMPASS. *ILRS : International Laser Ranging Service*.

INSIDE-GNSS (2006). The L2C study : Benefits of the new GPS civil signal. *Inside GNSS, July/August Issue*.

INSIDE-GNSS (2013). Beidou - chinas rapidly emerging GNSS. *Inside GNSS, May/June Issue*.

IZADPANAH, A. (2009). Parameterization of GPS L1 multipath using a dual polarized RHCP/LHCP antenna. *UCGE Reports, number 20280*.

JACKSON, T., SCHMUGGE, J. et ENGMAN, E. (1996). Remote sensing applications to hydrology : soil moisture. *Hydrol. Sci. J.*, 41(4):517–530.

JACOBSON, M. (2010). Snow-covered lake ice in GPS multipath reception - theory and measurement. *Adv. Space Res.*, 46(2):221–227.

JARVIS, J., REUTER, H., NELSON, A. et GUEVARA, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe, CGIAR-CSI SRTM 90 m database, version 4. *CGIAR Consort for Spatial Inf.*

KAPLAN, E. et HEGARTY, C. (2006). Understanding GPS, principles and applications, second edition. *Artech House Publishers*.

KATZBERG, S., TORRES, O., GRANT, M. et MASTERS, D. (2005). Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant : results from SMEX02. *Remote Sens. Environ.*, 100:17–28.

KAVAK, A., VOGEL, W. et GUANGHAN, X. (1998). Using GPS to measure ground complex permittivity. *Electronic Letters*, 34(3):254–255.

KERR, Y., WALDTEUFEL, P., WIGNERON, J.-P., DELWART, S., CABOT, F., BOUTIN, J., ESOCRIHUELA, M.-J., FONT, J., REUL, N., GRUHIER, C., JUGLEA, S., DRINKWATER, M., HAHNE, A., MARTIN-NEIRA, M. et MECKLENBURG, S. (2010). The SMOS mission : New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proceedings of the IEEE - invited paper*, 98(5).

KOMJATHY, A., ARMATYS, M., MASTERS, D. et AXELRAD, P. (2004). Retrieval of ocean surface wind speed and wind direction using reflected GPS signals. *J. Atmos. Ocean Technol.*, 21: 515–526.

KOMJATHY, A., ZAVOROTNY, V., AXELRAD, P., BORN, G. et GARRISON, J. (2000). GPS signal scattering from sea surface, wind speed retrieval using experimental data and theoretical model. *Remote Sens. Environ.*, 73:162–174.

LAGLER, K., SCHINDELEGGER, M., BOEHM, J., KRSN, H. et NILSON, T. (2013). GPT2 : Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 40:1069–1073.

LARSON, K., BRAUN, J., SMALL, E., ZAVOROTNY, V., GUTMANN, E. et BILICH, A. (2010). GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 3(1):91–99.

LARSON, K., GUTMANN, E., ZAVOROTNY, V., BRAUN, J., WILLIAMS, M. et NIEVINSKI, F. (2009). Can we measure snow depth with GPS receivers ? *Geophys. Res. Lett.*, 36(L17502).

LARSON, K., LÖFGREN, J. et HAAS, R. (2012). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *J. Adv. Space Res.*, 51(8):1301–1310.

LARSON, K. et NIEVINSKI, F. (2013). GPS snow sensing : results from the Earth Scope Plate Boundary Observatory. *GPS Solut.*, 17:41–52.

LARSON, K., SMALL, E., GUTMANN, E., BILICH, A., AXELRAD, P. et BRAUNN, J. (2008). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations : initial results. *GPS Solut.*, 12:173–177.

LAURICHESSE, D., MERCIER, F., BERTHIAS, J.-P., BROCA, P. et CERRI, L. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, 56(2):135–149.

LE TRAON, P. et MORROW, R. (2001). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Academic, San Diego, USA. In : Fu L-L, Cazenave A(ed) Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of techniques and applications*, pages 171–215.

LÖFGREN, J. (2014). *Local Sea Level Observations Using Reflected GNSS Signals*. Thèse de doctorat, Chalmers University of technology.

LÖFGREN, J. et HAAS, R. (2014). Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations. *URASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 1:1687–6172.

LÖFGREN, J., HAAS, R. et SCHERNECK, H. (2011). Sea-level analysis using 100 days of reflected GNSS signals. *Proceedings of the 3rd International Colloquium - Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme*.

LOMB, N. (1976). Least-squares frequency analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical and Space Science*, pages 447–462.

LOWE, S., LABRECQUE, J., ZUFFADA, C., ROMANS, L., YOUNG, L. et HAJI, G. (2002a). First airborne observation of earth-reflected GPS signals. *Radio Science*, 37(1).

LOWE, S., ZUFFADA, C., CHAO, Y., KROGER, P., YOUNG, L. et LABRECQUE, J. (2002b). 5-cm-precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections. *Geophys. Res. Lett.*, 29.

LYARD, F., LEFEVRE, F., LETELLIER, T. et FRANCIS, O. (2006). Modelling the global ocean tides : modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56:394–415.

MARCHAN-HERNANDEZ, J., E., V., RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., RAMOS-PEREZ, I., BOSH-LLUIS, X., CAMPS, A., EUGENIO, F. et MARCELLO, J. (2010). Sea-state determination using GNSS-R data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 7(4):1–5.

MARTIN-NEIRA, M. (1993). A passive reflectometry and interferometry system (PARIS) : Application to ocean altimetry. *ESA J-Eur. Space Agen.*, 17:331–355.

MARTIN-NEIRA, M., COLMENAREJO, P., RUFFINI, G. et SERRA, C. (2002). Altimetry precision of 1 cm over a pond using the widelane carrier phase of GPS reflected signals. *Can. J. Remote Sens.*, 28(3):394–403.

MASTERS, D. (2004). *Surface remote sensing applications of GNSS bistatic radar : soil moisture and aircraft altimetry*. Thèse de doctorat, University of Colorado at Boulder.

MAYO, M. (2014). GNSS-R : signaux réfléchis. *Géomètre*, 2123:46–49.

MORA, C., TITTENSOR, D. P., ADL, S., SIMPSON, A. et B., W. (2011). How many species are there on Earth and in the Ocean ? *PLoS Biology*, 9(8).

MOTTE, E., MEHREZ, Z. et FANISE, P. (2015). GLORI (GLObal navigation satellite system Reflectometry Instrument) : A new airborne GNSS-R receiver for land surface applications. *EGU General Assembly - Abstract*.

NASA et NIMA (1998). The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. *NASA/TP-1998-206861*.

NIEVINSKI, F. et LARSON, K. (2014). Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation : Part i and ii. *IEEE TGRS*, 52(10):6555–6573.

NIEVINSKI, F. et SANTOS, M. (2010). Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS. *Geomatica*, 64:191–207.

OUELETTE, K., de LINAGE, C. et FAMIGLIETTI, J. (2013). Estimating snow water equivalent from GPS vertical site-position observations in the western United States. *Water Resources Research*, 49(5):2508–2518.

PALLARES, J., RUFFINI, G. et RUFFINI, L. (2005). Ionospheric tomography using GNSS reflections. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 43(2):321–326.

PIERDICCA, N., GUERRIERO, L., CAPARRINI, M., EGIDO, A., PALOSCIA, S., SANTI, E. et FLOURY, N. (2013). GNSS Reflectometry as a tool to retrieve soil moisture and vegetation biomass : experimental and theoretical activities. *IEEE, ICL-GNSS*, pages 1–5.

POLISCHUK, G., KOZLOV, V., ILITCHOV, V., BARTENEV, V., KOSSENKO, V., ANPHIMOV, N., REVNIVYKH, S., PISAREV, S., TYULUAKOV, A., SHEBSHAEVITCH, B., BASEVITCH, A. et VOROKHOVSKY, Y. (2002). The Global Navigation Satellite System GLONASS : Development and usage in the 21st century. *34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) meeting, Décembre 3-5 2002*.

REES, W. (2003). Physical principles of remote sensing, second edition. *University press, Cambridge, United Kingdom*.

RIUS, A., NOGUÉS-CORREIG, O., RIBO, S., CARDELLACH, E., OLIVERAS, S., VALENCIA, E., PARK, H., TARONGI, J., CAMPS, A., VAN DER MAREL, H., VAN BREE, R. et ALTENA, B. Martin-Neira, M. (2012). Altimetry with GNSS-R interferometry : first proof of concept experiment. *GPS Solutions*, 16:231–241.

RODRIGUEZ, E., MORRIS, C., BELZ, J., CHAPIN, E., MARTIN, J., DAFFER, W. et HENSLEY, S. (2005). An assessment of the SRTM topographic products. *Technical Report D-31639, JPL/NASA*.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., BOSCH-LLUIS, X., ACEVO, R., AGUASCA, A., CAMPS, A., VALLLLOSERA, M., RAMOS-PEREZ, I. et E., V. (2010). Study of maize plants effects in the retrieval of soil moisture using the interference pattern GNSS-R technique. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2010*, pages 3813–3816.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., BOSCH-LLUIS, X., CAMPS, A., RAMOS-PEREZ, I., VALENCIA, E., PARK, H. et VALL-LLOSSERA, M. (2011a). Water level monitoring using the Interference Pattern GNSS-R Technique. *IGARSS2011*, pages 2334–2337.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., BOSCH-LLUIS, X., CAMPS, A., VALL-LLOSSERA, M., VALENCIA, E., MARCHAN-HERNANDEZ, J. et RAMOS-PEREZ, I. (2009a). Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques : Experimental results over a bare soil field. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 47:3616–3624.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., CAMPS, A., VALL-LLOSSERA, M., BOSCH-LLUIS, X., MONERRIS, A., RAMOS-PEREZ, I., VALENCIA, E., MARCHAN-HERNANDEZ, J., MARTINEZ-FERNANDEZ, J., BARONCINI-TURRICCHIA, G., PÉREZ-GUTIÉRREZ, C. et SANCHEZ, N. (2011b). Land geophysical parameters retrieval using the Interference Pattern GNSS-R Technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49:71–84.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., MARCHAN-HERNANDEZ, J., CAMPS, A., BOSCH-LLUIS, X., VALENCIA, E., RAMOS-PEREZ, I., VALLOSSERA, M., MONERRIS, A., MARTINEZ-FERNANDEZ, J., PEREZ-GUTIERREZ, C., BARONCINI-TURRICCHIA, G., SANCHEZ-MARTIN, N. et NIETO, J. (2009b). Topographic profile retrieval using the Interference Pattern GNSS-R Technique. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International IGARRS 2009*, 3:420–423.

ROUSSEL, N., FRAPPART, F., RAMILLIEN, G., DESJARDINS, C., GEGOUT, P., PÉROSANZ, F. et BIANCALE, R. (2014). Simulations of direct and reflected waves trajectories for in situ GNSS-R experiments. *Geosci. Model Dev.*, 7:1001–1062.

ROUSSEL, N., RAMILLIEN, G., FRAPPART, F., DARROZES, J., GAY, A., BIANCALE, R., STRIEBIG, N., HANQUIEZ, V., BERTIN, X. et ALLAIN, D. (2015). Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver. *Soumis à Remote Sensing of Environment le 26 mai 2015*.

RUF, C., LYONS, A., UNWIN, M., DICKINSON, J., ROSE, R., ROSE, D. et VINCENT, M. (2013). CYGNSS : Enabling the future of hurricane prediction. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, 1(2):52–67.

RUF, T. (1999). The lomb-scargle periodogram in biological rhythm research : Analysis of incomplete and unequally spaced time-series. *Biological Rhythm Research*, 30(2):178–201.

RUFFINI, G., CAPARRINI, M., CHAPRON, B., SOULAT, F., GERMAIN, O. et RUFFINI, L. (2003). Oceanpal : an instrument for remote sensing of the ocean and other water surfaces using GNSS reflections. *Proceedings of the Third International Conference on EuroGOOS. Elsevier Oceanography Series*, 69:146–153.

RUFFINI, G., SOULAT, F., CAPARRINI, M., GERMAIN, O. et MARTIN-NEIRA, M. (2004). The eddy experiment : Accurate GNSS-R ocean altimetry from low altitude aircraft. *Geophys. Res. Lett.*, 31(L12306).

SCARGLE, J. (1982). Studies in astronomical time series analysis. ii - statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data. *Astro.J.*, 263:835–853.

SEEBER, G. (1993). Satellite geodesy - foundations, methods, and applications. *Walter de Gruyter*.

SEMMLING, A., BEYERLE, G., STOSIUS, R., DICK, G., WICKERT, J., FABRA, F., CARDELLACH, E., RIBO, S., RIUS, A., HELM, A., YUDANOV, S. et D'ADDIO, S. (2011). Detection of artic ocean tides using interfeometric GNSS-R signals. *Geophys. Res. Lett.*, 38(L04103).

SEMMLING, A., SCHMIDT, T., WICKERT, J., SCHÖN, S., FABRA, F., CARDELLACH, E. et RIUS, A. (2012). On the retrieval of the specular reflection in gnss carrier observations for ocean altimetry. *Radio Sci.*, 47(RS6007).

SHUANGGEN, J., CARDELLACH, E. et XIE, F. (2014). *GNSS Remote Sensing. Theory, Methods and Applications*. Springer - Remote sensing and digital image processing.

STIENNE, G. (2013). *Traitements des signaux circulaires appliqués à l'altimétrie par la phase des signaux GNSS*. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale.

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*, 10:1359–1372.

SUTOUR, C. et DARRIN, E. (2012). Etude d'une nouvelle modélisation des erreurs de multitrajets en navigation GPS. *Rapport de projet. Université Bordeaux 1 Sciences Technologies*.

TARNIEWICZ, J. (2001). Amélioration de la précision de la composante altimétrique du GPS par une correction du délai troposphérique utilisant une mesure externe du contenu en vapeur d'eau. *Bulletin d'information de l'IGN*, 72.

TEUNISSEN, P. (1995). The least-squares ambiguity decorrelation adjustment : a method for fast GPS interger ambiguity estimation. *Journal of Geodesy*, 70:65–82.

TOLMAN, H. (2014). User manual and system documentation of WAVEWATCH-iii version 4.18. *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical notes 316*.

TREUHAFT, R., LOWE, S., ZUFFADA, C. et CHAO, Y. (2001). Two-cm gps altimetry over crater lake. *Geophys. Res. Lett*, 28(23):4343–4346.

TSAI, B. et GARDNER, C. (1982). Remote sensing of sea state using laser altimeters. *Applied Optics*, 21(21):3932–3940.

UNWIN, M., BLUNT, P., Vos van STEENWIJK, R., DUNCAN, S., MARTIN, G. et P., J. (2011). GNSS remote sensing and technology demonstration on TechDemoSat-1. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR*, pages 2970–2975.

WALLACE, J. et HOBBS, P. (2006). *Atmospheric Science : An Introductory Survey*. International Geophysics. Elsevier Science.

WARD, P. (1996). Satellite signal acquisition and tracking. *Understanding GPS : Principles and Applications*.

WIEHL, M., LEGRÉSY, B. et DIETRICH, R. (2003). Potential of reflected gnss signals for ice sheet remote sensing. *Prog. Electromagn. Res.*, 40:177–205.

ZAVOROTNY, V., GLEASON, S., CARDELLACH, E. et CAMPS, A. (2014). Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 2(4).

ZAVOROTNY, V. et VORONOVICH, A. (1999). Bistatic radar scaterring from an ocean surface in the small-slope approximation. *Proc. IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp. - Hamburg, Germany*, pages 2419–2421.

ZAVOROTNY, V. et VORONOVICH, A. (2000). Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38:951–964.

Annexe A

Présentations du GNSS-R et des travaux de l'équipe du GET dans la revue *Géomètre*

Cette annexe est un article rédigé par Marielle Mayo dans la revue *Géomètre* n°2123, paru en mars 2015. Il présente d'une manière générale et vulgarisée les potentialités du GNSS-R et s'attarde particulièrement sur les projets réalisés durant ma thèse par l'équipe du GET à Toulouse. Cet article a été rédigé suite à une présentation de mes travaux faites par José Darrozes à la conférence Francophone ESRI **SIG 2014** (1et et 2 octobre 2014) intitulée : "Simulateur R/ARCMAP des signaux GNSS-R pour le suivi environnemental".

GNSS-R

Signaux réfléchis

Le recueil des signaux GNSS réfléchis à la surface de la Terre permet de suivre des variations de hauteurs d'eau et donne accès à de précieuses informations géophysiques.

MARIELLE MAYO

Une convention passée entre le Cnes, la subdivision des phares et balises de la Dirm Sud-Atlantique et le syndicat mixte pour le développement durable de l'estuaire de la Gironde a permis l'installation pour six mois d'un réflectomètre GNSS sur la plateforme du phare de Cordouan, un site idéal en raison de sa position en plein océan et de la hauteur du phare.

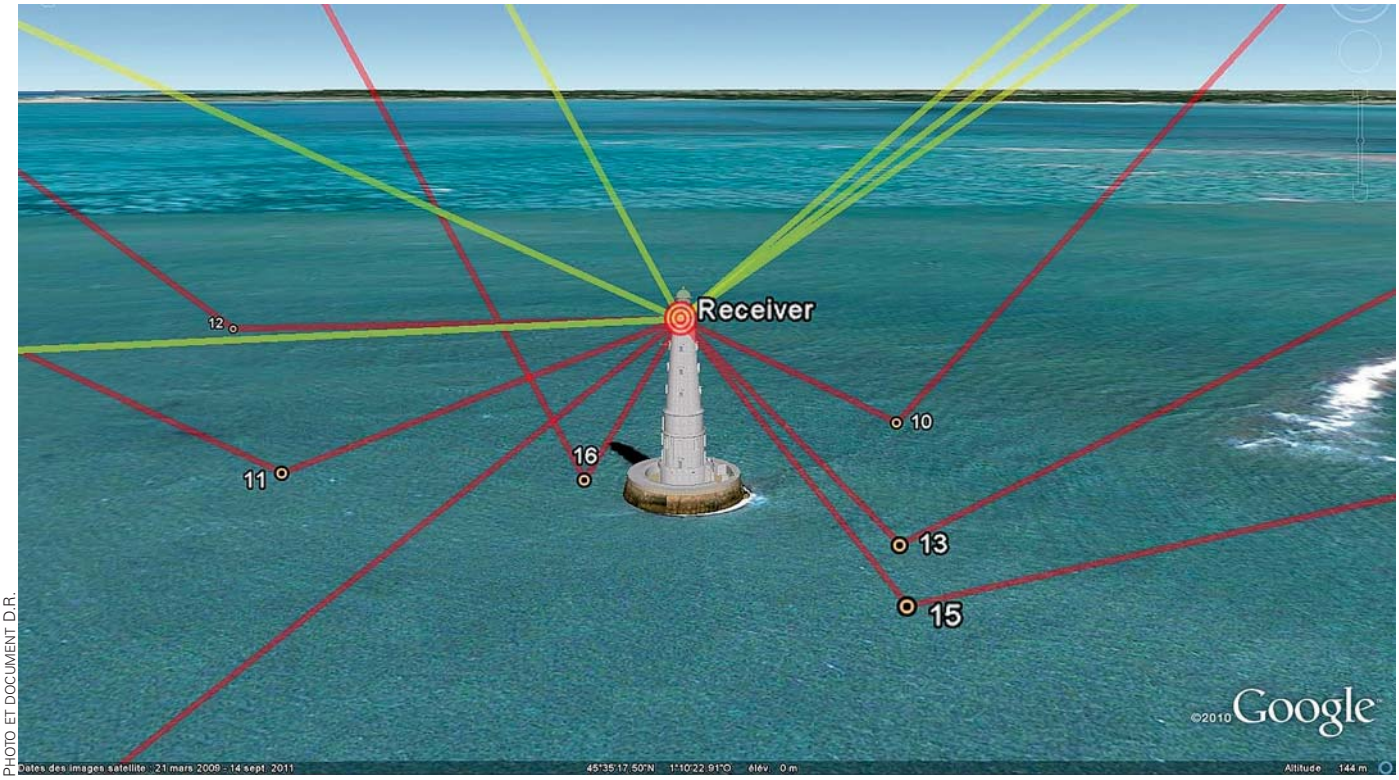


PHOTO ET DOCUMENT D.R.

Visualisation sous Google Earth des ondes GNSS directes et réfléchies de manière spéculaire (angle de réflexion égal à l'angle d'incidence).

Introduit il y a une vingtaine d'années, le concept de réflectométrie GNSS, ou GNSS-R, fait aujourd'hui l'objet de recherches très prometteuses. Ce nouvel outil de télédétection, fondé sur l'analyse des signaux GNSS réfléchis à l'interface terrestre, permet le suivi de niveaux d'eau ainsi que la détermination de différentes propriétés des surfaces maritimes et terrestres. Cette technique offre de nombreux avantages, à commencer par la pérennité et la continuité des mesures ainsi qu'une couverture dense et continue partout dans le monde. « *Elle est vouée à s'améliorer avec l'arrivée de nouvelles constellations GNSS et l'augmentation du nombre de satellites opérationnels* », souligne José Darrozes (université Paul Sabatier), chercheur au sein du laboratoire Géosciences environnement Toulouse (GET), composante de l'observatoire Midi-Pyrénées (OMP), l'un des acteurs majeurs du développement de la réflectométrie GNSS-R en France. Les applications envisagées sont variées : suivi environnemental, prévisions météorologiques, recherches en climatologie... Les enjeux sont donc très importants.

Proposé par l'ESA (European Space Agency) sous la dénomination de Paris (*Passive Reflectometry and Interferometry System*), le concept de réflectométrie GNSS se base sur l'analyse de la différence de trajets entre les signaux directs émis par les satellites des systèmes GNSS et ceux réfléchis sur la surface de la Terre, ce qui permet de déduire un certain nombre de paramètres. Le système mis en place est dit passif et opportuniste – il se contente « d'écouter », sans émission de signal, et profite des satellites déjà en fonctionnement.

Suivi environnemental hydrologique

Plusieurs méthodes de mesure sur les signaux directs et réfléchis peuvent être mises en œuvre : altimétrie par mesure de code ou phase de porteuse ; création de cartes DDM (*delay-Doppler map*), qui représentent la composante diffuse des signaux réfléchis en chaque point de la surface illuminée par l'onde incidente et donnent accès aux modifications de la forme d'onde induite par la rugosité de surface (pouvant être mise en relation avec la vitesse du vent et la hauteur des vagues) ; ou encore étude de la relation signal sur bruit (SNR : *signal-to-noise ratio*, le signal réfléchi étant capté comme un bruit). « *Cette dernière méthode ne nécessite qu'une antenne et un récepteur classique, ce qui représente un avantage en termes de coût* », ajoute José Darrozes. Dans les autres cas, on utilise deux antennes, la première orientée vers le zénith et de polarisation circulaire droite pour capter l'onde directe et la seconde orientée vers le nadir et de polarisation circulaire gauche pour capter le signal réfléchi (inversion de la polarisation lors de la réflexion). « *Pour récupérer toute la forme d'onde, il est nécessaire d'utiliser des appareils spécifiques, proches des récepteurs GPS classiques mais beaucoup plus coûteux* », précise José Darrozes.

Les systèmes GNSS-R ont un caractère multistatique, un seul récepteur permettant de collecter les informations correspondant à l'émission de signaux par plusieurs satellites. Différentes configurations sont envisageables, le récepteur pouvant être fixé sur un mât ou sur un point haut du sol ou être aéroporté, voire embarqué à bord d'un satellite en orbite basse. La zone couverte est d'autant plus vaste que le récepteur est haut, mais le signal est alors plus faible, ce qui impose des antennes de gain ▸▸

important. « *Pour effectuer de grandes campagnes sur de grandes surfaces, on se tourne plutôt vers les techniques aéroportées et l'analyse des formes d'onde* », précise José Darrozes. Des tests ont notamment été effectués par les chercheurs allemands du centre de recherche GFZ, en pointe dans ce domaine, avec un récepteur embarqué sur un Zeppelin. Le spécialiste espagnol Starlab a quant à lui réalisé des études avec un récepteur embarqué à bord d'un avion.

« *Depuis quatre ou cinq ans, on commence à voir clairement les potentialités de cette technique, qui permet le suivi environnemental de différentes informations hydrologiques* », poursuit José Darrozes. Totalement réfléchis par les plans d'eau, les signaux émis dans la bande de fréquence L sont dotés d'une certaine pénétration dans le sol, dont la profondeur est directement corrélée au taux d'humidité : plus celui-ci est important, plus la pénétration est faible. Il est donc possible d'utiliser la réflectométrie non seulement pour étudier les variations des hauteurs d'eau continentales ou océaniques, mais aussi pour la mesure de l'épaisseur du manteau neigeux, ou encore pour le suivi de la croissance végétale.

Des antennes côtières en marégraphes ?

Les travaux menés au sein du GET par Nicolas Roussel dans le cadre d'une thèse en cours d'achèvement ont contribué à mettre en lumière les potentialités de la réflectométrie. « *En 2012, j'ai consacré mon stage de fin d'études à la création d'un simulateur qui permet de prévoir la position des points de réflexion, connaissant la position des satellites et des récepteurs* », explique-t-il. Dans un premier temps, il s'agissait de modéliser la trajectoire des signaux GNSS réfléchis à la surface de la Terre en se basant sur les éphémérides des satellites afin de simuler différentes configurations, l'objectif étant d'évaluer l'intérêt de la réflectométrie GNSS-R pour le suivi spatialisé de paramètres géophysiques. Le chercheur a mis au point des algorithmes de recherche des coordonnées des points de réflexion intégrant différentes approximations de la surface locale – plane, ellipsoïde, sphère ou intégrant un modèle numérique de terrain (MNT) –, ce qui a permis de confirmer l'importance de l'intégration de la topographie pour la précision des mesures. Des corrections en fonction des perturbations liées à la traversée de la troposphère ont également été introduites. Dans un deuxième temps, les résultats issus du simulateur ont été comparés avec des données acquises in situ lors de campagnes de mesures, ce qui a permis de les valider. « *Ce simulateur permet de préparer efficacement des campagnes de mesures en déterminant la position optimale d'un récepteur GNSS-R pour la surveillance d'une zone déterminée* », explique Nicolas Roussel.

Les expérimentations menées sur une période de six mois (de septembre 2012 à mars 2013) au phare de Cordouan, situé en pleine mer à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde, ont montré qu'avec un récepteur placé à 60 m au dessus de la mer, il était possible de capter des réflexions jusqu'à 3,5 km de distance du récepteur. La réflectométrie apparaît comme une technique d'avenir

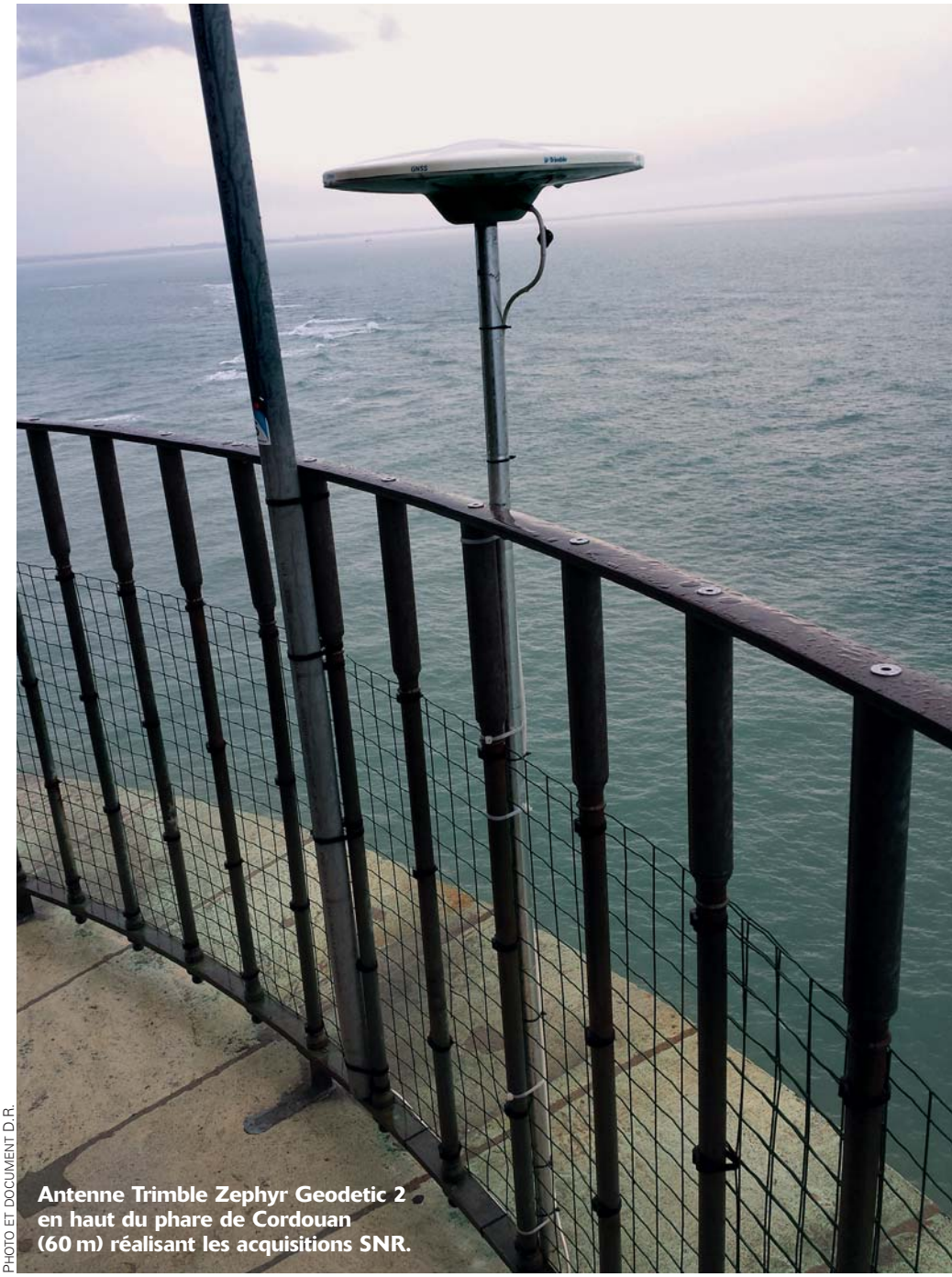
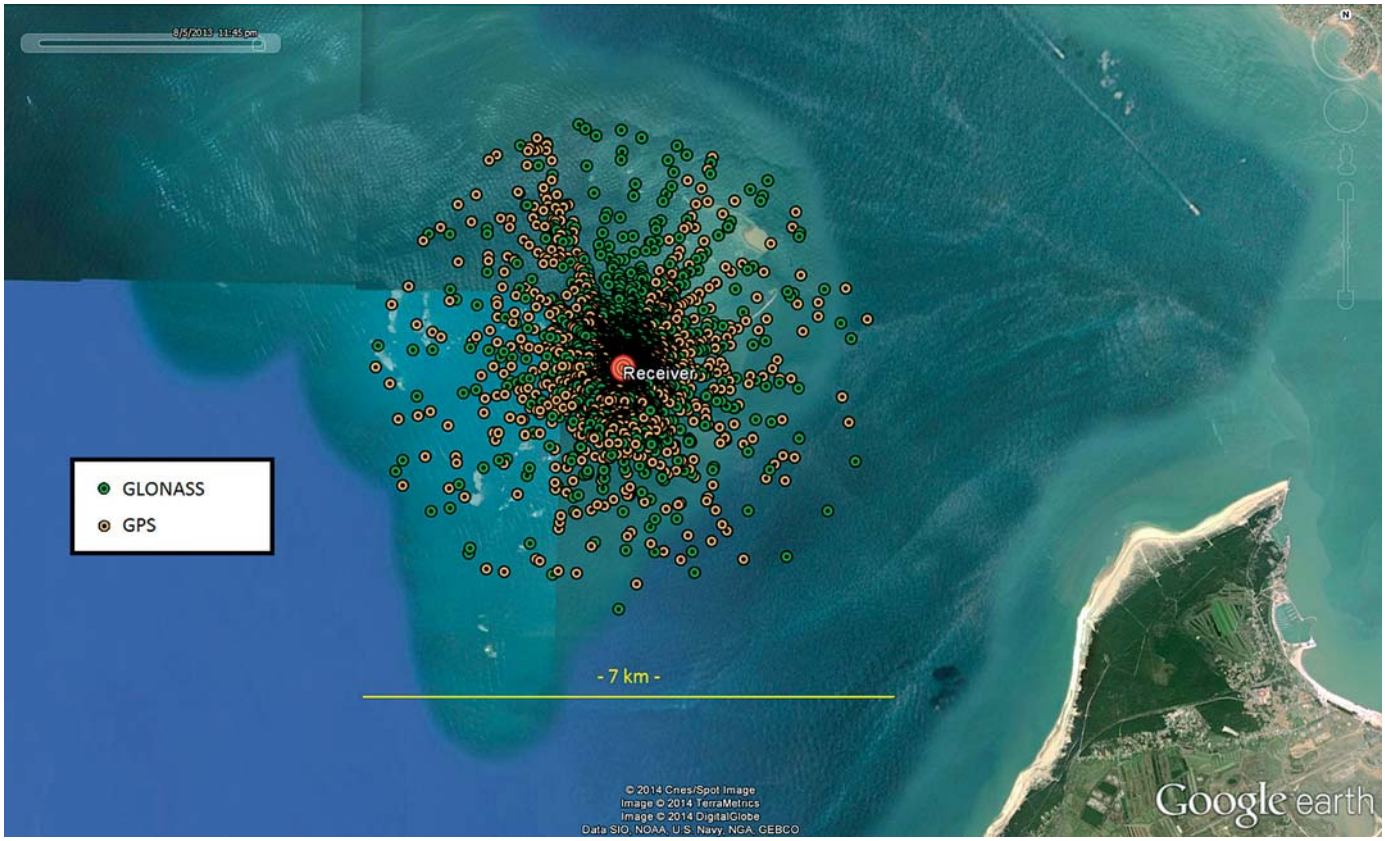


PHOTO ET DOCUMENT D.R.

Antenne Trimble Zephyr Geodetic 2 en haut du phare de Cordouan (60 m) réalisant les acquisitions SNR.



Positions des points de réflexions spéculaires des ondes GPS (orange) et Glonass (vert) obtenues durant une semaine de simulation ; positions des satellites actualisées toutes les quinze minutes.

en océanographie côtière. « *Elle permet d'évaluer toute une zone avec une résolution temporelle bien meilleure que celle des marégraphes, qui délivrent des mesures ponctuelles* », souligne Nicolas Roussel. Les tests montrent que les récepteurs des principaux constructeurs donnent des résultats équivalents, optimaux lorsqu'on utilise la bande L1 même si, à terme, l'objectif est d'exploiter toutes les fréquences de tous les satellites.

« *Avec la méthode SNR, on peut envisager de transformer toutes les antennes côtières des réseaux permanents en marégraphes, ce qui représente un gros avantage* », s'enthousiasme Nicolas Roussel. L'exploitation des réseaux permanents permet aussi de revenir sur des phénomènes anciens, par exemple d'étudier les surcotes liées à la tempête Xynthia de 2010. L'inconvénient réside dans la précision médiocre des mesures altimétriques SNR, alors que la méthode à deux antennes permet d'atteindre une précision centimétrique. Toutefois, les résultats obtenus par Nicolas Roussel, qui doivent être publiés à l'été, montrent que cette précision pourrait être meilleure que la précision décimétrique attendue. Le jeune chercheur a par ailleurs conduit d'autres expérimentations sur un site test en plein champ, qui ont permis de valider la technique pour l'évaluation des variations d'humidité des sols, mesurées en parallèle à l'aide d'une sonde.

Dans un proche avenir, de nombreux projets menés en France comme à l'international devraient permettre d'étendre encore les applications. Avec ses collègues Frédéric Frappart et Guillaume Ramillien, José Darrozes coordonne le projet Prism (Potentialités de la réflectométrie GNSS in-situ et mobile), qui vise à promouvoir les applications scientifiques de réflectométrie au sein de la région Midi-Pyrénées. « *Nous allons l'appliquer à la surveillance du verglas sur le réseau routier, à celle des zones inondables des rivières ou encore à l'agriculture raisonnée* », indique le chercheur. Un projet de surveillance du manteau neigeux sur la route qui relie la France et l'Andorre est en préparation, l'idée étant d'utiliser la réflectométrie pour déterminer une cote d'alerte pour la circulation. En novembre 2014, la première campagne de test du récepteur aéroporté Glori (1), développé par le Cesbio pour équiper l'avion de recherche *ATR42*, a par ailleurs confirmé la sensibilité de l'instrument aux surfaces arborées et aux surfaces réfléchissantes (plan d'eau). Quant à l'utilisation de récepteurs embarqués sur des satellites en orbite basse, elle suscite de très nombreuses expérimentations et représente l'un des principaux défis pour l'avenir, en particulier pour l'obtention d'informations relatives aux changements climatiques. « *L'ESA projette ainsi de placer une antenne sur la station spatiale internationale ISS* », indique le scientifique. On pourrait également mentionner le programme Cyclone GNSS (Cygnss) de la Nasa prévu pour 2016, qui devrait offrir des mesures précises et fréquentes des vents en surface des océans au cours des cycles de tempêtes tropicales et d'ouragans. L'aventure GNSS-R ne fait que commencer... ■

(1) *GLObal navigation satellite system Reflectometry Instrument*, développé par Mehrez Zribi et Pascal Fanisse du Centre d'études spatiales de la biosphère (Cesbio).

Annexe B

Article de vulgarisation publié dans la revue XYZ de l'Association Française de Topographie

Cette annexe est un article que j'ai rédigé dans la revue XYZ de l'Association Française de Topographie et qui a reçu le premier prix de l'AFT 2012. Il traite de généralités sur le GNSS-R et présente les premiers résultats des simulations introduites dans le chapitre 4 :

Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Pérosanz F., Biancale R. : *Réflectométrie GNSS : Modélisation des trajets des signaux réfléchis à la surface de la mer*. XYZ, AFT n° 135. Pages 31 à 38. 2012.

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 commencèrent 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 applications 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 : *PAssive Reflectometry and Interferometry System* (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 : $\varepsilon_r = 73{,}0 + i\,57{,}5$[1].

La valeur élevée de la partie imaginaire de la permittivité relative, étroitement 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 $\Delta\delta^j_{AB}(t)$ la distance supplémentaire parcourue par l'onde émise par le satellite j et réfléchie 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

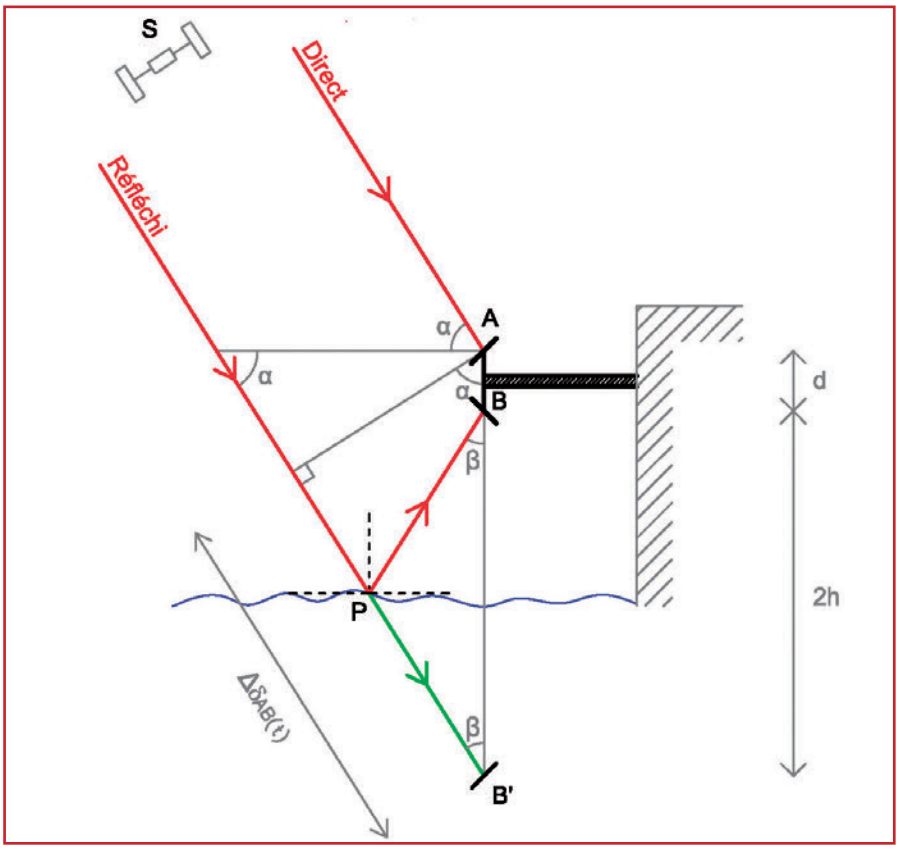


Figure 1. Principe de la réflectométrie GNSS

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

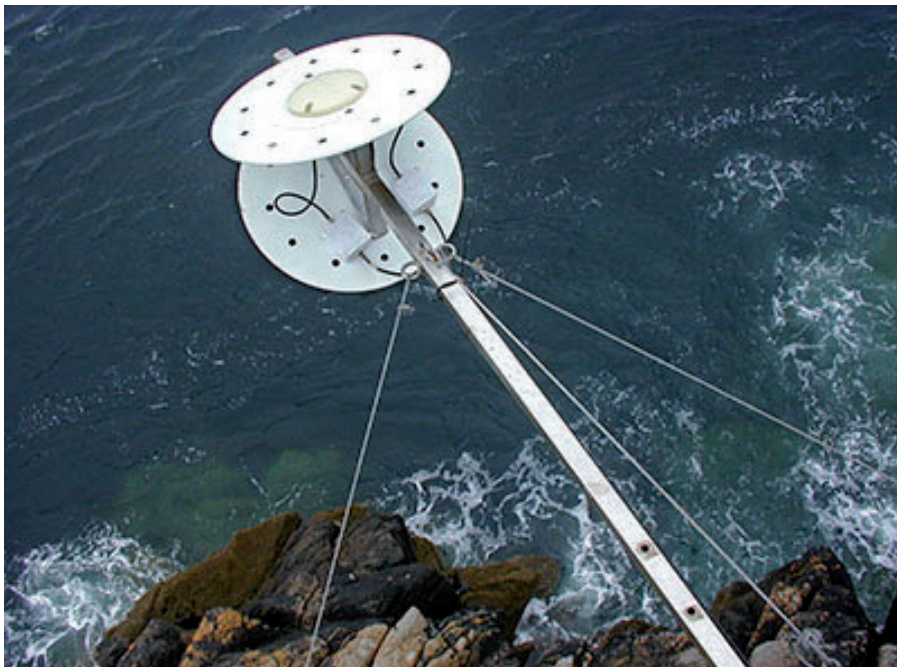


Figure 2. Réflectomètre Oceanpal de Starlab

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 $\Delta\delta^{j}_{AB}(t)$ 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 : $\Delta\delta^{j}_{AB}(t)$.

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, $\Delta\delta^{j}_{AB}(t)$ la distance supplémentaire parcourue par l'onde réfléchie et d la base verticale séparant les centres de phase des deux antennes A et B :

$$\Delta\delta^{j}_{AB}(t) = (2h + d).\sin(\alpha) \quad [2.1]$$

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 :

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

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

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

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 :

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

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 :

$\lambda_{L1} \times \Delta\varphi^{j}_{AB}(t) = \Delta\delta^{j}_{AB}(t) - \lambda_{L1} \times \Delta N^{j}_{AB}(t) + c \times \Delta\tau_{AB}(t)$

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 $\Delta N^{j}_{AB}(t)$ et du déphasage $\Delta\varphi^{j}_{AB}(t)$, on peut aisément déterminer la distance $\Delta\delta^{j}_{AB}(t)$. La détermination de l'ambiguité 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 plateformes 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°35'11''N ; 1°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

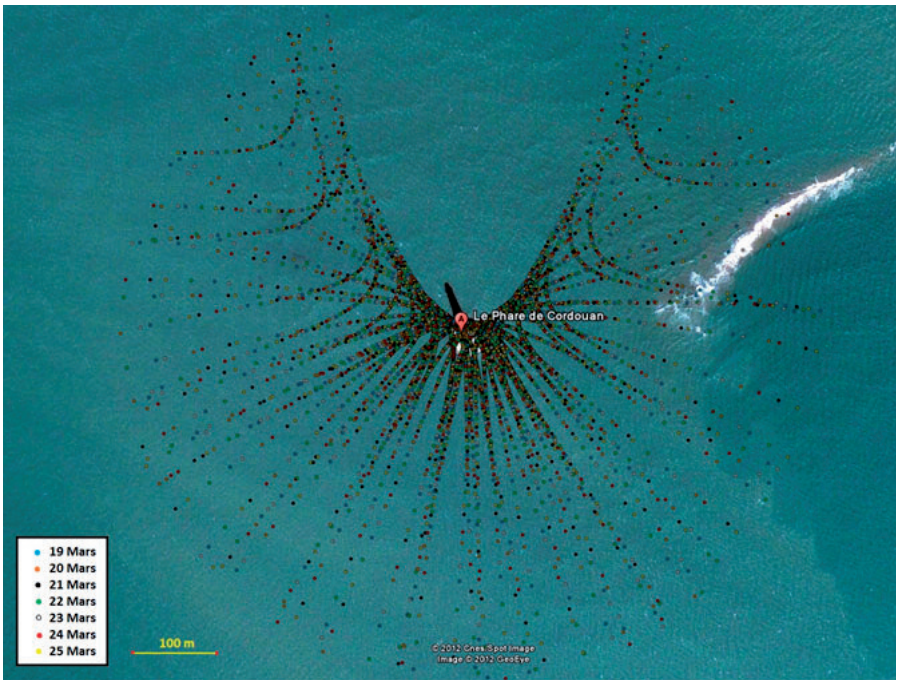


Figure 3. Simulation sur une semaine (19 au 25 mars 2012)

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)*.

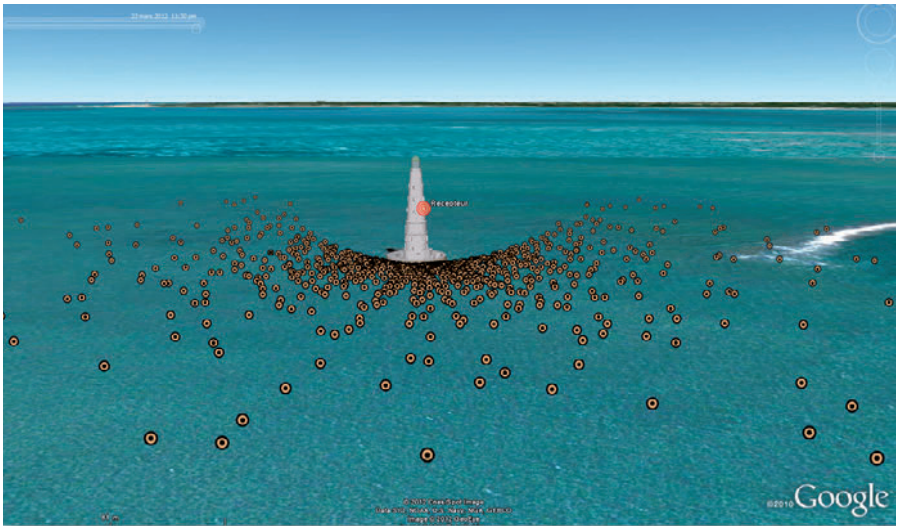


Figure 4. Simulation sur une journée (23 mars 2012)

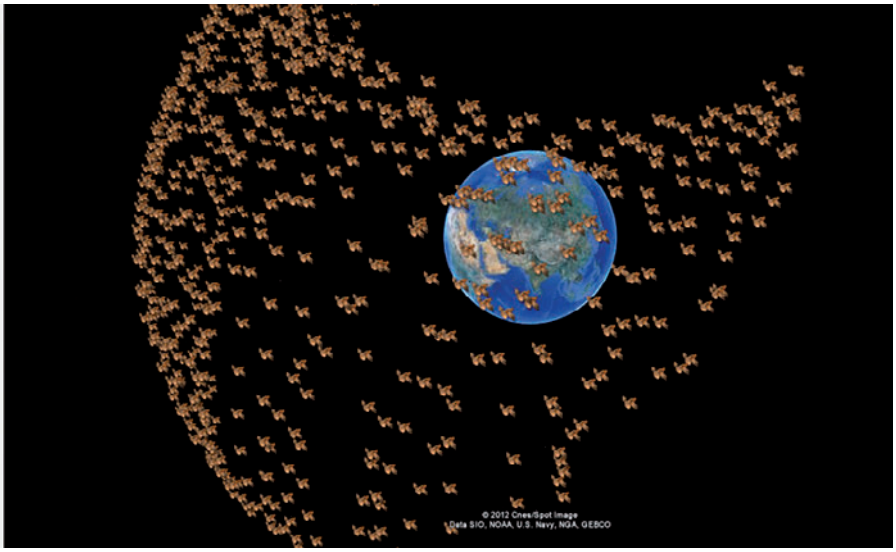


Figure 5. Visualisation de la position des satellites – simulation sur le phare de Cordouan

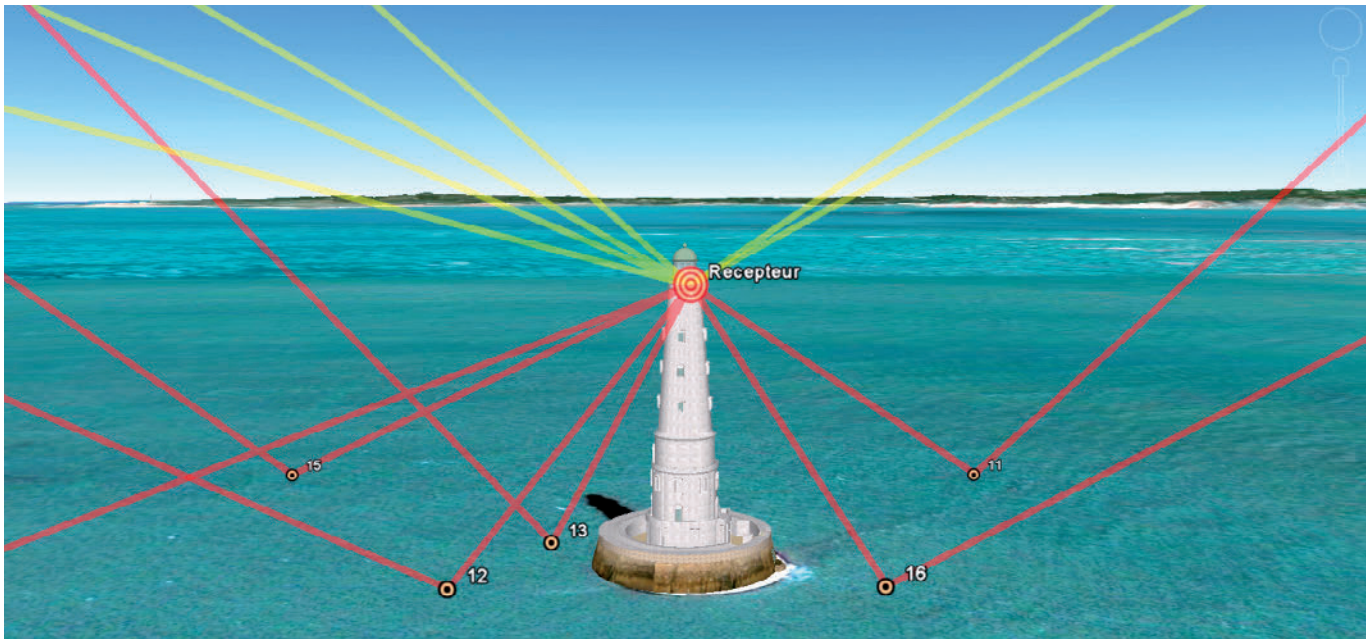


Figure 6. Visualisation de la trajectoire des ondes – simulation sur le phare de Cordouan

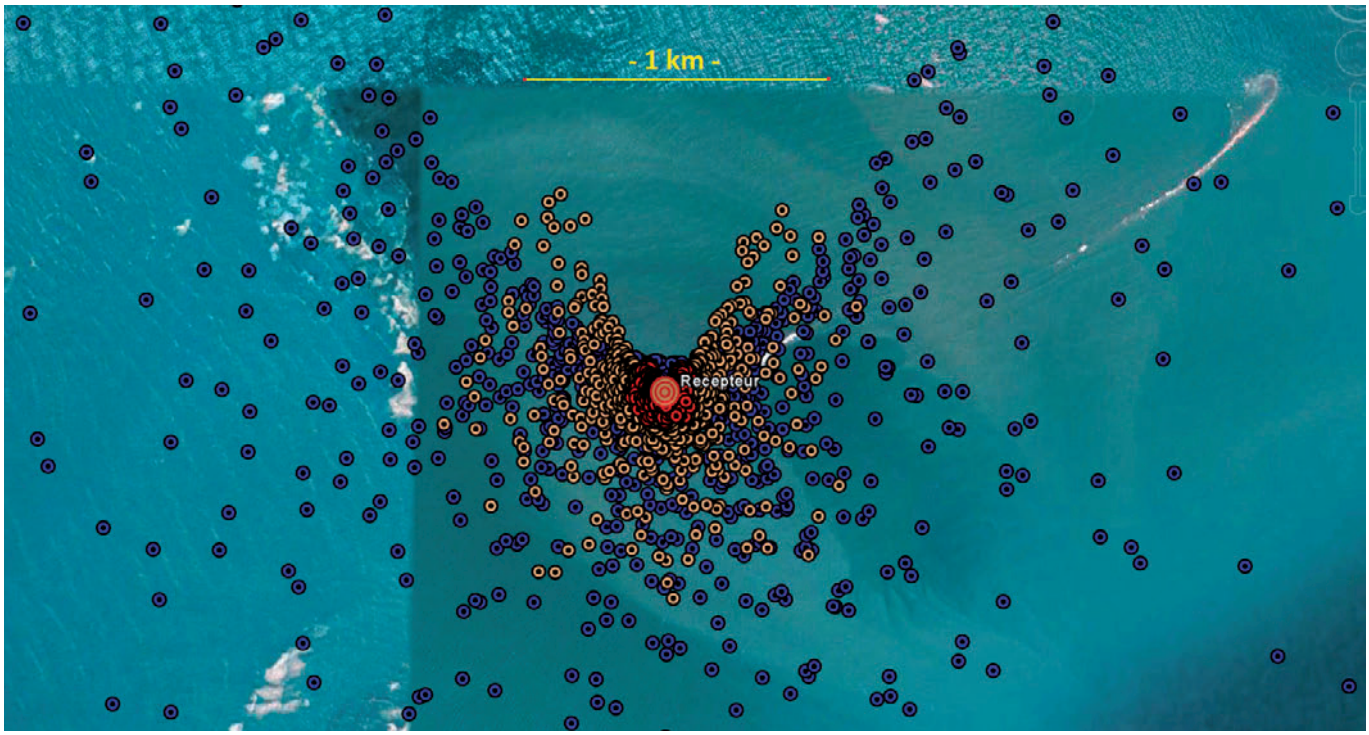


Figure 7. hauteur du récepteur de 10 mètres (rouge), de 65 mètres (orange) et de 400 mètres (bleu)

■ *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 (algorithme approximant la Terre en un ellipsoïde, algorithme 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-

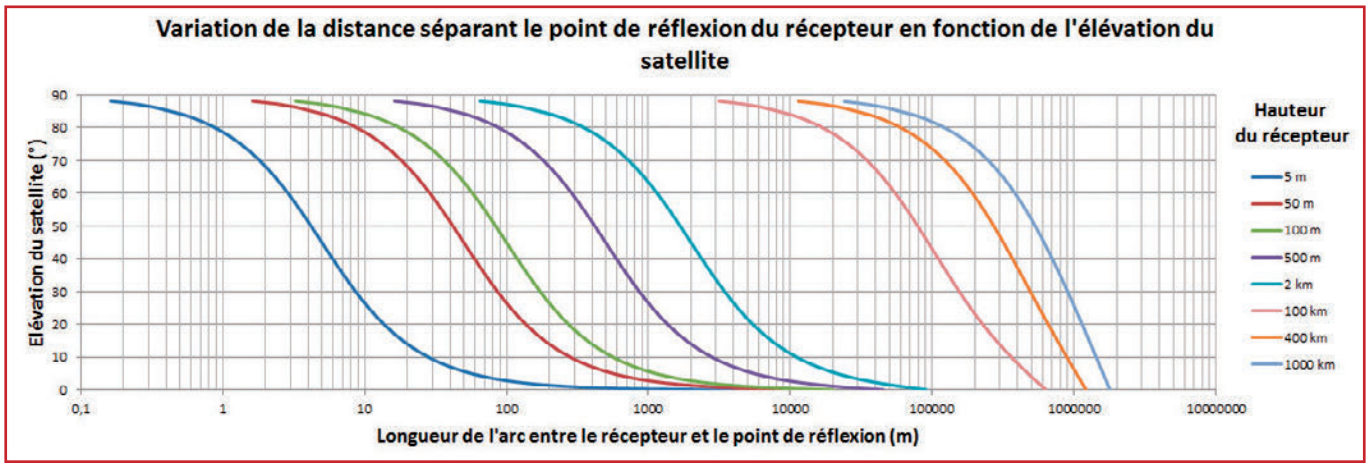


Figure 8. Eloignement des points de réflexion en fonction de l'élévation du satellite, pour différentes hauteurs du récepteur

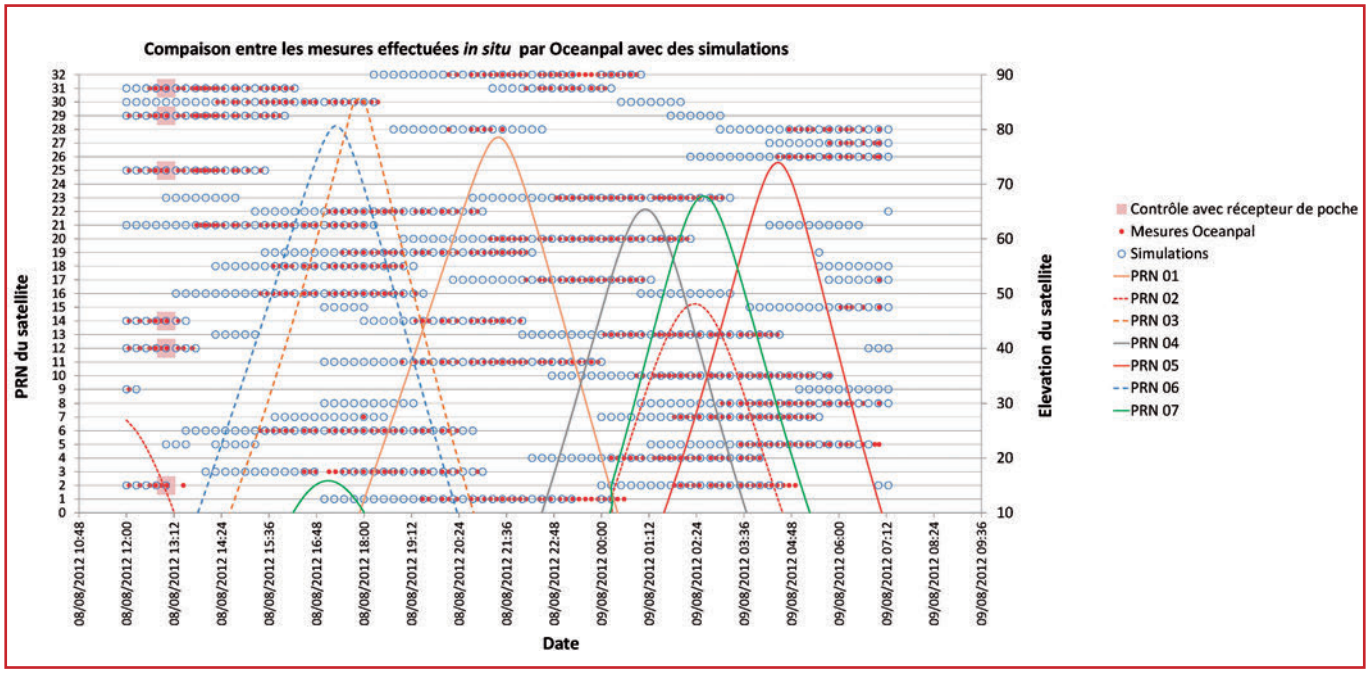


Figure 9. Comparaison des satellites visibles *in situ* avec ceux théoriques issus d'une simulation

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 3.7 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 dû 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 réapparaitre, 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 3.7, 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.roussel@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.

Annexe C

Précisions techniques sur le simulateur déterminant la position des points de réflexion

Cette annexe a pour but de détailler certains points techniques concernant le simulateur présenté dans le chapitre 4.
J'ai développé ce simulateur en langage GNU R, généralement utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique. Ce langage est distribué sous licence GNU GPL. Les routines R sont donc exécutables en *open source* sur de nombreuses plateformes (GNU/Linux, FreeBSD, NetBSD, OpenBSD, Mac OS et Windows).
La figure C.1 présente les différents modules de fonctionnement du simulateur. On distingue trois blocs principaux : un bloc d'entrées (*Input*) contenant les différents éléments nécessaires à l'exécution des programmes ; un bloc exécutif contenant les différents algorithmes à exécuter ; et un bloc de sorties (*Output*) contenant les différents résultats des simulations.

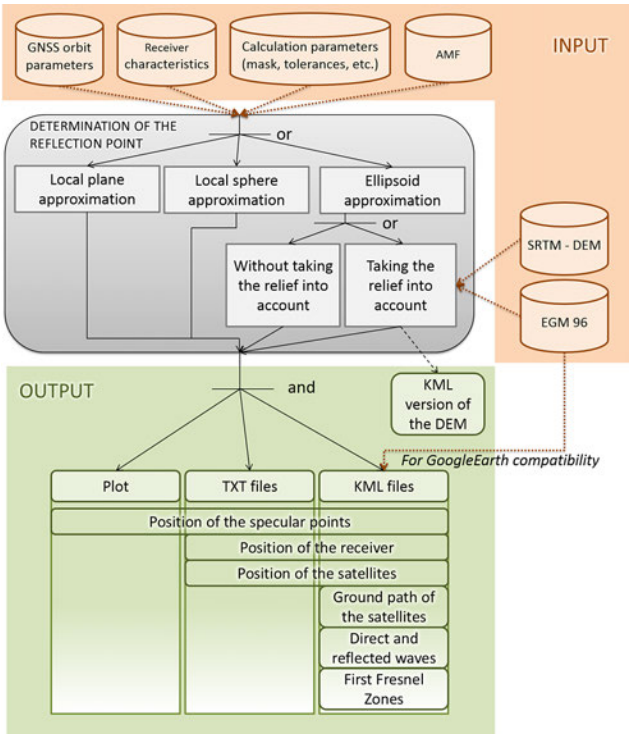


FIGURE C.1 – Modules de fonctionnement du simulateur.

Pour des raisons d'ergonomie, j'ai développé une interface graphique sous Tcl/tk permettant d'utiliser le simulateur de manière plus intuitive qu'en lignes de commandes. Tcl/tk est un langage interprété portable sur Mac, PC et stations Unix. Tcl (*Tool Command Language*) est un langage script non typé, et Tk (*Tool Kit*) est un ensemble d'outils dédiés à la construction d'interfaces graphiques.
La figure C.2 présente l'interface graphique du simulateur dans sa dernière version.

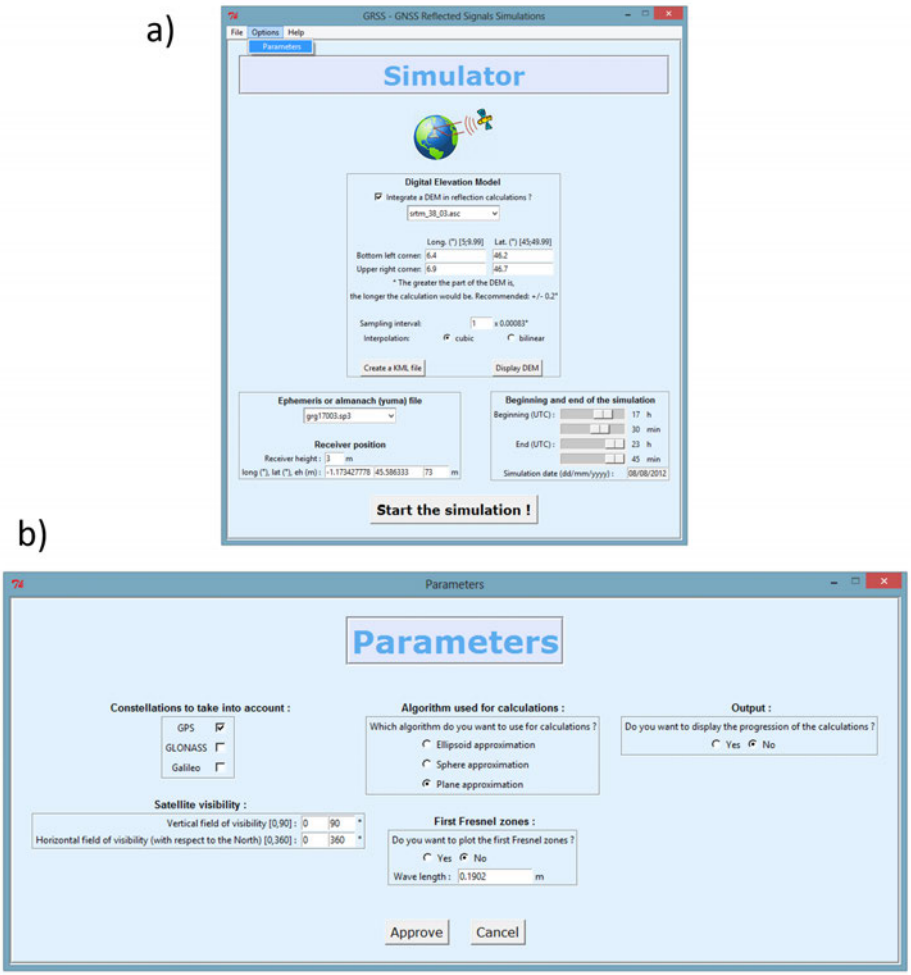


FIGURE C.2 – Interface graphique du simulateur : fenêtre principale (a) et fenêtre de paramétrages (b).

Annexe D

Optimisation de la durée d'une session et de la fréquence d'acquisition des données SNR pour des applications altimétriques

Cette annexe présente les résultats d'une étude théorique portant sur la période des oscillations "haute fréquence" (notées SNR_m) observées dans la série temporelle de rapport signal-sur-bruit (SNR) enregistrée par une station GNSS. Ces oscillations sont principalement dues au multi-trajet (voir section 3.4.2.2 page 60). Leur fréquence par rapport au sinus de l'angle d'élévation θ du satellite est décrite par l'équation 3.19, définie à la page 63 :

$$\tilde{f} = \frac{2}{\lambda}(\dot{h}\frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}} + h) \tag{D.1}$$

λ est la longueur d'onde de l'onde réfléchie par la surface, h est la hauteur de l'antenne par rapport à la surface de réflexion, $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ définit la vitesse verticale, et $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ la vitesse de variation de l'angle d'élévation du satellite.

Il est possible d'inverser ces mesures de fréquences $\tilde{f}$ pour estimer la hauteur h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion, en vue d'applications altimétriques : voir chapitres 5 et 6. La série temporelle SNR_m analysée doit présenter au moins quelques périodes pour permettre une mesure suffisamment précise de cette fréquence.

En se basant sur l'équation 3.19, il est possible de calculer la "période" ($= \frac{1}{\tilde{f}}$) en fonction du sinus de l'angle d'élévation. Cette période peut être exprimée en fonction du temps en prenant en compte la vitesse de variation du sinus de l'angle d'élévation.

Ainsi, les figures D.1, D.2 et D.3 présentent la période temporelle (en s, min ou h) d'une oscillation de SNR_m, en fonction de la position d'un satellite quelconque dans son passage (i.e., début de passage à l'horizon ou apogée), pour différentes hauteurs d'antenne au-dessus de la surface de réflexion. Trois cas différents sont testés :

- la surface de réflexion est supposée fixe, c'est à dire $\dot{h} = \frac{dh}{dt} = 0$ m/s ;
- la surface de réflexion est supposée être en mouvement vertical avec $\dot{h} = \frac{dh}{dt} = \pm 1.10^{-5}$ m/s (correspondant à la valeur utilisée dans le cadre des mesures altimétriques réalisées au phare de Cordouan : voir chapitre 5) ;
- la surface de réflexion est supposée être en mouvement vertical très rapide avec $\dot{h} = \frac{dh}{dt} = \pm 0.01$ m/s ;

Ces trois figures sont organisées de la même manière : les deux premières sous-figures (a et b) représentent l'angle d'élévation du satellite en fonction du temps. Une couleur est associée à chaque élévation, en différentiant les phases ascendantes des phases descendantes (inversion du signe de $\dot{\theta}$). Les 10 sous-figures suivantes (c à l) montrent la période des oscillations de SNR_m, en fonction de la hauteur d'antenne, pour chaque valeur de $\dot{h}$ testée, et en différentiant la phase ascendante de la phase descendante de la trajectoire du satellite. Les couleurs de ces 10 sous-figures correspondent aux couleurs attribuées en (a) et (b).

Ainsi, par exemple, si l'on considère la figure D.1 (c et d), avec une surface fixe (i.e., $\dot{h} = 0$), la période observée variera entre ~ 12 min (début du passage du satellite, faible élévation) et l'infini (apogée du passage) pour une antenne à 1 m au-dessus du sol. Une acquisition d'une heure environ sera donc nécessaire pour observer quelques périodes en début de passage du satellite. Mais plus on s'approchera de l'apogée de sa trajectoire, plus le temps d'acquisition nécessaire pour observer le même nombre de périodes sera grand.

Ceci permet donc d'évaluer le temps d'acquisition nécessaire pour avoir une bonne estimation de $\tilde{f}$ (et donc de h pour des applications altimétriques). Les résultats montrent que plus l'antenne sera haute par rapport au sol, plus les variations observées par SNR_m seront ra-

pides et donc plus nombreuses les estimations de $\tilde{f}$ seront possibles. Cependant, une acquisition GNSS classique à 1 HZ limitera la hauteur d'antenne à $\sim$ 800 m maximum pour des applications altimétriques. Au-delà, les oscillations seront trop rapides pour être observées (voir figure D.3).

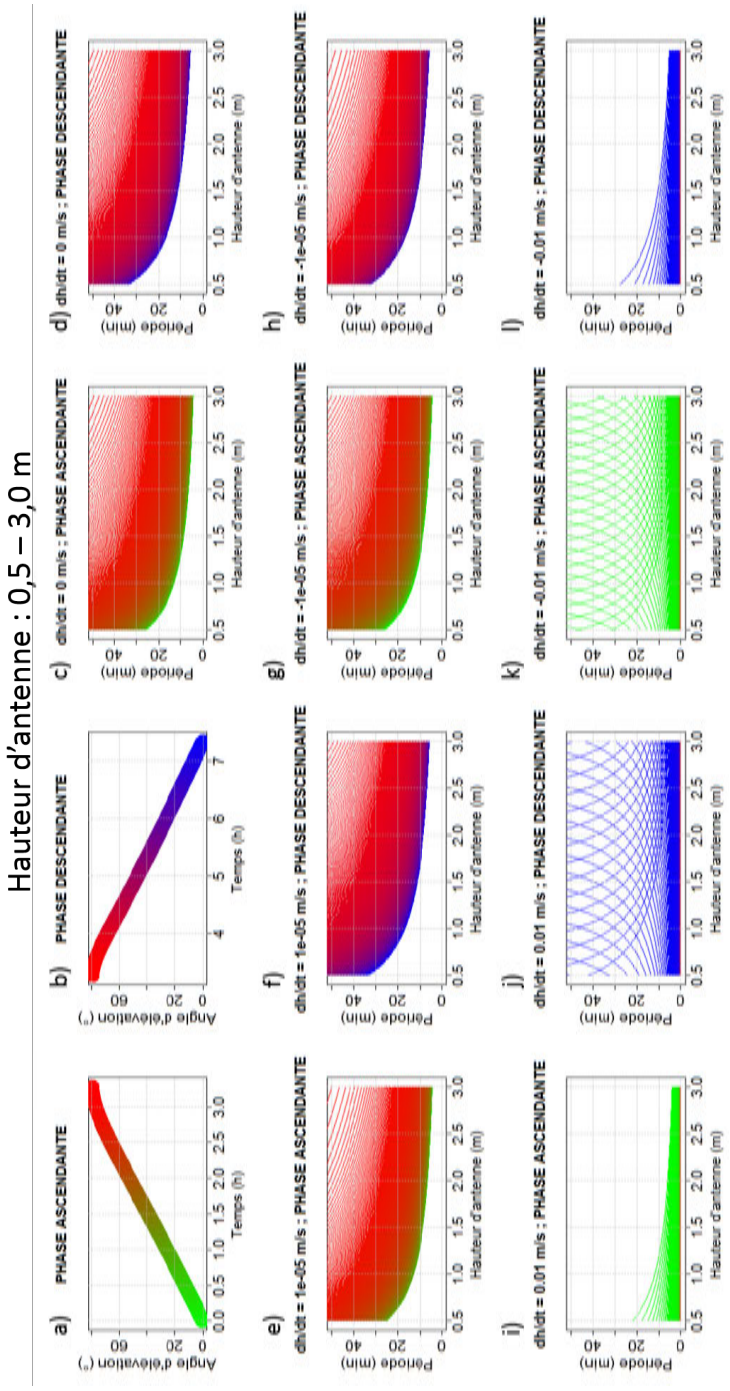


FIGURE D.1 – Période des oscillations du SNR dues au multi-trajet pour une hauteur d'antenne variant entre 0,5 et 3 m.
(a) et (b) : angle d'élévation du satellite en fonction du temps. (c à l) : période des oscillations en différentiant les phases ascendante et descendante, et pour différentes valeurs de vitesse de variation verticale $\frac{dh}{dt}$ de la surface de réflexion. Les couleurs correspondent à celles utilisées en (a) et (b).

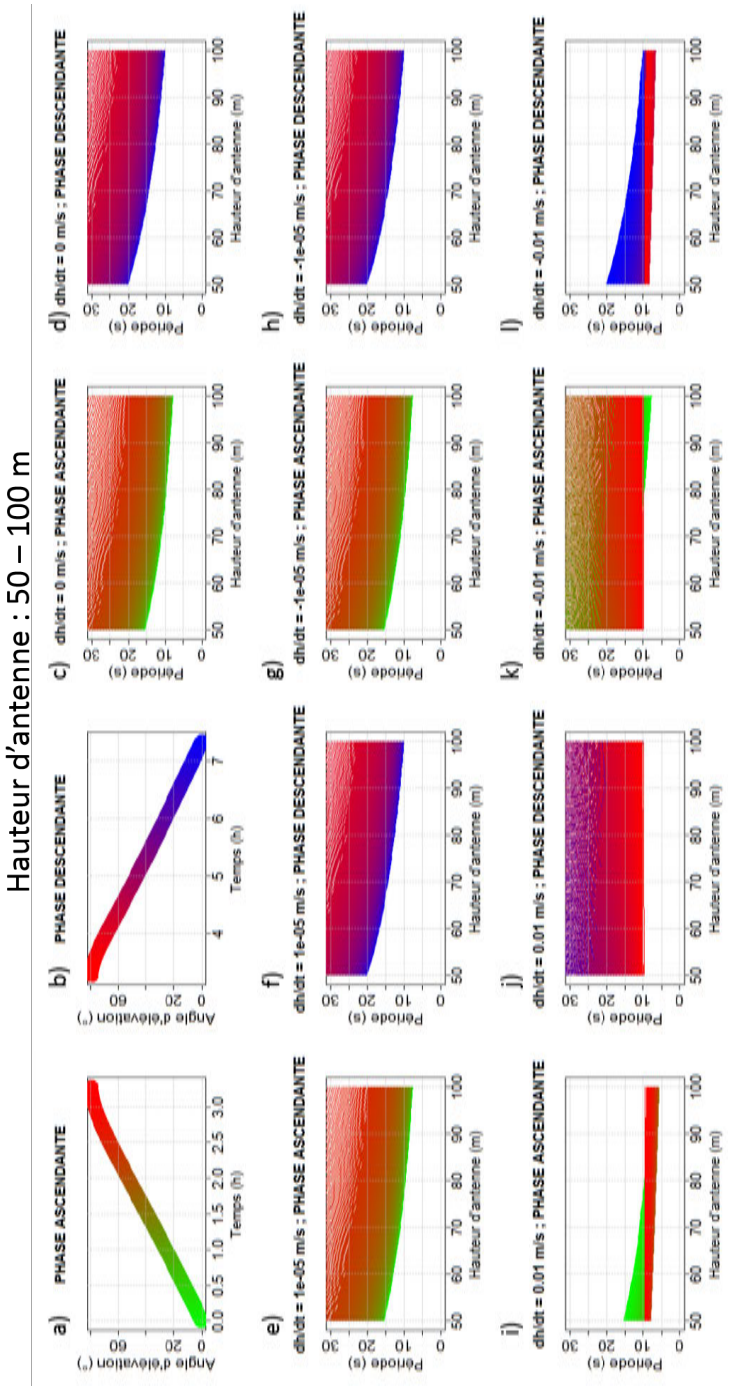


FIGURE D.2 – Période des oscillations du SNR dues au multi-trajet pour une hauteur d'antenne variant entre 50 et 100 m.
(a) et (b) : angle d'élévation du satellite en fonction du temps. (c à l) : période des oscillations en différentiant les phases ascendante et descendante, et pour différentes valeurs de vitesse de variation verticale $\frac{dh}{dt}$ de la surface de réflexion. Les couleurs correspondent à celles utilisées en (a) et (b).

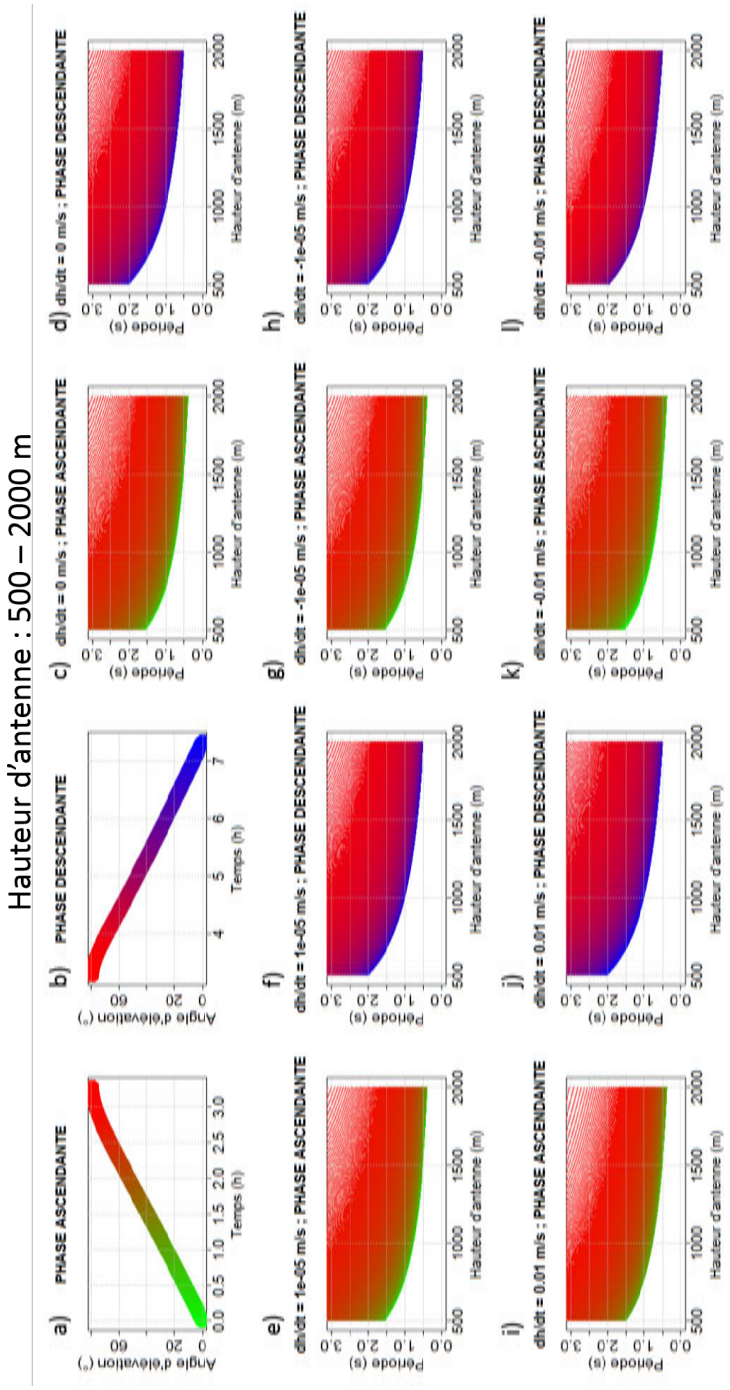


FIGURE D.3 – Période des oscillations du SNR dues au multi-trajet pour une hauteur d'antenne variant entre 500 et 2000 m.
(a) et (b) : angle d'élévation du satellite en fonction du temps. (c à l) : période des oscillations en différentiant les phases ascendante et descendante, et pour différentes valeurs de vitesse de variation verticale $\frac{dh}{dt}$ de la surface de réflexion. Les couleurs correspondent à celles utilisées en (a) et (b).

Annexe E

Participation à une campagne de calibration des altimètres Jason-2 et SARAL

Durant ma thèse, j'ai eu l'opportunité de participer à une campagne de calibration des altimètres Jason-2 et SARAL. Cette campagne de mesure a eu lieu du 14 au 16 septembre 2013 dans la mer Méditerranée (au large d'Ibiza, Espagne) et été composée de deux phases principales : (i) une calibration de 5 bouées GNSS pour estimer les hauteurs d'antenne de chacune d'elles ; (ii) une calibration absolue pour estimer les biais des deux altimètres (i.e., la différence de niveau de la mer mesurée par les altimètres radar et les bouées GNSS). La première phase a été réalisée au port d'Ibiza, à proximité d'un marégraphe classique, et la seconde phase à environ 40 km au Nord-Ouest d'Ibiza, à un point de croisement des traces au sol nominales de Jason-2 et SARAL. Les mesures des 5 bouées ont été traitées en utilisant la technique PPP (*Precise Point Positioning*), puis interpolées le long des traces des deux satellites. Les biais trouvées sont respectivement de (-0.1 ± 0.9) et (-3.1 ± 1.5) cm pour Jason-2 et SARAL.
J'ai pu participer à la fois aux mesures sur le terrain, et aux traitement des données en aval. Cette campagne de mesure a fait l'objet d'un article publié dans *Marine Geodesy* :

Frappart F., **Roussel N.**, Biancale R., Martinez-Benjamin J.J., Mercier F., Pérosanz F., Garate Pasquin J., Martin Davila J., Perez Gomez B., Gracia Gomez C., Lopez Bravo R., Tapia Gomez A., Gili Ripoll J., Hernandez Pajares M., Salazar Lino M., Bonnefond P., Valles Casanova I. : *The 2013 Ibiza Calibration Campaign of Jason-2 and SARAL Altimeters*. Marine Geodesy. doi : 10.1080/01490419.2015.1008711. 2015.

Marine Geodesy, 0:1–14, 2015
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0149-0419 print / 1521-060X online
DOI: 10.1080/01490419.2015.1008711

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

The 2013 Ibiza Calibration Campaign of Jason-2 and SARAL Altimeters

F. FRAPPART,[1,2,3] N. ROUSSEL,[1,3] R. BIANCALE,[1,3,4] J.J. MARTINEZ BENJAMIN,[5] F. MERCIER,[1,3,4] F. PEROSANZ,[1,3,4] J. GARATE PASQUIN,[6] J. MARTIN DAVILA,[6] B. PEREZ GOMEZ,[7] C. GRACIA GOMEZ,[5] R. LOPEZ BRAVO,[5] A. TAPIA GOMEZ,[5] J. GILI RIPOLL,[5] M. HERNANDEZ PAJARES,[5] M. SALAZAR LINO,[8] P. BONNEFOND,[9] AND I. VALLES CASANOVA[5]

[1]GET UMR5563, CNRS/IRD/UPS, OMP, Toulouse, France
[2]LEGOS UMR5566, CNES/CNRS/IRD/UPS, OMP, Toulouse, France
[3]Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, Toulouse, France
[4]CNES, Toulouse, France
[5]Department Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain
[6]Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), San Fernando, Cadiz, Spain
[7]Puertos del Estado (PE), Madrid, Spain
[8]Universidade do Porto, Porto, Portugal
[9]Géoazur, CNRS/IRD/UNS, OCA, Valbonne, France

This study presents the results of the 2013 Ibiza (Western Mediterranean) calibration campaign of Jason-2 and SARAL altimeters. It took place from 14 to 16 September 2013 and comprised two phases: the calibration of the GNSS (Global Navigation Satellite System) buoys to estimate the antenna height of each of them and the absolute calibration to estimate the altimeter bias (i.e., the difference of sea level measured by radar altimetry and GNSS). The first one was achieved in the Ibiza harbor at a close vicinity of the Ibiza tide gauge and the second one was performed at ∼ 40 km at the northwest of Ibiza Island at a crossover point of Jason-2 and SARAL nominal groundtracks. Five buoys were used to delineate the crossover region and their measurements interpolated at the exact location of each overflight. The overflights occurred two consecutive days: 15 and 16 September 2013 for Jason-2 and SARAL, respectively. The GNSS data were processed using precise point positioning technique. The biases found are of (−0.1 ± 0.9) and (−3.1 ± 1.5) cm for Jason-2 and SARAL, respectively.

Keywords satellite altimetry, calibration, GNSS buoys, tide gauge

Received 16 July 2014; Accepted 12 January 2015.
Address correspondence to Frédéric Frappart, Observatoire Midi-Pyrénées, 14 Avenue Edouard Belin, Toulouse, 31400, France. E-mail: frederic.frappart@get.obs-mip.fr.

Introduction

Accurate monitoring of sea-level variations using satellite altimetry requires a precise determination of the error budget of the altimeter measurements. Calibration of the altimetry missions is crucial for estimating sea surface height (SSH) bias and assessing the error balance of the altimetry measurement system. Besides, it is necessary for combining both spatially and temporally sea surface height (SSH) from different altimeters. The absolute calibration of the altimeter missions is used to compare the altimetry-derived SSH with independent measurements and consists in determining the bias between the SSH measured by an altimeter and an external ground truth (e.g., Cancet et al. 2013). Global Positioning System (GPS) receiver on buoys were early used for precise sea level estimates (Rocken et al. 1990) and calibration of Topex/Poseidon altimeter measurements (Born et al. 1994). Local absolute calibrations are performed under the altimeter groundtrack using tide gauge records or GNSS measurements either during a dedicated campaign (e.g., Bonnefond et al. 2003; Martinez Benjamin et al. 2004 in the Mediterranean Sea) or at permanent calibration facilities or Calibration/Validation (Cal/Val) sites in Corsica, Western Mediterranean Sea (e.g., Bonnefond et al. 2013) at Harvest platform, Eastern Pacific Ocean (e.g., Haines et al. 2010) in Gavdos, Eastern Mediterranean Sea (e.g., Mertikas et al. 2010), and Bass Strait, between Australia and Tasmania (e.g., Watson et al. 2011).

An altimetry calibration campaign was achieved in the Mediterranean Sea, close to the Ibiza Island (Baleares) area, September 2013 in the framework of a Spanish/French cooperation. Its goal was to estimate the absolute bias of AltiKa onboard SARAL, the first altimeter to operate in Ka band, through comparisons with GNSS measurements on buoys, and to compare it to Jason-2 absolute bias at a crossover of their respective groundtracks. A similar Spanish/French experiment was already performed for Jason-1 in June 2003 in this geographical area under the name IBIZA 2003 campaign (Martinez-Benjamin et al. 2004).

A direct absolute altimeter calibration estimating the Jason-2 and SARAL biases was performed from direct overflights using GNSS buoys. This method does not require any modeling of geoid and tidal error (Bonnefond et al. 2013; Cancet et al. 2013). The crossover point between Jason-2 and SARAL North of Ibiza (around 40 nm) and West of Mallorca island was found to be optimal for our purposes since it allows measurements at a one-day time-lag and a similar configuration of buoys for each satellite pass (Figure 1). Five buoys were deployed near a Jason-2/SARAL crossover point to determine the sea surface in the along-track and cross-track directions, to estimate by interpolation the SSH at the exact nadir point of the satellite. Here, we present the experimental settings of the campaign and the datasets used in this study, the methods used for comparing altimetry data with GNSS measurements, and the results of the absolute calibration.

Datasets

Altimetry Data

Jason-2. Jason-2 mission was launched on 20 June 2008 as a cooperative effort among CNES, EUMETSAT, NASA and NOAA. Its payload is mostly composed of the Poseidon-3 radar altimeter from CNES, the Advanced Microwave Radiometer (AMR) from JPL/NASA, and a triple system for precise orbit determination: the real-time tracking system DIODE of DORIS instrument from CNES, a GNSS receiver and a Laser Retroflector

Array (LRA) from NASA. Jason-2 orbits at an altitude of 1336 km, with an inclination of 66°, on a 10-day repeat cycle, providing observations of the Earth surface (ocean and land) from 66° latitude North to 66° latitude South. This orbit was formerly used by Topex/Poseidon, Jason-1 and 2, with an equatorial ground-track spacing of about 315 km. Poseidon-3 radar altimeter is a two-frequency solid-state altimeter that measures accurately the distance between the satellite and the surface (range) and provides ionospheric corrections over the ocean. It operates at Ku (13.575 GHz) and C (5.3 GHz) bands. Its accuracy is expected to be about 2 cm over ocean. Raw data are processed by SSALTO (Segment Sol multimissions d'ALTimétrie, d'Orbitographie).

SARAL. SARAL mission was launched on 25 February 2013 as a joint effort of CNES and ISRO. Its payload comprised the AltiKa radar altimeter and bi-frequency radiometer, and a triple system for precise orbit determination: the real-time tracking system DIODE of DORIS instrument, a Laser Retroflector Array (LRA), and the Advanced Research and Global Observation Satellite (ARGOS-3). SARAL orbits at an altitude of 790 km, with an inclination of 98.54°, on a 35-day repeat cycle, providing observations of the Earth surface (ocean and land) from 82.4° latitude North to 82.4° latitude South. This orbit was formerly used by ERS-1 & 2 and ENVISAT, with an equatorial ground-track spacing of about 85 km. AltiKa radar altimeter is a solid-state mono-frequency altimeter that provides accurate range measurements. It is the first altimeter to operate at Ka-band (35.75 GHz). Its accuracy is expected to be about 1 cm over ocean. More details about the AltiKa-SARAL mission can be found in (Verron et al. 2015).

The data used in this study come from the Geophysical Data Records (GDRs) for Jason-2 (GDR D) and SARAL (GDR T patch 2) and are made available by Centre de Topographie de l'Océan et de l'Hydrosphère (CTOH, http://ctoh.legos.obs-mip.fr/). Ranges are available every 20 Hz for Jason-2 and 40 Hz for SARAL. It corresponds to a measurement every 350 and 165 m, respectively, along the track. Range values suitable to derive *SSH* are retracked using MLE4 (Amarouche et al. 2004) and MLE3 (Rodriguez 1988) algorithms, Maximum Likelihood Estimator with 4(3) degrees of freedom, applied to the Brown model (Brown 1977). They are provided in the GDRs for both Jason-2 and SARAL for the first one, and only Jason-2 for the second one. The type of the corrections applied to the altimetry data for comparison with GNSS data is summarized in Table 1. As the environmental corrections affect both altimetry and GNSS data, they were not applied.

GNSS Data

Five GNSS stations were installed on buoys (denominated on Figure 2c GRGS, LEGOS/INSU, IPGP, UPC 1 & 2). They are composed of three receivers TOPCON GB-1000

Table 1
Corrections applied to the altimetry data for each altimetry mission

	Geophysical corrections			
Altimetry mission	ionosphere	dry troposphere	wet troposphere	sea state bias
Jason-2	bi-frequency (C-Ku)	ECMWF-derived	radiometer-derived	empirical models
SARAL	GIM-derived	ECMWF-derived	radiometer-derived	empirical models

with TOPCON PG_A1+GP antennas and two receivers and antennas TOPCON HIPER. All of them were acquiring data at a sample rate of 1 Hz.

Tide Gauge Records

The Spanish Port Authority (Puertos del Estado, http://www.puertos.es) installed the tide gauge station of Ibiza harbor in January 2003. The station is part of the REDMAR network, at this moment comprising 21 stations distributed along the whole Spanish coast. The tide gauge deployed in Ibiza is also part of the European Sea-Level Service (ESEAS) network. The tide gauge station of Ibiza harbor (longitude = 1.44896° E and latitude = 38.91125° N) is a radar sensor installed by the Spanish Port Authority in September 24 2009, providing sea level measurements at a 1 min. time sampling. It was leveled during the IBIZA 2013 campaign. The leveling of the tide gauge consists in determining precisely the orthometric height (N_0) of the gauge zero as:

$$N_0 = H_0 - N \tag{1}$$

where H_0 is the ellipsoidal height of the gauge zero and N the undulation of the geoid at the location of the gauge.

The ellipsoidal height of the gauge zero was estimated using GNSS observations made on 14 September 2013 during 4 hours and converted into orthometric height using the mean value of the sea level in Ibiza or nivel medio del mar en Ibiza (NMMI). H_0 was found to be 0.324 m below the NMMI. NMMI value (N) is 49.166 m with reference to WGS84 ellipsoid (REDMAR 2013). The absolute sea level at the tide gauge ($SSH_{tide\ gauge}$) is finally given by:

$$SSH_{tide\ gauge}(t) = h_{tide\ gauge}(t) + N_0 \tag{2}$$

where $h_{tide\ gauge}$ is the stage value in the gauge record at time t.

Method

Ibiza Calibration Site and Experimental Design

The Spanish/French Jason-2 and SARAL calibration campaign IBIZA 2013 was carried out on 14–16 September 2013 in the area of Ibiza Island in the NW Mediterranean Sea (Figure 1). The experiment was composed of two phases: i) the pre-calibration of the 5 buoys by reference with the Ibiza tide gauge (Figure 2a) to level the GNSS antennas above the sea level, and ii) the absolute calibration of the altimeters at the cross-over point.

The absolute calibration took place on 15 and 16 September 2013 at around 7:38 UTC under the Jason-2 ascending track 187 and around 5:29 UTC under SARAL ascending track 315. The Spanish Navy supported the altimetry satellites calibration survey assigning the Patrol ship Toralla to the campaign (Figure 2b). She is a 133 Tn. ship, 28 m in length and 6.5 ms beam, and suitable for this kind of mission. The GNSS buoys were carried on the patrol boat deck to the calibration area. The crew placed the buoys on the sea, at the estimated observing points around the calculated satellite track two hours before the expected time of overflight. The boat kept sailing out of the survey area about

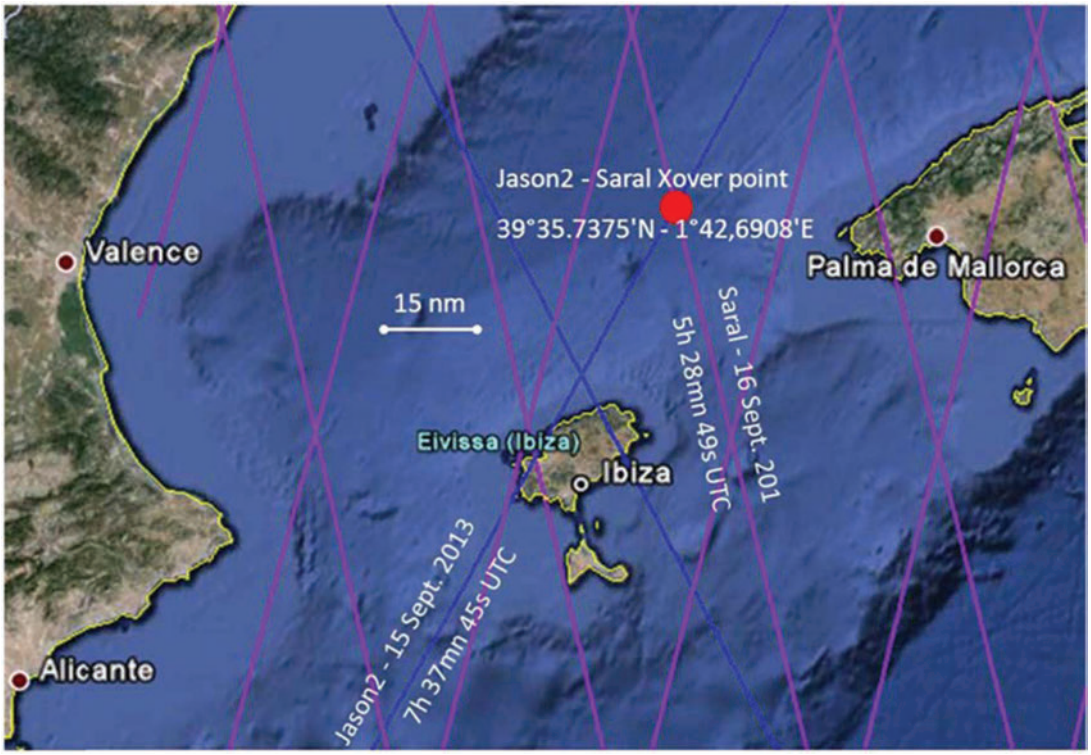


Figure 1. The geographical configuration of IBIZA 2013 absolute calibration campaign. Jason-2 tracks are represented with blue lines and Saral ones with purple lines. The white circle with a black dot represents the location of the Ibiza tide gauge used for calibration of the GNSS buoys the 14 September 2013 and the red one the crossover of Jason-2 track 196 (15 September 2013) with Saral track 274 (16 September 2013) at 40 km northwest of the Ibiza Island.

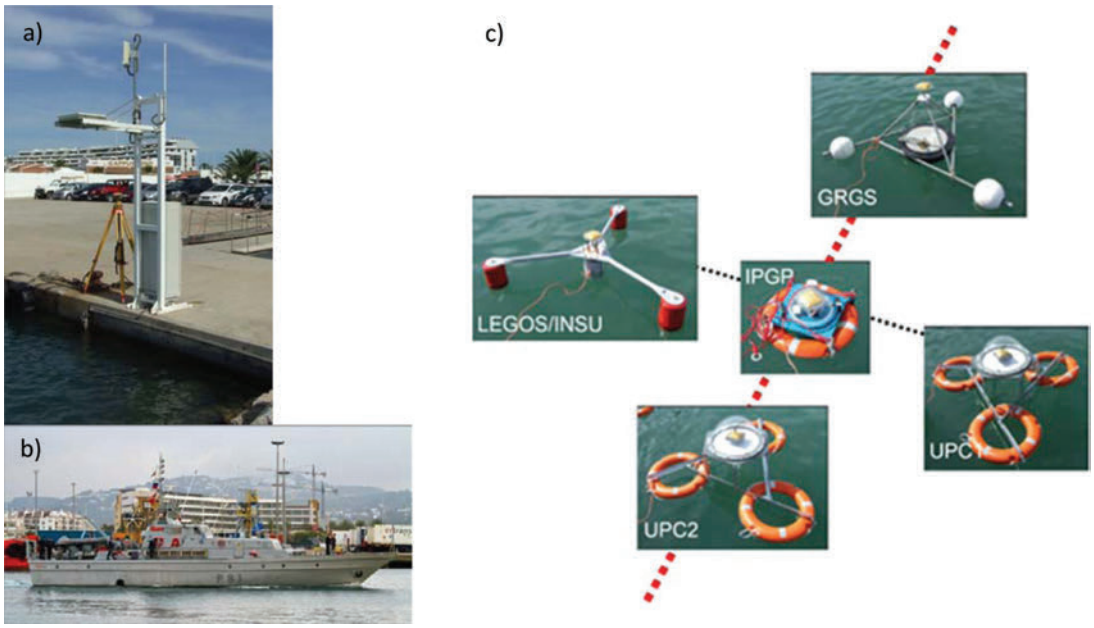


Figure 2. (a) Ibiza tide gauge (Puertos del Estado) with the GNSS used for levelling, (b) the Patrol ship Toralla from Spanish Navy (Armada Española) during the IBIZA 2013 campaign, (c) the instrumental configuration of IBIZA 2013 absolute calibration campaign. The dotted red and black lines represent the along and cross-track directions of the altimeter passes, respectively, along with the location of the buoys.

4 hours, and then she proceeded to remove the buoys from the water. The same operation achieved for the calibration of Jason-2 was repeated the day after for SARAL. The buoys were hence deployed at least 4 hours on site to allow a precise determination of their position using GNSS Precise Point Positioning (PPP) technique. The locations of buoys deployment were estimated from Jason-2 and SARAL orbit predictions obtained from the GINS/GRGS software fitting SLR data from previous days and current and wind predictions from Mercator and Météo-France to predict the drift of the buoys between their deployment and the overflight of the satellite.

Absolute Calibration Technique

An absolute calibration of both Jason-2 and SARAL was achieved. It consists of the determination of the absolute altimeter bias that requires simultaneous measurements of *SSH in situ* and by an altimeter in the same terrestrial reference frame at the exact same location or comparison point. The absolute altimeter bias ($Bias_{altimeter}$) is estimated as follows (Ménard et al. 1994):

$$Bias_{altimeter} = SSH_{altimeter} - SSH_{in\ situ} \tag{3}$$

where $SSH_{altimeter}$ and $SSH_{in\ situ}$ are the SSH estimated from altimeter and *in situ* measurements, respectively, with *SSH* from altimeter given by Chelton et al. (2001):

$$SSH_{altimeter} = h - \left(R + \sum \Delta R_{propogation}\right) \tag{4}$$

where h is the height of the centre of mass of the satellite above the ellipsoid estimated using precise orbit determination (POD) technique, R is the nadir altimeter range from the center of mass of the satellite to the sea surface taking into account instrumental corrections, $\sum \Delta R_{\text{propogation}}$ is the sum of the geophysical correction to apply to the range, respectively.

$$\sum \Delta R_{propogation} = \Delta R_{ion} + \Delta R_{dry} + \Delta R_{wet} + \Delta R_{SSB} \tag{5}$$

Where ΔR_{ion} is the atmospheric refraction range delay due to the free electron content associated with the dielectric properties of the ionosphere, ΔR_{dry} is the atmospheric refraction range delay due to the dry gas component of the troposphere, ΔR_{wet} is the atmospheric refraction range delay due to the water vapor and the cloud liquid water content of the troposphere, and ΔR_{ssb} is the range correction due to the interaction of the electromagnetic pulse emitted by the altimeter with the scatterometers within the footprint. It is known as sea state bias (*SSB*) and is the sum of the electromagnetic (*EM*), skewness, and tracker biases.

Altimetry data processing to obtain the SSH and selection at the cross-over were performed using the Multimission Altimetry Processing Software (MAPS, Frappart et al. 2015). A negative bias indicates that the measure of the *SSH* by the altimeter is too low, either the altimeter range being too long, or the orbit is biased downwards (Bonnefond et al. 2013).

The *SSH* was observed at the comparison point using five *GNSS* buoys located along and cross track (Figure 2c). The *GNSS*-derived *SSH* were either distance-weighting interpolated at the exact location of the of the satellite groundtrack on the sea surface at the

exact time t of the satellite overflight of the buoys or directly compared if one or several buoys are in the groundtrack of the satellite at the exact time t of the satellite overflight.

Calibration of the GNSS Buoys

The calibration is an essential phase that allows to estimate the antenna height over the sea surface and determine the systematic errors and accuracy of the *GNSS*-derived *SSH* measurements (Bonnefond et al. 2003; Martinez Benjamin et al. 2004). It consists in putting into the water the buoys equipped with GNSS receiver and antenna in a close vicinity of the tide gauge for several hours. Antenna heights ($h_{antenna}$) are determined as follows:

$$h_{antenna} = h_{GNSS}(t)_{\,\mathrm{T_0} = 1mn} - SSH_{tide\ gauge}(T)_{T_1 = 4\ \mathrm{h}ours} \tag{6}$$

where h_{GNSS}=$SSH_{in\ situ} + h_{antenna}$ is the elevation estimated from GNSS measurements at time t, T_0 is the sampling time of the tide gauge, $SSH_{tide\ gauge}$ is the absolute sea level at the tide gauge, and T_1 is the observation period close to the tide gauge.

Processing of the GNSS Measurements

As the cross-over point is located more than 50 km from the closest permanent GNSS station on the coast, PPP technique was chosen rather than classical differential GNSS (DGNSS) method to obtain positions with a centimeter-level accuracy. This alternative technique is powerful in such context because it does not require reference stations. Fund et al. (2013) has already demonstrate the potentiality of PPP for processing GNSS observations of sea level from buoys Nevertheless, precise GNSS satellite orbit and clock solutions given in a well-defined reference frame are needed. We used precise products from the International GNSS Service (Dow et al. 2009) and from JPL/NASA. However, compared with the DGNSS technique, PPP requires longer convergence times (typically 2 hours) estimating additional parameters (troposphere and clocks offsets), using dual-frequency receivers, and more refined observation (e.g., antenna phase center offsets and variations, phase wind-up) and earth deformation (e.g., solid earth tide, ocean loading) models (Laurichesse et al. 2008, 2009). The attitude angle of the buoy is not taken into account in the phase windup model. This error affects all observations, so it only impacts receiver clock estimates but not position solutions. Besides, the accurate solution is mainly based on carrier phase data (in order to avoid any doubt, or deeper discussions, regarding the pseudoranges which are not affected by the missing wind-up term).

The GNSS data from the pre- (14 September 2013) and post-calibration (16 September 2013) and from the absolute calibrations of Jason-2 (15 September 2013) and SARAL (16 September 2013) were processed using:

- the Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées (GINS) software from the French Space Agency (Centre National d'Etudes Spatiales–CNES), available upon request from http://grgs.obs-mip.fr/en/research/software;
- the GPS Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software (GIPSY-OASIS) from Jet Propulsion Laboratory (JPL), available upon request from https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov; and
- the Canadian Spatial Reference System–Precise Point Positioning (CSRS-PPP, http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php) which is an online

Table 2
Characteristics of the PPP processing for GINS and GIPSY softwares, and CSRS-PPP online service

PPP Softwares	GINS (Marty 2013)	GIPSY (Zumberge et al. 1997)	CSRS-PPP (CSRS-PPP 2013)
Models			
Orbit products	GRG-IGS	flinnR-JPL	IGS
Observation frequency	L3 (Ionospheric-Free)	L3 (Ionospheric-Free)	L3 (Ionospheric-Free)
Zenithal hydrostatic delay	ECMWF	ECMWF	GPT
Mapping functions	Global Mapping Functions	Niell Mapping Function	Global Mapping Functions
Parameters			
Data sampling	1 Hz	1 Hz	1 Hz
Buoy position and clock	1 per epoch / no constraint	1 per epoch / no constraint	1 per epoch / no constraint
Zenithal wet delay	Every 2 hours+ linear interp.	Every second with a random-walk process and the recommended value for slowly moving objects: 5E-8 km/sqrt(sec) ~ 3 mm/hr, zenith tropospheric delay and its horizontal gradients	Every second with a random-walk process and the recommended value for slowly moving objects: 5E-8 km/sqrt(sec) ~ 3 mm/hr, zenith tropospheric delay and its horizontal gradients
Phase ambiguities	1 / pass (real solution)	Undifferenced amb. Fixing (Bertiguer et al. 2010)	1 / pass (real solution)
Data weighting	Range: 50cm / Phase: 5mm	Range: 100cm / Phase 1cm	Range:200cm/Phase 1.5cm
Cut off angle	10 degrees	7 degrees	10 degrees

application from the Natural Resources Canada's (NRC) Geodetic Survey Division (GSD) that allows the computation of higher accuracy positions of raw GNSS data in Rinex format.

The main characteristics of the PPP processing, which allows a centimeter error level GNSS zero-differenced positioning, are summarized in Table 2.

Post-processing of GNSS Measurements

The GNSS measurements from the five buoys are first smoothed using a 5 min. averaging window and then interpolated at the exact location and time of the altimeter pass, taking into account the elevation of the antenna for each buoy obtained during the pre-calibration phase achieved in the Ibiza harbor. The corresponding sea level is then compared to the altimetry measurement to determine the absolute bias for each the altimeter following (e.g., Ménard et al. 1994; Martinez Benjamin et al. 2004; Bonnefond et al. 2013; Cancet et al. 2013).

Results

Determination of Antenna Height Above Sea Level

The buoys equipped with GNSS receiver and antenna were put into the water in a close vicinity of the Ibiza tide gauge for several hours on 14 September 2013 from 9h45 to 13h45 UTC for three of them (GRS, LEGOS/INSU, and IPGP) and on 16 September 2013 from 14h to 18h UTC for the remaining two (UPC1 and UPC2). Precise positions of the centre of phase of the antenna with a temporal resolution of 1 second were obtained computing kinematic double-difference solutions of the GNSS buoys with a static GNSS receiver TOPCON GB-1000 with a TOPCON PG_A1+GP antenna located a few meters away from the buoys in the Ibiza harbor (Figure 2a). They were averaged on a 1-minute window for comparison with the records from the Ibiza tide-gauge. The antenna height for each buoy were estimated as the mean difference between the altitude of the center of phase of the antenna and the sea level measured by the tide gauge over the common observation period. We finally obtained the following antenna height above sea level for each buoy: (0.765 ± 0.007) m, (0.349 ± 0.005) m, (0.163 ± 0.013) m, (0.409 ± 0.004) m, (0.402 ± 0.003) m for GRGS, LEGOS, IPGP, UPC1, and UPC2, respectively.

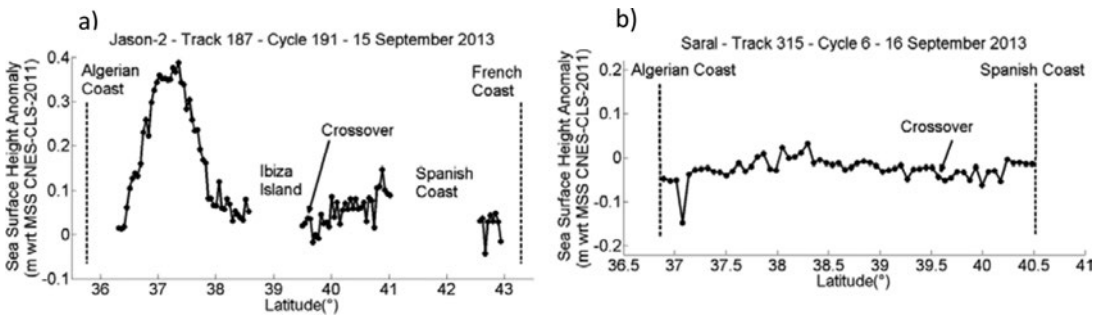


Figure 3. Differences between the altimetry-derived SSH and the MSS (CNES-CLS-2011) along Jason-2 track 187 (cycle 191–15 September 2013) (a) and SARAL track 315 (cycle 6–16 September 2013) (b).

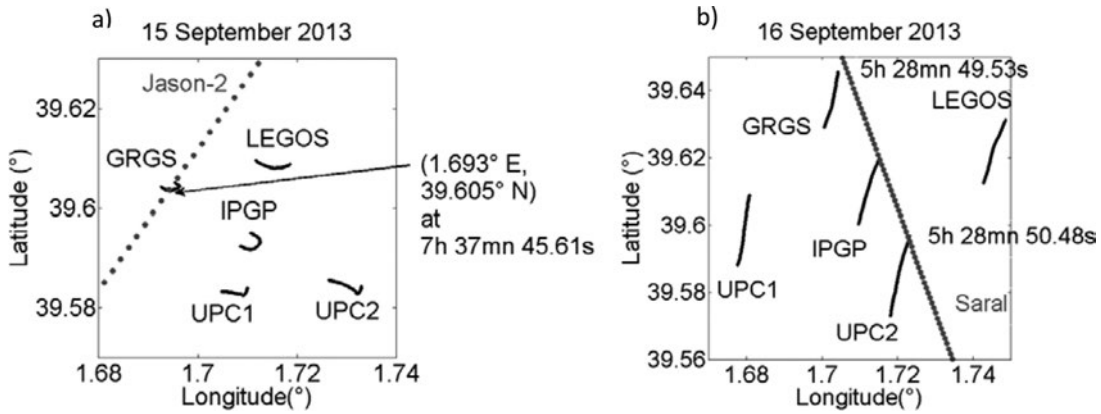


Figure 4. Location of the altimeters track (each grey point corresponding to a *SSH* measurement) and of the buoy drifts on 15 September 2013 along Jason-2 track 187 (a) and on 16 September 2013 along SARAL track 315 (b).

Uncertainties on antenna height are generally lower than 0.7 cm. Larger uncertainty is found for IPGP buoy with a standard deviation (std) of 1.3 cm. This is consistent with the larger sensitivity of this buoy to sea state (i.e., swell and waves).

Validation of Altimeter-based SSH

The along-track altimetry-derived SSH were compared to the mean sea surface (MSS) over the whole portion of the Mediterranean Sea overflown by each altimeter. Here we used the CNES-CLS-2011 MSS. Results are presented for both altimeters in Figure 3.

The differences are generally lower than 0.1 to 0.2 m (especially for SARAL), except close to the Algerian coast for Jason-2 where it reaches 0.4 m, likely due to a typical intense anticyclonic gyre in the area of the Algerian Basin. They remain lower than 0.5 m as expected for the Mediterranean Sea (see, e.g., Cancet et al. 2013) and are less than 0.1 m around the crossover point. SSH from both altimeters do not present any obvious outlier in the vicinity of the crossover point.

Altimeter Calibration

Jason-2 overflew the GRGS buoy on 15 September 2013 at 7h 37 mn and 45.61 s UTC at 1.639° E and 39.605° N (Figure 4a) whereas SARAL overflew the crossover zone on 16 September 2013 at 5h 28 mn between 49.53 and 50.48 s UTC at from 1.7261° E and

Table 3
Absolute bias estimates for Jason-2 and SARAL using PPP technique with GINS, GIPSY and CSRS-PPP

	Absolute bias = $SSH_{altimeter}$ - SSH_{GNSS}(m)		
Altimeter (Retracking)	GINS	GIPSY-OASIS	CSRS-PPP
Jason-2 (MLE4)	0.008	−0.009	−0.002
Jason-2 (MLE3)	−0.008	−0.025	−0.018
SARAL (MLE4)	(−0.018 ± 0.023)	(−0.047 ± 0.025)	(−0.029 ± 0.022)

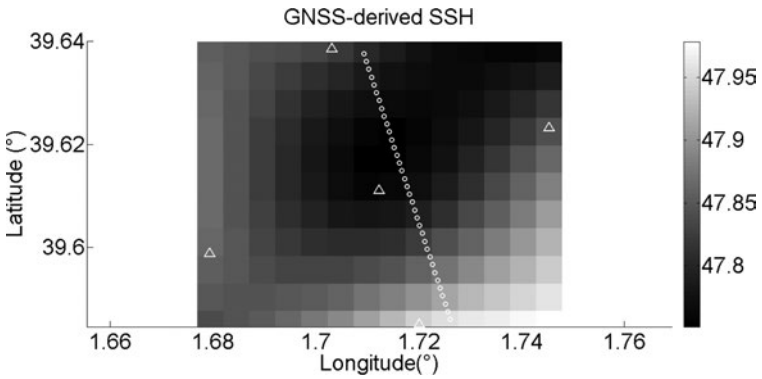


Figure 5. *SSH* (m) derived from the measurements of the GNSS buoys (white triangles). The SARAL altimetery measurements are represented by white dots.

39.5860° N to 1.7093° E and 39.6376° N (Figure 4b). The trajectories of the buoys differ significantly from one day to the other due to changes in the directions of both the oceanic currents and the winds. The *SSH* from Jason-2 was directly compared to the smoothed value, using a 5-minute moving average, of *SSH* from the GRGS buoy. The *SSH* from SARAL was compared along the transect to the smoothed using a 5-minute moving average window *SSH* interpolated from GRGS, LEGOS IPGP, UPC1, and UPC2 data. The results are presented in Table 3.

The bias on the *SSH* for Jason-2 for one comparison point vary from -0.9 to 0.8 cm for altimeter ranges processed using the MLE4 retracker and from -1.8 to -0.8 cm with MLE3, depending on the type of GNSS processing (Table 4). GINS, GIPSY-OASIS, and CSRS-PPP processings provide similar estimates. These results are in good agreement with Jason-2 absolute bias value of from OSTST (2013).

For SARAL, *SSH* presents a standard deviation (std) of 3.6 cm over an along-track distance of 5.7 km. The GNSS-based *SSH* was interpolated under the altimeter track using GRGS, LEGOS, IPGP, UPC1 and UPC2 GNSS buoy measurements at the exact time of the overflight (Figure 5). The absolute bias of SARAL was estimated along the transect using 35 altimeter measurements. Very consistent values of biases were obtained using different PPP processing. Values of (-1.8 ± 2.3), (-4.7 ± 2.5), and (-2.9 ± 2.2) cm along the transect were obtained using GINS, GIPSY-OASIS, and CSRS-PPP, respectively.

Conclusion

The 2013 Ibiza calibration campaign allowed to estimate the absolute biases of the AltiKa sensor onboard SARAL, that is, the first altimeter to function in Ka band, and Jason-2 at a crossover point during two consecutive days over the open ocean. The major originalities of this campaign are the use of several GNSS buoys to eventually estimate the bias in different locations along the track during the altimetry overflight, the use of the *PPP* technique for processing the GNSS measurements, and to compare the results obtained with three different software programs. Similar bias estimates were obtained using the three *PPP* GNSS processing software for both altimeters: (-0.1 ± 0.9) and (-3.1 ± 1.5) cm for Jason-2 and SARAL, respectively. The first one is in good agreement with the Jason-2 bias value from OSTST (2013). Since Jason-2 reprocessing (GDR-D products) instrumental errors discovered by the project ($\sim$ 15.6 cm on the range, see Bonnefond et al. 2012 for details) have been applied leading to remove the SSH bias that is now close to 0 as

assessed by OSTST (2013). Concerning the SARAL/AltiKa SSH bias, the origin is not currently known but other studies found similar values (−5 cm) either from *in situ* (Babu et al. 2015; Bonnefond et al. 2015; Mertikas et al. 2015) or global comparisons with Jason-2 (Philipps et al. 2015; Desai and Haines 2015).

Acknowledgements

We acknowledge the Spanish Navy (Armada Española) for its support and particularly T. N. Paredes, Commanding Officer of the Toralla patrol ship, and his crew, for the excellent job made during the survey. We thank the Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) for its support. We also thank the CTOH/LEGOS-OMP, France, for providing the altimetry dataset used in this study.

Funding

This study was funded under the Spanish National R+D+i program (ref: CGL2009–13435/CLI). This study takes part of the OSTST (CNES-NASA-NOAA-EUMETSAT) project “From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring” (FOAM, PI P. Bonnefond).

References

Amarouche, L., P. Thibaut, O. Zanife, J.-P. Dumont, P. Vincent, and N. Steunou. 2004. Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects. *Marine Geodesy* 27 (1–2):171–197.

Babu, K. N., A. K. Shukla, A. B. Suchandra, S. V. V. Arun, P. Bonnefond, L. Testut, and P. Mehra. 2015. Absolute calibration of SARAL-AltiKa in Kavaratti during its initial calibration-validation phase. *Marine Geodesy* 38(S1):.

Bertiger, W., S. D. Desai, B. Haines, N. Harvey, A. W. Moore, S. Owen, & J. P. Weiss. 2010. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *Journal of Geodesy* 84(5):327–337.

Bonnefond, P., P. Exertier, O. Laurain, O., Y. Menard, A. Orsoni, E. Jeansou, B. J. Haines, D. G. Kubitschek, and G. Born. 2003. Leveling sea surface using a GPS-catamaran. *Marine Geodesy* 26(3–4):319–334.

Bonnefond, P., J.-D. Desjonqueres, B. Haines, S. Mertikas, and C. Watson. 2012. Absolute calibration of the TOPEX/POSEIDON and Jason measurement systems: Twenty years of monitoring from dedicated sites. *20 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium Proceedings, ESA SP-710*, Venice.

Bonnefond, P., P. Exertier, O. Laurain, P. Thibaut, and F. Mercier. 2013. GPS-based sea level measurements to help the characterization of land contamination in coastal areas. *Advances in Space Research* 51(8):1383–1399.

Bonnefond, P., O. Laurain, P. Exertier, A. Guillot, N. Picot, M. Cancet, and F. Lyard. 2015. SARAL/AltiKa absolute calibration from the multi-mission Corsica facilities. *Marine Geodesy* 38(S1):.

Born, G. H., M. E. Parke, P. Axelrad, K. L. Gold, J. Johnson, K. W. Key, D. G. Kubitschek, and E. J. Christensen. 1994. Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy. *Journal of Geophysical Research* 99(C12):24517–24526,

Brown, G. 1977. The average impulse response of a rough surface and its applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 25(1):67–74.

Cancet, M., S. Bijac, J. Chimot, P. Bonnefond, E. Jeansou, O. Laurain, F. Lyard, E. Bronner, and P. Féménias. 2013. Regional in situ validation of satellite altimeters: Calibration and cross-calibration results at the Corsican sites. *Advances in Space Research* 51(8):1400–1417.

Chelton, D. B., J. C. Ries, B. J. Haines, L. -L. Fu, and P. S. Callahan. 2001. Satellite altimetry. In *Satellite Altimetry and the Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*. Fu, L. -L. and A. Cazenave (eds.), San Diego: Academic Press, 1–131.

CSRS-PPP 2013. Canadian spatial reference system (CSRS) precise point positioning (PPP) service. Available at http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php. Last accessed 1 July 2014.

Desai, S. and B. Haines. 2015. Cross calibration of the SARAL and OSTM near real time sea surface height measurements. *Marine Geodesy* 38(S1):.

Dow, J. M., R. E. Neilan, and C. Rizos. 2009. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems. *Journal of Geodesy* 83:191–198.

Frappart, F., F. Papa, V. Marieu, Y. Malbéteau, F. Jordy, S. Calmant, F. Durand, S. Bala. 2015. Preliminary assessment of SARAL/AltiKa observations over the Ganges-Brahmaputra and Irrawaddy Rivers. *Marine Geodesy* 38(S1):.

Fund, F., F. Perosanz, L. Testut, and S. Loyer. 2013. An integer precise point positioning technique for sea surface observations using a GPS buoy. *Advances in Space Research* 51(8):1311–1322.

Haines, B. J., S. D. Desai, and G. H. Börn. 2010. The Harvest experiment of the climate data record from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and the ocean surface topography mission. *Marine Geodesy* 33(S1):91–113.

Laurichesse, D., F. Mercier, J. P. Berthias, and J. Bijac. 2008. Real time zero-difference ambiguities blocking and absolute RTK. *ION NTM 2008*, San Diego.

Laurichesse, D., F. Mercier, J. -P. Berthias, J. -P., P. Broca, and L. Cerri. 2009. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation* 56(2):135–149.

Loyer, S., F. Perosanz, F. Mercier, H. Capdeville, and J. -C. Marty. 2012. Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center. *Journal of Geodesy* 86(11): 991–1003.

Martinez-Benjamin, J. J., M. Martinez-Garcia, S. Gonzalez Lopez, A. Nuñez Andres, F. Buill Pozuelo, M. Espino Infantes, J. Lopez-Marco, J. Martin Davila, J. Garate Pasquin, C. Garcia Silva, P. Bonnefond, O. Laurain, M. Baron Isanta, M.A. Ortiz Castellon, J. Talaya Lopez, B. Perez Gomez, E. Alvarez Fanjul, G. Rodriguez Velasco, D. Gomis, M. Marcos, Y. Menard, G. Jan, E. Jeansou, F. Lyard, and L. Roblou. 2004. Ibiza absolute calibration experiment: Survey and preliminary results. *Marine Geodesy* 27(3–4):657–681.

Marty, J. C. (eds.). 2013. Algorithmic documentation of the Gins software. Available at grgs.obs-mip.fr/content/download/1460/9226/file/GINS_Algo_2013.pdf. Last accessed 1 July 2014.

Ménard, Y., E. Jeansou, and P. Vincent. 1994. Calibration of the TOPEX/Poseidon altimeters at Lampedusa: Additional results at Harvest. *Journal of Geophysical Research* 99(C12):24487–24504.

Mertikas, S. P., R. T. Ioannides, I. N. Tziavos, G. S. Vergos, W. Hausleitner, X. Frantzis, A. Tripolitsiotis, P. Partsinevelos, and D. Andrikopoulos. 2010. Statistical models and latest results in the determination of the absolute bias for the radar altimeters of Jason satellites using the Gavdos facility. *Marine Geodesy* 33(1):114–149.

Mertikas, S. P., A. Daskalakis, I. N. Tziavos, G. Vergos, and V. Zervakis. 2015. First results for the calibration values of SARAL/AltiKa using the Gavdos permanent facilities. *Marine Geodesy* 38(S1):.

OSTST. 2013. Report of the ocean surface topography science team meeting. Willis, J. and P. Bonnefond (eds.). Available at http://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/OSTST/2013/oral/OSTST_2013_Meeting_Report.pdf. Last accessed 1 July 2014.

Philipps, S., P. Prandi, V. Pignot, and N. Picot. 2015. SARAL/AltiKa global statistical assessment and cross-calibration with Jason-2. *Marine Geodesy* 38(S1):.

REDMAR. 2013. *Red de maréografos de Puertos del Estado (Informe anual 2013)*, Area de Medio Físico. Madrid: Puertos del Estado.

Rocken, C., T. M. Kelecy, G. H. Born, L. E. Young, G. H. Purcell, and S. K. Wolf. 1990. Measuring precise sea level from a buoy using the global positioning system. *Geophysical Research Letters* 1712:2145–2148.

Rodriguez, E. 1988. Altimetry for non-Gaussian oceans: Height biases and estimation of parameters. *Journal of Geophysical Research* 93(C11):14107–14120.

Verron, J., P. Sengenes, J. Lambin, J. Noubel, N. Steunou, A. Guillot, N. Picot, S. Coutin-Faye, R. Gairola, D. V. A. Raghava Murthy, J. Richman, D. Griffin, A. Pascual, F. Rémy, and P. K. Gupta. 2015. The SARAL/AltiKa altimetry satellite mission. *Marine Geodesy* 38(S1):.

Watson C. S., N. C. White, J. A. Church, R. J. Burgette, P. Tregoning, and R. Coleman. 2011. Absolute calibration in Bass Strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2. *Marine Geodesy* 34(3–4):242–260.

Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F.H. Webb. 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research* 102(B3):5005–5017.

Annexe F

Activités d'enseignements et d'encadrement réalisées durant ma thèse

J'ai eu l'opportunité de réaliser un certain nombre d'activités d'enseignement et d'encadrement en parallèle de ma thèse. Cette annexe récapitule l'ensemble de ces expériences.

F.1 Enseignements dans le supérieur

Durant mes 3 ans de doctorat, j'ai bénéficié d'une première expérience professionnelle d'enseignant-chercheur dans le cadre du MIES (Monitorat d'Initiation à l'Enseignement Supérieur), et j'ai donc été amené à dispenser les enseignements suivants :

2014/2015 : 76 h

- **COURS MAGISTRAUX**
  - **Cartographie, Géodésie, SIG** : 4 h, Master 1. *Université Paul Sabatier, Toulouse.*
- **TERRAIN**
  - **Visite de chantier** : 6 h, Master 2. *Université Paul Sabatier, Toulouse.*
- **TRAVAUX PRATIQUES / TRAVAUX DIRIGÉS**
  - **Traitement d'image, SIG, cartographie** : 16 h, Master 1. *Université Paul Sabatier, Toulouse.*
  - **SIG** : 18 h, Licence 3. *Université Paul Sabatier, Toulouse.*
  - **SIG, Télédétection** : 32 h, Licence 3. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*

2013/2014 : 81 h

- **COURS MAGISTRAUX**
  - **Systèmes de positionnement GNSS** : 2 h, Master 1. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*
- **TERRAIN**
  - **Tachéométrie/théodolite, GPS, nivellement** : 6 h, Master 1. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*
  - **Géologie de terrain** : 6 h, Licence 3. *Université Paul Sabatier, Toulouse.*
- **TRAVAUX PRATIQUES / TRAVAUX DIRIGÉS**
  - **SIG, Télédétection** : 10 h, Master 1. *Université Paul Sabatier, Toulouse.*
  - **SIG** : 16 h, Licence 3. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*
  - **SIG** : 41 h, Licence 3. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*

2012/2013 : 82 h

- **TERRAIN**
  - **Géomorphologie appliquée à la construction** : 24 h, Master 1. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*
- **TRAVAUX PRATIQUES / TRAVAUX DIRIGÉS**
  - **SIG, Télédétection** : 12 h, Master 1. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*
  - **SIG** : 30 h, Licence 3. *Université Paul Sabatier, Toulouse.*
  - **SIG et Modèles Numériques de Terrain** : 16 h, Licence 3. *Université Paul Sabatier / École d'ingénieur UPSSITECH, Toulouse.*

F.2 Encadrement de stagiaires

Durant mes 3 ans passés à l'Observatoire Midi-Pyrénées, un certain nombre de stagiaires est venu compléter l'équipe de géodésie spatiale dans laquelle je travaillais. J'ai pu participer à l'encadrement de cinq d'entre eux.

2014/2015 : 2 stagiaires

- 1 mois - G. Cornu et K. Koummarasy, *Master 1 de l'Université Paul Sabatier, Toulouse*
  "Evaluation de la précision de la réflectométrie GNSS dans l'estuaire de la Gironde".

2013/2014 : 3 stagiaires

- 2 mois - S. Fau et F. Gonzales, *Master 1 de l'Université Paul Sabatier, Toulouse*
  "Evaluation de la précision des mesures satellitaires pour le suivi des marées".
- 6 mois - A. Gay, *Master 2 de l'école d'ingénieur ENSEEIHT, Toulouse*
  "Modélisation des signaux GNSS réfléchis à la surface de la Terre et application au traitement du signal pour la réflectométrie GNSS (GNSS-R)".

F.3 Activités de vulgarisation

$2^{ème}$ Congrès TPE Espace & Sciences à la Cité de l'Espace de Toulouse

J'ai participé à l'organisation du $2^{ème}$ **Congrès TPE Espace & Sciences** à la Cité de l'Espace de Toulouse durant l'année scolaire 2013/2014. Il s'agissait principalement de participer à l'encadrement des Travaux Personnels Encadrés (TPE) d'une classe de $1^{ère}$ Scientifique du lycée de Gourdon, France. Ces TPE, réalisés sur le thème "Espace & Sciences", ont fait l'objet d'une présentation des élèves à la Cité de l'Espace, au cours d'un Congrès organisé pour l'évènement.
Un article de la Dépêche locale est disponible sur le lien suivant : http://www.ladepeche.fr/article/2014/01/29/1805187-gourdon-des-ingenieurs-a-la-cite-scolaire.html

$4^{ème}$ Congrès scientifique des enfants à la Cité de l'Espace

La Cité de l'Espace de Toulouse organise chaque année un **Congrès Scientifique des Enfants** qui s'adresse aux classes de CM1 et CM2 toulousaines. Il s'agit pour ces classes de préparer un certain nombre de posters et de présentations orales que les enfants présentent officiellement au cours d'un Congrès à la Cité de l'Espace. J'ai eu l'opportunité de participer à la $4^{ème}$ édition de cet événement, durant l'année scolaire 2012/2013. Le thème était "Hommes et Femmes dans l'Espace", et j'ai ainsi aidé une classe de CM1/CM2 à confectionner 2 posters et 2 préparations orales. Une présentation et une interview faites par le journal *VousNousIls* sont disponibles sur les liens suivantes :
http://www.vousnousils.fr/2013/06/16/
http://www.vousnousils.fr/2013/04/08/

Nomenclature

α	Facteur d'atténuation ($0 \leq \alpha \leq 1$) du signal réfléchi par rapport au signal direct.
$\bar{\theta_i}$	Angle d'incidence de l'onde (angle par rapport à la normale à la surface de réflexion).
$\bar{\theta_r}$	Angle de réflexion de l'onde (angle par rapport à la normale à la surface de réflexion).
$\bar{A}$	Amplitude moyenne.
β	Amplitude du signal reçu (direct + réfléchi) par l'antenne.
$\Delta\delta^s_{AB}$	Distance supplémentaire parcourue par l'onde GNSS émise par le satellite s et réfléchie sur la surface de la Terre.
$\Delta\tilde{f}_{max}$	Variation maximale de $\tilde{f}$.
$\Delta\phi$	Partie décimale de la phase ϕ.
$\delta\phi$	Différence de phase entre le signal direct et le signal composite (direct + réfléchi).
$\Delta\phi_r$	Déphasage du signal réfléchi dû à l'allongement du trajet.
$\Delta\psi^s_{AB}$	Déphasage entre le signal direct et le signal réfléchi.
$\Delta\tau_{AB}$	Biais d'horloge entre les deux récepteurs A et B.
ΔI^s_{AB}	Terme différentiel (entre l'onde directe et réfléchie) du rallongement de trajet dû à la traversée de la ionosphère.
ΔN^s_{AB}	Différence des ambiguïtés entières entre les deux récepteurs A et B.
Δt	Intervalle temporel entre chaque estimation de h.
δt	Taille de la fenêtre glissante utilisée pour déterminer h à partir de la série temporelle de $\tilde{f}$.
Δt^s_i	Temps de propagation de l'onde électromagnétique GNSS entre le satellite s et le récepteur i.
ΔZ^s_{AB}	Terme différentiel (entre l'onde directe et réfléchie) du rallongement de trajet dû à la traversée de la troposphère.
δ	Différence de trajet (en m) entre l'onde directe et l'onde réfléchie.

$\Delta(sin(\theta))$ Taille de la fenêtre glissante utilisée pour déterminer $\tilde{f}$ à partir de la série temporelle SNR_m.

$\Delta\rho_{spec}$ Différence de trajet entre le rayon réfléchi au point de coordonnées (x,y) et le rayon réfléchi au point de réflexion spéculaire nominal.

$\Delta\tau_{spec}$ Retard (*délai*) entre la réception du rayon réfléchi au point de coordonnées (x,y) et du rayon réfléchi au point de réflexion spéculaire nominal.

ϵ Constante diélectrique (permittivité) caractérisant la surface réfléchissante.

ϵ_L Erreurs résiduelles sur la mesure de phase.

ϵ_r Permittivité relative de la surface réfléchissante.

ϵ_{PSD} Erreurs résiduelles sur la pseudo-distance PSD (effets relativistes, multi-trajets,...).

Γ_H Coefficient de Fresnel pour la composante horizontale.

Γ_V Coefficient de Fresnel pour la composante verticale.

Γ_{eff} Coefficient de réflexion *effectif*.

Γ_{LHCP} Coefficient de Fresnel pour la composante cross-polarisée (LHCP).

Γ_{RHCP} Coefficient de Fresnel pour la composante co-polarisée (RHCP).

λ Longueur d'onde (en m).

λ_e Latitude géodésique dans l'ellipsoïde local.

λ_W Latitude géodésique dans le système WGS84.

ω Pulsation.

$\dot{\theta}$ Vitesse de variation de l'angle d'élévation du satellite (en m/s).

$\dot{h}$ Vitesse de variation de la hauteur h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion.

$\dot{h}_{max}$ Vitesse de variation verticale maximale que la surface réfléchissante est susceptible d'observer durant la période d'observation.

$\tilde{f}$ Fréquence des oscillations de SNR_m par rapport au sinus de l'angle d'élévation du satellite.

$\tilde{f}_{max}$ Valeur maximale de $\tilde{f}$ que l'on est susceptible d'observer.

$\tilde{f}_{min}$ Valeur minimale de $\tilde{f}$ que l'on est susceptible d'observer.

ϕ Phase.

ϕ_c Phase du signal composite (= direct + réfléchi).

ϕ_d Phase de la porteuse de l'onde directe.

ϕ_e Longitude géodésique dans l'ellipsoïde local.

ϕ_m Phase de SNR_m.

ϕ_W Longitude géodésique dans le système WGS84.

ϕ_x et ϕ_y Phases des composantes suivant les axes $\vec{x}$ et $\vec{y}$.

ψ Déphasage du signal réfléchi par rapport au signal direct.

ψ_r Contribution du multi-trajet sur la phase du signal total reçu (direct + réfléchi) par l'antenne.

ρ_i^s Distance géométrique entre le satellite s et le récepteur i.

ρ_{LHCP} Amplitude du coefficient de réflexion LHCP.

ρ_{RHCP} Amplitude du coefficient de réflexion RHCP.

σ Conductivité de la surface réfléchissante (en S/m).

σ_{rms} Rugosité RMS de la surface de réflexion.

τ Décalage temporel du signal reçu avec la réplique générée par le récepteur.

$\tau(x,y)$ Temps de trajet de l'onde GNSS se réfléchissant sur le point de coordonnées (x,y).

τ_{spec} Temps de trajet de l'onde GNSS se réfléchissant au point de réflexion spéculaire nominal.

θ Angle d'élévation du satellite (angle par rapport à l'horizontale).

$\vec{B}$ Vecteur du champ magnétique.

$\vec{D}_i^s$ Distance séparant le récepteur i du satellite s.

$\vec{E}$ Vecteur du champ électrique.

a^* Réplique du code C/A générée par le récepteur.

A_c Amplitude du phaseur (diagramme I/Q) du signal composite (= direct + réfléchi).

A_d Amplitude du phaseur (diagramme I/Q) de l'onde directe.

a_e Demi-grand axe de l'ellipsoïde local utilisé dans le simulateur.

A_m Amplitude de SNR_m.

A_r Amplitude du phaseur (diagramme I/Q) de l'onde réfléchie.

a_W Demi-grand axe de l'ellipsoïde WGS84.

a_{iso} Demi-grand axe de l'ellipse d'iso-délais.

A_{L1} Amplitude de l'onde porteuse L1.

A_{L2} Amplitude de l'onde porteuse L2.

b_e Demi-petit axe de l'ellipsoïde local utilisé dans le simulateur.

b_W Demi-petit axe de l'ellipsoïde WGS84.

b_{iso} Demi-petit axe de l'ellipse d'iso-délais.

c Vitesse de propagation (en m/s) de l'onde électromagnétique GNSS (approximativement égale à la vitesse de la lumière).

C/A Modulation du code C/A.

D Message de navigation.

d Base verticale séparant les centres de phase des deux antennes d'un réflectomètre GNSS double antennes.

d_{iono} Allongement apparent de la distance récepteur-satellite dû à la traversée de la ionosphère.

d_{tropo} Allongement apparent de la distance récepteur-satellite dû à la traversée de la troposphère.

dt^s Décalage de l'horloge du satellite s par rapport au temps absolu.

dt_i Décalage de l'horloge du récepteur i par rapport au temps absolu.

E_0 Amplitude du champ électrique.

E_c Amplitude du champ électrique de polarisation circulaire.

E_r Amplitude du champ électrique de polarisation linéaire (rectiligne).

E_{x0}, E_{y0} et E_{z0} Amplitudes du champ électrique suivant les axes $\vec{x}$, $\vec{y}$ et $\vec{z}$.

E_x, E_y et E_z Composantes du champ électrique suivant les axes $\vec{x}$, $\vec{y}$ et $\vec{z}$.

f Fréquence.

f_d Fréquence Doppler du signal reçu.

f_t Fréquence des oscillations de SNR_m par rapport au temps.

f_{L1} Fréquence de l'onde porteuse L1.

f_{L2} Fréquence de l'onde porteuse L2.

H Hauteur (mesurée et considérée comme fixe) de l'antenne par rapport à la surface de réflexion.

h Hauteur (calculée) de l'antenne par rapport à la surface de réflexion.

h_e Hauteur ellipsoïdale dans l'ellipsoïde local.

h_W Hauteur ellipsoïdale dans le système WGS84.

h_{max} Distance verticale maximale que l'on est susceptible d'observer entre l'antenne (fixe) et la surface réfléchissante.

h_{min} Distance verticale minimale que l'on est susceptible d'observer entre l'antenne (fixe) et la surface réfléchissante.

I_{2_30} Gamme d'angle d'élévation des satellites variant entre 2° et 30°.

I_{30_70} Gamme d'angle d'élévation des satellites variant entre 30° et 70°.

j Nombre complexe.

K Nombre de cycles écoulés depuis la première mesure d'ambiguïté.

k Nombre d'onde.

$k_{GLONASS}$ Numéro de canal utilisé par le satellite GLONASS.

K_{LHCP} Taux de réjection LHCP (en dB).

K_{RHCP} Taux de réjection RHCP (en dB).

L_i^j Distance entre le satellite j et le récepteur i.

N Nombre entier de cycles observés par le signal GNSS entre le satellite et le récepteur : *ambiguïté entière*.

N_0 Nombre minimum de périodes de SNR_m que l'on souhaite observer dans la fenêtre glissante.

N_i Nombre d'intégrations incohérentes.

N_{elev} Nombre de classes d'angle d'élévation que l'on considère lors de la détermination des séries temporelles de A_m et ϕ_m.

N_{tot} Nombre de séries temporelles de A_m et ϕ_m que l'on peut calculer par satellite.

P Modulation du code P.

p Variations maximales de $\tilde{f}$ (en %) que l'on tolère dans la fenêtre glissante.

P_{0cm}^* Humidité superficielle du sol calculée à partir du gradient entre P_{2cm} et P_{5cm}.

P_d Profondeur de pénétration (en m) d'une onde dans une surface réfléchissante.

P_{2cm} Mesure d'humidité du sol à 2 cm de profondeur (sonde de type *Theta*).

P_{5cm} Mesure d'humidité du sol à 5 cm de profondeur (sonde de type *Theta*).

PSD_i^s Pseudo-distance (en m) entre le satellite s et le récepteur i.

R Antenne (récepteur).

r_a Demi-grand axe de la première surface de Fresnel.

r_b Demi-petit axe de la première surface de Fresnel.

R_e Rayon de courbure gaussien de la Terre approximée en une sphère locale.

R_{axial} Ratio axial d'une antenne (en dB).

r_{axial} Ratio axial d'une antenne (sans unité).

S Point de réflexion spéculaire.

S_d Signal direct reçu par l'antenne.

S_r Signal réfléchi reçu par l'antenne.

SNR_m Contribution isolée du multi-trajet au SNR (i.e., SNR auquel on a enlevé la contribution du signal direct).

T Satellite (transmetteur).

t Temps.

t_E^s Temps d'émission de l'onde électromagnétique en temps satellite s.

t_0 Temps initial.

T_c	Temps d'intégration cohérente.
t_E	Temps d'émission de l'onde électromagnétique en temps absolu.
t_R	Temps de réception de l'onde électromagnétique en temps absolu.
t_{Ri}	Temps de réception de l'onde électromagnétique en temps récepteur i.
W	Modulation du code W (dans le cas où le cryptage est activé).
x	= $sin(\theta)$, le sinus de l'angle d'élévation du satellite.
Y^c	Sortie du corrélateur des récepteurs de type cGNSS-R.
Y^i	Sortie du corrélateur des récepteurs de type iGNSS-R.

Table des figures

1 "*Pale Blue Dot*" : photographie de la Terre prise par la sonde Voyager 1 le 6 juillet 1990, à 6,4 milliards de kilomètres de distance. 1

1.1 Principe de la mesure de pseudo-distances pour le positionnement GNSS. . . . 10
1.2 Segment de contrôle de la constellation GPS. 13
1.3 Décomposition des éléments constitutifs du signal GPS. 14

2.1 Le phénomène de multi-trajet sur les signaux GNSS. 23
2.2 Antenne Trimble Zephyr Geodetic 2 avec plan absorbant. 24
2.3 Antenne Trimble *Choke rings*. 24
2.4 Réflexion spéculaire et diffuse. 25
2.5 Zone de scintillement (glistening zone) : décomposition de la surface réfléchissante en multiples facettes réfléchissantes. 27
2.6 Angle d'élévation au-delà duquel la composante diffuse domine la réflexion, en fonction de la rugosité RMS de surface. 29
2.7 Polarisation circulaire droite (RHCP) et gauche (LHCP) d'une onde électromagnétique. 31
2.8 Amplitude des coefficients de Fresnel pour la composante horizontale (H) et verticale (V) d'une onde électromagnétique se réfléchissant sur différents types de surface. 33
2.9 Phase des coefficients de Fresnel pour la composante horizontale (H) et verticale (V) d'une onde électromagnétique se réfléchissant sur différents types de surface. 33
2.10 Amplitude des coefficients de Fresnel pour la composante co-polarisée (RHCP) et cross-polarisée (LHCP) d'une onde électromagnétique (RHCP) incidente se réfléchissant sur différents types de surface. 34
2.11 Phase des coefficients de Fresnel pour la composante co-polarisée (RHCP) et cross-polarisée (LHCP) d'une onde électromagnétique (RHCP) se réfléchissant sur différents types de surface. 35
2.12 Diagramme de gain RHCP et LHCP de l'antenne Leica AR10. 36
2.13 Amplitude des coefficients de réflexion *effectifs* pour une onde RHCP se réfléchissant sur différents types de surface, et reçue par une antenne Leica AR10 (ratio axial de 1.4 dB). 37

2.14 Amplitude des coefficients de réflexion *effectif* pour une onde RHCP se réfléchissant sur différents types de surface et reçu par une antenne Leica AR10, en prenant en compte le diagramme de gain réel de l'antenne. 38
2.15 Taux de réjection LHCP et RHCP de l'antenne Leica AR10. 38

3.1 Géométrie d'un réflectomètre GNSS à double antenne. 43
3.2 Décomposition de la fonction de corrélation du signal direct. 44
3.3 Formes d'onde (a) et fréquences Doppler (b) des signaux direct et réfléchi. . . . 47
3.4 Allure des formes d'onde dans le cas d'une réflexion théorique spéculaire (a), sur mer calme (b), sur mer agitée (c). 48
3.5 Cartes de Délai-Doppler (DDM) obtenues pour un signal direct (a et a') et réfléchi (b et b'), et différence entre les deux (c et c'). 49
3.6 Principe de la mesure cGNSS-R. 51
3.7 Principe de la mesure iGNSS-R. 52
3.8 Principe de la mesure GNSS-R sur le code. 53
3.9 Différence de trajet entre les signaux directs et réfléchis pour le satellite PRN12. 54
3.10 Géométrie d'un réflectomètre GNSS à antenne unique - méthode IPT. 57
3.11 Puissance théorique reçue par un réflectomètre de type IPT pour une réflexion sur un sol nu, en fonction de l'angle d'élévation du satellite avec un polarisation verticale (gauche), et horizontale (droite), pour une humidité du sol de 0% (haut), et de 20 % (bas). 59
3.12 Puissance théorique reçue par un réflectomètre de type IPT pour une réflexion sur la mer, en fonction de l'angle d'élévation du satellite pour une hauteur d'instrument de 1 m (a) et 3 m (b). 59
3.13 Géométrie d'un réflectomètre GNSS à antenne unique. 61
3.14 Diagramme de phase du signal GNSS reçu illustrant les relations entre les composantes en phase (I) et en quadrature (Q) du signal. 62
3.15 SNR mesuré sur la fréquence L1 par une antenne Leica AR10 et un récepteur GR25 (satellite PRN01). 63
3.16 Exemple de simulation des points de réflexion et des surfaces de Fresnel associées ; (a) en milieu côtier (phare de Cordouan, France) et (b) en milieu continental (Lac Léman, Suisse), où la topographie influe non seulement sur la position des points de réflexion mais aussi sur l'existence même des points de réflexion (phénomènes de masque). 67
3.17 Station SMAPSITEA2 dédiée à la mesure de l'humidité par analyse du SNR du réseau PBO H_20 (USA) développé par K. Larson. 68
3.18 Marégraphe GNSS-R de l'observatoire spatial de Onsala. 69
3.19 Structure du projet H2020 Mistrale visant à faciliter l'agriculture raisonnée et le suivi des zones inondées à partir d'un GNSS-R embarqué sur un RPAS. 70
3.20 Principe du récepteur multi-constellations GEROS embarqué sur la station spatiale internationale. 71

4.1 Les différentes hypothèses sur la surface de réflexion utilisées dans le simulateur. 76
4.2 Détermination du point de réflexion spéculaire en prenant en compte un MNT 78
4.3 Influence de la troposphère sur la propagation : courbure des rayons. 79

4.4 Positions des points de réflexion spéculaire GPS (orange) et GLONASS (vert) pour une semaine de simulation au sommet du phare de Cordouan (45°35'11"N ; 1°10'24"O), du 2 au 8 mai 2013. 80
4.5 Positions des satellites GPS (orange) et GLONASS (vert) durant 24 h (8 mai 2013) avec une résolution temporelle de 15 min (positions des satellites actualisées toutes les 15 min). 81
4.6 Variations de la distance entre l'antenne et les points de réflexion spéculaire (a) et superficie des premières surfaces de Fresnel (b) en fonction de l'angle d'élévation des satellites et pour différentes hauteurs d'antenne. 82
4.7 Positions des points de réflexion spéculaire (GPS + GLONASS) obtenues lors de 24 h de simulations (19 mai 2013) pour une hauteur d'antenne de 5 m (points rouges), de 50 m (points oranges) et de 300 m (points verts). 83
4.8 Influence du relief - Points de réflexion spéculaires obtenus en intégrant un MNT (rouge) et en approximant la Terre en un ellipsoïde (orange). 85
4.9 Influence de la perturbation troposphérique sur la position des points de réflexion spéculaire. Différences planimétriques (a) et altimétriques (b) entre les positions intégrant ou non la correction de la perturbation troposphérique. . . 85
4.10 Comparaison des résultats du simulateur avec les satellites effectivement visibles in situ lors d'une campagne d'acquisition réalisée à l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse, le 8 et 9 Août 2012. 87

5.1 Principales stations GNSS permanentes en Europe. 111
5.2 Chaîne de traitement des données SNR mise au point durant ma thèse, basée sur un réflectomètre à antenne unique. 114
5.3 Isolement de la contribution du signal réfléchi au SNR (SNR_m) en enlevant un polynôme du deuxième degré. 115
5.4 Principe de la méthode d'inversion des données SNR par les moindre carrés (LSM). 118
5.5 Antenne Trimble Zephyr Geodetic 2 et récepteur Trimble NetR9 installés au sommet du phare de Cordouan, à environ 60 m au-dessus du niveau de la mer. 120
5.6 Phare de Cordouan à marée haute (a), par mer calme, et à marée basse (b), avec la plupart des bancs de sable émergeant. 120
5.7 Positions des points de réflexion spéculaires des satellites GPS (a) et GLONASS (b) pour un récepteur GNSS localisé en haut du phare de Cordouan, du 2 au 8 mai 2013. 121
5.8 Corrélation croisée obtenue par analyse ondelettes entre le marégraphe de Port-Bloc et la série temporelle SSH_{SNR} (a) et entre les marégraphe de Port-Bloc et celui de Royan (b). 124
5.9 a) Niveau de l'eau estimé par la méthode SNR dynamique (en noir) et mesuré par le marégraphe de Cordouan (en bleu) durant 2 semaines d'acquisitions communes. b) Série temporelle de la vitesse de variation de la surface déterminée par la méthode SNR dynamique (en noir) et niveau d'eau (normalisé) mesuré par le marégraphe de Cordouan (en gris). 126

5.10 Biais d'état de mer SSB induit par les crêtes des fortes vagues qui masquent les creux lorsque les mesures de réflectométrie sont faites off-nadir, à faible angle d'élévation, avec vagues de haute amplitude et fréquence (a), ou vagues de basse amplitude mais haute fréquence (c) ; et convergence du signal lorsque les vagues sont de faibles amplitude et fréquence (b). 128
5.11 Signal haute fréquence (période < 6 h) extrait de l'estimation du niveau d'eau par la méthode SNR dynamique du 28 avril au 13 mai 2013. 129
5.12 Estimations du niveau de la mer calculées par la méthode SNR statique classique (en noir) et par la méthode SNR dynamique (en rouge), comparées aux enregistrements du marégraphe de Cordouan (en bleu). 130

6.1 Stations GNSS du réseau **PBO H20** analysées par réflectométrie pour estimer l'humidité du sol. 155
6.2 Principe de détermination des séries temporelles de la phase ϕ_m et de l'amplitude A_m de la contribution du multi-trajet au SNR (méthode SNR statique). . . 157
6.3 Le site de mesure localisé à Lamasquère, dans le sud-ouest de la France (a), avec un récepteur Leica GR25 et une antenne AR10 installés dans une parcelle agricole (b), à côté de deux sondes d'humidité de type *Theta* (c). 159
6.4 Profondeur de pénétration théorique des ondes GNSS dans le sol autour de l'antenne géodésique. 160
6.5 Localisation des points de réflexion spéculaires et premières surfaces de Fresnel pour les constellations GPS (orange) et GLONASS (vert), sur le site de mesure de Lamasquère. 161
6.6 Évolution des séries temporelles $\phi^{PRN32}_{m-I_{2_30}}$, P_{2cm} et P_{5cm} du 5 février au 15 mars 2014. 163
6.7 Variations de l'humidité volumique P_{2cm} et P_{5cm} sur le site de Lamasquère en fonction de celles de la phase $\phi^{PRN32}_{m-I_{2_30}}$. 164
6.8 a) Évolution de $\phi^{all_sat}_{m-I_{2_30}\otimes I_{30_70}}$ et de P_{2cm} (le coefficient de corrélation linéaire est de 0.95). Les barres bleues sont les événements de pluie (en mm). b) Corrélation croisée entre $\phi^{all_sat}_{m-I_{2_30}\otimes I_{30_70}}$ et P_{2cm}, calculée par analyse en ondelettes de Morlet. 166
6.9 Taux de réjection RHCP et LHCP réels de l'antenne Leica AR10 en fonction de l'angle d'élévation. 167
6.10 Coefficient de réflexion effectif pour une onde incidente RHCP reçue par l'antenne Leica AR10 après réflexion sur un sol humide (29,87%) et sec (10,10%). . 168
6.11 Angle de coupure obtenu lors du passage du sol d'un état 1 (humide ou sec) à un état 2 (respectivement sec ou humide). 168

C.1 Modules de fonctionnement du simulateur. 218
C.2 Interface graphique du simulateur : fenêtre principale (a) et fenêtre de paramétrages (b). 219

D.1 Période des oscillations du SNR dues au multi-trajet pour une hauteur d'antenne variant entre 0,5 et 3 m. 224
D.2 Période des oscillations du SNR dues au multi-trajet pour une hauteur d'antenne variant entre 50 et 100 m. 225
D.3 Période des oscillations du SNR dues au multi-trajet pour une hauteur d'antenne variant entre 500 et 2000 m. 226

Liste des tableaux

1 Récapitulatif (non-exhaustif) des applications du GNSS-R et leur faisabilité en fonction de l'altitude de l'antenne réceptrice. 6

1.1 Correspondance entre appellation des satellites GLONASS et canal d'émission. 16
1.2 Tableau récapitulatif des caractéristiques des quatre principales constellations GNSS actuelles (mis à jour en septembre 2015). 19

2.1 Propriétés électriques de différents types de surface de réflexion (Hannah, 2001). 32

3.1 Altimétrie basée sur la mesure de code C/A : résultats d'une campagne de mesure à 60 m au-dessus du niveau de la mer au phare de Cordouan. 54
3.2 Comparaison entre l'IPT et l'analyse du SNR : avantages et inconvénients. . . . 65
3.3 Principales campagnes GNSS-R européennes. 70

5.1 Comparaison entre les différents marégraphes et la série temporelle $SSH_{SNR}(t)$ calculée à partir du SNR. 123
5.2 Comparaison entre les données du marégraphe de Port-Bloc avec $T-UGO_m$ et Royan sur les trois mois d'acquisition. 123
5.3 Influence de la constellation GNSS sur la détermination de la hauteur de mer par la méthode *SNR dynamique*. 125
5.4 Comparaison des résultats des méthodes *SNR statique* et *SNR dynamique*, par rapport aux enregistrements du marégraphe de Cordouan du 28 avril au 13 mai 2013. 131

6.1 Moyenne des coefficients de corrélation linéaire $\bar{R}$ entre les différentes observables du SNR et P_{2cm}/P_{5cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}) et les angles d'élévation élevés uniquement (I_{30_70}). 162
6.2 Valeur absolue des coefficients de corrélation linéaire R entre les différentes observables du SNR et P_{2cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}), les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), et la combinaison des deux ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$). 165
6.3 Coefficients de corrélation linéaire R entre $h_d^{all_sat}$ et P_{2cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}), les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), et la combinaison des deux ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$). 165

Table des matières

Résumé vii

Abstract ix

Remerciements xi

Sommaire xiii

Introduction 1

1 Le système GNSS : notions fondamentales 7
1.1 Introduction . . . 8
1.2 Principe du positionnement GNSS . . . 8
1.2.1 Le signal satellite . . . 8
1.2.2 La mesure de code . . . 9
1.2.3 La mesure de phase . . . 11
1.3 GPS . . . 12
1.3.1 Description . . . 12
1.3.2 Structure du signal . . . 13
1.4 GLONASS . . . 15
1.4.1 Description . . . 15
1.4.2 Structure du signal . . . 15
1.5 Galileo . . . 15
1.5.1 Description . . . 15
1.5.2 Structure du signal . . . 17
1.6 COMPASS-BeiDou . . . 17
1.6.1 Description . . . 17
1.6.2 Structure du signal . . . 18
1.7 Perspectives . . . 18

2 Réflexion des signaux GNSS 21
2.1 Introduction . . . 22
2.2 Le multi-trajet . . . 22
2.2.1 Introduction . . . 22

2.2.2 Perturbation de la mesure de phase . . . 22
2.2.3 Perturbation de la mesure de code . . . 23
2.2.4 Comment minimiser l'impact du multi-trajet ? . . . 23
2.2.4.1 Le site de mesure . . . 23
2.2.4.2 Des solutions matérielles . . . 24
2.2.4.3 Des solutions lors du traitement des observations . . . 24
2.3 Réflexion spéculaire et diffuse . . . 25
2.3.1 Introduction . . . 25
2.3.2 Réflexion spéculaire : première surface de Fresnel . . . 26
2.3.3 Réflexion diffuse : *glistening zone* . . . 26
2.3.4 Rugosité de la surface réfléchissante : le critère de Rayleigh . . . 28
2.4 Caractéristiques du signal GNSS après réflexion . . . 28
2.4.1 Polarisation d'une onde électromagnétique . . . 28
2.4.1.1 La polarisation elliptique (cas général) . . . 30
2.4.1.2 La polarisation circulaire . . . 30
2.4.1.3 La polarisation rectiligne (ou linéaire) . . . 30
2.4.2 Décomposition d'une polarisation . . . 31
2.4.3 Effet de la réflexion sur la polarisation . . . 32
2.4.3.1 Coefficients de réflexion de Fresnel pour une polarisation linéaire 32
2.4.3.2 Coefficients de réflexion de Fresnel pour une polarisation circulaire . . . 34
2.4.4 Effet du gain d'antenne sur le signal réfléchi . . . 35

3 La réflectométrie GNSS ou GNSS-R 39
3.1 Introduction . . . 41
3.2 Contexte historique . . . 41
3.3 Réflectomètre à double antenne . . . 42
3.3.1 Géométrie du système multistatique . . . 42
3.3.2 Observables . . . 43
3.3.2.1 Forme d'onde : délai et doppler . . . 43
3.3.2.2 Carte de délai-doppler : DDM . . . 44
3.3.2.3 Mesure sur la phase . . . 50
3.3.2.4 Théorie . . . 50
3.3.3 Applications . . . 52
3.3.3.1 Altimétrie . . . 52
3.3.3.2 État de mer / Rugosité de surface et vents de surface . . . 55
3.3.3.3 Humidité du sol . . . 55
3.3.3.4 Autres données géophysiques observables . . . 56
3.4 Réflectomètre à antenne unique . . . 57
3.4.1 Interference Pattern Technique . . . 57
3.4.1.1 Géométrie du système multistatique . . . 57
3.4.1.2 Observable : le diagramme d'interférence . . . 58
3.4.1.3 Applications . . . 58
3.4.2 Méthode SNR . . . 60
3.4.2.1 Géométrie du système multistatique . . . 60
3.4.2.2 Observable : Signal-to-Noise Ratio SNR . . . 60

3.4.2.3 Applications . . . 63
3.4.3 Conclusion . . . 65
3.5 Plateformes et contraintes . . . 66
3.5.1 Plateformes fixes / in situ . . . 67
3.5.2 Systèmes aéroportés . . . 67
3.5.3 Satellites . . . 68
3.5.3.1 TechDemoSat-1 . . . 68
3.5.3.2 CYGNSS : *Cyclone Global Navigation Satellite System* . . . 69
3.5.3.3 ${}^3CAT-2$ . . . 69
3.5.3.4 PARIS-IoD : *Passive Reflectometry and Interferometry System In orbit Demonstrator* . . . 69
3.5.3.5 GEROS ISS : GNSS REflectometry, Radio Occultation and Scatterometry onboard the International Space Station . . . 70
3.6 Perspectives . . . 70

4 Modélisation et simulations de la trajectoire des ondes GNSS directes et réfléchies à la surface de la Terre 73
4.1 Introduction . . . 74
4.2 Principe de fonctionnement du simulateur . . . 75
4.2.1 Approximation géométrique . . . 75
4.2.2 Jeu de données . . . 75
4.2.3 Algorithmes de détermination des positions des points de réflexion spéculaire . . . 76
4.2.3.1 Approximation en un ellipsoïde local . . . 76
4.2.3.2 Approximation en une sphère locale . . . 77
4.2.3.3 Approximation en un plan local . . . 77
4.2.3.4 Intégration d'un modèle numérique de terrain . . . 77
4.2.3.5 Correction de la réfraction angulaire due à la traversée de la troposphère . . . 78
4.2.4 Sorties des simulations . . . 79
4.3 Résumé des principaux résultats . . . 80
4.3.1 Influence de la constellation . . . 80
4.3.2 Influence de la hauteur du récepteur et de l'élévation du satellite . . . 81
4.3.3 Influence de l'approximation de la surface terrestre . . . 83
4.3.3.1 Comparaison entre les approximations géométriques . . . 83
4.3.3.2 Impact de la topographie sur la visibilité et la position des points de réflexion . . . 84
4.3.4 Réfraction angulaire due à la troposphère . . . 85
4.4 Conclusion . . . 86
4.5 ***Article publié*** : GMD 2014 - Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments . . . 88

5 Application de la réflectométrie pour l'altimétrie et l'état de mer : utilisation d'une seule antenne 109
5.1 Introduction . . . 110
5.2 Etat de l'art . . . 112
5.3 Méthodologie . . . 113

5.3.1 Suppression de la contribution du signal direct . . . 113
5.3.2 Discrétisation de la série temporelle $SNR_m(t)$ . . . 115
5.3.3 Détermination de la fréquence f des oscillations du SNR dues au multi-trajet . . . 116
5.3.4 Détermination de la hauteur h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion . . . 117
5.3.5 Validation de la méthode . . . 118
5.4 L'expérience du phare de Cordouan . . . 119
5.4.1 Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales . . . 119
5.4.2 Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS . . . 121
5.4.3 Données utilisées pour la validation . . . 122
5.4.4 Choix des paramètres de calcul . . . 122
5.5 Résumé des principaux résultats . . . 122
5.5.1 Détermination des principales périodes de marées . . . 122
5.5.2 Influence de la constellation GNSS . . . 124
5.5.3 Détection des vagues . . . 125
5.5.3.1 Impact des vagues sur le SSH (*Sea Surface Height*) . . . 125
5.5.3.2 État de mer . . . 129
5.5.4 Comparaison entre les méthodes SNR *statique* et SNR *dynamique* . . . 130
5.6 Conclusions et perspectives . . . 131
5.7 ***Article publié*** : RSE 2015 - Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver . . . 132

6 Application de la réflectométrie pour la mesure des variations de l'humidité du sol : utilisation d'une seule antenne 153
6.1 Introduction . . . 154
6.2 Etat de l'art . . . 155
6.2.1 Hauteur *effective h* de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante . 156
6.2.2 Amplitude A_m et phase ϕ_m des oscillations du SNR dues au multi-trajet 156
6.3 Méthodologie . . . 156
6.3.1 Détermination de la hauteur effective h . . . 156
6.3.2 Détermination de l'amplitude A_m et de la phase ϕ_m . . . 158
6.4 L'expérience de Lamasquère . . . 159
6.4.1 Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales . . . 159
6.4.2 Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS . . . 161
6.4.3 Données utilisées pour la validation . . . 161
6.5 Résumé des principaux résultats . . . 162
6.5.1 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_s, A_m et ϕ_m . . . 162
6.5.1.1 Faibles angles d'élévation : 2° à 30° . . . 162
6.5.1.2 Angles d'élévation élevés : 30° à 70° . . . 163
6.5.1.3 Combinaison des satellites entre eux . . . 164
6.5.1.4 Conclusion . . . 165
6.5.2 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_d . . . 165
6.6 Discussion sur l'inversion du signe de la corrélation entre les petits et grands angles d'élévation . . . 166
6.7 Conclusions et perspectives . . . 169

6.8 ***Article sous presse*** : IEEE JSTARS - Detection of soil moisture variations 171

Conclusion et perspectives **187**

Bibliographie **191**

A Présentations du GNSS-R et des travaux de l'équipe du GET dans la revue *Géomètre* **201**

B Article de vulgarisation publié dans la revue XYZ de l'Association Française de Topographie **207**

C Précisions techniques sur le simulateur déterminant la position des points de réflexion **217**

D Optimisation de la durée d'une session et de la fréquence d'acquisition des données SNR pour des applications altimétriques **221**

E Participation à une campagne de calibration des altimètres Jason-2 et SARAL **227**

F Activités d'enseignements et d'encadrement réalisées durant ma thèse **243**
F.1 Enseignements dans le supérieur 244
F.2 Encadrement de stagiaires 245
F.3 Activités de vulgarisation 245

Nomenclature **247**

Table des figures **253**

Liste des tableaux **257**

Table des matières **259**

PhD of the UNIVERSITY TOULOUSE III – Paul Sabatier

Nicolas ROUSSEL

PhD Advisers:	Guillaume RAMILLIEN & Frédéric FRAPPART
Thesis defense on:	November 26, 2015 in Toulouse, France
Laboratory:	GET (UMR 5563), GRGS – OMP 14, Avenue Edouard Belin, Toulouse, France

Application of GNSS reflectometry to the study of water storage redistribution over the Earth's surface

KEY WORDS:

GNSS-R
Remote sensing
Signal-to-Noise Ratio
Altimetry
Soil moisture
SNR
Reflected signals
Multipaths
Sea level
GNSS
GPS
GLONASS

ABSTRACT:

The aim of my PhD research is to demonstrate that a single GNSS antenna can be used to measure local temporal variations of geophysical parameters. This new technique, called **GNSS reflectometry (GNSS-R)**, uses the reflections at the Earth's surface of electromagnetic waves emitted by satellites usually dedicated to positioning (GPS, GLONASS…).
In addition to simulations of reflection points, I focused on the exploitation of in situ signal-to-noise ratio datasets to estimate the height of the antenna relative to the reflective surface (altimetry) and the soil moisture over continental areas. The method herein developed has been successfully applied to determine local variations of the sea level near the lighthouse of Cordouan, France, and the soil moisture level of an agricultural plot near to Toulouse, France.
This method opens up new avenues for use of existing data to increase the availability of in situ measurements, especially through the use of the GNSS permanent networks stations.

THESE de DOCTORAT de l'UNIVERSITE TOULOUSE III – Paul Sabatier

Nicolas ROUSSEL

Directeurs de thèse :	Guillaume RAMILLIEN & Frédéric FRAPPART
Thèse soutenue le :	26 novembre 2015 à Toulouse
Laboratoire de rattachement :	GET (UMR 5563), GRGS – OMP 14, Avenue Edouard Belin, Toulouse

Application de la réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre

MOTS CLES :

GNSS-R
Télédétection
Rapport signal sur bruit
Altimétrie
Humidité du sol
SNR
Réflectométrie
Multi-trajets
Niveau de la mer
GNSS
GPS
GLONASS

RESUME :

Mon travail de thèse consiste à démontrer qu'il est possible d'utiliser une simple antenne GNSS pour mesurer les variations temporelles locales de paramètres géophysiques. Cette nouvelle technique, **la réflectométrie GNSS (GNSS-R),** est basée sur la réflexion à la surface terrestre des ondes électromagnétiques émises par des satellites (GPS, GLONASS…) habituellement dédiés au positionnement.
En plus de simulations des points de réflexion, je me suis focalisé sur l'exploitation de vraies mesures du rapport signal-sur-bruit pour estimer la hauteur de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante (altimétrie) et l'humidité du sol en domaine continental. Ma méthode d'inversion a été appliquée avec succès pour déterminer les variations locales de la hauteur de la mer au voisinage du phare de Cordouan et de l'humidité d'une parcelle agricole.
Cette méthode ouvre de larges perspectives de densification des mesures in situ, notamment par l'utilisation des stations des réseaux GNSS permanents.