

## Mémoire

**Auteur** : Ruisseau, Hugues

**Promoteur(s)** : Warnant, René

**Faculté** : Faculté des Sciences

**Diplôme** : Master en sciences géographiques, orientation géomatique, à finalité spécialisée en geodata-expert

**Année académique** : 2023-2024

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/20527>

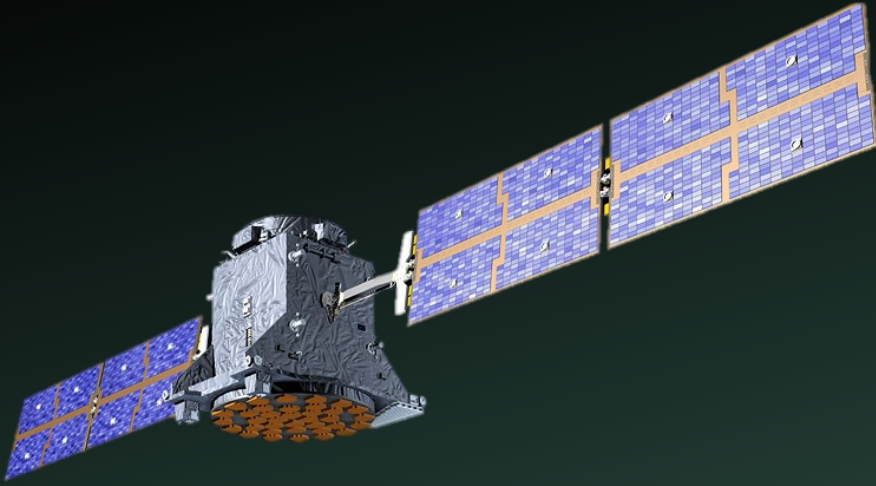
---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



MÉMOIRE DE MASTER EN SCIENCES GÉOGRAPHIQUES, ORIENTATION  
GÉOMATIQUE, À FINALITÉ SPÉCIALISÉE EN GEODATA-EXPERT

# Faisabilité de l'estimation de l'humidité du sol par réflectométrie GNSS grâce aux récepteurs low-cost

Par Hugues RUISSEAU

Date de défense : Juin 2024

**Promoteur :** René WARNANT

**Jury de lecture :** Roland BILLEN  
Xavier FETTWEIS

*Je tiens particulièrement à remercier mon promoteur, M. René Warnant, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses bonnes idées et, de manière plus générale, pour tout ce qu'il a pu m'apporter ces dernières années. Je remercie aussi son assistant, Caneren Gül, pour l'aide qu'il m'a fournie.*

*Ensuite, je remercie mon parrain, Gérard Kempeneers, d'avoir mis son jardin à ma disposition et de m'avoir grandement aidé dans la conception du montage utilisé pour réaliser les acquisitions de données.*

*Je souhaite aussi remercier mes parents et mon frère pour leur aide et leurs encouragements.*

*Ces 5 dernières années auraient certainement été bien plus difficiles sans la présence et le soutien constant de mes amis géographes ; alors merci à eux !*

# ABSTRACT

Soil moisture is a crucial variable in various fields such as agriculture, hydrology, and climatology. This study aims at determining the feasibility of studying this parameter using low-cost GNSS receivers ( $< \text{€}300$ ). To achieve this, there exists a technique that involves analysing the signal-to-noise ratio (SNR) to extract the interference caused by the interaction between the signal directly coming from the satellite and the one reflected from the ground: this is known as interferometric reflectometry. Scientific literature has shown that the amplitude and phase of this interference are sensitive to soil moisture variations. However, until now, studies have used data from fixed reference stations consisting of geodetic receivers. Thus, the interference was produced by the movement of the satellite over time. Moreover, a recent scientific article has shown that this interference can be observed by performing a vertical displacement of the GNSS antenna.

In this context, this work has established the feasibility of detecting variations in soil moisture through interferometric reflectometry using the vertical displacement of a low-cost receiver. A ublox F9P and various smartphone models were tested.

The theoretical model related to this interference reconstruction technique was defined. Additionally, two processing methods were developed to: only use SNR measurements corresponding to reflections located in the study area and to eliminate unwanted interferences based on the Lomb-Scargle periodogram. Various acquisitions were made using a setup that allowed vertical displacement of the receivers.

Ultimately, this study demonstrated that it is possible to detect soil moisture variations with low-cost receivers by exploiting the amplitude but not the phase of the interference. The latter proves to be ambiguous and too sensitive to any errors in the reflection geometry. Furthermore, this work has also provided several contributions to the field of interferometric reflectometry.

## RÉSUMÉ

L'humidité du sol constitue une variable essentielle dans une variété de domaines comme l'agriculture, l'hydrologie ou la climatologie. Cette étude vise donc à déterminer la faisabilité de l'étude de ce paramètre grâce à des récepteurs GNSS low-cost (< 300 €). Pour ce faire, il existe une technique qui consiste à analyser le signal-to-noise ratio (SNR) afin d'en extraire l'interférence liée à l'interaction entre le signal provenant directement du satellite et celui réfléchi sur le sol : c'est la réflectométrie interférométrique. La littérature scientifique a montré que l'amplitude et la phase de cette interférence étaient sensibles aux variations de l'humidité du sol. Néanmoins, jusqu'ici, les études ont exploité des données issues de stations de référence fixes constituées par des récepteurs géodésiques. Ainsi, l'interférence était produite par le déplacement du satellite au cours du temps. Par ailleurs, un article scientifique a récemment montré que cette dernière pouvait être observée en réalisant un déplacement vertical de l'antenne GNSS.

Dans ce contexte, ce travail a établi la faisabilité de la détection de variations dans l'humidité du sol par réflectométrie interférométrique grâce au déplacement vertical d'un récepteur low-cost. Un ublox F9P et différents modèles de smartphones ont été testés.

Ainsi, le modèle théorique relatif à cette technique de reconstitution de l'interférence a été défini. En outre, deux traitements ont été élaborés afin : de n'exploiter que les mesures de SNR correspondant à une réflexion située dans de la zone d'étude et de supprimer les interférences indésirables sur base du périodogramme de Lomb-Scargle. Différentes acquisitions ont été réalisées grâce à un montage permettant d'effectuer un déplacement vertical des récepteurs.

Finalement, cette étude a montré qu'il était possible de détecter une variation de l'humidité du sol avec des récepteurs low-cost en exploitant l'amplitude mais pas la phase de l'interférence. Cette dernière s'avère être ambiguë et trop sensible à la moindre erreur sur la géométrie de la réflexion. Par ailleurs, ce travail a aussi fourni plusieurs apports au domaine de la réflectométrie interférométrique.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>3</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS.....</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre I : Introduction.....</b>	<b>8</b>
I - 1. Généralités.....	9
I - 2. Motivations .....	9
I - 3. Structure .....	9
<b>Chapitre II : Fondamentaux théoriques.....</b>	<b>10</b>
II - 1. Global Navigation Satellite Systems .....	11
II - 1.1. Histoire .....	11
II - 1.2. Principe de fonctionnement .....	11
II - 1.3. Segment spatial.....	12
II - 1.4. Signaux GNSS .....	14
II - 1.5. Observables .....	15
• Ranging codes .....	15
• Phases de l'onde porteuse.....	16
II - 1.6. Sources d'erreur.....	17
• Erreurs d'horloges .....	17
• Effets atmosphériques.....	17
• Multitrajet.....	18
• Autres sources d'erreur.....	18
II - 1.7. Positionnement différentiel.....	18
II - 1.8. Récepteurs GNSS .....	19
II - 1.9. Antennes GNSS .....	20
II - 2. Humidité du sol .....	21
II - 2.1. Méthodes de mesure .....	21
II - 3. Réflectométrie GNSS .....	23
II - 3.1. Fondamentaux de la GNSS-R.....	24
• Types de réflexion .....	24
• Modèle mathématique du multitrajet.....	26
<b>Chapitre III : État de l'art .....</b>	<b>29</b>
III - 1. Méthodes utilisant les récepteurs dédiés à la GNSS-R.....	30
III - 1.1. Types de récepteurs dédiés à la GNSS-R.....	30
III - 1.2. Réflectivité de la surface.....	30
• Équation radar bistatique .....	31
• Rapport de puissance des signaux .....	31
• Delay-Doppler Map.....	32

III - 1.3.	De la réflectivité à l'humidité du sol.....	33
III - 2.	Méthodes utilisant les récepteurs GNSS classiques .....	33
III - 2.1.	Diagramme d'interférence .....	33
III - 2.2.	Méthodes basées sur le SNR.....	34
•	Calcul du SNR par le récepteur .....	34
•	Amplitude du multitrajet .....	35
•	Phase du multitrajet .....	38
•	Satellites GEO .....	38
•	Améliorations .....	39
•	Avantages .....	39
III - 3.	Utilisation des récepteurs low-cost en GNSS-R .....	40
III - 3.1.	Smartphones et données GNSS .....	40
III - 3.2.	Smartphones et GNSS-R .....	40
<b>Chapitre IV :</b>	<b>Objectifs.....</b>	<b>42</b>
<b>Chapitre V :</b>	<b>Méthodologie.....</b>	<b>43</b>
V - 1.	Modèle théorique.....	44
V - 1.1.	Résolution spatiale.....	46
V - 2.	Protocole d'acquisition.....	48
V - 2.1.	Récepteurs .....	48
•	Smartphones .....	48
•	Ublox F9P.....	48
V - 2.2.	Expérience 1 .....	50
V - 2.3.	Expérience 2 .....	51
V - 2.4.	Expérience 3 .....	52
V - 2.5.	Expérience 4 .....	53
V - 3.	Traitement des données .....	54
V - 3.1.	Implémentation .....	57
V - 4.	Statistiques d'analyse .....	58
V - 4.1.	Coefficient de détermination.....	58
V - 4.2.	Écart-type.....	59
<b>Chapitre VI :</b>	<b>Résultats .....</b>	<b>60</b>
VI - 1.	Expérience 1 .....	61
VI - 1.1.	Périodogramme de Lomb-Scargle .....	61
VI - 1.2.	Qualité générale des ajustements .....	61
VI - 1.3.	Analyse des ajustements .....	62
VI - 1.4.	Analyse de la première zone d'étude .....	64
VI - 2.	Expérience 2 .....	65
VI - 2.1.	Périodogramme de Lomb-Scargle .....	65
VI - 2.2.	Qualité générale des ajustements .....	66
VI - 2.3.	Analyse des ajustements .....	66
•	Comparaison entre les signaux L1 et L5 .....	67
VI - 2.4.	Analyse de l'AAF et de la profondeur de réflexion.....	68

VI - 2.5.	Analyse de la seconde zone d'étude .....	69
VI - 2.6.	Analyse des données issues du second smartphone .....	70
•	Acquisition (a) .....	70
•	Acquisition (b) .....	70
VI - 3.	Expérience 3 .....	72
VI - 3.1.	Qualité générale des ajustements pour les différents récepteurs .....	72
VI - 3.2.	Ajustement sur des données acquise avec le récepteur ublox .....	72
VI - 3.3.	Analyse de l'AAF et de la profondeur de réflexion .....	74
VI - 4.	Expérience 4 .....	76
VI - 4.1.	Qualité générale des ajustements .....	76
VI - 4.2.	Analyse d'un ajustement .....	76
VI - 4.3.	Analyse des paramètres de Larson estimés .....	77
•	Facteur d'atténuation de l'amplitude .....	77
•	Profondeur de réflexion .....	79
<b>Chapitre VII :</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>81</b>
VII - 1.	Qualité des mesures .....	82
VII - 1.1.	Signal-to-Noise Ratio .....	82
VII - 1.2.	Hauteur du récepteur .....	83
VII - 2.	Influence du site d'étude .....	84
VII - 3.	Qualité des modélisations .....	86
VII - 3.1.	Approximation de Yu .....	86
VII - 3.2.	Périodogramme de Lomb-Scargle .....	87
VII - 3.3.	Ajustement par moindres carrés du modèle théorique .....	88
VII - 4.	Paramètres de Larson et humidité du sol .....	89
VII - 4.1.	Facteur d'atténuation de l'amplitude .....	89
VII - 4.2.	Profondeur de réflexion .....	91
VII - 5.	Autocritique .....	92
VII - 6.	Perspectives .....	94
<b>Chapitre VIII :</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>95</b>
VIII - 1.	Cadre de l'étude .....	96
VIII - 2.	Rappel des objectifs .....	97
VIII - 3.	Méthode .....	97
VIII - 4.	Synthèse des résultats .....	98
VIII - 4.1.	Apports à la réflectométrie interférométrique GNSS .....	98
VIII - 4.2.	Réponse à la question de recherche .....	98
VIII - 5.	Bilan .....	98
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>99</b>	
<b>ANNEXES</b> .....	<b>102</b>	

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>AAF</b>	Amplitude Attenuation Factor
<b>ANN</b>	Artificial Neural Network
<b>C/N<sub>0</sub></b>	Carrier-to-Noise Ratio
<b>DDM</b>	Delay-Doppler Map
<b>DGNSS</b>	Differential GNSS
<b>DSP</b>	Digital Signal Processor
<b>ESA</b>	European Space Agency
<b>FFZ</b>	First Fresnel Zone
<b>GEO</b>	Geostationary Orbit
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>ISGO</b>	Inclined Geo-Synchronous Orbit
<b>LEO</b>	Low Earth Orbit
<b>LHCP</b>	Left-Handed Circular Polarization
<b>LSP</b>	Lomb-Scargle Peridogram
<b>MEO</b>	Medium Earth Orbit
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Agency
<b>NMEA</b>	National Marine Electronics Association
<b>PNT</b>	Position Navigation and Time
<b>PPP</b>	Precise Point Positioning
<b>PVT</b>	Position Velocity and Time
<b>RHCP</b>	Right-Handed Circular Polarization
<b>RINEX</b>	Receiver Independent Exchange Format
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>SBAS</b>	Space-Based Augmentation System
<b>SMAP</b>	Soil Moisture Active and Passive
<b>SMOS</b>	Soil Moisture and Ocean Salinity
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>SPP</b>	Single Point Positioning
<b>UTC</b>	Coordinated Universal Time

# Chapitre I : INTRODUCTION

Ce mémoire est rendu dans le cadre de l'obtention du titre de Master en sciences géographiques, orientation géomatique, à finalité spécialisée en geodata-expert à l'Université de Liège.

Ce premier chapitre va introduire le sujet étudié dans le cadre de ce travail. D'abord, les principaux domaines impliqués seront brièvement présentés. Suite à cela, les motivations initiales de l'étude seront décrites. La dernière section dressera la structure du mémoire.

## **I - 1. Généralités**

L'humidité du sol est une variable géophysique essentielle dans un ensemble de domaines comme l'agriculture, les systèmes climatiques ou encore l'hydrologie. Ainsi, son étude s'avère primordiale pour comprendre : la réaction des écosystèmes en cas de stress hydrique ou de sécheresse, la recharge des aquifères, le flux de chaleur latente et encore bien d'autres phénomènes. Actuellement, l'humidité du sol est mesurée soit à un niveau très local par des appareils appelés « humidimètres » soit de manière globale sur base d'observations réalisées par des capteurs embarqués sur des satellites. Par conséquent, il n'existe pas de méthode largement utilisée permettant d'effectuer des estimations à une résolution intermédiaire.

Le positionnement par satellites, ou GNSS pour Global Navigation Satellite Systems, repose sur l'émission depuis l'espace de signaux électromagnétiques permettant théoriquement à un récepteur dédié de déterminer sa localisation partout et à tout instant à la surface de la Terre. Cette technique est utilisée dans une variété d'applications nécessitant une grande précision comme l'aviation, la topographie ou encore la géophysique. Par ailleurs, des récepteurs GNSS de moindre qualité sont aussi utilisés dans des appareils comme les smartphones et les montres connectées. Cependant, le positionnement par satellites est affecté par un ensemble d'erreurs dont l'une d'elles est liée au fait que l'antenne GNSS peut recevoir un signal réfléchi par une surface en plus du signal directement issu du satellite : c'est le multitrajet.

Très vite, la communauté scientifique a remarqué que l'effet du multitrajet sur les mesures effectuées par les récepteurs GNSS pouvait être exploité pour estimer des propriétés géophysiques de la surface réfléchissante (épaisseur de la couverture neigeuse, étude de la végétation, altimétrie,...). Ce domaine d'étude porte le nom de réflectométrie GNSS. Ainsi, cette technique a aussi pu être utilisée pour détecter des variations de l'humidité du sol. Néanmoins, jusqu'ici, ce paramètre n'a été étudié qu'à l'aide de récepteurs fixes caractérisés par une haute précision mais aussi un coût important.

## **I - 2. Motivations**

Dans le cadre défini ci-dessus, cette étude va déterminer la faisabilité de la détection de variations dans l'humidité du sol par réflectométrie GNSS grâce à des récepteurs « low-cost » par opposition aux récepteurs de haute précision. De cette manière, ce travail cherche à ouvrir la voie à l'élaboration d'une nouvelle méthode permettant d'estimer ce paramètre avec une résolution moyenne grâce à des appareils peu coûteux et largement répandus. En outre, étant donné le nombre de satellites GNSS en orbite, il serait ainsi possible de déterminer l'humidité du sol à n'importe quel endroit et à n'importe quel moment.

## **I - 3. Structure**

Ce mémoire se compose de 8 chapitres. Après cette introduction, on commencera par poser les bases : du positionnement par satellites, de l'étude de l'humidité du sol et de la réflectométrie GNSS. Ceci permettra au lecteur de pouvoir appréhender l'état de l'art constituant le troisième chapitre. Celui-ci résumera l'ensemble des méthodes permettant d'estimer l'humidité du sol au travers de la réflectométrie GNSS. Une fois ce cadre théorique établi, les objectifs de ce mémoire seront clairement détaillés et une question de recherche sera formulée. Après cela, le cinquième chapitre développera la méthodologie utilisée pour l'acquisition et le traitement des données qui permettront d'étudier la problématique posée. Par la suite, les résultats seront présentés et analysés. Ces derniers seront discutés et interprétés dans le septième chapitre. Ceci permettra d'apporter les éléments de réponse à la question de recherche. Finalement, la conclusion synthétisera le travail effectué. Les principales tendances mises en avant par ce travail seront résumées et une section tâchera de répondre aux objectifs fixés.

# Chapitre II : FONDAMENTAUX THÉORIQUES

Avant de rentrer dans le corps de l'étude, il est important d'établir le cadre théorique du domaine étudié. Ces fondamentaux permettront de comprendre au mieux ce qui a déjà été réalisé dans la littérature scientifique mais aussi de développer, par la suite, une méthodologie permettant d'atteindre les objectifs définis.

Le présent chapitre commence donc par un rappel théorique sur les fondements du positionnement par satellites. Certains points présentant une grande importance pour la suite du travail seront étudiés en détail alors que les autres principes seront présentés de manière plus succincte. La section suivante fournira un ensemble d'informations concernant l'humidité du sol comme, par exemple, les principales méthodes permettant l'estimation de ce paramètre. Finalement, le domaine de la réflectométrie GNSS sera défini et les principes fondamentaux y étant associés seront développés.

Au vu de la complexité de plusieurs principes abordés ci-dessous, les explications seront parfois volontairement données avec un certain niveau d'abstraction. Ceci évitera d'embrouiller le lecteur avec des informations superflues. Par ailleurs, dans le cas où un terme technique n'aurait pas de traduction satisfaisante en français, l'appellation anglaise sera utilisée.

## II - 1. Global Navigation Satellite Systems

Les GNSS (Global Navigation Satellite Systems) se composent d'un ensemble de satellites permettant, en théorie, à un utilisateur de déterminer sa position dans l'espace (solution PNT<sup>1</sup>) partout et à tout instant autour de la Terre. Il existe à ce jour 4 constellations de satellites de positionnement : GPS, GLONASS, BeiDou et Galileo appartenant respectivement aux États-Unis, à la Russie, à la Chine et à l'Europe.

### II - 1.1. Histoire

Le premier système de positionnement par satellites, Transit, est né en 1960 et était destiné à l'US Navy. Il était composé de 5 satellites et ne permettait d'obtenir qu'environ une position toutes les heures. En 1973, les États-Unis ont pris la décision de créer la première constellation GNSS nommée NAVSTAR (Navigation Satellite Timing And Ranging) GPS (Global Positioning System) dont le premier satellite fut lancé en 1978. Ce service a été réservé à la Défense américaine jusqu'en 1983. Néanmoins, après cela, les signaux destinés à l'usage civil étaient volontairement dégradés par la technique de la « Selective Availability » (SA) qui provoquait une erreur sur les positions d'environ 100 m. La SA fut désactivée en 2000 ce qui permit de grandement améliorer la précision du positionnement par satellites et marqua le début de l'utilisation massive de cette technologie. (Jin et al., 2014)

Par la suite, GLONASS est devenu la seconde constellation GNSS complètement opérationnelle en 1995 puis en 2010 après une diminution du nombre de satellites liée à l'effondrement de l'URSS. En 2020, la Chine annonça la fin du développement de BeiDou (Jin et al., 2014). En ce qui concerne Galileo, la constellation compte à ce jour 26 satellites utilisables sur les 30 prévus (ESA, 2021).

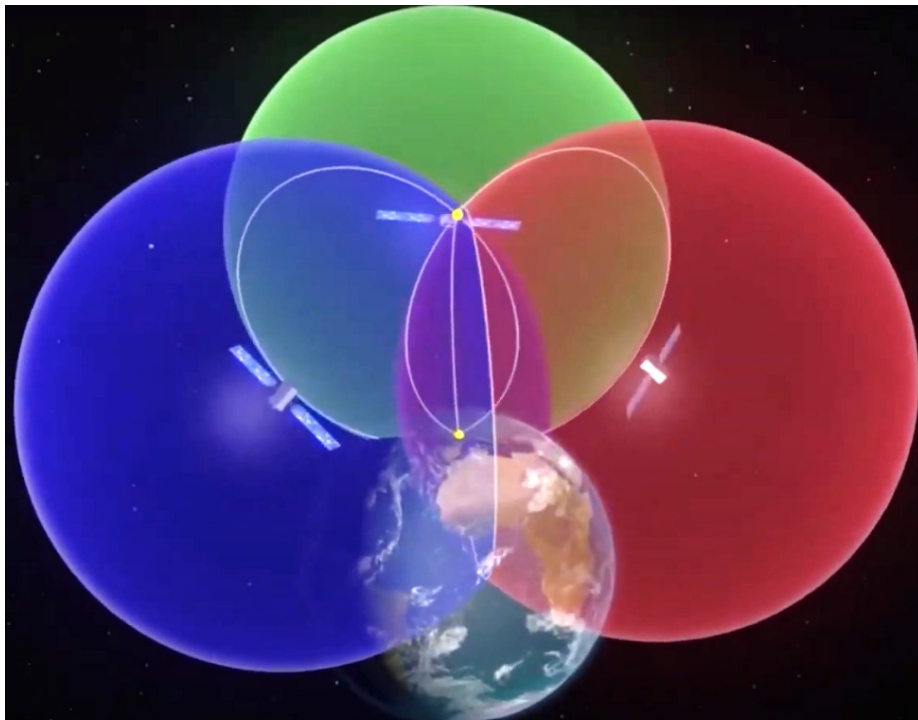
### II - 1.2. Principe de fonctionnement

Un satellite de positionnement émet constamment des signaux qui permettent de calculer sa position absolue dans l'espace ainsi que la distance qui le sépare du récepteur. Ceci définit donc une sphère centrée sur le satellite et à la surface de laquelle se trouve l'utilisateur. Avec deux satellites, le domaine des positions possibles est réduit à l'intersection de la surface de deux sphères, c'est-à-dire un cercle (en blanc dans la Figure 1). Comme le montre la Figure 1, un satellite supplémentaire laisse encore 2 solutions possibles qui sont représentées par les points jaunes. Cependant, une information additionnelle sur la position (le fait que l'on se situe à la surface de la Terre, l'altitude de vol,...) permet généralement de lever cette ambiguïté. De cette manière, dans la Figure 1, la position du récepteur correspond au point se trouvant à la surface de la Terre tandis que l'autre solution paraît absurde. Ainsi, il est théoriquement possible de déterminer mathématiquement les coordonnées dans l'espace d'un récepteur sur base de trois satellites. Cette affirmation n'est vraie qu'en l'absence d'erreur de synchronisation entre les différentes horloges (des satellites, du récepteur, utilisées comme références) permettant l'utilisation des signaux GNSS. Dans les faits, ce n'est jamais le cas comme cela sera expliqué plus loin. (Sanz Subirana et al., 2013)

---

<sup>1</sup> Calculer une position à deux époques successives permet assez trivialement d'obtenir le déplacement caractérisé par une vitesse et une direction. De plus, comme cela sera expliqué plus loin, pour déterminer sa position il est nécessaire de conjointement se synchroniser vis-à-vis de l'échelle de temps universel. C'est pourquoi on parle de solution PNT (Position Navigation and Time) ou PVT (Position Velocity and Time).

FIGURE 1 : Positions déterminées sur base de 3 satellites (Maréchal, 2021)



### II - 1.3. Segment spatial

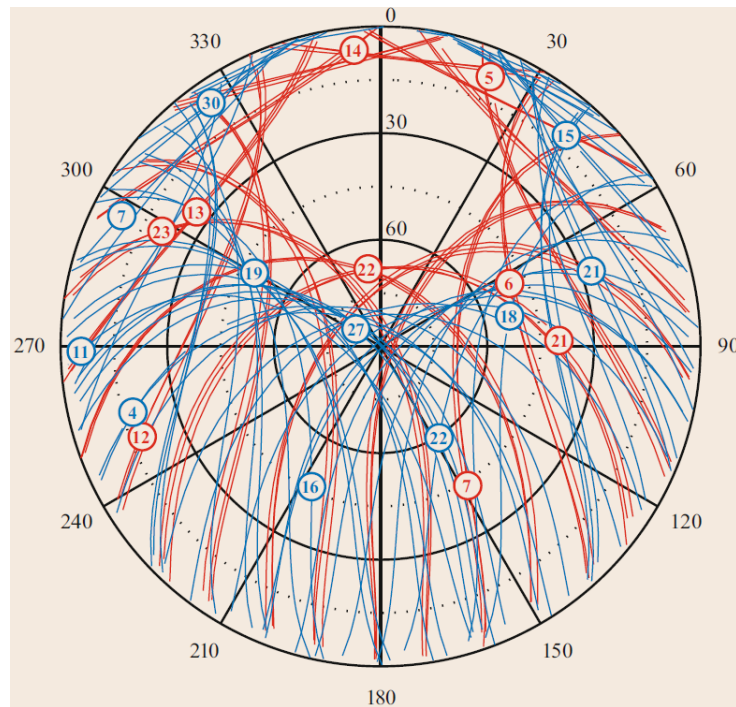
À elles quatre, les constellations GNSS représentent plus d'une centaine de satellites. De plus, il existe des systèmes régionaux et des systèmes d'augmentation SBAS (Space-Based Augmentation System) permettant d'améliorer localement la qualité du positionnement. Ainsi, le ciel au-dessus d'un utilisateur contient généralement environ une cinquantaine de satellites GNSS.

La majeure partie des satellites de positionnement se trouvent sur des orbites MEO (Medium Earth Orbit) à une altitude d'environ 20 000 km au-dessus du niveau de la mer. Les différents plans orbitaux contenant ces derniers présentent une inclinaison par rapport à l'équateur de  $55^\circ$  pour GPS et BeiDou,  $56^\circ$  pour Galileo et  $64,8^\circ$  pour GLONASS. Ces valeurs d'inclinaison sont telles que les zones du ciel en direction des pôles célestes<sup>2</sup> ne contiennent jamais de satellite. Ainsi, pour un observateur se trouvant dans l'hémisphère nord, cette zone dans le ciel est située vers le nord et réciproquement s'il se situe dans l'hémisphère sud. La Figure 2 est une représentation du ciel au-dessus d'une station située à Munich. Les graduations des différents secteurs représentent l'azimut alors que les cercles concentriques correspondent à l'élévation. Les arcs bleus (resp. rouges) montrent les trajectoires suivies par les satellites de positionnement GPS (resp. GLONASS) au cours d'une journée. On constate bien la présence d'une zone vide située vers le nord ( $0^\circ$  d'azimut). En outre, cette dernière est plus restreinte pour la constellation GLONASS étant donné que les plans orbitaux de celle-ci sont plus inclinés que ceux contenant les satellites GPS. (Teunissen & Montenbruck, 2017)

---

<sup>2</sup> Les pôles célestes correspondent aux directions dans le ciel se trouvant dans le prolongement de l'axe de rotation de la Terre.

**FIGURE 2 : Trajectoires dans le ciel des satellites GPS et GLONASS sur 24h pour une station située à Munich ( $\varphi = 48,8^\circ$  N) (Teunissen & Montenbruck, 2017)**



Par ailleurs, certains satellites BeiDou, les satellites SBAS et ceux appartenant aux systèmes régionaux se trouvent sur des orbites géostationnaires (GEO : Geostationary Orbit) ou géosynchrones inclinées (ISGO : Inclined Geo-Synchronous Orbit). Ils ne sont donc observables que depuis certaines régions. (Teunissen & Montenbruck, 2017)

Afin de faire référence à un satellite de positionnement en particulier, on peut utiliser la dénomination définie par le format RINEX<sup>3</sup>. Celle-ci consiste à identifier un satellite par une lettre capitale correspondant à la constellation suivie d'un nombre à deux chiffres associé à l'identifiant du satellite dans ladite constellation. Le Tableau 1 répertorie les lettres faisant référence aux différentes constellations. C'est cette nomenclature qui sera utilisée dans la suite de ce mémoire.

**TABEAU 1 : Identification des constellations GNSS définie par la nomenclature RINEX**

Constellation	Lettre
GPS	G
GLONASS	R
Galileo	E
BeiDou	C
SBAS	S

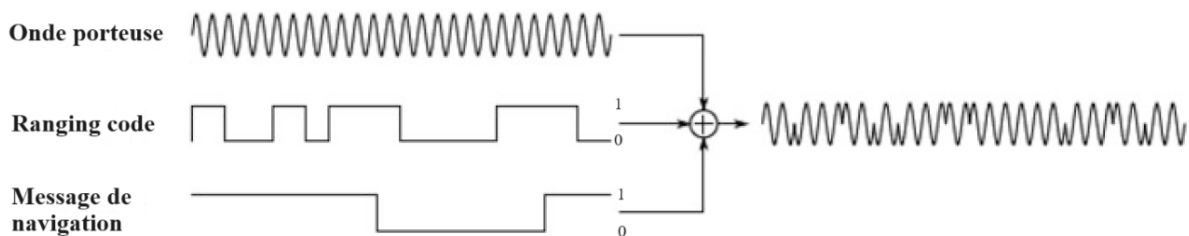
<sup>3</sup> RINEX signifie « Receiver INdependent EXchange ». Il s'agit d'un format d'échange de données GNSS qui ne dépend pas du récepteur utilisé.

## II - 1.4. Signaux GNSS

Un signal GNSS est composé d'une onde porteuse sur laquelle sont modulés deux types d'information : un « ranging code » et le message de navigation.

La porteuse est constituée d'une onde électromagnétique à polarisation<sup>4</sup> circulaire droite (RHCP : Right-Handed Circular Polarization) appartenant à la bande L<sup>5</sup>. Celle-ci comprend les fréquences situées entre 1 et 2 GHz ce qui correspond à une longueur d'onde d'environ 20 cm. Un ranging code est une séquence définie de 0 et de 1 synchronisée vis-à-vis d'une échelle de temps GNSS<sup>6</sup>. Celui-ci permet de déterminer la distance entre le satellite et le récepteur<sup>7</sup>. Le message de navigation correspond, quant à lui, à un ensemble d'informations nécessaires au positionnement transmis sous la forme d'un code binaire. Il contient, par exemple, les paramètres képlériens permettant de calculer la position des satellites. Ainsi, on comprend que l'onde porteuse n'est a priori que le vecteur physique permettant de transmettre le ranging code et le message de navigation. (Sanz Subirana et al., 2013)

FIGURE 3 : Structure des signaux GNSS (modulation de la phase), modifié d'après Ogaja (2022)



La Figure 3 illustre la manière dont les signaux GNSS sont générés. On constate que lorsque l'état du ranging code et du message de navigation est identique (1 et 1 ou 0 et 0), l'onde porteuse n'est pas modifiée. En revanche, lorsque qu'ils prennent des valeurs différentes (0 et 1 ou 1 et 0), l'onde porteuse est inversée. Ainsi, on dit que le ranging code et le message de navigation sont transmis par l'onde porteuse au travers d'une modulation de la phase.

Chaque constellation GNSS émet plusieurs signaux caractérisés par la fréquence de la porteuse et par le ou les ranging codes qu'ils contiennent. La Figure 4 montre les différentes plages de fréquences d'émission, aussi communément appelées « bandes », utilisées pour chaque constellation GNSS. En général, on constate que chaque bande a approximativement un équivalent dans les autres constellations. Ainsi, lorsqu'on souhaite faire référence aux différents signaux occupant la même plage de fréquences, on utilise parfois par commodité l'appellation de la bande GPS correspondante. Ainsi, on a :

- L1 qui fait référence à L1, G1, B1 et E1 ;
- L2 qui fait référence à L2, G2, B2b et E5b ;
- L5 qui fait référence à L5, G3, B2a et E5a.

Cette dénomination sera parfois utilisée plus loin dans ce mémoire.

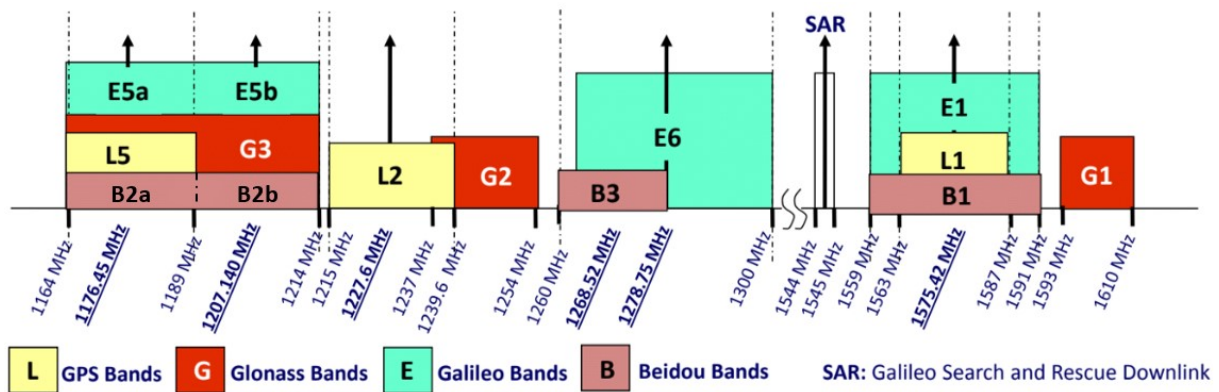
<sup>4</sup> La polarisation d'une onde décrit la direction d'oscillation du champ électrique qui la compose. On parle d'une polarisation linéaire lorsque cette direction est constante. Quand elle tourne dans le sens horaire (resp. antihoraire) dans le plan perpendiculaire à la propagation, on dit que l'onde a une polarisation circulaire droite (resp. gauche). (Hoffmann-Wellenhof et al., 2008)

<sup>5</sup> La bande L fait partie de la gamme des ondes radios.

<sup>6</sup> Selon Teunissen et Montenbruck, « un temps atomique fait référence à une échelle de temps définie et réalisée par les oscillations entre les états d'énergie du césium-133 ». Le temps atomique fournit une mesure de la seconde avec une très grande précision ce qui est nécessaire pour le positionnement par satellites. Chaque constellation GNSS possède sa propre échelle de temps atomique mais toutes sont compatibles à un nombre entier de secondes près. (Theunissen & Montenbruck, 2017)

<sup>7</sup> Voir plus loin la section sur les « Ranging codes ».

FIGURE 4 : Bandes d'émission des différentes constellations GNSS, modifié d'après Sanz Subirana et al. (2013)



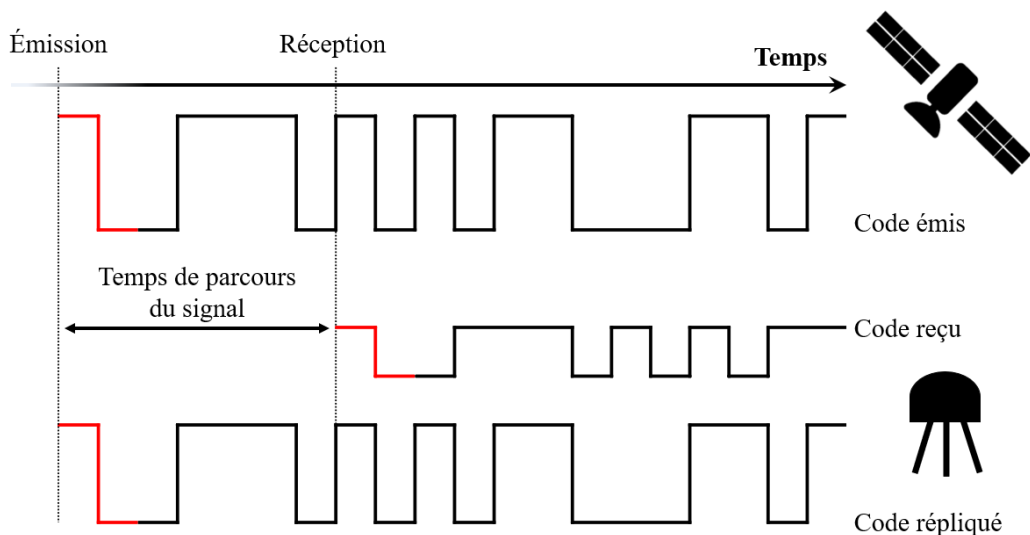
## II - 1.5. Observables

Maintenant que la structure des signaux GNSS a été définie, il convient de décrire les deux méthodes permettant de déterminer la distance entre un satellite et le récepteur. Chacune de ces techniques repose un type de mesure que l'on appelle « observable ».

- Ranging codes

Le positionnement basé sur les codes ou Single Point Positioning (SPP) est la méthode pour laquelle les GNSS ont initialement été conçus. Elle consiste à déterminer la distance satellite/utilisateur grâce à un ranging code connu par le récepteur. Pour ce faire, celui-ci va générer en continu une réplique du code dont l'état (1 ou 0) est défini à tout instant par la synchronisation établie vis-à-vis de l'échelle de temps GNSS. Étant donné que le satellite émet lui aussi le code selon cette même synchronisation, le déphasage entre le code reçu et le code généré au moment de la réception correspond au temps de parcours du signal. La Figure 5 illustre ce principe. On observe bien que les codes générés par le satellite et par le récepteur sont identiques à tout instant alors que le code reçu présente un déphasage lié au temps que le signal met pour parvenir à l'utilisateur. Finalement, pour calculer la distance qui sépare le satellite du récepteur, il suffit de multiplier ce temps par la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide soit environ 300 000 km/s. Une fois de plus, cette explication n'est correcte qu'en l'absence d'erreur de synchronisation des horloges et de propagation du signal.

FIGURE 5 : Détermination du temps de parcours du signal grâce au ranging code



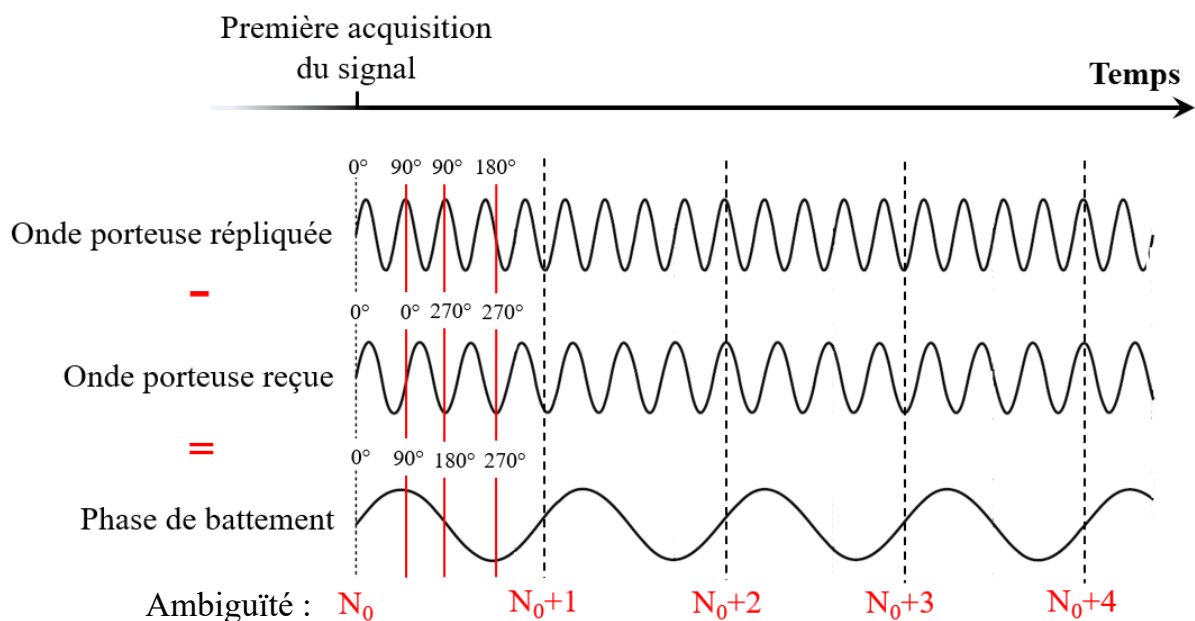
Intrinsèquement, les mesures de codes ont une résolution de quelques décimètres. Dans ce cas-ci, la résolution correspond à la plus petite variation de distance qui induit un changement perceptible au niveau du déphasage entre le code reçu et le code répliqué. (Teunissen & Montenbruck, 2017)

- Phases de l'onde porteuse

La seconde méthode de positionnement exploite directement l'onde porteuse afin de déterminer la distance entre le satellite et le récepteur. Le principe consiste à mesurer cette distance en nombre de longueurs d'onde, aussi communément appelées « cycles ». Pour cela, la plupart des récepteurs GNSS sont capables de mesurer la phase de battement. Celle-ci se définit comme la différence entre la phase de la réplique de l'onde porteuse générée par le récepteur et la phase de l'onde porteuse reçue. Cette différence de phase<sup>8</sup> multipliée par la longueur d'onde est égale à la distance satellite/récepteur. Les mesures de déphasage étant ambiguës, la partie entière du déphasage est inconnue. On ne connaît donc que la partie décimale du nombre total de cycles. Cependant, les mesures sont effectuées en continu. Il est donc possible de détecter, après la première acquisition du signal, une augmentation ou une diminution d'un cycle complet dans la phase de battement. De cette manière, la seule inconnue qui subsiste est le nombre entier de cycles qui séparent le satellite et le récepteur à la première époque d'observation : on parle de l'ambiguïté initiale. Cette dernière peut être estimée mathématiquement après un minimum de trois mesures successives.

La Figure 6 illustre la manière dont est calculée la phase de battement. D'abord, on peut remarquer que l'onde porteuse reçue présente une fréquence légèrement différente de celle de l'onde répliquée. Ceci s'explique par l'effet Doppler que subit le signal émis étant donné la vitesse radiale de déplacement du satellite dans la direction du récepteur. Les lignes rouges verticales indiquent, pour trois cas, la phase de battement calculée sur base des phases de la porteuse répliquée et de la porteuse reçue. En outre, on constate que l'ambiguïté lors de la première acquisition du signal est égale à  $N_0$ . Ensuite, le récepteur est capable de compter chaque nombre entier de cycle déjà enregistré. Ainsi, la seule inconnue dans la mesure de la phase de battement est l'ambiguïté initiale.

FIGURE 6 : Calcul de la phase de battement de l'onde porteuse



<sup>8</sup> Il est nécessaire de mesurer la phase de battement en fraction de cycles ( $[0,1]$ ) et non en degrés ou en radians.

La résolution des mesures de phases de battement est de l'ordre de quelques millimètres. Ainsi, le positionnement sur base des phases ou Precise Point Positioning (PPP) est bien plus précis que le SPP. Néanmoins, il est aussi plus complexe et coûteux en capacité CPU étant donné la nécessité de résoudre l'ambiguïté initiale après chaque perte du signal. (Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

## II - 1.6. Sources d'erreur

Jusqu'ici, le positionnement par satellites consiste en la résolution d'un problème géométrique dans lequel on souhaite déterminer les coordonnées d'un utilisateur sur base des distances qui le séparent d'au moins 3 satellites dont les positions sont connues. Si le principe initial semble relativement simple, les distances satellite/récepteur mesurées sont en fait affectées par une ensemble d'erreurs dont il est nécessaire de tenir compte. C'est pourquoi ces distances sont appelées « pseudodistances ».

- Erreurs d'horloges

Dans la Section II – 1.5., on a supposé que le signal était émis par le satellite et répliqué par le récepteur de manière parfaitement synchronisée vis-à-vis d'une échelle de temps GNSS. Ce n'est en réalité jamais le cas. D'une part, les horloges atomiques embarquées dans les satellites présentent une erreur de synchronisation qui varie légèrement au cours du temps. Étant donné leur stabilité, il est possible de modéliser et corriger cette erreur grâce à des paramètres transmis dans le message de navigation. D'autre part, les horloges des récepteurs sont, quant à elles, bien moins précises que celles des satellites. L'erreur de synchronisation correspondante présente donc une forte variabilité d'une époque à l'autre. Ainsi, il n'est que rarement possible de la modéliser. Il est par conséquent nécessaire de l'estimer, à chaque époque, au même titre que les 3 coordonnées spatiales. Cette inconnue supplémentaire explique pourquoi il est en réalité obligatoire de disposer d'un minimum de 4 satellites pour être en mesure de calculer une position. Les défauts de synchronisation des horloges provoquent une erreur de plusieurs centaines de kilomètres sur les pseudodistances. (Sanz Subirana et al., 2013)

- Effets atmosphériques

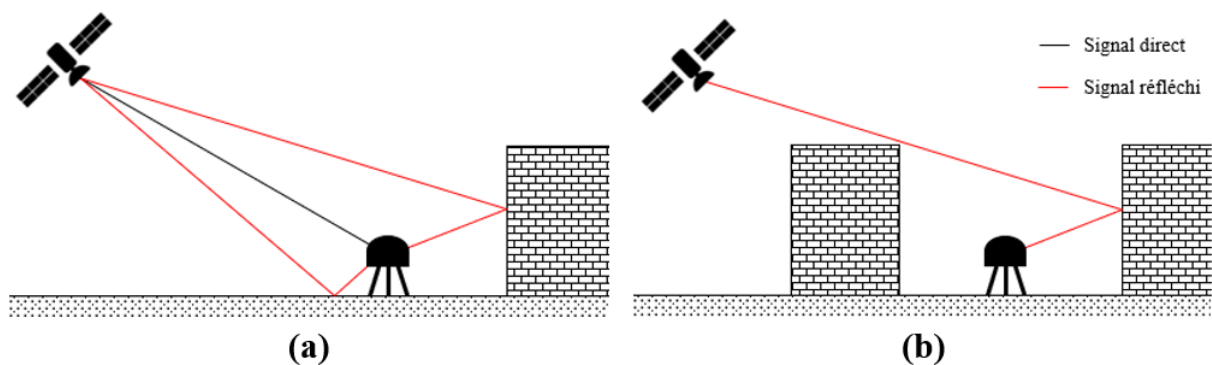
Afin de déterminer la distance entre le satellite et le récepteur, on a supposé que le signal se déplaçait en ligne droite et à la vitesse de la lumière. Cependant, l'atmosphère va dévier et modifier la vitesse de propagation de l'onde à cause de la réfraction. Ceci va avoir pour influence de perturber le temps de parcours du signal et par conséquent la distance mesurée entre le satellite et le récepteur. Si on veut classer les couches atmosphériques du point de vue de la propagation des ondes radio, on distingue généralement : la troposphère (entre 0 et 50 km d'altitude) et l'ionosphère (entre 50 et environ 2000 km d'altitude). L'erreur troposphérique dépend des conditions de pression, de température et d'humidité sur le chemin entre le satellite et le récepteur tandis que l'erreur ionosphérique est liée à la quantité d'électrons libres sur ce même trajet. Cette dernière quantité dépend de plusieurs paramètres comme l'activité solaire, le champ magnétique terrestre ou encore l'heure locale. Ces deux sources d'erreur peuvent être modélisées de différentes manières selon la précision désirée. Par ailleurs, les effets atmosphériques sont plus importants lorsque l'élévation du satellite diminue. Ceci provient du fait que la portion d'atmosphère traversée par le signal augmente. Les effets atmosphériques induisent une erreur allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres sur les pseudodistances. (Teunissen & Montenbruck, 2017)

- Multitrajet

Comme le montre la Figure 7a, il est fréquent que le récepteur GNSS reçoive des signaux réfléchis par les objets environnants en plus du signal provenant directement du satellite. Ainsi, le signal capté par l'antenne est une combinaison du signal direct et des signaux réfléchis ce qui va perturber les mesures de codes et de phases. Cette source d'erreur s'appelle le multitrajet. Bien qu'il soit difficilement modélisable, il existe une série de techniques software et hardware permettant de limiter son influence sur le positionnement.

Le multitrajet ne doit pas être confondu avec le « shadowing » qui correspond à la situation dans laquelle le récepteur GNSS ne reçoit pas le signal direct et effectue les mesures sur un signal réfléchi (Figure 7b). Cette configuration est fréquente lorsque le récepteur se trouve dans un canyon urbain. (Teunissen & Montenbruck, 2017)

FIGURE 7 : Multitrajet et shadowing



- Autres sources d'erreur

Le défaut de synchronisation des horloges, les perturbations atmosphériques et le multitrajet sont les principales erreurs affectant les mesures GNSS. Cependant, il existe d'autres effets ayant une influence plus limitée sur la qualité du positionnement. On peut par exemple citer les erreurs d'orbites, les marées terrestres ou encore la « phase center variation » (PCV). Ce dernier effet provient du fait que le point dans l'espace où l'antenne effectue les mesures varie en fonction de l'élévation du satellite, de son azimut et de la fréquence du signal reçu. Toutes ces erreurs ne dépassent généralement pas le mètre. Elles sont donc négligées en SPP étant donné la résolution intrinsèque du ranging code. En revanche, il est nécessaire de corriger ces erreurs dans le cadre du PPP si l'on souhaite tirer profit au maximum de la haute résolution des mesures de phases.

## II - 1.7. Positionnement différentiel

Le positionnement différentiel consiste à corriger une partie des erreurs grâce à des mesures effectuées par une station de base. Une station de base est un récepteur GNSS fixe dont la position est connue avec une grande précision. Ainsi, les mesures effectuées par cette référence sont utilisées pour calculer les erreurs affectant les signaux GNSS reçus par les utilisateurs itinérants. Le positionnement différentiel repose donc sur un réseau de stations de références capables de transmettre des corrections dites « différentielles » aux utilisateurs. Étant donné que les effets atmosphériques varient avec la position du récepteur et celle des satellites, la validité et par conséquent l'efficacité de ces corrections décroissent lorsque la distance entre l'utilisateur et la station de base augmente. Le positionnement différentiel basé sur les codes est appelé DGNSS (Differential GNSS) tandis que celui basé sur les phases est appelé RTK (Real Time Kinematic). (Hofmann-Wellenhof, 2008)

Le Tableau 2 ci-dessous donne le niveau d'exactitude attendu des différentes méthodes de positionnement abordées.

**TABLEAU 2 : Niveau d'exactitude des différentes méthodes de positionnement**

	<b>SPP</b>	<b>PPP</b>	<b>DGNSS</b>	<b>RTK</b>
<i>Niveau d'exactitude</i>	> 2 m	3 – 20 cm	< 1 m	< 3 cm

## II - 1.8. Récepteurs GNSS

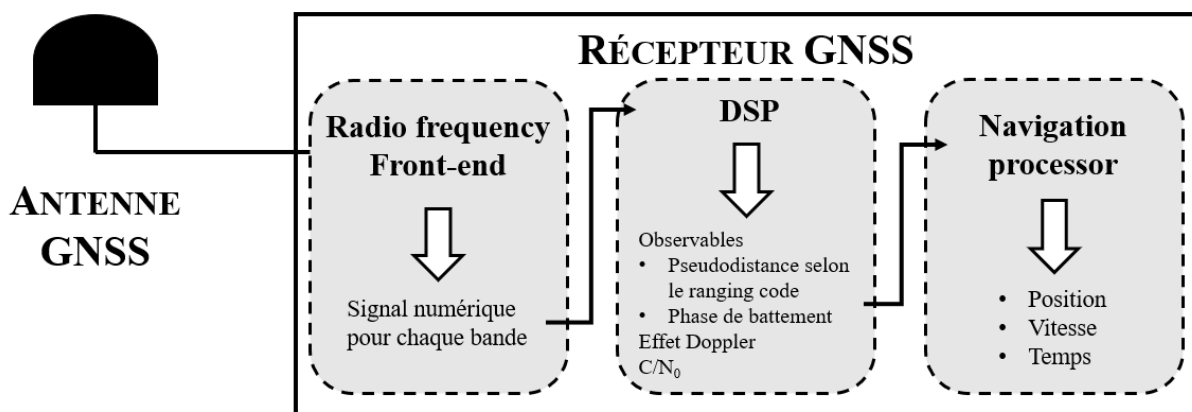
Les traitements appliqués par un récepteur GNSS peuvent être envisagés au travers de trois niveaux fonctionnels permettant d'exploiter les signaux transmis par l'antenne afin d'effectuer les mesures de codes et de phases ainsi que de calculer des positions.

- Le « radio frequency front-end » sépare les composantes du signal issu de l'antenne se trouvant dans les différentes bandes de fréquences GNSS. Ce niveau convertit aussi le signal analogue en un signal numérique.
- Le DSP (Digital Signal Processor) compare, pour chaque ranging code disponible dans la bande et supporté par le récepteur, le signal issu du niveau précédent et la réplique générée. Ceci permet de déterminer, pour chaque combinaison onde porteuse/code/satellite, la pseudodistance et la phase de battement. En plus de ces observables, le DSP fournit aussi une mesure de l'effet Doppler subi par les signaux lié à la vitesse radiale des satellites dans la direction du récepteur lors de l'émission et du Carrier-to-Noise ratio ( $C/N_0$ ). Cette dernière valeur représente la puissance du signal par rapport au niveau de bruit.
- Le « navigation processor » décode le message de navigation, détermine la position des satellites, corrige les erreurs affectant les observables et, finalement, calcule la solution PVT. (Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

Le diagramme de la Figure 8 est une représentation des trois blocs fonctionnels décrits ci-dessus qui constituent le récepteur GNSS. On constate que les traitements sont effectués de manière séquentielle puisque les résultats de chaque niveau sont passés en entrée au bloc suivant.

Il existe une grande variété de récepteurs GNSS dont les performances et le prix dépendent d'un grand nombre de paramètres comme les signaux pouvant être traités, la qualité des mesures ou encore les types de positionnements supportés.

**FIGURE 8 : Structure d'un récepteur GNSS**



## II - 1.9. Antennes GNSS

Les antennes GNSS sont principalement caractérisées par les fréquences qu'elles sont capables de capter et par les méthodes permettant de limiter l'influence du multitrajet qu'elles implémentent comme la polarisation ou la directivité.

Lorsqu'une onde GNSS est réfléchiée sur une surface, le produit de la réflexion contient une composante RHCP et une composante LHCP dont les puissances respectives dépendent de la loi de Brewster. Cette dernière définit l'angle de Brewster  $\theta_B$  comme l'angle incident au niveau duquel les portions RHCP et LHCP ont la même puissance. On a :

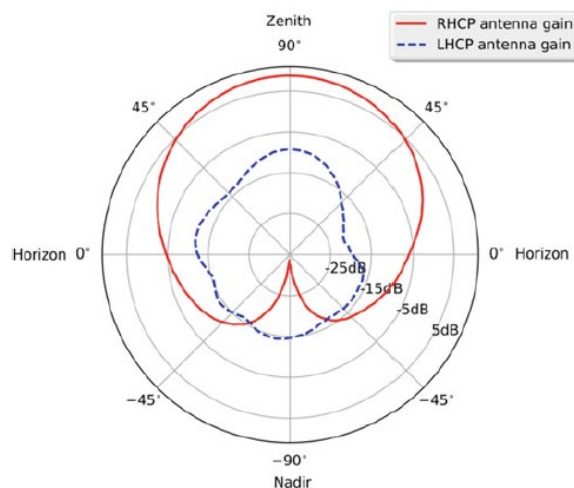
$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{n_a}{n_s} \right) \quad (1)$$

où  $n_a$  et  $n_s$  sont respectivement les indices de réfraction de l'air et du milieu qui compose la surface réfléchissante. En outre, on sait que la puissance de l'onde LHCP réfléchiée augmente avec l'angle d'incidence mesuré par rapport à la surface. (Guerova & Simeonov, 2022)

La polarisation d'une antenne décrit la direction dans laquelle les mesures vont être effectuées sur le champ électrique du signal capté. Étant donné la polarisation des ondes GNSS émises, on utilise généralement des antennes RHCP pour le positionnement. Idéalement, ce choix devrait empêcher les ondes LHCP réfléchies de contribuer au multitrajet. Cependant, les antennes ne sont pas parfaites et présentent toujours une légère sensibilité aux signaux LHCP. Par ailleurs, on peut aussi utiliser des antennes polarisées linéairement (horizontalement ou verticalement) pour capter les signaux GNSS. Ces dernières présentent l'avantage d'être particulièrement compactes. Néanmoins, elles sont incapables de faire la différence entre les ondes RHCP ou LHCP. Elles sont donc plus sujettes au multitrajet que les antennes polarisées circulairement. (Yu, 2021)

Le gain d'une antenne définit la proportion de la puissance du signal que l'antenne est capable d'enregistrer. Cette valeur varie généralement en fonction de la direction (élévation et azimut) d'où provient l'onde. Ainsi, en GNSS, on va maximiser le gain de l'antenne dans la demi-sphère orientée vers le ciel et le minimiser dans les directions opposées : on parle d'une augmentation de la directivité de l'antenne. Ceci permet de limiter l'influence des signaux réfléchis provenant d'une élévation négative. La Figure 9 illustre le gain d'une antenne RHCP directive. On remarque aussi la présence d'un faible gain pour les signaux LHCP lié à l'imperfection des antennes évoquée ci-dessus. Pour les stations de base, on fixe souvent l'antenne sur une « chokering » ou sur une « ground plane » qui sont des dispositifs qui permettent de diminuer encore le gain pour les élévations négatives. (Teunissen & Montenbruck, 2017)

FIGURE 9 : Gain d'une antenne GNSS RHCP directive (Yu, 2021)



## II - 2. Humidité du sol

L'humidité du sol correspond à la partie des précipitations stockée temporairement dans les couches supérieures du sol avant de rejoindre l'atmosphère via l'évapotranspiration, s'écouler vers les rivières ou s'infiltrer dans les nappes d'eau souterraines. Il s'agit d'une variable essentielle dans un ensemble de domaines comme l'hydrologie, l'écologie, l'agriculture et la climatologie. Ainsi, l'humidité du sol influence :

- la balance entre l'infiltration et le ruissellement lors des précipitations ce qui conditionne l'érosivité des épisodes de pluie ;
- la réponse des écosystèmes en cas de stress hydrique ou de sécheresse ;
- la recharge des aquifères ;
- la magnitude et la fréquence des inondations ;
- le contenu en eau des récoltes et de la végétation ;
- le flux de chaleur latente.

(Larson et al., 2007)

Généralement, on décompose le sol en différentes couches, appelées horizons, selon les caractéristiques qu'elles présentent. Les 20 premiers centimètres sont très poreux, riches en matière organique et contiennent le système racinaire de la végétation basse : c'est l'horizon O. De 20 à 50 cm et de 50 cm à 3 m, on trouve les horizons A et B caractérisés par une plus faible porosité et abritant les racines des arbres. Finalement, l'horizon C (entre 3 et 5 m) est la couche surplombant la roche en place et qui contient les nappes d'eau souterraines. Généralement, l'humidité du sol fait référence à la quantité d'eau contenue dans les horizons O, A et B. (Guerova & Simeonov, 2022)

### II - 2.1. Méthodes de mesure

À présent, il convient de donner un aperçu des méthodes utilisées pour déterminer l'humidité du sol. On les classe généralement en fonction de la résolution spatiale qu'elles sont capables d'offrir.

Au niveau local, on peut mesurer l'humidité du sol en effectuant des échantillonnages ou grâce à des capteurs à enterrer ou à planter dans le sol appelés « humidimètres ». Ces méthodes présentent une résolution spatiale allant de 10 cm à 1 m mais sont coûteuses et chronophages, particulièrement lorsqu'une grande résolution temporelle est nécessaire. De plus, l'humidité du sol présente une forte variabilité dans l'espace ; un grand nombre de mesures est donc requis pour reconstituer au mieux l'état de cette variable dans une zone donnée. Par ailleurs, ces techniques sont parfois destructives ce qui signifie qu'elles altèrent la structure du sol étudié. Ainsi, elles ne sont généralement mises en place qu'à petite échelle. (Awange, 2018)

À plus grande échelle, l'humidité du sol est déterminée grâce à des capteurs actifs ou passifs embarqués sur des satellites LEO (Low Earth Orbit à environ 700 km d'altitude). Les capteurs actifs sont des radars qui émettent des ondes électromagnétiques vers la Terre et enregistrent la puissance des signaux réfléchis vers le satellite. Ceci permet de déterminer l'humidité du sol lorsque la bande d'émission y est particulièrement sensible. Les bandes L<sup>9</sup> (~ 20 cm de longueur d'onde) et P (~ 50 cm de longueur d'onde) sont généralement utilisées. À l'inverse, les capteurs passifs ne possèdent pas leur propre source d'énergie. Ils fonctionnent comme des radiomètres qui enregistrent la radiation naturelle de la surface de la Terre et le produit de la réflexion des émissions solaires. De ce fait, ces capteurs ont une moins bonne résolution spatiale mais une meilleure résolution temporelle par rapport à la méthode active. Généralement, les capteurs embarqués sur les satellites combinent ces deux techniques. Ainsi, on peut citer la mission SMOS de l'ESA, lancée en 2009, qui offre un monitoring global de l'humidité du sol

---

<sup>9</sup> La bande L est sensible à l'humidité du sol entre 0 et 5 cm de profondeur (Larson et al., 2007).

tous les 1 à 3 jours avec une résolution spatiale de 30 à 50 km. En outre, depuis 2015, la mission SMAP de la NASA fournit des mesures similaires mais avec une résolution spatiale allant de 3 à 36 km. Aujourd'hui, les données issues de certains satellites radars permettent d'obtenir une valeur d'humidité du sol tous les km<sup>2</sup>. Cependant, il existe toujours un compromis entre la résolution spatiale et temporelle. Ainsi, des mesures fréquentes auront tendance à souffrir d'une faible résolution spatiale et réciproquement. (Awange, 2018)

L'humidité du sol peut aussi être mesurée grâce à d'autres méthodes comme l'utilisation de radiomètres terrestres ou de capteurs hyperspectraux embarqués sur des drones. Néanmoins, ces techniques sont encore très coûteuses et ne sont donc pas souvent utilisées dans les faits.

## II - 3. Réflectométrie GNSS

La réflectométrie GNSS, ou GNSS-R, consiste à analyser les signaux GNSS réfléchis afin de mesurer certaines propriétés de la surface réfléchissante. Cette méthode a été envisagée dans les années 1990 par la communauté scientifique et correspond à un usage détourné du positionnement par satellites permettant de réaliser de la télédétection (Yu, 2021). Plus précisément, la GNSS-R fonctionne selon le principe du radar bistatique dans lequel l'émetteur et le récepteur sont séparés par une distance significative. Les ondes étant émises par différentes sources (potentiellement l'ensemble des satellites GNSS), on parle même de radar multistatique (Jin et al., 2014).

On peut distinguer différentes méthodes de GNSS-R en fonction : du type de récepteur utilisé qu'il soit dédié à la réflectométrie ou non, de la plateforme qui le transporte ou encore la métrique exploitée pour analyser le signal. Le récepteur peut être basé au sol, aéroporté ou embarqué sur un satellite LEO. Généralement, les signaux réfléchis sont étudiés par le biais de la puissance du signal réfléchi (souvent approximée par le SNR<sup>10</sup>), de l'effet Doppler affectant les ondes ou de la phase de la porteuse. (Guerova & Simeonov, 2022)

La GNSS-R présente une série d'avantages par rapport aux méthodes classiques de télédétection. D'abord, le grand nombre de satellites GNSS en orbite permet de réaliser simultanément jusqu'à une cinquantaine de mesures. Par ailleurs, les récepteurs sont relativement compacts, présentent une consommation énergétique réduite et peuvent capter des signaux de très faible puissance. De plus, contrairement aux radiomètres, ils ne sont pas affectés par la température ambiante (Awange, 2018). Enfin, la sensibilité de la bande L aux propriétés des surfaces permet d'étudier une grande variété de paramètres grâce à la réflectométrie GNSS comme :

- la vitesse du vent au-dessus des étendues d'eau ;
  - l'altimétrie ;
  - l'amplitude des marées et la hauteurs des vagues ;
  - la permittivité diélectrique des surfaces ;
  - la salinité des océans ;
  - la hauteur de neige ;
  - la présence de glace de mer ;
  - l'intensité des ouragans ;
  - les caractéristiques de la végétation (hauteur, densité, contenu en eau,...) ;
  - l'humidité du sol.
- (Yu, 2021)

En GNSS-R, le multitrajet, dont on tente de limiter l'influence en positionnement, représente aussi une source d'information. Dans le même esprit, il est possible d'exploiter d'autres erreurs affectant les signaux GNSS afin de mesurer des paramètres géophysiques. Ainsi, les effets ionosphériques et troposphériques peuvent être utilisés pour étudier respectivement la quantité d'électrons libres dans l'ionosphère et des variables météorologiques comme la température, la pression ou l'humidité atmosphérique. (Guerova & Simeonov, 2022)

Malgré l'intérêt accru pour la réflectométrie GNSS observé ces dernières années, il s'agit d'un domaine peu mature qui nécessite encore du travail de la part de la communauté scientifique afin de rendre cette technique pleinement exploitable (Yu, 2021).

---

<sup>10</sup> Le SNR est une métrique basée sur le  $C/N_0$  (voir plus loin la section expliquant le « Calcul du SNR par le récepteur »).

## II - 3.1. Fondamentaux de la GNSS-R

Cette section va fixer les principes fondamentaux de la réflectométrie GNSS. Pour ce faire, plusieurs équations vont être énoncées. Afin d'éviter les redondances, les différentes variables ne seront définies qu'une seule fois et les notations introduites seront conservées tout au long de ce mémoire. Néanmoins, pour faciliter la compréhension du lecteur, ces dernières seront parfois rappelées dans le texte.

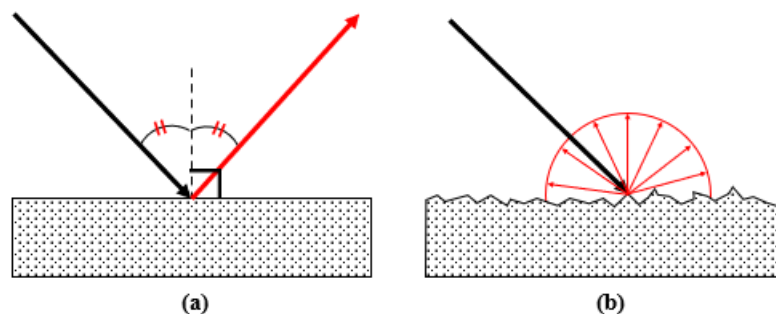
- Types de réflexion

Étant donné que la réflectométrie étudie les signaux GNSS réfléchis, il convient de présenter les deux types de réflexion pouvant affecter les ondes électromagnétiques lors de la transition entre 2 milieux dont les indices de réfraction sont différents.

En optique géométrique<sup>11</sup>, on distingue deux types extrêmes de réflexion.

- La réflexion spéculaire désigne le cas dans lequel l'onde incidente est réfléchi dans la direction opposée. Mesuré par rapport à la normale à la surface de transition entre les 2 milieux, l'angle d'incidence est alors égal à l'angle de réflexion. (Figure 10a)
- La réflexion diffuse correspond à la situation où l'onde incidente est réfléchi uniformément dans toutes les directions. (Figure 10b)

FIGURE 10 : Cas limites de réflexion des ondes électromagnétiques en optique géométrique : (a) réflexion spéculaire et (b) réflexion diffuse

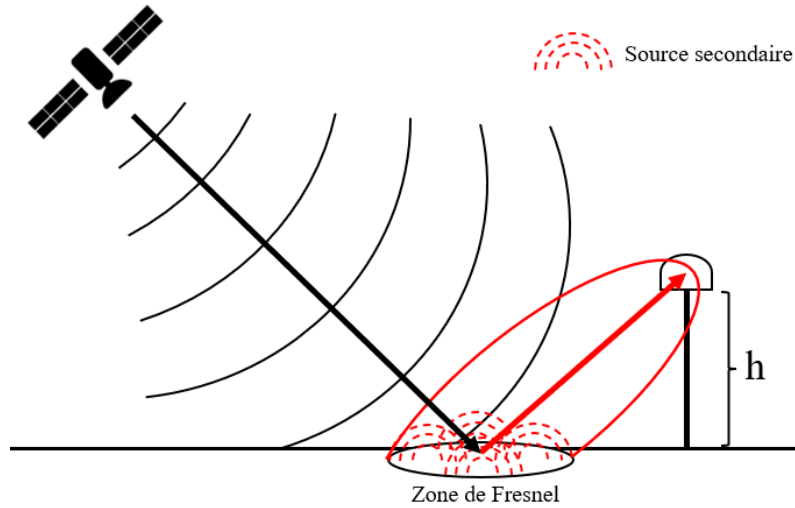


En réalité, il existe un continuum entre ces deux types de réflexion : on observe une composante spéculaire et une composante diffuse dans différentes proportions en fonction de la rugosité de la surface réfléchissante. Ainsi, la réflexion sera principalement spéculaire si la surface est lisse alors que la composante diffuse sera dominante si les aspérités de la surface sont de l'ordre de la longueur d'onde de la porteuse ( $\lambda$ ). (Jin et al, 2014)

Lorsque l'on envisage la réflexion en optique ondulatoire, le principe de Huygens-Fresnel explique que chaque point appartenant au front d'onde agit comme une source secondaire d'une onde sphérique. Ainsi, on comprend que l'onde résultant de la réflexion sur une surface (et ce quelle que soit sa rugosité) ne provient pas uniquement du point spéculaire mais d'une zone qui contient un ensemble de sources secondaires (Jin et al, 2014). La Figure 11 illustre le principe de réflexion spéculaire selon la théorie de l'optique ondulatoire. On constate que le signal émis par le satellite arrive au niveau de l'entièreté de la surface réfléchissante ce qui crée en tout point une source secondaire. Néanmoins, seules celles se trouvant au sein d'une certaine surface ellipsoïdale participent de manière significative au signal enregistré par l'antenne.

<sup>11</sup> L'optique géométrique envisage les ondes électromagnétiques comme des rayons en ignorant leur caractère ondulatoire.

FIGURE 11 : Réflexion spéculaire en optique ondulatoire et zone de Fresnel



Dans ce cadre, Fresnel a donné une définition mathématique de la zone « qui contribue le plus<sup>12</sup> » au signal réfléchi reçu en un point situé à une hauteur  $h$  par rapport à la surface : on parle de la première zone de Fresnel ou FFZ (First Fresnel Zone) (Jin et al, 2014). Étant donné que les signaux GNSS arrivent rarement perpendiculairement à la surface, la FFZ a une forme ellipsoïdale comme on peut le voir dans la Figure 11. Dans le cas d'une surface plane et horizontale, les paramètres de cette ellipse sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{\sqrt{\lambda h \sin(\theta) + \lambda^2/4}}{(\sin(\theta))^2} \\
 b &= \frac{\sqrt{\lambda h \sin(\theta) + \lambda^2/4}}{\sin(\theta)} \\
 d &= \left(\frac{\lambda}{2} + h \sin(\theta)\right) \frac{\cos(\theta)}{(\sin(\theta))^2}
 \end{aligned} \tag{2}$$

(Yu, 2021)

où :

- $a$  et  $b$  sont respectivement le demi-grand axe et le demi-petit axe de l'ellipse ;
- $d$  est la distance entre le point au nadir de l'antenne et le centre de l'ellipse ;
- $\theta$  est l'élévation du satellite ;
- $\lambda$  est la longueur d'onde de la porteuse du signal.

(L'Annexe 1 contient le développement mathématique permettant d'arriver aux Équations (2).)

Par ailleurs, l'ellipse est orientée de telle sorte que le demi-grand axe ( $a$ ) soit dans la direction opposée à celle du satellite qui émet de signal. Ainsi, si le satellite se trouve à un azimut  $Z$ , alors la FFZ sera dirigée vers  $Z + 180^\circ$  (modulo  $360^\circ$ ).

Grâce aux Équations (2), on remarque que la taille de la première zone de Fresnel et son éloignement par rapport au point de mesure augmente avec la hauteur de l'antenne et la longueur d'onde. En revanche, ces paramètres diminuent lorsque l'élévation du satellite augmente.

<sup>12</sup> Cette zone correspond à la surface horizontale au sol où l'onde peut être réfléchie sans que la différence de trajet parcouru ne dépasse de plus de  $\frac{\lambda}{2}$  la distance effectuée par l'onde réfléchie au niveau du point spéculaire.

- Modèle mathématique du multitrajet

À présent, il convient d'énoncer les équations fondamentales qui permettent de modéliser le signal composite reçu par l'antenne. Celui-ci est constitué par la somme du signal provenant directement du satellite et des signaux réfléchis par les surfaces environnantes. On a :

$$s(t) = A_d(t) \sin(\psi(t)) + \sum_{i=1}^R \alpha_r^i A_d(t) \sin(\psi(t) + \delta_\psi^i(t)) \quad (3)$$

$$\alpha_r^i = \frac{A_m^i(t)}{A_d(t)} \quad (4)$$

où :

- $s(t)$  est le signal composite reçu au niveau de l'antenne ;
- $A_d(t)$  et  $A_m^i(t)$  sont respectivement les amplitudes du signal direct et du  $i^{\text{ème}}$  signal réfléchi ;
- $\psi(t) = 2\pi(\phi(t) + N_0)$  avec  $\phi(t)$  la phase de battement de la porteuse et  $N_0$  l'ambiguïté initiale (toutes deux en nombre de cycles) ;
- $R$  correspond au nombre de signaux réfléchis atteignant l'antenne ;
- $\alpha_r^i \in [0 ; 1]$  est le facteur d'atténuation de l'amplitude AAF<sup>13</sup> du  $i^{\text{ème}}$  signal réfléchi ;
- $\delta_\psi^i(t)$  est l'excès de phase, ou phase interférométrique, du  $i^{\text{ème}}$  signal réfléchi par rapport à la phase du signal direct (en radians).

Si on considère une seule source de réflexion, l'Équation (3) devient :

$$s(t) = A_d(t) \sin(\psi(t)) + \alpha_r A_d(t) \sin(\psi(t) + \delta_\psi(t)) \quad (5)$$

L'Équation (5) montre que les deux composantes du signal ont la même forme mais présentent un déphasage  $\delta_\psi(t)$  qui varie en fonction du temps. Ainsi,  $s(t)$  est aussi un signal sinusoïdal dont les oscillations reflètent l'état destructif (en opposition de phase) ou constructif (en phase) de l'interférence entre l'onde directe et l'onde réfléchie. C'est cette interférence qui est étudiée en GNSS-R. On parle donc parfois de réflectométrie interférométrique<sup>14</sup>.

Afin de ne conserver qu'un seul terme sinusoïdal, le signal composite atteignant l'antenne  $s(t)$  peut s'écrire comme :

$$s(t) = \rho_M(t) A_d(t) \sin(\psi(t) + \Delta\psi_M(t)) \quad (6)$$

où :

- $\rho_M(t)$  est l'effet du multitrajet sur l'amplitude du signal composite ;
- $\Delta\psi_M(t)$  est l'excès de phase de battement du signal composite induit par le multitrajet.

(Ces variables ne doivent pas être confondues avec  $\alpha_r$  et  $\delta_\psi(t)$  qui caractérisent le signal réfléchi uniquement.)

<sup>13</sup> Dans la littérature scientifique, on parle de « Amplitude Attenuation Factor ».

<sup>14</sup> L'interférométrie est un procédé de mesure qui utilise le phénomène d'interférence des ondes.

Sur base des Équations (5) et (6), on peut déduire :

$$\rho_M(t) = \sqrt{1 + \alpha_r^2 + 2\alpha_r \cos(\delta_\psi(t))} \quad (7)$$

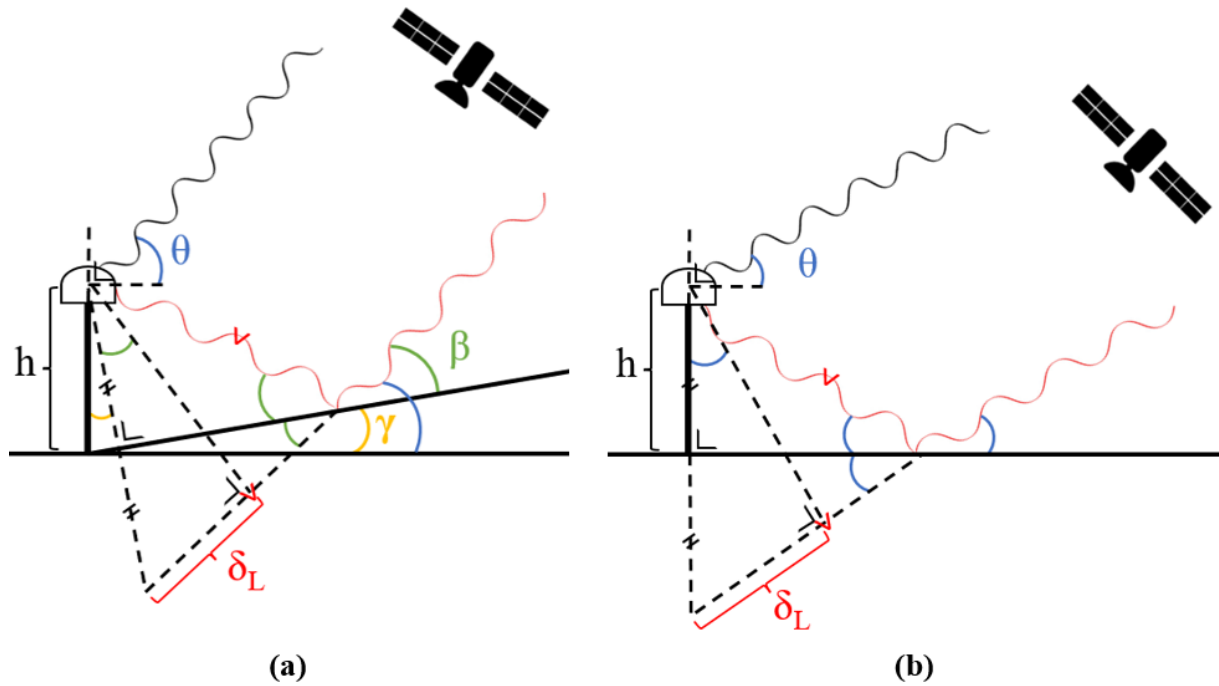
et

$$\Delta\psi_M(t) = \tan^{-1} \left( \frac{\alpha_r \sin(\delta_\psi(t))}{1 + \alpha_r \cos(\delta_\psi(t))} \right) \quad (8)$$

(Le développement mathématique complet se trouve dans l'Annexe 2.)

L'Équation (7) montre que  $\rho_M(t)$  est systématiquement supérieur à 1 lorsque l'antenne capte un signal réfléchi. Ainsi, l'amplitude du signal composite lié au multitrajets est toujours plus importante que celle du signal direct seul. En outre, en positionnement, le modèle présenté dans l'Équation (8) est parfois utilisé pour corriger l'effet du multitrajets lié à la réflexion sur une surface horizontale des mesures de phases de battement.

FIGURE 12 : Géométrie du multitrajets lié à une unique source de réflexion spéculaire



Géométriquement, il est possible d'extraire le modèle permettant de calculer la phase interférométrique  $\delta_\psi(t)$ . Dans la Figure 12, on considère que l'antenne se trouve à une hauteur  $h$  de quelques mètres. Les satellites GNSS se trouvant à environ 20 000 km d'altitude, on peut raisonnablement admettre que le signal direct et le signal réfléchi arrivent parallèlement l'un à l'autre. Ainsi, lorsque la surface réfléchissante est inclinée d'un angle  $\gamma$  par rapport à l'horizontale locale et pour un satellite à une élévation  $\theta$ , les angles incidents et réfléchis  $\beta$  mesurés à partir de la surface valent :

$$\beta = \theta - \gamma \quad (9)$$

Dans Figure 12a, on a prolongé (en pointillés) le signal incident à la surface d'une distance égale à celle qui sépare le point de réflexion et l'antenne. En traçant, à partir du centre de cette dernière, la perpendiculaire aux ondes émises par le satellite, on peut définir sur le prolongement tracé la distance excédentaire  $\delta_L$  parcourue par le signal réfléchi. C'est donc cette valeur que l'on souhaite pouvoir

exprimer en fonction de la géométrie de la réflexion. Grâce aux propriétés trigonométriques des triangles rectangles, on obtient :

$$\delta_L = 2h \cos(\gamma) \sin(\beta) \quad (10)$$

Dès lors, les Équations (9) et (10) permettent d'exprimer  $\delta_L$  en fonction de la hauteur de l'antenne, de la pente de la surface et de l'élévation du satellite.

Dans la Figure 12b, par rapport à ce qui a été fait pour la Figure 12a, le même développement géométrique a été réalisé à la différence que la surface réfléchissante a été fixée comme étant parfaitement horizontale, c'est-à-dire que  $\gamma = 0^\circ$ . De ce fait, on constate que l'angle incident mesuré à partir de la surface devient égal à l'élévation du satellite, on a :  $\beta = \theta$ . Ainsi, sous cette hypothèse et avec la Relation (9), l'Équation (10) devient :

$$\delta_L = 2h \sin(\theta) \quad (11)$$

Afin de transformer cette distance excédentaire  $\delta_L$  en radians pour obtenir la phase interférométrique  $\delta_\psi$ , il suffit de la diviser par la longueur d'onde de la porteuse  $\lambda$  (on obtient alors le nombre de cycles excédentaires) et de multiplier par  $2\pi$ , ce qui donne :

$$\delta_\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta_L = \frac{4\pi}{\lambda} h \sin(\theta) \quad (12)$$

La longueur d'onde de la porteuse étant fixe, on remarque grâce à l'Équation (12) que l'excès de phase du signal réfléchi ne dépend que de la hauteur de l'antenne par rapport au sol et de l'élévation du satellite émetteur dans le cas où la surface réfléchissante est parfaitement horizontale.

## Chapitre III : ÉTAT DE L'ART

Maintenant que les principes théoriques fondamentaux des GNSS, de l'humidité du sol et de la réflectométrie GNSS ont été présentés, ce chapitre a pour but d'évoquer les méthodes développées dans la littérature scientifique permettant d'estimer l'humidité du sol par GNSS-R.

On commencera par présenter les techniques nécessitant un récepteur dédié à la réflectométrie GNSS avant d'aborder les méthodes pouvant être appliquées sur les données issues d'un récepteur GNSS classique. Finalement, étant donné les objectifs de ce mémoire, une attention particulière sera portée aux techniques exploitant les récepteurs « low-cost » et le SNR.

### III - 1. Méthodes utilisant les récepteurs dédiés à la GNSS-R

Les récepteurs conçus pour la réflectométrie GNSS sont toujours équipés d'au moins deux antennes : une RHCP orientée vers le zénith pour enregistrer les signaux directs et une LHCP orientée vers le nadir pour capter les signaux réfléchis. Parfois, ces antennes sont capables de fournir séparément les composantes à polarisation horizontale et verticale du signal reçu. Par ailleurs, afin d'améliorer la qualité des mesures, certains récepteurs disposent d'une troisième antenne RHCP orientée vers le nadir qui permet d'enregistrer aussi la portion RHCP du signal réfléchi. Ces deux dernières configurations permettent, lors du traitement des données, de supprimer mathématiquement des observations l'effet de la rugosité de la surface réfléchissante. (Edokossi et al, 2020)

#### III - 1.1. Types de récepteurs dédiés à la GNSS-R

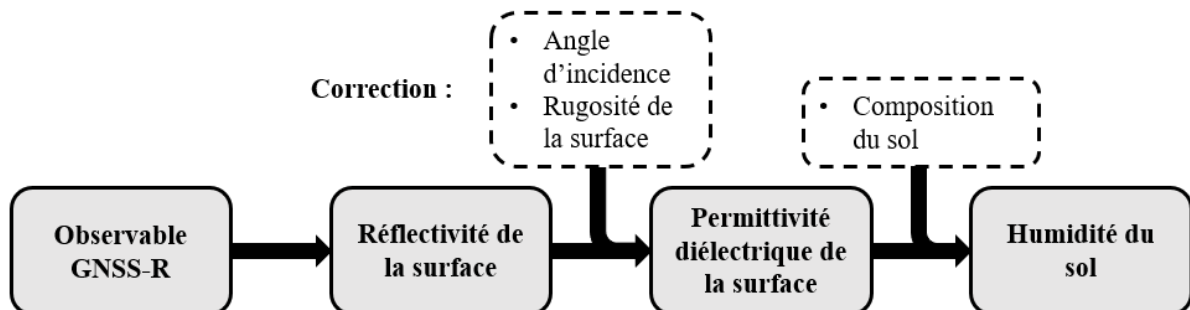
On distingue deux types de récepteurs dédiés à la réflectométrie GNSS en fonction de la manière dont les signaux sont traités dans le DSP.

- Les récepteurs GNSS-R conventionnels (cGNSS-R), à l'instar des récepteurs GNSS classiques, vont comparer le signal reçu avec la réplique générée.
- Disponibles depuis 2010, les récepteurs GNSS-R interférométriques (iGNSS-R) sont capables de comparer le signal réfléchi avec le signal direct reçu au niveau de l'antenne RHCP zénithale. Cette technique présente plusieurs avantages par rapport à la première mais nécessite aussi une plus grande antenne pour l'enregistrement du signal direct. (Edokossi et al, 2020)

#### III - 1.2. Réflectivité de la surface

Afin de déterminer l'humidité du sol grâce un récepteur de GNSS-R, on va, dans un premier temps, estimer la réflectivité de la surface. Il existe plusieurs techniques permettant de calculer ce paramètre sur base des différentes observables fournies par le récepteur. Ensuite, en corrigeant la réflectivité de l'angle d'incidence de l'onde et de la rugosité de la surface, on peut déterminer la permittivité diélectrique<sup>15</sup> du sol. Finalement, sur base de la composition du sol étudié, il est possible de calculer l'humidité du sol à partir de la permittivité diélectrique. La Figure 13 illustre la chaîne de traitements générique présentée à appliquer pour extraire l'humidité du sol à partir d'une observable de GNSS-R. (Edokossi et al, 2020)

FIGURE 13 : Détermination de l'humidité du sol à partir d'une observable de GNSS-R



<sup>15</sup> La permittivité diélectrique d'un matériau est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique. Ce paramètre dépend fortement de la quantité d'eau contenue dans le matériau.

Ainsi, il convient de présenter les méthodes permettant d'estimer la réflectivité de la surface par réflectométrie GNSS.

- Équation radar bistatique

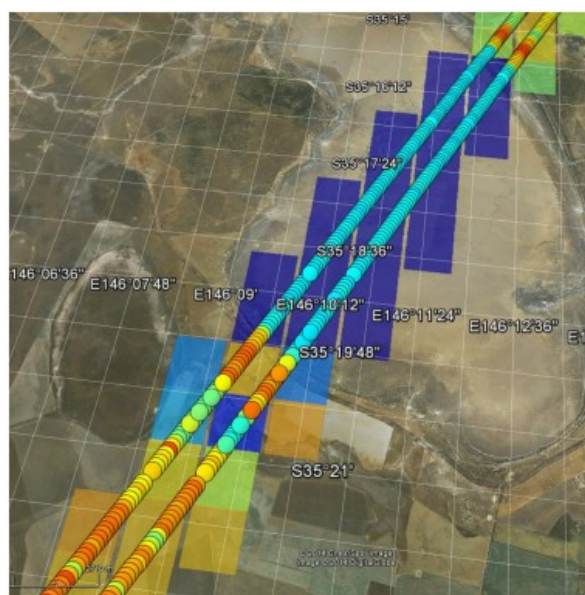
L'équation des radars bistatiques décrit l'atténuation de la puissance d'une onde émise en fonction du trajet qu'elle parcourt, des caractéristiques des antennes émettrices et réceptrices et de la réflectivité de la surface réfléchissante. Ainsi, en utilisant la puissance du signal LHCP réfléchi enregistrée par le récepteur de GNSS-R, il est possible d'estimer la réflectivité sur base de cette équation. Bien que cette technique soit relativement simple, elle nécessite de connaître préalablement le gain des antennes ainsi que la puissance d'émission des satellites observés. (Jia & Pei, 2018)

- Rapport de puissance des signaux

Cette seconde méthode se base aussi sur l'équations des radars bistatiques pour estimer la réflectivité de la surface. En revanche, le rapport entre la puissance du signal réfléchi (LHCP) et celle du signal direct (RHCP) est utilisé ce qui permet de remplacer l'ensemble des variables liées aux caractéristiques des antennes par un unique paramètre à calibrer. De ce fait, cette méthode est l'une des plus exploitée pour déterminer la réflectivité d'une surface en GNSS-R, particulièrement lorsque le récepteur est aéroporté ou embarqué sur une plateforme basée au sol. (Alonso-Arroyo et al., 2014)

Dans une étude basée sur des capteurs embarqués dans un avion, Alonso-Arroyo et ses collègues (2014) ont montré que la réflectivité estimée par le rapport des puissances issues d'un récepteur de GNSS-R présentait une très forte corrélation avec les mesures réalisées par un radiomètre. Ainsi, dans la Figure 14, on peut observer les mesures de réflectivité effectuées par les deux types de capteurs le long de la trajectoire suivie par l'avion (aller-retour). Les carrés représentent les observations réalisées par le radiomètre tandis que les cercles montrent les mesures réalisées par le récepteur de GNSS-R. Dans les deux cas, le bleu est associé à une forte réflectivité ce qui indique une humidité du sol importante alors que le rouge correspond à une faible réflectivité et par conséquent une faible humidité du sol. On constate bien une forte corrélation entre les mesures effectuées par les deux types de capteurs. Par ailleurs, la Figure 14 illustre aussi la haute résolution spatiale offerte par la réflectométrie GNSS par rapport à celle d'un radiomètre passif classique.

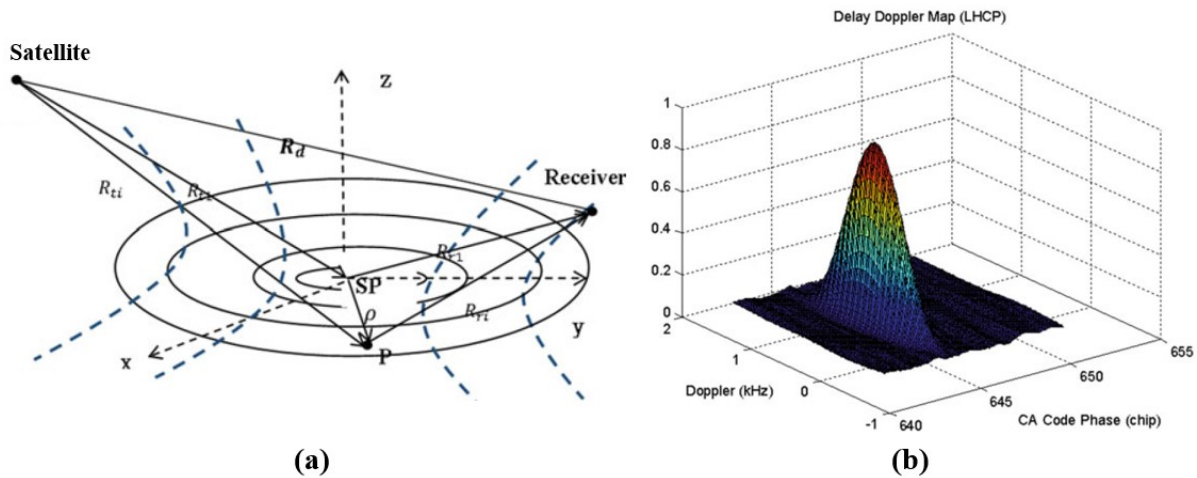
**FIGURE 14 : Réflectivité de la surface estimée par un radiomètre (carrés) et par un récepteur de GNSS-R (cercles) embarqués dans un avion (Alonso-Arroyo et al., 2014)**



- Delay-Doppler Map

Les Delay-Doppler Map (DDM) constituent l'observable la plus utilisée en réflectométrie GNSS. Cette technique, initialement inventée par Zavorotny et Voronovich (2000) afin de calculer la vitesse du vent, se base sur le fait que l'effet Doppler et le temps de trajet du signal réfléchi varient avec la position du point de réflexion. D'une part, la vitesse de déplacement radiale par rapport au point de réflexion pour le satellite à l'émission et pour le récepteur à la réception vont induire un effet Doppler sur l'onde enregistrée. Étant donné que ces vitesses varient en fonction de la position du point de réflexion, on peut tracer les courbes au sol qui correspondent à un même effet Doppler. Ces « iso-Doppler » sont des hyperboles perpendiculaires au plan contenant le satellite, le point spéculaire et le récepteur. D'autre part, les lignes correspondant à un même délai temporel<sup>16</sup> entre l'arrivée du signal direct et du signal réfléchi sont définies par le périmètre des zones de Fresnel évoquées plus haut : elles ont donc des formes ellipsoïdales. La Figure 15a illustre ces deux types de courbes au sol : les ellipses en traits pleins noirs correspondent aux iso-delay et les hyperboles en traits pointillés bleus sont les iso-Doppler. On distingue aussi les positions du récepteur, du satellite et du point de réflexion spéculaire (SP). Dans ce cadre, une DDM correspond à la puissance de la corrélation entre la réplique générée par le récepteur et le signal réfléchi en fonction de l'effet Doppler et du délai de propagation par rapport au signal direct. En d'autres termes, une Delay-Doppler Map donne pour chaque combinaison delay/Doppler, ce qui correspond aux intersections entre les ellipses et les hyperboles, la puissance de la corrélation entre le signal répliqué et le signal réfléchi. Comme le montre la Figure 15b, il s'agit donc d'une surface en trois dimensions. L'étude de cette fonction tridimensionnelle permet de déterminer une série de caractéristiques de la surface réfléchissante. (Yu, 2021)

FIGURE 15 : (a) « iso-delay » (en trait plein) et « iso-Doppler » (en pointillés) ; (b) Delay-Doppler Map (Yu, 2021)



D'après Egido et al. (2012), la réflectivité de la surface peut être estimée par le carré du rapport entre le maximum de la DDM associée au signal réfléchi et le maximum de la DDM associée au signal direct. Dans ce même article, les auteurs ont montré que cette métrique (calculée avec des données issues d'un récepteur fixe basé au sol) présentait une forte corrélation avec l'humidité du sol mesurée in-situ. Par ailleurs, une récente étude a mis en avant que, pour les récepteurs embarqués sur les satellites LEO, la technique des DDM était la plus précise pour la détermination de l'humidité du sol. Cette tendance a été déduite de l'analyse de données issues des récepteurs cGNSS-R de la constellation CyGNSS composées de 8 satellites compacts initialement utilisés pour détecter les cyclones (Pierdicca et al., 2021).

<sup>16</sup> On parle d'« iso-delay » en anglais.

### III - 1.3. De la réflectivité à l'humidité du sol

Avant de pouvoir estimer l'humidité du sol, il est nécessaire de corriger la réflectivité de l'influence du potentiel couvert végétal au niveau de la surface. En effet, les ondes de la bande L sont aussi sensibles à la quantité d'eau présente dans la végétation. Il conviendra donc de tenir compte de cet effet à l'aide d'un modèle de végétation lorsque la réflexion n'a pas lieu au niveau d'un sol nu. (Pierdicca et al., 2021)

Une fois la réflectivité de la surface estimée correctement, il reste à en extraire l'humidité du sol. Typiquement, on utilise des modèles déterministes afin de suivre la chaîne de traitements présentée dans la Figure 13. Ainsi, les équations des coefficients de Fresnel permettent de passer de la réflectivité à la permittivité diélectrique. Finalement, le « wilting point<sup>17</sup> » et la porosité sont utilisés pour obtenir l'humidité du sol (l'Annexe 3 reprend l'ensemble du modèle) (Yu, 2021). Cette méthode présente l'avantage d'être valide et de pouvoir être appliquée partout avec une même précision une fois la calibration liée à la composition du sol effectuée.

Depuis quelques années, le développement des réseaux de neurones artificiels (ANN) a permis de créer des modèles capables de prédire l'humidité du sol directement sur base des observables GNSS-R. De plus, les ANN permettent de combiner les différentes métriques GNSS-R avec d'autres paramètres environnementaux afin d'améliorer la qualité des prédictions. Shi et al. (2021) ont montré que cette nouvelle méthode présentait de très bons résultats. Néanmoins, les ANN nécessitent un entraînement sur un large set de données labélisées<sup>18</sup> qui est parfois difficile et chronophage à créer. En outre, la validité d'un tel modèle n'est garantie que pour des observations acquises dans des conditions (plateforme, type de sol,...) identiques à celles qui caractérisent les données d'entraînement. (Shi et al., 2021)

## III - 2. Méthodes utilisant les récepteurs GNSS classiques

Les techniques présentées dans cette section se distinguent des précédentes par le fait qu'elles ne requièrent pas nécessairement des données issues d'un récepteur de GNSS-R. Ces derniers étant particulièrement onéreux, le développement des méthodes abordées ci-dessous a permis d'élargir l'utilisation de la réflectométrie en la rendant plus abordable.

### III - 2.1. Diagramme d'interférence

La méthode d'estimation de l'humidité du sol grâce au diagramme d'interférence a été proposée par Rodriguez-Alvarez et ses collègues en 2007. Cette technique permet de mesurer directement la permittivité diélectrique de la surface grâce à des observations effectuées par un récepteur GNSS fixe connecté à une antenne polarisée linéairement<sup>19</sup>.

Un diagramme d'interférence représente l'évolution de la puissance du signal capté en fonction de l'élévation du satellite. La Figure 16 présente un exemple théorique d'un tel diagramme. On constate que la puissance du signal reçu par le récepteur oscille en fonction de l'élévation du satellite. L'amplitude de ces oscillations est d'abord très importante puis diminue jusqu'à atteindre un minimum à 20° d'élévation avant de réaugmenter légèrement. Ces oscillations sont en fait liées à l'interaction entre le

---

<sup>17</sup> Le « wilting point » d'un sol correspond au seuil d'humidité du sol sous lequel une plante n'est plus capable d'absorber l'eau.

<sup>18</sup> En « Machine Learning », un set de données labélisées contient une série d'instances de variables fournies en entrée au modèle et la valeur à prédire correspondante (dans le cas présent, il s'agit respectivement de(s) observable(s) de GNSS-R et de l'humidité du sol).

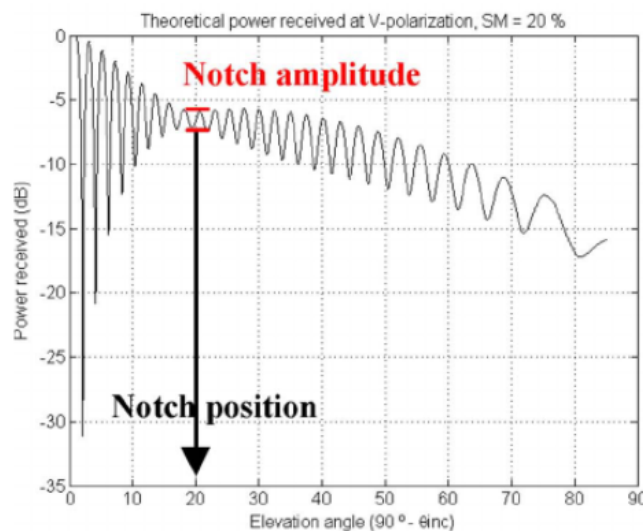
<sup>19</sup> Il semble que la polarisation verticale soit particulièrement sensible à l'humidité du sol et donc plus efficace (Rodriguez-Alvarez et al., 2007).

signal direct et le signal réfléchi. Lorsque ceux-ci sont en phase, on observe une crête dans la puissance et inversement lorsque les signaux sont en opposition de phase. On remarque la présence d'un étranglement (« notch » en anglais) où l'amplitude de l'interférence est minimale. Cette singularité apparaît au niveau de l'angle de Brewster car les composantes linéaires des signaux RHCP et LHCP réfléchis sont identiques en termes de puissances mais présentent un déphasage de  $180^\circ$ . Ainsi, les deux composantes s'annulent ce qui s'apparente à une disparition presque totale de l'oscillation dans le diagramme d'interférence. Grâce à l'Équation (1) et à l'angle auquel on observe l'étranglement, on peut estimer l'indice de réfraction du sol  $n_s$  qui dépend lui-même de sa permittivité diélectrique  $\epsilon_s$  au travers de la relation suivante :

$$n_s = \sqrt{\epsilon_s \mu_s}$$

où  $\mu_s$  est la perméabilité magnétique du sol. (Rodriguez-Alvarez et al., 2007)

FIGURE 16 : Diagramme d'interférence théorique (Rodriguez-Alvarez et al., 2007)



### III - 2.2. Méthodes basées sur le SNR

- Calcul du SNR par le récepteur

Avant de présenter les méthodes d'estimation de l'humidité du sol basées sur le SNR, il convient de décrire la manière générique dont les récepteurs GNSS classiques calculent cette métrique. Pour cela, il est nécessaire d'expliquer plus précisément les opérations réalisées par le DSP.

La phase du signal reçu étant inconnue, le récepteur va en réalité générer deux instances de l'onde porteuse avec un déphasage de  $90^\circ$  : on parle des répliques en phase  $I$  et en quadrature  $Q$ . En comparant  $I$  et  $Q$  avec le signal entrant  $S$  au travers de fonctions de corrélation<sup>20</sup>  $f(x, y)$ , il est possible de déterminer la phase mais aussi le  $C/N_0$ . Ce dernier correspond à :

$$C/N_0 = 10 \log_{10}(f^2(I, S) + f^2(Q, S)) \quad (\text{en dBHz})$$

<sup>20</sup> Une fonction de corrélation permet de calculer la ressemblance entre deux signaux. Ainsi, la fonction de corrélation entre 2 signaux identiques et en phase sera maximale alors qu'elle sera nulle dans le cas où les signaux sont en opposition de phase.

Le carrier-to-noise (power density) ratio est défini comme le rapport entre la puissance du signal et le niveau de bruit pour 1 Hz de largeur de bande. Il s'agit d'une des observables fournies par les récepteurs GNSS classiques. Le SNR, quant à lui, prend la largeur de la bande de fréquence  $B$  en compte, ce qui donne :

$$SNR = \frac{C/N_0}{B} \quad (\text{en dB})$$

Le SNR est souvent utilisé pour approximer la puissance du signal reçu.

La majorité des formats d'échange et de stockage de données GNSS fournissent le  $C/N_0$ . Ainsi, par commodité, on peut supposer que la largeur de bande vaut 1 Hz et que, par conséquent,  $SNR = C/N_0$  (Larson & Nievinski, 2012).

Afin de transformer le SNR depuis l'échelle logarithmique (en dB) en une échelle linéaire (en volt/volt), il suffit d'appliquer la formule suivante :

$$SNR_v = 10^{SNR_{Db}/20} \quad (\text{en volt/volt})(13)$$

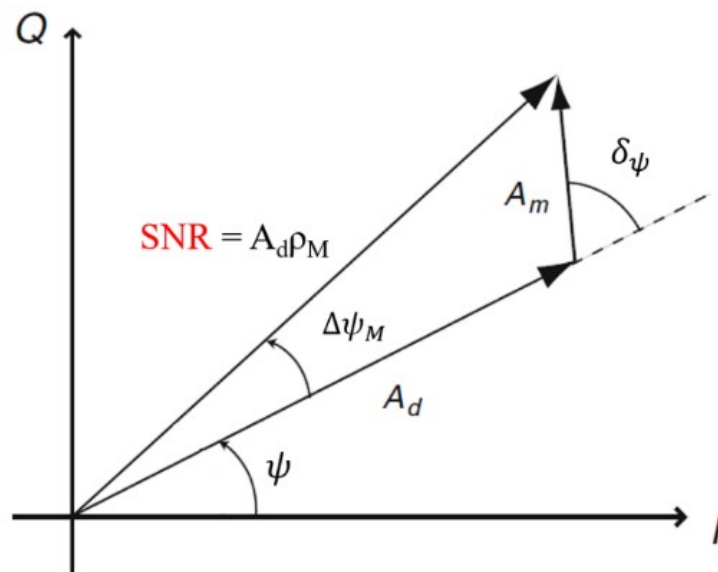
- Amplitude du multitrajet

En 2008, Kristine M. Larson et ses collègues ont publié un article dans lequel ils montrent que l'effet du multitrajet sur le SNR peut s'écrire, sur base des Équations (4) et (7), comme :

$$\begin{aligned} SNR^2 &= (A_d \rho_M)^2 \\ &= A_d^2 + A_m^2 + 2A_d A_m \cos(\delta_\psi) \end{aligned} \quad (14)$$

Plus explicitement, l'Équation (14) stipule que le SNR est égal à l'amplitude du signal composite lié au multitrajet. La Figure 17 illustre cette relation dans le diagramme de phase correspondant aux répliques  $I$  et  $Q$  du DSP utilisées pour calculer le SNR. Le vecteur de norme  $A_d$  représente l'amplitude du signal direct et  $\psi$  correspond à sa phase de battement. À celui-ci vient s'ajouter le vecteur de norme  $A_m$  correspondant au multitrajet et dont la phase de battement est de  $\psi + \delta_\psi$ . De cette manière, le signal composite résultant de cette somme a une amplitude (qui est donc égale au SNR) de  $A_d \rho_M$  et une phase de battement de  $\psi + \Delta\psi_M$ .

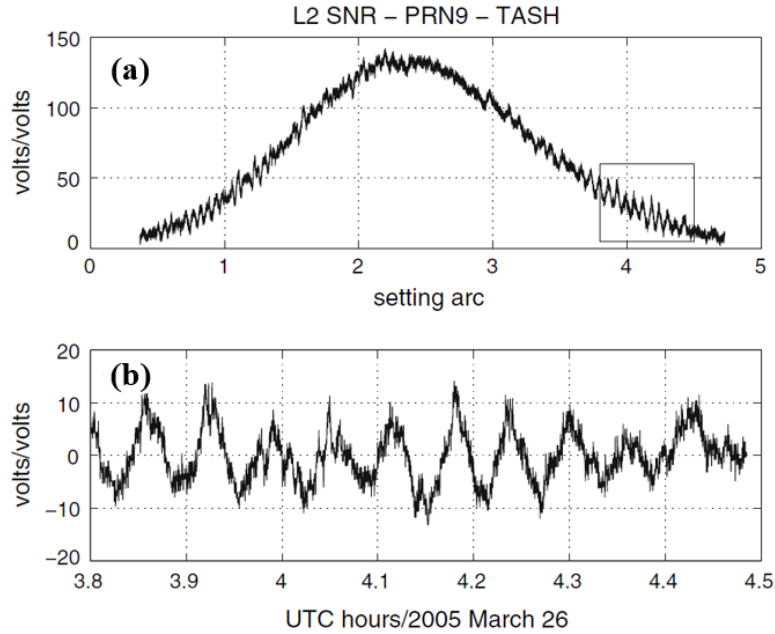
FIGURE 17 : Diagramme de phase illustrant l'effet du multitrajet sur le SNR, modifié d'après Larson et al. (2008a)



De plus, l'Équation (14) montre aussi que le SNR contient deux composantes.

- Premièrement, on a une tendance générale constituée par la somme des carrés des amplitudes du signal direct et du signal réfléchi et qui ne dépend pas de la géométrie de la réflexion qui permet de définir  $\delta_\psi$ . Dans la Figure 18a qui illustre l'évolution du SNR mesuré depuis un récepteur fixe sur le signal L2 du satellite G09 en fonction du temps, il s'agit de la forme en cloche observée. Cette variation est liée à la diminution de la puissance du signal lorsque l'élévation du satellite diminue étant donné l'augmentation de la distance parcourue par l'onde.
- Deuxièmement, on observe dans la Figure 18a des oscillations modulées sur la tendance générale. Celles-ci sont liées au terme contenant le cosinus de l'excès de phase du signal réfléchi  $\delta_\psi$  qui évolue au cours du lever et du coucher du satellite observé à cause de la variation dans la géométrie de la réflexion. On constate que l'interférence est moins visible à haute élévation à cause de la directivité de l'antenne utilisée.

FIGURE 18 : (a) Évolution du SNR entre le lever et le coucher d'un satellite (b) interférence corrigée de la tendance générale pour une portion des mesures de SNR (Larson et al., 2008a)



Ainsi, pour un récepteur fixe, la géométrie de la réflexion varie en fonction du temps étant donné le déplacement du satellite. Si on suppose que la surface réfléchissante est plane, la fréquence de l'interférence liée au multitrajet correspond, sur base de l'Équation (12), à :

$$\frac{d\delta_\psi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} h \cos(\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (15)$$

Celle-ci peut être simplifiée en effectuant un changement de variable avec  $x = \sin(\theta)$  :

$$\frac{d\delta_\psi}{dx} = \frac{4\pi}{\lambda} h \quad (16)$$

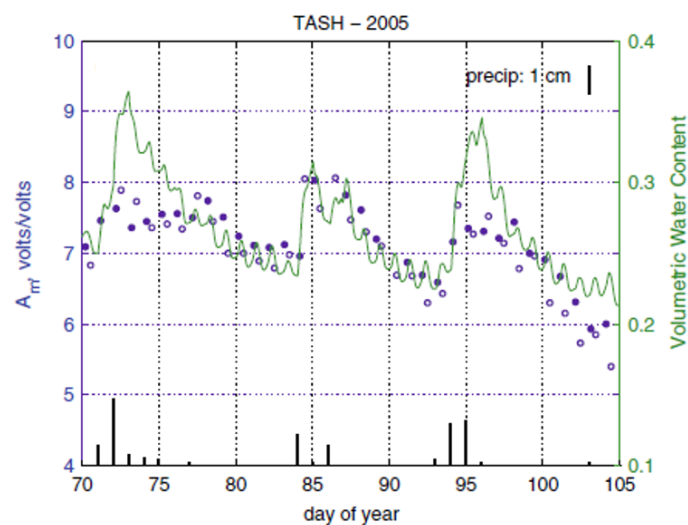
L'Équation (15) montre que la fréquence liée au multitrajet augmente avec la diminution de l'élévation du satellite. On remarque aussi que plus l'antenne est proche du sol, plus cette fréquence est faible.

Dans ce cadre, l'idée de Larson et ses collègues a été d'utiliser l'amplitude de l'interférence décrite ci-dessus afin d'estimer la réflectivité de la surface et donc l'humidité du sol. Pour ce faire, chaque séquence de SNR est corrigée de la tendance générale en soustrayant un polynôme de faible degré ajusté

par la méthode des moindres carrés. C'est ce traitement qui permet de transformer les mesures de SNR encadrées dans la Figure 18a en l'interférence observée dans la Figure 18b : on dit que l'on passe du SNR au dSNR. Ensuite, le périodogramme de Lomb-Scargle (LSP) est calculé sur cette série temporelle de dSNR. Le LSP est un outil d'analyse qui permet de détecter et caractériser la périodicité d'une série de mesures dont l'intervalle d'échantillonnage n'est pas nécessairement constant. À l'instar de la transformée de Fourier, le LSP calcule, pour une fréquence  $f$ , la puissance de densité spectrale qui indique à quel point un signal de fréquence  $f$  est présent dans les données. Ainsi, plus la densité spectrale est importante, plus le signal de fréquence  $f$  est reconnaissable dans la série de mesures. Généralement, on calcule la puissance de densité spectrale pour un ensemble de fréquences situées dans un intervalle à définir (VanderPlas, 2018). L'Annexe 4 présente la formule permettant de calculer le périodogramme de Lomb-Scargle. Ainsi, la densité de puissance spectrale est calculée grâce au LSP sur la série de dSNR pour la fréquence définie par l'Équation (16) afin d'estimer l'amplitude de l'interférence.

La Figure 19 montre l'amplitude estimée de l'interférence en bleu, la quantité d'eau dans le sol en vert et les épisodes de précipitations en noir sur une période de 35 jours. Il est important de noter que les amplitudes ont été estimées chaque jour sur base du SNR issu d'un même satellite GPS lorsqu'il repassait au niveau de la même trajectoire dans le ciel<sup>21</sup>. On constate donc dans la Figure 19 que les mesures d'amplitudes varient en même temps que l'humidité du sol. Ainsi, l'amplitude de l'interférence liée à l'effet du multitrajet présente bien une forte corrélation avec l'humidité du sol mesurée in-situ. Cependant, l'article souligne bien que cette estimation est affectée par la non-uniformité du gain de l'antenne ; c'est pourquoi seules les mesures issues d'un même satellite repassant sur une même trajectoire sont comparées. (Larson et al., 2008a)

FIGURE 19 : Comparaison entre l'amplitude du multitrajet et l'humidité du sol mesurée in-situ (Larson et al., 2008a)



<sup>21</sup> La constellation GPS est telle que la configuration des satellites dans le ciel d'un utilisateur se répète tous les jours sidéraux. Un jour sidéral dure environ 23h56.

- Phase du multitrajet

En poursuivant leurs travaux sur la méthode de l'amplitude du multitrajet, Larson et ses collègues ont découvert une seconde technique permettant d'estimer l'humidité du sol.

Sur base des Équations (12) et (14), on peut décrire le SNR corrigé de la tendance générale  $dSNR$  comme :

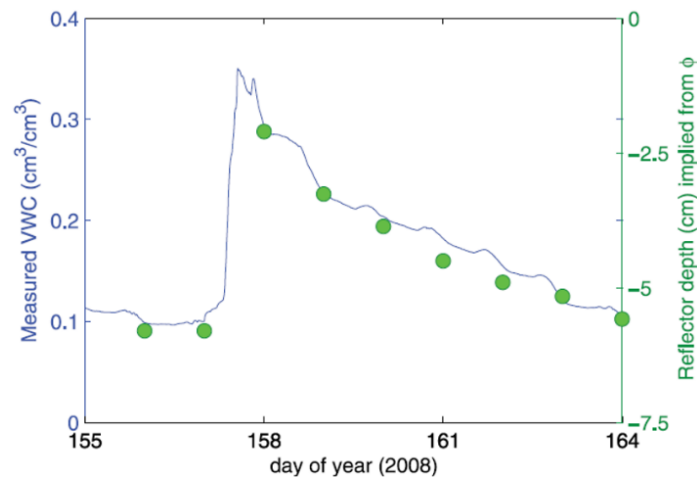
$$dSNR = A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h \sin(\theta(t)) + \phi\right) \quad (17)$$

Ainsi, en ajustant ce modèle théorique par moindres carrés au  $dSNR$ , il est possible d'estimer conjointement l'amplitude du multitrajet  $A$ , déjà évoquée ci-dessus, et un terme de phase  $\phi$ . Ce dernier correspond à la distance excédentaire parcourue par le signal réfléchi qui n'est pas modélisée par l'Équation (12).

Comme cela a été mentionné plus haut, les ondes de la bande L ont la capacité de pénétrer le sol de 0 à 5 cm. Or, l'Équation (12) suppose que la réflexion se produit exactement au niveau de la surface. Ainsi, la phase  $\phi$  correspond à la distance excédentaire parcourue par le signal réfléchi liée à la profondeur réelle de réflexion.

La Figure 20 illustre l'humidité du sol mesurée (en bleu) et la profondeur de réflexion estimée (en vert) pour 9 jours. Une fois de plus, les mesures de SNR utilisées proviennent d'un même satellite GPS lors d'un même passage dans le ciel. On constate que la profondeur de réflexion augmente lorsque l'humidité du sol diminue. Ainsi, Larson et son équipe ont montré que la profondeur réelle de réflexion calculée sur base de la phase  $\phi$  de l'interférence liée au multitrajet est fortement corrélée avec l'humidité du sol. Plus cette profondeur augmente, plus le sol est sec et réciproquement. Par rapport à la méthode utilisant l'amplitude du multitrajet, celle exploitant la phase est plus précise mais aussi plus sensible aux erreurs sur la hauteur de l'antenne par rapport à la surface. (Larson et al., 2008b)

FIGURE 20 : Corrélation entre la profondeur de réflexion et l'humidité du sol (Larson et al., 2008b)



- Satellites GEO

Théoriquement, la position dans le ciel des satellites GEO est censée rester fixe. On observe malgré tout une légère variation de leur élévation au cours du temps d'environ  $0,5^\circ$ . Par conséquent, il est aussi possible d'appliquer les méthodes de l'amplitude et de la phase pour estimer l'humidité du sol grâce à ces satellites. La principale différence est qu'approximativement 24h sont nécessaires pour reconstituer une oscillation complète. (Yu, 2021)

- Améliorations

Depuis la publication des deux articles de Larson et al., la communauté scientifique a développé plusieurs moyens d'améliorer la qualité des estimations de l'humidité du sol. D'une part, certains ont proposé un modèle pour prendre en compte l'effet du gain de l'antenne sur l'amplitude du multitrajet (Han et al., 2018). D'autre part, Ran et ses collègues ont défini plusieurs critères pour filtrer le SNR sur base de la position du point spéculaire afin de minimiser les erreurs affectant la méthode basée sur la phase (Ran et al., 2022).

- Avantages

Les deux méthodes développées par Larson et ses collègues ont constitué une véritable avancée dans le domaine de la réflectométrie GNSS. En effet, étant donné qu'elles peuvent être appliquées sur des données issues de n'importe quel type de récepteur ou d'antenne, les réseaux de stations de références géodésiques existants peuvent potentiellement être utilisés pour mesurer l'humidité du sol partout à travers le monde. Évidemment, ce type de mesure n'est possible que lorsque l'environnement autour de l'antenne est favorable (surface relativement plane, à l'écart des zones urbanisées pouvant créer d'autres sources de multitrajet, etc.). Par ailleurs, ces techniques offrent une résolution spatiale<sup>22</sup> allant de 1 à 100 m, une couverture d'une zone d'environ 0,1 ha autour de chaque station de mesure et une résolution temporelle de  $\frac{1}{2}$  jour. Ces caractéristiques sont particulièrement intéressantes quand on sait que les méthodes classiques d'estimation de l'humidité du sol fournissent des observations soit trop locales (capteurs in-situ) soit pas assez (satellites) pour certaines applications. (Larson et al., 2008b)

---

<sup>22</sup> Dans le cas présent, la résolution spatiale correspond au demi-grand axe de la FFZ.

### III - 3. Utilisation des récepteurs low-cost en GNSS-R

En positionnement par satellites, l'appellation « récepteurs low-cost » fait référence aux modules dont le prix ne dépasse généralement pas les 300 €. À titre de comparaison, les récepteurs géodésiques de haute précision utilisés pour les stations de références coûtent entre 10 000 et 20 000 €. Malgré tout, les récepteurs low-cost peuvent fournir une grande quantité d'options ainsi qu'un positionnement de très bonne qualité.

Quelques articles dans la littérature scientifique ont montré que les récepteurs low-cost pouvaient aussi être utilisés pour la réflectométrie au travers des méthodes : du diagramme d'interférence, de l'amplitude et de la phase de l'interférence liée au multitrajet (Rodriguez-Alvarez et al., 2007 ; Martín et al., 2020).

#### III - 3.1. Smartphones et données GNSS

Aujourd'hui, une grande partie des modules de positionnement par satellites se trouvent dans les smartphones. Ces récepteurs ultra-compactes peuvent sans aucun doute être qualifiés de « low-cost » étant donné que leur prix dépasse rarement les 5 €. En 2016, Google a annoncé que, à partir de la version du système d'exploitation Android 7, les données brutes utilisées par la puce GNSS pour calculer les positions seraient rendues disponibles. Ceci a permis de commencer à utiliser les smartphones pour une série d'applications autrefois réservées aux récepteurs GNSS plus avancés. (Angrisano & Gaglione, 2022)

#### III - 3.2. Smartphones et GNSS-R

Depuis quelques années, des chercheurs ont commencé à s'intéresser à la possibilité de réaliser de la réflectométrie GNSS sur base des données issues des smartphones.

D'une part, Kurum et son équipe ont réalisé plusieurs expériences où un smartphone, orienté vers le sol, était embarqué sur un drone survolant différents types de surfaces afin de détecter de potentielles variations. Ainsi, la Figure 21 illustre la trajectoire suivie par le drone en rouge et le  $C/N_0$  associé au point de réflexion spéculaire pour un seul satellite. On constate que le  $C/N_0$  augmente significativement lorsque la réflexion se produit au niveau du plan d'eau situé sur la gauche de la figure. Ce résultat paraissait encourageant quant à la faisabilité de la détection de la quantité d'eau contenue dans le sol. Néanmoins, ces expériences ont aussi mis en avant que les mesures de  $C/N_0$  étaient fortement dépendantes de l'orientation du smartphone à cause des caractéristiques de l'antenne. En effet, les

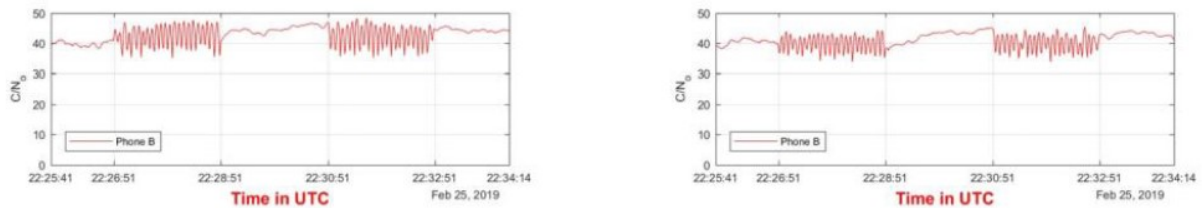
FIGURE 21 : Variation du  $C/N_0$  en fonction du point spéculaire de réflexion (en rouge : plan de vol suivi par le drone) (Kurum et al., 2021)



antennes polarisées linéairement contenues dans les smartphones sont de mauvaise qualité : elles présentent une faible directivité et une forte variabilité du gain (Kurum et al., 2021). Afin de remédier à cela, Farhad et ses collègues ont proposé de faire tourner le smartphone à une vitesse de 1 tour par seconde ce qui permet d'enregistrer le  $C/N_0$  correspondant au gain de l'antenne moyen. Bien que cette idée soit efficace, elle complexifie aussi fortement la procédure d'acquisition (Farhad et al., 2023).

D'autre part, il a été démontré que les smartphones étaient aussi capables d'enregistrer dans le SNR l'interférence liée au multitrajet suite à l'évolution de l'élévation des satellites (Liu et al., 2022). De plus, Kurum et son équipe ont mis en avant qu'il était possible de reconstituer cette interférence d'une autre manière. Dans la Figure 22, on peut voir l'évolution du  $C/N_0$  au cours du temps pour deux satellites. On constate la présence de deux périodes dans le temps contenant une interférence. Au cours de celles-ci, il se trouve que le smartphone était déplacé verticalement sur une hauteur de 3,5 m grâce à un mat télescopique. Ainsi, Kurum a pu montrer qu'il était possible d'enregistrer dans le SNR l'interférence liée au multitrajet en effectuant une variation de la hauteur d'un récepteur GNSS. Ce résultat est particulièrement intéressant puisqu'il permet de fortement augmenter la résolution temporelle des mesures de réflectométrie. En effet, lorsque la géométrie de réflexion varie à cause du déplacement du satellite, plusieurs dizaines de minutes sont nécessaires pour reconstituer un nombre suffisant d'oscillations. En revanche, en changeant la hauteur de l'antenne, il est possible d'enregistrer l'interférence en quelques minutes. (Kurum et al., 2019). En revanche, aucune étude n'a encore tenté d'estimer l'humidité du sol au travers de l'amplitude ou de la phase estimées sur base de ce type de mesures.

**FIGURE 22 : Interférences liées au multitrajet dans le  $C/N_0$  reconstituées grâce à 2 variations de 3,5 m de la hauteur du smartphone (Kurum et al., 2019)**



## Chapitre IV : OBJECTIFS

Étant donné l'état actuel des connaissances en réflectométrie GNSS pour déterminer l'humidité du sol, il est à présent possible de définir clairement les objectifs de ce mémoire.

Ainsi, l'objectif de ce mémoire est d'étudier la faisabilité de la détection de variations dans l'humidité du sol grâce au SNR issu des récepteurs low-cost. Pour cela, les paramètres d'amplitude et de phase définis par Larson (Larson et al., 2008a ; Larson et al., 2008b) seront extraits de l'interférence reconstituée par une variation de la hauteur du récepteur (Kurum et al., 2019). Il est possible de résumer cet objectif en la question de recherche suivante :

***« Est-il possible de détecter des variations de l'humidité du sol grâce aux paramètres de Larson estimés sur base de l'interférence liée au multitrajet enregistrée dans le SNR en effectuant un déplacement vertical d'un récepteur GNSS low-cost ? »***

Répondre à cette question implique quatre grandes étapes à savoir :

- la définition d'un modèle théorique permettant de décrire l'interférence ;
- l'élaboration d'une procédure d'acquisition de données ;
- le développement d'une méthode de traitement des données afin d'extraire les paramètres de Larson ;
- l'évaluation de la qualité et de l'efficacité de l'ensemble du protocole au travers de la réalisation de plusieurs expériences.

Ainsi, ce mémoire devrait permettre d'évaluer les capacités des récepteurs low-cost en réflectométrie GNSS. Par ailleurs, il sera conjointement possible d'étudier l'interférence liée à la variation de la hauteur du récepteur mais aussi de vérifier que les paramètres de Larson sont toujours aussi sensibles à l'humidité du sol lorsque le récepteur n'est pas fixe. Ce travail devrait, par la même occasion, s'avérer utile pour d'autres applications de la réflectométrie GNSS comme l'estimation de la hauteur de neige ou encore l'étude de la végétation. Finalement, des résultats favorables mettraient en avant l'opportunité d'embarquer un récepteur GNSS low-cost sur un drone afin de réaliser relativement rapidement des mesures de réflectométrie GNSS utilisables.

## Chapitre V : MÉTHODOLOGIE

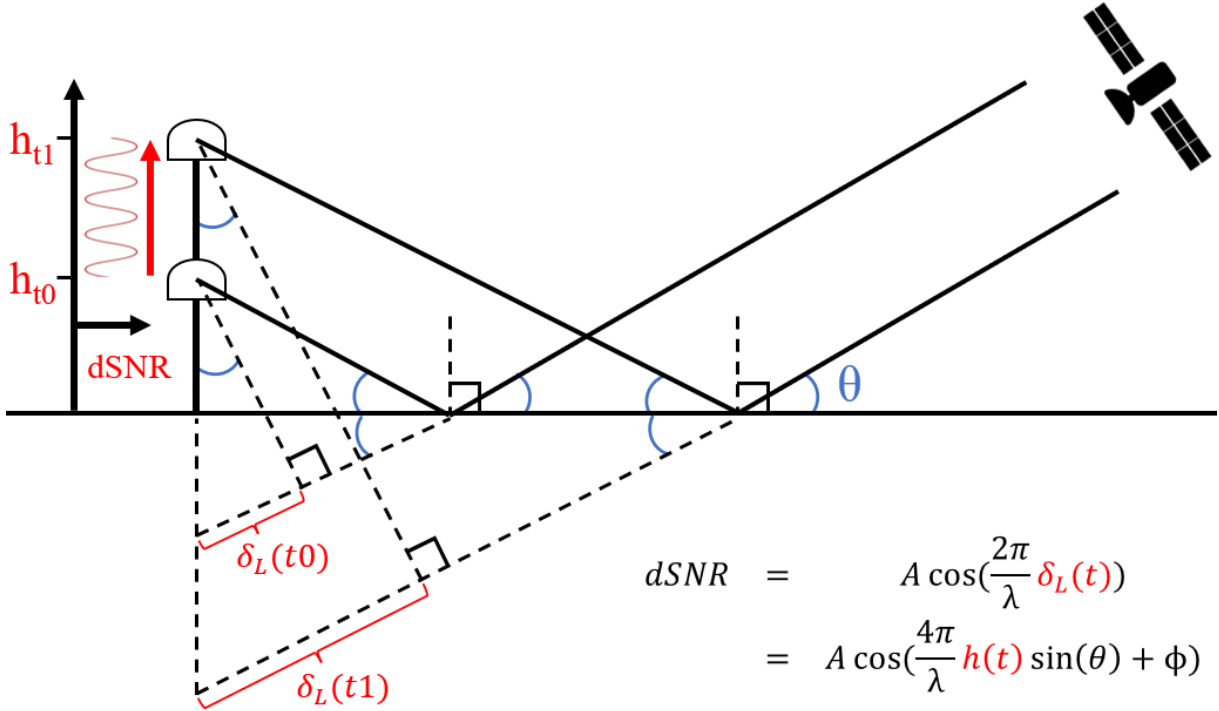
Cette section va présenter la méthodologie mise en place afin de répondre aux objectifs fixés ci-dessus.

On commencera par développer le modèle théorique permettant de relier l'interférence produite par la variation de hauteur du récepteur et les paramètres de Larson. Ensuite, le protocole permettant d'enregistrer les données et les différentes acquisitions réalisées seront présentés. Après cela, la chaîne de traitements des données sera détaillée. Finalement, les indicateurs qui permettront d'évaluer, dans le chapitre sur les résultats, la qualité des modèles, des traitements et des données seront introduits.

## V - 1. Modèle théorique

Dans un premier temps, il convient de montrer géométriquement de manière claire comment une variation de la hauteur de l'antenne peut produire une interférence dans le SNR à cause du multitrajet.

FIGURE 23 : Variation de la géométrie du phénomène de réflexion produisant une interférence dans le dSNR



La Figure 23 illustre la géométrie de la réflexion au sol d'un signal GNSS provenant d'un satellite pour deux hauteurs différentes de l'antenne. Les signaux directs n'ont pas été représentés pour éviter de surcharger la figure. On peut voir, à l'instar de ce qui a été montré plus haut, que la distance excédentaire parcourue par le signal réfléchi  $\delta_L(t)$  a été identifiée en rouge pour les deux hauteurs de l'antenne correspondant aux temps  $t_0$  et  $t_1$ . Dans la Figure 23, on émet l'hypothèse que la variation de la hauteur de l'antenne dure relativement peu de temps et que l'effet du déplacement du satellite sur la géométrie de la réflexion peut être négligé. En effet, l'élévation d'un satellite de positionnement ne varie en moyenne que de 0,004 %/s (Teunissen & Montenbruck, 2017). Ainsi, l'évolution de la distance excédentaire parcourue par le signal réfléchi  $\delta_L(t)$  sur une surface horizontale peut s'écrire :

$$\delta_L(t) = 2h(t) \sin(\theta) \quad (18)$$

Grâce à l'Équation (18), on constate bien que la distance excédentaire parcourue par le signal réfléchi augmente avec la hauteur de l'antenne par rapport au sol. En supposant que le récepteur ne reçoit, en plus du signal direct, qu'un seul signal réfléchi (Équation (5)), on peut décrire l'interférence enregistrée dans le  $dSNR$  comme :

$$dSNR = A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h(t) \sin(\theta) + \phi\right) \quad (19)$$

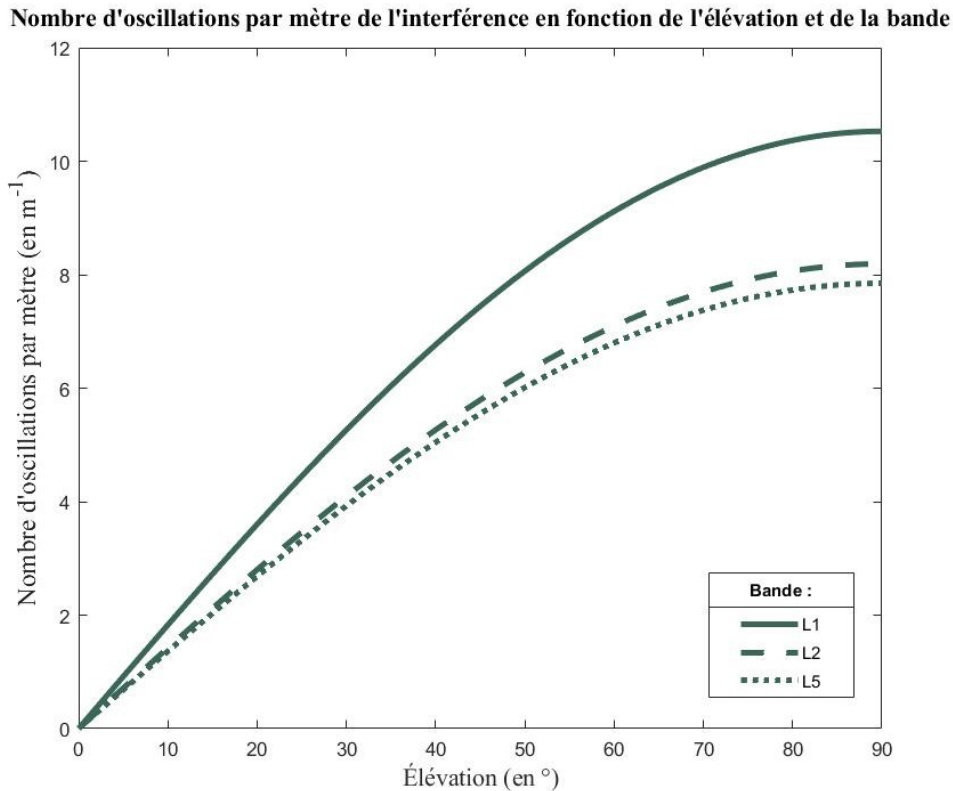
Contrairement à l'Équation (17) proposée par Larson, le modèle ci-dessus représente une interférence qui évolue en fonction de la hauteur de l'antenne  $h(t)$  et non selon l'élévation du satellite. Ainsi, la Figure 23 illustre schématiquement l'interférence enregistrée dans le  $dSNR$  en fonction de la variation de cette hauteur.

La fréquence du signal défini par l'Équation (19) est donnée par :

$$f = \frac{\partial(\delta_L(t)/\lambda)}{\partial t} = \frac{2}{\lambda} v_v(t) \sin(\theta) \quad (\text{en Hz})(20)$$

où  $v_v(t)$  est la vitesse verticale de déplacement de l'antenne. Ainsi, la fréquence augmente avec ce paramètre et avec l'élévation du satellite. En outre, si on dérive  $\delta_L(t)/\lambda$  directement en fonction de la hauteur, on peut calculer le nombre d'oscillations enregistrées sur 1 m de déplacement vertical. Par abus de langage et pour faciliter la discussion, ce nombre d'oscillations par mètre de changement de hauteur sera parfois appelé « fréquence » ; le terme fréquence désigne habituellement le nombre de périodes par seconde. La Figure 24 illustre l'évolution de cette « fréquence » selon la bande du signal et l'élévation du satellite. On constate que le nombre d'oscillations par mètre augmente en fonction de l'élévation du satellite observé. En outre, la fréquence est plus grande pour la bande L1 dont la longueur d'onde de la porteuse est la plus faible.

FIGURE 24 : Nombre d'oscillations par mètre de l'interférence en fonction de l'élévation et de la bande



Sur base du modèle défini par l'Équation (19), l'humidité du sol peut être évaluée via l'amplitude  $A$  telle quelle (Larson et al., 2008a) ou au travers d'une estimation du facteur d'atténuation de l'amplitude  $\alpha$  (AAF) donnée par :

$$A = \frac{2\alpha}{A_d^2 \rho_G} \quad (21)$$

$$\rho_G = \sqrt{\frac{G_r}{G_d}} \quad (22)$$

où  $G_d$  et  $G_r$  sont respectivement le gain de l'antenne dans la direction du signal direct et dans celle du signal réfléchi (Yu, 2021). La Relation (21) découle des Équations (7) et (14) ainsi que de l'effet du gain

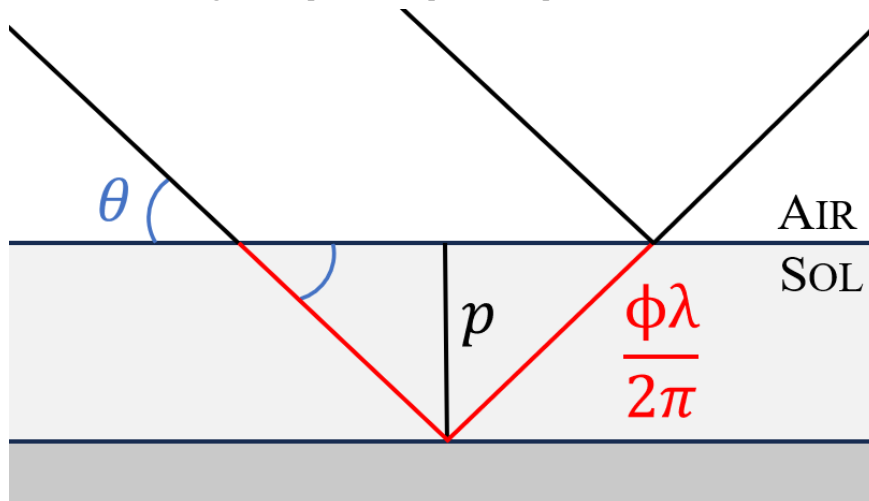
de l'antenne évoqué plus haut. Dans son livre sur la réflectométrie GNSS, Yu propose d'approximer le carré de l'amplitude du signal direct  $A_d^2$  par le polynôme utilisé pour obtenir le  $dSNR$  à partir du  $SNR$ . Ceci rend la métrique indépendante de la puissance de l'onde lorsqu'elle arrive au niveau de la surface de la Terre et permet donc la comparaison entre les valeurs obtenues au travers des différents signaux. C'est donc cet indicateur qui sera utilisé dans la présente étude.

La Figure 25 montre l'effet de la profondeur réelle de réflexion sur la distance parcourue par le signal réfléchi. Les traits rouges représentent la longueur qui n'est pas modélisée par l'Équation (18) étant donné la pénétration de l'onde dans le sol et qui sera absorbée dans la phase  $\phi$  de l'Équation (19). Comme le montre la Figure 25, on peut calculer la profondeur réelle de réflexion  $p$  à partir de la phase  $\phi$  grâce à :

$$p = \frac{\phi\lambda}{4\pi} \sin(\theta) \quad (23)$$

Le facteur  $\frac{\lambda}{2\pi}$  permet de transformer la phase exprimée en radians en une distance sur base de la longueur d'onde du signal. Finalement la profondeur réelle de réflexion est obtenue en multipliant cette distance par la moitié du sinus de l'élévation du satellite.

FIGURE 25 : Lien géométrique entre la phase et la profondeur réelle de réflexion

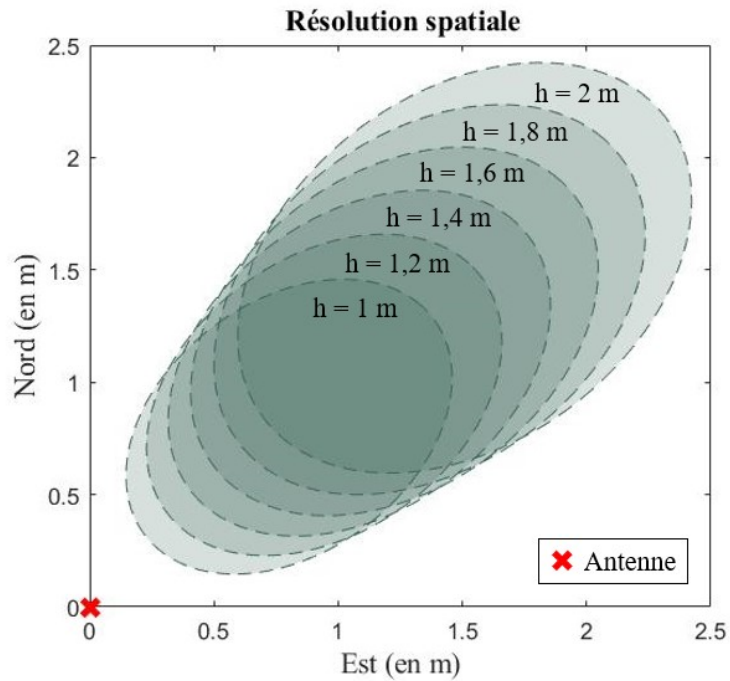


### V - 1.1. Résolution spatiale

En GNSS-R, on définit généralement la résolution spatiale pour une mesure à une époque donnée comme la première zone de Fresnel. Néanmoins, la méthode proposée dans ce mémoire requiert une série temporelle de  $dSNR$  afin de reconstituer les paramètres utilisés pour rendre compte de l'humidité du sol. De cette manière, la résolution spatiale correspond ici à l'union des FFZ associées aux différentes mesures dans cette série. Grâce aux Équations (2), on comprend que le déplacement relatif du récepteur et du satellite va affecter la position et la forme de la première zone de Fresnel. Si le mouvement du satellite peut, une fois encore, être négligé pour une acquisition de faible durée, un accroissement (resp. une réduction) de la hauteur de l'antenne augmentera (resp. diminuera) la taille et l'éloignement de la FFZ. La Figure 26 illustre cette résolution spatiale pour 6 mesures de  $SNR$  effectuées le long d'un déplacement vertical de 1 m à partir d'une hauteur initiale de 1 m. On peut constater que toutes les parties de la zone n'influencent pas les mesures dans la série temporelle avec la même importance : plus la couleur est foncée, plus l'effet sur la série temporelle est grand. Par ailleurs, la hauteur initiale à laquelle on effectue le déplacement vertical de l'antenne permet de définir le niveau de résolution spatiale : celle-ci sera d'autant plus fine que la distance entre la surface et le récepteur

diminue. Il convient donc d'ajuster ce paramètre en fonction des besoins de l'application pour laquelle l'humidité du sol est nécessaire. Cependant, il existe toujours un compromis entre la qualité de la résolution et l'étendue de la zone potentiellement couverte par les mesures.

FIGURE 26 : Résolution spatiale constituée par l'union des FFZ correspondant aux mesures dans la série temporelle



<b>Élévation</b>	45°
<b>Azimut</b>	45°
<b>Nombre d'époques de mesure</b>	6
<b>Hauteur initiale</b>	1 m
<b>Variation de hauteur</b>	1 m
<b>Bande</b>	L1

## V - 2. Protocole d'acquisition

### V - 2.1. Récepteurs

Cette section va présenter les récepteurs utilisés dans ce mémoire et les méthodes associées permettant d'enregistrer les données GNSS nécessaires à la réflectométrie.

- Smartphones

Le Tableau 3 reprend les caractéristiques des smartphones utilisés pour certaines acquisitions qui seront décrites plus loin. On constate que le Google Pixel 6 et le Xiaomi Mi 8 sont capables de capter 2 bandes de fréquence alors que la Samsung Galaxy Z flip 3 ne peut en exploiter qu'une.

TABLEAU 3 : Caractéristiques des smartphones utilisés dans ce mémoire

Modèle	Puce GNSS	Signaux captés
<i>Google Pixel 6</i>	Broadcom BCM47765	L1, L5, E1, E5a, G1, B1 et B2a
<i>Xiaomi Mi 8</i>	Broadcom BCM47755	L1, L5, E1, E5a, G1 et B1
<i>Samsung Galaxy Z flip 3</i>	Qualcomm Snapdragon 888	L1, E1, G1 et B1

L'application gratuite « GNSSLogger » a été utilisée afin d'enregistrer les données GNSS sur la mémoire des smartphones. Ces dernières sont stockées au format RINEX qui répertorie à chaque époque de mesure (chaque seconde) la pseudodistance, la phase de battement, l'effet Doppler et le  $C/N_0$  pour tous les signaux disponibles.

- Ublox F9P

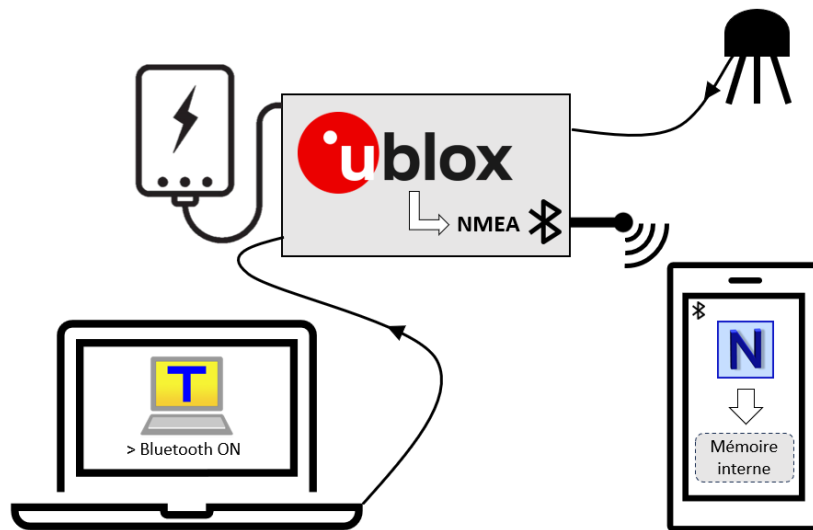
Afin d'étudier les capacités des récepteurs low-cost, un module de développement F9P de la marque ublox a été utilisé. En plus de l'unité de positionnement, il est équipé d'interfaces de communications Bluetooth et Wi-Fi. Ce récepteur coûte environ 250 € et est capable d'effectuer des mesures sur les bandes L1, L2, E1, E5b, G1, G2, B1 et B2.

Enregistrer des données GNSS avec le F9P n'est pas évident car ce récepteur ne dispose pas de mémoire interne persistante. Ainsi, tout un protocole a été mis en place afin de transférer et stocker ces informations sur un smartphone. Voici une brève description de la méthode utilisée.

- Préalablement, configurer le récepteur au travers du GUI ublox pour qu'il fournisse les données GNSS au format NMEA (National Marine Electronics Association). Celui-ci contient, parmi d'autres informations, le  $C/N_0$  pour tous les signaux captés.
- Démarrer le récepteur en connectant une batterie portable comme source d'énergie.
- Connecter un ordinateur au récepteur afin d'activer la communication du module Bluetooth grâce au programme d'émulation de terminal « Tera Term ».
- Connecter le smartphone au ublox F9P par Bluetooth grâce à l'application « NTRIP Client Lefebure ». Initialement développée pour transférer des corrections différentielles depuis internet vers un récepteur, cette application permet aussi d'enregistrer les données GNSS issues du module de positionnement.  
(R.Warnant, comm. pers., 2024)

Le diagramme de la Figure 27 illustre ce montage lors de la mise en marche du récepteur ublox F9P. Il convient de noter qu'une fois le Bluetooth activé, l'ordinateur portable peut être déconnecté.





FIGURE 27 : Diagramme illustrant la méthode d'enregistrement des donnée GNSS avec le ublox F9P



o Antennes

Le Tableau 4 répertorie les caractéristiques des 4 antennes utilisées dans le cadre de ce mémoire pour capter les signaux GNSS avec le récepteur ublox F9P. On distingue donc une antenne à polarisation linéaire et trois à polarisation RHCP. Celles-ci ont un prix croissant allant d'environ 10 à 100 € de la gauche vers la droite du tableau. Les lettres A, B, C et D seront utilisées dans la suite de cette étude pour identifier les différentes antennes.

TABLEAU 4 : Caractéristiques des antennes utilisées

				
<b>Modèle</b>	<i>Taoglas TS.07.0113</i>	<i>Taoglas AA.162.301111</i>	<i>ublox ANN-MB</i>	<i>Drotek DA910</i>
<b>Identifiant</b>	A	B	C	D
<b>Polarisation</b>	Linéaire	RHCP	RHCP	RHCP
<b>Signaux captés</b>	L1, L2, E1, E5b, G1, G2, B1 et B2	L1, E1, G1 et B1	L1, L2, E1, E5b, G1, G2, B1 et B2	L1, L2, L5, E1, E5a, E5b, E6, G1, G2, G3, B1, B2 et B3
<b>Prix</b>	~ 10 €	~ 15 €	~ 60 €	~ 100 €

## V - 2.2. Expérience 1

Les premières acquisitions ont été réalisées avec le *Samsung Galaxy Z flip 3* (Figure 28d) les 6, 7 et 8 juillet 2023 à Ampsin sur la commune d'Amay près de Huy. Le smartphone était fixé en position pliée sous un disque de plexiglass recouvert d'adhésif de cuivre ce qui permet, selon Kurum et al. (2019) de limiter l'influence du signal direct (Figure 27c et d). Ce plateau était suspendu à une corde, passant par une poulie, qu'il suffisait de tirer ou relâcher pour déplacer verticalement le récepteur. Ainsi, en mesurant la hauteur initiale du récepteur  $h_0$  à l'aide d'un mètre, la distance entre l'antenne et le sol  $h(t)$  peut être estimée à tout instant sur base de :

$$h(t) = h_0 + \bar{v}t \quad (24)$$

$$\bar{v} = \frac{\Delta h}{N}$$

où :

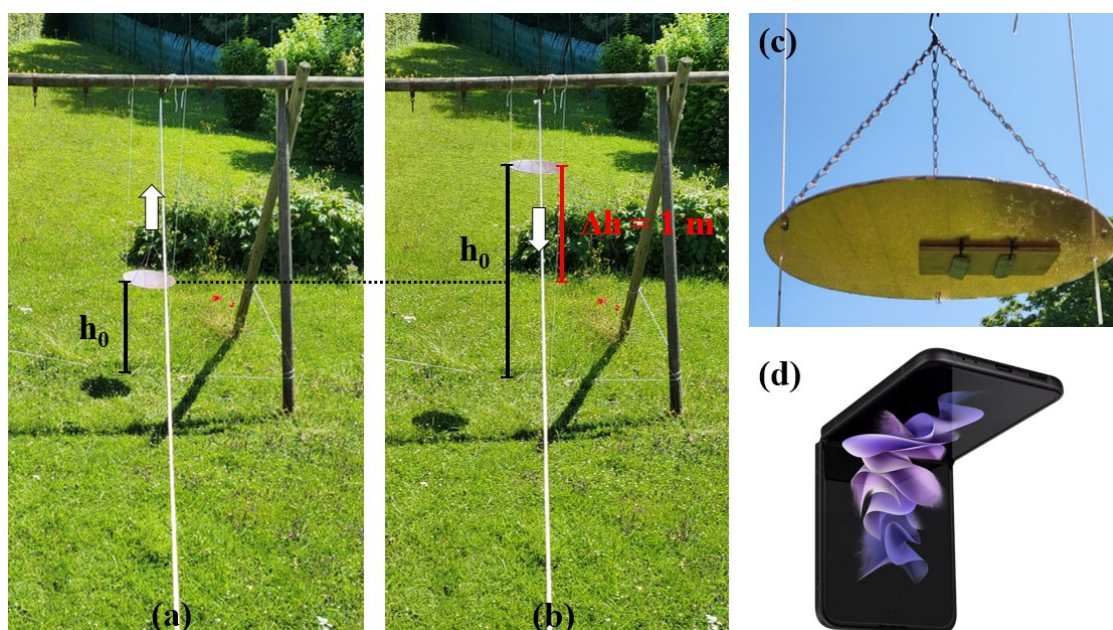
- $\bar{v}$  est la composante verticale de la vitesse supposée constante tout au long du déplacement (elle est négative lorsque le vecteur de déplacement est dirigé vers le bas) ;
- $t = 0, 1, 2, \dots, N - 1$  est l'indice de la mesure pour une acquisition ayant duré  $N$  secondes ;
- $\Delta h$  est la variation de hauteur de l'antenne entre le début et la fin du déplacement.

Les acquisitions se composent de 10 variations de la hauteur (avec  $\Delta h = 1 \text{ m}$ ) : une alternance de mouvements ascendants et descendants. Ces déplacements seront appelés « séquences » dans la suite de ce mémoire. Pour cette première expérience, la hauteur initiale  $h_0$  vaut 0,85 m pour un déplacement ascendant et, par conséquent, 1,85 m pour un mouvement descendant comme illustré sur la Figure 28 (panneaux a et b). En outre, l'heure au début et à la fin de chaque séquence a été enregistrée. Pour cette première expérience, chaque mouvement a duré entre 15 et 25 secondes.

Les acquisitions ont été réalisées au-dessus d'une surface recouverte d'herbe ou de végétation basse. Le sol présente par endroits une pente qui n'excède pas  $10^\circ$ . Par ailleurs, il convient de noter que le site est entouré de quelques maisons et d'arbres relativement hauts.

L'objectif principal de cette expérience est d'obtenir un premier jeu de données permettant d'observer l'aspect de l'interférence dans le SNR enregistrée par un smartphone, d'évaluer la qualité du protocole d'acquisition et du site d'étude.

FIGURE 28 : Montage utilisé pour les acquisitions de l'Expérience 1



### V - 2.3. Expérience 2

La deuxième expérience comprend 2 acquisitions réalisées le 5 novembre 2023 à Faimes en Hesbaye. Les enregistrements ont été effectués avec 2 Xiaomi Mi 8.

- Le premier était fixé horizontalement en-dessous du disque de plexiglass afin de capter préférentiellement les signaux réfléchis comme dans l'Expérience 1 (Figure 29b).
- Le second smartphone était soit placé au-dessus du disque, qui devait donc agir comme une ground plane (Figure 29c), soit posé au sol. On parlera respectivement des Acquisitions (a) et (b) dans la suite du mémoire. Ainsi, ces deux dispositions devaient permettre au deuxième smartphone de ne capter que les signaux issus directement des satellites.

Ici, le plateau était suspendu à une grande structure en forme de trépied permettant de réaliser des variations de hauteur  $\Delta h$  de 1,5 m. En outre, pour rendre la vitesse de déplacement aussi constante que possible, la corde reliée au disque a été fixée à un axe capable de tourner grâce à une visseuse. Cependant, appliquer une pression constante manuellement sur le bouton de cette dernière s'est avéré relativement compliqué. Ainsi, un levier équipé d'une vis de réglage a été conçu pour venir butter contre la gâchette de la visseuse et, de cette manière, contrôler au mieux la vitesse de rotation. (Figure 29a)

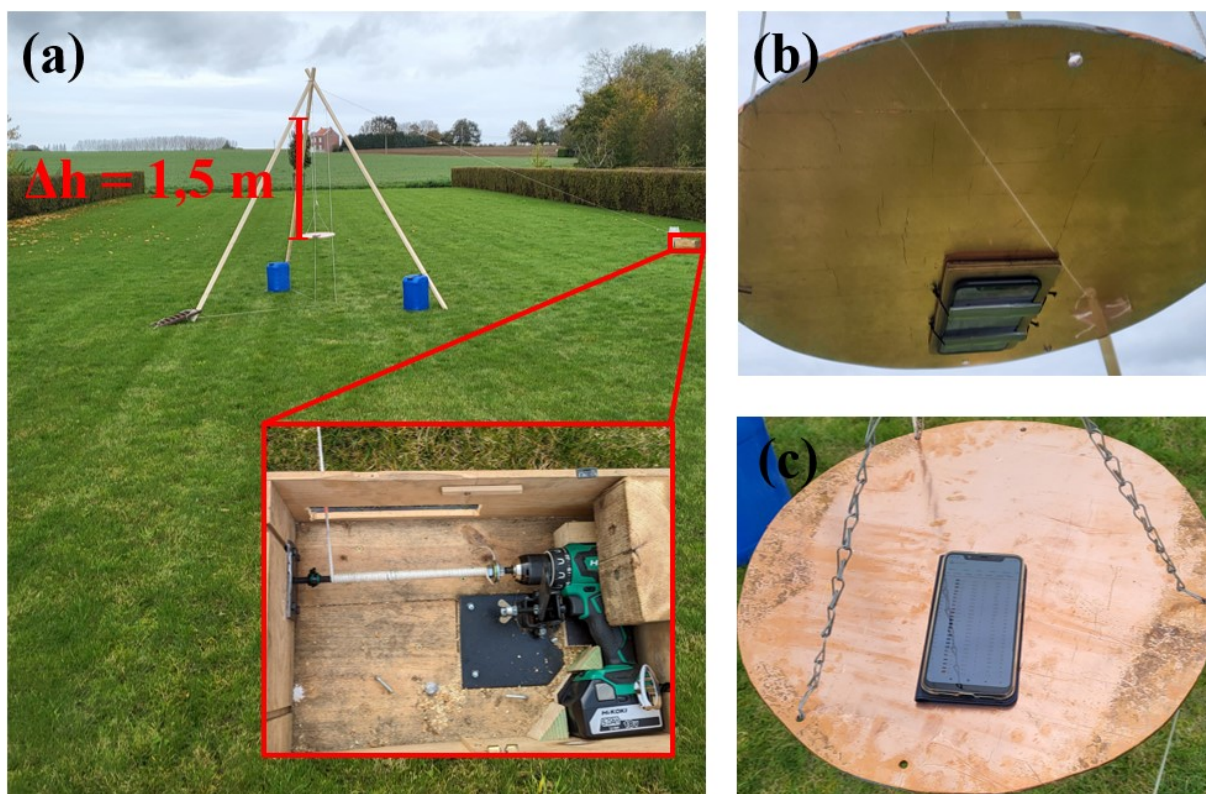
Pour cette seconde expérience, la durée des séquences varie entre 45 et 110 secondes.

On peut constater sur la Figure 29a que le site d'étude est bien plus grand et plus plat que celui de l'Expérience 1 : la pente  $y$  est partout inférieure à  $5^\circ$ . De plus, on observe ni arbre ni bâtiment à moins de 15 m de la position du récepteur.

Ces acquisitions ont été réalisées dans le but :

- d'acquérir des données dans de meilleures conditions que celles de la première expérience ;
- de comparer le SNR associé au signal direct uniquement à celui affecté par du multitrajet.

FIGURE 29 : Montage utilisé pour les acquisitions de l'Expérience 2



### V - 2.4. Expérience 3

L'Expérience 3 a été réalisée le 4 mars 2024 sur le site de Faimés décrit ci-dessus. Elle se compose de 6 acquisitions : 4 effectuées avec le ublox F9P relié aux différentes antennes présentées plus haut, une avec le Google Pixel 6 et une avec le Xiaomi Mi 8. Comme on peut le voir sur la Figure 30, les antennes étaient orientées vers le bas (Figure 30).

Le protocole d'acquisition était identique à celui utilisé dans l'Expérience 2 à la différence qu'un palan à trois brins (Annexe 5) a été ajouté au niveau de la corde reliée au plateau. Ceci permet, pour un même déplacement vertical du récepteur, d'augmenter la vitesse de rotation de la visseuse afin de la placer dans sa fenêtre de fonctionnement optimum et ainsi de maximiser encore plus la constance de la vitesse de variation de hauteur de l'antenne.

Les séquences ont duré entre 60 et 120 secondes chacune.

Cette troisième expérience avait pour objectif de pouvoir comparer la magnitude de l'interférence enregistrée par les différents récepteurs (ou combinaison récepteur/antenne).

**FIGURE 30 : Disposition du récepteur ublox F9P et des antennes au cours de l'Expérience 3**



## V - 2.5. Expérience 4

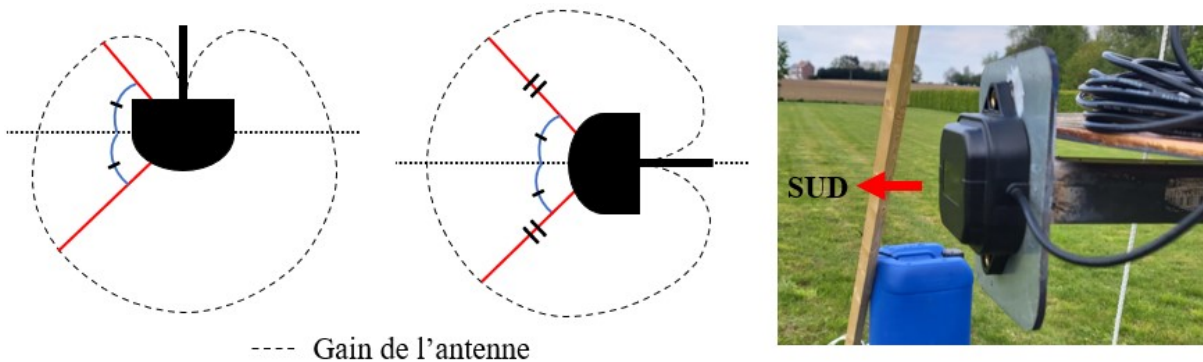
La quatrième et dernière expérience a eu lieu à Faimés. Le 23 avril 2024, 4 enregistrements ont été réalisés successivement avec le Google Pixel 6, le Xiaomi Mi 8 et le ublox F9P connecté à l'Antenne A puis à l'Antenne C. Des précipitations ont été enregistrées durant les 3 jours précédant cette date. Après cela, les 4 acquisitions ont été effectuées une seconde fois le 27 avril après plusieurs jours sans pluie. Ainsi, on peut supposer que l'humidité du sol a subi une diminution entre ces deux journées. Cependant, le mois d'avril 2024 a enregistré une très grande quantité de précipitations. Il est donc possible que le sol ait été saturé en eau et que les quelques jours plus secs n'aient pas suffi à générer assez d'évapotranspiration pour provoquer une variation significative de l'humidité du sol.

La Figure 31 illustre l'effet de l'orientation d'une antenne dont la directivité ne varie qu'en fonction de l'élévation du satellite. On constate que le gain associé au signal direct et au signal réfléchi est identique lorsque l'antenne est orientée vers l'horizon ce qui n'est pas le cas quand elle est dirigée vers le bas. Ainsi, contrairement à l'expérience précédente, les antennes ont été placées horizontalement ce qui permet théoriquement de corriger les mesures de SNR d'une grande partie de l'effet de la directivité de l'antenne (Edokossi et al, 2020) étant donné que le gain des antennes varie principalement en fonction de l'élévation du satellite. En outre, les antennes ont été orientées vers le sud afin d'optimiser la qualité d'un maximum de signaux puisque la densité de satellites dans l'hémisphère nord est plus importante vers le sud (voir ci-dessus la section sur le « Segment spatial »). Outre ce changement, le protocole d'acquisition est semblable à celui décrit pour l'Expérience 3.

Les séquences ont duré entre 50 et 90 secondes chacune.

Les objectifs de cette dernière expérience étaient d'évaluer : l'influence de l'orientation de l'antenne et l'effet d'un changement de l'humidité du sol sur les interférences enregistrées dans le SNR.

FIGURE 31 : Effet théorique de l'orientation d'une antenne directive



### V - 3. Traitement des données

Cette section va décrire l'ensemble des traitements appliqués aux données afin d'extraire et analyser les paramètres théoriquement sensibles aux variations de l'humidité du sol.

La première étape consiste à lire les fichiers (au format RINEX ou NMEA en fonction du type de récepteur) et en extraire les séries temporelles de  $C/N_0$  sur base des époques de début et de fin enregistrées<sup>23</sup> pour les 10 séquences et cela pour chaque signal capté. Suite à cela, le  $C/N_0$  est converti en SNR grâce à la Relation (13).

Afin de calculer l'élévation et l'azimut d'un satellite, il est nécessaire de connaître ses coordonnées et celles du récepteur dans un même système de référence. Si la position du récepteur a été déterminée pour chaque acquisition, les positions des satellites sont extraites des fichiers d'orbites précises<sup>24</sup>. Ceux-ci fournissent, pour un jour donné, les coordonnées des satellites avec un intervalle de 5 minutes. Ainsi, pour l'ensemble des époques contenues dans la période d'enregistrement, l'élévation et l'azimut sont calculés et interpolés dans le temps grâce à une régression linéaire. Cette méthode d'interpolation est pertinente et valide dans le cas présent étant donné que la variation de ces paramètres peut être fixée comme constante sachant que la durée totale des enregistrements n'excède jamais 30 minutes. Néanmoins, il arrive que les fichiers d'orbites précises ne contiennent pas la position de certains satellites (rarement plus de 2 ou 3) ce qui rend donc les séquences correspondantes inutilisables.

Les longueurs d'onde  $\lambda$  des différents signaux GNSS ont été extraites du livre de référence « GNSS data processing » publié par l'ESA et intégrées à la chaîne de traitements (Sanz Subirana et al., 2013).

Ensuite, l'emprise de la zone d'étude, c'est-à-dire la surface relativement plane et homogène dont on souhaite estimer l'humidité du sol (excluant les arbres, les bâtiments, les surfaces anthropiques,...), a été définie et extraite au format shape file grâce au logiciel QGIS. Sur base de cela et des données évoquées précédemment, le centre de la FFZ correspondant à chaque mesure de SNR est calculé. Lorsque ce point ne se situe pas au sein de la zone, la valeur de SNR associée est supprimée de la série temporelle.

Après cela, les séquences de SNR contenant moins de 50 % des mesures, à cause de pertes momentanées du signal par le récepteur ou de la suppression des observations en fonction de la position du point de réflexion, ont été retirées de l'analyse. Ce filtre garantit que chaque série temporelle comporte assez de données pour l'extraction des paramètres de Larson. Il maximise aussi la probabilité que ces derniers soient représentatifs de l'humidité du sol.

La tendance générale est alors retirée pour chaque série de mesures restante en soustrayant le polynôme de degré 1 ajusté par la méthode des moindres carrés. Ceci permet de transformer le SNR en dSNR. Étant donné la faible durée des mouvements, l'utilisation d'un modèle linéaire semble suffisante pour modéliser l'évolution de la puissance moyenne du signal composite. Chacune des séries de dSNR est ensuite divisée par le polynôme de degré 1 afin d'appliquer l'approximation de Yu et permettre plus tard l'estimation de l'AAF  $\alpha$ . Pour rappel, cet indicateur est comparable entre les différents satellites contrairement à l'amplitude « brute » de Larson.

---

<sup>23</sup> Il convient de noter que les époques de début et de fin des séquences ont été enregistrées dans l'échelle de temps UTC+1 ou UTC+2 selon la saison alors que les formats RINEX et NMEA fournissent respectivement les indications temporelles en temps GPS et en UTC. Ainsi, il a été nécessaire d'effectuer la conversion entre ces différentes échelles.

<sup>24</sup> Les orbites précises calculées par l'International GNSS Service et téléchargeables dans l'archive Crustal Dynamics Data Information System de la NASA ont été utilisées ([https://cddis.nasa.gov/Data\\_and\\_Derived\\_Products/GNSS/orbit\\_products.html](https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html)). Ces fichiers sont généralement disponibles 13 jours après la date de l'enregistrement.

Il a été montré plus haut (voir la section « Modèle théorique ») que la fréquence de l'interférence résultant du multitrajet issu d'une seule surface plane est définie en fonction de l'élévation du satellite, de la longueur d'onde de la porteuse et de la vitesse verticale de déplacement de l'antenne (Équation (20)). Cependant, l'environnement des sites d'acquisition comporte un ensemble de surfaces (murs, toits, arbres,...) qui constituent autant de sources de réflexion pouvant potentiellement polluer les mesures selon le modèle décrit par l'Équation (3). Étant donné que ces surfaces présentent généralement une pente supérieure à celle du sol, la fréquence des interférences qu'elles produisent est différente de celle que l'on cherche à extraire. Ainsi, dans un tel cas, le périodogramme de Lomb-Scargle calculé sur la série temporelle devrait présenter plusieurs pics. De cette manière, il est possible de corriger les mesures des signaux indésirables en soustrayant, pour chaque pic significatif du LSP ne correspondant pas à la réflexion au sol, le modèle sinusoïdale ajusté par moindres carrés dont la fréquence est fixée par la position du maximum. Néanmoins, étant donné que la surface du terrain n'est jamais parfaitement horizontale, il est nécessaire de définir un intervalle de fréquences dans lequel se situe l'interférence pertinente afin de garantir qu'elle ne soit pas retirée par le filtre décrit. Ainsi, les bornes de cet intervalle sont données par :

$$\left[ \frac{2}{\lambda} \bar{v} \cos(\gamma_{max}) \sin(\theta - \gamma_{max}) ; \frac{2}{\lambda} \bar{v} \cos(\gamma_{max}) \sin(\theta + \gamma_{max}) \right] \quad (\text{en Hz}) \quad (25)$$

où  $\gamma_{max}$  est la pente maximum du sol au sein de la zone d'étude (Équation (10)). La borne inférieure (resp. supérieure) correspond à l'expression qui minimise (resp. maximise) la fréquence en fonction de la pente maximale pour des valeurs fixes de longueur d'onde, de vitesse verticale et d'élévation.

La dernière étape des traitements consiste à ajuster par moindres carrés le modèle décrit par les Équations (19) et (21) à chaque série temporelle afin d'estimer l'AAF  $\alpha$  et la phase  $\phi$ . Cette dernière est ensuite utilisée pour calculer la profondeur réelle de réflexion grâce à la Relation (23). Dans l'Équation (21),  $\rho_G$  a été fixé à 1 ce qui revient à négliger l'effet de la directivité de l'antenne. En effet, la variation du gain de l'antenne en fonction de la direction n'est pas fournie ou alors seulement de manière incomplète par les fabricants. Ainsi, il paraissait préférable d'émettre l'hypothèse d'un gain uniforme plutôt que de potentiellement ajouter une information de mauvaise qualité susceptible de produire des erreurs difficiles à étudier. Néanmoins, il est important de déjà insister sur le fait que la validité de cette supposition reste à prouver.

Finalement, un ensemble de fonctionnalités ont été ajoutées à plusieurs niveaux dans la chaîne de traitements pour produire des statistiques ainsi que des visualisations graphiques et cartographiques qui seront utilisées pour l'analyse des résultats. Ainsi, l'orthophoto<sup>25</sup> de chaque site d'étude a été ajoutée au programme afin d'être utilisée comme fond de plan pour les cartes.

Le protocole de traitement des données comporte 2 hyperparamètres :

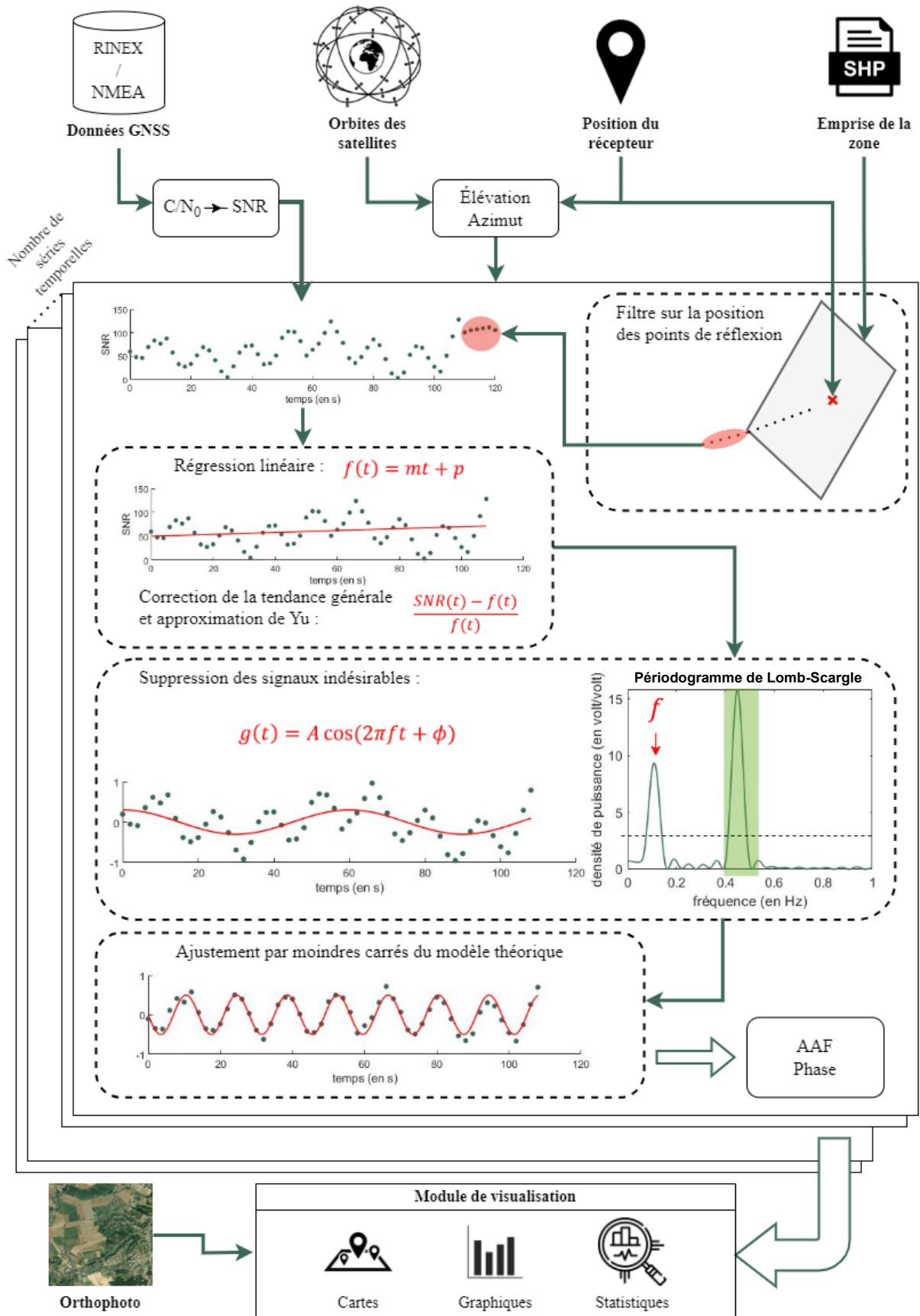
- la proportion de mesures nécessaires dans une séquence pour qu'elle ne soit pas supprimée ;
- le seuil de densité de puissance du LSP au-dessus duquel une interférence indésirable sera corrigée.

Si ce premier paramètre a été fixé à 50 %, le second sera choisi pour chaque expérience après une analyse visuelle du LSP étant donné que la densité de puissance calculée grâce à cette méthode varie en fonction du nombre d'observations dans la série temporelle (VanderPlas, 2018).

---

<sup>25</sup> Les orthophotos ont été découpées et enregistrées au format « geotiff » depuis le Web Map Service fourni par le Géoportail de la Wallonie (WalOnMap) : <https://geoportail.wallonie.be/home.html>.

FIGURE 32 : Diagramme illustrant le traitement des données (les données utilisées comme exemple ont été produites artificiellement)



La Figure 32 illustre par un exemple l'ensemble de la chaîne de traitements des données. D'abord, la série temporelle de  $C/N_0$  est extraite du fichier contenant les données GNSS et ces valeurs sont transformées en SNR. Ensuite, la position du centre de la FFZ associée à chaque mesure a été calculée et les observations situées hors de la zone d'étude ont été supprimées (ellipses rouges dans la Figure 32). Une régression linéaire est alors calculée sur base de la série temporelle résultante. Ce modèle est utilisé pour corriger de la tendance générale et appliquer l'approximation de Yu. À l'issue de ce traitement, la série temporelle correspond au troisième graphique en partant du haut de la Figure 32. Sur base de cela, le périodogramme de Lomb-Scargle est calculé. On observe dans ce dernier la présence de deux pics supérieurs au seuil défini : l'un correspond à l'effet du multitrajet lié à la réflexion au sol étant donné qu'il se trouve dans l'intervalle contenant la fréquence théorique modélisée tandis que l'autre est associé à une interférence indésirable. Un modèle sinusoïdal dont la fréquence correspond à ce dernier pic est ajusté par moindres carrés aux données et est ensuite utilisé pour corriger les observations de l'interférence indésirable. Finalement, le modèle théorique est ajusté par moindres carrés sur les mesures de SNR transformé afin d'estimer l'AAF et la phase (et la profondeur de réflexion qui en découle). L'ensemble de cette chaîne de traitements est appliquées sur l'ensemble des séries temporelles d'observations disponibles. Finalement, le module de visualisation permet de produire une variété de figures utiles pour l'analyse.

### V - 3.1. Implémentation

La chaîne de traitements des données décrite ci-dessus a été implémentée dans le langage de programmation Matlab et selon le paradigme de l'orienté-objet. L'ensemble du code source développé est disponible à l'adresse suivante : [Mémoire GNSS-R - juin 2024](#). Ce programme a été créé dans le but de traiter et analyser les données acquises dans le cadre de ce mémoire. Son utilisation n'est donc pas et n'avait pas vocation à être particulièrement « user-friendly ».

## V - 4. Statistiques d'analyse

Avant de passer à l'analyse des résultats, il convient de présenter les différentes métriques qui vont être utilisées pour évaluer la qualité des données et des traitements. L'étude de ces statistiques sera bien-sûr complétée par l'examen visuel des représentations graphiques et cartographiques créées par le programme développé.

### V - 4.1. Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination de Pearson, ou  $R^2$ , évalue la capacité d'une régression linéaire à prédire une mesure cible sur base d'une variable explicative. Il est donné par :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (26)$$

où :

- $n$  est le nombre de mesures ;
- $y_i$  est la valeur de la  $i^{\text{ème}}$  mesure cible ;
- $\hat{y}_i$  est la prédiction du modèle linéaire pour la  $i^{\text{ème}}$  mesure ;
- $\bar{y}$  est la moyenne des mesures.

Comme le montre l'Équation (26), le  $R^2$  vaut 1 lorsque les prédictions sont systématiquement identiques aux mesures cibles et donc que les résidus sont nuls. À l'inverse, le coefficient de détermination est égal à 0 quand la somme du carré des résidus du modèle linéaire équivaut à la somme du carré des écarts des mesures par rapport à la moyenne. En d'autres termes, cela signifie que la régression évaluée a un pouvoir de prédiction équivalant à celui que fournit la moyenne des mesures.

Dans le cas présent, les mesures cibles correspondent aux observations de SNR transformées par la chaîne de traitements alors que la variable explicative est donnée par les prédictions du modèle théorique ajusté par moindres carrés. Ainsi, le coefficient de détermination va quantifier la correspondance entre les valeurs prédites et les mesures. Il sera utilisé ici pour estimer conjointement la qualité du modèle théorique ajusté et la confiance que l'on peut accorder aux paramètres de Larson (AAF et phase) extraits.

L'analyse se basera directement sur le coefficient de détermination ou sur des indicateurs qui en découlent tels que le  $R^2$  moyen ou encore la distribution des  $R^2$  pour l'ensemble des séries temporelles d'un enregistrement.

## V - 4.2. Écart-type

En statistique, l'écart-type  $\sigma$  donne une mesure de la dispersion d'un ensemble d'observations. Il se calcule comme :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (27)$$

où :

- $n$  est le nombre d'observations ;
- $x_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  observations ;
- $\bar{x}$  est la moyenne des observations.

On comprend que plus les observations prennent des valeurs proches, plus l'écart-type est faible.

Ici, l'écart-type sera utilisé pour évaluer la répétabilité des mesures d'AAF et de phase pour un même signal au cours des 10 séquences successives. Ceci suppose donc que la zone de réflexion reste identique pour les 10 mouvements verticaux et que donc l'humidité du sol est constante. Il s'agit d'une hypothèse acceptable étant donné la courte durée des enregistrements et donc la faible variation de l'élévation et de l'azimut des satellites. Cette répétabilité des mesures correspond à la précision des paramètres de Larson extraits dans le cadre des différentes expériences. Cette dernière ne doit pas être confondue avec l'exactitude qui étudie, quant à elle, la proximité d'une mesure par rapport à la vraie valeur que l'on cherche à estimer. C'est donc bien la précision qui sera évaluée dans le cadre de ce mémoire.

Il est important de noter que la représentativité d'un écart-type augmente avec le nombre d'observations. Ainsi, cette statistique ne sera que peu significative si elle se base sur 2 ou 3 observations seulement.

## **Chapitre VI : RÉSULTATS**

Ce chapitre va décrire les résultats du traitement décrit précédemment sur base des données acquises au cours des 4 expériences réalisées. L'analyse se basera sur les statistiques, les graphiques et les cartes produits par le programme développé.

Les expériences seront envisagées l'une après l'autre mais des comparaisons seront parfois effectuées avec ce qui a déjà été présenté. La structure de l'analyse au sein des 4 sections tâchera d'être aussi similaire que possible pour faciliter la compréhension du lecteur.

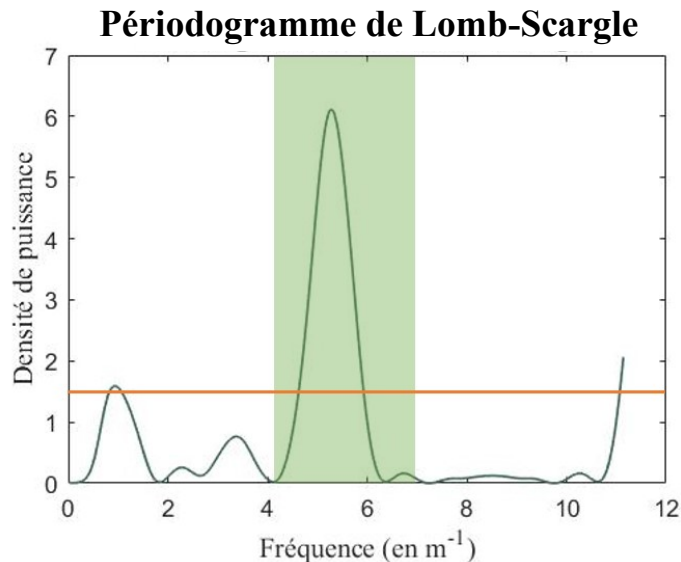
## VI - 1. Expérience 1

Cette première expérience a été réalisée au niveau du site d'Ampsin et a pour but d'étudier une première fois l'aspect de l'interférence enregistrée par la méthode de variation de hauteur de l'antenne et traitée par le programme développé.

### VI - 1.1. Périodogramme de Lomb-Scargle

D'abord, on peut constater que le périodogramme de Lomb-Scargle ci-dessous (Figure 33) illustre la densité de puissance en fonction de la « fréquence » (en nombre d'oscillations par mètre de déplacement vertical de l'antenne) pour des valeurs entre 0 et  $\sim 11$ . Cette borne supérieure correspond à la fréquence maximale qui peut être produite par une interférence dans le SNR liée au multitrajet, c'est-à-dire pour un angle d'incidence équivalant à  $90^\circ$ . Ainsi, les valeurs au-delà de ce seuil n'ont aucune pertinence d'un point de vue théorique dans le cadre de la réflectométrie interférométrique GNSS ; c'est pourquoi elles ne sont pas envisagées.

FIGURE 33 : Périodogramme de Lomb-Scargle correspondant à la deuxième séquence ascendante pour le satellite G10 et le signal L1



La Figure 33 montre un pic particulièrement visible pour une valeur de  $5,5 m^{-1}$  environ ce qui correspond à la fréquence théorique de l'interférence calculée sur base de l'élévation du satellite et de la longueur d'onde du signal (dans l'intervalle en vert dans le graphique). Cependant, on observe aussi un second maximum assez marqué indiquant 1 oscillation par mètre de déplacement vertical. Les autres valeurs de densité de puissance semblent relativement peu significatives. Ainsi, sur base de ces résultats, le seuil au-dessus duquel une interférence indésirable sera supprimée a été fixé à une densité de puissance de 1,5 volt/volt (ligne orange dans le graphique) pour la première expérience qui contient des séries temporelles composées de 20 observations en moyenne. Finalement, on remarque aussi que la densité de puissance augmente jusqu'à arriver à la fréquence maximale représentée sur la droite du graphique.

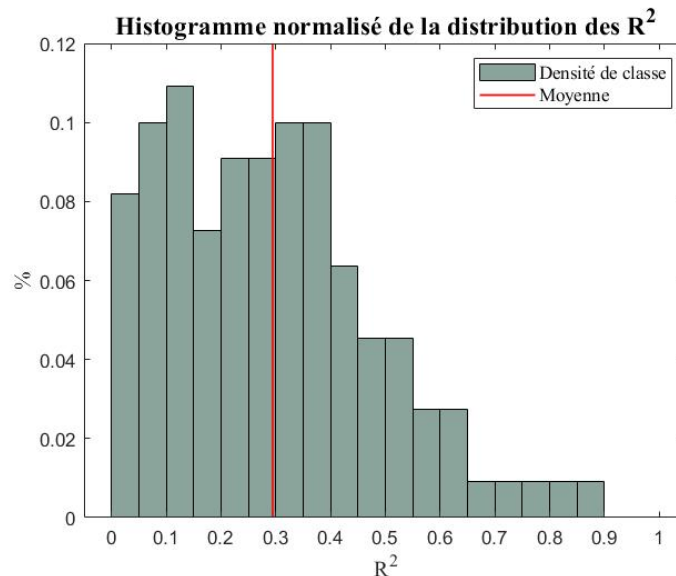
### VI - 1.2. Qualité générale des ajustements

Les données acquises par le Samsung Galaxy Z flip 3 lors de la première expérience se composent de 114 séries temporelles de SNR issues de 16 satellites différents. Après avoir appliqué les filtres sur la position de la zone de réflexion et sur la proportion de mesures disponibles, 4 séries temporelles ont été supprimées. La Figure 34 représente la distribution normalisée des  $R^2$  calculés pour les 110 ajustements effectués après avoir corrigé les potentielles interférences indésirables sur base des

LSP. On constate que le  $R^2$  moyen est de 0,29 et que la majeure partie de la distribution se situe sur la gauche de l’histogramme. En effet, à peine 15 % des ajustements présentent un coefficient de détermination supérieur à 0,5. Ceci indique que, globalement, la qualité des modélisations est relativement médiocre.

Par ailleurs, les ajustements ont aussi été effectués sans appliquer le module de suppression des interférences indésirables. Dans ce cas, le  $R^2$  moyen tombe à 0,21 et l’ensemble de la distribution est légèrement déplacée vers la gauche par rapport à ce que l’on peut observer sur la Figure 34. Ce filtre semble donc améliorer la qualité des ajustements.

**FIGURE 34 : Histogramme normalisé de la distribution des  $R^2$  associés aux ajustements pour la première expérience**



En outre, le  $R^2$  moyen a été calculé pour les séquences ascendantes et pour les séquences descendantes : ces deux valeurs sont pratiquement identiques. Il semble donc que le sens de déplacement vertical de l’antenne n’ait pas d’influence sur la qualité de la modélisation. De la même manière, le coefficient de détermination moyen pour chaque séquence a été calculé. Dans ce cas-ci, les valeurs vont de 0,17 à 0,4 ce qui montre que les 10 mouvements réalisés ne donnent pas accès à la même qualité des mesures de SNR.

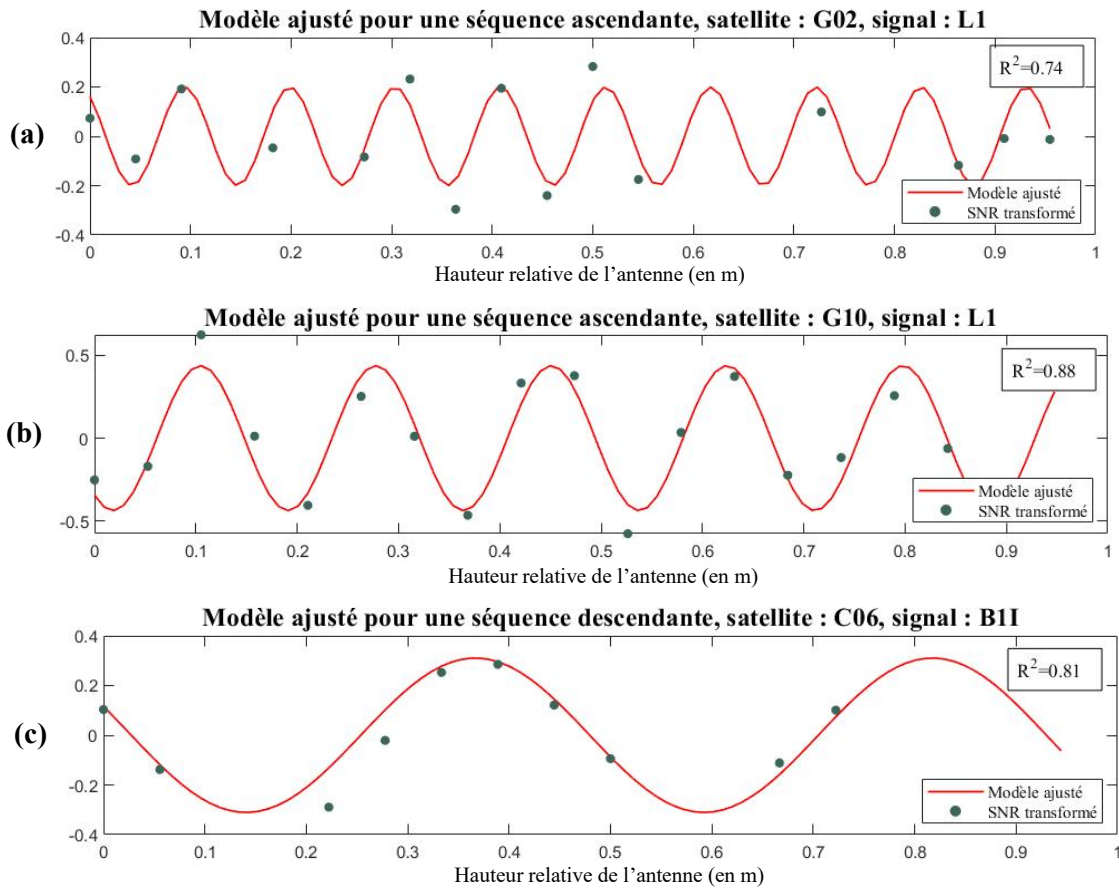
### VI - 1.3. Analyse des ajustements

Les graphiques de la Figure 35 présentent les modèles ajustés sur plusieurs séries temporelles de SNR transformé en fonction de la hauteur relative de l’antenne par rapport à la hauteur initiale  $h_0$ . Les trois ajustements illustrés correspondent aux valeurs de  $R^2$  les plus élevées pour cette première acquisition. On constate que la fréquence des interférences modélisées est différentes pour chaque série temporelle étant donné que les satellites G02, G10 et C06 se trouvaient à des élévations différentes (respectivement  $65^\circ$ ,  $33^\circ$  et  $12^\circ$ ). Or, étant donné la durée des déplacements pour la première expérience, toutes les séries temporelles contiennent au mieux une vingtaine d’observations. Ainsi, on observe que le nombre de mesures par période d’interférence diminue quand la fréquence augmente. De cette manière, on constate que, dans la Figure 35a, chaque oscillation du modèle passe par 2 points au maximum. Ce phénomène implique qu’il est plus difficile de distinguer visuellement l’interférence dans les mesures transformées de SNR lorsque la fréquence de cette dernière est élevée. À l’inverse, il aurait été relativement simple de retracer manuellement l’effet du multitrajet sur base de la série d’observations de la Figure 35c. Le graphique (b) illustre, quant à lui, une situation intermédiaire.

Par ailleurs, on peut remarquer que les séries temporelles (a) et (c) représentées dans la Figure 35 sont incomplètes : la distance entre les observations de SNR n’est pas systématiquement identique. Les

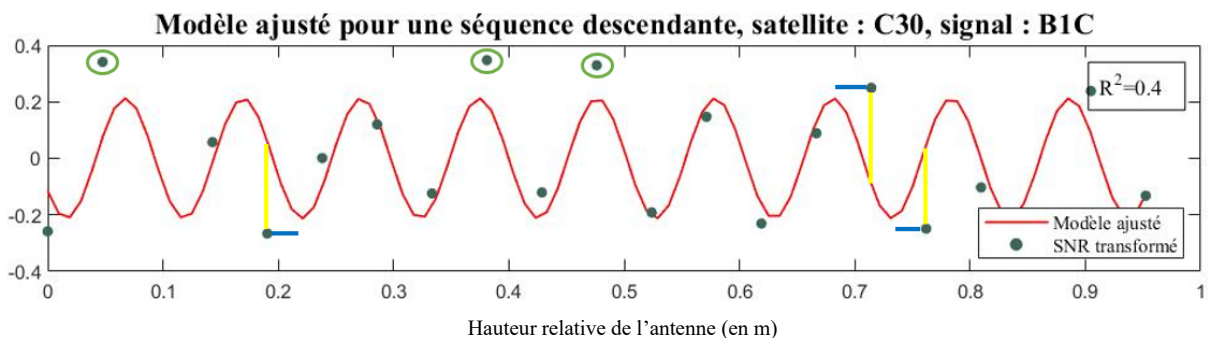
absences de mesure peuvent provenir du filtre sur la position de la zone de réflexion ou de la perte momentanée du signal GNSS.

FIGURE 35 : Exemples d'ajustements satisfaisants du modèle théorique sur des séries temporelles de SNR transformé



La Figure 36 présente le résultat d'un ajustement correspondant à un  $R^2$  relativement faible (0,4). Néanmoins, on observe que, malgré cette faible valeur, la majorité des mesures de SNR transformé sont très proches du modèle tracé en rouge. On constate que la médiocrité du coefficient de détermination s'explique majoritairement par l'importance des résidus représentés sur le graphique par les lignes jaunes. Cependant, il semblerait qu'un léger déplacement des mesures concernées (en bleu sur le graphique) permettrait de se rattacher au modèle. De plus, on peut observer que, à cause de l'importante pente locale de la sinusoïde, une faible translation horizontale d'une observation induira une forte variation sur le résidu correspondant. De la même manière, l'effet inverse sera observé pour une oscillation de plus basse fréquence qui présente donc des pentes locales bien moins importantes. Ainsi, une petite erreur sur la hauteur verticale de l'antenne aura un effet plus prononcé sur les résidus, et donc sur le  $R^2$ , pour la reconstitution des interférences de hautes fréquences.

FIGURE 36 : Modèle ajusté pour la deuxième séquence descendante pour le satellite C30 et le signal B1C



Par ailleurs, on constate aussi que plusieurs points (entourés en vert dans la Figure 36) se trouvent significativement au-dessus du modèle mais toujours dans le prolongement d'une crête de celui-ci. Il semble donc que l'ajustement sous-estime légèrement l'amplitude de l'interférence affectant les observations de SNR.

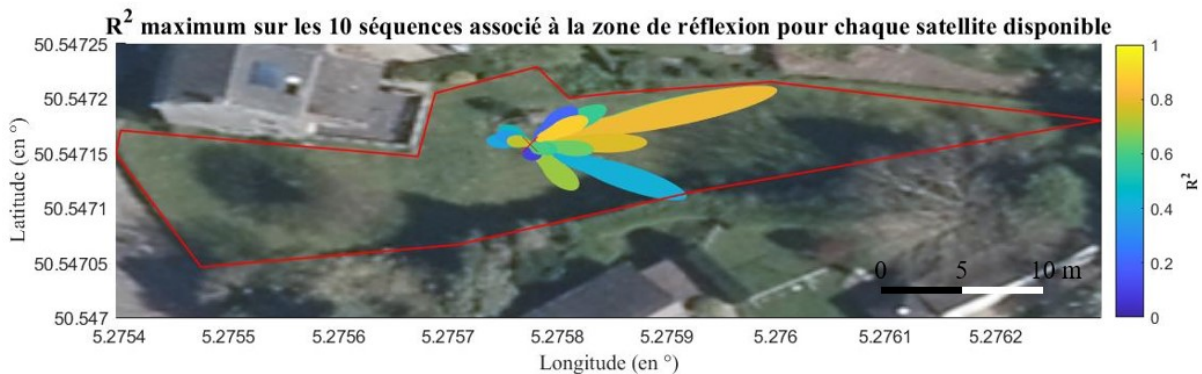
#### VI - 1.4. Analyse de la première zone d'étude

La carte ci-dessous (Figure 37) illustre, pour chaque satellite, le  $R^2$  maximum parmi les ajustements réalisés sur les 10 séquences disponibles. Chaque coefficient de corrélation est représenté, dans la zone de réflexion au sol correspondante, par une couleur selon l'échelle se trouvant sur la droite de la figure. Le fond de plan est constitué par l'orthophoto et la zone d'étude est définie par la bordure en rouge.

On constate que les observations ne sont pas uniformément réparties autour de la position du récepteur : le quadrant nord n'en contient aucune tandis que la majorité des mesures se trouvent dans le quadrant est. De plus, les zones de réflexion distinguées dans ce secteur présentent des tailles très diversifiées ce qui indique que les signaux proviennent de satellites se trouvant dans les différents niveaux d'élévation du ciel. À l'inverse, on observe seulement quelques mesures correspondant à des satellites à relativement haute élévation vers le sud et vers l'ouest.

En outre, les plus hautes valeurs de  $R^2$  maximum (dans les tons de jaune) sont orientées vers l'est.

FIGURE 37 :  $R^2$  maximum parmi les ajustements réalisés pour les 10 séquences pour chaque satellite disponible dans l'enregistrement



La Figure 38 montre une vue panoramique du site d'étude depuis la position du récepteur pendant l'acquisition. On peut constater que, entre le sud-est et le nord-est, la végétation et les bâtiments masquent la portion du ciel située juste au-dessus de l'horizon, c'est-à-dire à basse élévation (le jour où l'acquisition a été réalisée, l'arbre situé à l'ouest n'avait pas encore été élagué et masquait donc une plus grande partie du ciel). Ceci semble expliquer le fait que seul le quadrant est contienne des zones de réflexion correspondant à des satellites situés à faible élévation. Par ailleurs, on distingue bien la pente vers l'est évoquée dans la présentation du site.

FIGURE 38 : Vue panoramique du site d'étude depuis la position du récepteur pour l'Expérience 1



## VI - 2. Expérience 2

Pour rappel, la seconde expérience se compose de deux acquisitions : (a) et (b) ; chacune réalisée à l'aide de deux smartphones Xiaomi Mi 8.

- Lors de l'Acquisition (a), un smartphone était accroché sous le disque de plexiglass alors que le second était posé au-dessus de celui-ci.
- Pour l'Acquisition (b), le premier smartphone se trouvait toujours accroché sous le disque tandis que le deuxième avait été placé au sol.

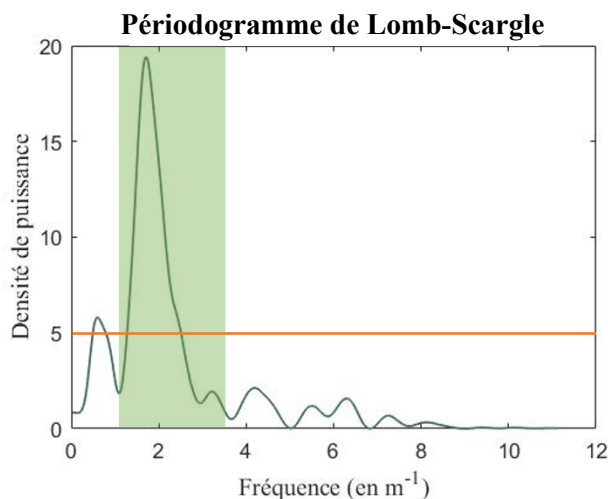
Les Sections V - 2.1. à V - 2.5. vont étudier le traitement des interférences liées au multitrajet comme cela a été fait pour la première expérience afin de permettre la comparaison. Les différentes figures qui seront présentées dans cette analyse se basent sur les données issues du smartphone placé sous le disque au cours de l'Acquisition (a). Néanmoins, les mêmes résultats sont observables pour les mesures réalisées avec ce smartphone pendant l'Acquisition (b).

### VI - 2.1. Périodogramme de Lomb-Scargle

La Figure 39 présente un exemple de périodogramme de Lomb-Scargle pour une série temporelle acquise au cours de la seconde expérience. Lors de cette dernière, les séquences de déplacement vertical ont duré entre 45 et 110 secondes ; les séries temporelles sont donc constituées d'autant de mesures. On remarque, dans la figure ci-dessous, que les valeurs de densité de puissance sont près de 3 fois plus importantes que celles observées pour la première expérience. Ainsi, le pic principal correspondant à la fréquence théorique de l'interférence atteint une densité de puissance d'environ 19 tandis qu'il présentait à peine une valeur de 6 dans la Figure 33. Une fois de plus, on observe la présence d'un second maximum local de plus faible magnitude associé à une fréquence de  $0,7 \text{ m}^{-1}$ . En comparaison, les autres crêtes dans le LSP semblent peu significatives étant donné que leur densité de puissance n'excède jamais 3. Par ailleurs, on ne distingue plus d'augmentation de la densité de puissance à l'approche de la fréquence maximale pertinente représentée comme c'était le cas pour la première expérience.

Au vu de ces résultats, le seuil au-dessus duquel une interférence indésirable sera retirée a été fixé à une densité de puissance de 5 (ligne orange dans le graphique) pour cette expérience mais aussi pour les 2 suivantes. En effet, étant donné que celles-ci se composent de séries temporelles comptant globalement le même nombre de mesures que pour l'Expérience 2, les valeurs de densité de puissance devraient être comparables (VanderPlas, 2018). Evidemment, cette hypothèse a été validée en observant préalablement la forme des LSP associés à plusieurs séries temporelles pour chaque acquisition.

FIGURE 39 : Périodogramme de Lomb-Scargle correspondant à la première séquence



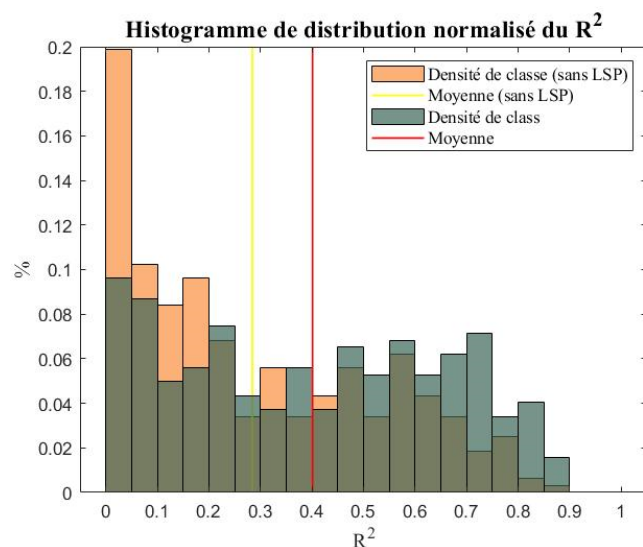
## VI - 2.2. Qualité générale des ajustements

L'enregistrement réalisé par le Xiaomi Mi 8 placé sous le disque de plexiglass pendant l'Acquisition (a) se compose de 322 séries temporelles de SNR utilisables. Celles-ci proviennent de mesures réalisées sur 36 signaux issus de 27 satellites différents. Ainsi, le nombre d'observations est donc largement plus important que pour la première expérience : on dispose d'environ trois fois plus de séries temporelles et on capte 9 satellites supplémentaires.

Dans la Figure 40, on peut observer les distributions normalisées des  $R^2$  correspondant aux ajustements du modèle théorique avec (resp. sans) l'application du filtre basé sur le LSP permettant de supprimer les interférences indésirables en vert (resp. orange). On constate que le coefficient de détermination moyen est de 0,4 en rouge lorsque ce filtre est utilisé tandis qu'il ne vaut que 0,29 dans le cas contraire en jaune. Au niveau des histogrammes, on observe que le traitement basé sur le LSP diminue la proportion d'ajustement dont le  $R^2$  est inférieur à 0,2 et augmente la quantité de coefficients de détermination supérieurs à 0,7. Ceci rend donc la distribution plus uniforme. En revanche, le  $R^2$  ne dépasse jamais 0,9. Ainsi, l'utilisation du filtre de suppression des interférences semble clairement améliorer la qualité des ajustements.

Ainsi, la qualité de la modélisation est meilleure pour cette expérience que pour la première. En effet, 40 % des ajustements présentent un  $R^2$  supérieur à 0,5 ce qui représente 25 % de plus que précédemment. Il semble donc que les conditions et le protocole d'acquisition de la seconde expérience soient plus favorables à la reconstitution des interférences. En outre, le coefficient de corrélation moyen pour chaque séquence varie entre 0,25 et 0,47 ce qui indique, une fois de plus, que chaque mouvement ne permet pas nécessairement de modéliser l'effet du multitrajet avec une égale qualité.

FIGURE 40 : Histogrammes normalisés de la distribution des  $R^2$  associés aux ajustements réalisés avec et sans le filtre de suppression des interférences indésirables



## VI - 2.3. Analyse des ajustements

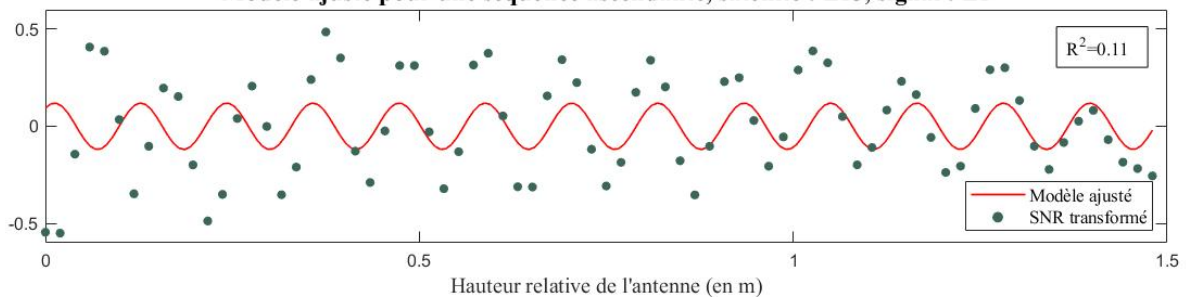
La Figure 41 montre le modèle ajusté à une série temporelle de SNR transformé issu de la première séquence ascendante pour le satellite E13 sur le signal E1. Il convient de noter que la variation de hauteur est maintenant de 1,5 m.

D'une part, on constate que l'interférence de relativement haute fréquence est facilement identifiable dans les mesures (Figure 41) alors que cela n'était pas systématiquement possible lors de la première expérience. Ceci est lié à l'augmentation du nombre d'observations dans la série temporelle provoquée par la diminution de vitesse de déplacement vertical du smartphone. En outre, étant donné la fréquence

de l'interférence et la densité de mesures, il semble qu'un si grand nombre de périodes ne soit pas forcément nécessaire pour reconstituer l'amplitude et la phase du signal. Cela implique qu'un déplacement vertical sur une bien plus faible distance aurait été suffisant.

D'autre part, dans la Figure 41, on remarque que, malgré l'aspect des mesures, le modèle ajusté n'est pas capable de reconstituer correctement l'interférence. Le coefficient de détermination correspondant n'est que de 0,11. On observe que la fréquence théorique ne correspond pas parfaitement aux oscillations visibles dans les données, particulièrement dans la partie gauche du graphique. Cette incapacité à modéliser la fréquence a pour effet de perturber l'estimation de la phase et de limiter l'amplitude de l'ajustement afin de minimiser les résidus. De cette manière, l'AAF s'en trouve sous-estimé.

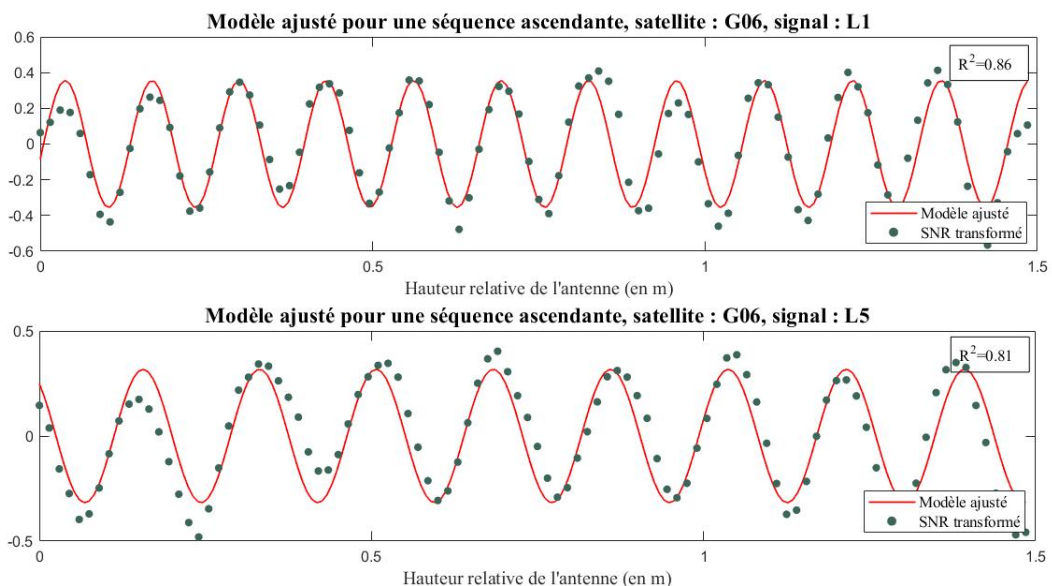
**FIGURE 41 : Modèle ajusté pour la première séquence ascendante pour le satellite E13 et le signal E1**  
**Modèle ajusté pour une séquence ascendante, satellite : E13, signal : E1**



- Comparaison entre les signaux L1 et L5

Contrairement au Samsung Galaxy Z flip 3, le Xiaomi Mi 8 est capable de capter les signaux dans les bandes L1 et L5 pour les constellations GPS et Galileo. Il est donc possible de comparer les mesures et les ajustements correspondant à deux signaux différents émis par le même satellite.

**FIGURE 42 : Modèle ajusté pour la première séquence ascendante pour le satellite G06 sur les signaux L1 et L5**



Ainsi, la Figure 42 illustre les modèles ajustés aux séries temporelles enregistrées sur les bandes L1 et L5 du satellite G06. D'abord, on constate que la qualité de la modélisation pour les deux séries temporelles est semblable : les  $R^2$  sont de 0,86 et 0,81. Ensuite, on peut observer que la fréquence de l'interférence est différente. Ceci provient de la différence de longueur d'onde de la porteuse pour les signaux L1 et L5. Par ailleurs, l'amplitude des oscillations et, par conséquent, l'AAF extrait est pratiquement identique pour les deux séries temporelles. En revanche, la profondeur de réflexion

estimée sur base de la phase n'est pas la même pour les deux signaux : elle est de 4,2 cm pour L1 et de 7,5 cm pour L5. Ainsi, il semble que ce paramètre ne soit pas comparable pour des signaux appartenant à des bandes de fréquences différentes. Pour cette raison, certaines statistiques basées sur les profondeurs de réflexion seront évaluées pour chaque bande séparément.

#### VI - 2.4. Analyse de l'AAF et de la profondeur de réflexion

La Section V – 2.2. a montré qu'une partie significative des interférences liées à la réflexion au sol a pu être modélisée avec succès. Il est donc maintenant possible d'étudier les AAF et les profondeurs de réflexion estimés sur base des ajustements. À l'inverse, la qualité des données acquises lors de l'Expérience 1 avait empêché de réaliser cette analyse plus tôt.

Avant d'analyser l'AAF et la profondeur de réflexion, il convient de rappeler l'intervalle théorique dans lequel chaque paramètre peut prendre sa valeur.

- L'AAF est compris entre 0 et 1 : 0 correspond à une absence de réflexion alors qu'une valeur de 1 signifie que le signal réfléchi est aussi puissant que le signal direct. (Ce dernier cas extrême n'est physiquement pas observable mais il permet de mieux comprendre la signification du facteur d'atténuation de l'amplitude.)
- La profondeur de réflexion, quant à elle, peut prendre des valeurs entre 0 et la moitié de la longueur d'onde ( $\lambda/2$ ) du signal ; c'est-à-dire  $\sim 9,5$  cm pour L1 et  $\sim 12,7$  cm pour L5.

Le Tableau 5 contient deux types d'indicateur pour l'AAF et pour la profondeur de réflexion. Pour cette dernière, les valeurs sont données pour chaque bande étant donné que la section précédente a mis en avant que les signaux de fréquences différentes n'étaient pas nécessairement comparables. D'une part, on a l'écart-type moyen qui correspond à la moyenne des écarts-types calculés pour chaque signal sur les différents mouvements. D'autre part, le tableau ci-dessous contient la moyenne des valeurs estimées. Afin de garantir la pertinence de ces statistiques, seuls les ajustements présentant un  $R^2$  supérieur à 0,65 ont été utilisés dans les calculs. Ainsi, les valeurs présentées ci-dessous se basent sur 70 séries temporelles (38 sur L1 et 32 sur L5).

On constate que la puissance des signaux réfléchis enregistrés est faible étant donné que l'AAF moyen ne vaut que 0,17. L'écart-type moyen est lui aussi relativement petit ce qui semble indiquer une bonne précision dans la reconstitution de l'AAF. En ce qui concerne la profondeur moyenne de réflexion, on constate, une fois de plus, qu'elle est deux fois plus importante pour la bande L5 que pour la bande L1. En revanche, l'écart-type moyen est similaire pour les deux types de signaux. Ainsi, pour les prochaines expériences, une seule valeur d'écart-type moyen sera calculée pour toutes les bandes confondues. Avec une valeur de 1 cm, cet indicateur semble relativement grand en sachant que la profondeur de réflexion a une variabilité maximale d'environ 10 cm. Ceci indique donc une faible précision pour l'estimation de la profondeur de réflexion.

TABLEAU 5 : Écart-type moyen et moyenne des AAF et des profondeurs de réflexion estimés

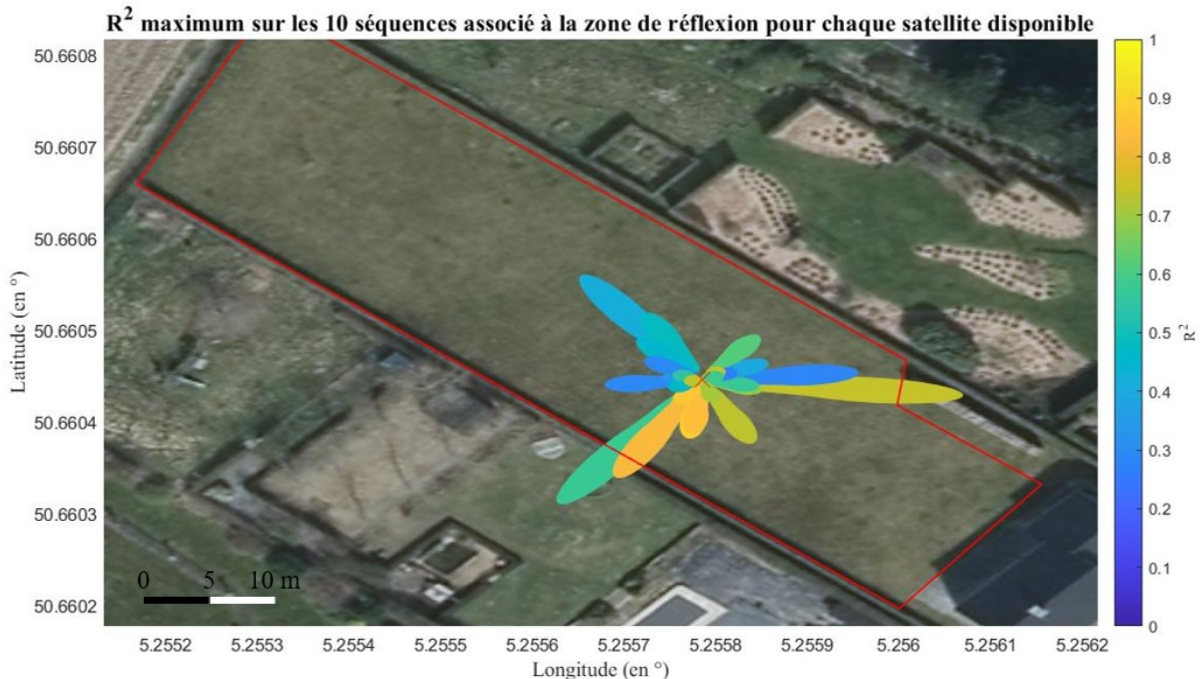
		Écart-type moyen	Moyenne
		0,018	0,17
<i>Profondeur de réflexion (en cm)</i>	<i>L1</i>	1,1	1,9
	<i>L5</i>	1	4,1

## VI - 2.5. Analyse de la seconde zone d'étude

Comme pour l'Expérience 1, la Figure 43 illustre le  $R^2$  le plus élevé parmi les 10 séquences pour chaque satellite (sur L1) en fonction de la zone de réflexion. Cette fois-ci, on observe que la distribution des mesures est bien plus uniforme que ce qui a été présenté pour le premier site d'étude. Cependant, on distingue toujours un secteur d'environ  $70^\circ$  centré sur le nord qui ne contient pas la moindre mesure. La taille des zones de réflexion est très variable ce qui montre que des satellites captés se trouvaient bien répartis dans les différents niveaux d'élévation du ciel.

Par ailleurs, on remarque dans la figure ci-dessous que les coefficients de détermination montrent généralement des valeurs plus élevées que dans l'Expérience 1. Néanmoins, l'axe est-ouest semble contenir les observations correspondant aux  $R^2$  maximums les plus faibles.

FIGURE 43 :  $R^2$  maximum parmi les ajustements réalisés pour les 10 séquences pour chaque satellite (bande L1) disponible dans l'enregistrement



La Figure 44 montre une vue panoramique du site d'étude de Faimés depuis la position où se trouvait le récepteur GNSS lors des acquisitions réalisées dans le cadre des Expériences 2, 3 et 4. D'abord, on constate que la zone est bien plus grande, plate et dégagée que celle où a été réalisée la précédente expérience. De plus, les bâtiments et la végétation susceptibles de perturber les signaux sont relativement éloignés de la position du récepteur. Les principaux éléments qui masquent une partie significative du ciel se situent à l'ouest et au nord-est ce qui pourrait potentiellement expliquer les faibles valeurs de  $R^2$  observées au niveau de cet axe.

FIGURE 44 : Vue panoramique du site d'étude depuis la position du récepteur pour les Expériences 2, 3 et 4



## VI - 2.6. Analyse des données issues du second smartphone

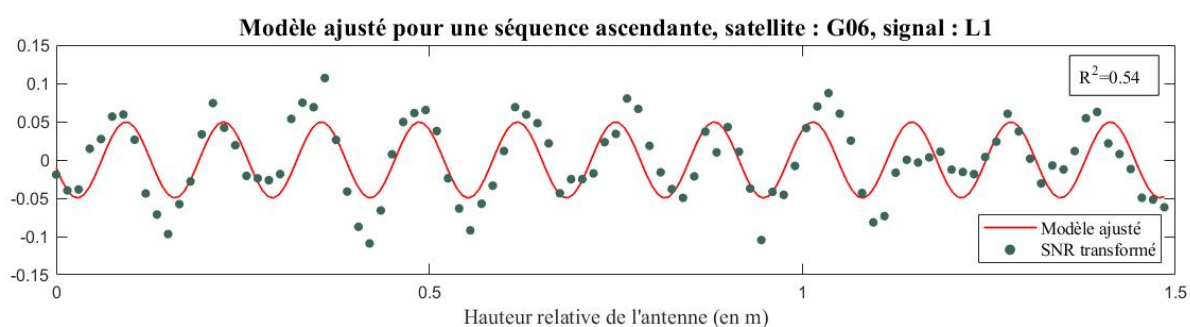
Cette section va étudier les valeurs de SNR enregistrées par le second smartphone se trouvant soit au-dessus du disque de plexiglass (Acquisition (a)) soit posé au sol (Acquisition (b)).

### • Acquisition (a)

Dans la Figure 45, on observe la modélisation réalisée sur une série temporelle enregistrée avec le Xiaomi Mi 8 posé sur le disque. L'ajustement sur la série temporelle correspondante pour le smartphone fixé sous le plateau a déjà été étudié dans la Figure 42.

D'abord, on constate que les mesures sont affectées par le multitrajet étant donné qu'on distingue la présence d'une interférence. Néanmoins, cette dernière est déformée par endroits comme, par exemple, au niveau de la hauteur relative de 1,2 m. Ainsi, le  $R^2$  de l'ajustement n'est que de 0,54 alors qu'il vaut 0,86 pour la série temporelle correspondante acquise par l'autre smartphone. En outre, l'amplitude de l'interférence est environ 8 fois plus faible que celle estimée dans la Figure 42. Il semble donc que le disque de plexiglass recouvert d'adhésif de cuivre ne bloque pas complètement les signaux réfléchis mais diminue fortement leur puissance et leur cohérence.

FIGURE 45 : Modèle ajusté pour la première séquence ascendante pour le satellite G06 et le signal L1 sur les données acquises par le smartphone posé sur le disque de plexiglass

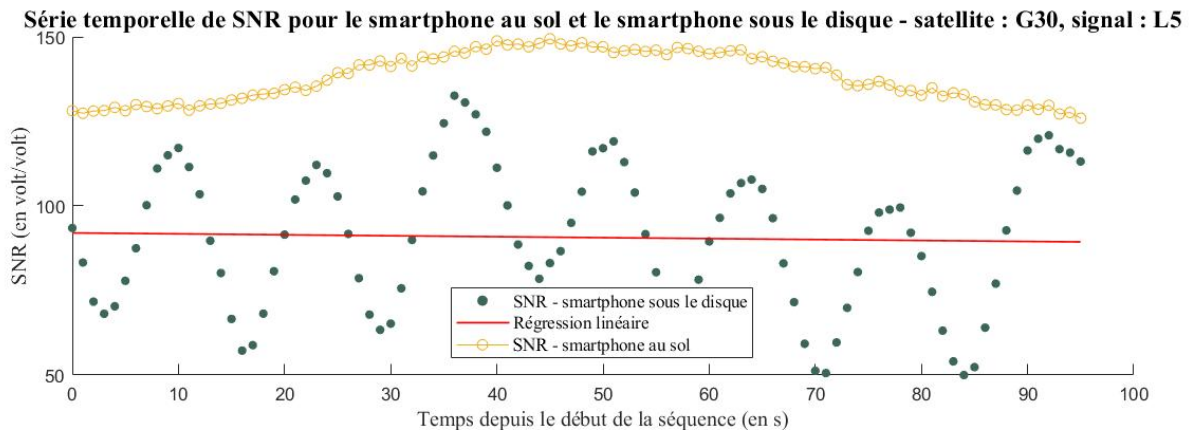


### • Acquisition (b)

Le graphique ci-dessous (Figure 46) montre pour une série temporelle de l'Acquisition (b) : les mesures de SNR enregistrées par les deux smartphones et la régression linéaire utilisée afin d'appliquer l'approximation de Yu dans la modélisation de l'interférence. Il est important de noter que l'axe horizontal représente le nombre de secondes depuis le début de la séquence et plus la hauteur relative.

On constate que la série temporelle enregistrée par le Xiaomi Mi 8 au sol ne présente pas d'interférence mais n'est pas constante pour autant : elle présente une légère variation « en cloche » entre ~ 130 et 150 volt/volt. De plus, ces valeurs de SNR sont systématiquement supérieures à celles issues du smartphone placé sous le disque. Ainsi, le modèle linéaire ajusté pour estimer la puissance du signal direct capté afin d'appliquer l'approximation de Yu est, quant à lui, inférieur à la série temporelle enregistrée par le Xiaomi Mi 8 au sol. La différence moyenne est de 37 volt/volt sur les 300 ajustements réalisés pour les données obtenues lors de l'Acquisition (b).

FIGURE 46 : Séries temporelles de SNR enregistrées avec le smartphone posé au sol et celui fixé sous le disque pour le satellite G30 et le signal L5



## VI - 3. Expérience 3

### VI - 3.1. Qualité générale des ajustements pour les différents récepteurs

Le Tableau 6 contient un ensemble d'informations concernant la quantité de données enregistrées par les différents récepteurs GNSS et la qualité des ajustements correspondants.

En ce qui concerne la quantité de données acquises, le nombre de séries temporelles utilisables varie entre environ 300 et 500 ce qui représente un important volume de données. On constate aussi que ce nombre est proportionnel à la quantité de signaux captés qui dépend elle-même des types de signaux que l'antenne du récepteur GNSS est capable d'enregistrer. Ainsi, l'antenne B qui est monofréquence sur les 4 constellations GNSS a acquis moins de données que les antennes bifréquences A, C et D. Les smartphones constituent des situations intermédiaires vu qu'ils ne sont bifréquences que sur certaines constellations. Au niveau du nombre de satellites captés, il semble augmenter légèrement avec la qualité de l'antenne. Néanmoins, cette variation atteint 9 satellites au maximum. Ce paramètre semble particulièrement important étant donné qu'il définit le nombre de zones de réflexion différentes étudiées.

Concernant la qualité des ajustements, le Tableau 6 montre que le coefficient de détermination moyen est relativement constant ( $\sim 0,4$ ) pour les différents récepteurs GNSS. En revanche, la proportion de modélisations satisfaisantes, c'est-à-dire dont le  $R^2$  moyen est supérieur à 0,5, semble plus importante pour les données acquises avec le ublox connecté aux antennes C et D que pour les autres récepteurs.

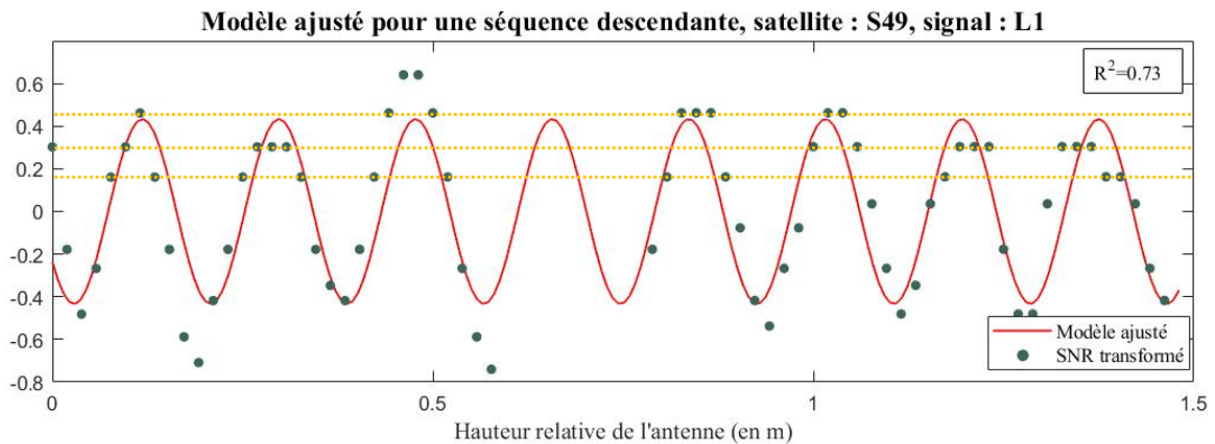
TABLEAU 6 : Statistiques sur la quantité de données acquises et la qualité des ajustements pour les différents récepteurs GNSS utilisés

		Nombre de séries temporelles utilisables	Nombre de satellites	Nombre de signaux	$R^2$ moyen des ajustements	Proportion de $R^2 > 0,5$
	<i>Xiaomi Mi 8</i>	295	26	33	0,37	25,1 %
	<i>Google Pixel 6</i>	416	29	47	0,38	25,7 %
<i>ublox</i>	<i>A</i>	520	32	55	0,35	22,5 %
	<i>B</i>	295	31	31	0,36	24,7 %
	<i>C</i>	511	33	55	0,4	34,3 %
	<i>D</i>	531	35	57	0,4	32,2 %

### VI - 3.2. Ajustement sur des données acquise avec le récepteur ublox

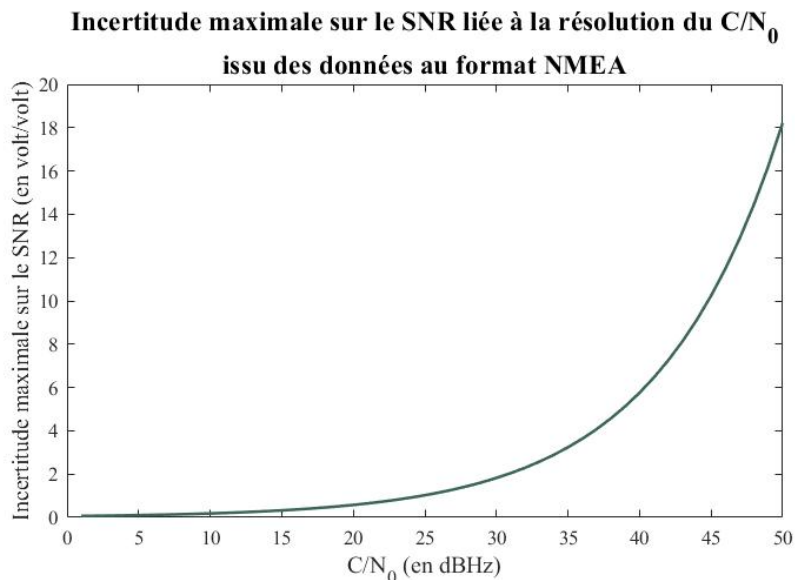
La Figure 47 montre l'ajustement réalisé sur une série temporelle acquise par le récepteur ublox F9P (connecté à l'antenne D) sur un signal de la bande L1 émis par un satellite SBAS (ID 49). On constate que les mesures sont affectées par l'interférence liée au multitrajet et que cette dernière est relativement bien modélisée. Ainsi, cette figure prouve que les satellites géostationnaires et les satellites appartenant à un système d'augmentation peuvent être utilisés pour réaliser de la réflectométrie GNSS sur base du protocole d'acquisition développé dans ce mémoire.

**FIGURE 48 : Modèle ajusté pour la seconde séquence descendante pour le satellite S49 et le signal L1 sur des données acquises par le récepteur ublox F9P**



Par ailleurs, on observe sur la Figure 47 que les mesures de SNR transformé ne prennent des valeurs que parmi un ensemble de niveaux discrets en dehors desquels on n'observe pas de points. Ces discontinuités semblent particulièrement visibles sur la partie haute du graphique comme le montre les lignes tracées en pointillés jaunes. Cet effet provient du fait que le  $C/N_0$  stocké dans le format NMEA est défini sur un nombre entier. De cette manière, le carrier-to-noise ratio calculé par le récepteur ublox est systématiquement arrondi à l'unité supérieure ou inférieure lorsqu'il est inclus dans le fichier NMEA. Cette dégradation de la résolution induit une incertitude maximale de 0,5 dBHz sur chaque mesure de  $C/N_0$ . Étant donné que cette valeur est convertie en SNR afin de passer d'une échelle logarithmique à une échelle linéaire, l'incertitude sur le SNR augmente avec la puissance du signal. Ainsi, la Figure 48 illustre cette dernière en fonction de la valeur de  $C/N_0$ . On peut constater que la potentielle erreur maximale sur le SNR liée à la résolution des mesures augmente de manière exponentielle en fonction de la puissance du signal.

**FIGURE 47 : Évolution de l'incertitude maximale sur le SNR liée à la résolution du  $C/N_0$  issu des données au format NMEA**



Cette faible résolution a pour effet d'augmenter les résidus correspondant au modèle ajusté et donc de diminuer la valeur du coefficient de détermination. De cette manière, on peut dire que la résolution grossière des observations diminue la précision des ajustements et, par conséquent, des paramètres d'amplitude et de phase estimés.

À l'inverse, le  $C/N_0$  consigné dans le format RINEX est un nombre réel à 5 décimales. Ainsi, les données issues des smartphones ne sont pas affectées par cette dégradation de la résolution des mesures effectuées par le récepteur GNSS.

### VI - 3.3. Analyse de l'AAF et de la profondeur de réflexion

Le Tableau 7 répertorie l'écart-type moyen des estimations de l'AAF et de la profondeur de réflexion parmi les différents signaux et pour les ajustements dont le  $R^2$  est supérieur à 0,65. Pour chaque récepteur, le nombre d'ajustements utilisés pour calculer ces statistiques est donné afin de rendre compte de leur significativité.

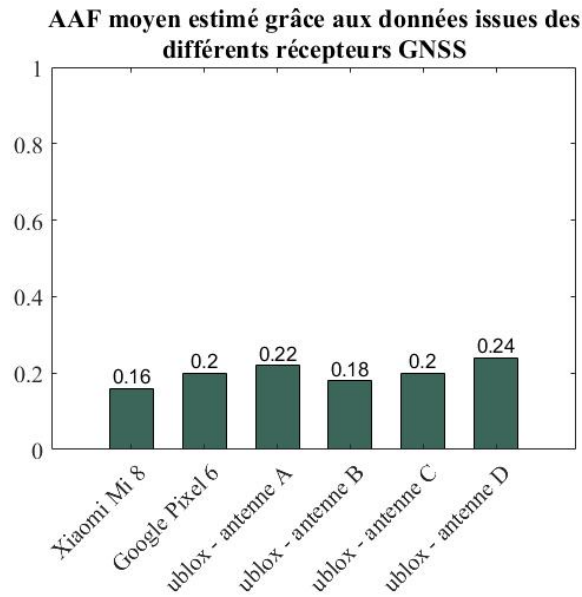
On constate que les écarts-types moyens pour l'AAF se situent entre environ 0,015 et 0,03. Les valeurs calculées pour les données acquises lors de l'expérience précédente se trouvent elles-aussi dans cet intervalle. On peut donc raisonnablement supposer que celui-ci définit la précision de l'estimation du facteur d'atténuation de l'amplitude développée pour ce mémoire. Selon le même raisonnement, il semble que la précision de l'estimation de la profondeur de réflexion soit d'approximativement 1 cm.

TABLEAU 7 : Écart-type moyen de l'AAF et de la profondeur de réflexion pour chaque récepteur GNSS utilisé

		Écart-type moyen		Nombre d'estimations utilisées pour calculer l'écart-type moyen
		AAF	Profondeur de réflexion (en cm)	
<i>Xiaomi Mi 8</i>		0,014	1	24
<i>Google Pixel 6</i>		0,03	1,3	38
<i>ublox</i>	<i>A</i>	0,018	0,8	27
	<i>B</i>	0,019	0,6	21
	<i>C</i>	0,03	1,2	45
	<i>D</i>	0,025	0,7	64

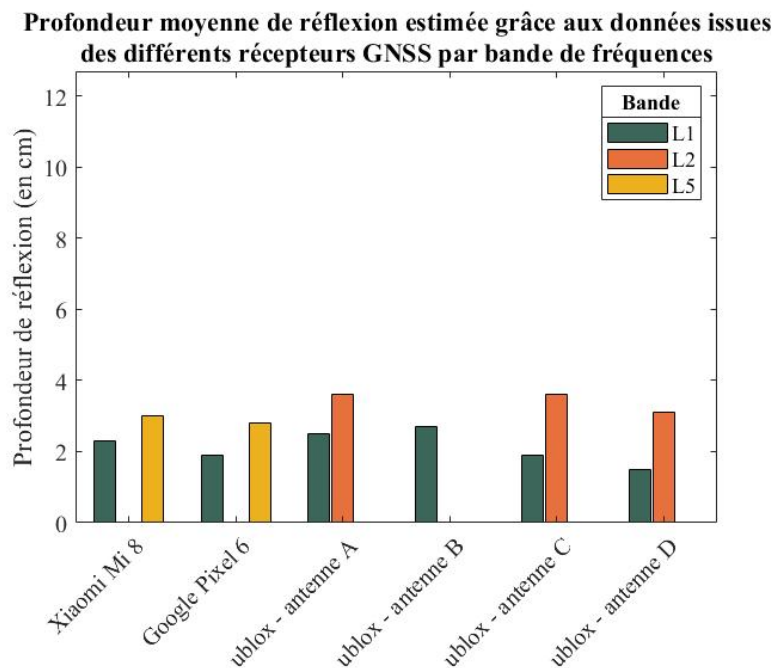
Le diagramme ci-dessous (Figure 49) illustre la moyenne des AAF estimés pour les ajustements dont le  $R^2$  est supérieur à 0,65 pour les différents récepteurs GNSS utilisés. On observe que les 6 acquisitions indiquent un AAF d'environ 0,2. Néanmoins, les moyennes associées au Xiaomi Mi 8 et à l'antenne D paraissent s'écarter de manière assez significative de cette valeur compte tenu de l'intervalle de confiance inférieur à 0,03 défini par l'écart-type moyen. Ceci semble indiquer que les AAF estimés ne sont pas comparables pour des récepteurs différents.

**FIGURE 49 : AAF moyen estimé sur base des ajustements réalisés sur les données issues des différents récepteurs GNSS**



La Figure 50 montre, pour chaque bande de fréquences, la profondeur de réflexion moyenne estimée en fonction du récepteur utilisé pour acquérir les données. Une fois de plus, ces valeurs ne se basent que sur les ajustements dont le  $R^2$  est supérieur à 0,65. D’abord, on peut observer que les profondeurs moyennes de réflexion sont systématiquement plus importantes pour les bandes L2 ou L5 que pour la bande L1. Ceci semble confirmer ce qui avait déjà été mis en avant dans l’expérience précédente. En outre, on constate que, au sein de chaque bande, les valeurs pour les différents récepteurs ne diffèrent jamais de plus de 1 cm. Étant donné que cette variabilité correspond à l’écart-type moyen associé à l’estimation de la profondeur de réflexion, il semble que ce paramètre soit comparable d’un récepteur à l’autre.

**FIGURE 50 : Profondeur moyenne de réflexion estimée sur base des ajustements réalisés sur les données issues des différents récepteurs GNSS pour les toutes bandes de fréquences captées**



## VI - 4. Expérience 4

Cette dernière expérience a pour but d'étudier la variation des paramètres de Larson estimés pour deux journées (le 23/04/2024 et le 27/04/2024) caractérisées par une humidité du sol légèrement différente. Les acquisitions ont été réalisées avec le Xiaomi Mi 8, le Google Pixel 6, le ublox F9P relié à l'Antenne A et à l'Antenne C.

### VI - 4.1. Qualité générale des ajustements

Pour chaque acquisition, le coefficient de détermination moyen pour les ajustements a été calculé. Ce dernier varie entre 0,22 et 0,34 ce qui est significativement plus faible que les  $R^2$  obtenus dans l'expérience précédente qui étaient compris entre 0,35 et 0,4. Étant donné que la seule différence entre les Expériences 3 et 4 est la disposition de l'antenne lors de l'acquisition des données, il semble que ce changement ait un effet sur la qualité des modélisations. Ceci paraît donc indiquer que l'utilisation du disque de plexiglass recouvert d'adhésif de cuivre permette d'améliorer la qualité avec laquelle l'interférence est enregistrée dans le SNR ce qui augmente la valeur du  $R^2$  associé à l'ajustement du modèle théorique.

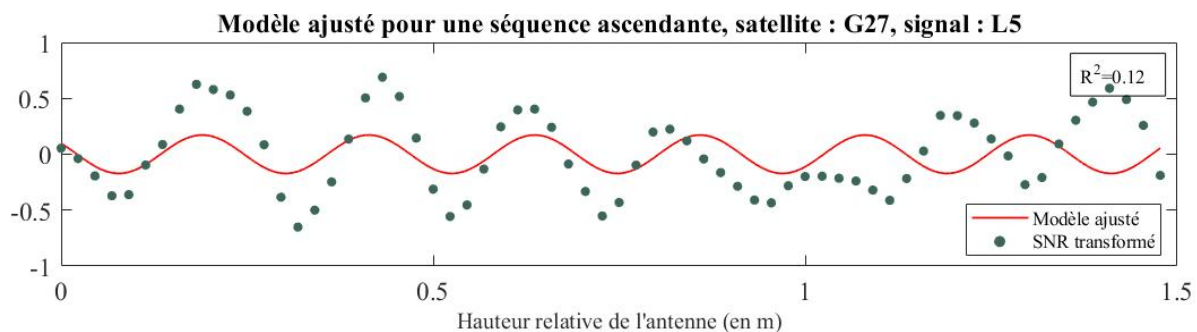
Malheureusement, la très faible qualité des ajustements ( $R^2$  moyen de 0,22) réalisés sur les données acquises le 23/04/2024 avec le Xiaomi Mi 8 empêche d'analyser les paramètres de Larson estimés sur base des enregistrements effectués avec ce récepteur. En effet, seules 4 séries temporelles présentent un coefficient de détermination supérieur à 0,65. Il paraît donc inutile d'étudier des indicateurs dont on sait déjà que la fiabilité est limitée.

### VI - 4.2. Analyse d'un ajustement

En observant les ajustements réalisés sur les données issues du Xiaomi Mi 8 pour tenter de comprendre l'origine du faible  $R^2$  moyen, un phénomène intéressant a été observé et va être décrit ici.

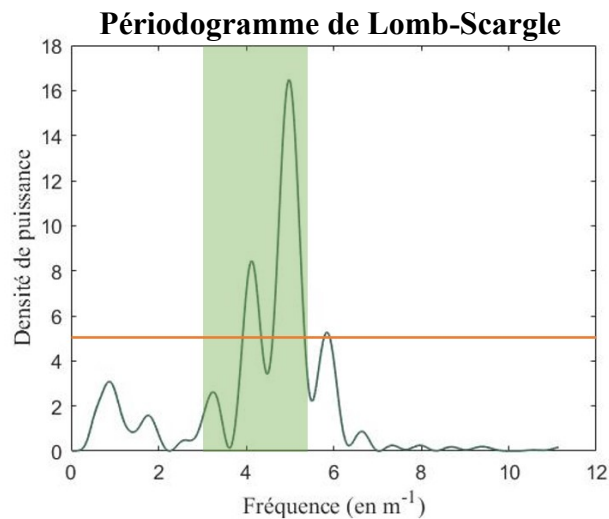
La Figure 51 montre l'ajustement réalisé sur une série temporelle de SNR transformé. D'abord, on constate que la modélisation n'est pas capable de reconstruire fidèlement l'interférence affectant les données. Ainsi, le coefficient de détermination n'est que de 0,12. Ensuite, on remarque que la longueur d'onde des différentes oscillations n'est pas constante au cours du déplacement de l'antenne. Ceci indique que la fréquence de l'interférence varie légèrement. Dès lors, il est normal que le modèle théorique, dont la fréquence est constante pour une acquisition de faible durée, ne soit pas capable de représenter les mesures. Enfin, on peut observer que l'amplitude de l'interférence affectant les observations augmente puis diminue pour atteindre un minimum pour une hauteur relative de 1 m avant de réaugmenter. Cette description est caractéristique d'un phénomène de battement produit, d'un point de vue théorique, par la superposition de deux signaux de fréquences légèrement différentes.

FIGURE 51 : Modèle ajusté pour la première séquence ascendante pour le satellite G27 et le signal L5 sur base des données acquises avec le Xiaomi Mi 8 le 23/04/2024



Dans la Figure 52, on observe le LSP calculé sur base de la série temporelle de mesures décrite ci-dessus. La zone verte représente la fenêtre définie dans le programme comme contenant la fréquence théorique de l'interférence. La ligne horizontale orange, quant à elle, représente le seuil en-dessous duquel une potentielle interférence indésirable ne sera pas supprimée. On constate que le LSP présente deux pics importants assez proches contenus dans la zone verte ce qui indique que le signal étudié se compose principalement de la superposition de deux sinusoides de fréquences légèrement différentes. Ceci confirme donc la présence du phénomène de battement dans les observations.

FIGURE 52 : Périodogramme de Lomb-Scargle associé à la série temporelle de SNR transformé issue du satellite G27 sur le signal L5 et acquise par le Xiaomi Mi 8 le 23/04/2024 lors de la première séquence ascendante



### VI - 4.3. Analyse des paramètres de Larson estimés

- Facteur d'atténuation de l'amplitude

Pour chaque acquisition (à l'exception de celles réalisées avec le Xiaomi Mi 8 comme expliqué précédemment), les AAF estimés sur base des ajustements dont le  $R^2$  est supérieur à 0,65 ont été extraits. Pour chaque récepteur, la Figure 53 contient la distribution normalisée de ces AAF et la courbe de densité cumulée correspondante pour les deux journées d'acquisition.

Au niveau des données associées au Google Pixel 6, on remarque que la distribution des AAF associée au 23/04/2024 est plus déplacée vers la droite du graphique que celle correspondant au 27/04/2024. Ceci indique que les facteurs d'atténuation de l'amplitude estimés sont plus importants pour les mesures réalisées le 23. Le mode de la distribution se trouve au niveau d'un AAF d'environ 0,22 alors que celui de l'autre distribution est d'approximativement 0,08. Ainsi, on constate que la courbe de densité cumulée associée au 27 avril est systématiquement située au-dessus de celle correspondant au 23 avril ce qui indique que les AAF estimés présentent comparativement de plus faibles valeurs.

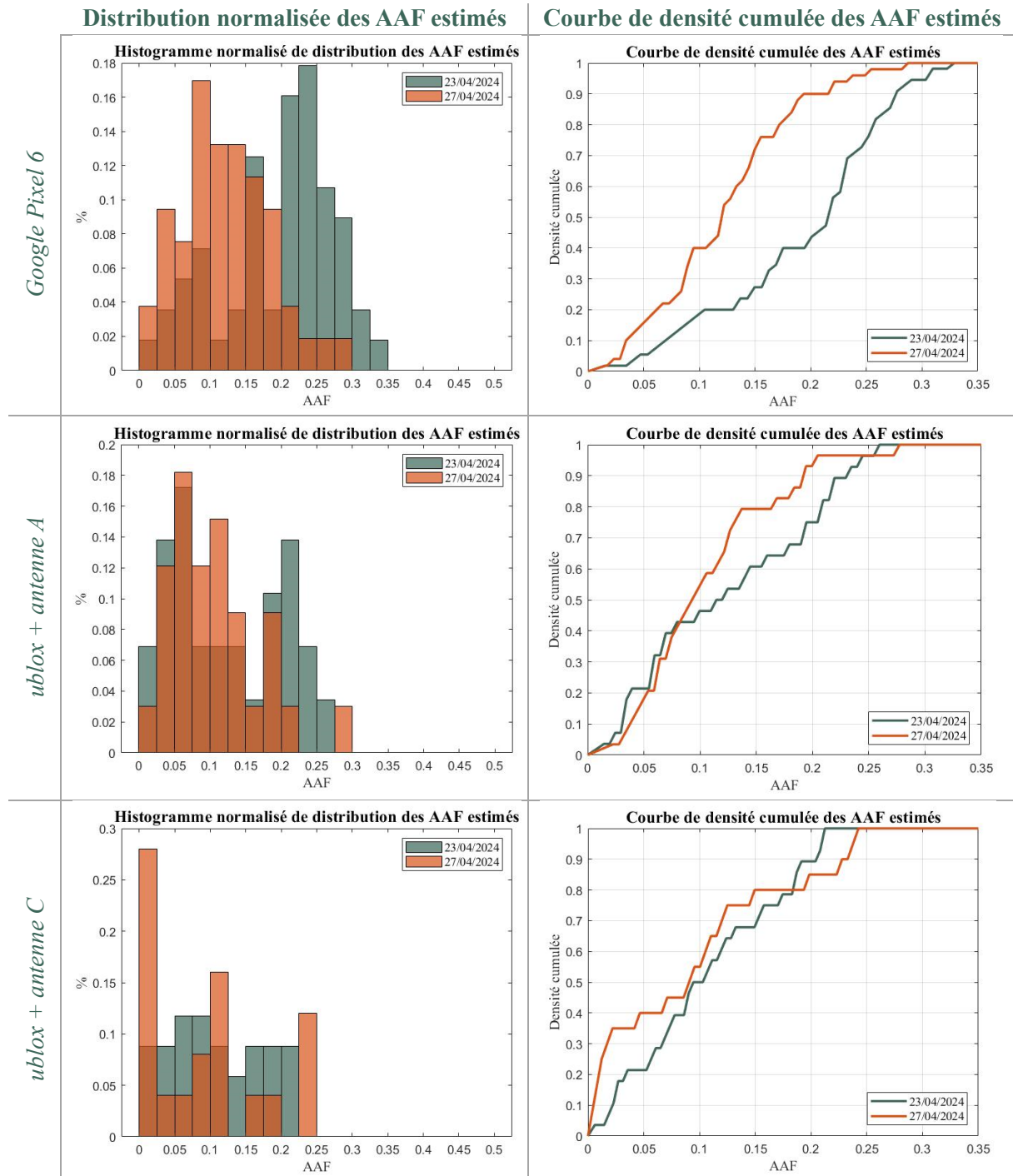
En ce qui concerne les données enregistrées avec le ublox connecté à l'Antenne A, on constate que la distribution correspondant au 23 avril présente deux modes associés aux AAF de 0,06 et 0,21. En revanche, la distribution liée au 27 avril est centrée sur une valeur de 0,06. Dès lors, les courbes de densité cumulée sont d'abord confondues avant que celle correspondant au 27/04 surpasse l'autre. Ceci indique que les AAF estimés pour le 27 avril sont légèrement moins importants que ceux déterminés pour le 23.

Pour les acquisitions réalisées avec le ublox connecté à l'Antenne C, étant donné que les distributions ne se basent que sur une vingtaine de valeurs, il semble relativement difficile de décrire une quelconque tendance dans l'histogramme. En revanche, on observe que les courbes de densité cumulée sont

relativement similaires pour le 23 et le 27 avril. Il convient malgré tout de garder à l'esprit que ces résultats ne se fondent que sur une quantité limitée d'estimations.

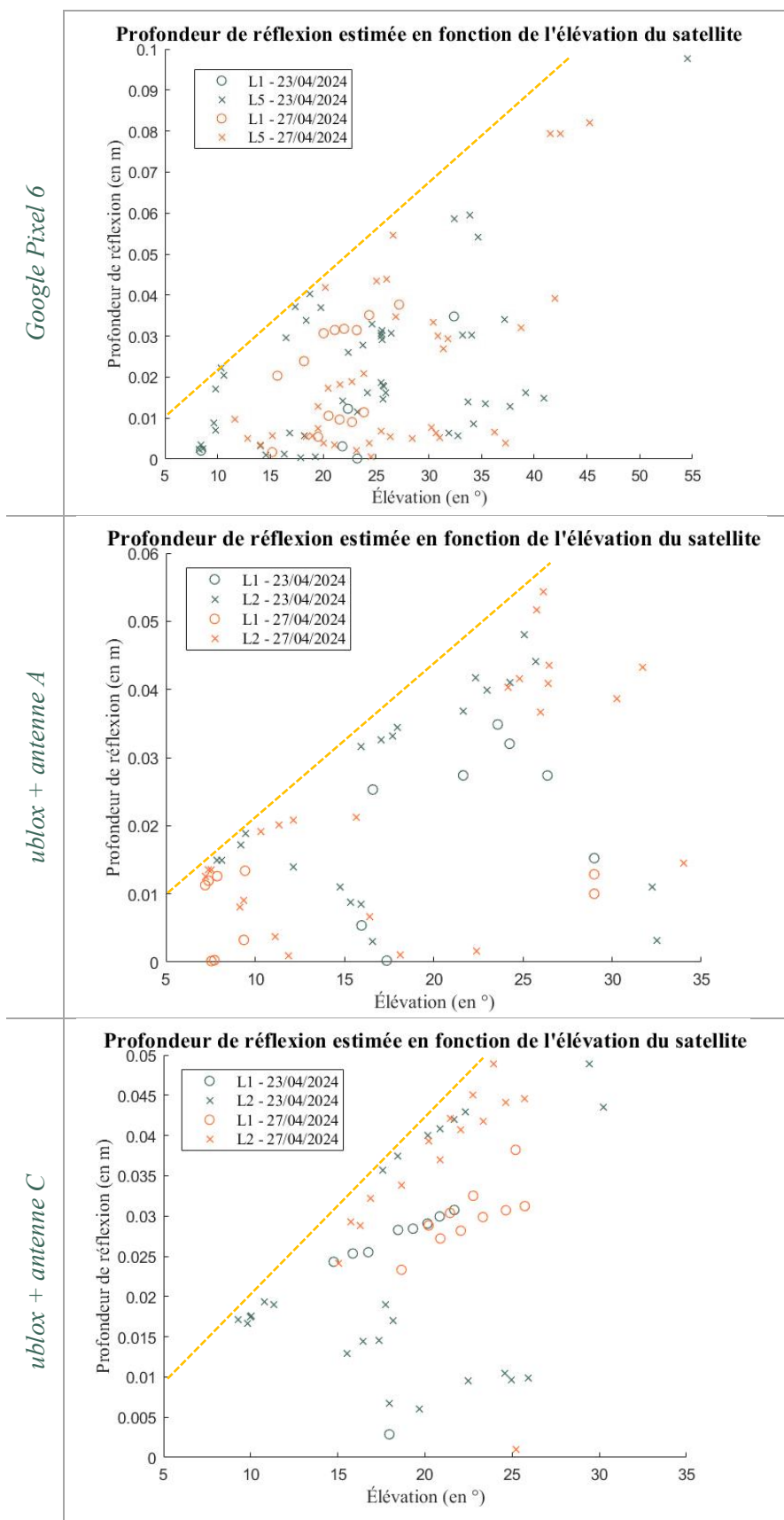
Ainsi, on constate qu'en général, les AAF estimés pour les enregistrements réalisés le 23 présentent des valeurs plus importantes. Néanmoins, cette tendance est plus marquée pour le Google Pixel 6 et, dans une moindre mesure, pour le ublox connecté à l'Antenne A que pour le ublox relié à l'Antenne C.

FIGURE 53 : Comparaison de la distribution des AAF estimés pour le 23 et le 27 avril 2024



- Profondeur de réflexion

FIGURE 54 : Profondeur de réflexion estimée en fonction de l'élévation du satellite pour le 23 et le 27 avril 2024



La Figure 54 contient, pour chaque récepteur, la profondeur de réflexion estimée en fonction de l'élévation du satellite correspondant aux mesures pour tous les ajustements dont le  $R^2$  est supérieur à 0,65. Les symboles verts représentent le 23 avril 2024 alors que les symboles oranges sont associés au 27 avril 2024. Les cercles correspondent aux bandes L1 et les croix aux bandes L2 ou L5 en fonction du récepteur.

On peut constater que les graphiques correspondant aux 3 récepteurs dans Figure 54 présentent globalement la même forme et les mêmes tendances. Ainsi, une seule description générale va être réalisée. Il est important de prendre en considération que les graduations des axes ne sont pas nécessairement les mêmes pour les différentes illustrations.

D'abord, on peut observer que les différents graphiques contiennent systématiquement une plus grande quantité de croix que de cercles. Ainsi, la plupart des ajustements dont le  $R^2$  est supérieur à 0,65 correspondent à des mesures réalisées sur des signaux appartenant aux bandes L2 ou L5. Ce résultat paraît relativement surprenant étant donné que, pour toutes les acquisitions, la majeure partie des signaux traités par le récepteur sont contenus dans la bande L1. Il semblerait donc que les modélisations soient de meilleure qualité sur les données issues d'ondes comprises dans les bandes L2 et L5.

Dans les graphiques de la Figure 54, on remarque que les profondeurs estimées par un ajustement dont le  $R^2$  est supérieur à 0,65 sont généralement associées à des satellites se trouvant à une élévation de 5 à  $\sim 40^\circ$ . Il semble donc que la modélisation de l'interférence liée au multitrajet soit de meilleure qualité pour des mesures effectuées sur un satellite se trouvant à une relativement faible élévation dans le ciel.

Ensuite, on remarque que les estimations se situent toujours sous une droite « imaginaire » intersectant l'axe des ordonnées représenté (pour une élévation de  $5^\circ$ ) au niveau d'une profondeur de réflexion de 1 cm. Cette ligne a été représentée au jaune sur les 3 graphiques. En outre, approximativement la moitié des points se situent légèrement sous la droite, parallèlement à celle-ci. Néanmoins, l'autre partie des estimations est répartie de manière plus aléatoire dans la partie basse des graphiques.

Par ailleurs, on constate que les alignements de cercles observables sont toujours situés sous l'alignement de croix disposé sous la droite imaginaire évoquée plus haut. Ceci indique donc que la profondeur de réflexion est généralement plus faible pour L1 que pour les autres fréquences (L2 et L5).

Finalement, il semble que la répartition des estimations ne varie pas en fonction du jour où les données ont été enregistrées.

## Chapitre VII : DISCUSSION

Maintenant que les résultats des 4 expériences ont été présentés et décrits en détail dans le chapitre précédent, il convient de discuter ces derniers. Pour ce faire, les différentes tendances observées vont être mises en relation, interprétées et expliquées autant que possible. Ponctuellement, les résultats seront comparés avec ce qui a déjà été fait dans la littérature scientifique et évoqué dans l'état de l'art. Sur base de cela, les éléments de réponse à la problématique formulée seront mis en avant.

D'abord, la qualité des mesures de SNR et de la hauteur du récepteur réalisées grâce au protocole d'acquisition développé sera discutée. Une évaluation des influences de la zone d'étude sera aussi effectuée. Ensuite, la performance des principaux blocs fonctionnels qui composent la chaîne de traitements permettant la modélisation de l'interférence liée au multitrajet sera établie. Suite à cela, la pertinence et la capacité des paramètres de Larson estimés à détecter une variation dans l'humidité du sol sera discutée. Afin de relativiser les éléments mis en avant par la discussion, une autocritique du travail sera réalisée. Ce chapitre se clôturera par l'évocation des perspectives concernant l'estimation de l'humidité du sol par réflectométrie GNSS sur base des récepteurs low-cost.

## VII - 1. Qualité des mesures

Cette section va rendre compte de la qualité avec laquelle l'interférence liée au multitrajet est enregistrée dans le SNR. En outre, la précision de la détermination de la hauteur de l'antenne va être évaluée. Ce paramètre est tout aussi crucial que le SNR étant donné que la méthode développée dans ce mémoire repose sur une modélisation d'un phénomène en fonction d'un déplacement vertical.

### VII - 1.1. Signal-to-Noise Ratio

Au cours de l'analyse des résultats, il a été montré que l'effet lié au multitrajet pouvait apparaître de manière très nette dans le SNR et ce au niveau des signaux appartenant aux différentes bandes GNSS. Dès lors, les différents paramètres liés au protocole d'acquisition et ayant une influence sur l'aspect de l'interférence vont être discutés.

D'abord, l'Expérience 1 a mis en avant que, pour un même déplacement vertical, le nombre de mesures nécessaires pour distinguer visuellement l'interférence augmentait en fonction de la fréquence de celle-ci. Ceci paraît évident puisque ce qui importe, en réalité, c'est la quantité d'observations par oscillation. Sur base de l'observation d'un ensemble de séries temporelles, il semblerait qu'une petite dizaine de mesures par période de l'interférence soit suffisante pour distinguer correctement l'effet du multitrajet. Il est donc nécessaire de réaliser un déplacement d'autant plus lent que le satellite exploité se trouve à une élévation importante afin d'augmenter le nombre d'observations par unité de distance. Néanmoins, pour un tel satellite, l'avantage est qu'une faible variation de la hauteur de l'antenne (moins de 50 cm) permettra déjà d'enregistrer assez d'oscillations pour reconstituer l'amplitude et la phase de l'interférence. Les tendances inverses sont observées pour les satellites présentant une faible élévation. En résumé, pour un intervalle fixé d'échantillonnage et afin de distinguer l'interférence, il conviendra de :

- déplacer l'antenne assez lentement ( $\sim 2$  cm/s) pour pouvoir utiliser les satellites à haute élévation ;
- déplacer l'antenne sur une distance assez importante ( $\sim 1,5$  m) pour pouvoir utiliser les satellites à faible élévation.

La seconde expérience a montré que fixer l'antenne sous un disque de plexiglass recouvert d'adhésif de cuivre permettait de diminuer la puissance du signal direct d'approximativement 37 dB. Lors de l'Expérience 4, ce dispositif n'a pas été utilisé. Ainsi, l'antenne recevait les signaux directs sans qu'ils ne soient atténués. Il est apparu que le  $R^2$  moyen correspondant aux ajustements réalisés sur ces données était significativement plus faible que celui calculé lors des précédentes expériences. Il semblerait donc que le disque de plexiglass permette d'augmenter la qualité avec laquelle l'interférence est enregistrée dans le SNR. Il est possible que cet effet soit lié au traitement réalisé dans le radio frequency front-end du récepteur. Dans ce block fonctionnel, le signal analogue transmis par l'antenne est numérisé. Cependant, la sensibilité du convertisseur varie en fonction de la puissance du signal entrant. Ainsi, lorsque le signal direct n'est pas atténué, sa puissance est telle que la sensibilité de la conversion diminue ce qui complique la « transcription » du signal réfléchi caractérisé par une faible puissance. De cette manière, lorsque l'antenne était placée au-dessus du plateau, l'interférence liée au multitrajet pouvait toujours être distinguée mais son amplitude était 8 fois moins importante que pour le récepteur placé sous le disque.

Dans les résultats relatifs à la troisième expérience, on a pu constater que le récepteur ublox F9P connecté à n'importe quelle antenne et les différents modèles de smartphones étaient tous capables d'enregistrer l'effet du multitrajet dans le SNR. Néanmoins, les antennes C et D permettaient d'acquérir une plus grande quantité de données mais aussi de réaliser des ajustements de meilleure qualité sur ces dernières. Étant donné que ces deux antennes correspondent aux plus coûteuses testées dans ce mémoire,

on peut aussi supposer qu'il s'agit des plus efficaces en termes de quantité de signaux pouvant être captés et de capacité à enregistrer ces signaux. Ceci pourrait donc expliquer que les interférences soient mieux reconnaissables dans les données acquises avec ces antennes.

La dernière expérience a mis en avant que la majeure partie des ajustements présentant un coefficient de détermination supérieur à 0,65 correspondaient à des mesures réalisées sur des signaux appartenant à la bande L2 ou L5 alors que les récepteurs captaient systématiquement plus de signaux contenu dans la bande L1. Ceci indique donc que l'interférence liée au multitrajet est mieux enregistrée dans le SNR pour les signaux dont l'onde porteuse présente une fréquence plus petite. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que plus la fréquence d'une onde est petite, moins celle-ci est perturbée par les potentiels obstacles de tailles limitées (inférieurs à la longueur d'onde) se trouvant sur son chemin. Ainsi, les bandes L2 et L5 sont moins sensibles à la végétation que la bande L1. Étant donné que les deux sites d'étude présentaient quelques arbres à proximité de la position du récepteur, il est possible que cet effet soit à l'origine de la meilleure qualité avec laquelle l'interférence apparaît dans les mesures de SNR sur L2 et L5.

Par ailleurs, l'Expérience 3 a pu montrer que le fait que le  $C/N_0$  soit fourni par un nombre entier dans le format NMEA dégradait la précision des mesures. En outre, l'importance de cet effet augmente avec la puissance du signal à cause de la transformation exponentielle utilisée pour la conversion en SNR. Afin d'éviter cette détérioration des observations, il est indiqué de stocker les données GNSS dans un format où le  $C/N_0$  est défini sur un nombre réel à plusieurs décimales comme dans le RINEX.

L'analyse générale des différentes acquisitions a montré que les  $R^2$  moyens correspondant aux séquences ascendantes et aux les séquences descendantes étaient similaires. Dès lors, il ne semble pas qu'un type de mouvement soit plus propice que l'autre à la reconstitution du multitrajet dans le SNR. Ainsi, la qualité avec laquelle l'interférence apparaît dans les mesures est indifférente au sens de déplacement vertical de l'antenne.

## VII - 1.2. Hauteur du récepteur

Pour rappel, la hauteur initiale de l'antenne par rapport au sol  $h_0$  a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban avant chaque acquisition. Le déplacement vertical  $\Delta h$ , quant à lui, a été fixé en mesurant la longueur de corde à enrouler lors des mouvements ascendants et descendants. Ainsi, afin de connaître la hauteur de l'antenne à chaque époque de mesure, on a supposé que la vitesse verticale était parfaitement constante  $\bar{v}$  et valait donc  $\Delta h$  divisé par la durée de la séquence. Ceci permet d'obtenir que la hauteur à la  $t^{ième}$  époque est de  $h_0 + t\bar{v}$ .

Dans la première expérience, on a pu montrer que la qualité des ajustements était globalement médiocre, entre autres choses, parce que les mesures de SNR présentaient parfois un décalage horizontal par rapport au modèle ajusté. Ces écarts sont probablement liés au fait que la vitesse verticale de déplacement du récepteur n'était pas constante ce qui est fort probable étant donné que la corde était tirée ou relâchée manuellement pour l'Expérience 1. Ainsi, la hauteur estimée présente une erreur de quelques centimètres ce qui permet d'expliquer la distance entre certaines mesures de SNR et le modèle. Cette explication est appuyée par le fait que l'amélioration du montage (utilisation d'une visseuse activée à l'aide d'un levier et ajout d'un système de palan au niveau de la corde) semble avoir permis de limiter les décalages des observations en rendant la vitesse verticale plus constante pour les expériences suivantes. Par ailleurs, on a pu identifier que le  $R^2$  moyen des modélisations différait parfois significativement entre les séquences. Ceci pourrait donc être lié à des variations de la constance avec laquelle les déplacements verticaux étaient effectués.

En outre, on a pu illustrer, dans l'analyse des résultats pour la première expérience, que l'effet sur les résidus (et donc sur le  $R^2$ ) d'une erreur sur la hauteur relative de l'antenne est plus important lorsque le satellite utilisé se trouve à haute élévation. Ceci est lié au fait que la fréquence de l'interférence

correspondante est élevée pour un tel satellite. Dès lors, la pente de la sinusoïde utilisée pour la modélisation est localement très importante. Cela implique qu'une faible variation en abscisse aura une grande incidence sur la valeur en ordonnée. Ainsi, une petite erreur sur la hauteur relative provoquera une large différence entre l'observation et le modèle. Ainsi, on peut dire que la précision requise sur la hauteur relative de l'antenne pour modéliser correctement l'interférence augmente avec l'élévation des satellites que l'on souhaite exploiter. Ces derniers sont donc plus difficilement utilisables. Ceci explique probablement pourquoi, dans l'Expérience 3, les ajustements dont le  $R^2$  était supérieur à 0,65 correspondaient à des satellites dont l'élévation n'excédait que rarement  $40^\circ$ .

Par ailleurs, si la mesure de la hauteur initiale de l'antenne est de bonne qualité étant donné la précision d'un mètre ruban, il convient de noter que cette valeur est affectée par une erreur liée à la variation du centre de phase (PCV) de l'antenne. Pour rappel, le PCV correspond à la variation de l'endroit exact dans l'espace où les mesures sont effectuées sur le signal incident. Cet effet, propre à chaque antenne, dépend de la fréquence de l'onde porteuse, de l'élévation et de l'azimut du satellite. Ainsi, la hauteur initiale mesurée ne correspond pas exactement à celle qui est physiquement pertinente. La différence affecte le calcul de la distance excédentaire parcourue par le signal réfléchi de manière constante. Dès lors, cette erreur ne contamine directement que la phase de la sinusoïde ajustée et donc la profondeur de réflexion qui en découle. Néanmoins, l'effet du PCV ne devrait jamais excéder 1 cm étant donné les valeurs typiques de variation du centre de phase. On peut donc raisonnablement le négliger.

## VII - 2. Influence du site d'étude

Dans cette section, les influences de la zone d'étude sur l'utilisation de la méthode de reconstitution de l'interférence liée au multitrajet seront évoquées.

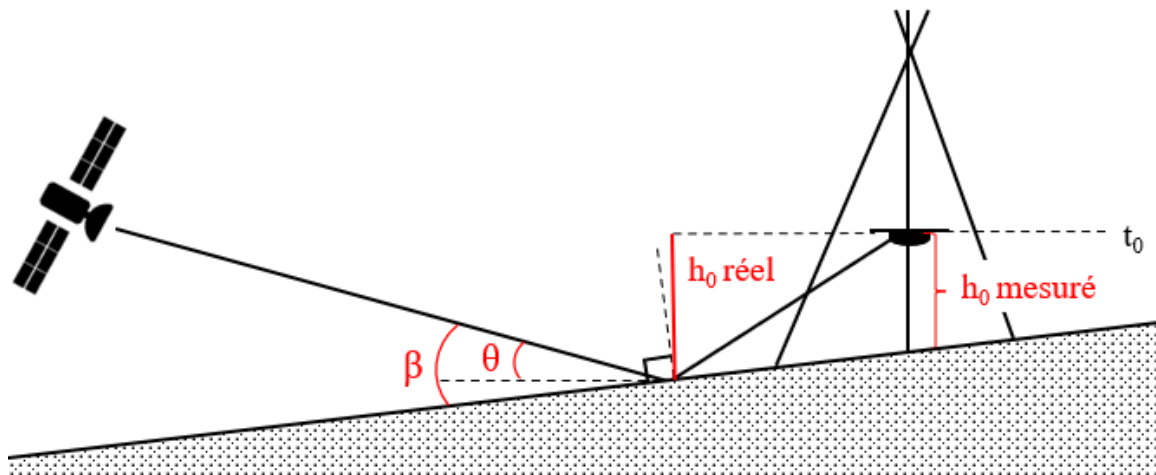
Dans un premier temps, on a pu constater que la zone d'étude avait une grande influence sur la quantité et la qualité des données enregistrées. D'une part, le nombre de séries temporelles utilisables était de  $\sim 100$  pour la première zone et  $\sim 300$  pour la seconde. Ceci est lié à l'importance des parties du ciel masquées par les éléments qui entourent le site d'étude. Pour les trois dernières expériences, les bâtiments et les arbres étaient relativement loin de la position du récepteur. Ainsi, ce dernier était en mesure de capter la majeure partie des satellites présents dans le ciel. En revanche, au niveau de la première zone, une quantité significative des signaux ne pouvait pas être captée par l'antenne à cause des blocages dû à l'environnement. Cet effet a donc tendance à condamner l'exploitation des satellites se trouvant à faible élévation. D'autre part, la qualité des ajustements était largement inférieure pour les données acquises dans le premier site d'étude. Ceci peut s'expliquer par le nombre de surfaces dans l'environnement de l'antenne pouvant potentiellement constituer des sources supplémentaires de multitrajet. Dans de telles conditions, il est possible que le SNR enregistré soit le produit d'un trop grand nombre de signaux réfléchis et que le LSP ne soit plus capable d'identifier les différentes fréquences indésirables. En outre, l'analyse a montré que lorsqu'un arbre se trouvait dans l'axe reliant le récepteur et le satellite, les observations correspondantes étaient perturbées ce qui empêche une modélisation satisfaisante de l'interférence. Cet effet affecte particulièrement la bande L1 comme cela a été discuté dans la Section VII – 1.1..

Dans le modèle théorique, on a supposé que la zone d'étude était parfaitement plate afin de pouvoir calculer la fréquence de l'interférence pertinente. Cependant, dans les faits, cette hypothèse n'était jamais parfaitement satisfaite. Le problème est que l'erreur relative à cette supposition affecte doublement la qualité du modèle.

- Comme le montre la Figure 55, si la surface de réflexion présente une pente, alors l'angle de réflexion  $\beta$  ne correspond plus à l'élévation du satellite  $\theta$  ce qui produira une erreur au niveau de la fréquence du modèle ajusté.

- La Figure 55 illustre que, lorsque la zone d'étude présente une pente, la hauteur du récepteur par rapport à la surface n'est pas la même au niveau du point spéculaire et au droit de l'antenne. Or, on a supposé dans le modèle théorique que ces deux distances étaient identiques en fixant que la zone d'étude était parfaitement plate. De plus, la différence entre celles-ci augmente au fur et à mesure que la zone de réflexion s'écarte de la position de l'antenne en suivant la pente étant donné le mouvement vertical. Ainsi, l'erreur relative à cet effet croît au cours du temps ce qui se traduira, une fois de plus, par une mauvaise modélisation de la fréquence de l'interférence.

FIGURE 55 : Influence d'une pente au niveau de la zone d'étude



Ainsi, on comprend qu'une pente, même légère, au niveau de la zone d'étude aura une incidence importante sur la qualité de la modélisation étant donné le double impact sur la fréquence de l'interférence.

Pour toutes ces raisons, l'utilisation de la méthode de réflectométrie GNSS développée dans ce mémoire n'est pas pertinente dans les zones :

- dont les éléments environnants masquent une grande partie du ciel et offrent des surfaces susceptibles de constituer des sources de multitrajet ;
- entourées par une trop grande quantité d'arbres ;
- présentant une pente importante.

En ce qui concerne la répartition des zones de réflexion, on a pu voir que ce facteur dépendait des satellites captés par le récepteur et donc des potentiels blocages liés à l'environnement. Ainsi, la distribution des mesures autour de l'antenne n'était jamais uniforme. Plus particulièrement, l'analyse a indiqué qu'il existait systématiquement une zone située au nord de la position du montage ne contenant aucune observation. Cette dernière s'explique par la distribution des satellites de positionnement dans le ciel. En effet, il a été montré dans la Section II – 1 que l'inclinaison des orbites contenant ces derniers définissait des régions dans le ciel en direction des pôles célestes constamment dépourvues de satellite. Dès lors, il existe une zone correspondante au sol qui ne pourra jamais contenir de point de réflexion pour une position définie du récepteur. Les acquisitions ayant été réalisées dans l'hémisphère nord, cette zone se trouve au nord de l'antenne. Afin de régler ce biais quant à la couverture des mesures, il suffit simplement de réaliser une autre acquisition depuis un point situé plus au nord. Ainsi, le fait de pouvoir déplacer le récepteur GNSS permet théoriquement d'effectuer des mesures sur la totalité de la zone d'étude.

Finalement, pour un déplacement vertical du récepteur de 1,5 m depuis une hauteur d'environ 1 m (ou 2,5 m si le déplacement était réalisé vers le bas), les zones de réflexion se trouvaient éloignées de la position du récepteur de 0 à 20 m. Ainsi, on peut dire que, dans ces conditions, la « portée » des mesures

atteint 20 m. Il convient de noter que ce paramètre peut être augmenté (resp. diminué) en réalisant le déplacement depuis une hauteur initiale plus (resp. moins) importante.

## VII - 3. Qualité des modélisations

Maintenant que la qualité des données a été étudiée en détail, la chaîne de traitements utilisée pour modéliser l'interférence liée au multitrajet va être discutée. La pertinence et la validité de l'approximation de Yu seront d'abord établies. Ensuite, le filtre de suppression des interférences indésirables basé sur le LSP sera évalué. Cette section finira par présenter les avantages et les inconvénients de l'estimation des paramètres de Larson au moyen de l'ajustement du modèle théorique par moindres carrés.

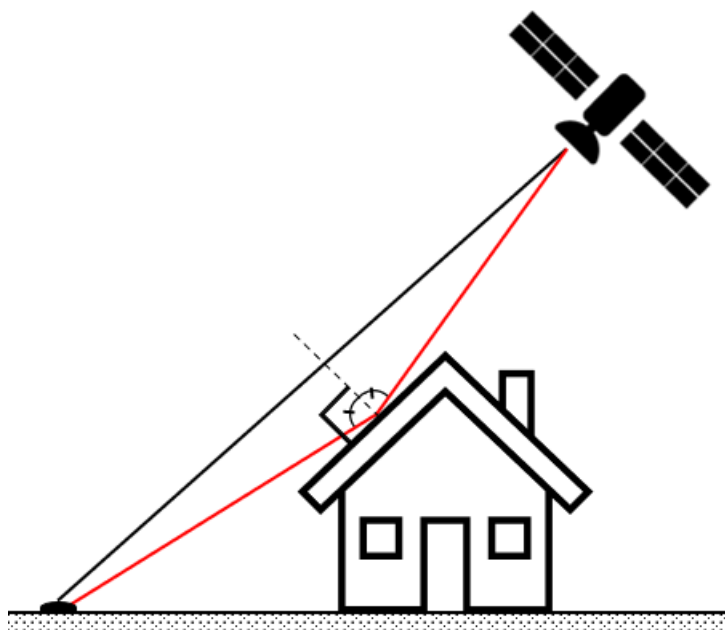
### VII - 3.1. Approximation de Yu

Pour rappel, l'approximation de Yu consiste à normaliser les séries temporelles de dSNR en les divisant par le polynôme utilisé pour centrer les mesures de SNR sur 0, c'est-à-dire pour passer du SNR au dSNR. Cette normalisation permet de rendre l'amplitude et, par conséquent, l'AAF indépendants de la puissance du signal capté. Ceci paraît donc indispensable afin de pouvoir comparer les estimations d'AAF réalisées sur des mesures provenant de satellites différents. Dans la chaîne de traitements développée, un polynôme de degré 1 a été utilisé pour transformer le SNR en dSNR et pour appliquer l'approximation de Yu. Étant donné que la durée des séquences n'excédait jamais 2 minutes, on peut supposer que la puissance du signal direct ne varie que légèrement et de manière linéaire. Dès lors, un polynôme de degré 1 paraissait largement suffisant pour modéliser ce phénomène.

D'abord, les multiples illustrations des ajustements réalisés sur les mesures transformées de SNR ont montré que les valeurs se trouvaient toujours dans le même intervalle et ce indépendamment du satellite : l'amplitude ne dépassait jamais l'unité. Ceci indique donc que l'approximation de Yu remplit bien ses objectifs en permettant la comparaison entre les modélisations réalisées sur des observations issues de signaux ayant des puissances différentes.

Dans la seconde expérience, le signal affecté par le multitrajet a été comparé avec le signal direct enregistré par un récepteur posé au sol. Le SNR issu de ce dernier présentait une légère variation quadratique. Deux théories semblent pouvoir expliquer ce résultat. La première est que l'hypothèse stipulant que la puissance du signal direct ne varie que légèrement et de manière linéaire n'est pas valide. Ceci indiquerait donc que la puissance d'un signal GNSS peut varier de manière quadratique et ce en moins de deux minutes. Dès lors, l'utilisation d'un polynôme de degré 1 pour la transformation des mesures de SNR ne serait plus valide. Intuitivement, cette explication semble peu probable. La seconde théorie est que le récepteur posé au sol était, en fait, affecté par du multitrajet lié à la réflexion du signal sur le toit d'une des maisons situées à proximité du site d'étude. Ainsi, la tendance quadratique observée correspondrait en fait à la demi-oscillation d'une interférence de très faible fréquence qui serait produite par le mouvement du satellite au cours de l'enregistrement. La Figure 56 illustre cette configuration. Cette seconde explication est compatible avec la supposition que la puissance du signal n'évolue que de manière linéaire à court terme. Quoiqu'il en soit, la variation du SNR enregistré par le récepteur au sol ne dépassant pas 20 volt/volt, on peut raisonnablement affirmer que l'utilisation d'une régression linéaire est suffisante pour normaliser les observations dans le cadre de la méthode de reconstitution de l'interférence exploitée dans ce mémoire.

FIGURE 56 : Illustration du multitrajet pouvant affecter un récepteur placé au sol



### VII - 3.2. Périodogramme de Lomb-Scargle

Le périodogramme de Lomb-Scargle est un outil mathématique permettant de détecter la périodicité au sein d'une séquence de mesures potentiellement échantillonnées à un intervalle irrégulier. Plus grossièrement, il s'agit d'une fonction qui présente des pics au niveau des fréquences associées à des sinusoïdes détectées dans les observations. Ces maximums de densité de puissance sont d'autant plus importants que le signal est reconnaissable dans les mesures. De cette manière, le LSP a été utilisé pour corriger le SNR des interférences ne correspondant pas à la réflexion du signal par le sol sur base de la fréquence définie par le modèle théorique. Pour ce faire un « intervalle de confiance » a été défini de part et d'autre de cette valeur afin d'éviter de supprimer le signal pertinent. En revanche, toutes les sinusoïdes associés aux pics hors de cet intervalle et dépassant un certain seuil de densité de puissance ont été retirées des mesures. Ce filtre permettant de supprimer les interférences indésirables est inédit. En effet, dans la littérature scientifique, on se contente généralement de supprimer les mesures lorsqu'elles sont trop perturbées par plusieurs sources de multitrajet. Ceci ne pose généralement pas problème étant donné l'abondance d'observations disponibles lorsque l'on exploite une station fixe pour la réflectométrie. À l'inverse, dans le cas d'acquisitions ponctuelles, il semble important de tout mettre en œuvre pour profiter autant que possible des séries temporelles disponibles. C'est pourquoi ce « nettoyage » des mesures s'avère pertinent.

Dans les deux premières expériences, les ajustements ont été réalisés avec et sans le filtre de suppression des interférences indésirables. Il en est ressorti que le  $R^2$  moyen était systématiquement plus faible lorsque le traitement basé sur le LSP n'était pas appliqué. En effet, celui-ci augmente approximativement de 50 % la quantité de modélisations dont le coefficient de détermination est supérieur à 0,7. Ceci prouve donc clairement que le traitement développé pour la suppression des interférences indésirables permet d'améliorer la qualité des mesures de SNR affectées par plusieurs sources de multitrajet.

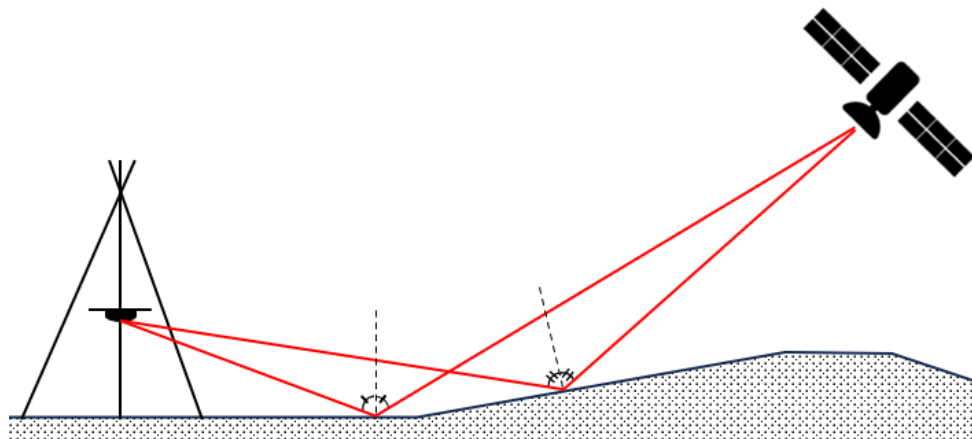
Comme cela a déjà été mentionné dans la littérature scientifique, l'analyse des LSP calculés pour les différentes acquisitions a montré que la taille des pics de densité de puissance augmentait avec le nombre de mesures dans la série temporelle. Néanmoins, au-delà d'une quarantaine d'observations, on atteint un palier et cette tendance disparaît. De cette manière, il a été nécessaire de définir différents seuils pour la détection des pics significatifs en fonction du nombre de mesures réalisées par séquence. Afin de se

libérer de cette contrainte, il serait pertinent de normaliser les LSP pour permettre la comparaison quelle que soit la longueur de la série d'observations. Il serait ainsi possible de définir un seuil fixe.

Par ailleurs, le LSP calculé sur base d'une séquence de 20 mesures lors de la première expérience a montré une augmentation de la densité de puissance vers l'extrémité droite du graphique. Ceci indique la présence d'un pic en dehors de l'intervalle de fréquences pouvant être produites par le multitrajet ce qui n'a physiquement aucun sens. En fait, cette tendance vient du fait que, pour un nombre limité de mesures, la probabilité de trouver un modèle sinusoïdal qui s'ajuste bien aux données « par hasard » augmente avec la fréquence de celui-ci. Dès lors, on comprend qu'il est indispensable de ne calculer le LSP que dans l'intervalle de fréquences présentant une pertinence physique. En outre, un minimum de 20 mesures semble être requis pour garantir que la qualité de l'ajustement ne soit pas le fruit du hasard.

Finalement, lors de l'Expérience 4, on a observé une série temporelle qui semblait être affectée par un phénomène de battement. Celui-ci se produit lors de la superposition de deux signaux de fréquence légèrement différente. L'analyse du LSP a donc mis en avant la présence de deux pics relativement proches contenus dans l'intervalle au sein duquel les interférences ne sont pas retirées. Ceci indique que l'antenne a reçu deux signaux réfléchis provenant de surfaces ayant une pente légèrement différente. Une faible incurvation de la zone étudiée pourrait expliquer cette configuration. La Figure 57 montre que cette concavité produit deux sources de multitrajet. Ainsi, dans cette configuration, le filtre sur les interférences indésirables n'est pas capable de nettoyer les données. Dès lors, la modélisation n'est pas satisfaisante. Afin de gérer un tel cas de figure, il serait pertinent de ne conserver que le signal dans l'intervalle dont la fréquence est la plus proche de celle calculée sur base du modèle théorique.

FIGURE 57 : Sources multiples de réflexion liées à la concavité du sol autour du récepteur



### VII - 3.3. Ajustement par moindres carrés du modèle théorique

La dernière étape de la chaîne de traitements consiste à ajuster par moindres carrés le modèle théorique définissant la fréquence de l'interférence afin de déterminer l'amplitude et la phase. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir estimer simultanément ces deux paramètres qui sont pertinents dans le cadre de l'étude de l'humidité du sol par réflectométrie GNSS.

Au cours des différentes expériences, on a pu montrer que les ajustements réalisés étaient parfois capables de reconstituer l'effet du multitrajet avec un coefficient de détermination supérieur à 0,8. Ce résultat prouve donc qu'il est possible d'extraire les paramètres de Larson avec une grande fidélité sur base de l'interférence enregistrée dans le SNR par un déplacement vertical de l'antenne. Par ailleurs, ceci prouve que ces valeurs peuvent être estimées grâce à un enregistrement de quelques dizaines de secondes seulement alors que, jusqu'ici, plusieurs dizaines de minutes au minimum étaient nécessaires

étant donné l'utilisation de stations fixes dans la littérature scientifique ! Ce gain de temps est particulièrement marqué pour les satellites GEO étant donné que, pour un récepteur immobile, 24 h de données sont requises pour observer une seule oscillation liée au multitrajet.

Cependant, si la modélisation est parfois très bonne, moins de 15 % des séries temporelles acquises présentent un  $R^2$  supérieur à 0,7. L'une des principales explications semble être que la fréquence observée dans les données ne soit pas exactement la même que celle fixée par le modèle théorique. Cette différence provient du fait que :

- le sol ne soit pas parfaitement plat ce qui implique que l'angle de réflexion n'est pas tout à fait égal à l'élévation du satellite et que la hauteur du récepteur estimée n'est pas correcte (voir la Section VII – 2.) ;
- la vitesse de déplacement ne soit pas parfaitement constante ce qui induit une erreur sur la hauteur du récepteur mesurée et qui agit comme une variation de la fréquence de l'interférence au cours du déplacement.

Ainsi, une légère erreur sur l'un de ces deux (ou les deux) paramètres empêche le modèle de coller correctement aux données. Dans un tel cas de figure, l'ajustement par moindres carrés va minimiser les résidus en réduisant l'amplitude de la sinusoïde. L'inverse n'est jamais vrai car une amplitude importante aux endroits où le modèle est en opposition de phase par rapport aux mesures augmenterait drastiquement la distance entre les observations et la sinusoïde. Ainsi, une erreur sur la fréquence se traduira toujours par une sous-estimation de l'amplitude et, par conséquent, de l'AAF. Il est, en revanche, difficile de prédire l'incidence qu'aura une erreur dans la fréquence sur l'estimation de la phase.

Dans les différentes expériences, les ajustements ont systématiquement été réalisés sur l'ensemble des données disponibles. Néanmoins, il semble qu'environ 2 périodes de l'interférence soient largement suffisantes pour réaliser la modélisation à condition de disposer d'assez de mesures. Ainsi, lorsque cela s'avère possible, il serait pertinent de couper la série d'observations afin de ne conserver que la quantité d'information strictement nécessaire pour distinguer l'interférence. Ceci permettrait de réduire le risque que la vitesse de déplacement de l'antenne ne varie au cours de l'acquisition ce qui améliorerait probablement la qualité des modélisations.

En outre, si l'ajustement par moindres carrés semble être nécessaire pour la détermination de la phase étant donné que ce paramètre est indissociable de la fréquence, d'autres méthodes d'estimation de l'amplitude existent. Ainsi, Yu proposait de la calculer sur base de la moyenne des valeurs absolues des maximums et des minimums de la série temporelle de SNR transformé. Sous condition que la séquence contienne assez d'observations, cette technique permet d'estimer fidèlement l'amplitude en se libérant de la contrainte liée à la modélisation de la fréquence.

## **VII - 4. Paramètres de Larson et humidité du sol**

À présent, il convient de discuter les résultats relatifs aux paramètres de Larson estimés et à leur sensibilité vis-à-vis de l'humidité du sol. Ceci permettra d'apporter les éléments de réponse à la question de recherche traitée dans le cadre de ce mémoire. Ainsi, le facteur d'atténuation de l'amplitude et la profondeur de réflexion seront envisagés séparément.

### **VII - 4.1. Facteur d'atténuation de l'amplitude**

Le facteur d'atténuation de l'amplitude a été reconnu par Larson comme étant dépendant de l'humidité du sol. Ceci s'explique par le fait que la permittivité diélectrique augmente avec la quantité d'eau contenue dans un milieu ce qui accroît la puissance du signal réfléchi. Dans ce mémoire, l'AAF a

été calculé en divisant par 2 l'amplitude de l'interférence ajustée par moindres carrés. Théoriquement, cette valeur doit encore être multipliée par la racine carrée du rapport entre le gain de l'antenne pour le signal réfléchi et le signal direct afin d'obtenir l'AAF tel qu'il est défini dans la littérature. Néanmoins, la variation du gain de l'antenne n'est pas toujours disponible. Par défaut, son influence a été négligée. Ceci revient donc à supposer que l'antenne n'est pas directive ce qui signifie que le gain de l'antenne est uniforme dans toutes les directions. Il convient déjà de noter que cette hypothèse n'est pratiquement jamais respectée.

Théoriquement, on sait que le facteur d'atténuation de l'amplitude peut prendre des valeurs entre 0 et 1. Néanmoins, il est rare que des valeurs aussi extrêmes soient atteintes car cela correspondrait respectivement à une situation sans multitrajet et au cas où les signaux directs et réfléchis ont la même puissance. Ainsi, les AAF estimés dans ce mémoire se situaient entre 0,03 et 0,5. Il semble donc que, en général, la réflexion diminue au minimum de moitié la puissance du signal. Par ailleurs, les différentes acquisitions ont montré que la méthode développée dans ce mémoire permettait d'estimer l'AAF d'une même interférence enregistrée dans deux séquences successives avec une précision située entre 0,015 et 0,03 (écart-type).

Dans l'Expérience 3, il a été montré que, pour une même zone et une même journée, l'AAF moyen estimé pouvait significativement varier d'un récepteur et d'une antenne à l'autre. Dans de telles conditions, on peut supposer que l'humidité du sol est restée constante. Ainsi, il semble que les écarts entre les estimations des différents récepteurs/antennes soient liés au fait que leur directivité ne soit pas la même. Dès lors, les AAF ne sont comparables que lorsqu'ils ont été estimés sur base de données acquises avec une même combinaison récepteur/antenne.

Les distributions des AAF estimés (pour un  $R^2$  supérieur à 0,65) ont montré une grande dispersion des valeurs : entre 0,03 et 0,35 pour les différents satellites. Cette importante variabilité est probablement liée à la non-uniformité du gain de l'antenne dans les différentes directions. En outre, même la méthode consistant à placer l'antenne horizontalement pour limiter cet effet ne semble pas efficace. Ainsi, chaque valeur d'AAF présente un biais en lien avec la position dans le ciel du satellite utilisé. Il paraît donc difficile d'exploiter des valeurs isolées de ce paramètre pour dégager une quelconque tendance quant à l'humidité du sol. En revanche, étudier les caractéristiques de l'ensemble de la distribution des AAF estimés sur base des ajustements satisfaisants semble plus pertinent. En effet, si on suppose que, d'un enregistrement à l'autre, les biais affectant les paramètres estimés sont distribués de la même manière, alors la comparaison des histogrammes de densité des AAF peut être exploitée pour détecter une potentielle variation de l'humidité du sol.

Ainsi, dans l'Expérience 4, la comparaison des courbes de densité cumulée associées aux distributions des AAF estimés a montré que, pour le smartphone Google Pixel 6, ces paramètres étaient significativement plus élevés le 23 avril 2024 que le 27 avril 2024. Or, cette première date suivait plusieurs jours de pluie tandis qu'aucun événement de précipitations n'a été enregistré à Faimes les deux journées précédant le 27 avril. Il est donc probable que l'humidité du sol ait légèrement diminué entre ces deux époques. Ainsi, la différence observée entre les distributions des AAF associées à ces deux journées laisse raisonnablement penser qu'il est possible de détecter une variation de l'humidité du sol en reconstituant le facteur d'atténuation de l'amplitude grâce à un déplacement verticale de l'antenne d'un récepteur low-cost ! Cette tendance a aussi pu être observée pour le ublox F9P relié à l'Antenne A mais dans une moindre mesure. En revanche, il ne semble pas que les courbes de densité cumulée soient significativement différentes pour le ublox F9P relié à l'Antenne C. Ceci pourrait s'expliquer par la polarisation de cette dernière. En effet, la littérature scientifique indique que les antennes à polarisation circulaire sont moins sensibles à l'humidité du sol que celles présentant une polarisation linéaire. Par ailleurs, l'analyse a permis de montrer que la différence entre les courbes de densité cumulée des AAF associés à deux périodes différentes est un bon indicateur pour la détection d'une variation de l'humidité du sol.

Pour finir, comme cela a déjà été discuté, il semble que l'ajustement par moindres carrés du modèle théorique soit une méthode trop exigeante pour estimer l'AAF. En effet, l'extraction satisfaisante de ce paramètre ne se fait que sous la condition sine qua non que la fréquence de l'interférence a été correctement modélisée. L'utilisation d'une autre méthode semblerait donc plus indiquée.

#### VII - 4.2. Profondeur de réflexion

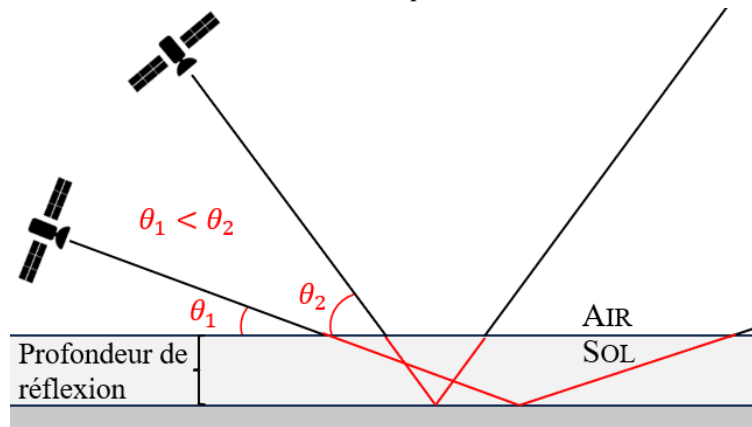
Pour rappel, la profondeur de réflexion des signaux GNSS est capable de rendre compte de l'humidité du sol car la capacité de pénétration d'une onde augmente lorsque la quantité d'eau dans le milieu diminue. Cette profondeur peut être calculée en multipliant la phase, estimée sur base de l'interférence, transformée en distance grâce à la longueur d'onde par la moitié du sinus de l'élévation du satellite.

Les estimations de la profondeur de réflexion pour une même interférence enregistrée par des séquences successives ont montré que la précision de la méthode développée n'était que d'environ 1 cm (écart-type). Cette faible répétabilité des mesures s'explique probablement par des erreurs sur la hauteur initiale de l'antenne liées au fait que le disque de plexiglass n'était pas ramené exactement à la même position entre les différentes séquences. Mathématiquement, cet effet sera directement absorbé dans la phase estimée par l'ajustement par moindres carrés.

Dans les Expériences 2, 3 et 4, on a pu montrer que la profondeur de réflexion estimée était toujours plus importante pour les bandes L2 et L5 que pour la bande L1. Cet effet est clairement expliqué dans la littérature scientifique par le fait que plus la fréquence d'une onde est petite, plus elle est capable de pénétrer profondément le sol. Ainsi, les profondeurs de réflexion estimées sur base de signaux appartenant à des bandes différentes ne sont pas comparables.

La dernière expérience a indiqué que la profondeur de réflexion estimée était bornée vers le haut par un seuil croissant en fonction de l'élévation du satellite. Physiquement, cette tendance est absurde car la profondeur de réflexion, pour une même fréquence, est censée rester constante quelle que soit l'origine du signal GNSS. Mathématiquement, en revanche, ce résultat prend tout son sens. La phase estimée par l'ajustement par moindres carrés est toujours comprise entre 0 et  $2\pi$ . Ainsi, on suppose que l'excédent de trajet parcouru par le signal à cause de la profondeur de réflexion n'excède pas la longueur d'onde de la porteuse. Autrement dit, on néglige le fait que toute mesure de phase est ambiguë. Ainsi, à l'instar de ce qui a été présenté pour le positionnement, les estimations de phase ne sont toujours connues qu'à un nombre entier de cycles près. Or, comme le montre la Figure 58, pour une même profondeur de réflexion, la distance excédentaire parcourue par le signal par rapport à la modélisation augmente lorsque l'élévation diminue. Ainsi, la longueur de la ligne rouge est plus grande pour le satellite située plus bas dans le ciel que pour l'autre. Dès lors, supposer que cette distance vaut, au maximum, la longueur d'onde de la porteuse est une hypothèse d'autant plus forte que l'élévation diminue. De cette manière, le fait que la profondeur de réflexion estimée soit bornée par un seuil croissant en fonction de l'élévation est lié à l'augmentation de l'ambiguïté lorsque le satellite descend dans le ciel. Dans les travaux de Larson, cet effet n'est pas important car les mesures sont réalisées chaque jour sur le même satellite GPS lorsqu'il repasse au même endroit dans le ciel. L'ambiguïté est donc identique ou facile à résoudre sur base des observations réalisées les journées précédentes. En revanche, les profondeurs de réflexion estimées sur base de la méthode développée dans ce mémoire ne peuvent pas être comparées lorsque les mesures sont effectuées depuis un endroit ou sur un satellite différent. Cette affirmation restera vraie aussi longtemps que l'on ne sera pas capable de résoudre l'ambiguïté associée à chaque satellite.

FIGURE 58 : Effet de l'élévation du satellite sur la distance excédentaire parcourue par le signal par rapport à la modélisation étant donné la profondeur de réflexion



Dans la section VII – 3.3., on a montré qu'une estimation fiable de la phase ne pouvait être réalisée sans une très bonne modélisation de la fréquence de l'interférence. Néanmoins, cette dernière est potentiellement affectée par un ensemble d'erreurs liées à la géométrie de la réflexion dans le cadre de la méthode développée au cours de ce mémoire. Une détermination pertinente de la phase requiert donc une très bonne connaissance de la topographie de la zone d'étude. Pour cette raison et à cause du phénomène d'ambiguïté décrit plus haut, la profondeur de réflexion semble être un indicateur très difficile à exploiter. De cette manière, dans l'Expérience 4, aucune différence significative n'a été mise en avant entre les profondeurs de réflexion estimées pour le 23/04/2024 et pour le 27/04/2024. Dès lors, la reconstitution de ce paramètre sur base de l'interférence enregistrée par un déplacement vertical de l'antenne semble être inutilisable pour détecter une variation de l'humidité du sol !

## VII - 5. Autocritique

L'étude étant terminée, il est important de mettre en perspective les résultats et les interprétations proposés. Ainsi, une autocritique du travail va être effectuée. Celle-ci mettra l'accent sur l'ensemble des faiblesses contenues dans ce mémoire qui constituent autant de raisons de garder une certaine distance vis-à-vis des tendances mises en avant.

Dans le Chapitre III, la manière dont les récepteurs GNSS mesurent le SNR a été développée. Cependant, ces appareils restent des « boîtes noires » étant donné que les fabricants ne dévoilent jamais la manière exacte dont les différentes observables sont calculées. Ainsi, on ne peut pas certifier que tous les récepteurs testés dans ce mémoire déterminent le SNR selon la méthode générique présentée.

La principale raison qui encourage à porter un regard critique sur les résultats réside dans l'ensemble des hypothèses définies au niveau du modèle théorique. La majorité d'entre elles a été discutée plus haut et leurs influences sur les estimations ont été décrites. Néanmoins, d'autres effets affectant les résultats n'ont probablement pas été identifiés. Il convient donc de citer une dernière fois toutes ces hypothèses.

- Pour calculer le SNR sur base du  $C/N_0$ , on a fixé la largeur de bande pour tous les signaux utilisés comme étant égale à 1 Hz. Dans les faits, la plupart des signaux GNSS sont caractérisés par des largeurs de bande différentes.
- Comme cela est souvent le cas dans la littérature scientifique, on a supposé que la première zone de Fresnel pouvait servir à définir la résolution spatiale d'une mesure de SNR effectuée par un récepteur GNSS. Cependant, on sait en réalité que l'entièreté de la FFZ ne participe pas avec la même importance dans la constitution du signal enregistré par l'antenne. Ainsi, le même biais affecte la zone définie comme la résolution spatiale des paramètres de Larson estimés.
- On a supposé que la pente de la zone d'étude était nulle alors que ce n'était jamais le cas.

- La vitesse de déplacement de l'antenne a été fixée comme étant constante ce qui est, dans les faits, très difficile à garantir.
- On a supposé que la variation de la puissance du signal direct au cours d'une séquence pouvait être modélisée par une régression linéaire.
- L'approximation de Yu consistant à normaliser l'amplitude de l'interférence par le polynôme utilisé pour transformer le SNR en dSNR a été appliquée.
- On a supposé que le traitement de suppression des interférences indésirables était efficace et qu'il permettait de ne conserver dans les données que l'effet du multitrajet lié à la réflexion du signal sur le sol.

Le programme de traitement des données développé est relativement complexe : il contient au total environ 2000 lignes de code et manipule des données issues de 3 sources différentes. Même si les résultats semblent indiquer le bon fonctionnement de ce dernier, il est toujours possible que de petites erreurs de programmation aient entaché la qualité des résultats.

Les deux sites d'étude sont recouverts de gazon or il a été prouvé dans la littérature scientifique que la bande L était aussi sensible à la végétation. Il est donc possible que le paramètre étudié soit en fait la quantité d'eau contenue dans la basse végétation et non l'humidité du sol.

Afin d'étudier l'humidité du sol, on est parti du postulat que ce paramètre avait diminué entre le 23/04/2024 et le 27/04/2024. Néanmoins, la quantité de précipitations enregistrée au début du mois d'avril est telle qu'il est possible que le sol ait été pratiquement saturé en eau pour les deux journées étudiées.

Finalement, l'ensemble des résultats et des interprétations présentés dans le cadre de ce mémoire ne se basent que sur quelques acquisitions de données. La présente étude n'est donc clairement pas suffisante pour définir avec certitude des principes universels. La portée des tendances dégagées ne s'étend, pour l'instant, qu'aux acquisitions réalisées. De plus, les résultats mis en avant mériteraient d'être validés en effectuant d'autres expériences.

## VII - 6. Perspectives

Afin de clôturer ce chapitre, les différents points méritant d'être investigués plus avant dans de futures études vont être mis en avant.

- Ce mémoire a développé une nouvelle méthode permettant d'enregistrer l'interférence liée au multitrajet dans le SNR en déplaçant l'antenne verticalement. Cette technique a été exploitée pour évaluer l'humidité du sol. Il serait donc intéressant d'utiliser cette nouvelle méthode pour d'autres applications de la réflectométrie GNSS comme l'altimétrie, la détermination de l'épaisseur des précipitations neigeuses ou encore l'étude de la couverture végétale.
- Le déplacement vertical de l'antenne a été réalisé à l'aide d'un montage relativement lourd qui n'est pas optimal pour réaliser des acquisitions depuis plusieurs points. En revanche, embarquer le récepteur GNSS low-cost sur un drone pourrait permettre de réaliser les variations de hauteur plus facilement. Il serait donc pertinent de tester ce protocole d'acquisition.
- Dans la discussion, il a été mis en avant que l'ajustement par moindres carrés n'était pas une méthode particulièrement indiquée pour estimer l'amplitude de l'interférence. Étudier d'autres techniques d'extraction de ce paramètre pourrait donc permettre d'améliorer les résultats présentés.
- Afin d'améliorer les performances de la chaîne de traitements, il serait intéressant d'envisager l'intégration de nouvelles sources de données comme :
  - la variation du gain de l'antenne fournie par certains fabricants pourrait aider à modéliser l'AAF ;
  - un modèle numérique de surface ou de terrain pourrait limiter les erreurs liées à la topographie de la zone d'étude.
- Finalement, il serait pertinent de confronter les paramètres de Larson estimés sur base du déplacement de l'antenne à des mesures d'humidité du sol effectuées au niveau de la zone d'étude. Ceci permettrait d'étudier de manière plus fiable la possibilité de détecter des variations de ce paramètre grâce à la nouvelle méthode de GNSS-R élaborée.

## Chapitre VIII : CONCLUSION

Ce dernier chapitre marque la fin de ce mémoire et va fournir une synthèse de l'étude réalisée.

Pour commencer, le cadre dans lequel s'inscrit cette étude va être résumé. Ensuite, les objectifs définis sur base de ce contexte seront rappelés. Afin de répondre à ces aspirations, la méthode développée sera décrite. Après cela, les principaux résultats seront synthétisés. La distinction sera faite entre les apports au domaine général de la réflectométrie GNSS et les éléments permettant de répondre à la question de recherche. Ce mémoire se clôturera par un court paragraphe mettant en perspective l'analyse réalisée.

## VIII - 1. Cadre de l'étude

Les GNSS sont constitués par un ensemble de satellites (+ de 120) permettant théoriquement à un utilisateur de déterminer sa position partout et à tout instant à la surface de la Terre. Pour ce faire, ces satellites émettent constamment des signaux électromagnétiques permettant de mesurer la distance qui les sépare du récepteur. Cette méthode de positionnement est affectée par un ensemble d'erreurs dont l'une d'elles est liée au fait que l'antenne GNSS peut recevoir un signal réfléchi par une surface en plus du signal direct.

L'humidité du sol correspond à la quantité d'eau contenue dans les couches supérieures du sol. Il s'agit d'une variable essentielle dans un ensemble de domaines comme l'agriculture, l'hydrologie ou encore la climatologie. Traditionnellement, il existe deux techniques permettant de mesurer l'humidité du sol. La première repose sur l'utilisation de satellites dédiés qui permettent d'obtenir des observations à une couverture globale mais caractérisées par une très mauvaise résolution spatiale (plusieurs kilomètres). À l'inverse, la seconde technique consiste à effectuer des mesures très locales grâce à un appareil adapté ce qui limite fortement l'étendue de la zone pouvant être étudiée.

La réflectométrie GNSS est un domaine d'étude qui consiste à exploiter le multitrajet afin de déterminer des propriétés géophysiques de la surface réfléchissante. Pour ce faire, il existe différentes méthodes. L'une d'elles repose sur l'étude de la variation de l'interférence entre la phase du signal direct et celle du signal réfléchi : on parle donc de réflectométrie interférométrique. Cet effet provoque une variation sinusoïdale de la puissance ou SNR du signal composite enregistré par l'antenne GNSS. Cette technique repose sur l'équation fondamentale suivante :

$$dSNR = A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h \sin(\theta) + \phi\right)$$

où le  $dSNR$  correspond à la série de mesures de SNR centrée sur 0.

Dans ce contexte, la scientifique, Kristine M. Larson, a mis en avant deux indicateurs distincts permettant d'estimer l'humidité du sol sur base de l'interférence dans le  $dSNR$  produite par l'évolution au cours du temps de l'élévation  $\theta$  d'un satellite.

- Le premier est l'amplitude  $A$  de l'interférence qui augmente en même temps que l'humidité du sol. Il arrive aussi que l'on normalise cette amplitude par la puissance du signal en appliquant l'approximation de Yu. On parle alors du facteur d'atténuation de l'amplitude (AAF) si on néglige les effets de l'antenne.
- Le second indicateur correspond à la profondeur de réflexion qui peut être obtenue grâce à la phase de l'interférence  $\phi$ . Cette première valeur diminue quand l'humidité du sol augmente.

Ces deux paramètres, s'ils sont calculés depuis une station fixe, pour un même satellite et lorsqu'il effectue un même déplacement dans le ciel, permettent de détecter des variations de l'humidité du sol. Cette méthode a été décrite sur base de mesures effectuées par des récepteurs géodésiques.

Les récepteurs GNSS dits « low-cost » sont caractérisés par un prix n'excédant pas les 300 € alors que les récepteurs géodésiques coûtent entre 10 000 et 20 000 €. En 2016, Google a annoncé que les données issues de la puce GNSS contenue dans les smartphones seraient rendues accessibles pour les utilisateurs. Dès lors, cette mise à disposition des mesures GNSS a induit un nouveau mouvement dans la littérature scientifique consacré à l'utilisation des smartphones pour des techniques autrefois réservées aux récepteurs de haute qualité.

Ainsi, Kurum a étudié l'utilisation des smartphones pour effectuer des mesures de réflectométrie GNSS. L'une de ses récentes études a montré que l'interférence liée au multitrajet pouvait être enregistrée dans le SNR en effectuant une variation de la hauteur  $h$  de l'antenne. Ceci a permis d'augmenter

considérablement la résolution temporelle avec laquelle il est possible d'enregistrer la sinusoïde liée au multitrajet. En effet, jusque-là, la méthode exploitée par Larson nécessitait d'attendre plusieurs dizaines de minutes afin que l'élévation du satellite évolue suffisamment pour faire varier l'interférence entre la phase du signal direct et celle du signal réfléchi.

## VIII - 2. Rappel des objectifs

Les objectifs principaux de cette étude ont été résumés grâce à la question suivante :

« Est-il possible de détecter des variations de l'humidité du sol grâce aux paramètres de Larson estimés sur base de l'interférence liée au multitrajet enregistrée dans le SNR en effectuant un déplacement vertical d'un récepteur GNSS low-cost ? »

Cependant, afin de répondre à cette question, d'autres aspects de la réflectométrie interférométrique ont dû être étudiés. Ainsi, les résultats du travail ont dépassé le cadre fixé par la problématique.

## VIII - 3. Méthode

Dans un premier temps, l'équation fondamentale de la réflectométrie interférométrique basée sur le SNR a été adaptée pour être capable de modéliser l'interférence produite par un déplacement vertical de l'antenne. La résolution spatiale associée aux paramètres de Larson reconstitués de cette manière a été clairement définie sur base du concept de la première zone de Fresnel.

Ensuite, un programme implémentant le modèle théorique pour traiter les données a été développé. De plus, deux filtres inédits ont été élaborés pour améliorer la qualité des observations.

- Le premier consiste à supprimer chaque mesure de SNR dont la zone de réflexion correspondante se situe hors du site d'étude défini dans un fichier shape file.
- Le second filtre repose sur la correction des potentielles interférences indésirables affectant les observations sur base du calcul du périodogramme de Lomb-Scargle.

Par ailleurs, un protocole d'acquisition permettant d'effectuer un déplacement vertical de l'antenne tout en enregistrant la hauteur de cette dernière et le SNR au cours du temps a été conçu.

Afin de rassembler des éléments pour répondre à la question de recherche posée, 4 expériences ont été réalisées. Les données ainsi acquises ont été traitées et analysées.

## VIII - 4. Synthèse des résultats

Ainsi, cette section va présenter les principaux résultats et les interprétations mis en avant par l'analyse.

### VIII - 4.1. Apports à la réflectométrie interférométrique GNSS

Pour commencer, l'analyse a montré que la méthode exploitée permettait de reconstituer jusqu'à une trentaine d'interférences indépendantes par déplacement vertical sous couvert que ce dernier soit réalisé assez lentement ( $\sim 2$  cm/s) et sur une distance suffisante ( $\sim 1,5$  m). Il est apparu que la qualité des mesures était meilleure lorsque la différence entre la puissance du signal direct et réfléchi n'est pas trop importante étant donné la manière dont les récepteurs GNSS traitent le signal analogue. Ceci encourage donc l'utilisation de dispositifs au niveau de l'antenne permettant de limiter la puissance du signal direct. Par ailleurs, les influences du site d'étude ont mis en avant que les mesures sont moins altérées lorsque la zone est plate et que l'espace est le moins encombré possible. En outre, les résultats ont démontré que les signaux appartenant aux bandes L2 et L5 sont moins sensibles aux perturbations liées à l'environnement. En ce qui concerne la modélisation, en moyenne seuls 15 % des interférences sont correctement représentées par l'ajustement par moindres carrés. Finalement, les résultats ont confirmé la pertinence et l'efficacité de l'approximation de Yu et du filtre de suppression des interférences indésirables sur base du LSP.

### VIII - 4.2. Réponse à la question de recherche

Il est apparu que la réponse à la problématique énoncée était différente pour les deux paramètres de Larson.

Le travail réalisé a mis en avant qu'il était possible de détecter une variation de l'humidité du sol sur base de la distribution des AAF estimés grâce aux interférences reconstituées par un déplacement vertical de l'antenne d'un récepteur low-cost. Cette affirmation n'est valide que sous la condition que les données comparées proviennent de la même combinaison récepteur/antenne GNSS. De plus, il semble que l'étude des variations de l'humidité du sol soit de meilleure qualité lors de l'utilisation d'antennes faiblement directives et à polarisation linéaire. Par ailleurs, il a été montré que l'estimation de l'amplitude par un ajustement par moindres carrés n'était pas optimale et que d'autres techniques devraient être envisagées.

S'il a été prouvé dans la littérature scientifique que la profondeur de réflexion permettait de détecter des variations l'humidité du sol sur base d'une station fixe, cette étude a montré que cet indicateur n'était pas utilisable pour une interférence reconstituée par un déplacement vertical du récepteur. Ceci provient du fait que l'estimation de la phase permettant de calculer ce paramètre est ambiguë par essence mais aussi très sensible à la moindre erreur concernant la géométrie de la réflexion.

## VIII - 5. Bilan

En conclusion, ce mémoire s'est basé sur les connaissances actuelles de la littérature scientifique pour tenter d'élaborer une nouvelle méthode de détection des variations de l'humidité du sol grâce aux récepteurs low-cost. Bien qu'il faille toujours garder une distance vis-à-vis des résultats, ces derniers restent prometteurs et constituent un premier aperçu des possibilités de l'utilisations de tels récepteurs en réflectométrie interférométrique GNSS.

# BIBLIOGRAPHIE

- Alonso-Arroyo, A., Camps, A., Monerris, A., Rüdiger, C., Walker, J. P., Forte, G., Pascual, D., Park, H. & Onrubia, R. (2014). The light airborne reflectometer for GNSS-R observations (LARGO) instrument: Initial results from airborne and Rover field campaigns. *In IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (ed.), actes du symposium, Quebec City, 2014, 4054-4057. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947376>.
- Angrisano, A. & Gaglione, S. (2022). Smartphone GNSS Performance in an Urban Scenario with RAIM Application. *Sensors*, 22, 786-798. <https://doi.org/10.3390/s22030786>.
- Awange, J. (2018). *GNSS Environmental Sensing: Revolutionizing Environmental Monitoring (Second Edition)*. Cham : Springer, Environmental Science and Engineering, 452 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58418-8>.
- Edokossi, K., Calabria, A., Jin, S. & Molina, I. (2020). GNSS-Reflectometry and Remote Sensing of Soil Moisture: A Review of Measurement Techniques, Methods, and Applications. *Remote Sensing*, 12, 614-640. <https://doi.org/10.3390/rs12040614>.
- Egido, A., Caparrini, M., Ruffini, G., Paloscia, S., Santi, E., Guerriero, L., Pierdicca, N. & Floury, N. (2012). Global Navigation Satellite Systems Reflectometry as a Remote Sensing Tool for Agriculture. *Remote Sensing*, 4, 2356-2372. <https://doi.org/10.3390/rs4082356>.
- ESA. (2021). *Deux nouveaux satellites rejoignent la constellation Galileo*. ESA. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/France/Deux\\_nouveaux\\_satellites\\_rejoignent\\_1\\_a\\_constellation\\_Galileo2](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Deux_nouveaux_satellites_rejoignent_1_a_constellation_Galileo2). Consulté le 11 février 2024.
- Farhad, M., Kurum, M. & Cafer Gurbuz, A. (2023). A Ubiquitous GNSS-R Methodology to Estimate Surface Reflectivity Using Spinning Smartphone Onboard a Small UAS. *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 16, 6568-6578. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3294833>.
- Guerova, G. & Simeonov, T. (2022). Chapter 8 – GNSS reflectometry (GNSS-R) for environmental observation. *In Guerova, G., Simeonov, T. (eds), Global Navigation Satellite System Monitoring of the Atmosphere*. Elsevier, 129-149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819152-1.00002-7>.
- Han, M., Zhu, Y., Yang, D., Hong, X. & Song, S. (2018). A Semi-Empirical SNR Model for Soil Moisture Retrieval Using GNSS SNR Data. *Remote Sensing*, 10, 280-299. <https://doi.org/10.3390/rs10020280>.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Autriche : SpringerWienNewYork. 516 p.

- Jia, Y. & Pei, Y. (2018). 4. Remote Sensing in Land Applications by Using GNSS-Reflectometry. In Hung, M. (eds), *Recent Advances and Applications in Remote Sensing*. IntechOpen, 214 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72901>.
- Jin, S., Cardellach, E. & Xie, F. (2014). *GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications*. Dordrecht : Springer, Remote Sensing and Digital Image Processing, 19, 276 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7482-7>.
- Kurum, M., Cafer Gurbuz, A., Nelson, C., Orsini, L. & Scheider, M. (2019). On the Feasibility of Smartphone-based Interferometric GNSS Reflectometry. In Proceedings of the Pacific PNT Meeting, ION PNT, actes du symposium, Honolulu, 2019. 635-640. <https://doi.org/10.33012/2019.16829>.
- Kurum, M., Farhad, M. & Gurbuz, A. (2021). Integration of Smartphones Into Small Unmanned Aircraft Systems to Sense Water in Soil by Using Reflected GPS Signals. *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 14, 1048-1059. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3041162>.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E., Bilich, A., Axelrad, P. & Braun, J. (2008a). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. *GPS Solution*, 12, 173-177. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0076-6>.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J. & Zavorotny, V. U. (2008b). Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters*, 35, L24405. <https://doi.org/10.1029/2008GL036013>.
- Larson, K. M. & Nievinsnski, F. G. (2012). GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. *GPS Solution*, 17, 41-52. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7>.
- Liu, Z., Du, L., Zhou, P., Liu, Z., Zhang, Z. & Xu, Z. (2022). Performance assessment of GNSS-IR altimetry using signal-to-noise ratio data from Huawei P30 smartphone. *GPS Solution*, 26, 42. <https://oi.org/10.1007/s10291-01223-5>.
- Maréchal, J. (2021). Géolocalisation par satellite – Principes de fonctionnement Galileo [Vidéo en ligne]. Connect by CNES. <https://www.youtube.com/watch?v=HLnijHcrKxI>. Consulté le 11 février 2024.
- Martín, A., Ibáñez, S., Baixauli, C., Blanc, S. & Belén Anquela, A. (2020). Multi-constellation GNSS interferometric reflectometry with mass-market sensors as a solution for soil moisture monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 3573-3582. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3573-2020>.
- Ogaja, C. A. (2022). *Introduction to GNSS Geodesy: Foundations of Precise Positioning Using Global Navigation Satellite Systems*. Suisse : Springer. 166 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91821-7>.
- Pierdicca, N., Comite, D., Camps, A., Carreno-Luengo, L., Cenci, M., Clarizia, P., Constantini, F., Dente, L., Guerriero, L., Mollfulleda, A., Paloscia, S., Park, H., Santi, E., Zribi, M. & Floury, N. (2021). Potential of Spaceborne GNSS Reflectometry for Soil Moisture, Biomass and Freeze-Thaw Monitoring: Summary of an ESA-Funded Study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 10, 8-38. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3115448>.

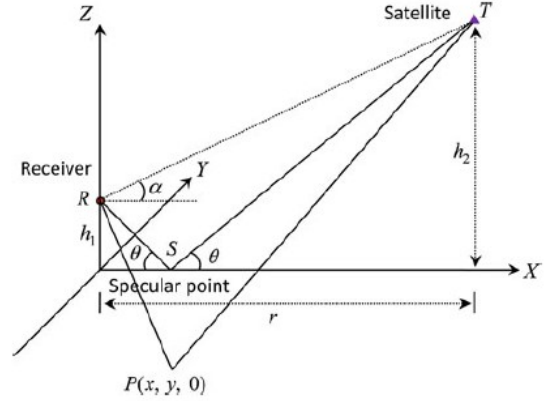
- Ran, Q., Zhang, B., Yao, Y., Yan, X. & Li, J. (2022). Editing arcs to improve the capacity of GNSS-IR for soil moisture retrieval in undulating terrains. *GPS Solution*, 26, 19. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01206-y>.
- Rodriguez-Alvarez, N., Bosch-Lluis, X., Camps, A., Vall-llossera, M., Valencia, E., Marchan-Hernandez, J. F. & Ramos-Perez, I. (2009). Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 3616-3624. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030672>.
- Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J.M. & Hernández-Pajares, M. (2013). *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*. ESA Communications. Leiden : Contactivity bv. 223 p.
- Shi, Y., Ren, C., Yan, Z. & Lai, J. (2021). High Spatial-Temporal Resolution Estimation of Ground-Based Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) Soil Moisture Using the Generic Back Propagation (GA-BP) Neural Network. *International Journal of Geo-Information*, 10, 623-644. <https://doi.org/10.3390/ijgi10090623>.
- Teunissen, P. J. G., Montenbruck, O. (Eds.). (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Suisse : Springer. 1329 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>.
- VanderPlas, J. T. (2018). Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236, 16. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aab766>.
- Yu, K. (2021). *Theory and Practice of GNSS Reflectometry*. Singapour : Springer, Navigation: Science and Technology, 9, 376 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0411-9>.
- Zavorotny, V. U. & Voronovich, A. G. (2000). Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 951-964. <https://doi.org/10.1109/36.841977>.

# ANNEXES

ANNEXE 1 : Développement mathématique permettant de calculer les paramètres de la première zone de Fresnel pour une surface plane et horizontale d'après Yu, 2021

Soient l'émetteur T, le point spéculaire S, le récepteur R et P un autre point de réflexion.

On peut définir la différence de trajet parcouru par l'onde lorsqu'elle passe par S ou par P comme :



$$\begin{aligned} \Delta d &= (TP + PR) - (TS + SR) \\ &= \sqrt{(x-r)^2 + y^2 + h_2^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2} - \left( \left( r - \frac{h_1}{\tan(\theta)} \right) \frac{1}{\cos(\theta)} - \frac{1}{\sin(\theta)} \right) \\ &= \sqrt{(x-r)^2 + y^2 + h_2^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2} - \frac{r}{\cos(\theta)} \end{aligned}$$

Pour la première zone de Fresnel, on pose  $\Delta d = \frac{\lambda}{2}$ . On obtient :

$$\sqrt{(x-r)^2 + y^2 + h_2^2} = \frac{\lambda}{2} + \frac{r}{\cos(\theta)} - \sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2}$$

En élevant au carré, on a :

$$\begin{aligned} \left( \lambda + \frac{2r}{\cos(\theta)} \right) \sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2} &= 2rx + h_1^2 - h_2^2 - r^2 + \left( \frac{\lambda}{2} + \frac{r}{\cos(\theta)} \right)^2 \\ &= 2rx + \frac{\lambda r}{\cos(\theta)} + (h_1 + h_2)(h_1 - h_2) + \frac{\lambda^2}{4} + (r \tan(\theta))^2 \\ &= 2rx + \frac{\lambda r}{\cos(\theta)} + rh_1 \tan(\theta) - rh_2 \tan(\theta) + \frac{\lambda^2}{4} + (r \tan(\theta))^2 \\ &= 2rx + \frac{\lambda r}{\cos(\theta)} + 2rh_1 \tan(\theta) + \frac{\lambda^2}{4} \end{aligned}$$

Étant donné que  $\frac{r}{\cos(\theta)} = TS + SR \gg \lambda$  et avec quelques manipulations mathématiques, on peut écrire :

$$\sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2} = x \cos(\theta) + 2rh_1 \tan(\theta) + \frac{\lambda^2}{4}$$

Finalement, en élevant au carré, on peut déduire l'équation d'une ellipse :

$$\frac{(x-d)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Avec :

$$a = \frac{\sqrt{\lambda h \sin(\theta) + \lambda^2/4}}{(\sin(\theta))^2}$$

$$b = \frac{\sqrt{\lambda h \sin(\theta) + \lambda^2/4}}{\sin(\theta)}$$

$$d = \left(\frac{\lambda}{2} + h \sin(\theta)\right) \frac{\cos(\theta)}{(\sin(\theta))^2}$$

où :

- $(d, 0)$  sont les coordonnées du centre de l'ellipse ;
- $a$  et  $b$  sont respectivement le demi-grand axe et le demi-petit axe de l'ellipse.

**ANNEXE 2 : Développement mathématique permettant de calculer les effets du multitrajet (composé d'une seule source de réflexion) sur le signal résultant d'après Hofmann-Wellenhof et al., 2008**

Avec l'Équation (5), on a :

$$s(t) = A_d(t) \sin(\psi(t)) + \alpha_r A_d(t) \sin(\psi(t) + \delta_\psi(t)) \rightarrow \text{en appliquant le théorème des cosinus}$$

$$= A_d(t) \sin(\psi(t)) + \alpha_r A_d(t) \cos(\psi(t)) \cos(\delta_\psi(t)) - \alpha_r A_d(t) \sin(\psi(t)) \sin(\delta_\psi(t))$$

$$= \left(1 + \alpha_r \cos(\delta_\psi(t))\right) A_d(t) \cos(\psi(t)) - \left(\alpha_r \sin(\delta_\psi(t))\right) A_d(t) \sin(\psi(t))$$

et l'Équation (6) peut s'écrire comme :

$$s(t) = \rho_M(t) A_d(t) \sin(\psi(t) + \Delta\psi_M(t)) \rightarrow \text{en appliquant le théorème des cosinus}$$

$$= (\rho_M(t) \cos(\Delta\psi_M(t))) A_d(t) \cos(\psi(t)) - (\rho_M(t) \sin(\Delta\psi_M(t))) A_d(t) \sin(\psi(t))$$

On peut donc écrire :

$$\begin{cases} \rho_M(t) \sin(\Delta\psi_M(t)) = \alpha_r \sin(\delta_\psi(t)) \\ \rho_M(t) \cos(\Delta\psi_M(t)) = 1 + \alpha_r \cos(\delta_\psi(t)) \end{cases}$$

La résolution de ce système donne :

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \rho_M(t) = \sqrt{1 + \alpha_r^2 + 2\alpha_r \cos(\delta_\psi(t))} \\ \Delta\psi_M(t) = \tan^{-1} \left( \frac{\alpha_r \sin(\delta_\psi(t))}{1 + \alpha_r \cos(\delta_\psi(t))} \right) \end{cases}$$

La relation entre la réflectivité et la permittivité diélectrique est donnée par les Coefficients de Fresnel.

- Pour les composantes linéaires (horizontale et verticale), la réflectivité  $\Gamma$  est donnée par :

$$\Gamma_{HH} = \frac{\varepsilon \cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon - (\sin(\theta_i))^2}}{\varepsilon \cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon - (\sin(\theta_i))^2}}$$

$$\Gamma_{VV} = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon - (\sin(\theta_i))^2}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon - (\sin(\theta_i))^2}}$$

où :

- $\varepsilon$  est la permittivité diélectrique du milieu ;
- $\theta_i$  est l'angle d'incidence.
- Le lien avec la réflectivité des ondes polarisées circulairement (RHCP  $\rightarrow$  LHCP et RHCP  $\rightarrow$  RHCP) est donné par :

$$\Gamma_{RL} = \frac{1}{2}(\Gamma_{HH} - \Gamma_{VV})$$

$$\Gamma_{RR} = \frac{1}{2}(\Gamma_{HH} + \Gamma_{VV})$$

La relation entre la permittivité diélectrique et l'humidité du sol provient de :

- Empiriquement, on a pu montrer que la relation entre la permittivité diélectrique et l'humidité du sol présentait deux phases dont le point de transition  $SM_t$  peut être déterminé sur base du wilting point  $WP$ . On a :

$$SM_t = 0.49 WP + 0.165$$

$$WP = 0.06774 - 0.00064 SAND + 0.00478 CLAY$$

Où  $SAND$  et  $CLAY$  représente la quantité (en %) de sable et d'argile contenu dans le sol.

- Finalement, l'humidité du sol est définie par :

$$SM = \begin{cases} \frac{\varepsilon - S_p \varepsilon_a - (1 - S_p) \varepsilon_r}{\varepsilon_x - \varepsilon_a}, & \text{si } SM \leq SM_t \\ \frac{\varepsilon + SM_t \varepsilon_w - SM_t \varepsilon_x - S_p \varepsilon_a - (1 - S_p) \varepsilon_r}{\varepsilon_w - \varepsilon_a}, & \text{si } SM > SM_t \end{cases}$$

Avec :

- $S_p = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_r}$
- $SM = \begin{cases} \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \frac{SM}{SM_t} \gamma, & \text{si } SM \leq SM_t \\ \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \gamma, & \text{si } SM > SM_t \end{cases}$

où :

- $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_r$  et  $\varepsilon_w$  sont respectivement les permittivités diélectriques du sol, de l'air, de la glace, de la roche et de l'eau ;
- $S_p$  est la porosité du sol ;
- $\rho_s$  et  $\rho_r$  sont les densités du sol et de la roche ;
- $\gamma$  est un paramètre à calibrer en fonction du meilleur ajustement pour compenser les erreurs de modélisation.

#### ANNEXE 4 : Lomb-Scargle périodogramme

Par rapport à une transformée de Fourier classique, le Lomb-Scargle périodogramme présente l'avantage de pouvoir être appliqué sur des données échantillonnées à un intervalle irrégulier.

Soit un signal composé de  $N$  échantillons  $x_i$  mesurés aux temps  $i = 1, 2, \dots, N$ . Le Lomb-Scargle périodogramme pour une fréquence  $f$  est défini par :

$$P_{LS}(f) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cos(\omega(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2(\omega(t_i - \tau))} + \frac{[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \sin(\omega(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2(\omega(t_i - \tau))} \right\}$$

Où :

- $\omega = 2\pi f$  est la fréquence angulaire ;
- $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  est la moyenne ;
- $\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$  est la variance ;
- $\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{k=1}^N \sin(2\omega t_k)}{\sum_{k=1}^N \cos(2\omega t_k)}$  permet de calculer  $\tau$ .

#### ANNEXE 5 : Système de palan ajouté à la corde reliée au disque de plexiglass à partir de l'Épérience 3 afin d'utiliser la visseuse dans sa fenêtre optimale de fonctionnement

