
Détection de variations dans les propriétés de la surface réfléchissante grâce à des données GPS

Auteur : Dedroog, Emeline

Promoteur(s) : Warnant, René

Faculté : Faculté des Sciences

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9832>

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.



Détection de variations dans les propriétés de la surface réfléchissante grâce à des données GPS

Mémoire présenté par : **Emeline DEDROOG**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,
orientation géomatique et géométrie**

Année académique :

2019-2020

Date de défense :

Septembre 2020

Président de jury :

René WARNANT

Promoteur :

René WARNANT

Jury de lecture :

Jean-Paul KASPRZYK

Bernard TYCHON

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, M. Warnant, pour ses remarques d'une grande aide, sa disponibilité et son suivi tout au long de l'année.

Je souhaite également remercier son assistante, Mathilde Debelle, pour ses encouragements, ses précieux conseils ainsi que sa disponibilité.

Je remercie l'ensemble des professeurs et des assistants du Département de Géographie pour leur aide et leur bienveillance durant ces cinq dernières années.

Je voudrais remercier mes amis et mon entourage pour les encouragements depuis le 1^{er} bac. J'aimerais tout particulièrement remercier Julien M., Julien H. et François R. pour le soutien, la relecture ainsi que les différents conseils qu'ils m'ont fournis pour améliorer mes différents codes.

Enfin, je souhaiterais remercier mes parents, mon frère et Nikolay pour leur soutien et leur implication dans ce mémoire et tout au long de mon cursus.

Résumé

La détection et la quantification de l'humidité du sol sont primordiales pour l'étude de la météo ainsi que celle du climat. Dans un monde où le changement climatique est plus important qu'il ne l'a jamais été, un set de données global n'est pas disponible afin de combler les besoins des scientifiques dans les domaines de l'hydrologie, du climat et de l'écologie.

Tout au long de l'année, des données sont collectées par deux récepteurs géodésiques de la marque Septentrio reliés chacun à une antenne différente. Ces dernières, fixes, se trouvent sur le toit du bâtiment B5a situé au Sart Tilman. L'environnement aux alentours de ces antennes est de type urbain. Ainsi, une grande quantité d'objets pouvant réfléchir le signal GPS avant qu'il atteigne l'une ou l'autre antenne sont présents (c'est ce qu'on appelle le multi trajet).

L'objectif de ce travail est de déterminer s'il est possible de détecter des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante grâce à des données GPS. Nous avons donc mis en place une méthodologie afin de détecter et quantifier (amplitude et fréquence) les variations dans les résidus du SNR (signal to noise ratio) au fil des jours. Un lien est établi entre ces variations et les quantités de précipitations obtenues grâce à des archives météorologiques. Le SNR représente le rapport signal sur bruit. Cette mesure, à l'instar des codes et des phases, est sensible au multi trajet et est également affectée par le moindre changement dans l'environnement. Ces résidus sont obtenus grâce à un ajustement par moindres carrés d'un polynôme de degré 4. Ainsi, l'ajustement permet de modéliser la partie du SNR liée au signal direct et les résidus représentent la partie du SNR liée au multi trajet.

En ce qui concerne la quantification des différentes variations entre les jours, une corrélation croisée permet de mettre en avant des ressemblances entre certains jours. À l'inverse, elle permet également de montrer que certains jours sont différents. Toutefois, la méthodologie utilisée n'est pas concluante afin de quantifier l'amplitude et la fréquence des résidus du SNR.

Abstract

The detection and quantification of soil moisture is essential for the meteorology and climate science. In a world where climate change is a greater challenge than ever before, a global dataset is not yet available to meet the needs of scientists in the fields of hydrology, climate and ecology.

Throughout the year, data is collected by two Septentrio geodetic receivers, each connected to a different antenna. Their position is fixed and they are located on the roof of building B5a in Sart Tilman. The environment around these antennas is urban. Thus, numerous objects that can reflect the GPS signal before it reaches one or the other antenna are present (this is called multi-path).

The objective of this work is to determine whether it is possible to detect variations in the properties of the reflecting surface using GPS data. We have therefore set up a methodology to detect and quantify (amplitude and frequency) variations in SNR (signal to noise ratio) residuals over time. A link is established between these variations and the precipitation quantities obtained from meteorological archives. The SNR represents the signal to noise ratio. Like codes and phases, this measure is sensitive to multipath and is also affected by the slightest change in the environment. These residuals are obtained by a least-squares fit of a degree 4 polynomial. Thus, the fit allows the direct signal portion of the SNR to be modelled and the residuals represent the multipath portion of the SNR.

With respect to the quantification of variations between days, a cross-correlation allows to highlight similarities and differences between some days. However, the methodology used is not conclusive for quantifying the amplitude and frequency of SNR residuals.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé.....	3
Abstract	4
Table des figures.....	7
Liste des tableaux.....	10
Liste des abréviations et des acronymes.....	11
A. Introduction.....	12
B. État de l’art.....	13
1. Théorie.....	13
1.1 Généralités	13
1.2 La constellation GPS	13
1.3 Observables	14
1.4 Sources d’erreurs sur les observables.....	17
1.5 Combinaison multi trajet.....	22
2. Extraction du multi trajet	25
3. Calcul de la fréquence, de l’amplitude et de la hauteur	27
C. Question de recherche	30
D. Méthodologie	30
1. Environnement de travail.....	30
2. Données utilisées	31
2.1 Août 2019	32
2.2 Début février 2020 (tempête Ciara)	33
3. Combinaisons du multi trajet basées sur les codes	33
4. Extraction du multi trajet	34
5. Comparaison visuelle des résidus	36
6. Extraction de la fréquence, de l’amplitude et de la hauteur	37
7. Corrélation croisée	41
E. Résultats.....	42
1. Détection du multi trajet.....	42
1.1 En général.....	42
1.2 Pour un satellite	47
2. Extraction du multi trajet	50
3. Comparaison visuelle des résultats.....	54
3.1 Le cas du 1 ^{er} passage du satellite 6 durant la période d’août 2019	54

3.2	Le cas du 1 ^{er} passage du satellite 14 durant la période d'août 2019	59
3.3	Le cas du 1 ^{er} passage du satellite 10 durant la période d'août 2019	63
3.4	Le cas du 1 ^{er} passage du satellite 19 durant la période de début février 2020	65
3.5	Synthèse des différents cas	69
4.	Extraction de l'amplitude, de la fréquence et de la hauteur	71
4.1	Le cas du 1 ^{er} passage du satellite 6 durant la période d'août 2019	74
4.2	Le cas du 1 ^{er} passage du satellite 14 durant la période d'août 2019	83
4.3	Autres cas	85
5.	Corrélation croisée	85
F.	Conclusion	91
G.	Perspectives.....	93
H.	Bibliographie.....	94
I.	Annexe.....	96

Table des figures

Figure B-1 : Caractéristiques de la constellation GPS (Source : Hofmann-Wellenhof et al., 2008)	14
Figure B-2 : Mesure du temps de propagation d'un code grâce à une corrélation croisée (Source : Sanz Subirana et al., 2013)	15
Figure B-3 : Calcul du déphasage entre le signal généré par le récepteur et celui qu'il reçoit (Source : Warnant, 2018)	16
Figure B-4 : Principe de l'ambiguïté initiale (Source : Aspexit, 2020)	17
Figure B-5 : Signal direct et signal indirect (Source : Hofmann-Wellenhof et al., 2008).....	19
Figure B-6 : Amplitude et période du multi trajet.....	20
Figure B-7 : Hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante (Source : Hofmann-Wellenhof et al., 2008).....	20
Figure B-8 : Estimation de l'effet du multi trajet pour le signal GPS (Source : Mendonça et al., 2019)	24
Figure B-9 : Multi trajet différent selon la position du satellite.....	25
Figure B-10 : SNR lié au signal direct et SNR causé par la présence de multi trajet	26
Figure B-11 : Origine des différents angles pour le calcul de la hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante (Bilich et al., 2007)	27
Figure B-12 : Origine des différents angles pour le calcul de la hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante (Bilich et al., 2007)	29
Figure D-1 : Localisation des antennes ULG0 et ULG1 sur le toit du B5a.....	31
Figure D-2 : Ajustement d'un polynôme de degré 4.....	35
Figure D-3 : Résidus du SNR sur L1 et MP1	36
Figure D-4 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 6 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0.....	37
Figure D-5 : Extraction de l'amplitude et de la fréquence en un point grâce à des fenêtres	38
Figure D-6 : Zoom sur la fenêtre permettant de calculer la fréquence pour un point sur base de la fonction d'autocorrélation	38
Figure D-7 : Zoom sur la fenêtre permettant de calculer l'amplitude pour un point sur base de la fonction des résidus du SNR.....	38
Figure E-1 : Multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X400.....	45
Figure E-2 : Multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X501.....	46
Figure E-3 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR grâce à la combinaison MP1 pour l'antenne ULG0.....	48
Figure E-4 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR grâce à la combinaison MP1 pour l'antenne ULG1.....	48
Figure E-5 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR grâce à la combinaison MP1 et à la détermination d'un seuil pour l'antenne ULG0	49
Figure E-6 : SNR en fonction de l'élévation et en fonction du temps	50
Figure E-7 : Ajustement d'un polynôme de degré 4.....	51
Figure E-8 : Comparaison des résidus SNR en fonction du degré du polynôme permettant l'extraction du multi trajet.....	52
Figure E-9 : Comparaison des résidus SNR en fonction du degré du polynôme permettant l'extraction du multi trajet.....	53

Figure E-10 : Comparaison SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 6 pour son 1 ^{er} passage sur ULG0	54
Figure E-11 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 6 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1.....	55
Figure E-12 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR sur L1 grâce à la combinaison MP1 et à la détermination d'un seuil l'antenne ULG0 pour le J219.....	55
Figure E-13 : Comparaison des résidus SNR pour le J219 sur L1 pour les deux antennes	56
Figure E-14 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J221-J222-J223 du satellite 6 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0.....	57
Figure E-15 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J234-J235-J236 du satellite 6 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0.....	58
Figure E-16 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG0 du satellite 6 durant son 1 ^{er} passage pour le J219	58
Figure E-17 : Comparaison des résidus SNR du J219 en fonction de la fréquence L1/L2/L5	59
Figure E-18 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 14 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0.....	59
Figure E-19 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 14 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1.....	60
Figure E-20 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J221-J222-J223 du satellite 14 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1.....	61
Figure E-21 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J222 du satellite 14 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1.....	61
Figure E-22 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 14 durant son 1 ^{er} passage pour le J219	62
Figure E-23 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J234-J235-J236 du satellite 14 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1.....	62
Figure E-24 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 10 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0.....	63
Figure E-25 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 10 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1.....	64
Figure E-26 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG0 du satellite 10 durant son 1 ^{er} passage pour le J219	64
Figure E-27 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J36-J37-J38 du satellite 19 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0.....	65
Figure E-28 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J36-J37-J38 du satellite 19 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1	66
Figure E-29 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J37-J38-J41 du satellite 19 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0	67
Figure E-30 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J37-J38-J41 du satellite 19 pour son 1 ^{er} passage pour ULG1	68
Figure E-31 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 19 durant son 1 ^{er} passage pour le J36	68
Figure E-32 : Résidus SNR avec la modélisation de l'amplitude (81) et de la fréquence (81) calculée grâce à une fonction cosinus.....	72
Figure E-33 : Résidus SNR avec la modélisation de l'amplitude (41) et de la fréquence (81) calculée grâce à une fonction cosinus.....	72
Figure E-34 : Résidus SNR avec la modélisation de l'amplitude (21) et de la fréquence (81) calculée grâce à une fonction cosinus.....	73

Figure E-35 : Représentation visuelle de l'extraction de la fréquence et de l'amplitude pour le J219 sur l'antenne ULG0.....	75
Figure E-36 : Fonction sinusoïdale pour des fréquences de 0.13Hz et 0.17Hz	76
Figure E-37 : Fréquence extraite en fonction du seuil utilisé pour le J219 sur l'antenne ULG0	77
Figure E-38 : Hauteur calculée grâce à la fréquence extraite pour les 3 porteuse pour le J219 sur l'antenne ULG0 pour le satellite 6.....	78
Figure E-39 : Flaques présentes le jeudi 16 juin 2020.....	79
Figure E-40 : Variation de l'amplitude du multi trajet des J219 à J223 sur l'antenne ULG0.....	80
Figure E-41 : Comparaison des amplitudes de J219 et J220 sur ULG0.....	81
Figure E-42 : Variation de l'amplitude du multi trajet des J234 à J236 sur l'antenne ULG0.....	82
Figure E-43 : Hauteur calculée grâce à la fréquence extraite pour les 2 bandes pour le J219 sur les deux antennes.....	83
Figure E-44 : Représentation visuelle de l'extraction de la fréquence et de l'amplitude pour le J219 sur l'antenne ULG0.....	84
Figure E-45 : Représentation visuelle de l'extraction de la fréquence et de l'amplitude pour le J219 sur l'antenne ULG1.....	85
Figure I-1 : Développement des équations MP1, MP2 et MP5.....	97
Figure I-2 : Grille du multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X400.....	98
Figure I-3 : Grille du multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X501.....	99
Figure I-4 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J222 du satellite 6 pour son 1 ^{er} passage pour ULG0.....	100
Figure I-5 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 6 durant son 1 ^{er} passage pour le J219	100
Figure I-6 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 10 durant son 1 ^{er} passage pour le J219	101
Figure I-7 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG0 du satellite 19 durant son 1 ^{er} passage pour le J36	101
Figure I-8 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 16 pour son 2 ^{ème} passage pour ULG0	102
Figure I-9 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J221-J222-J223 du satellite 16 pour son 2 ^{ème} passage pour ULG0	102

Liste des tableaux

Tableau B-1 : Fréquence et longueur d'onde des trois porteuses GPS.....	14
Tableau D-1 : Météo du mois d'août 2019 (Source : Des Clics Nomades, n.d.).....	32
Tableau D-2 : Météo du début du mois de février 2020 (Source : Des Clics Nomades, n.d.)	33
Tableau D-3 : Résumé de l'extraction de l'amplitude, la fréquence et la hauteur en un point.....	41
Tableau E-1 : Médiane, écart-type et 3 ^{ème} quartile des variances du MP1 pour le J220 sur l'antenne ULG0	42
Tableau E-2 : Variance du MP1 des différents voxels pour le J220 pour l'antenne ULG0	43
Tableau E-3 : Résumé des différents cas.....	70
Tableau E-4 : Moyenne et écart-type des différences entre les amplitudes des J219 à J223	81
Tableau E-5 : Moyenne et écart-type des différences entre les amplitudes des J234 à J236	82
Tableau E-6 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J223 pour le 1 ^{er} passage du satellite 6 sur la période de 5h à 6.2h pour les deux antennes.....	86
Tableau E-7 : Corrélation entre les résidus SNR des J234 à J236 pour le 1 ^{er} passage du satellite 6 sur la période de 4h à 5.2h pour l'antenne ULG0	86
Tableau E-8 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J221 pour le 1 ^{er} passage du satellite 14 sur la période de 6.5h à 7.3h pour l'antenne ULG0	87
Tableau E-9 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J223 pour le 1 ^{er} passage du satellite 14 sur la période de 3h à 4h pour l'antenne ULG1	87
Tableau E-10 : Corrélation entre les résidus SNR des J234 à J235 pour le 1 ^{er} passage du satellite 14 sur la période de 2h à 2.7h pour l'antenne ULG1	88
Tableau E-11 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J221 pour le 1 ^{er} passage du satellite 10 sur la période de 3h à 3.7h pour l'antenne ULG0	88
Tableau E-12 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J221 pour le 1 ^{er} passage du satellite 10 sur la période de 0.4h à 1.5h pour l'antenne ULG1	88
Tableau E-13 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J223 pour le 2 ^{ème} passage du satellite 16 sur la période de 20h à 21.2h pour l'antenne ULG0	89
Tableau E-14 : Corrélation entre les résidus SNR des J36, J37, J38 et J41 pour le 1 ^{er} passage du satellite 19 sur la période de 2.5h à 3h pour les deux antennes	89

Liste des abréviations et des acronymes

C/N_0 : Carrier to Noise density Ratio

GNSS : Global Navigation Satellite System

GPS : Global Positioning System

SNR : Signal to Noise Ratio

X400 : Récepteur Septentrio relié à l'antenne ULG0

X501 : Récepteur Septentrio relié à l'antenne ULG1

J219 : 219^{ème} jour de l'année

A. Introduction

Les mesures de l'humidité du sol sont nécessaires pour un certain nombre d'applications : pour comprendre et quantifier les cycles du carbone et de l'eau notamment. De la même façon, des mesures précises de la quantité de neige sont utiles afin de modéliser les changements climatiques, de prévoir des inondations... Les mesures obtenues grâce à la télédétection permettent d'obtenir des données sur l'humidité du sol à une échelle globale, mais ces données ne concernent que les premiers millimètres de sol. De plus, la résolution (10 km) à laquelle travaillent ces satellites est trop grande et ne permet pas d'avoir des informations sur un lieu précis. En ce qui concerne les mesures de neige, la télédétection permet de calculer la couverture de neige, mais il n'est pas possible d'obtenir des données concernant son épaisseur (Larson et al., 2013) (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Braun, et al., 2008). Ces différentes raisons expliquent les recherches effectuées pour permettre l'utilisation des données GNSS afin de quantifier l'humidité dans le sol. En effet, un réseau d'antennes existe déjà et il n'est donc pas nécessaire d'en mettre un nouveau en place.

L'objectif de ce mémoire est de déterminer s'il est possible de détecter des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante grâce à des données GPS. Ainsi, on peut se demander de quelle manière il est possible de détecter ces variations.

Premièrement, le signal envoyé par le satellite n'atteint pas toujours l'antenne : il est possible qu'il soit réfléchi sur une surface réfléchissante avant d'atteindre l'antenne. Dès lors, on est en présence de multi trajet. Afin de détecter des variations dans les propriétés de cette surface, il est nécessaire de repérer les périodes avec la présence de multi trajet dans les données. Pour ce faire, le SNR (Signal to Noise Ratio) sera utilisé et cette mesure est à l'instar des codes et des phases sensible au multi trajet. Elle est également affectée par le moindre changement dans l'environnement (Bilich et al., 2007).

Après cette détection, il faut séparer la partie du SNR provenant du signal direct de celle issue du signal réfléchi afin de conserver uniquement cette deuxième partie et d'en extraire l'amplitude et la fréquence. En effet, ces paramètres varient et leurs variations sont causées par une diversité de facteurs incluant la composition, la géométrie et la rugosité de la surface réfléchissante (Bilich et al., 2008). Il est également possible d'extraire la hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante afin de repérer l'objet sur lequel le signal est réfléchi, mais également de quantifier la hauteur de neige.

La variation de l'amplitude et de la fréquence permet de quantifier la variation d'humidité dans le sol au cours du temps. Nous nous limiterons à la détection de cette variation et à sa quantification sans calculer de valeur d'humidité du sol dans ce travail, car l'environnement urbain de travail ne le permet pas.

Afin de répondre à l'objectif de ce travail, il est indispensable de poser au préalable plusieurs cadres théoriques qui fourniront les outils nécessaires à la compréhension de la méthodologie et des résultats. Dans cette optique, une partie de théorie pure concernant le domaine des GNSS sera mise en place. Elle sera suivie par un état de l'art énonçant les différentes méthodologies utilisées par le passé. Le point suivant développera les différents traitements

effectués sur les données et la méthodologie choisie. Les choix posés dans cette partie seront justifiés dans la partie contenant les résultats où ces derniers seront également exposés. Nous terminerons par une brève conclusion ainsi que différentes perspectives.

B. État de l'art

1. Théorie

1.1 Généralités

Le but premier de la mise en place des différentes constellations de satellites GNSS est le positionnement d'un utilisateur à la surface de la Terre. En effet, grâce à la mesure du temps de propagation de l'onde électromagnétique émise par le satellite et la connaissance de la position de ce dernier, il est possible de calculer la distance entre le satellite et l'utilisateur. À l'aide des données de quatre satellites, une position terrestre peut être connue. Par la suite, il a été découvert que les données issues de ces satellites peuvent être exploitées dans le cadre de différentes applications, comme par exemple, afin de déterminer le contenu électronique total de l'ionosphère, la quantité de vapeur dans l'atmosphère...

1.2 La constellation GPS

Un GNSS est composé de trois segments : le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur. Le premier comprend la constellation de satellites permettant de se positionner à la surface de la Terre. Le deuxième est un ensemble de stations terrestres mises en place afin d'assurer le contrôle et le maintien du statut et de la configuration des satellites. Quant au dernier segment, il contient tous les récepteurs GNSS (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Dans ce travail, seule la constellation GPS, premier GNSS opérationnel, sera utilisée. Il en existe bien sûr d'autres telles que Galileo ou Glonass. La constellation GPS est composée de 32 satellites qui suivent une orbite MEO (Medium Earth Orbit) à une altitude de 20 200 kilomètres. Leurs orbites sont presque circulaires et les satellites se trouvent sur six plans orbitaux séparés de 60° et avec une inclinaison de 55° . La période de ces satellites est de douze heures sidérales. Cela signifie qu'en un lieu donné, la configuration géométrique des satellites dans le ciel de l'observateur (azimut et élévation) se répète de manière identique après 24 heures sidérales. Puisque les orbites sont inclinées, les deux passages du satellite ne sont pas semblables, mais son trajet se répète après un jour sidéral (un jour sidéral vaut 23 h 56 min 4.09 s) (Nasa, n.d.) (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). La Figure B-1 illustre les différentes caractéristiques de la constellation GPS.

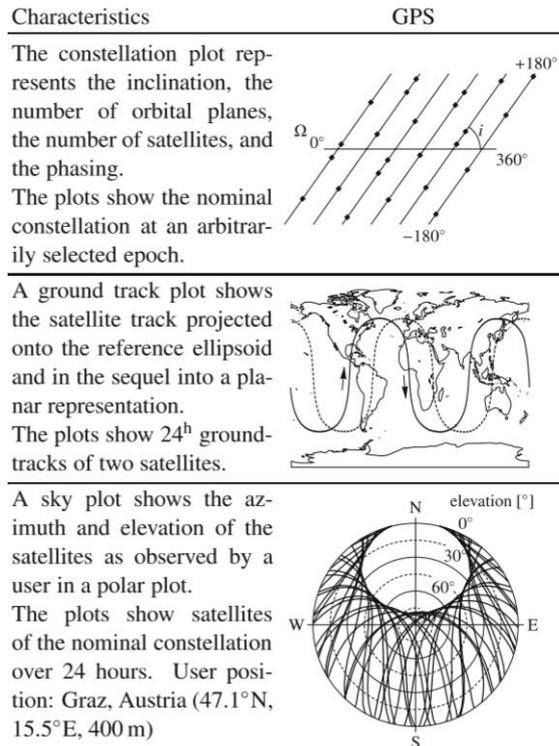


Figure B-1 : Caractéristiques de la constellation GPS (Source : Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

En ce qui concerne les différents signaux, il existe trois ondes porteuses différentes (L1, L2 et L5) qui se différencient par leur fréquence, et donc, leur longueur d'onde. Ainsi, trois codes (il existe plus d'un code par porteuse) et trois C/N_0 correspondant à ces porteuses seront utilisés dans ce travail. Le Tableau B-1 présente les fréquences et longueurs d'onde correspondant aux trois ondes porteuses du système GPS (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Porteuse	Fréquence (en MHz)	Longueur d'onde (en m)
L1	1575.42	0.190
L2	1227.60	0.244
L5	1176.45	0.254

Tableau B-1 : Fréquence et longueur d'onde des trois porteuses GPS

1.3 Observables

Afin de calculer la distance entre un satellite et un récepteur, une onde est envoyée depuis le satellite pour transporter différentes informations. Les données permettant de calculer cette distance sont appelées des observables.

Il existe deux types d'observables : les mesures effectuées sur les codes et les mesures effectuées sur les ondes porteuses appelées mesures de phases. Les codes sont une succession de chips (valeur de 0 ou 1) envoyée par le satellite. Afin de déterminer le temps nécessaire pour recevoir la suite de chips, le récepteur la génère également. En superposant ces deux suites, il peut mesurer le décalage entre elles pour connaître le temps que la première a mis pour arriver jusqu'à lui. Sur la Figure B-2, on peut voir le signal tel qu'il est reçu par le récepteur, la suite de chips telle qu'elle est générée par le récepteur et la corrélation entre ces deux signaux permettant de déterminer le temps de propagation de ce code (Sanz Subirana et al., 2013).

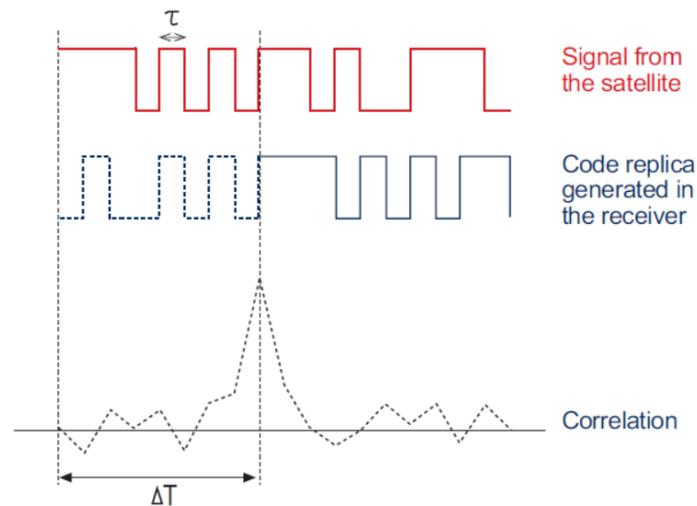


Figure B-2 : Mesure du temps de propagation d'un code grâce à une corrélation croisée (Source : Sanz Subirana et al., 2013)

Les mesures de phases, quant à elles, sont effectuées sur les porteuses qui, à l'origine, servaient uniquement à transporter les codes et le message de navigation. En pratique, elles servent également à mesurer la distance satellite-récepteur. En effet, la porteuse est aussi générée par le récepteur et la mesure de phase est une mesure de déphasage entre l'onde émise par le satellite et reçue par le récepteur et une réplique de l'onde porteuse du satellite générée par le récepteur. La Figure B-3 contient la phase de l'onde générée par le récepteur au temps t , la phase de l'onde reçue par le récepteur au temps t et la mesure de déphasage au temps t (Sanz Subirana et al., 2013).

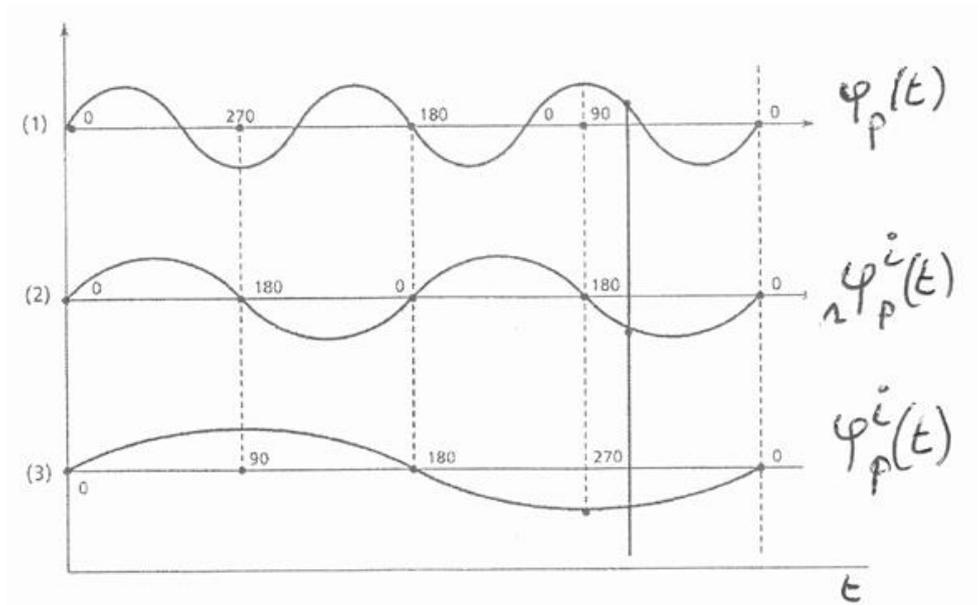


Figure B-3 : Calcul du déphasage entre le signal généré par le récepteur et celui qu'il reçoit (Source : Warnant, 2018)

Les ondes électromagnétiques sur lesquelles ont lieu les mesures de phases suivent les équations de Maxwell. Un champ électrique ainsi qu'un champ magnétique qui oscillent à une fréquence donnée sont nécessaires afin de générer une onde électromagnétique (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Le positionnement avec les phases, c'est-à-dire le calcul de distances entre plusieurs satellites (minimum 4) et une antenne afin d'obtenir la position de l'antenne, est plus précis mais ambigu. En effet, lorsque le récepteur commence à recevoir le signal envoyé par un satellite, il existe un nombre entier de cycles non connu par le récepteur et déjà transmis par le satellite puisque le récepteur ne mesure qu'un déphasage entre le signal qu'il reçoit et le signal qu'il génère. Ce nombre ne peut pas être mesuré par le récepteur directement, il sera déterminé par la suite. Dès lors, durant tout le temps de mesure, le récepteur « ignore » un nombre entier de cycles émis par le satellite, mais ce dernier reste constant si la réception du signal n'est pas perdue (par exemple, lorsque le satellite passe derrière un bâtiment, ce qu'on appelle un saut de cycle) et il peut être calculé de manière très précise. Ce nombre est appelé *ambiguïté initiale* et est entier (Sanz Subirana et al., 2013). La Figure B-4 permet de mieux comprendre ce concept. Le t_0 du signal n'est pas le même pour le récepteur et pour le satellite.

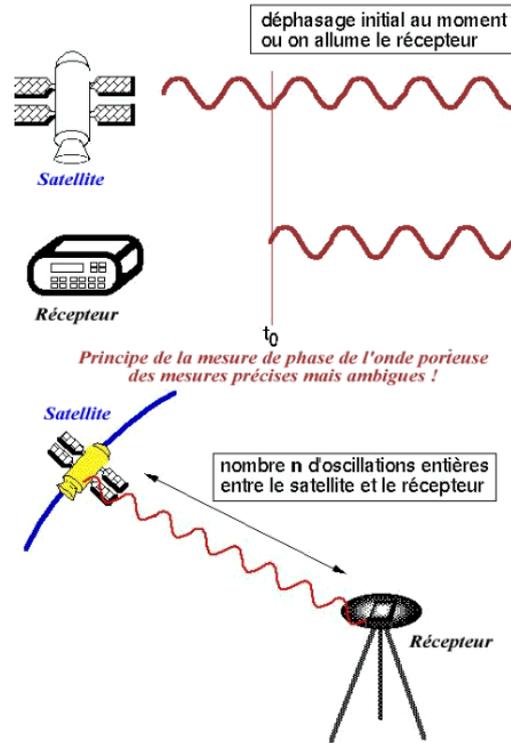


Figure B-4 : Principe de l'ambiguïté initiale (Source : Aspexit, 2020)

Il existe également un message de navigation émis par le satellite contenant des informations à propos du satellite émetteur telles que la santé de celui-ci, son orbite (qui permet de calculer sa position), les erreurs d'horloge ainsi que l'activité ionosphérique (Sanz Subirana et al., 2013).

1.4 Sources d'erreurs sur les observables

Les équations ci-dessous représentent le modèle mathématique des observables contenant les différentes sources d'erreurs qui influencent le temps de propagation du signal (Sanz Subirana et al., 2013).

$$P_{p,k}^i(t) = D_p^i + T_p^i + I_{p,k}^i + M_{p,k,g}^i + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \varepsilon_{p,k,g}^i \quad (1)$$

$$\Phi_{p,k}^i(t) = D_p^i + T_p^i - I_{p,k}^i + M_{p,k,\phi}^i + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_k N_{p,k}^i + \varepsilon_{p,k,\phi}^i \quad (2)$$

$P_{p,k}^i$: mesure effectuée sur un code émis par le satellite i , reçu par le récepteur p et transporté par une onde porteuse de fréquence f_k (en m)

$\Phi_{p,k}^i$: mesure effectuée sur une onde porteuse de fréquence f_k émise par le satellite i et reçue par le récepteur p , appelée mesure de phase (en m)

D_p^i : distance géométrique entre le récepteur p et le satellite i (en m)

T_p^i : erreur troposphérique (en m)

$I_{p,k}^i$: erreur ionosphérique dépendant de la fréquence de la porteuse considérée f_k (en m)

$M_{p,k,g}^i$ et $M_{p,k,\phi}^i$: erreur de multi trajet sur les codes et sur les phases dépendant de la fréquence f_k et du type d'observable (en m)

c : vitesse de la lumière dans le vide (en m/s)

$\Delta t^i(t_e)$, $\Delta t_p(t)$: erreurs d'horloge respectivement du satellite i et du récepteur p (en s)

$\varepsilon_{p,k,g}^i$ et $\varepsilon_{p,k,\phi}^i$: bruit de mesure sur les codes et sur les phases dépendant de la fréquence f_k et du type d'observable (en m)

λ_k : longueur d'onde de l'onde porteuse de fréquence f_k (en m)

$N_{p,k}^i$: ambiguïté initiale (en cycles)

Erreur troposphérique

L'erreur troposphérique comprend l'influence de l'atmosphère neutre, c'est-à-dire les effets des cinquante premiers kilomètres d'atmosphère sur la propagation du signal GNSS. Cette erreur est appelée *erreur troposphérique*, car cette dernière contribue le plus aux modifications subies par le signal. Le délai troposphérique dépend de la température, de la pression et de l'humidité qui varient tout au long du trajet du signal. Elle est divisée en deux composantes : la composante sèche et la composante humide. La première a un ordre de grandeur beaucoup plus important que la seconde, mais cette dernière possède une plus forte variabilité dans l'espace et dans le temps. Elle est donc plus difficile à modéliser (Sanz Subirana et al., 2013).

L'élévation du satellite influence l'importance de cette erreur. En effet, si un satellite est à basse élévation, le trajet du signal dans l'atmosphère neutre sera plus long que s'il traversait cette dernière perpendiculairement à une tangente à la Terre au point où se trouve l'antenne (Sanz Subirana et al., 2013).

Erreur ionosphérique

L'ionosphère est composée d'atomes et de molécules neutres ainsi que d'ions et d'électrons libres. Ces derniers affectent la propagation du signal. La quantité d'électrons varie en fonction du temps, de certains phénomènes (activité solaire, activité géomagnétique...) ainsi que de la position de l'observateur à la surface de la Terre. Dès lors, l'ionosphère est un milieu dispersif et cette dernière amène un délai de propagation pour les ondes porteuses et pour les codes (Sanz Subirana et al., 2013).

Multi trajet

Le multi trajet est une erreur causée par la réception par l'antenne d'un signal indirect en plus du signal direct. L'importance de celle-ci varie en fonction de la fréquence du signal incident ainsi que du type d'observable. Il possède un effet périodique qui dépend de la distance entre l'objet réfléchissant et l'antenne. En effet, plus l'objet est proche, plus la période est grande et la fréquence, faible. Un satellite à basse élévation favorisera le multi trajet par la géométrie satellite-surface réfléchissante-antenne. Dans le cas de la constellation GPS, pour une antenne fixe, après chaque jour sidéral, le multi trajet se répète si la configuration du site ne change pas (Sanz Subirana et al., 2013).

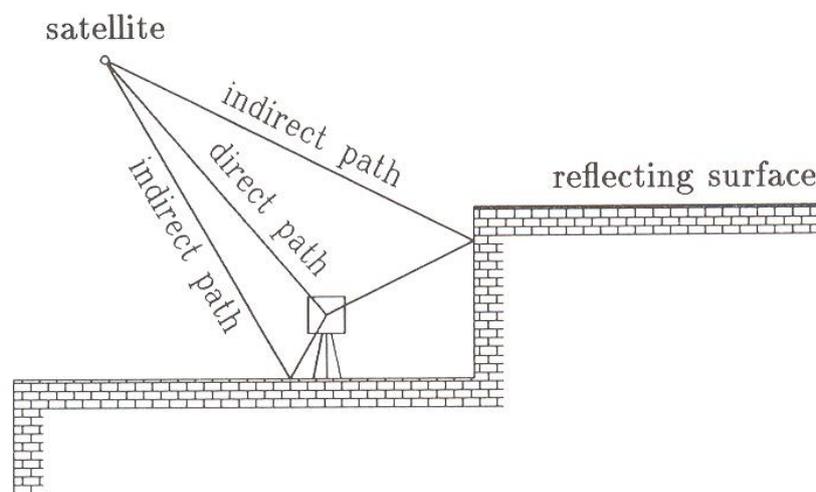


Figure B-5 : Signal direct et signal indirect (Source : Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

Il existe deux types de multi trajet : le multi trajet diffus et le multi trajet spéculaire. Le premier type a lieu lorsque le signal arrive sur une surface rugueuse et que ce dernier est renvoyé dans différentes directions. Il se comporte souvent comme du bruit. Cependant, le multi trajet spéculaire se produit lorsque le signal réfléchi reçu par l'antenne en plus du signal direct provient d'une surface assez lisse. Par conséquent, ce type de multi trajet amène des erreurs systématiques. Ces dernières peuvent être assez importantes, de l'ordre du mètre pour les codes et de quelques centimètres pour les phases (Bilich et al., 2007). La Figure B-5 montre la réception d'un signal avec la présence de multi trajet spéculaire. Les récepteurs de très haute qualité implémentent des stratégies afin d'atténuer le multi trajet (Bilich et al., 2008).

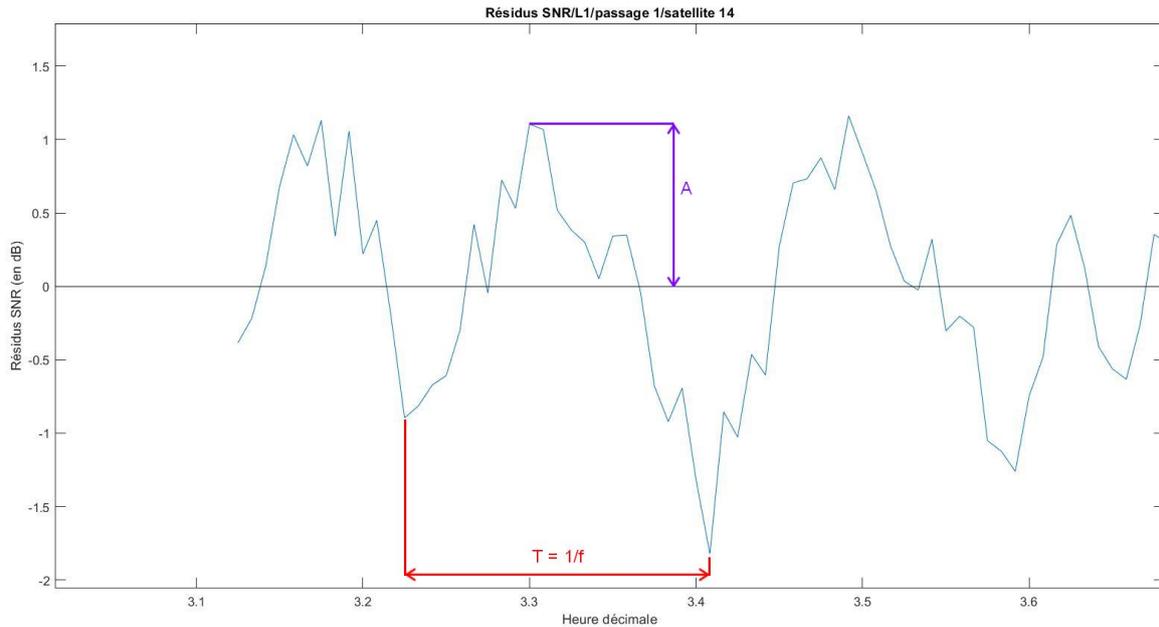


Figure B-6 : Amplitude et période du multi trajet

Comme le montre la Figure B-6, l'amplitude (A) du multi trajet est la valeur absolue maximale que le résidu du SNR peut prendre. Ensuite, la période (T) est le temps nécessaire à l'onde afin d'effectuer une oscillation complète et la fréquence (f) est l'inverse de la période. La phase initiale (Φ) est la valeur angulaire de la phase ($\omega t + \phi$) lorsque t vaut 0. Dans notre cas, l'instant $t=0$ a lieu au début de la réception du signal, c'est-à-dire vers 3.1h sur l'illustration ci-dessus (Benson, 2016). La hauteur (H) qui sera étudiée par la suite est la hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante. Cette dernière est représentée sur la Figure B-7.

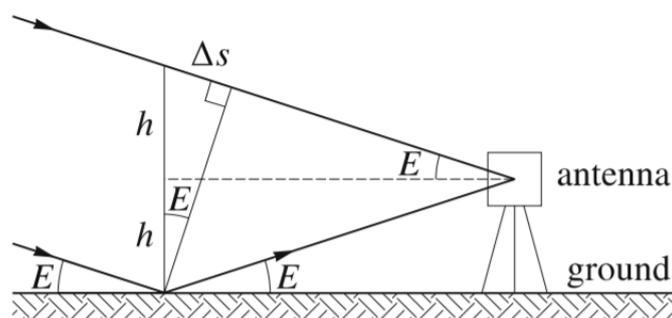


Figure B-7 : Hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante (Source : Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

En plus des trois observables de codes (il existe différents codes pour chaque fréquence d'onde porteuse, mais nous avons choisi un seul type de code pour ce travail) et des trois observables de phases rendues disponibles par les récepteurs GPS, trois valeurs intéressantes sont également produites. Il s'agit du *carrier to noise density ratio* (C/N_0) pour chaque fréquence : L1, L2 et L5. Il correspond au rapport de la puissance du signal sur la densité de la puissance du bruit. En le divisant par la largeur de bande, le *signal to noise ratio* (SNR) est obtenu. L'unité du C/N_0 est le dB Hz, en utilisant une valeur de 1 Hz comme largeur de bande ; le SNR est égal au C/N_0 et a comme unité le dB (Larson et al., 2013).

Le SNR est, à l'instar des codes et des phases, sensible au multi trajet et il est également affecté par le moindre changement dans l'environnement (Bilich et al., 2007). Il est préférable d'utiliser le SNR plutôt que les observables de phases afin d'extraire le multi trajet, car il amène une mesure du multi trajet moins bruitée et il n'est pas nécessaire de modéliser les orbites, les délais atmosphériques ainsi que les erreurs d'horloge afin de l'utiliser. En effet, ces modélisations pourraient induire des erreurs. Comme le SNR permet de quantifier le multi trajet (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Axelrad, et al., 2008), il est possible de relier les caractéristiques de ce dernier aux propriétés physiques des surfaces réfléchissantes si une analyse satellite par satellite est effectuée (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Braun, et al., 2008).

La fréquence, la phase et l'amplitude du multi trajet varient et leurs variations sont causées par une variété de facteurs incluant la composition, la géométrie et la rugosité de la surface réfléchissante (Bilich et al., 2008).

La fréquence du multi trajet dépend de la géométrie satellite-surface réfléchissante-antenne. En effet, plus la surface réfléchissante est proche de l'antenne, plus la fréquence du multi trajet est faible (Kurum et al., 2019). Pour une même surface réfléchie, la fréquence du multi trajet est élevée pour un faible angle d'élévation et au contraire, si l'angle d'élévation est élevé, les fréquences sont plus faibles. Il est donc évident que l'élévation influence la fréquence du multi trajet (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Axelrad, et al., 2008).

L'amplitude et la phase dépendent des propriétés de la surface sur laquelle le signal est réfléchi comme la rugosité, l'humidité et la présence de végétation. Ces paramètres sont utiles afin de quantifier les propriétés géophysiques de la surface (Kurum et al., 2019). En ce qui concerne plus particulièrement l'amplitude, elle dépend de la réflectivité de la surface. De plus, il est possible de relier la réflectivité à une constante diélectrique et cette constante dépend fortement de l'humidité des derniers centimètres de sol aux fréquences GPS. Elle dépend moins de la végétation et du type de sol (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Axelrad, et al., 2008).

Quant à la phase, elle est directement reliée à la profondeur de la réflexion apparente du signal. Si le sol est humide, le signal est réfléchi à proximité de la surface. S'il est sec, la réflexion a lieu quelques centimètres plus en profondeur. La phase du signal multi trajet est très sensible aux faibles modifications d'humidité (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Braun, et al., 2008).

Erreurs d'horloge

Deux horloges ne peuvent jamais être parfaitement synchronisées. Pour cette erreur reprise par l'équation (3), le facteur « c » est la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide. t^i est le temps d'émission de l'onde par le satellite et t_p est le temps de réception de cette même onde par le récepteur. La différence entre ces deux temps permet de calculer la distance entre le satellite et le récepteur, mais les deux horloges mesurant ces temps ne sont ni synchronisées entre elles ni synchronisées avec le temps de référence du GNSS. Dès lors, les termes $\Delta t^i(t_e)$ et $\Delta t_p(t)$ expriment l'erreur d'horloge du satellite au temps de référence t_e et l'erreur d'horloge du récepteur au temps de référence t (Sanz Subirana et al., 2013).

$$c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) \quad (3)$$

Le message de navigation contient des informations permettant de modéliser l'erreur d'horloge du satellite (Sanz Subirana et al., 2013).

Bruit de mesure

Le bruit de mesure dépend de la fréquence du signal ainsi que du type d'observable. Il contient les erreurs aléatoires qui ne peuvent être modélisées contrairement aux erreurs atmosphériques (Sanz Subirana et al., 2013).

1.5 Combinaison multi trajet

$$MP1 = P_1 - \Phi_1 + \frac{2}{(1 - \delta_1)} (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (4)$$

$$MP1 = -\lambda_1 N_1 + \frac{2}{(1 - \delta_1)} [\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2] + M_{1,g} + \varepsilon_{1,g} \quad (4.1)$$

$$MP2 = P_2 - \Phi_2 + \frac{2\delta_1}{(1 - \delta_1)} (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (5)$$

$$MP2 = -\lambda_2 N_2 + \frac{2\delta_1}{(1 - \delta_1)} [\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2] + M_{2,g} + \varepsilon_{2,g} \quad (5.1)$$

$$MP5 = P_5 - \Phi_5 + \frac{2}{(1 - \delta_5)}(\Phi_1 - \delta_5 \Phi_5) \quad (6)$$

$$MP5 = -\lambda_5 N_5 + \frac{2}{(1 - \delta_5)}[\lambda_1 N_1 - \delta_5 \lambda_5 N_5] + M_{5,g} + \varepsilon_{5,g} \quad (6.1)$$

$MP1, MP2, MP5$: estimations de l'effet du multi trajet grâce aux mesures de codes et de phases (en m)

P_1, P_2, P_5 : observations sur les codes aux fréquences f_1, f_2, f_5 (en m)

$\Phi_1 = L_1 \lambda_1$: observations sur les phases à la fréquence f_1 (en m)

$\Phi_2 = L_2 \lambda_2$: observations sur les phases à la fréquence f_2 (en m)

$\Phi_5 = L_5 \lambda_5$: observations sur les phases à la fréquence f_5 (en m)

L_1, L_2, L_5 : observations sur les phases aux fréquences f_1, f_2, f_5 (en cycles)

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_5$: longueur d'onde de l'onde porteuse aux fréquences f_1, f_2, f_5 (en m)

$\delta_1 = \frac{f_1^2}{f_2^2}$: ratio entre les fréquences des observables utilisées pour MP1 et MP2

$\delta_5 = \frac{f_1^2}{f_5^2}$: ratio entre les fréquences des observables utilisées pour MP5

Ces trois combinaisons basées sur les observations obtenues pour les deux types d'observables permettent de montrer la présence et l'importance du multi trajet ainsi que son impact sur un calcul de positionnement. En effet, ces combinaisons annulent la distance, les erreurs troposphérique et d'horloge. Par conséquent, on obtient une estimation en mètres de l'influence du multi trajet sur le résultat du positionnement. On obtient les équations (4.1), (5.1) et (6.1) sur la base des équations (4), (5) et (6) et en remplaçant les observables à l'aide du modèle mathématique des observables (équations (1) et (2)). Le développement se trouve en annexe sur la Figure I-1. Ainsi, dans cette estimation, on conserve, en plus du multi trajet lié aux codes, le bruit de mesure, les termes d'ambiguïté initiale et les délais hardware qui sont des biais qui apparaissent sur les mesures de codes et de phases en raison de la conception matérielle à la fois du récepteur GNSS et du satellite (Hakansson, 2020). Ces derniers ne sont pas représentés dans les équations, car pour un récepteur géodésique, ils sont négligeables par rapport aux autres termes.

Sur la Figure B-8, on peut voir des valeurs de MP1, MP2 et MP5 du signal GPS au cours du temps (Mendonça et al., 2019). La valeur de MP5 au cours du temps est inférieure à celles de MP1 ou MP2 parce que les mesures effectuées sur l'onde porteuse L5 sont moins bruitées.

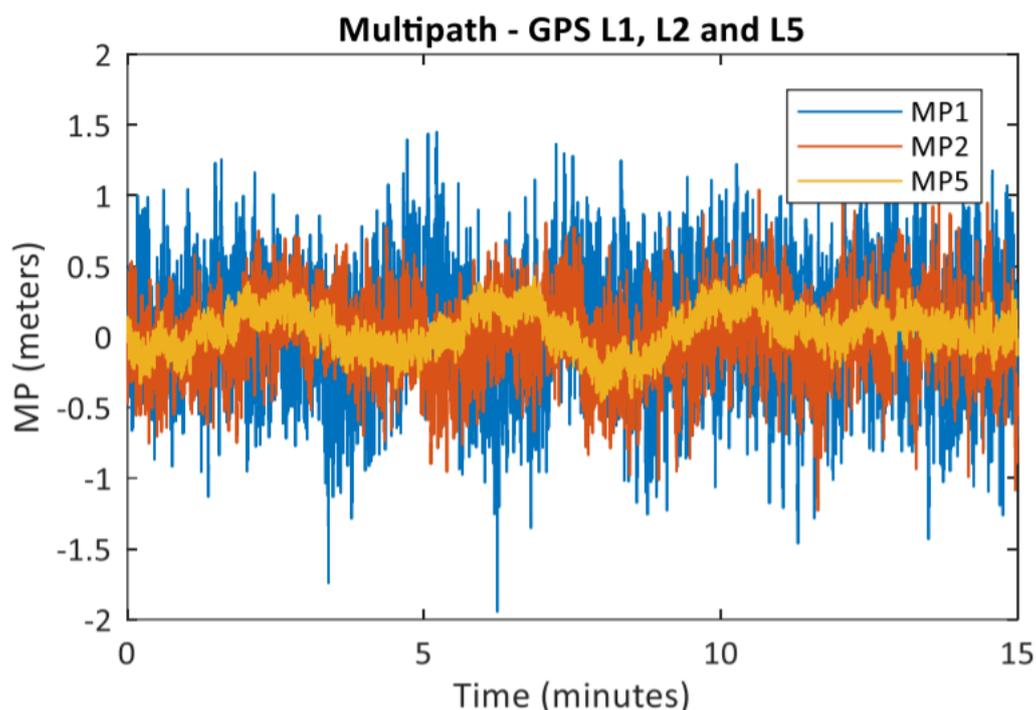


Figure B-8 : Estimation de l'effet du multi trajet pour le signal GPS (Source : Mendonça et al., 2019)

Lors de certains travaux, ces combinaisons sont utilisées afin de compenser l'erreur de multi trajet. Par jour et par site, une valeur de multi trajet est calculée grâce à ces combinaisons et elle est utilisée pour annuler l'erreur de multi trajet, comme il est possible de compenser l'erreur troposphérique grâce à un modèle prenant en compte les caractéristiques modifiant cette erreur (la température, la pression et l'humidité). Dès lors, il existe certaines limitations à l'utilisation de ces combinaisons de cette manière. L'utilisation d'une seule valeur par jour pour quantifier le multi trajet d'un site alors qu'il peut varier en fonction de la direction (comme représenté sur la Figure B-9) limite la précision et l'exactitude des données initiales (Bilich et al., 2007).

En effet, la Figure B-9 représente la variation possible du multi trajet au cours du trajet d'un satellite et de la variation de son élévation parce que le signal réfléchi dépend des propriétés de la surface réfléchissante. Ici, on peut voir que le type de surface varie en fonction de la position du satellite.

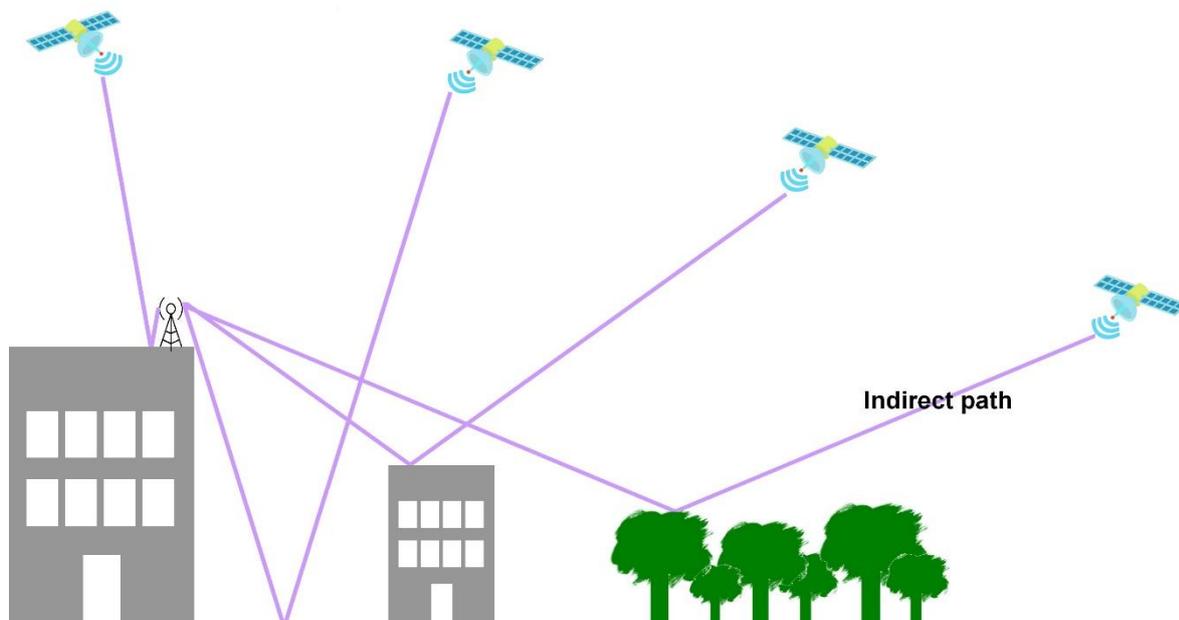


Figure B-9 : Multi trajet différent selon la position du satellite

2. Extraction du multi trajet

Afin d'obtenir le multi trajet et d'en extraire ses propriétés principales pour constater un changement dans les propriétés de la surface réfléchissante, il est nécessaire de diviser le SNR en deux parties : la première partie due au signal direct (SNR lié au signal direct) et la deuxième induite par la présence de multi trajet (SNR lié au multi trajet), c'est-à-dire par le signal réfléchi qui lui-même dépend des propriétés de la surface réfléchissante. La tendance principale du SNR en fonction du temps est causée par le signal direct. En effet, sur un passage de satellite, seulement un cycle du SNR lié au signal direct est visible.

Sur la Figure B-10, on peut voir une tendance principale qui se dégage. Elle est produite par le signal direct, une période dure environ 4h et possède une amplitude de 6 dB et une fréquence de 7.10^{-5} Hz. Une valeur de SNR est donnée par le récepteur pour chaque onde porteuse. Si on suppose un niveau de bruit constant, le SNR est simplement une version à l'échelle de l'amplitude ou la force du signal (Bilich et al., 2007). Ce signal étant plus puissant (et également moins bruité) lorsque le satellite est à haute élévation, cela explique la tendance principale du SNR. Les autres oscillations sont quant à elles causées par le multi trajet, le bruit ou une autre erreur détaillée précédemment.

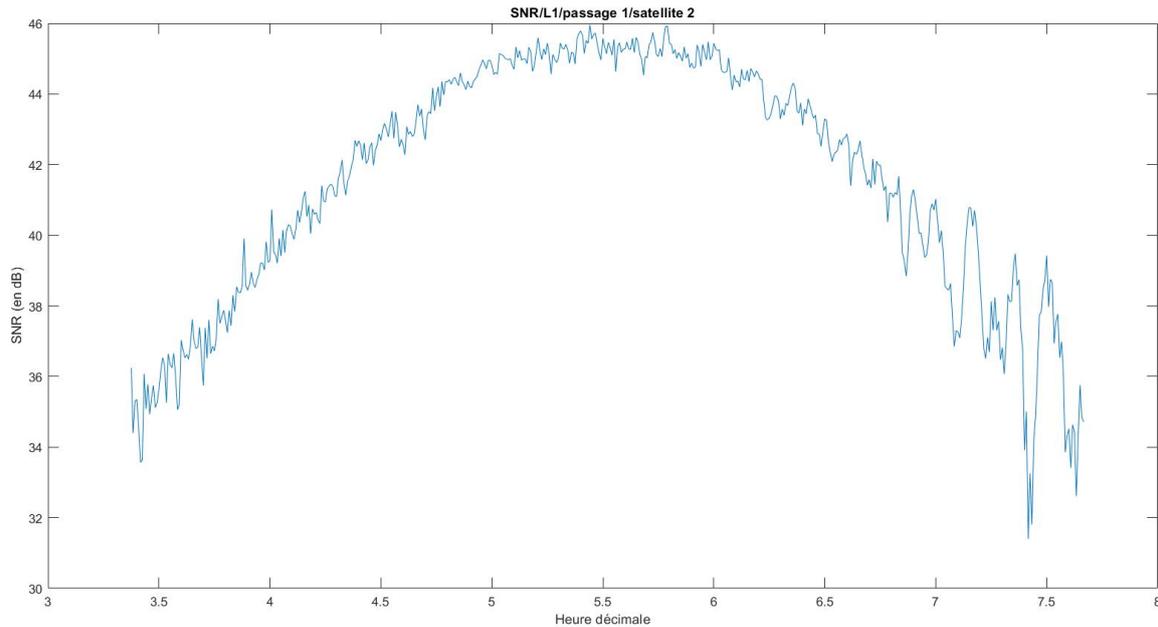


Figure B-10 : SNR lié au signal direct et SNR causé par la présence de multi trajet

En effet, le multi trajet crée des oscillations avec une amplitude plus petite et une fréquence généralement plus grande (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Axelrad, et al., 2008). Dans la littérature, le polynôme de faible degré qui s'ajuste au mieux à la fonction est implémenté. Le degré de ce polynôme est inférieur à 15. Ensuite, la valeur de cette modélisation est retirée de chaque valeur de SNR disponible. Ainsi, ce polynôme est considéré comme équivalent au SNR lié au signal direct et il ne reste que la partie du SNR due au multi trajet.

Puisque la première hypothèse de ce raisonnement est que la contribution à la longue période du SNR est due au signal direct, il est possible de perdre dans cet ajustement des informations sur du multi trajet lié à un objet très proche (Bilich et al., 2007). En effet, dans ce type de configuration (objet réfléchissant très proche de l'antenne), le multi trajet aura une très petite fréquence qui pourrait être perdue dans la modélisation du SNR lié au signal direct. D'autres moyens ont déjà été utilisés, mais ils n'ont pas amélioré la modulation de la fréquence du multi trajet (Larson et al., 2013).

Par exemple, une décomposition en ondelettes a déjà été mise en place afin de retirer le SNR lié au signal direct qui possède une grande période comme expliqué précédemment (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Braun, et al., 2008). Il est également arrivé que le SNR ne soit pas décomposé en deux parties, mais qu'un set de données contient le SNR lié au signal direct et celui causé par le multi trajet et qu'un autre ne soit composé que par le SNR dû au signal direct. Il est donc possible de comparer le comportement de ces deux sets de données afin de constater l'influence que le multi trajet a sur le SNR (Kurum et al., 2019).

Les données possédant une élévation supérieure à 30° sont rarement utilisées puisqu'elles ne contiennent généralement pas d'oscillations significatives dues au multi trajet (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Braun, et al., 2008).

3. Calcul de la fréquence, de l'amplitude et de la hauteur

Différentes techniques ont déjà été mises en place afin d'extraire la fréquence et l'amplitude du SNR dû au multi trajet. Les deux principales façons de calculer la fréquence sont les transformées de fourrier et la transformation en ondelettes (Larson, Small, Gutmann, Bilich, Axelrad, et al., 2008). Cette dernière s'adapte bien pour analyser des séries temporelles avec des fréquences qui changent au cours du temps comme pour le multi trajet. En effet, la fréquence du multi trajet est causée par la distance entre l'antenne et l'objet sur lequel le signal est réfléchi. Puisque la position du satellite (élévation et azimuth) change au cours du temps, la distance entre l'antenne et l'objet réfléchissant varie également.

Pour calculer l'amplitude du signal, il est considéré que l'amplitude du multi trajet vaut l'amplitude de l'ondelette (Bilich et al., 2007). Il est également possible d'utiliser les moindres carrés récursifs, après avoir retiré le signal direct, en les initialisant avec la fréquence calculée au préalable grâce aux ondelettes. Les moindres carrés récursifs pourraient permettre de calculer la fréquence et l'amplitude d'une seule traite, mais ils ne sont pas suffisamment robustes pour extraire la fréquence du signal avec la présence de bruit (Bilich et al., 2008).

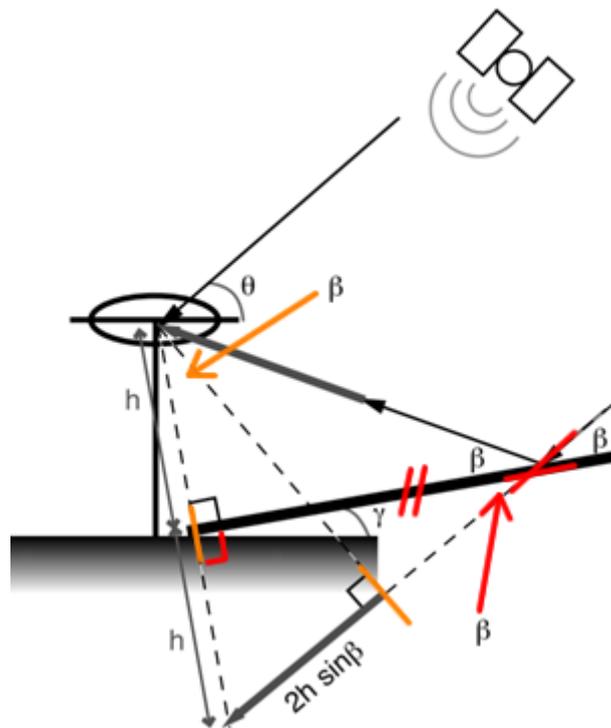


Figure B-11 : Origine des différents angles pour le calcul de la hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante (Bilich et al., 2007)

La Figure B-11 montre les différents angles présents lors de la réception par l'antenne d'un signal indirect ainsi qu'un signal direct. On peut voir l'angle d'élévation du satellite (θ), l'angle incident qui est égal à l'angle de réflexion (β) ainsi que l'angle d'inclinaison de la surface réfléchissante (γ).

Les deux flèches en gras représentent la même distance : celle parcourue « en trop » par le signal pour arriver jusqu'à l'antenne puisqu'il est réfléchi. Cette dernière est calculée en imaginant que le signal ne soit pas réfléchi sur la surface et qu'il continue son chemin. Lorsqu'on projette l'antenne perpendiculairement sur cette droite, on obtient la longueur de signal nécessaire afin de rejoindre l'antenne (si le signal y arrivait directement) et le trajet supplémentaire qu'il fait parce qu'il est réfléchi. Cette distance supplémentaire peut être calculée.

Sur la Figure B-11, se trouvent en rouge les preuves que les deux triangles sont les mêmes (triangles rectangles possédant un côté en commun ainsi qu'un angle de même amplitude). Ainsi, puisque la base du triangle du dessus vaut H (car c'est la valeur entre l'antenne et la surface réfléchissante), la base de l'autre triangle possède la même valeur. En orange, on peut voir la raison pour laquelle l'angle du triangle en pointillé vaut β (les deux côtés formant cet angle sont perpendiculaires aux deux côtés du triangle du dessous formant un angle β).

Sur la base de ce développement et de la Figure B-12, on peut calculer la distance supplémentaire parcourue par le signal réfléchi (équation (7.1)). En multipliant cette distance par $\frac{2\pi}{\lambda}$, on obtient la phase du multi trajet. Comme l'angle de réflexion est égal à la différence entre l'angle d'élévation et l'angle d'inclinaison de la surface réfléchissante, on arrive à l'équation (7.2) (Bilich et al., 2007).

$$\delta = 2H \sin \beta \quad (7.1)$$

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2H \sin \beta = \frac{4\pi}{\lambda} H \sin(\theta - \gamma) \quad (7.2)$$

δ : distance supplémentaire parcourue par le signal réfléchi (en m)

ψ : phase du multi trajet (en rad)

H : hauteur de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante (en m)

β : angle de réflexion (en rad)

λ : longueur d'onde de l'onde porteuse (en m)

θ : angle d'élévation du satellite (en rad)

γ : angle d'inclinaison de la surface réfléchissante (en rad)

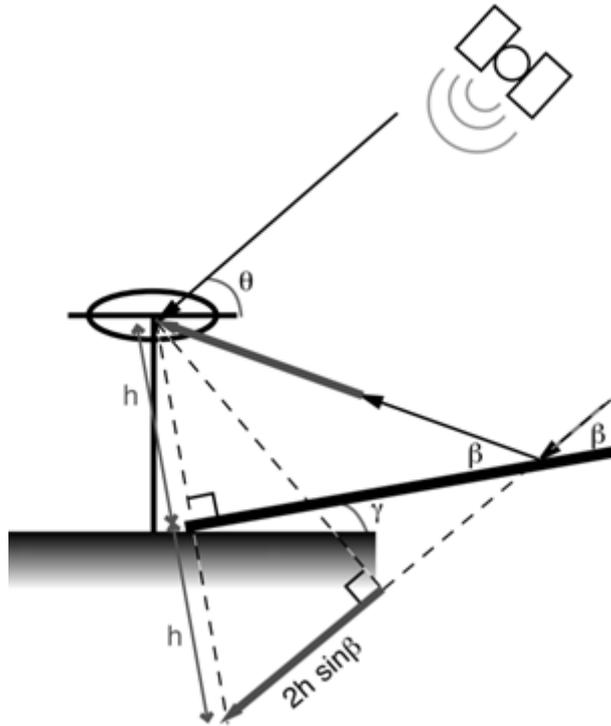


Figure B-12 : Origine des différents angles pour le calcul de la hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante (Bilich et al., 2007)

$$SNR = A \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} H \sin \theta + \phi \right) \quad (7)$$

SNR : résidu du SNR (en dB)

A : amplitude du multi trajet (en dB)

λ : longueur d'onde de l'onde porteuse (en m)

H : hauteur de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante (en m)

θ : angle d'élévation du satellite (en rad)

ϕ : phase initiale du multi trajet (en rad)

En émettant l'hypothèse que l'angle d'inclinaison de la surface réfléchissante vaut 0, c'est-à-dire que le signal est réfléchi sur une surface horizontale et parce que les résidus du SNR correspondent à une fonction sinusoïdale, on obtient l'équation (7) (Bilich et al., 2007). Dès lors, il ne faudra pas oublier cette première hypothèse lors de l'utilisation de cette équation dans la suite du travail.

C. Question de recherche

Le but de ce travail est de déterminer s'il est possible de détecter des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante grâce à des données GPS. Dès lors, il faut se demander de quelle façon constater ces variations.

Tout d'abord, il est nécessaire de détecter les périodes avec la présence de multi trajet dans les données. Pour ce faire, la coïncidence entre les combinaisons du multi trajet basées sur les codes et le SNR est utilisée afin de montrer la présence de multi trajet dans le SNR. Ensuite, une comparaison entre le SNR reçu par les deux antennes différentes permet également de détecter l'existence de multi trajet. En effet, il sera différent pour les deux antennes puisque la géométrie satellite-antenne-surface réfléchissante est distincte.

Après cette détection, il faut séparer la partie du SNR provenant du signal direct de celle issue du signal réfléchi afin de conserver uniquement cette deuxième partie et d'en extraire l'amplitude, la fréquence du signal réfléchi ainsi que la hauteur d'antenne.

D. Méthodologie

1. Environnement de travail

Au vu de la situation sanitaire dans laquelle ce mémoire a dû être effectué, le seul environnement de travail utilisé est le toit du bâtiment B5a. Ce dernier est situé Allée du 6 Août au numéro 17 à 4000 Liège. Le toit du bâtiment est couvert de roofing qui ne permet pas une bonne évacuation de l'eau. Par conséquent, lorsqu'il pleut, de grandes flaques se forment et peuvent rester quelques jours. Deux antennes (ULG0 et ULG1) se trouvent sur le côté sud du local d'ascenseur à l'est du toit du bâtiment comme montré sur la figure ci-dessous. Ces dernières sont chacune reliées à un récepteur de marque Septentrio (X400 et X501).

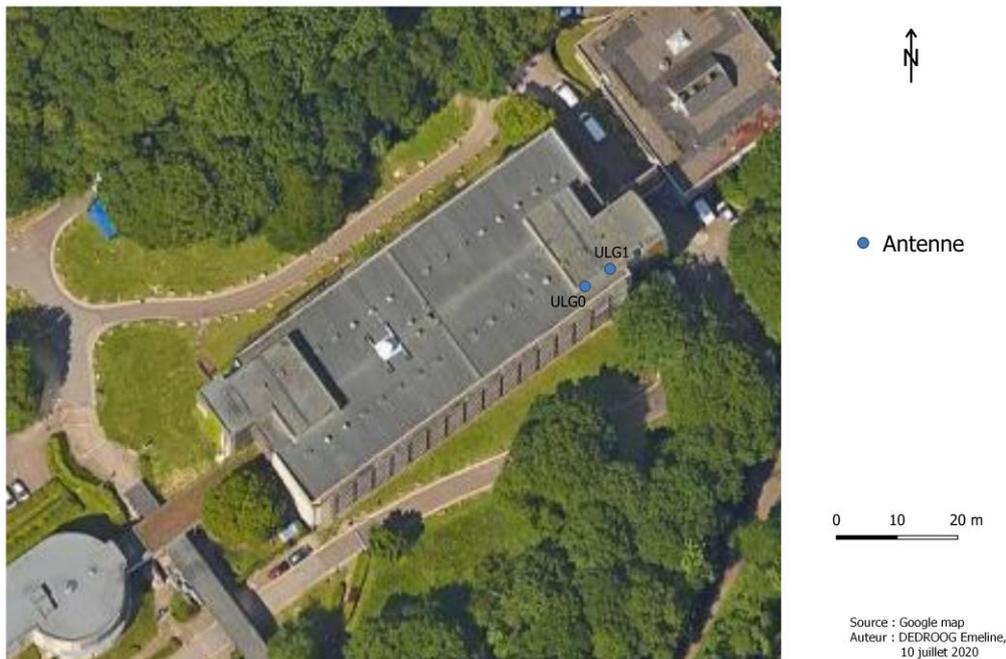


Figure D-1 : Localisation des antennes ULG0 et ULG1 sur le toit du B5a

Ainsi, l’environnement de travail, comme le montre la Figure D-1, est un environnement urbain, car d’autres bâtiments sont proches. De plus, ce complexe universitaire est entouré par une forêt, ce qui fait de cet environnement un environnement très complexe pour ce genre d’étude. Des données devaient être obtenues grâce à une antenne placée dans un environnement plus simple, mais à cause de la situation sanitaire, cela n’a pas pu être fait.

2. Données utilisées

Comme précisé au point précédent, les données proviennent de deux antennes différentes reliées à deux récepteurs de même marque. Dès lors, pour un même jour, il existe deux sets de données disponibles. Les données sont constamment enregistrées au cours de l’année parce que les récepteurs et les antennes sont fixes. Le taux d’échantillonnage de mesures de codes et de phases est de 30 secondes.

Les données utilisées ont été acquises lors de deux périodes de récolte : août 2019 et début février 2020. Celles-ci sont caractérisées par une météo différente qui sera précisée dans les sous-points suivants (Des Clics Nomades, n.d.). Comme précisé au point B.4, l’amplitude (ainsi que la phase) du multi trajet est assez sensible à l’humidité du sol. Par conséquent, puisque le but de ce travail est de repérer des modifications dans les propriétés du sol grâce au signal réfléchi, la première étape est de constater s’il existe une différence dans les données en fonction des précipitations. Un autre set de données devait être utilisé afin de quantifier la

hauteur de neige durant sa fonte, mais la méthodologie mise en place ne permet pas de calculs aussi précis.

2.1 Août 2019

Le mois d'août 2019 a connu une météo assez variable, ce qui permet de comparer des situations assez différentes et de constater l'influence d'une pluie plus ou moins importante. Il est également possible de vérifier que le multi trajet extrait est bel et bien semblable pour les jours caractérisés par l'absence de précipitation présents dans le Tableau D-1. Ce set de données n'avait pour but que de tester les scripts créés et de prendre en main le format de ces données, mais comme expliqué précédemment, la situation sanitaire ne permettant pas l'utilisation de données d'un site moins complexe, ces données ont malgré tout été utilisées et les résultats seront exposés dans ce travail.

Jour de l'année	Météo	Date	Précipitations (en mm)
217	Faibles averses après 19h	05-août	0.4
218	Faibles averses en matinée	06-août	0.9
219	Pluie légère à partir de 13h	07-août	5.4
220	Faibles averses après 19h	08-août	0.6
221	Pluie forte ou modérée à partir de 13h	09-août	10.6
222	Faibles averses après 13h	10-août	1.6
223	Pluie légère après 19h	11-août	1
224	Pluie légère à partir de 13h	12-août	5.2
225	Faibles averses après 19h	13-août	5.1
226	Faibles averses après 19h	14-août	1.2
227	Pluie légère toute la journée	15-août	9.6
228	Faibles averses en matinée	16-août	0.6
229	Pluie à partir de 13h	17-août	4
230	Pluie continue toute la journée	18-août	32.1
231	Sec	19-août	0.3
232	Pluie légère après 19h	20-août	1.2
233	Sec	21-août	0
234	Sec	22-août	0
235	Sec	23-août	0
236	Sec	24-août	0

Tableau D-1 : Météo du mois d'août 2019 (Source : Des Clics Nomades, n.d.)

2.2 Début février 2020 (tempête Ciara)

Dans ce set de données, des jours secs et des jours avec des quantités de précipitations sont présents. Ces dernières sont quantifiées dans le Tableau D-2.

Jour de l'année	Météo	Date	Précipitations (en mm)
35	Pluie et neige fondante	04-févr	21.6
36	Sec	05-févr	0.5
37	Sec	06-févr	0
38	Sec	07-févr	0
39	Sec (bruine légère)	08-févr	0.7
40	Tempête Ciara (pluie le soir)	09-févr	3.3
41	Pluie toute la journée	10-févr	38

Tableau D-2 : Météo du début du mois de février 2020 (Source : Des Clics Nomades, n.d.)

3. Combinaisons du multi trajet basées sur les codes

Grâce aux équations (4), (5) et (6), il est possible d'estimer la grandeur du multi trajet. Dès lors, la première équation est appliquée à chaque moment où les données nécessaires à son calcul sont disponibles puisqu'on va essentiellement travailler sur les données de la fréquence f_1 . En effet, étant donné que la longueur d'onde de cette porteuse est la plus petite, la fréquence du multi trajet obtenu sera plus grande et donc, plus visible. Un graphique avec une estimation du multi trajet au cours du temps est donc disponible pour chaque passage de chaque satellite. Ensuite, pour les trois combinaisons, on calcule la moyenne des valeurs de chaque graphique pour la retirer à ces mêmes valeurs. Grâce aux équations (4.1), (5.1) et (6.1), on se rend effectivement compte qu'il reste des termes contenant des ambiguïtés initiales qui créent un biais (par exemple, $(-\lambda_1 N_1 + \frac{2}{(1-\delta_1)} [\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2])$ pour l'onde porteuse de fréquence f_1). Puisque celles-ci sont supposées constantes (on considère qu'il n'y a pas de saut de cycle), soustraire la moyenne aux valeurs permet de conserver uniquement les termes de multi trajet, le bruit et les délais hardwares. En comparant ce graphique avec celui des résidus du SNR au cours du temps, il est donc possible de vérifier la présence ou l'absence de multi trajet à chaque instant, mais il faut être prudent. En effet, le résultat de ces équations contient également le bruit, les délais hardwares et des résidus de l'ambiguïté initiale qui a été retirée en soustrayant la moyenne des valeurs d'un passage.

À l'aide de ces combinaisons, il est également possible de construire une grille mettant en avant des endroits de l'espace où le multi trajet est fort présent. Pour ce faire, nous avons décomposé le « ciel » de l'observateur en secteurs de 10° de côté, l'élévation d'un satellite étant placée en abscisse et son azimut en ordonnée. Dès lors, la valeur du multi trajet calculée grâce à la combinaison MP1 est placée dans le voxel de l'espace correspondant à la position du satellite à ce même moment. Cette démarche est mise en place pour les deux passages des satellites sur une même journée. Ainsi, lorsque toutes les valeurs sont reliées au voxel correspondant, la variance est calculée pour chaque voxel. De cette façon, pour chaque endroit de l'espace, il existe la valeur de variance du multi trajet au cours de la journée.

Le multi trajet est considéré comme important lorsque la variance est supérieure au 3^{ème} quartile des valeurs de toute la journée et la valeur 1 est attribuée à ce voxel. Cette dernière peut englober des valeurs assez différentes de multi trajet, il est donc nécessaire d'utiliser ces graphiques en tenant compte de cela. En combinant les données de différents jours, il est donc possible de mettre en lumière des paires élévation/azimut de satellites qui provoquent un multi trajet important. En connaissant ces zones de l'espace, l'objet sur lequel le signal est réfléchi peut être mis en avant en imaginant le trajet du signal parce que les positions du satellite et de l'antenne sont connues. De cette manière, des modifications d'un jour à l'autre dans le multi trajet peuvent être attribuées à un objet et cela permet de limiter les données dans lesquelles rechercher ces variations, car des paires élévation/azimut sont connues.

4. Extraction du multi trajet

Dans le cadre de ce travail, les deux parties du SNR sont séparées en ajustant par moindres carrés un polynôme de degré 4 considéré comme la partie du SNR due au signal direct. Le degré du polynôme sera justifié dans la partie consacrée aux résultats. Dès lors, pour chaque temps, la valeur de ce polynôme est soustraite à la valeur du SNR afin d'obtenir la valeur du SNR liée au multi trajet.

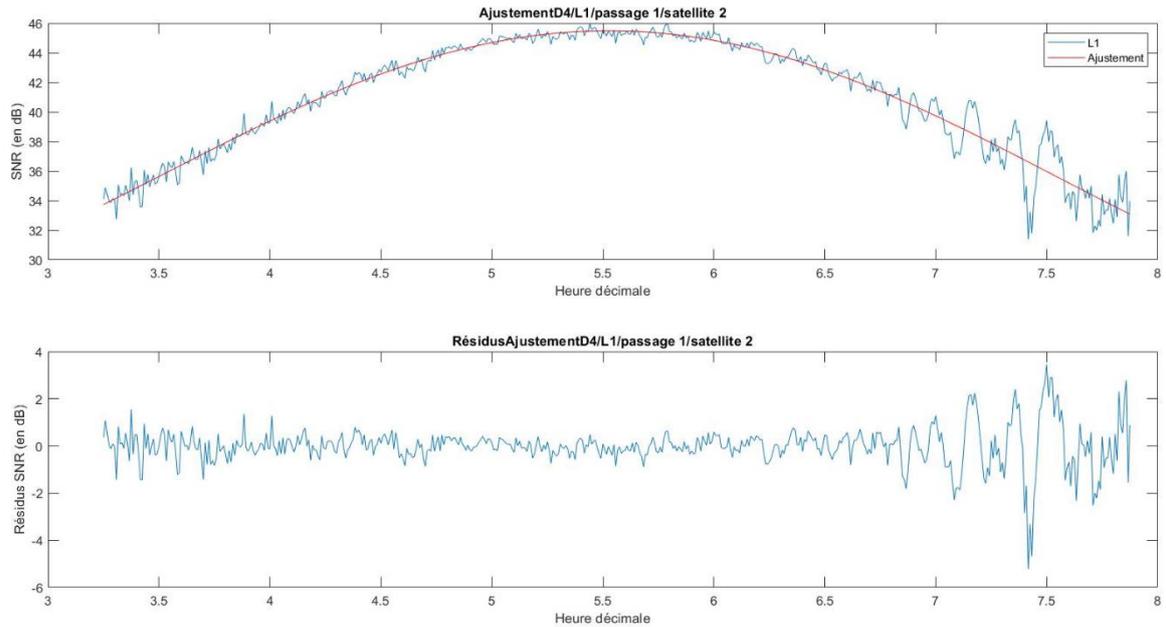


Figure D-2 : Ajustement d'un polynôme de degré 4

Sur la partie supérieure de la Figure D-2, on peut voir le SNR en fonction du temps ainsi que l'ajustement du polynôme de degré 4 et sur la partie du dessous, on garde uniquement les résidus obtenus grâce à cet ajustement. Pour s'assurer que ces résidus représentent bien le multi trajet, la Figure D-3, quant à elle, reprend les résidus obtenus grâce à l'ajustement par moindres carrés d'un polynôme de degré 4 et sur la 2^{ème} partie de la figure, on peut voir le MP1 au cours du temps. Le MP1 contient une estimation du multi trajet, du bruit, des délais hardwares ainsi que certains résidus des ambiguïtés initiales. En effet, elles ont été retirées en soustrayant la moyenne des valeurs de MP1 du passage du satellite. Des résidus peuvent donc être toujours présents dans les valeurs de MP1.

Ainsi, on constate que les résidus obtenus grâce à l'ajustement représentent bien le SNR causé par le multi trajet puisqu'il possède des valeurs plus importantes de la même façon que le MP1.

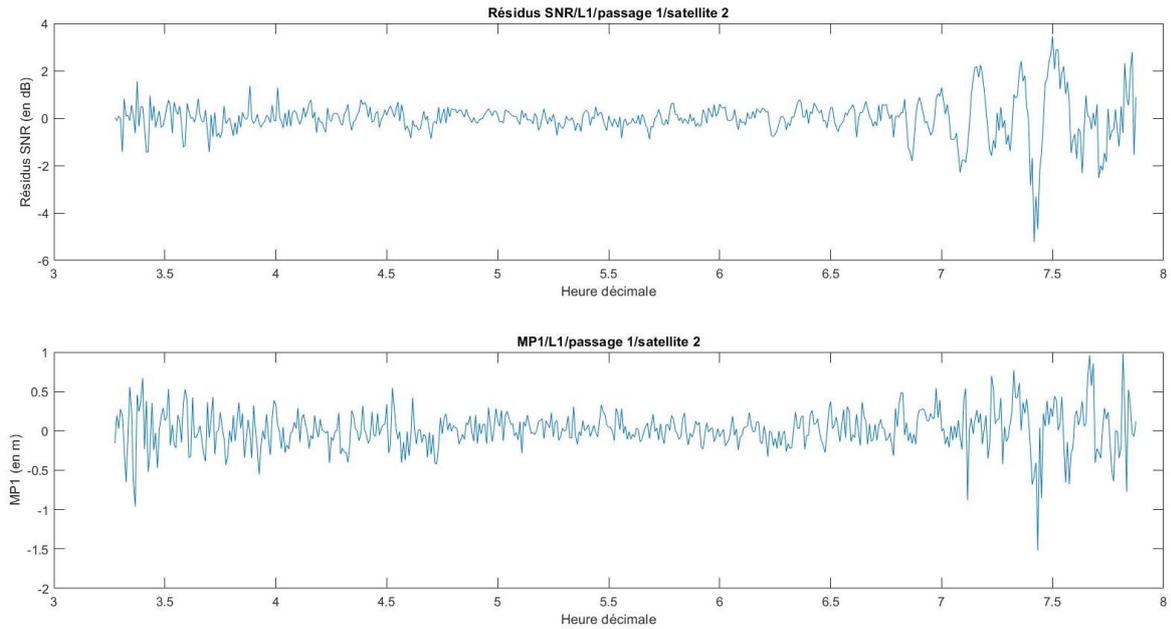


Figure D-3 : Résidus du SNR sur L1 et MP1

5. Comparaison visuelle des résidus

Afin de constater une variation dans les propriétés de la surface réfléchissante, les résidus du SNR considérés comme le SNR lié au multi trajet sont comparés sur plusieurs jours. En effet, si un changement dans le signal est constaté, cela pourrait signifier une modification des propriétés de la surface réfléchissante. Celle-ci peut être confirmée grâce à une météo différente pour la succession des jours utilisés.

Par exemple, sur la Figure D-4, les résidus du SNR du jour 221 sont déphasés par rapport à ceux des deux autres jours. Ce graphique sera mieux détaillé et expliqué dans la partie concernant les résultats.

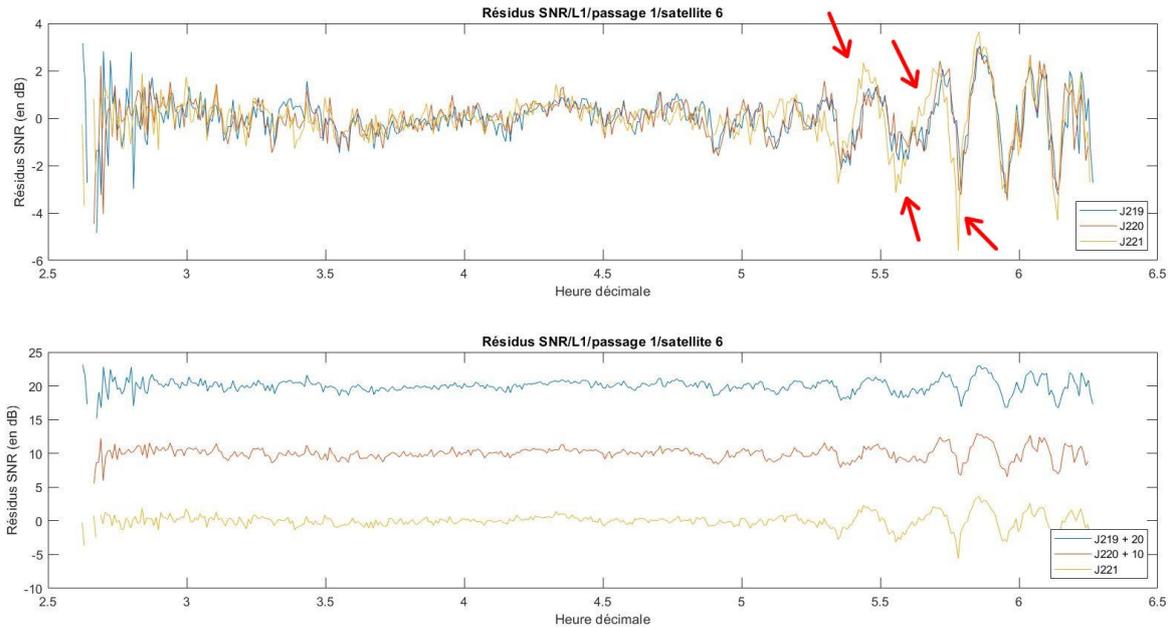


Figure D-4 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 6 pour son 1^{er} passage pour ULG0

6. Extraction de la fréquence, de l'amplitude et de la hauteur

Puisque la fréquence et l'amplitude du multi trajet varient au cours du temps, des méthodes spécifiques doivent être mises en place afin de les extraire. Dès lors, pour calculer ces paramètres en un temps donné, les valeurs des 20 minutes précédentes ainsi que des 20 minutes suivantes sont utilisées pour calculer la fréquence pour une valeur de résidus de SNR. Pour l'amplitude, ce sont les valeurs des 5 minutes précédentes et celles des 5 minutes suivantes qui sont employées. Comme le taux d'échantillonnage est de 30 secondes, 81 valeurs sont disponibles afin d'évaluer la fréquence en un point. En ce qui concerne l'amplitude pour un instant, 21 valeurs sont disponibles. Ces tailles de fenêtres seront discutées dans la partie résultats.

Tout d'abord, pour calculer la fréquence, la fonction d'autocorrélation des résidus du SNR en fonction du temps est implémentée. En effet, lorsque cette dernière est calculée pour un signal périodique, elle possède les mêmes caractéristiques que le signal lui-même (MathWorks, n.d.). Ensuite, pour chaque fenêtre de 81 valeurs, les pics principaux de cette fonction sont calculés sur la base d'un seuil. Ainsi, la période du signal est obtenue et donc, la fréquence également. Il suffit d'introduire un seuil et les sommets possédant une valeur supérieure à ce dernier sont utilisés afin de calculer la période de la fonction obtenue avec les 81 valeurs.

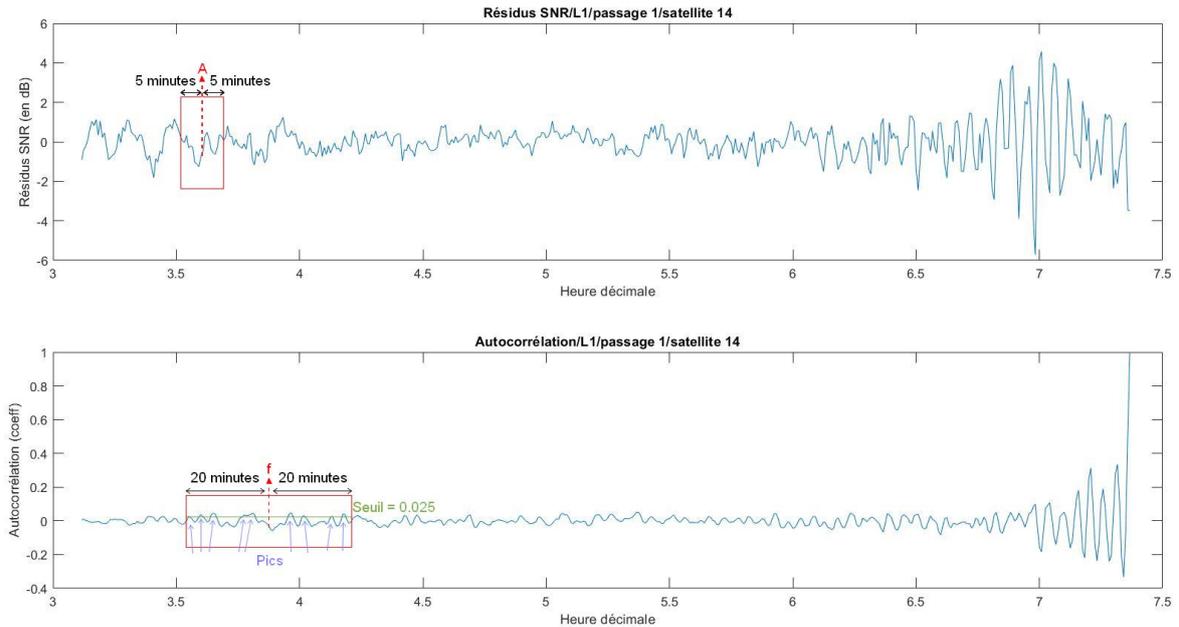


Figure D-5 : Extraction de l'amplitude et de la fréquence en un point grâce à des fenêtres

La Figure D-5 montre la taille des fenêtres permettant d'extraire l'amplitude à partir des résidus du SNR ainsi que la fréquence à partir de la fonction d'autocorrélation. Les coefficients formant cette fonction sont obtenus grâce au calcul de l'autocorrélation de la fonction des résidus du SNR. Sur la Figure D-6, on peut voir le seuil placé à 0.025 ainsi que les différents pics obtenus afin de calculer la périodicité et donc, la fréquence de la fonction d'autocorrélation qui se comporte de la même manière que la fonction en elle-même. Le choix du seuil est discuté dans la partie résultats.

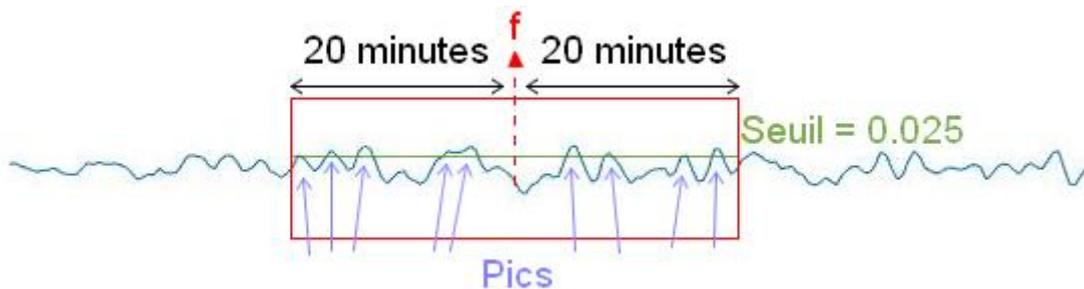


Figure D-6 : Zoom sur la fenêtre permettant de calculer la fréquence pour un point sur base de la fonction d'autocorrélation

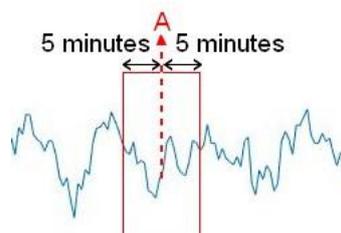


Figure D-7 : Zoom sur la fenêtre permettant de calculer l'amplitude pour un point sur base de la fonction des résidus du SNR

En ce qui concerne l'amplitude, comme le montre la Figure D-7, les 21 valeurs des résidus du SNR sont utilisées directement. Il existe une relation entre le RMS (Root Mean Square) et l'amplitude d'une fonction (équation (8)) (Beranek, 2012).

$$RMS = \sqrt{\frac{A^2}{2}} \quad (8)$$

RMS : Root Mean Square (en dB)

A : amplitude du multi trajet (en dB)

Étant donné qu'un set de 21 valeurs est utilisé afin de déterminer l'amplitude de la fonction du multi trajet (on considère que les résidus du SNR sont la partie du SNR liée au multi trajet) en fonction du temps, il est possible de calculer le RMS de ce set de données grâce à l'équation (9) (Warnant, 2019).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (9)$$

x_i : résidu du SNR (en dB)

n : nombre de valeurs utilisées pour calculer le RMS (21 dans notre cas)

Par conséquent, l'amplitude en un point est obtenue à l'aide de l'équation (10) utilisant les équations (8) et (9).

$$A = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (10)$$

Quant à la hauteur, puisque la fonction des résidus du SNR au cours du temps est une sinusoïdale, l'équation (11) est obtenue (Benson, 2016).

$$SNR = A \cos(\omega t + \phi) \quad (11)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (12)$$

SNR : résidu du SNR (en dB)

ω : fréquence angulaire (en rad/s)

t : temps (en s)

ϕ : phase initiale du multi trajet (en rad)

f : fréquence du multi trajet (en Hz)

En utilisant également l'équation (7), il est possible d'obtenir une relation entre la fréquence et la hauteur entre le récepteur et l'objet sur lequel le signal réfléchi.

$$2\pi f t = \frac{4\pi}{\lambda} H \sin \theta \quad (13)$$

f : fréquence du multi trajet (en Hz)

t : temps (en s)

λ : longueur d'onde de l'onde porteuse (en m)

H : hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante (en m)

θ : élévation du satellite (en rad)

La fréquence, le temps, la longueur d'onde et l'élévation sont connus. Dès lors, la hauteur peut être extraite grâce à l'équation (14).

$$H = \frac{\lambda f t}{2 \sin \theta} \quad (14)$$

Comme expliqué précédemment, il faut rester prudent avec cette équation. Effectivement, l'équation (7) est obtenue lorsque la surface réfléchissante est horizontale, mais dans ce travail et dans des environnements aussi complexes que le nôtre, ce n'est pas toujours le cas.

Le Tableau D-3 reprend de manière succincte la façon de calculer les différents paramètres.

	Amplitude	Fréquence	Hauteur
Fenêtre	21 valeurs	81 valeurs	1 valeur
Données	Résidus du RMS (en dB)	Fonction d'autocorrélation (coeff)	- Longueur d'onde de l'onde porteuse (en m) - Fréquence du multi trajet (en Hz) - Temps (en s) - Élévation du satellite (en rad)
Calcul	$A = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$	- Détermination de pics de la fonction d'autocorrélation grâce à une valeur-seuil - Calcul de la périodicité grâce à ces pics - Calcul de la fréquence	$H = \frac{\lambda f t}{2 \sin \theta}$

Tableau D-3 : Résumé de l'extraction de l'amplitude, la fréquence et la hauteur en un point

7. Corrélation croisée

Après une première analyse visuelle des résultats, la corrélation entre les résidus du SNR de différents jours a été calculée. La fonction `xcorr` du logiciel matlab a été utilisée sur une partie des résidus du SNR de plusieurs jours consécutifs. Ainsi, la période de données utilisée pour calculer les coefficients de corrélation entre les jours est une période contenant du multi trajet. Par exemple, pour la Figure D-4, on calculera les coefficients de 5h à 6.2h.

Les résultats de cette fonction peuvent être interprétés comme l'estimation de la corrélation entre deux fonctions aléatoires (MathWorks, n.d.). Ensuite, le maximum de ces coefficients est conservé, il est compris entre -1 et 1. S'il vaut 1, la fonction est la même et si sa valeur est de -1, on est en présence de la fonction opposée.

E. Résultats

1. Détection du multi trajet

1.1 En général

Comme expliqué au point D.3, à l'aide de l'équation (4), il est possible de calculer une valeur de multi trajet (sans oublier que cette valeur contient également le bruit de mesure, les délais hardwares et des résidus des ambiguïtés) à chaque instant du trajet d'un satellite et deux grilles peuvent être construites par jour (une pour chaque antenne). Un exemple se trouve dans les annexes à la Figure I-2 et à la Figure I-3. Trois jours ont été utilisés afin de créer ces grilles et d'intégrer des données concernant les trois périodes utilisées dans ce travail : le jour 220 de l'année 2019 et les jours 36 et 61 de l'année 2020. La dernière période contenant le J61 n'a pas été utilisée puisqu'elle devait permettre de calculer des hauteurs de neige, ce qui n'a pas été possible avec notre environnement et notre méthodologie. Malgré cela, ces données ont été utilisées pour ce calcul afin d'avoir des données possédant des conditions météorologiques différentes. Comme attendu, le multi trajet est surtout présent lorsque les satellites se trouvent à basse élévation et on peut également voir deux diagonales avec des valeurs 3. Cela signifie que pour les trois sets de données, le multi trajet de ces voxels était plus important que le 3^{ème} quartile des variances d'une même journée. En effet, une valeur de 1 est attribuée pour chaque set de données lorsque la valeur d'un voxel est supérieure au 3^{ème} quartile des variances calculées.

Cette valeur-seuil est choisie de cette façon puisqu'à de faibles élévations, les variances peuvent avoir des valeurs assez extrêmes et donc, l'écart-type calculé pour le set de données est très élevé. En effet, il est sensible à ce type de valeur. Afin d'avoir un certain nombre de valeurs sélectionnées, le 3^{ème} quartile est privilégié à la moyenne, car on cherche à isoler les valeurs les plus élevées sans pour autant que ce seuil soit trop influencé par les valeurs très extrêmes. Si la médiane était retenue comme seuil, il y aurait eu trop de valeurs pas assez élevées et donc pas intéressantes qui auraient été retenues. Par exemple, dans un set de données, une variance d'un voxel vaut 148. Dès lors, l'écart-type du set de données vaut 10, mais on cherche également à conserver comme valeur élevée une variance d'un voxel qui est de 8, car les autres variances se situent entre 0 et 0.5. Dans ce cas, la médiane vaut 0.15. Par conséquent, des valeurs comme 0.5 auraient été retenues alors qu'elles ne représentent pas un multi trajet élevé.

Médiane (en m ²)	0.16
Écart-type (en m ²)	10.42
3 ^{ème} quartile (en m ²)	0.49

Tableau E-1 : Médiane, écart-type et 3^{ème} quartile des variances du MP1 pour le J220 sur l'antenne ULGO

Le Tableau E-1 reprend les différentes valeurs seuils possibles et le Tableau E-2, quant à lui, montre les variances des différents voxels. En rouge, on peut voir les voxels auxquels une valeur de 1 a été attribuée. On constate que les valeurs de ceux-ci vont de 148 à 0.5. Comme cela a été expliqué précédemment, des valeurs de 1 peuvent être attribuées pour des variances de multi trajet très variées.

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
10	2.10								0.20
20	77.47								0.24
30	5.05	0.18							0.20
40	0.46	0.32							0.13
50	2.57	0.21	0.10	0.15				0.00	0.19
60	8.17	0.69	0.62	0.52	0.81		0.00	0.00	0.27
70	8.96	0.17	0.03	0.08	0.19	0.29	0.01	0.01	0.10
80	21.39	0.41	0.33	0.09	0.01	0.74	0.02	0.04	0.30
90	1.33	0.18	0.03	0.08	0.01	0.47	0.03	0.12	0.31
100	0.13	0.08	0.03	0.09	0.01	0.71	0.06	0.17	0.30
110	0.13	0.07	0.12	0.09	0.02	0.52	0.84	0.42	0.48
120	3.68	0.11	0.11	0.04	0.01	0.73	0.52	0.05	0.77
130	8.93	0.12	0.04	0.39	0.59	0.88	0.18	0.59	0.69
140	2.48	0.50	0.03	0.65	0.60	0.59	0.66	0.38	0.01
150	1.42	0.34	0.71	0.73	0.71	0.51	0.00	0.03	0.00
160	2.90	0.86	0.53	0.02		0.00	0.01	0.03	0.00
170	0.66	0.11	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00
180	6.91	0.30	0.27	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00
190	0.58	0.22	0.17	0.33	0.34	0.35	0.01	0.00	0.00
200	0.14	0.46	0.11	0.02	0.01	0.22	0.33	0.00	0.00
210	0.07	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.25	0.00	0.00
220	0.24	0.09	0.02	0.02	0.01	0.01	0.24	0.27	0.00
230	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.16	0.00
240	148.65	0.35	0.06	0.01	0.01	0.00	0.02	0.16	0.01
250	4.83	1.93	0.32	0.03		0.01	0.02	0.16	0.00
260	3.25	9.30	5.62	0.13	0.01	0.00	0.02	0.19	0.00
270	0.13	0.55	2.06	0.84	0.23	0.01	0.02	0.19	0.00
280	0.15	0.10	0.19	1.15	0.40	0.51	0.31	0.07	0.00
290	0.95	0.86	0.13	0.82	0.30	0.26	0.54	0.09	0.00
300	2.37	0.08	0.56	1.07	0.54	0.50	0.22	0.64	0.17
310	0.11	0.05	0.20	0.35	0.02	0.01	0.00	0.32	0.63
320	0.12	0.31	0.50	0.02				0.01	0.42
330	0.45	0.43	0.06						0.36
340	0.11	0.10							0.35
350	0.88								0.33
360	0.19								0.26

Tableau E-2 : Variance du MP1 des différents voxels pour le J220 pour l'antenne ULG0

Comme des hotspots de multi trajet ont été mis en avant grâce à ces grilles, la Figure E-1 et la Figure E-2 ont été créées afin de permettre une meilleure visualisation de la position du satellite et donc des objets sur lesquels le signal pourrait être réfléchi. Il est nécessaire de garder une certaine réserve avec ces figures, car si le rayon du cercle est modifié et puisque le centre de ce dernier est l'antenne, une case n'aura pas la même place sur le fond. Ces illustrations ont été créées dans le seul but de visualiser au mieux la direction du signal réfléchi ainsi que la position de ces différents signaux réfléchis les uns par rapport aux autres.

La valeur de chaque case de ces figures est attribuée de la même façon que pour les deux grilles créées. Afin de construire ce cercle et de remplir chaque case avec la bonne valeur, un rayon a été tracé tous les 10° afin de représenter les 360° d'azimut et neuf cercles sont emboîtés les uns dans les autres afin de représenter les 90° d'élévation. Dès lors, le rayon partant du centre, l'antenne, et se dirigeant vers le nord est le rayon qui a une valeur d'azimut de 0° . En ce qui concerne l'élévation, le centre du cercle représente une élévation de 90° et le bord extérieur du cercle, une élévation de 0° . Ce choix a été fait afin de représenter au mieux la réalité. Lorsqu'un satellite se trouve à basse élévation, l'objet sur lequel le signal est réfléchi est généralement plus éloigné de l'antenne que lorsque le satellite se trouve à une élévation plus importante où le signal sera réfléchi très proche de l'antenne. S'il y a une réflexion, l'angle d'incidence est égal à l'angle réfléchi. De plus, lorsque la réflexion a lieu sur une surface horizontale, l'angle d'incidence vaut l'angle d'élévation. Cependant, cela ne signifie pas que le signal est réfléchi à l'endroit où la case se trouve sur le bâtiment.

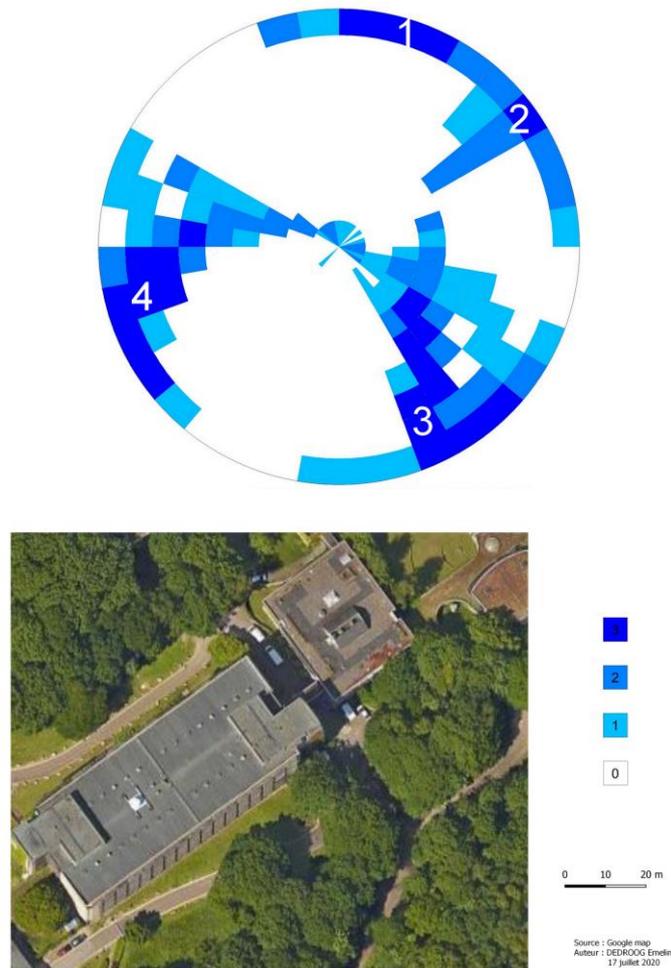


Figure E-1 : Multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X400

Comme attendu, le multi trajet est plus fréquent lorsque les satellites se trouvent à de faibles élévations, mais en croisant les données des deux antennes, quatre hotspots peuvent être mis en avant et sont numérotés sur les deux figures. Le premier comprend des élévations de 0° à 10° et un azimut de 0° à environ 40° , le deuxième possède des élévations allant de 0° à 60° et un azimut de 50° à 90° , le troisième a des élévations de 0° à 90° et un azimut de 120° à 160° et le quatrième contient des élévations de 0° à 90° et un azimut de 230° à 350° . Ces valeurs sont approximatives et peuvent être étendues selon l'antenne ou la combinaison de calcul de multi trajet utilisée. Ainsi, on peut se demander sur quels objets le signal est réfléchi pour ces quatre hotspots.

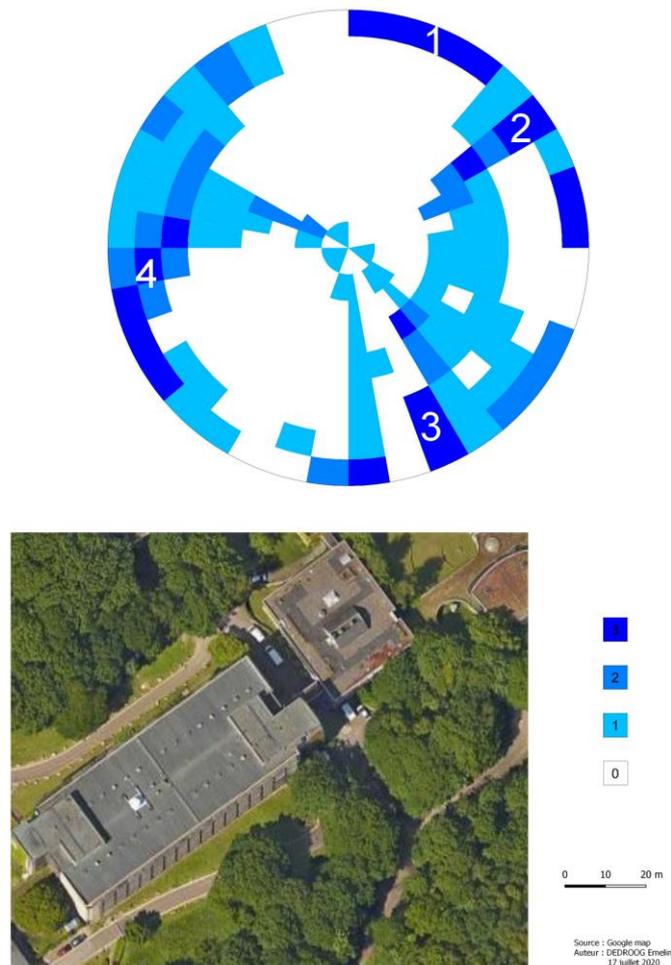


Figure E-2 : Multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X501

Si des valeurs 1 sont présentes en grand nombre comme pour la partie sud-est (secteur 4) de la Figure E-2, cela signifie qu'une valeur 1 est présente pour différents jours dans la même zone. En effet, la valeur-seuil utilisée est le 3^{ème} quartile et donc, un certain nombre fixe de valeurs est sélectionné pour chaque jour

Les hotspots, définis précédemment, se comportent de différentes façons.

En ce qui concerne le premier spot, sa forme s'explique par le fait qu'il n'y a pas de données pour ces azimuts cités à des élévations supérieures à 20°. Sur la Figure D-1, on pouvait voir que dans cette direction se trouve un autre bâtiment assez important et que d'autres sont également présents un peu plus loin.

Pour le deuxième spot, pour l'antenne ULG0, les cases sont surtout alignées selon un même azimut compris entre 50° et 60° et des valeurs 2 ou 3 sont également présentes pour des élévations inférieures à 10°. Pour la deuxième antenne, entre les hotspots 2 et 3, on voit une grande surface de valeur 1 et comme mentionné précédemment, cela signifie que des valeurs de 1 sont présentes pour différents jours et sont proches les unes des autres. Pour le hotspot 2, dans son prolongement se trouve un bâtiment ayant une forme allongée suivant le même azimut. Dès lors, comme le mobilier urbain permet plus de réflexion, il est possible que cette

« ligne » soit causée par ce bâtiment. Pour la surface étendue de valeur 1 entre les hotspots 2 et 3, il se peut que cela soit provoqué par le changement de végétation entre les trois périodes. Effectivement, il est possible que puisque la végétation n'est pas similaire entre le mois d'août et le mois de février, les quatre spots visibles soient uniquement dus à des objets qui ne changent pas au fur et à mesure des saisons, comme des constructions ou du sol.

Les 3^{ème} et 4^{ème} spots, quant à eux, se comportent de manière similaire (mais avec un effet miroir). En effet, lorsque l'élévation du satellite augmente, l'azimut diminue pour le 3^{ème} spot et augmente pour le 4^{ème}. Le 4^{ème} spot pourrait être dû à une réflexion du signal sur le toit du bâtiment et/ou sur la coupole blanche présente au milieu du toit du B5a. En ce qui concerne le 3^{ème}, le signal devrait réfléchir sur le sol puisqu'aucun bâtiment n'est présent dans cette zone.

À cette étape du travail, les objets réfléchissants énoncés ne sont que des hypothèses. Afin de confirmer ces hypothèses, il est possible de calculer la différence de hauteur entre l'antenne et l'objet réfléchissant. Cela fera l'objet d'une partie de la suite de ce travail.

1.2 Pour un satellite

En plus d'une détection du multi trajet selon une paire azimut/élévation grâce aux données fournies par tous les satellites, il est possible de calculer le multi trajet pour une journée pour un certain satellite. En comparant les combinaisons MP1 au SNR de la fréquence f_1 , ainsi qu'en mettant en parallèle les valeurs de SNR pour les deux récepteurs, la partie du SNR due au multi trajet peut être mise en avant. On a utilisé la fréquence f_1 car, sa longueur d'onde est la plus petite. De cette façon, la fréquence du multi trajet extrait du SNR sera plus grande et ainsi, plus visible.

La comparaison du MP1 et SNR pour les deux récepteurs permet de constater la présence de multi trajet, car ce dernier est différent pour les deux antennes. Il ne faut cependant pas oublier qu'en plus des effets du multi trajet, MP1 comporte aussi les erreurs liées au bruit de mesure, aux délais hardwares et aux résidus de l'ambiguïté initiale. Ce sont sûrement ces dernières qui amènent une valeur aussi extrême lors du tout début du lever du satellite sur la Figure E-3 et la Figure E-4.

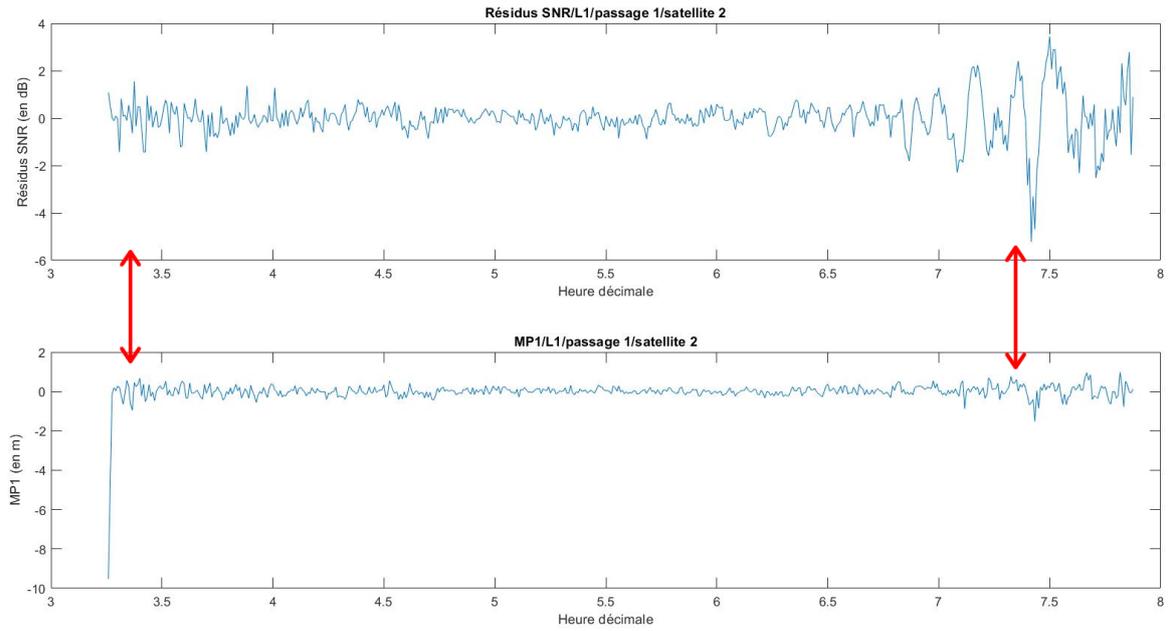


Figure E-3 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR grâce à la combinaison MP1 pour l'antenne ULG0

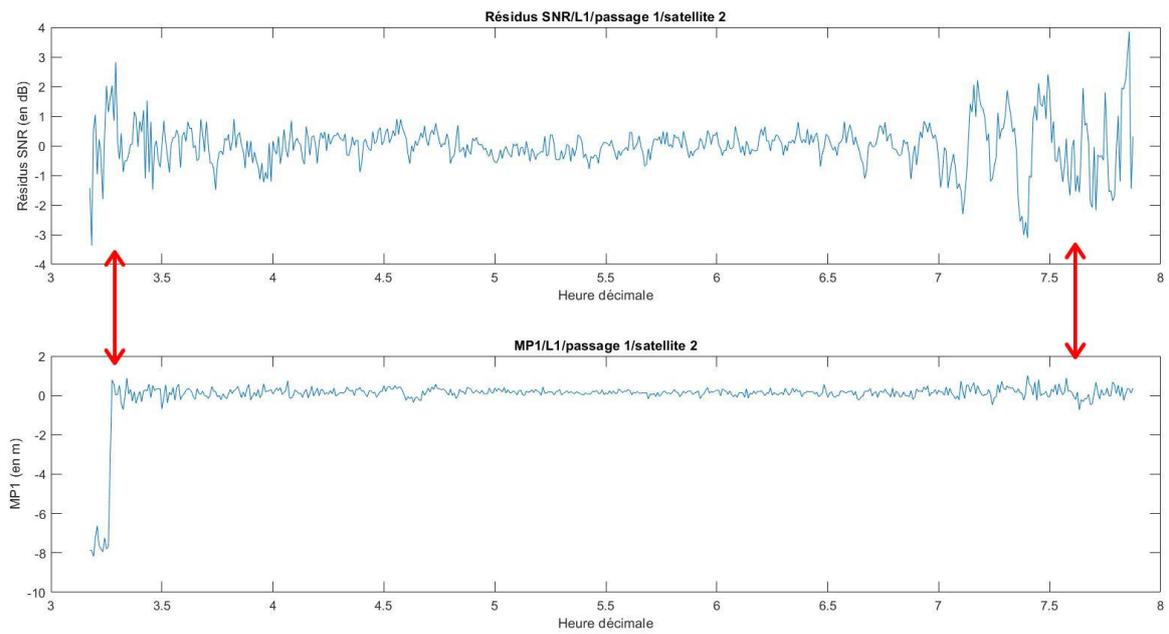


Figure E-4 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR grâce à la combinaison MP1 pour l'antenne ULG1

Afin de déterminer si on est en présence ou non de multi trajet, un seuil a été choisi. En effet, on considérera dans la suite de ce travail que du multi trajet est présent si la valeur du MP1 est supérieure en valeur absolue à 0.4 mètres. Bien sûr, le MP1 oscille ; si on retrouve beaucoup de sommets supérieurs à 0.4 mètres, le creux présent entre ceux-ci montre également la présence de multi trajet. Toutefois, la présence d'un seul pic possédant une valeur supérieure à 0.4 mètres ne prouve pas que du multi trajet est présent puisque le bruit fait également partie des termes finaux de la combinaison.

Différents seuils ont été testés et la valeur de 0.4 mètres permettait de mieux détecter la présence de multi trajet que les autres valeurs.

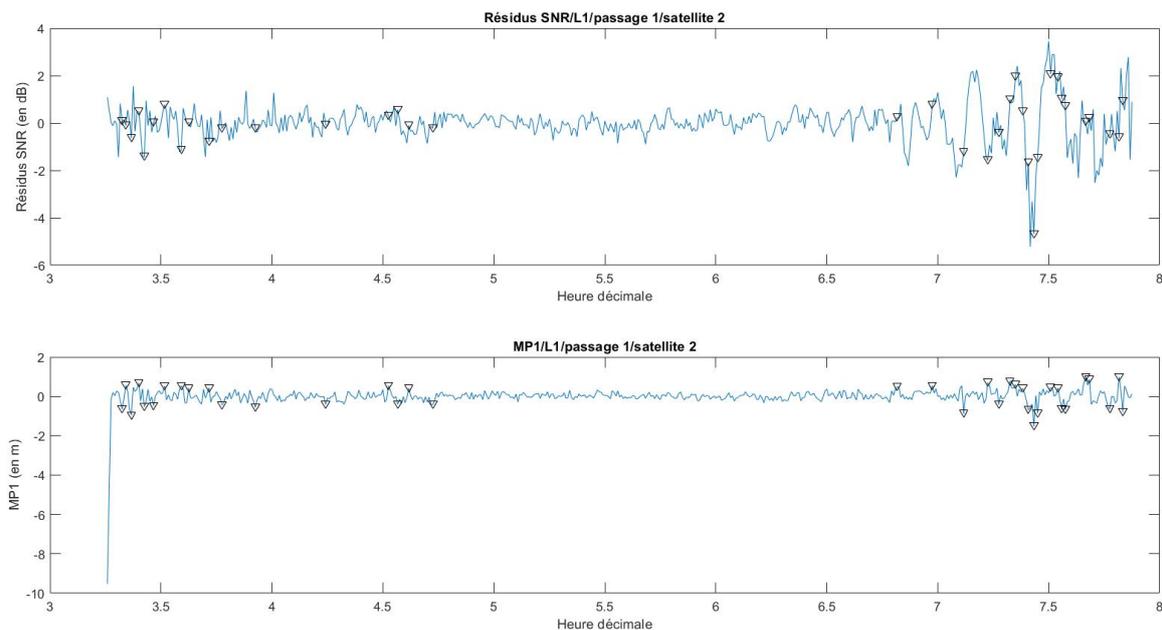


Figure E-5 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR grâce à la combinaison MP1 et à la détermination d'un seuil pour l'antenne ULGO

La Figure E-5 est similaire à la Figure E-3. Des triangles noirs ont été ajoutés afin de montrer les instants où le MP1 est supérieur à la valeur-seuil. Ces derniers se trouvent bien dans les zones montrées par les flèches rouges de la première figure.

Cette valeur-seuil a été déterminée à 0.4 mètres puisqu'en dessous de ce seuil, il est encore possible que la valeur de MP1 soit différente de 0 à cause de la présence de bruit de mesure, de délais hardwares et de résidus de l'ambiguïté initiale. Lorsqu'on passe ce seuil, il n'y a quasiment plus aucun doute sur la présence de multi trajet.

2. Extraction du multi trajet

Premièrement, avant de mettre en place l'extraction du multi trajet, il est nécessaire de se demander en fonction de quels paramètres modéliser le SNR. En effet, la modélisation peut se faire en fonction de l'élévation, du temps...

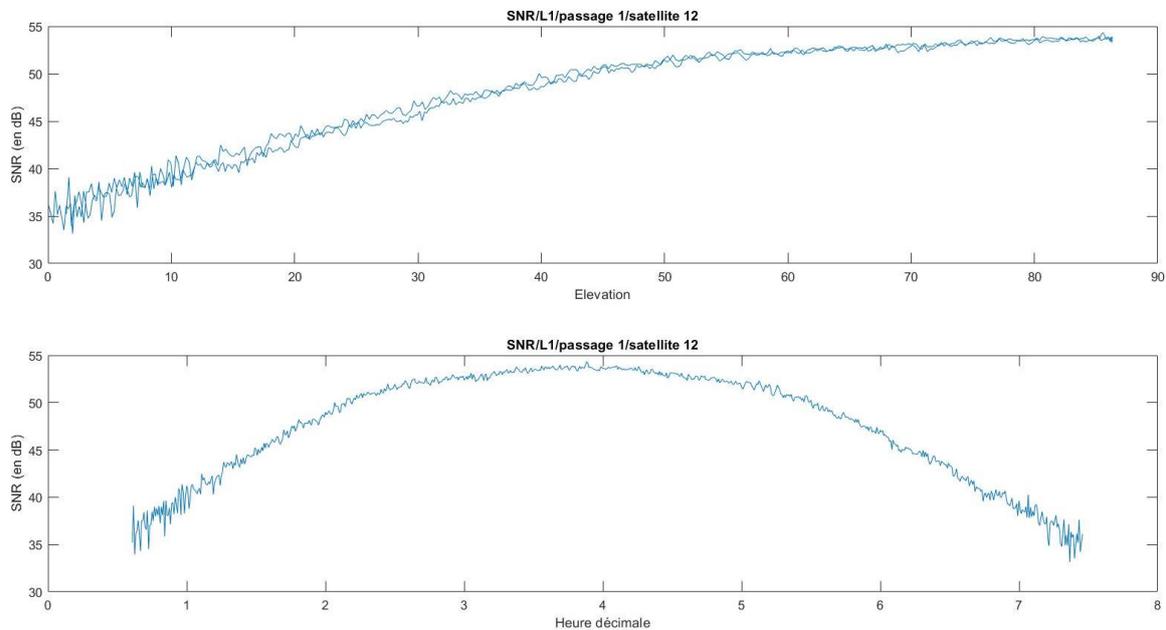


Figure E-6 : SNR en fonction de l'élévation et en fonction du temps

La partie supérieure de la Figure E-6 représente le SNR en fonction de l'élévation. Cette fonction pourrait être modélisée par une exponentielle négative où les différents facteurs peuvent être ajustés par moindres carrés. Le multi trajet étant présent lorsque le satellite se trouve à de faibles élévations, la fonction représentant le SNR lié au signal direct doit s'ajuster parfaitement quand le satellite possède une haute élévation. Comme la montée et la descente du satellite ne se superposent pas parfaitement, l'ajustement ne retire pas que le SNR dû au signal direct. De plus, différents tests ont été faits et les moindres carrés s'ajustent rarement bien grâce à ce type de fonction.

La partie inférieure du graphique représente le SNR en fonction du temps. Un polynôme permet d'assez bien modéliser le SNR lié au signal direct. En effet, cette méthode a déjà été utilisée précédemment (voir point B.2). De plus, Larson K.M. affirme que les autres méthodes mises en place afin d'extraire le multi trajet ne permettent pas d'obtenir de meilleurs résultats. Les différents coefficients de ce polynôme sont calculés pour chaque passage de chaque satellite par la méthode des moindres carrés qui permet l'ajustement d'une fonction en minimisant la somme des carrés des résidus.

Puisque la méthode d'ajustement a été déterminée, il ne reste plus qu'à choisir le degré du polynôme utilisé pour modéliser le SNR produit par le signal direct. Dans la littérature, les polynômes implémentés ont toujours un faible degré. En effet, si le degré de ce dernier est trop important, il risquerait de s'ajuster avec le multi trajet présent dans le SNR. Des polynômes de degrés 3, 4 et 5 ont été testés sur les différents sets de données afin de déterminer le type de fonction à utiliser.

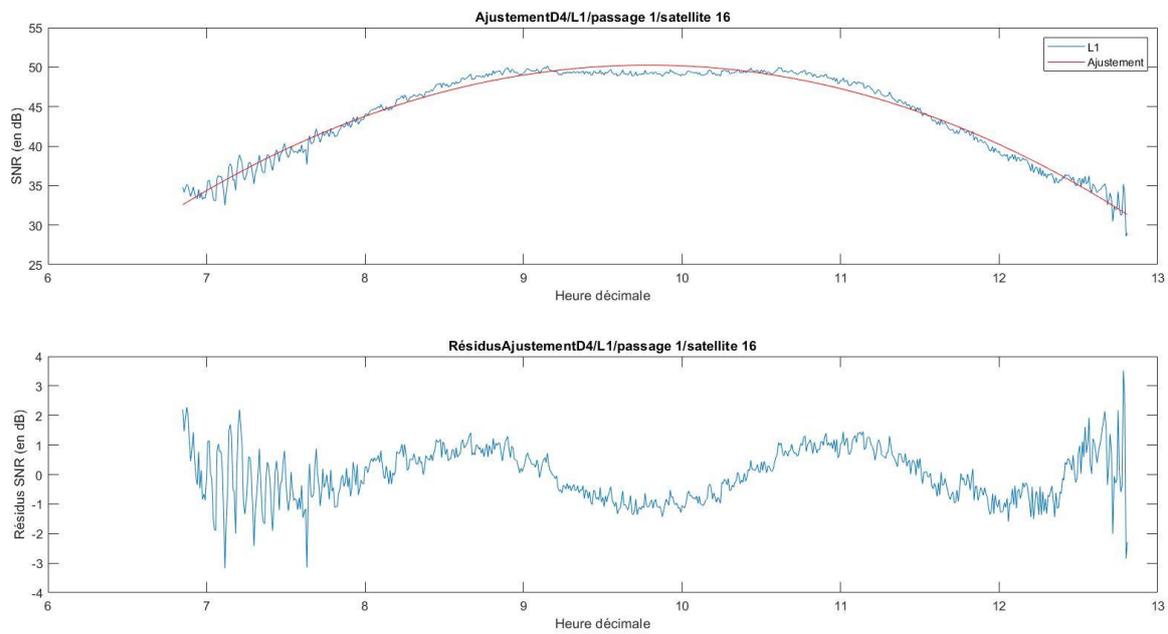


Figure E-7 : Ajustement d'un polynôme de degré 4

Sur la partie inférieure de la Figure E-7, trois oscillations ayant une basse fréquence sont présentes dans les résidus du SNR. En effet, lors de l'extraction du multi trajet, le polynôme de degré 4 n'a pas un degré suffisant afin de s'ajuster avec la forme que prennent les valeurs de SNR au cours du temps dans ce cas. Néanmoins, ce degré convient parfaitement pour les résidus du SNR obtenus pour d'autres satellites. Ces oscillations pourraient également être dues au multi trajet causé par un objet lointain, mais lorsqu'on analyse la partie supérieure de la figure, on se rend compte que celles-ci sont causées par le mauvais ajustement du polynôme afin d'extraire le multi trajet. Comme expliqué précédemment, les ajustements avec des polynômes de degrés 3 et 5 ont également été implémentés. Sur la Figure E-8, les résultats des résidus créés par les différents polynômes sont comparés et peu importe le degré, ils sont les mêmes. Puisqu'en ajoutant uniquement un degré au polynôme, les résidus ne changent pas, l'ajustement se fera grâce au polynôme de degré 4.

Tout d'abord, le multi trajet est surtout présent à faible élévation et, donc, au début et à la fin de ce graphique où les oscillations sont moins présentes et surtout d'une amplitude moins importante que celles causées par le multi trajet. Ensuite, puisque ce phénomène a été mis en évidence, les passages des satellites utilisés dans la suite de ce travail seront ceux pour lesquels ces oscillations dues au degré du polynôme ne sont pas présentes ou presque pas. En effet, la Figure E-7 reprend un cas assez extrême, mais qu'il était nécessaire de montrer, et la plupart des passages des satellites obtiennent un ajustement assez efficace avec un polynôme de degré 4. Puisque le même degré a été choisi pour chaque cas afin d'extraire le multi trajet, si un degré trop important est sélectionné, il se pourrait que l'ajustement se confonde avec le multi trajet pour les graphiques avec une forme plus simple pour lesquelles le polynôme de degré 4 convient.

L'ajustement afin d'extraire le multi trajet ayant un impact sur la suite de ce travail, il est nécessaire d'en être conscient et de se demander si les résultats ne seraient pas complètement différents avec une autre modélisation de départ.

À ce stade du travail, avec ces informations supplémentaires, il est intéressant de se demander si le déphasage présent à la Figure D-4 n'est pas simplement dû à l'ajustement qui serait différent pour les trois jours. Cette idée sera développée par la suite.

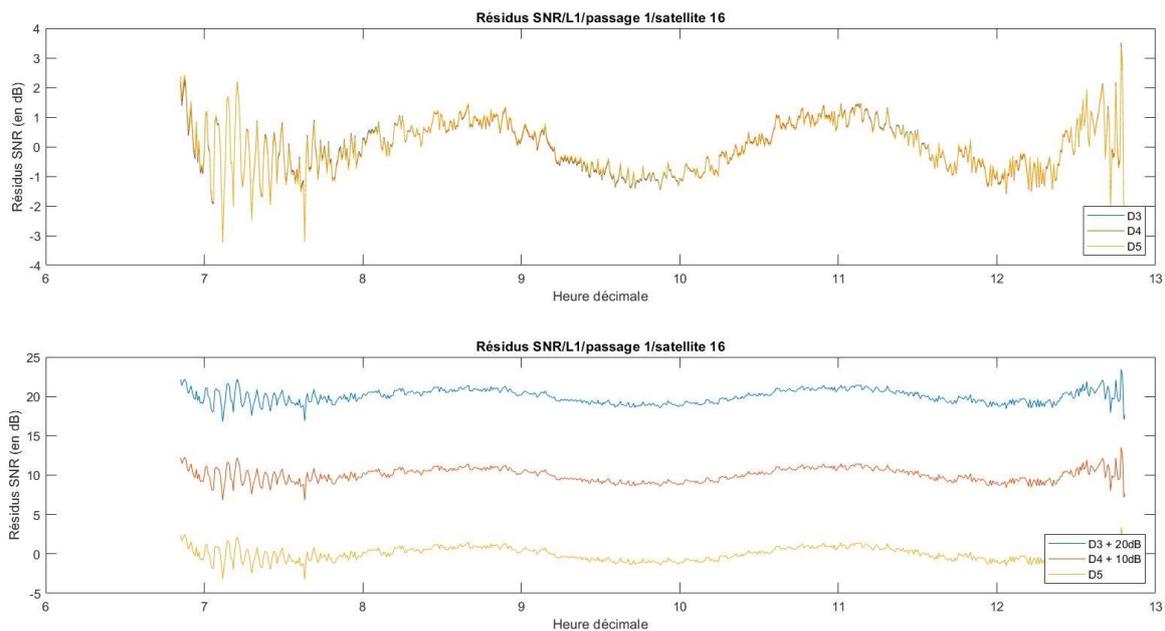


Figure E-8 : Comparaison des résidus SNR en fonction du degré du polynôme permettant l'extraction du multi trajet

Sur la Figure D-2, l'ajustement de degré 4 correspondait assez bien à la forme des valeurs du SNR en fonction du temps du premier passage du satellite 2 pour le 219^{ème} jour de l'année 2019. Dès lors, on peut se demander comment varient ces résidus selon le degré de l'ajustement parce que celui du degré 4 semblait efficace. La Figure E-9 montre que les résidus pour les ajustements de degré 4 et 5 sont égaux et que ceux obtenus après la modélisation d'un polynôme de degré 3 contiennent une petite oscillation. En effet, les résidus obtenus avec le degré 3 passent au-dessus puis en dessous puis de nouveau au-dessus de ceux extraits par les deux autres polynômes. Ce seul exemple ne peut justifier le choix du degré du polynôme, mais, dans la suite de ce travail, les passages de différents satellites seront traités et nous constaterons que le degré 4 convient pour l'extraction des résidus du SNR pour beaucoup de cas.

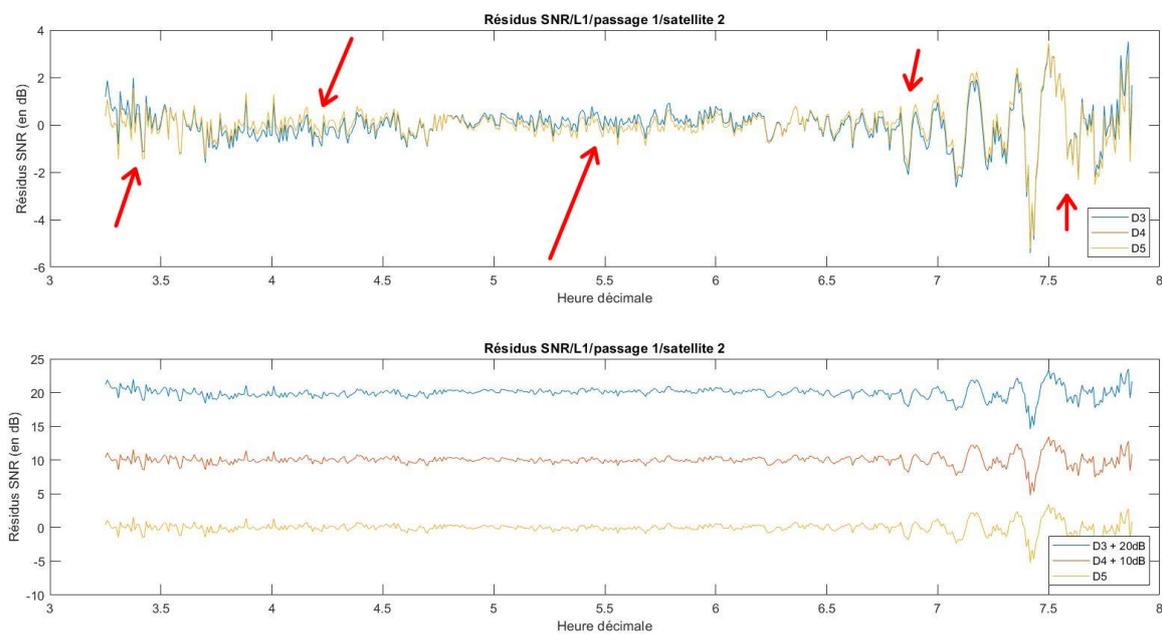


Figure E-9 : Comparaison des résidus SNR en fonction du degré du polynôme permettant l'extraction du multi trajet

3. Comparaison visuelle des résultats

3.1 Le cas du 1^{er} passage du satellite 6 durant la période d'août 2019

Au point D.5, sur la Figure D-4, on pouvait voir un déphasage ainsi qu'une variation de l'amplitude du jour 221 par rapport aux résidus des deux autres jours qui semblaient se comporter de façon assez similaire. Ce déphasage n'est en aucun cas causé par le fait qu'un jour sidéral ne possède pas une durée de 24h. En effet, la différence entre un jour sidéral et un jour de temps UTC a été prise en compte et les données sont toutes calées sur le début du lever du J219. Ensuite, l'hypothèse que ce dernier pouvait être dû à l'extraction du multi trajet plutôt qu'à un quelconque changement dans les propriétés de la surface réfléchissante avait été émise. Analyser le SNR avant que sa partie due au multi trajet soit extraite permet de déterminer si cette hypothèse est exacte ou non.

La Figure E-10 montre que ce déphasage et cette variation d'amplitude existent déjà dans le SNR contenant le signal direct et le signal indirect. Par conséquent, l'ajustement influence sûrement la différence entre les résidus SNR des trois jours puisqu'il se fait sur des jeux de données qui ne sont pas identiques et est supposé s'ajuster au mieux sur chaque, mais il ne crée pas le déphasage visible à la Figure D-4.

L'étape suivante concernant l'analyse de ce phénomène est de mettre en avant les moments où le multi trajet est présent pour le trajet de ce satellite grâce à la combinaison MP1 (puisque l'on travaille sur le SNR lié à l'onde porteuse de fréquence f_1) ainsi qu'au comportement des résidus de ces mêmes jours pour l'autre antenne.

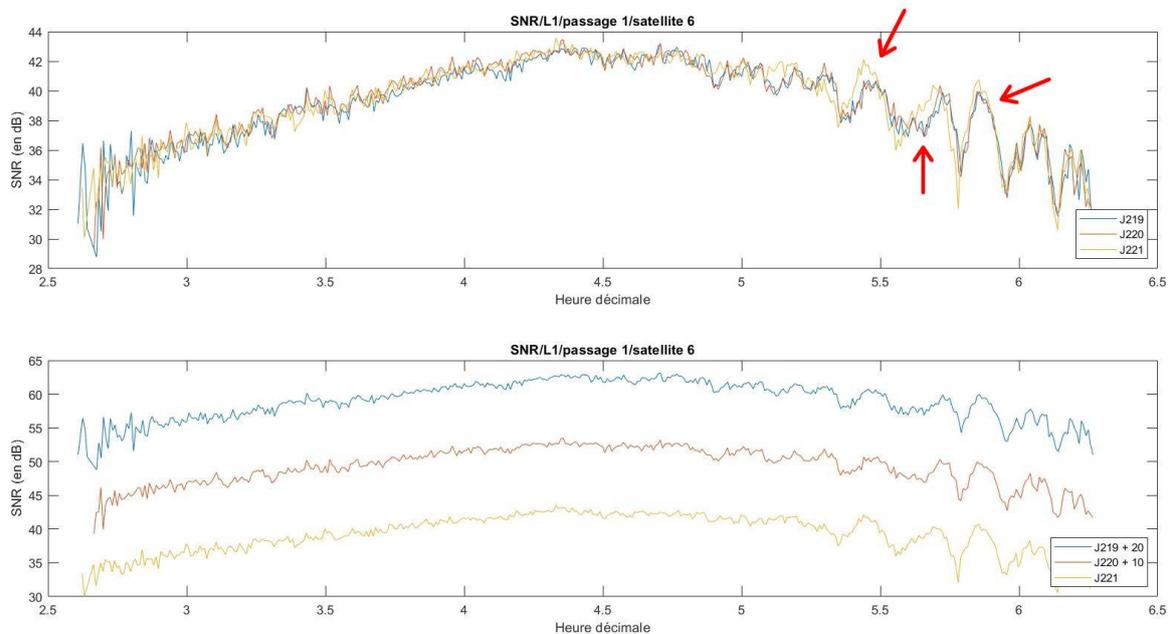


Figure E-10 : Comparaison SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 6 pour son 1^{er} passage sur ULGO

Comme le montre la Figure E-11, un déphasage ainsi qu'une amplitude plus grande pour les résidus du J221 par rapport aux deux autres jours sont également présents sur les données reçues par l'antenne ULG1, mais le multi trajet ne se comporte pas de la même façon. Il est donc possible de détecter les périodes comprenant du multi trajet et celles qui n'en contiennent pas. La deuxième manière de mettre en évidence ce multi trajet est de calculer les valeurs de la combinaison MP1 comme cela est fait à la Figure E-12.

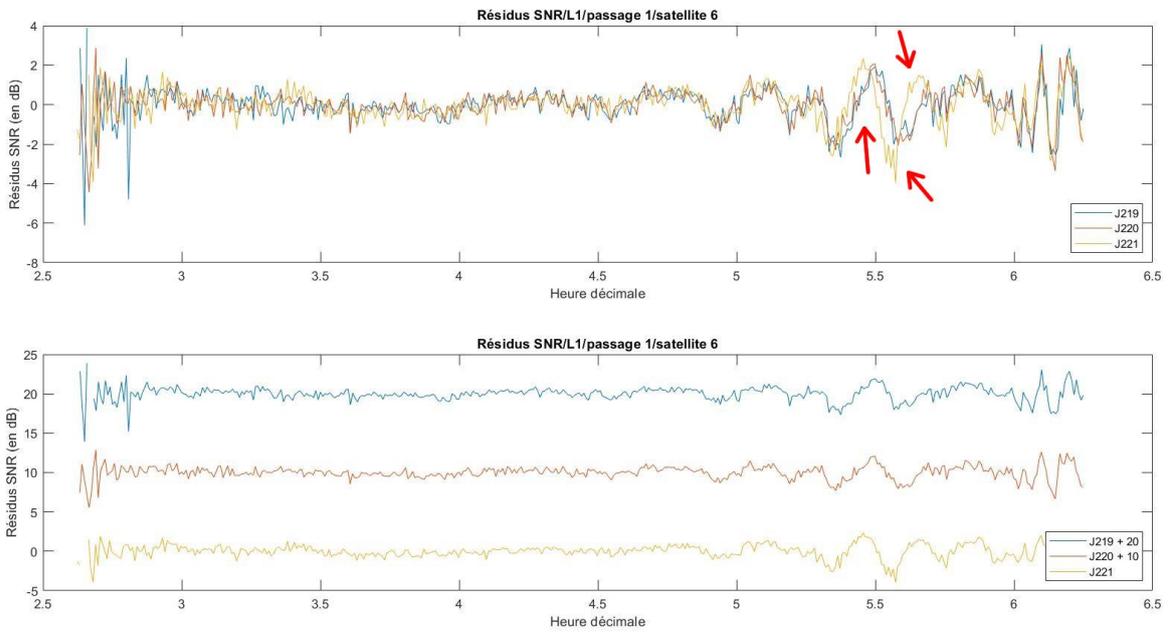


Figure E-11 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 6 pour son 1^{er} passage pour ULG1

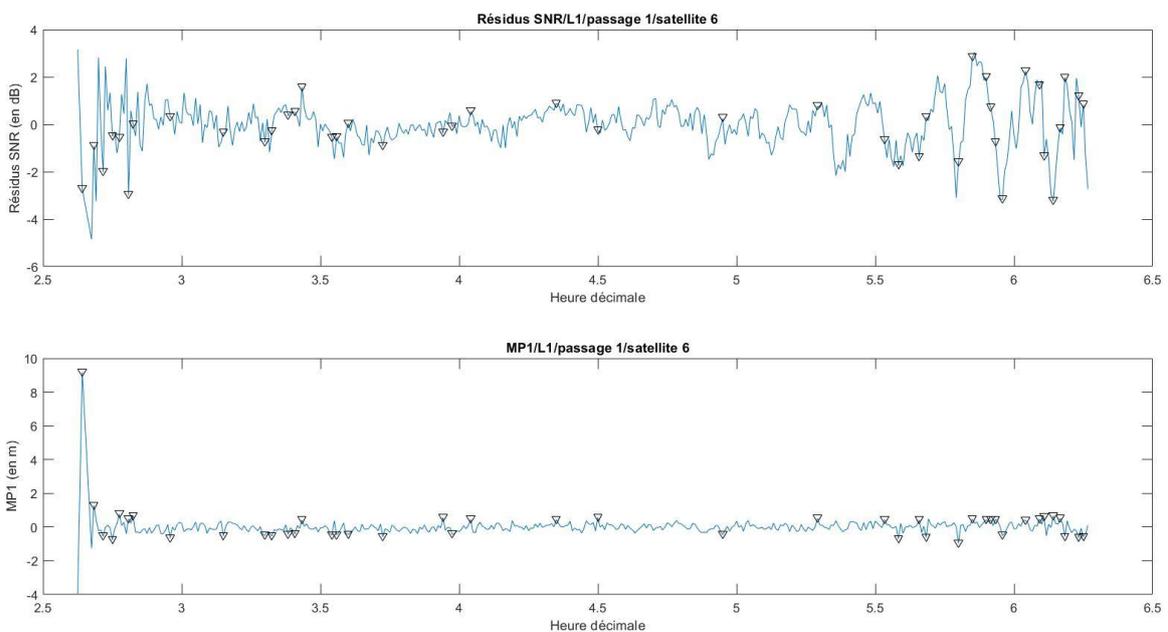


Figure E-12 : Mise en avant du multi trajet des résidus du SNR sur L1 grâce à la combinaison MP1 et à la détermination d'un seuil l'antenne ULGO pour le J219

Grâce à toutes ces figures ainsi qu'à la Figure E-13, on se rend compte que le multi trajet est principalement présent avant 3h ainsi qu'après 5h pour les deux récepteurs. Les oscillations présentes entre ces deux heures peuvent provenir de l'ajustement du polynôme comme expliqué précédemment. Nous pensons toutefois qu'elles sont plutôt causées par le bruit des mesures, les délais hardware étant très faibles avec les récepteurs géodésiques. La présence de ces oscillations ne pose pas de problème dans ce cas-ci puisque l'analyse portera principalement sur le déphasage présent après 5h. Ainsi, des valeurs numériques de fréquence, amplitude et hauteur de réflexion seront présentées dans le point E.4.

La Figure E-13 reprend les résidus du SNR pour un même jour pour les deux antennes. La comparaison entre ces résidus permet de mettre en évidence les périodes contenant du multi trajet parce que l'impact du multi trajet est différent pour les deux récepteurs.

Dans ce travail, la combinaison MP1 n'est jamais utilisée afin de quantifier le multi trajet, mais pour détecter les périodes durant lesquelles il a un impact sur le SNR.

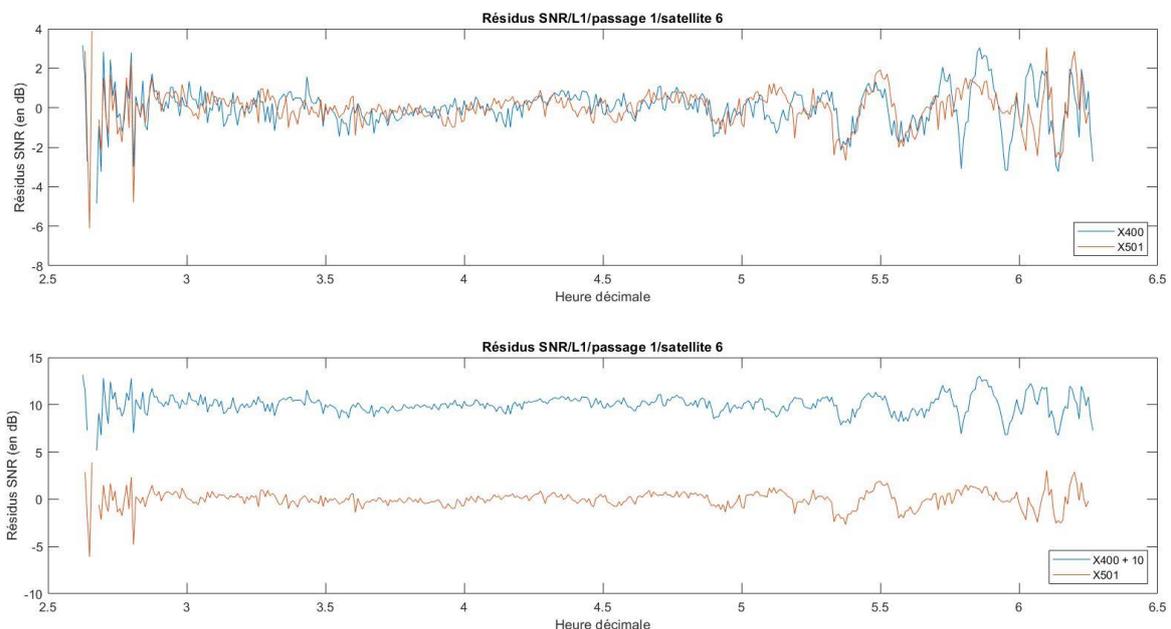


Figure E-13 : Comparaison des résidus SNR pour le J219 sur L1 pour les deux antennes

Sur la Figure E-14, un déphasage est également présent et le multi trajet présent pour le J222 est très différent de celui qui correspond aux J221 et J223. Pourtant, le J221 était déjà déphasé par rapport aux J219 et J220 et est en avance par rapport aux deux autres. En ce qui concerne le J222, il est en retard dans le temps par rapport aux deux autres jours. Il pourrait donc correspondre avec les J219 et J220 (voir Figure I-4 en annexe). En plus de ce déphasage, on peut voir que l'amplitude du J222 est inférieure à celles des deux autres jours.

Comme expliqué dans la partie théorique, la variation de l'amplitude d'un jour à l'autre montre des changements dans les propriétés du sol. C'est la raison pour laquelle, au point suivant, l'amplitude sera calculée afin de mettre en évidence l'importance des modifications entre chaque jour en fonction de l'humidité. De plus, la hauteur de réflexion sera également calculée afin de confirmer l'objet réfléchissant et de constater si cet objet est seulement sensible au fait d'être mouillé ou non, ou si la quantité des précipitations a également un impact.

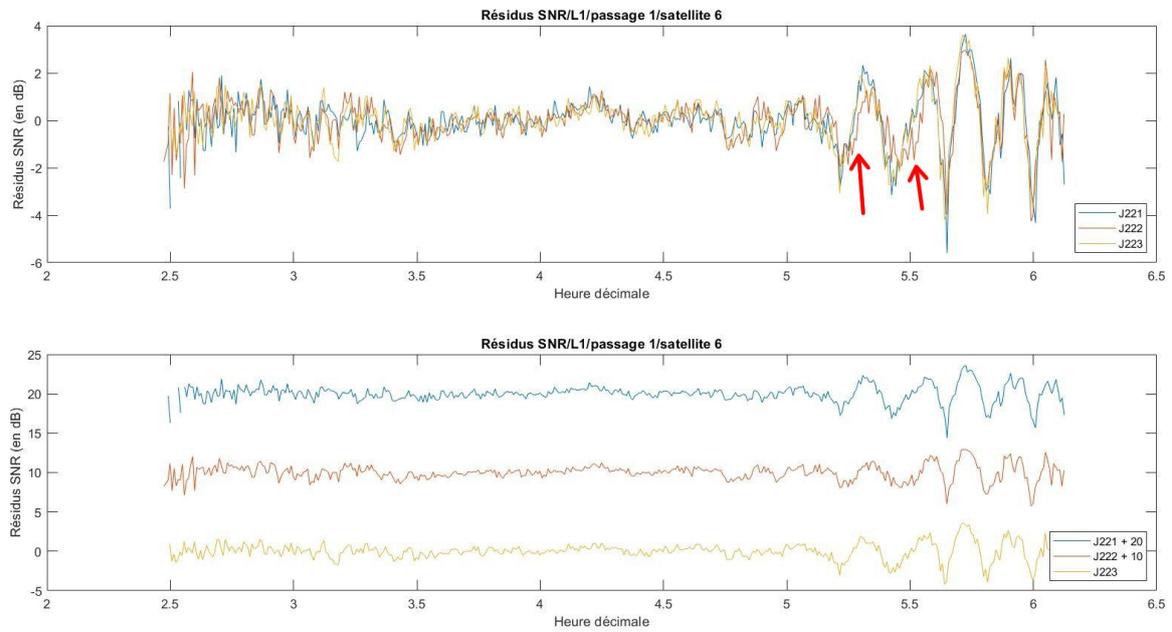


Figure E-14 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J221-J222-J223 du satellite 6 pour son 1^{er} passage pour ULGO

Dans les données utilisées précédemment, J219 à J223, un changement d'humidité était présent. En effet, il y avait des précipitations durant cette période et elles variaient en fonction des jours (voir Tableau D-1). À ce stade du travail, on constate que ce changement d'humidité a un impact. Il existe effectivement un déphasage ainsi qu'une variation d'amplitude dans la partie du SNR due au multi trajet. Cependant, on ne sait pas encore comment l'humidité impacte le multi trajet, sur quelle composante ni avec quelle importance.

Sur la Figure E-15 qui reprend les J234 à J236, on constate qu'il n'existe ni déphasage ni variation d'amplitude au cours des jours. Premièrement, le multi trajet est présent après 4h et plus après 5h. Puisque le trajet d'un satellite se reproduit après un jour sidéral et que la durée de ce jour est inférieure à 24h, les heures décimales ne sont en effet pas les mêmes que pour les jours du début du mois. Ensuite, ces trois jours ainsi que le précédent étaient secs. Dès lors, l'humidité est sensée ne pas influencer la forme que prend le multi trajet et l'exemple ci-dessous confirme cette hypothèse.

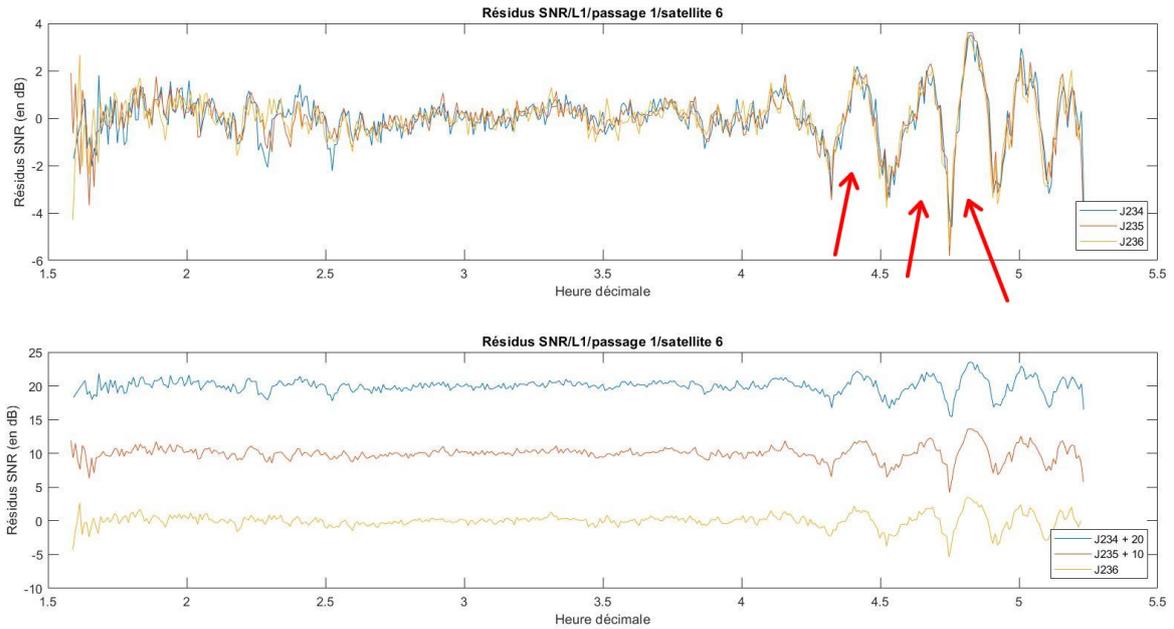


Figure E-15 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J234-J235-J236 du satellite 6 pour son 1^{er} passage pour ULGO

La Figure E-16 reprend l'élévation et l'azimut du satellite tout au long de son 1^{er} passage pour le J219. Ainsi, les paires intéressantes sont d'environ 20° à 40° d'azimut et 5° à 20° d'élévation. Lorsque ces paires sont replacées sur la Figure E-1, on se rend compte qu'on se trouve dans les valeurs du hotspot 1. Les paires sont les mêmes pour la deuxième antenne et sont représentées sur la Figure I-5.

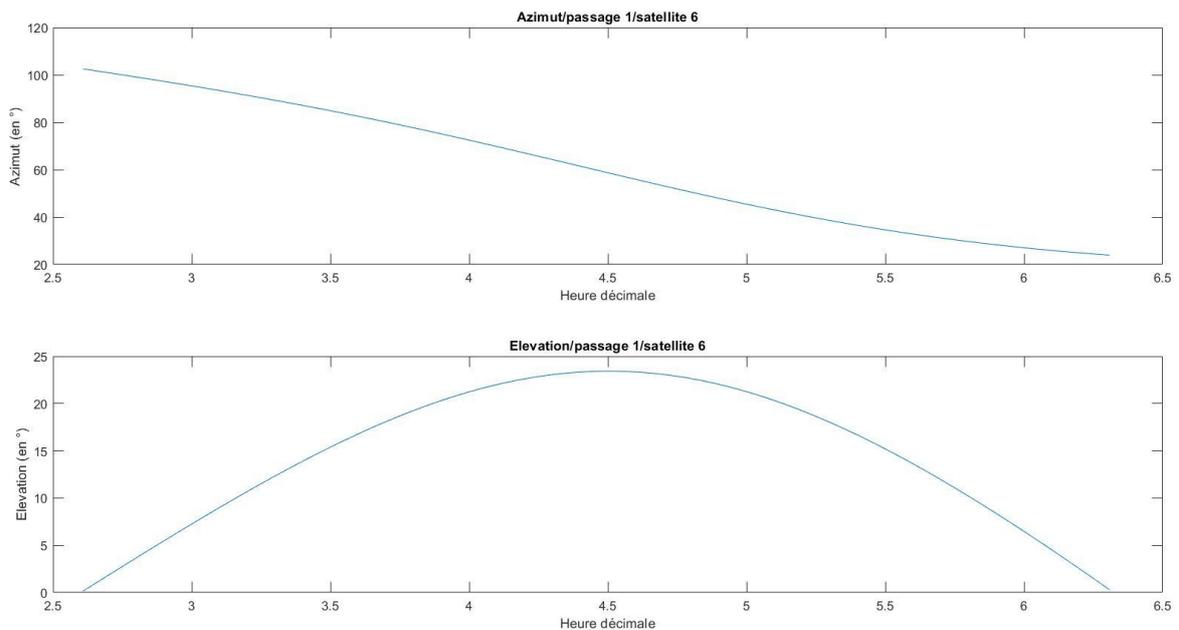


Figure E-16 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULGO du satellite 6 durant son 1^{er} passage pour le J219

Dans le point B.1.4, il a été développé que plus la longueur d'onde de l'onde porteuse était grande plus la fréquence du multi trajet était petite. Cela se confirme, grâce au Tableau B-1, on sait que $\lambda_{L1} < \lambda_{L2} < \lambda_{L5}$ (onde porteuse). Sur la Figure E-17, on constate que $f_{L1} > f_{L2} > f_{L5}$ (multi trajet).

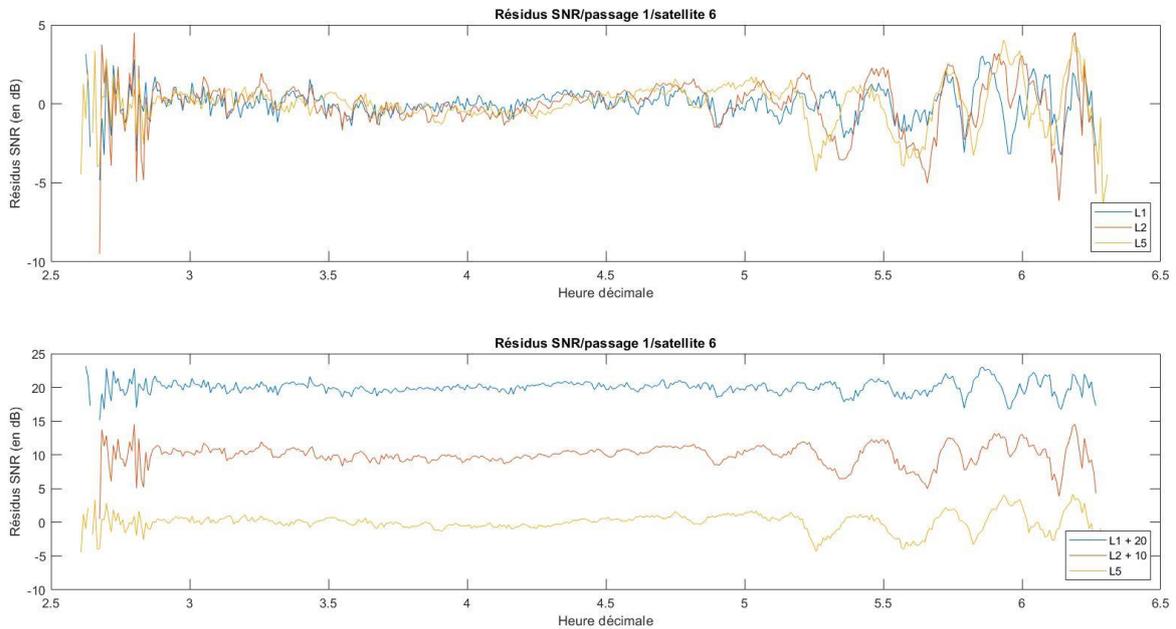


Figure E-17 : Comparaison des résidus SNR du J219 en fonction de la fréquence L1/L2/L5

3.2 Le cas du 1^{er} passage du satellite 14 durant la période d'août 2019

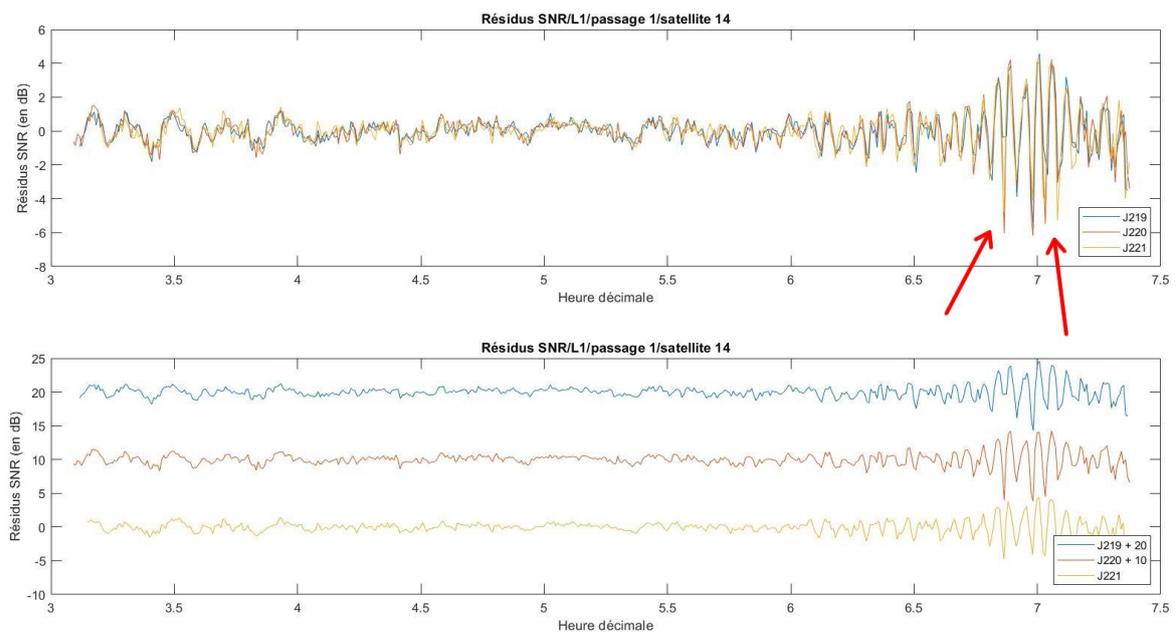


Figure E-18 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 14 pour son 1^{er} passage pour ULGO

Pour ce satellite, aucun déphasage n'est visible peu importe l'antenne pour laquelle les données ont été enregistrées. En revanche, du multi trajet est présent. En effet, si les données reçues des deux récepteurs sont comparées, on peut voir que les données pour ULG0 débutent un peu après 3h et celles de la deuxième antenne débutent un peu avant 3h, ce qui est sans doute dû au fait que le premier ne « voit » pas le satellite dès son lever. Ensuite, une fréquence et une amplitude plus grandes sont présentes entre 3h et 4h pour ULG1 ainsi qu'après 6h pour les deux récepteurs. Puisqu'elles sont différentes pour les deux récepteurs, cela prouve que du multi trajet est présent.

La Figure E-18 montre des variations dans l'amplitude du multi trajet vers 7h.

Sur la Figure E-19, des changements dans l'amplitude des résidus du SNR lié au le multi trajet sont présents avant 4h. Ces derniers montrent une amplitude plus importante pour le J221 par rapport à l'amplitude des deux autres jours présents sur le graphique comme cela est le cas pour le satellite 6. Dans cette situation, il n'existe pas de déphasage.

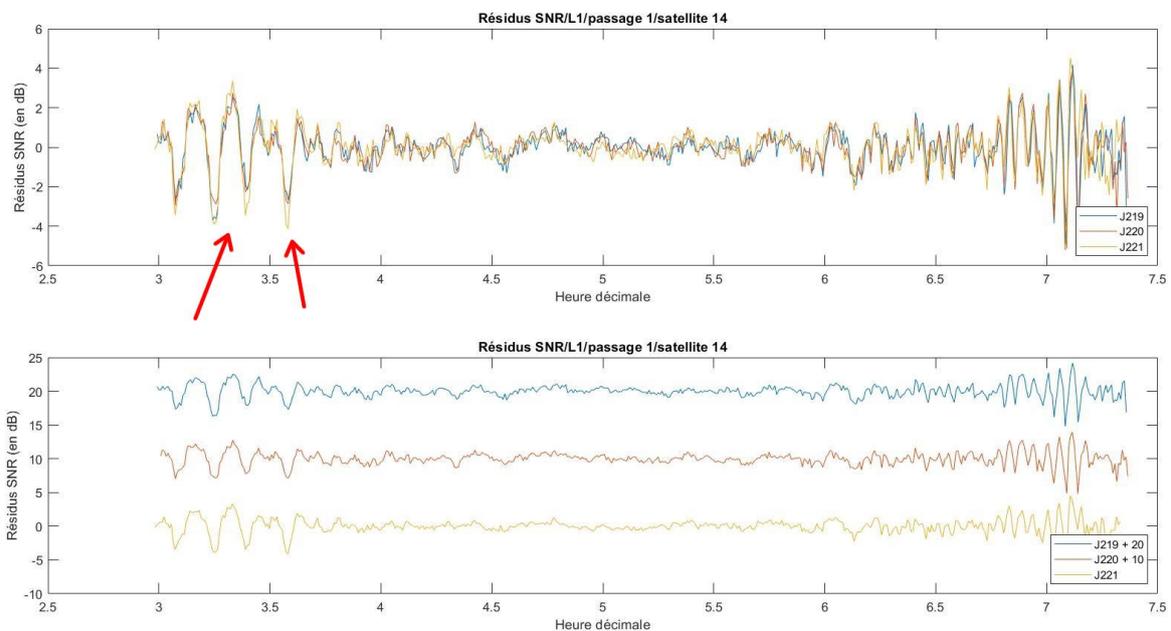


Figure E-19 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 14 pour son 1^{er} passage pour ULG1

De même que pour le satellite 6, sur la Figure E-20, l'amplitude du multi trajet du J222 est différente de celle des J221 et J223. La Figure E-21 montre que de la même façon que pour le satellite 6, les résidus du SNR du J222 se comportent de manière similaire à ceux des J219 et J220.

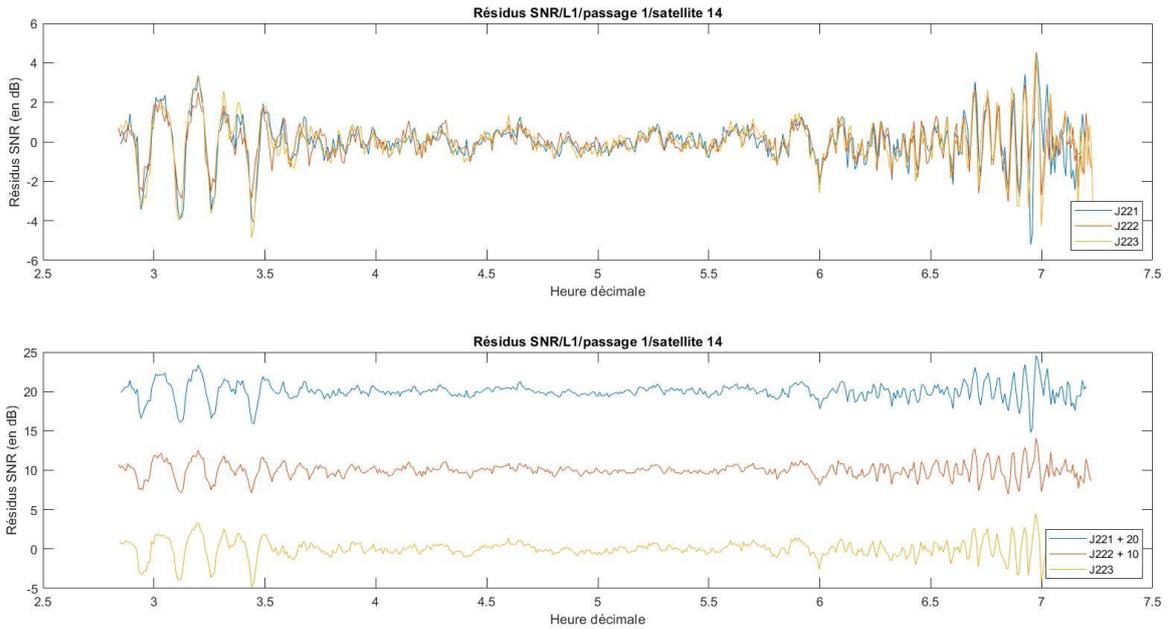


Figure E-20 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J221-J222-J223 du satellite 14 pour son 1^{er} passage pour ULG1

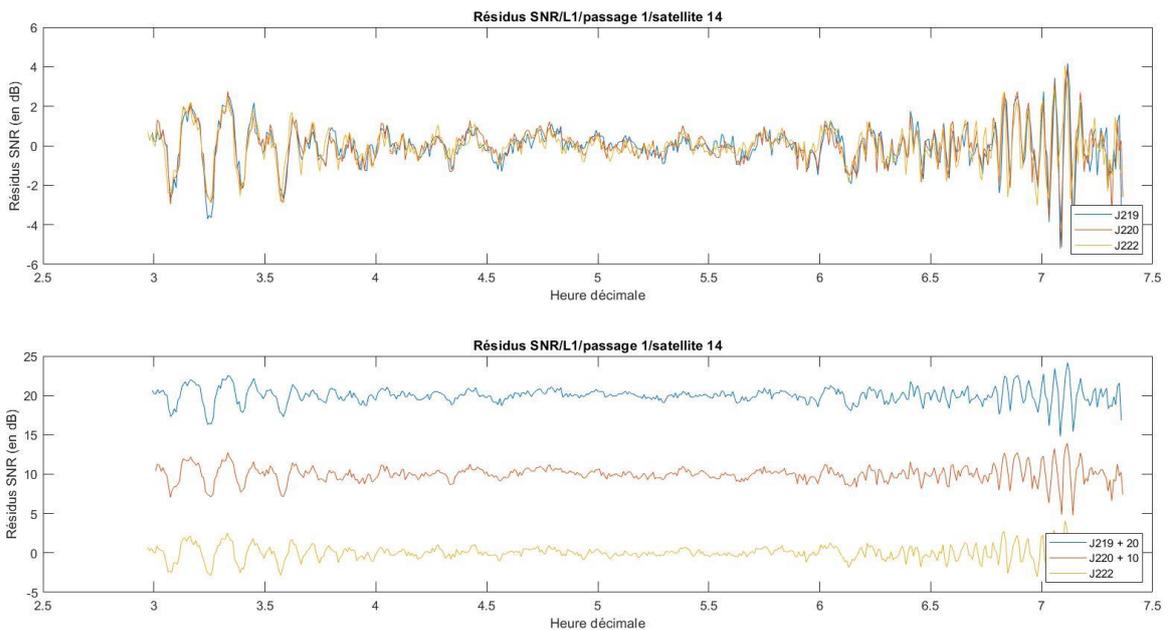


Figure E-21 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J222 du satellite 14 pour son 1^{er} passage pour ULG1

Comme le montre la Figure E-22, le multi trajet a lieu à un azimut de 330° à 310° et à une élévation de 5° à 25° environ. Il ne faut pas oublier que la fréquence du multi trajet dépend de la distance entre l'objet réfléchi et l'antenne : plus l'objet est proche plus la période est grande et la fréquence faible. Par conséquent, l'objet réfléchissant provoquant le multi trajet avant 4h est plus proche que celui causant le multi trajet aux alentours de 7h.

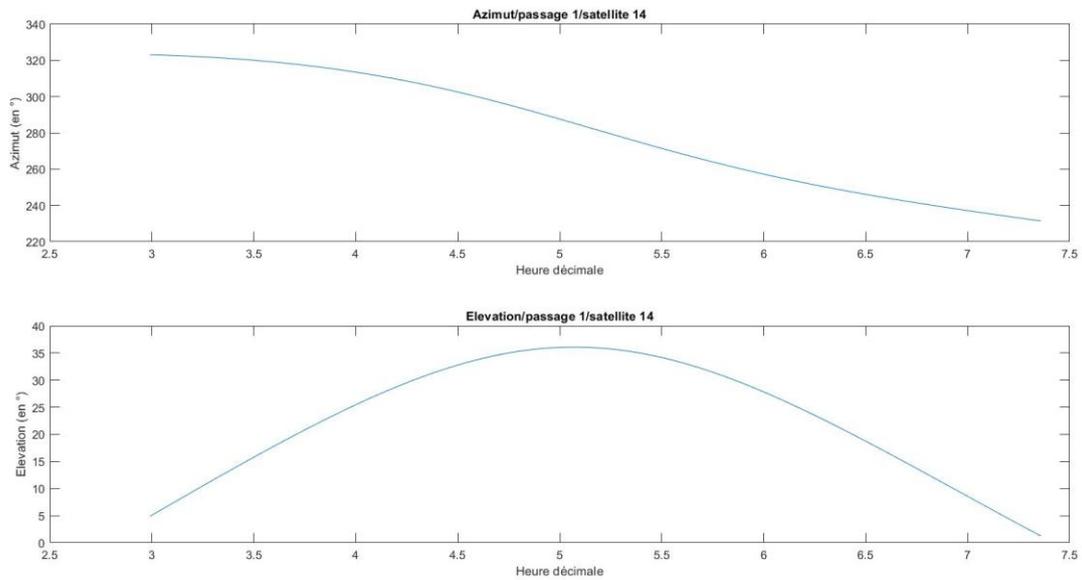


Figure E-22 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 14 durant son 1^{er} passage pour le J219

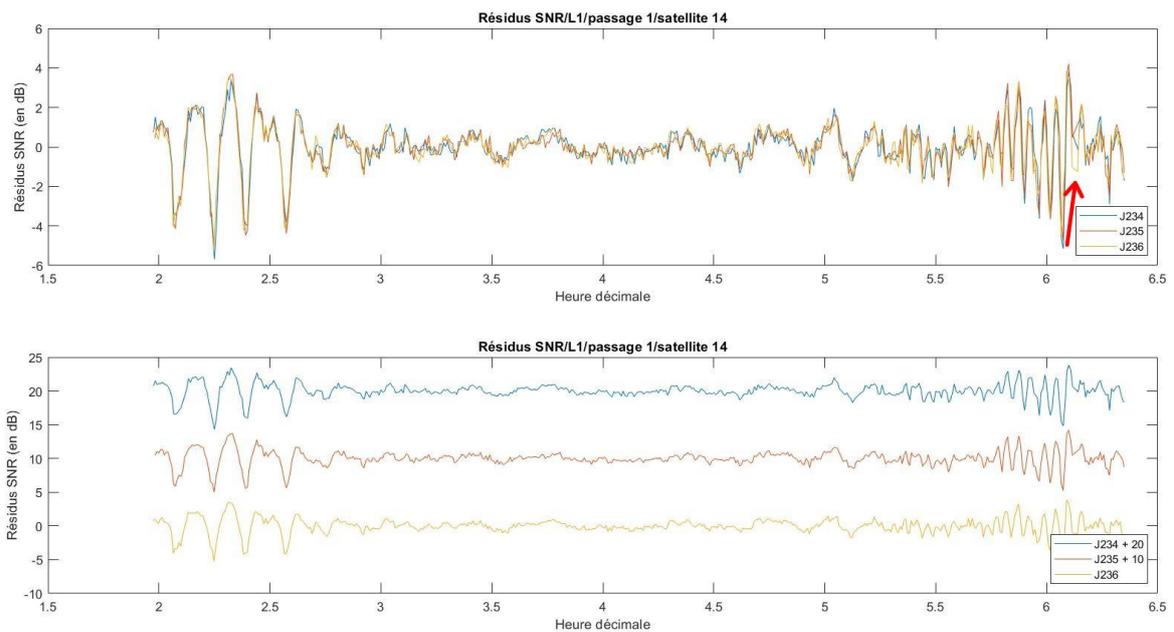


Figure E-23 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J234-J235-J236 du satellite 14 pour son 1^{er} passage pour ULG1

Comme pour le cas du satellite 6, lorsque les trois jours secs sont comparés sur la Figure E-23, ils se comportent presque exactement de la même façon. Il existe seulement une oscillation différente pour les trois jours et comme elle se trouve à la fin du trajet du satellite, elle a lieu à faible élévation. Il est donc possible qu'une autre erreur ait un rôle.

3.3 Le cas du 1^{er} passage du satellite 10 durant la période d'août 2019

En ce qui concerne le multi trajet présent lors du passage du satellite 10, pour le récepteur X400, l'amplitude des résidus du SNR du J221 est plus importante que celle des J219 et J220 de la même façon que pour les deux cas précédents. Cela est visible sur la Figure E-24. Pour l'autre récepteur, cela est également vrai, mais en plus, il existe un déphasage montré par la Figure E-25 comme c'était le cas pour le satellite 6.

La Figure E-26 et la Figure I-6 montrent que ce comportement a lieu pour un azimut de 340° à 320° et une élévation de 5° à 10° comme pour le satellite 14.

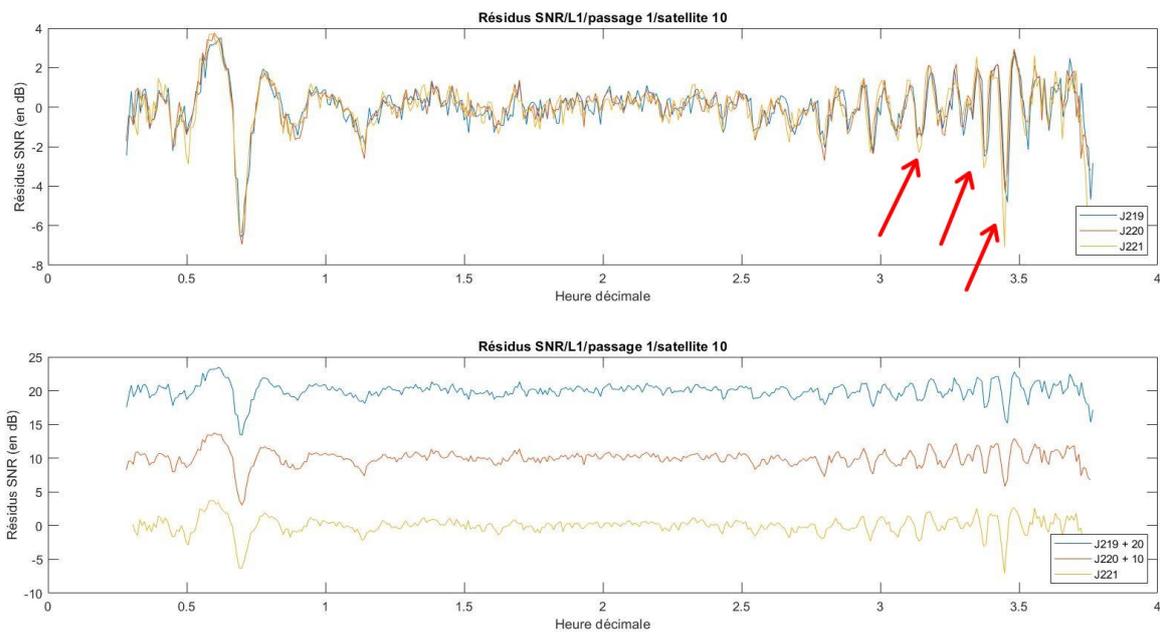


Figure E-24 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 10 pour son 1^{er} passage pour ULGO

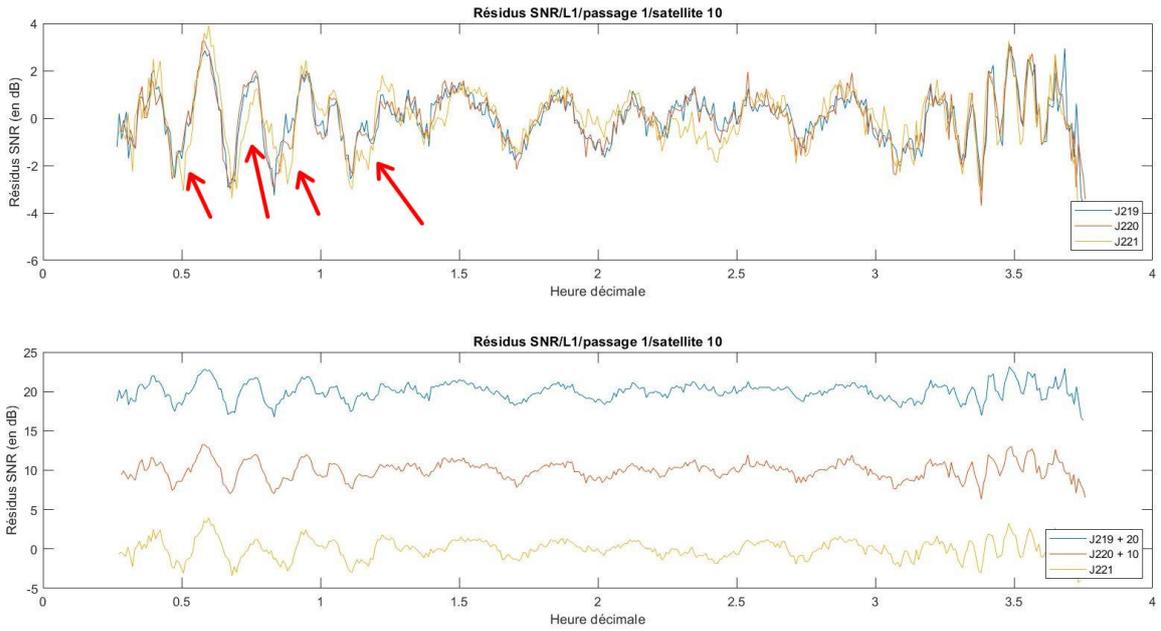


Figure E-25 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 10 pour son 1^{er} passage pour ULG1

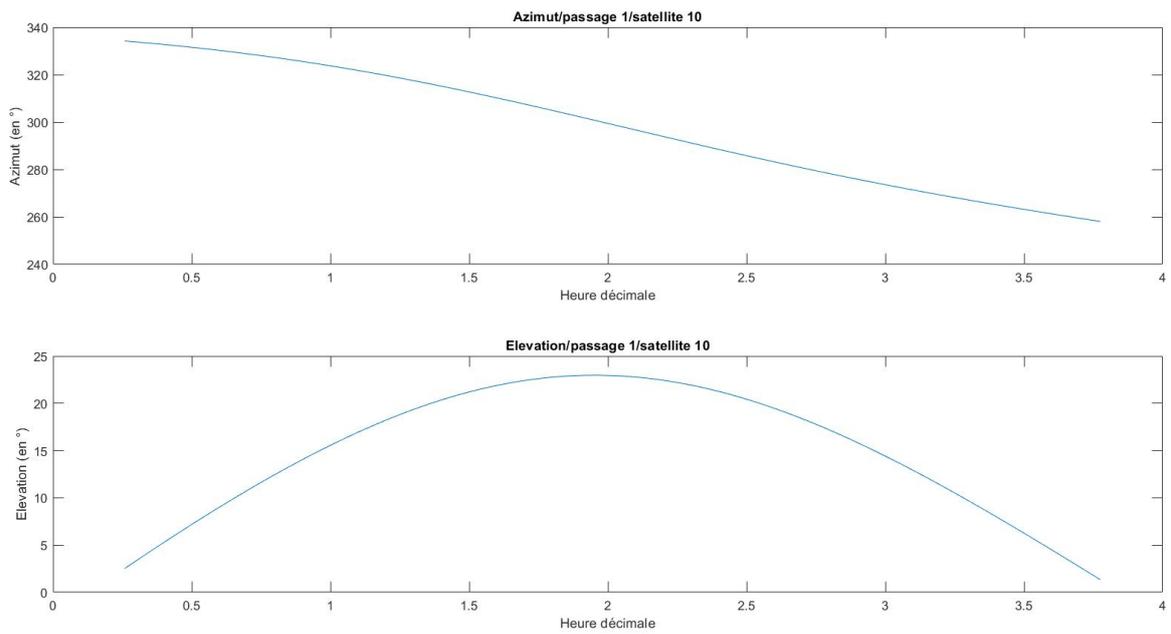


Figure E-26 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULGO du satellite 10 durant son 1^{er} passage pour le J219

3.4 Le cas du 1^{er} passage du satellite 19 durant la période de début février 2020

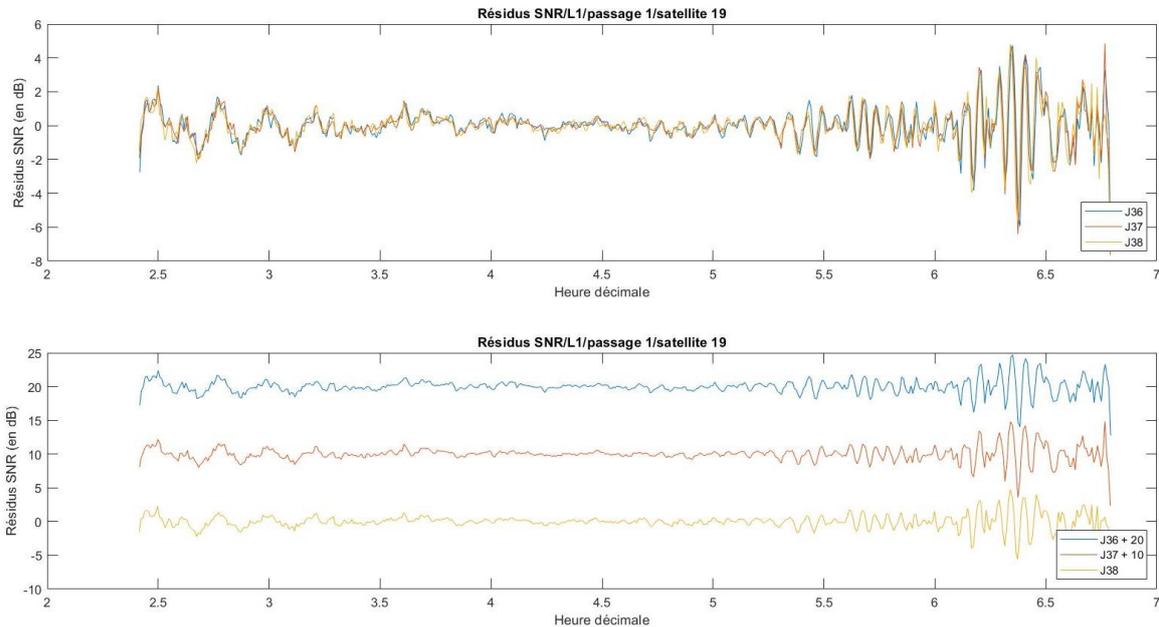


Figure E-27 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J36-J37-J38 du satellite 19 pour son 1^{er} passage pour ULGO

Ce set de données est utilisé afin de mieux comprendre le comportement de la partie du SNR causée par le multi trajet. En effet, dans les points précédents, on a vu que ces oscillations variaient en fonction des jours. Le but d'étendre les données est de trouver une relation entre la météo et ces modifications. Une tendance générale a été remarquée pour le set de données du mois d'août. Dès lors, l'analyse de cette période-ci permettra de confirmer ou de créer de nouvelles questions concernant cette relation. Effectivement, pour les données du mois d'août, les SNR liés au multi trajet des J221 et J223 possèdent une amplitude supérieure à celles des J219, J220 et J222. De plus, on peut voir un déphasage (en avance) des résidus de ces deux mêmes jours par rapport à ceux des trois autres jours. On a également constaté que lorsqu'il n'y avait pas de précipitation entre différents jours (J234, J235 et J236), les résidus étaient presque parfaitement identiques.

Comme pour chaque cas, les résidus ont été extraits pour chaque jour à l'aide d'un polynôme de degré 4. Afin d'être certains de la bonne détection du multi trajet, les résidus des deux récepteurs sont comparés. Deux périodes contenant du multi trajet (les périodes aux plus basses élévations) sont détectées.

Les jours étudiés sur la Figure E-27 et la Figure E-28 sont secs selon les informations recensées sur le site d'historique météo (Des Clics Nomades, n.d.). On s'attend donc à ne pas voir de variations dans l'amplitude du multi trajet, ce qui est bien le cas pour la première figure et donc, pour l'antenne ULG0. Par contre, pour la deuxième figure, l'amplitude du J38 est nettement plus importante que les deux autres pour la première période de multi trajet présent pour ce récepteur. Les oscillations de ce jour sont également un peu différentes pour la deuxième période, mais on peut se demander à partir de quelle valeur on peut considérer que l'amplitude change de manière significative. Puisque ce comportement est assez étonnant, le SNR est repris dans la deuxième partie de la figure afin de s'assurer que ce n'est pas l'extraction du multi trajet qui cause cette modification. Effectivement, comme énoncé plus tôt, l'ajustement du polynôme peut influencer les résultats et il ne faut pas l'oublier.

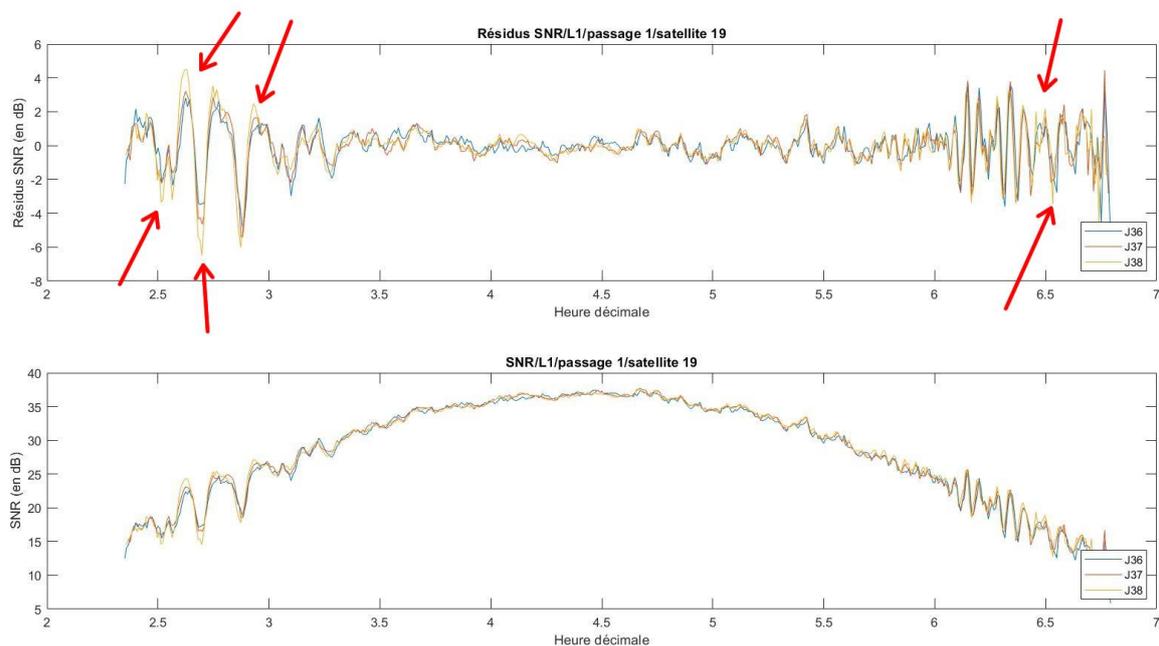


Figure E-28 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J36-J37-J38 du satellite 19 pour son 1^{er} passage pour ULG1

Lors de la période de multi trajet correspondant au lever du satellite (cela n'est pas le cas pour la période aux alentours de 6.5h, pour le coucher du satellite), la Figure E-31 et la Figure I-7 montrent que le satellite se trouve à 320° d'azimut et entre 10° et 20° d'élévation. Dès lors, il se trouve dans une case avec une valeur 2 selon la Figure E-2, ce qui signifie que lorsqu'un satellite se trouve à cet endroit, le multi trajet possède une amplitude plus importante sur l'antenne ULG1 que pour l'antenne ULG0. Il est donc possible que ce soit cette différence qui explique la variation d'amplitude pour le J38 pour une antenne seulement. Un autre phénomène pourrait également causer ce changement, mais avec les données disponibles, nous n'avons pas trouvé d'autre explication.

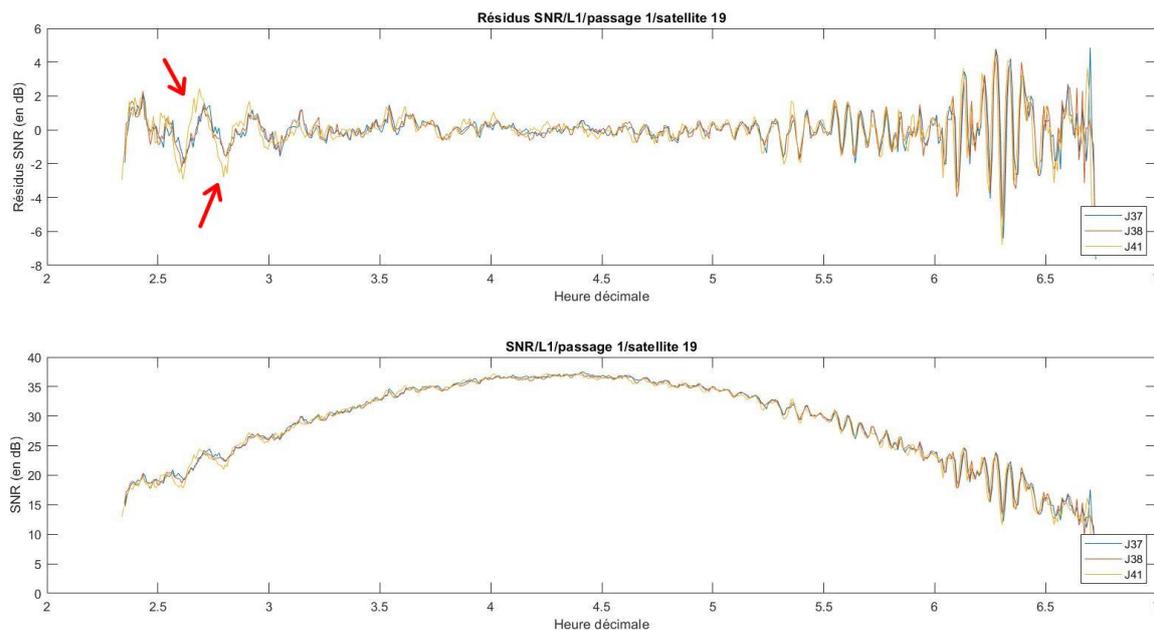


Figure E-29 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J37-J38-J41 du satellite 19 pour son 1^{er} passage pour ULGO

Lors de la comparaison avec les données de l'antenne ULGO des J37, J38 et J41, sur la Figure E-29, un déphasage ainsi qu'une amplitude supérieure sont présents dans la première période de multi trajet entre ce dernier jour et les deux autres comme pour le satellite 6 ou 10.

Toutefois, sur la Figure E-30, lorsque ces trois mêmes jours sont comparés avec les données reçues par l'autre antenne, dans la première période de multi trajet, aux environs de 2.5h, le J38 possède une amplitude supérieure à l'amplitude des deux autres jours. De plus, dans la deuxième partie comprenant du multi trajet, aucune tendance claire n'est présente. Effectivement, certaines oscillations du J41 possèdent une amplitude supérieure à celles des deux autres jours. Ensuite, à certains moments, les résidus du SNR du J38 ont également une amplitude plus importantes que celles des deux autres jours.

Le but de l'analyse de ces données est de se rendre compte que contrairement aux résultats obtenus pour la période d'août 2019, les comportements des résidus des différents jours (amplitude plus importante, déphasage) sont différents selon qu'on étudie les données reçues par une antenne ou par l'autre et que les tendances claires obtenues pour cette première période peuvent également être plus complexes pour d'autres cas comme celui-ci.

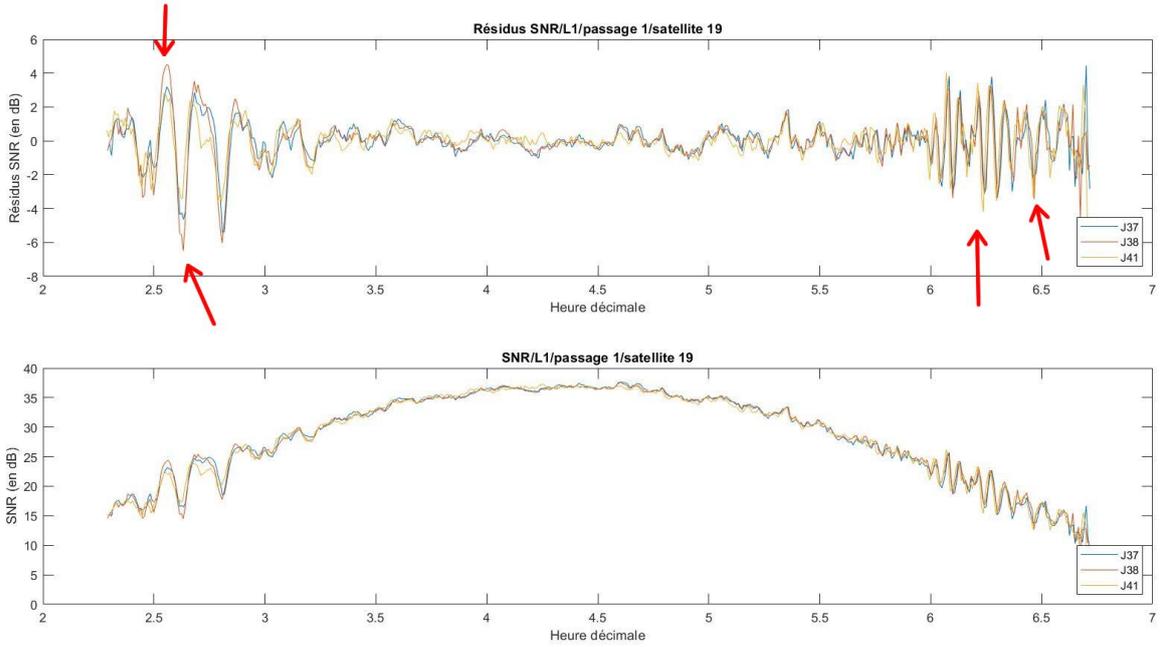


Figure E-30 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J37-J38-J41 du satellite 19 pour son 1^{er} passage pour ULG1

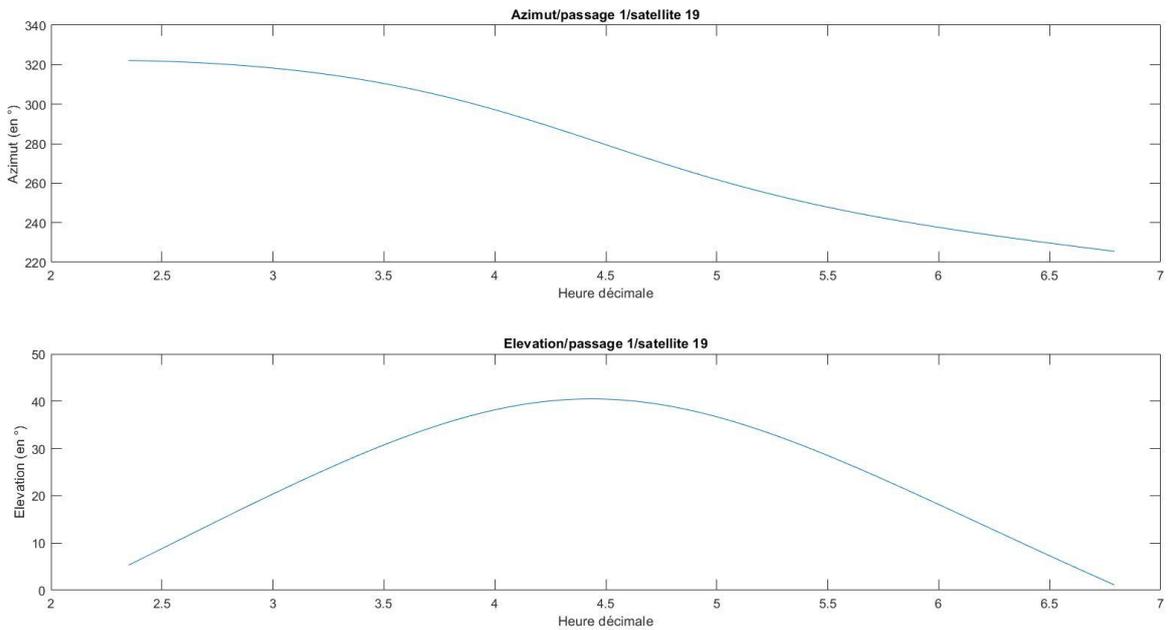


Figure E-31 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 19 durant son 1^{er} passage pour le J36

3.5 Synthèse des différents cas

Cas	Antenne	Jour	Tendance	Météo	Azimut	Élévation	Heures	
Satellite 6	ULG0	219		Pluie légère à partir de 13h	100-20 (40-20)	0-25-0 (15-5)	2h30 - 6h30	
		220		Faibles averses après 19h				
		221	Déphasage de J221 (en avance) et amplitude plus importante par rapport à J219 et J220	Pluie forte ou modérée à partir de 13h				
		222	Amplitude plus faible par rapport à J221 et J223	Faibles averses après 13h				
		223		Pluie légère après 19h				
		234	Egaux	Sec				
		235		Sec				
		236		Sec				
	ULG1	219		Pluie légère à partir de 13h	100-20 (40-20)	0-25-0 (15-5)	2h30 - 6h30	
		220		Faibles averses après 19h				
		221	Déphasage de J221 (en avance) et amplitude plus importante par rapport à J219 et J220	Pluie forte ou modérée à partir de 13h				
	Satellite 14	ULG0	219	Aucune tendance particulière	Pluie légère à partir de 13h	320-230	10-35-0	3h - 7h30
			220		Faibles averses après 19h			
221			Pluie forte ou modérée à partir de 13h					
ULG1		219		Pluie légère à partir de 13h	330-230 (330-310)	5-35-0 (5-25)	3h - 7h30	
		220		Faibles averses après 19h				
		221	Amplitude plus importante par rapport à J219 et J220	Pluie forte ou modérée à partir de 13h				
		222	Amplitude plus faible par rapport à J221 et J223	Faibles averses après 13h				
		223		Pluie légère après 19h				
		234	Egaux	Sec				
		235		Sec				
236	Sec							

Satellite 10	ULG0	219		Pluie légère à partir de 13h	340-250	5-20-5	0h - 4h
		220		Faibles averses après 19h			
		221	Amplitude plus importante par rapport à J219 et J220	Pluie forte ou modérée à partir de 13h			
	ULG1	219		Pluie légère à partir de 13h	340-250	5-20-5	0h - 4h
		220		Faibles averses après 19h			
		221	Déphasage de J221 (en retard) et amplitude plus importante par rapport à J219 et J220	Pluie forte ou modérée à partir de 13h			
Satellite 19	ULG0	36	Egaux	Sec	320-220 (320)	5-40-0 (10-20)	2h - 7h
		37		Sec			
		38		Sec			
		41	Déphasage de J41 (en avance) et amplitude plus importante par rapport à J37 et J38	Pluie toute la journée			
	ULG1	36		Sec	320-220 (320)	5-40-0 (10-20)	2h - 7h
		37		Sec			
		38	Amplitude plus importante que les J36, J37 et J41	Sec			
		41		Pluie toute la journée			

Tableau E-3 : Résumé des différents cas

Dans le Tableau E-3, les différents cas décrits et expliqués précédemment sont repris. La tendance suivie par le multi trajet pour chaque jour ainsi que leur météo, l'azimut et l'élévation du satellite ont été regroupés. De plus, si une tendance a été remarquée pour un moment particulier du trajet du satellite, l'azimut et l'élévation de cette période sont indiqués entre parenthèses en dessous de l'azimut et de l'élévation de l'entièreté du trajet. Puisque des heures sont présentes pour le temps qu'il faisait, les heures durant lesquelles les données sont reçues par les antennes ont également été inscrites.

Pour la période d'août, on s'aperçoit que pour chaque cas traité (sauf pour les données du satellite 14 reçues par l'antenne ULG0), le multi trajet des J221 et J223 possède une amplitude supérieure à celle des J219, J220 et J222. En ce qui concerne le satellite 14, le multi trajet présent sur ULG0 est moins important que celui présent sur l'autre antenne lorsque des variations d'amplitude sont détectées.

Ces cinq jours possèdent des précipitations. Il faut être prudent concernant l'ordre entre les précipitations et l'enregistrement des données, car si le satellite passe au début de la journée, les précipitations de la veille ont plus d'impact. Deux groupes se créent : des jours plus humides et des jours plus secs. Il semblerait que les J219, J220 et J222 soient plus humides que les deux autres jours. Lors du J221, une grande quantité de précipitations est tombée, mais son impact est tangible plutôt lors des passages du J222 étant donné que les satellites dont les données ont été analysées sont observés en début de journée et que les précipitations ont eu lieu vers 13h.

En annexe se trouvent la Figure I-8 et la Figure I-9. Ces dernières comparent les J219 à J223 pour le 2^{ème} passage du satellite 16 qui a lieu en fin de journée. On peut voir que cette fois, ce sont les amplitudes des J219 et J221 qui sont inférieures aux amplitudes des trois autres jours. Cela confirme le fait qu'une amplitude moins importante montre la présence d'une humidité plus grande pour la surface réfléchissante puisque cette fois les importantes précipitations du J221 ont un impact sur le SNR de ce même jour. Dans le Tableau D-1, on constate que les quantités de précipitations des J219 et J221 sont beaucoup plus importantes que celles des trois autres jours et le fait que le passage du satellite 16 ait lieu en fin de journée permet de mettre en avant cette différence au niveau des amplitudes. Cela permet ainsi de confirmer l'hypothèse qu'une amplitude inférieure montre une humidité de la surface réfléchissante plus importante.

Ensuite, les J234, J235 et J236 sont secs et leur multi trajet est le même.

Ces variations sont enregistrées à des élévations assez basses et à des azimuts qui varient (20-40, 310-330...).

En ce qui concerne la période de début février, on peut voir que pour une antenne, le J41 est déphasé et possède une amplitude plus importante que les autres jours, ce qui est dû aux précipitations de ce jour-là et du jour précédent. En revanche, pour la deuxième antenne, le J38 possède une amplitude plus importante, et la quantité de précipitations ne permet pas d'expliquer ce phénomène.

4. Extraction de l'amplitude, de la fréquence et de la hauteur

Comme expliqué auparavant, afin de calculer l'amplitude ainsi que la fréquence du multi trajet à un instant donné, il est nécessaire d'utiliser des valeurs précédant et suivant cet instant. Puisqu'on cherche à calculer ces données pour extraire les caractéristiques du multi trajet, elles seront mesurées à partir du SNR extrait grâce au polynôme de degré 4, et donc, sur le SNR causé par le signal réfléchi.

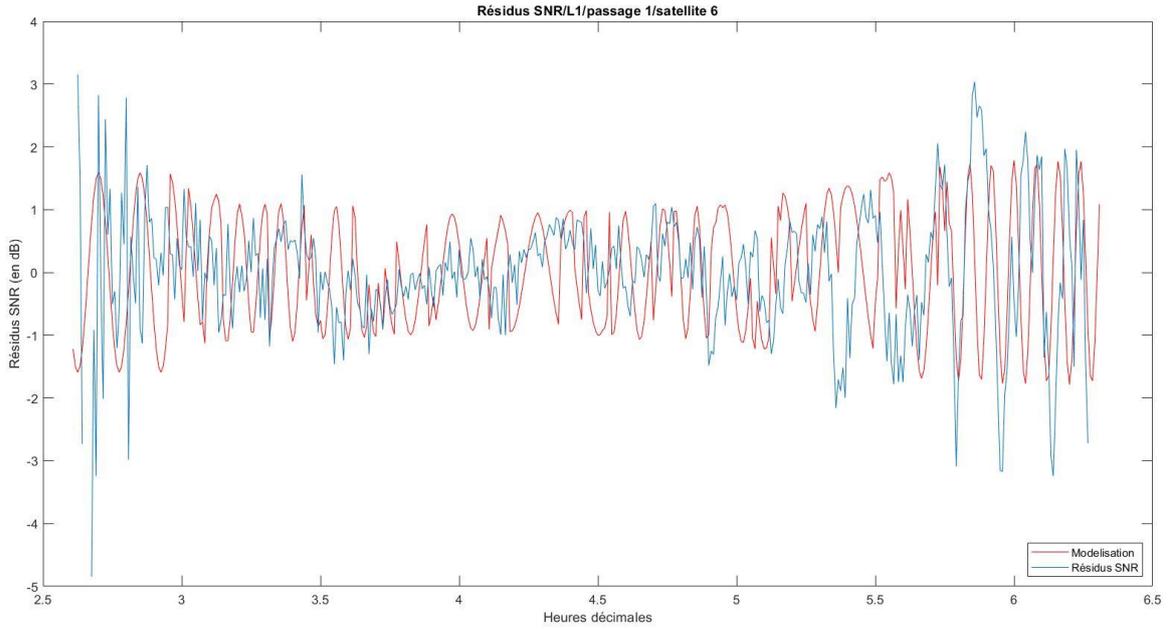


Figure E-32 : Résidus SNR avec la modélisation de l'amplitude (81) et de la fréquence (81) calculée grâce à une fonction cosinus

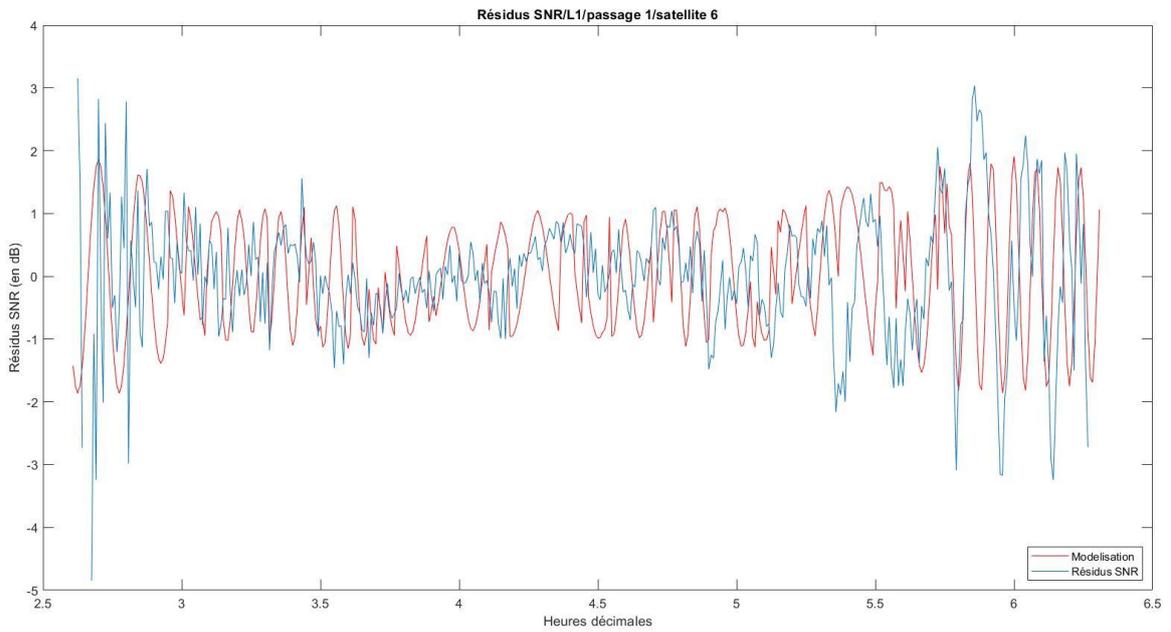


Figure E-33 : Résidus SNR avec la modélisation de l'amplitude (41) et de la fréquence (81) calculée grâce à une fonction cosinus

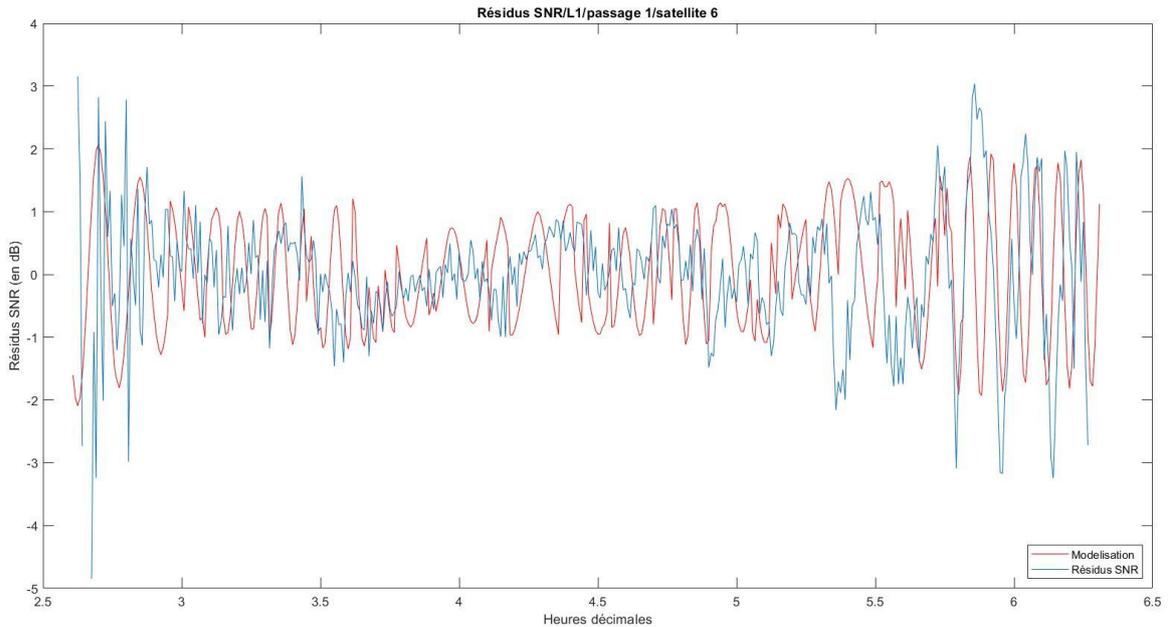


Figure E-34 : Résidus SNR avec la modélisation de l'amplitude (21) et de la fréquence (81) calculée grâce à une fonction cosinus

Il faut déterminer la taille de la fenêtre de temps utilisée afin de calculer l'amplitude ainsi que la fréquence. En effet, ce paramètre a une influence sur les résultats d'amplitude et de fréquence obtenus. À cet effet, différentes tailles ont été testées : plus la taille est petite, plus on ne prend que l'information qui nous intéresse et on obtient une valeur exacte. Néanmoins, si cette fenêtre est trop petite, il se peut que les variations dues au bruit influencent plus que celles qui nous intéressent. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre.

En ce qui concerne la taille de la fenêtre utilisée pour calculer la fréquence, 81 valeurs est le minimum afin d'obtenir des résultats dans la recherche des pics. C'est la raison pour laquelle aucune autre taille de fenêtre n'a été testée puisqu'elle possède déjà une grande taille. Ce minimum est nécessaire afin d'obtenir des résultats dans la recherche des pics, car si la fenêtre est plus petite, aucune valeur n'est supérieure au seuil et il n'est pas possible de calculer de périodicité ni de fréquence pour cette fenêtre. Cela arrive également pour une fenêtre de 81 valeurs, mais cela est moins fréquent. Ainsi, il est possible de prendre les résultats de la fenêtre précédente ou suivante. Si la fenêtre est plus petite, on n'obtient pas assez de pics dans une même fenêtre pour calculer une périodicité et une fréquence valables. Pour ce qui est de l'amplitude, des fenêtres comprenant 81, 41 et 21 valeurs ont été implémentées et les amplitudes obtenues sont représentées grâce à une fonction cosinus sur la Figure E-32, la Figure E-33 et la Figure E-34.

Puisqu'un certain nombre de valeurs précédant et suivant l'instant pour lequel l'amplitude et la fréquence sont calculés sont nécessaires, les amplitudes et fréquences des valeurs ne possédant pas ce nombre, c'est-à-dire celles au début et celles à la fin du trajet du satellite, sont celles de la dernière valeur pour laquelle l'amplitude et la fréquence ont pu être calculées. Ainsi, il est possible que l'amplitude et la fréquence des dernières valeurs soient moins exactes. Les fenêtres nécessitant le moins de valeurs permettent de calculer des amplitudes et des fréquences qui correspondent le mieux pour la fin et le début du trajet du satellite aux instants où le multi trajet se trouve (la partie qui nous intéresse le plus). C'est pour cette raison que la fenêtre de 21 valeurs a été choisie afin de calculer l'amplitude du multi trajet de tous les satellites.

Comme le montre l'équation (14), la hauteur dépend de la fréquence du multi trajet qui vient d'être calculée, de la longueur d'onde de l'onde porteuse ainsi que de l'élévation du satellite. Dès lors, les deux premiers paramètres changent en fonction de la porteuse utilisée et dans ce sens, la Figure E-17 a montré que les fréquences de multi trajet extraites sont différentes selon la longueur d'onde de la porteuse utilisée. Puisque cette dernière est constante pour chaque porteuse, la fréquence extraite devrait équilibrer afin que la même hauteur soit trouvée pour les trois ondes porteuses.

Une fonction sinusoïdale a été implémentée afin de mettre en évidence des valeurs d'amplitudes et de fréquences du multi trajet qui ont été extraites. En effet, on ne peut pas analyser une valeur d'amplitude sans la représenter ni la comparer aux résidus du SNR, c'est pourquoi une fonction sinusoïdale a été calculée à l'aide des différentes valeurs d'amplitudes et de fréquences.

La modélisation représentée à la Figure E-34 par une fonction cosinus montre l'amplitude et la fréquence calculées à chaque instant pour le premier passage du satellite 6 au J219. Les périodes qui nous intéressent sont celles contenant du multi trajet. Pour celle avant 3h, la fréquence est sous-estimée et pour celle après 5h, elle est sous-estimée par moment et surestimée pour d'autres. Par conséquent, cela aura un impact sur la hauteur calculée et il faudra en tenir compte. Comme la fréquence se trouve au numérateur de l'équation (14) qui permet de trouver la hauteur, si la fréquence est surestimée, la hauteur le sera également et inversement.

4.1 Le cas du 1^{er} passage du satellite 6 durant la période d'août 2019

L'objectif de ce point est de mieux comprendre sur quel(s) objet(s) a lieu le multi trajet en comparant des valeurs numériques de l'amplitude pour le multi trajet des différents jours ainsi qu'une valeur de hauteur. Pour ce faire, il est nécessaire d'extraire l'amplitude et la fréquence du multi trajet de la manière expliquée précédemment.

Dans la méthodologie décrite, il est possible de modifier un paramètre de plus. En effet, la détermination des pics afin d'obtenir la fréquence se fait en utilisant un seuil. Dès lors, les sommets supérieurs à ce dernier sont considérés comme des pics et la périodicité de la fonction est calculée. Ainsi, en modifiant ce seuil, la fréquence extraite est également changée. Afin d'obtenir les résultats, ce seuil est déterminé au cas par cas dans le but de calculer la meilleure fréquence possible parce que cette valeur est nécessaire au calcul de hauteur. Étant donné que le SNR est différent pour chaque porteuse, une valeur-seuil différente a été retenue afin d'extraire au mieux les pics de la fonction d'autocorrélation des résidus du SNR selon la fréquence de l'onde porteuse.

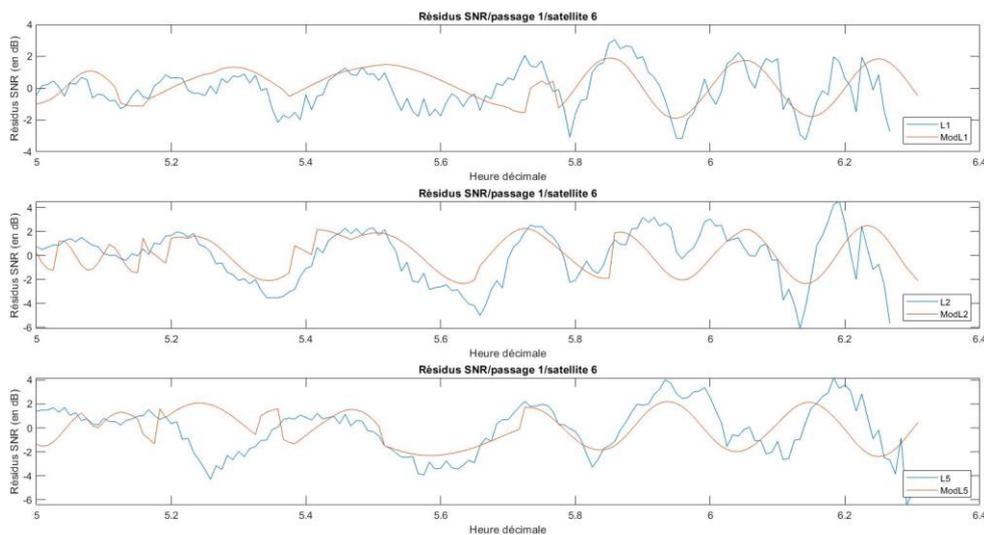


Figure E-35 : Représentation visuelle de l'extraction de la fréquence et de l'amplitude pour le J219 sur l'antenne ULG0

La Figure E-35 représente la fréquence et l'amplitude extraites pour le multi trajet de la période d'intérêt pour le J219, après 5h. Les imperfections de cette méthode d'extraction sont présentes sur le graphique : l'amplitude est souvent sous-estimée. En ce qui concerne la fréquence, la modification manuelle du seuil amène de gros changements dans sa valeur, mais elle a été préférée à une valeur fixe pour chaque cas puisqu'elle permet un meilleur ajustement et donc une fréquence plus représentative. Dès lors, dans la suite de ce travail, il faudra tenir compte qu'une modification de ce seuil pourrait totalement changer la fréquence.

Pour L1, la fréquence calculée correspond assez bien à la fréquence du multi trajet avant et après 6h, mais elle n'est plus bien ajustée vers 5.6h. Ce seuil aurait peut-être pu être fixé de manière plus objective et automatique en minimisant les écarts entre le modèle et les résidus du SNR, mais la sinusoïdale utilisée afin de modéliser les fréquences et les amplitudes n'est pas forcément la même selon l'onde porteuse ou le satellite qu'on considère (cos, sin, -cos, -sin). La sinusoïdale est également choisie de manière manuelle afin de trouver celle qui s'ajuste le mieux au set de données et qui permet une meilleure visualisation. Il est nécessaire de remplacer cette partie manuelle afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Par exemple, avec un seuil de 0.02, on obtient une fréquence de multi trajet de 0.17Hz et avec un seuil de 0.03, la fréquence calculée vaut 0.13Hz. Si on augmente le seuil jusqu'à 0.04, il n'existe pas assez de valeurs de pics supérieures à ce seuil afin de calculer une périodicité. De plus, en fonction des oscillations sur lesquelles le regard est attiré pour l'ajustement, cette valeur-seuil peut changer.

La Figure E-36 représente la différence entre deux fonctions sinusoïdales de même amplitude et de même phase initiale mais possédant des fréquences de 0.13Hz et 0.17Hz. De cette manière, on se rend compte de l'impact qu'a cette différence de fréquence. Pour un calcul de hauteur à 30s à une élévation de 30° et pour une longueur d'onde de 0.19m, on obtient 0.741m pour une fréquence 0.13Hz et 0.963m pour une fréquence de 0.17Hz. Cette hauteur ne signifie rien, mais la différence entre les deux valeurs montre l'importance de la détermination de la valeur-seuil et d'une fréquence exacte.

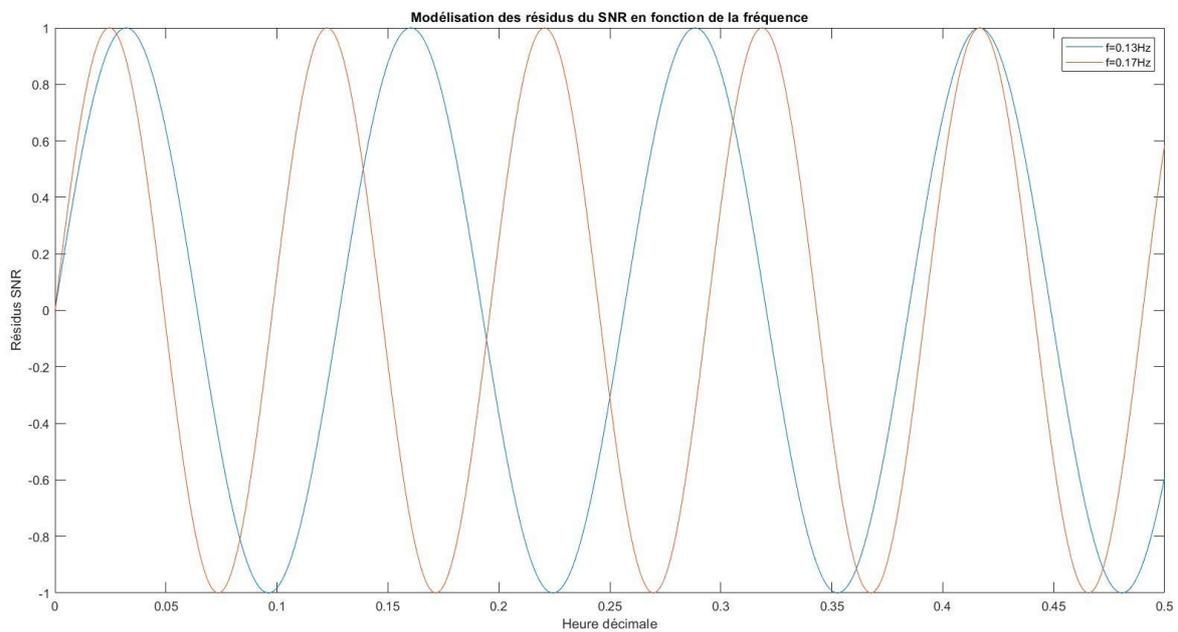


Figure E-36 : Fonction sinusoïdale pour des fréquences de 0.13Hz et 0.17Hz

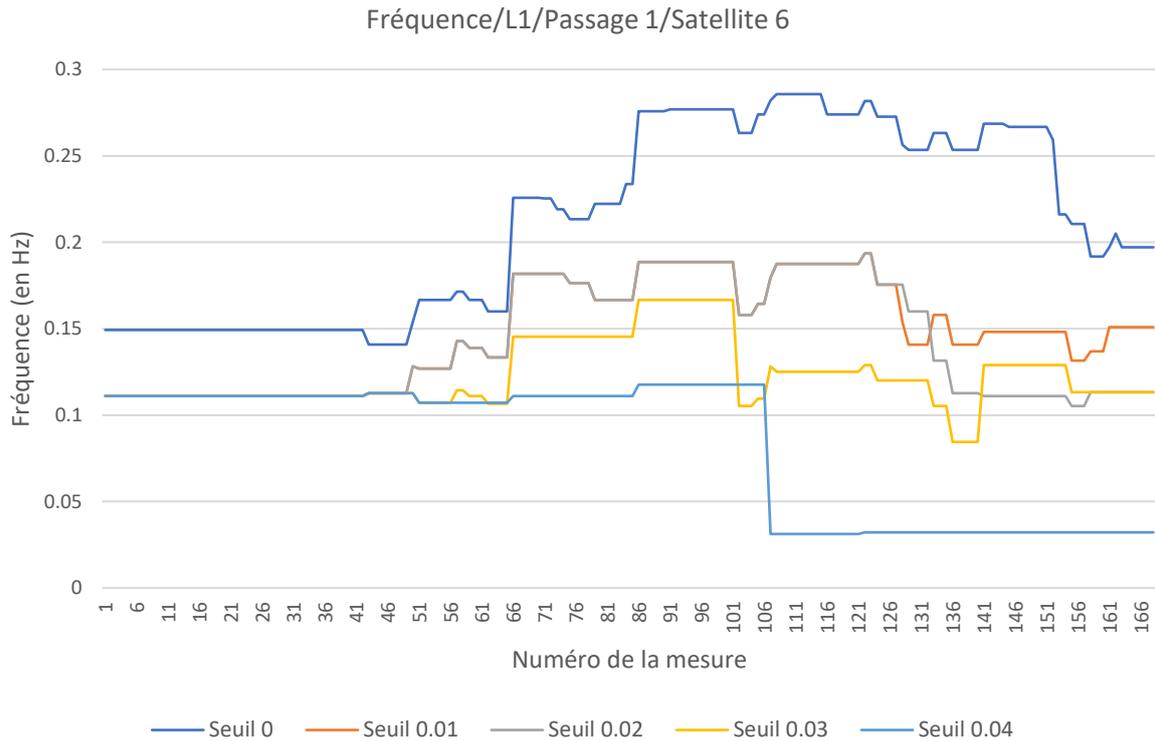


Figure E-37 : Fréquence extraite en fonction du seuil utilisé pour le J219 sur l'antenne ULGO

Sur la Figure E-37, on peut voir qu'on passe d'une fréquence de 0.11Hz pour les seuils de 0.01, 0.02, 0.03 et 0.04 à une fréquence de 0.15Hz pour un seuil de 0. Ensuite, à partir de la 46^{ème} mesure, les fréquences ne sont plus les mêmes en fonction du seuil utilisé sauf pour les seuils de 0.01 et 0.02. Ainsi, utiliser un seuil de 0.01 ou 0.02 donne les mêmes fréquences. Toutefois, si on passe à un seuil de 0.03, on obtient des résultats différents d'environ 0.05Hz. On constate également que la différence entre un seuil de 0 et de 0.04 est de 0.1Hz. Cette dernière atteint même plus de 0.2Hz par moment.

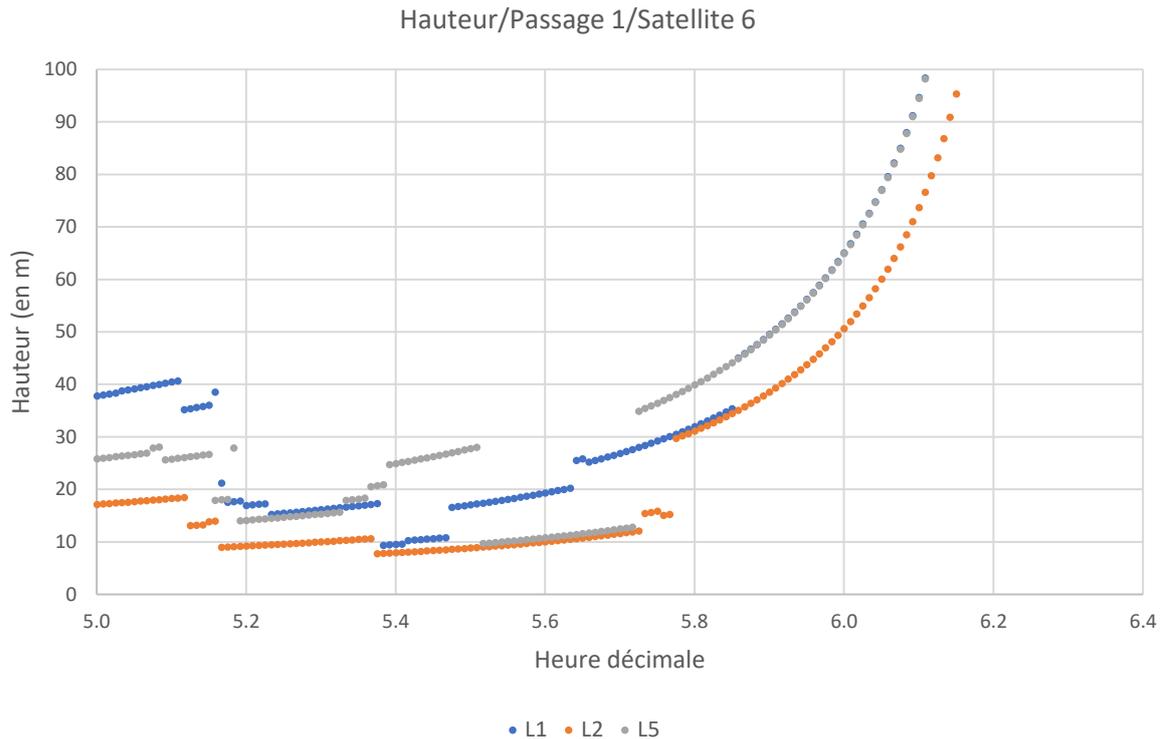


Figure E-38 : Hauteur calculée grâce à la fréquence extraite pour les 3 porteuse pour le J219 sur l'antenne ULGO pour le satellite 6

Sur la Figure E-38, la hauteur calculée est représentée en fonction du temps. Celle calculée pour l'onde porteuse L1 ne s'arrête pas vers 5.8h, elle est simplement confondue avec celle de L5 par la suite. Il existe des plateaux puisque la fréquence est utilisée pour obtenir la hauteur ; elle est constante pour chaque plateau et la variation de l'élévation du satellite amène leur courbure. La fréquence est constante puisqu'elle est calculée pour des sets de données de 40 minutes et qu'elle est uniquement déterminée par une recherche de pics. Ceux-ci peuvent donc être les mêmes pour différents sets. De plus, lorsqu'aucun pic n'est trouvé, la fréquence attribuée est celle du set de données précédent (ce cas de figure n'arrive pas souvent). On pourrait également décider qu'aucune fréquence n'a été obtenue, mais cela permettrait de construire des graphiques plus lisibles.

En théorie, la hauteur devrait être la même peu importe la porteuse utilisée, mais il a été démontré précédemment que l'extraction de la fréquence n'est pas optimale, ce qui pourrait expliquer les différences entre les hauteurs. De plus, afin d'utiliser l'équation (14), l'hypothèse que la surface réfléchissante est horizontale a été émise. Par contre, dans cet environnement-ci, il se peut que la surface réfléchissante possède une inclinaison : le signal pourrait être réfléchi sur des murs verticaux, sur une coupole ou sur d'autres objets encore plus complexes. Un environnement de travail plus simple avec un espace plan autour de l'antenne permettrait une meilleure étude et sûrement de meilleurs résultats. L'objet sur lequel le signal est réfléchi peut être différent en fonction de l'élévation du satellite, c'est pourquoi il existe des oscillations pour lesquelles l'amplitude ne varie pas en fonction des jours et d'autres biens.

De plus, il est possible que les propriétés de certains objets ne changent pas en fonction de l'humidité ; la variation de l'humidité ne sera donc pas visible dans les variations du multi trajet au fil des jours.

Afin d'affiner l'extraction de la fréquence, on aurait pu prendre une période où le multi trajet est élevé et « obliger » la hauteur à être la même pour les trois ondes porteuses, car cela doit être le cas. Cela n'est pas possible parce que, comme nous l'avons expliqué précédemment, la hauteur calculée n'est pas forcément la hauteur entre la surface réfléchissante et l'antenne puisque la surface réfléchissante n'est pas forcément horizontale comme cela doit être le cas pour utiliser l'équation (7).

De 5.2h à 5.6h, la fréquence extraite pour l'onde porteuse L2 semble assez proche de la fréquence du signal. Dès lors, en supposant que la surface sur laquelle le signal est réfléchi est plane, elle posséderait une altitude de 10m inférieure ou supérieure (il est impossible que cette altitude soit supérieure de 10m, l'antenne ne pourrait pas recevoir le signal) à celle de l'antenne et se trouve dans le secteur d'azimut de 20° à 40°. Cette différence d'altitude et ce secteur montrent que le signal pourrait être réfléchi sur le toit du bâtiment B6b se trouvant au nord-est du bâtiment B5a et visible sur la Figure E-1. Sur les toits des différents bâtiments se trouve du roofing sur lequel des flaques se forment après les pluies et ces dernières restent présentes un certain nombre de jours comme le montre la Figure E-39. Elles peuvent être à l'origine des différents déphasages et variations dans l'amplitude du multi trajet.



Figure E-39 : Flaques présentes le jeudi 16 juin 2020

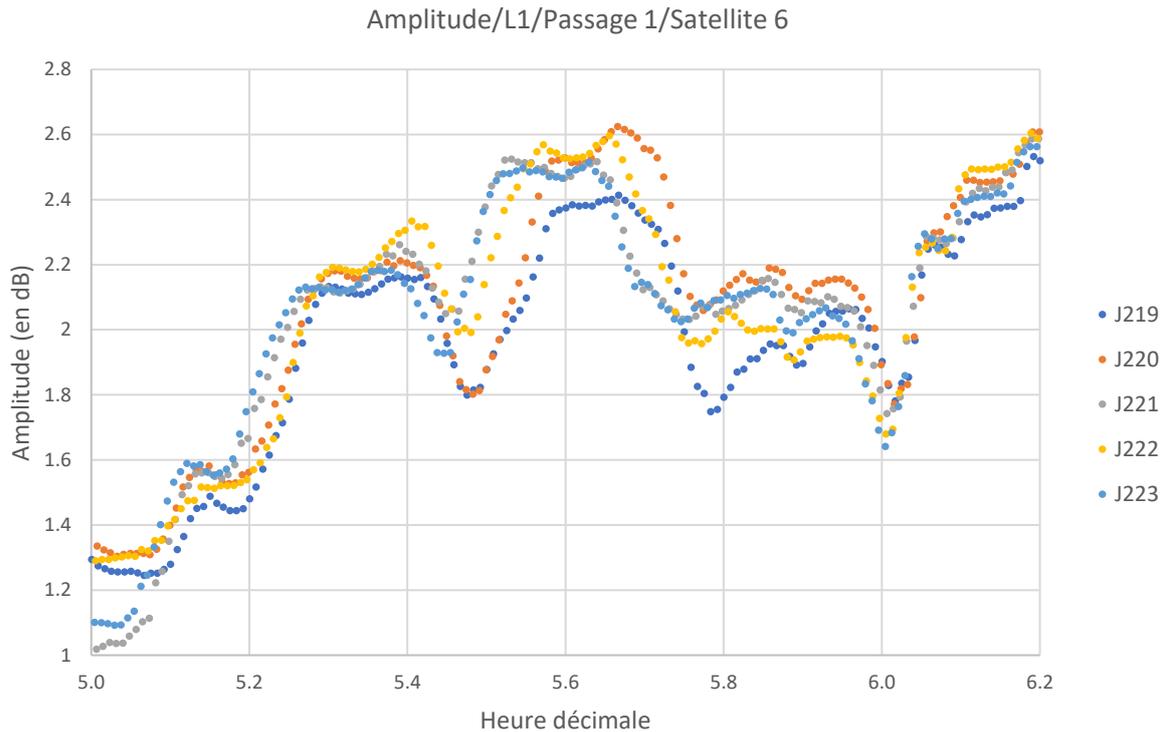


Figure E-40 : Variation de l'amplitude du multi trajet des J219 à J223 sur l'antenne ULG0

La Figure E-40 montre que les amplitudes des J221 et J223 sont très semblables tout au long de la période de multi trajet analysée. Les J220 et J222 possèdent des amplitudes supérieures et les augmentations d'amplitude sont en retard par rapport à celles de J221 et J223. En ce qui concerne le J219, son amplitude est inférieure à toutes celles des autres jours et ses variations sont également en retard par rapport à celles des autres jours. La Figure E-35, quant à elle, mettait déjà en avant le fait que l'amplitude du J219 est sous-estimée lors de l'extraction. On peut se demander si elle ne l'est pas plus que celle des autres jours.

Par conséquent, il est nécessaire de comparer l'amplitude extraite pour le J219 et celle extraite pour le J220. Sur la Figure E-41, vers 5.6h, il existe un minimum dans les résidus du SNR du J219 qui n'existe pas pour le J220 et il a un impact sur l'amplitude extraite comme le montre la fonction « ModJ219 ». En effet, le minimum de l'oscillation qui est censé représenter l'amplitude ainsi que la fréquence extraite en chaque point dure plus longtemps que pour celle du J220. La cause de cette modification semble être du bruit plus important pour le J219 que pour le J220.

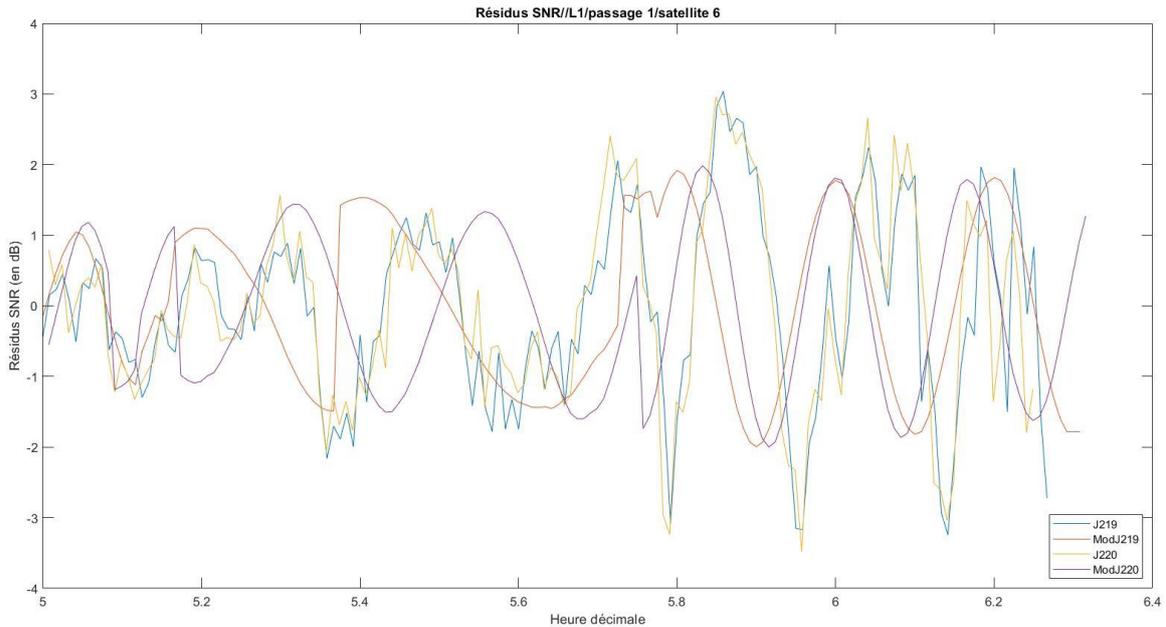


Figure E-41 : Comparaison des amplitudes de J219 et J220 sur ULGO

Afin quantifier la différence entre les amplitudes des différents jours, une moyenne et un écart-type des différences entre les jours ont été calculés pour chaque paire de jours. Puisque l'amplitude des dernières minutes n'est pas calculée directement, mais que la dernière possédant 10 valeurs enregistrées à des temps supérieurs est utilisée pour ces dernières minutes, ces valeurs ne sont pas utilisées pour obtenir les résultats du Tableau E-4, c'est-à-dire les dix dernières valeurs.

Lorsque l'écart-type est élevé, cela signifie que les différences entre les amplitudes des deux jours sont assez dispersées. Toutefois, la moyenne peut mettre en avant un biais dans les données, c'est-à-dire un écart entre les deux valeurs qui est plutôt constant dans le temps. Comme le montre le graphique représentant les amplitudes des différents jours, les valeurs des amplitudes des J221 et J223 sont très proches. Lorsqu'une moyenne est faible, il est nécessaire d'analyser son écart-type, car il se pourrait que des valeurs se compensent (par exemple, -0.2 et 0.19).

	J219-J220	J219-J221	J219-J222	J219-J223	J220-J221	J220-J222	J220-J223	J221-J222	J221-J223	J222-J223
Moyenne (en dB)	-0.109	-0.090	-0.088	-0.081	0.018	0.021	0.027	0.003	0.009	0.006
Ecart-type (en dB)	0.082	0.161	0.108	0.166	0.175	0.128	0.175	0.124	0.057	0.130

Tableau E-4 : Moyenne et écart-type des différences entre les amplitudes des J219 à J223

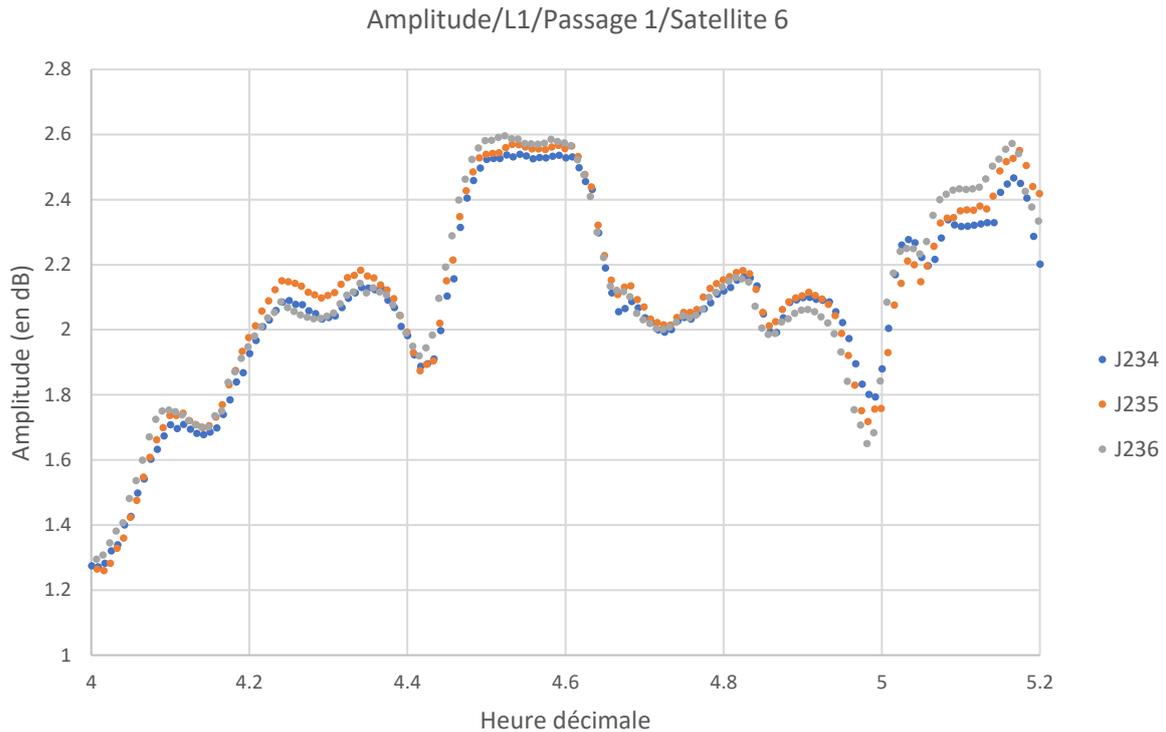


Figure E-42 : Variation de l'amplitude du multi trajet des J234 à J236 sur l'antenne ULG0

En ce qui concerne les amplitudes des J234 à J236, elles semblaient presque parfaitement égales lors de la comparaison visuelle des résidus, la Figure E-42 ainsi que le Tableau E-5 le confirment avec des moyennes et des écarts-types très faibles comme pour les J221 et J223.

	J234-J235	J234-J236	J235-J236
Moyenne	-0.021	-0.022	-0.001
Ecart-type	0.041	0.055	0.051

Tableau E-5 : Moyenne et écart-type des différences entre les amplitudes des J234 à J236

En ce qui concerne ce cas pour les données reçues par l'antenne ULG1, la réflexion du signal doit avoir lieu également sur le toit du bâtiment au nord-est de l'antenne parce que les antennes sont proches et que l'objet sur lequel le signal est réfléchi assez grand. L'extraction de l'amplitude pour cette antenne en particulier ne sera pas faite parce que la méthodologie utilisée n'est pas très précise et que ce paramètre ne peut pas être analysé seul, car par exemple, un peu de bruit change complètement l'amplitude calculée.

4.2 Le cas du 1^{er} passage du satellite 14 durant la période d'août 2019

Pour ce cas, l'important est de trouver sur quel objet a lieu le multi trajet de 3h à 4h afin de mieux comprendre pourquoi un multi trajet beaucoup plus important et qui amène une tendance est visible pour l'antenne ULG1. Il faut calculer la fréquence du signal pour les deux antennes pour un jour de la première période de récolte de données et ensuite, à partir de cette fréquence, obtenir la hauteur présente entre l'antenne et l'objet réfléchissant.

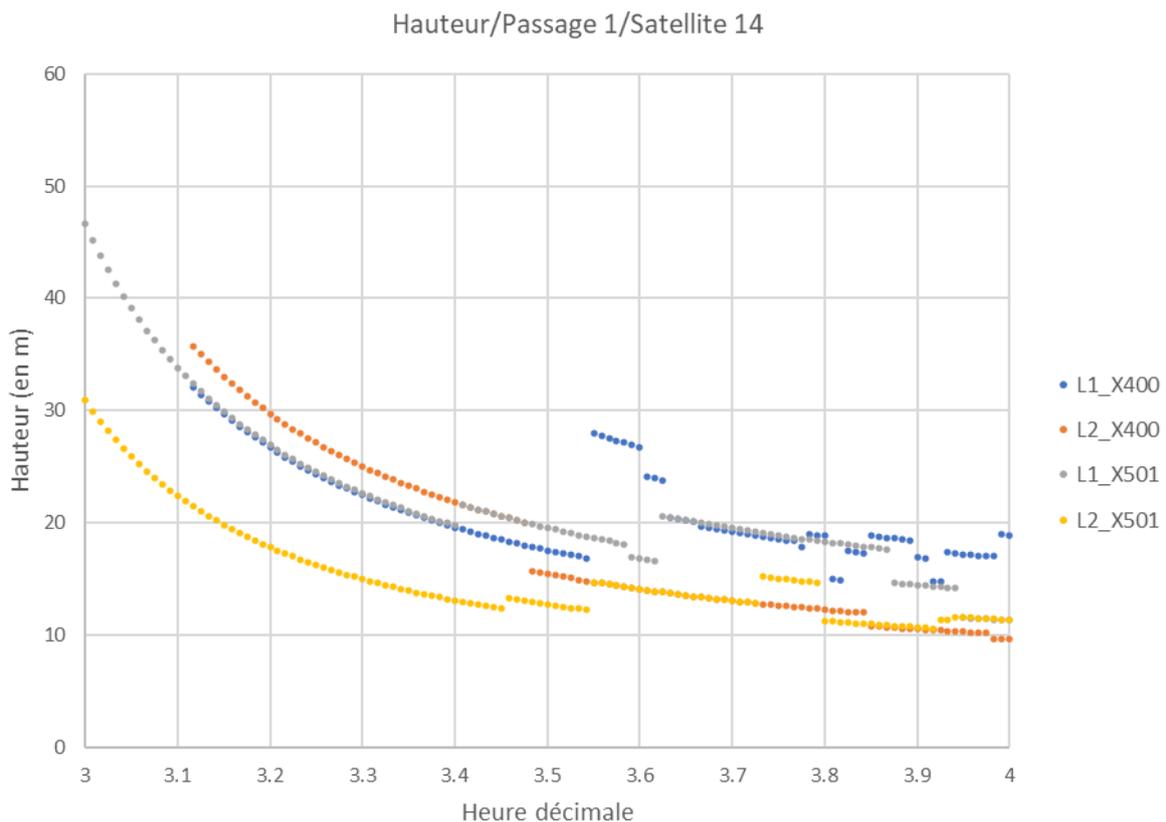


Figure E-43 : Hauteur calculée grâce à la fréquence extraite pour les 2 bandes pour le J219 sur les deux antennes

La Figure E-43 reprend les hauteurs calculées grâce à l'extraction de la fréquence du SNR dû à la présence de multi trajet. Comme expliqué précédemment, le seul paramètre modifié est le seuil qui détermine les pics du graphique de l'autocorrélation afin de calculer leur période et ensuite, leur fréquence. La Figure E-44 et la Figure E-45 permettent de représenter l'amplitude et la fréquence pour chaque instant afin de voir si ces dernières correspondent au mieux aux résidus du SNR en fonction du temps. On constate que les amplitudes calculées sont très semblables aux amplitudes réelles. En ce qui concerne la fréquence, elle est surestimée par moment pour l'antenne ULG0 pour l'onde porteuse L1 et sous-estimée pour l'autre antenne sur la même onde porteuse. Dès lors, la hauteur suivra ces tendances comme cela a déjà été dit. Les différents plateaux mis en avant pour le calcul de la hauteur pour le cas précédent sont de nouveaux présents, c'est-à-dire que seule l'élévation change au cours du temps.

Sur la Figure E-38, pour la fin du graphique, on peut voir que la hauteur augmente fortement puisque c'est la fin des mesures et que la fréquence obtenue pour ces instants est celle du dernier instant calculable. Le même phénomène a lieu pour ce cas également, mais il a lieu au début du graphique. De plus, à ce moment-là, le satellite se couche ou se lève, l'élévation varie donc de manière plus rapide.

Les hauteurs calculées sont comprises entre 10 et 30 mètres et le signal est réfléchi dans le secteur d'azimut 310° à 330° , elles ne semblent pas se différencier en fonction de l'antenne. Comme l'hypothèse a été émise précédemment, 30 mètres devraient correspondre à la hauteur présente entre le sol et l'antenne. Sur la Figure E-1 et la Figure E-2, on pouvait voir que le multi trajet n'était pas fort présent dans ce secteur pour l'antenne ULG0 contrairement à l'autre antenne, comme cela avait été constaté lors de la comparaison visuelle des résidus. Cependant, on ne sait toujours pas si parce que le multi trajet est moins présent qu'aucune tendance n'est visible ou si cela est causé parce que pour une antenne le signal est réfléchi sur un chemin en asphalté ou pour autre raison. Il faut également se méfier de la hauteur calculée, car comme expliqué précédemment, la hauteur est calculée pour une surface horizontale, mais il est possible que le signal réfléchisse sur une surface inclinée. De plus, avec l'élévation du satellite, il se peut que la surface réfléchissante ainsi que sa différence d'hauteur avec l'antenne varient.

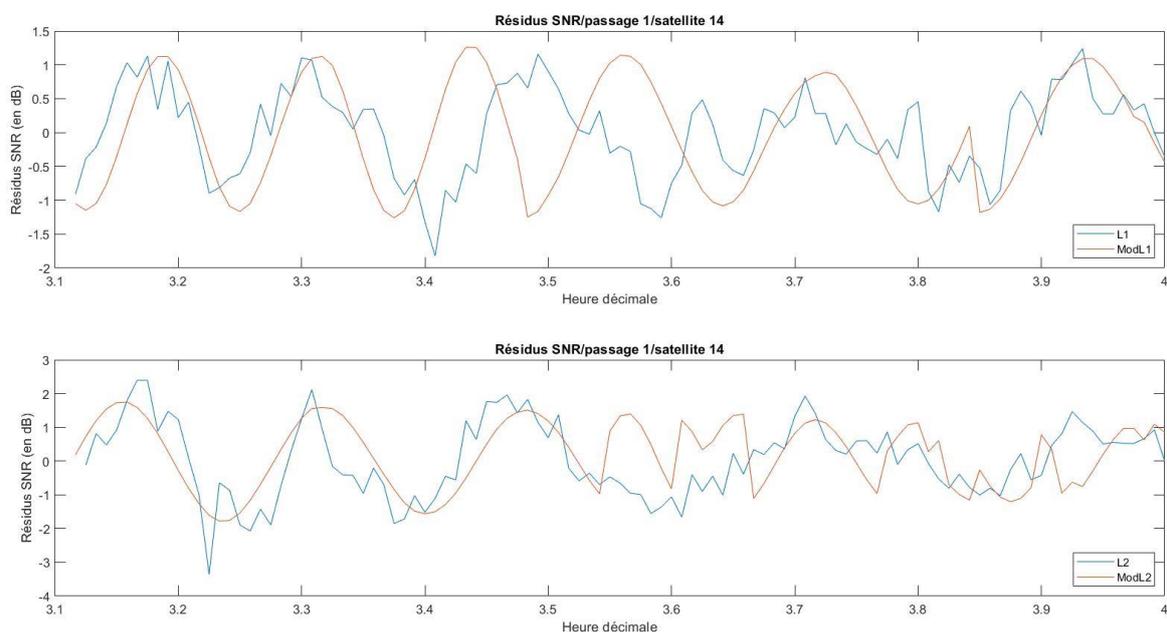


Figure E-44 : Représentation visuelle de l'extraction de la fréquence et de l'amplitude pour le J219 sur l'antenne ULG0

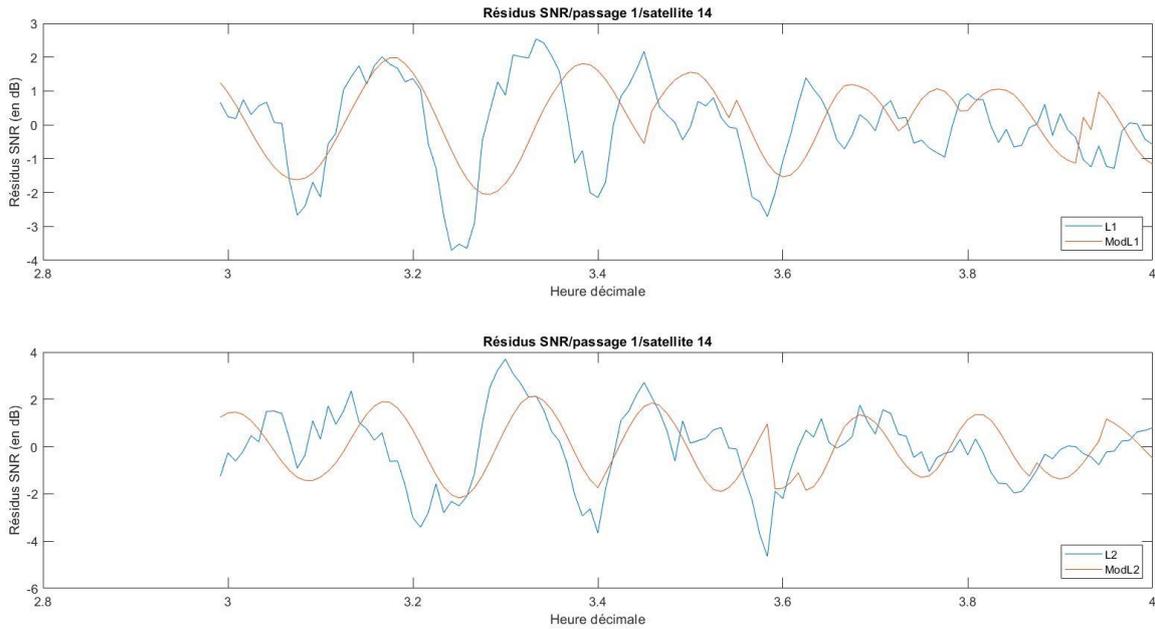


Figure E-45 : Représentation visuelle de l'extraction de la fréquence et de l'amplitude pour le J219 sur l'antenne ULG1

4.3 Autres cas

Les différents paramètres tels que l'amplitude, la fréquence ou la hauteur ne sont pas extraits assez précisément. Dès lors, il sera impossible de constater une différence de hauteur aussi fine que de la hauteur de neige. De plus, la fréquence est extraite de manière assez manuelle et peut changer en fonction de la personne qui configure le seuil. Les valeurs ne peuvent pas être simplement extraites puis analysées puisque comme cela a été montré, elles peuvent être fortement influencées par du bruit et elles ne sont pas assez bonnes.

5. Corrélation croisée

Afin de quantifier et de vérifier numériquement les tendances observées dans le point E.3 qui seront rappelées au fur et à mesure de l'analyse des tableaux contenant les coefficients de corrélation, des corrélations croisées entre les résidus du SNR ont été implémentées. Des valeurs n'ont pas été calculées pour tout le trajet des différents satellites. En effet, nous sommes uniquement intéressés par les périodes où les résidus du SNR sont influencés par du multi trajet. Ces périodes assez courtes ont été également déterminées grâce aux observations effectuées lors de l'analyse visuelle des résultats.

Les coefficients en vert sont ceux entre deux jours censés se ressembler et être secs ; ceux en orange sont les coefficients entre deux jours semblables lors de l'analyse visuelle et humides. Grâce à tous les résultats obtenus, lorsqu'un coefficient est inférieur à 0.86, on considère que les résidus des deux jours sont différents. Bien sûr, plus ce coefficient se rapproche de 1, plus les résidus se ressemblent. Cette valeur-seuil est la moyenne des coefficients de corrélation calculés.

Pour le trajet du satellite 6, la tendance observée était un déphasage des résidus du SNR des J221 et J223 par rapport aux J219, J220 et J221 ainsi que des amplitudes supérieures pour ces deux jours. Le Tableau E-6 reprend les différents coefficients de corrélation entre les différents jours pour la période de 5h à 6.2h. Plus le coefficient est proche de 1, plus les résidus du SNR ont un comportement similaire. Quelle que soit l'antenne, on peut voir qu'une forte corrélation existe entre les J219, J220 et J222. De plus, les J221 et J223 sont également fortement corrélés (0.9231 pour ULG0). Les corrélations sont moins importantes pour la deuxième antenne et cela montre d'autant plus le fait que les J221 et J223 sont assez différents des trois autres. On peut également voir que pour l'antenne ULG0, la corrélation entre les J220 et J222 est semblable au coefficient pour les J219 et J223.

SAT 6 ULG0 (5h-6.2h)	J219	J220	J221	J222
J220	0.9077			
J221	0.8531	0.7806		
J222	0.9277	0.8674	0.8492	
J223	0.8624	0.8134	0.9231	0.8282
SAT 6 ULG1 (5h-6.2h)	J219	J220	J221	J222
J220	0.8819			
J221	0.6394	0.6526		
J222	0.8435	0.8139	0.7865	
J223	0.673	0.6519	0.888	0.7529

Tableau E-6 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J223 pour le 1^{er} passage du satellite 6 sur la période de 5h à 6.2h pour les deux antennes

SAT 6 ULG0 (4h-5.2h)	J234	J235
J235	0.9539	
J236	0.9283	0.9544

Tableau E-7 : Corrélation entre les résidus SNR des J234 à J236 pour le 1^{er} passage du satellite 6 sur la période de 4h à 5.2h pour l'antenne ULG0

Le Tableau E-7 montre la très forte corrélation entre les J234, J235 et J236 qui étaient des jours sans précipitations. De plus, les jours les précédant ne possédaient pas de précipitations ou en très faible quantité.

SAT 14 ULG0 (6.5h-7.3h)	J219	J220
J220	0.9375	
J221	0.8728	0.9054

Tableau E-8 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J221 pour le 1^{er} passage du satellite 14 sur la période de 6.5h à 7.3h pour l'antenne ULG0

SAT 14 ULG1 (3h-4h)	J219	J220	J221	J222
J220	0.9541			
J221	0.9342	0.9463		
J222	0.9153	0.925	0.8986	
J223	0.9242	0.9278	0.9615	0.8796

Tableau E-9 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J223 pour le 1^{er} passage du satellite 14 sur la période de 3h à 4h pour l'antenne ULG1

Le Tableau E-8 et le Tableau E-9 montrent les différents coefficients de corrélation pour le satellite 14. Les périodes étudiées ne sont pas les mêmes, car des différences n'étaient pas visibles aux mêmes moments. Pour le premier tableau, même si aucune tendance n'était visible sur la Figure E-18, on peut quand même voir une corrélation plus forte entre les résidus des J219 et J220, mais les valeurs entre les J219 et J221 et entre les J220 et J221 sont trop élevées pour dire que les résidus du J221 ne se comportent pas de manière semblable à ceux des deux autres jours.

En ce qui concerne les résultats pour l'antenne ULG1, on peut voir que les J221 et J223 sont fortement corrélés, cependant, les J219, J220 et J222 ne sont pas plus corrélés entre eux qu'avec les deux autres jours. Dès lors, une variation dans l'amplitude est visible au cours des jours mais ne se ressent pas dans les valeurs de corrélation entre les résidus des différents jours. Une meilleure technique afin de calculer l'amplitude permettrait sûrement de mettre en avant ce qui était visible sur la Figure E-19, mais cette différence entre les amplitudes n'est pas suffisante pour influencer le coefficient de corrélation.

SAT 14 ULG1 (2h-2.7h)	J234	J235
J235	0.8658	
J236	0.8789	0.941

Tableau E-10 : Corrélacion entre les résidus SNR des J234 à J235 pour le 1^{er} passage du satellite 14 sur la période de 2h à 2.7h pour l'antenne ULG1

Le Tableau E-10 montre les coefficients de corrélation entre les trois jours secs. Pour ce satellite, les J235 et J236 semblent autant corrélés que pour le satellite 6. Le J234, pour sa part, ne semble pas posséder des résidus aussi proches de ceux de J235 et J236 que pour le satellite 6. Peut-être qu'en prenant une autre période, le coefficient serait plus important. Il est également possible que l'ajustement de degré 4 influence ce résultat. Les valeurs des coefficients montrent quand même que les résidus sont fortement corrélés.

SAT 10 ULG0 (3h-3.7h)	J219	J220
J220	0.9103	
J221	0.842	0.8753

Tableau E-11 : Corrélacion entre les résidus SNR des J219 à J221 pour le 1^{er} passage du satellite 10 sur la période de 3h à 3.7h pour l'antenne ULG0

Le Tableau E-11 et le Tableau E-12 montrent que les J219 et J220 sont fortement corrélés. Pour l'antenne ULG1, on peut voir que ces deux jours sont moins corrélés avec le J221 que pour l'autre antenne. En effet, un déphasage était présent pour le J221 avec les données de l'antenne ULG1, ce qui explique cette différence. Ainsi, lorsqu'un déphasage était présent lors de la comparaison visuelle, on peut constater que les coefficients sont inférieurs uniquement lorsqu'une variation d'amplitude était visible.

SAT 10 ULG1 (0.4h-1.5h)	J219	J220
J220	0.9506	
J221	0.8175	0.8285

Tableau E-12 : Corrélacion entre les résidus SNR des J219 à J221 pour le 1^{er} passage du satellite 10 sur la période de 0.4h à 1.5h pour l'antenne ULG1

SAT 16 ULG0 (20h-20.2h)	J219	J220	J221	J222
J220	0.7747			
J221	0.7965	0.7		
J222	0.8491	0.9002	0.7159	
J223	0.7946	0.9327	0.6802	0.9241

Tableau E-13 : Corrélation entre les résidus SNR des J219 à J223 pour le 2^{ème} passage du satellite 16 sur la période de 20h à 21.2h pour l'antenne ULG0

Sur le Tableau E-13, on constate que les J220, J222 et J223 sont très fortement corrélés parce que ce sont les jours avec le moins de précipitations. Néanmoins, on pouvait très bien voir sur la Figure I-8 que les J219 et J221 étaient différents du J220, mais ce n'est pas pour cela qu'ils se ressemblent entre eux. En effet, les J219 et J221 possédaient des quantités de précipitations assez importantes, mais 10.6 mm sont tombés pour le J221 contre la moitié pour le J219. Le fait que ces deux jours ne sont pas corrélés contrairement à ce qu'il se passait lorsque les mesures ont lieu tôt dans la journée pour les autres satellite (6,10 et 14) montre que l'importance des précipitations a également un impact. Il n'y pas simplement deux cas extrêmes : mouillé ou sec.

La conclusion pour les J219 à J223 est la même que précédemment. Lorsque les mesures ont lieu tôt dans la journée, les J219, J220 et J222 sont plus humides que les J221 et J223 et cela est visible dans les résidus du SNR. Cependant, lorsque le trajet du satellite a lieu plus tard dans la journée, l'impact des précipitations a lieu pour les J219 et J221. Par conséquent, cela signifie que la surface réfléchissante a eu le temps de sécher au cours du J220 et que les précipitations du J221 ont un impact pour le J222 tôt dans la journée et pour le J221 plus tard dans la journée.

SAT 19 ULG0 (2.5h-3h)	J36	J37	J38
J37	0.8916		
J38	0.9043	0.8987	
J41	0.8585	0.8001	0.8361
SAT 19 ULG1 (2.5h-3h)	J36	J37	J38
J37	0.968		
J38	0.9438	0.9658	
J41	0.9354	0.9121	0.9186

Tableau E-14 : Corrélation entre les résidus SNR des J36, J37, J38 et J41 pour le 1^{er} passage du satellite 19 sur la période de 2.5h à 3h pour les deux antennes

Pour le Tableau E-14, pour l'antenne ULGO, on peut voir que les trois premiers jours sont plus corrélés entre eux qu'avec le J41 comme cela était visible lors de la comparaison visuelle des résidus. De plus, la différence est assez grande pour dire que le J41 est différent des trois autres. Toutefois, pour la deuxième antenne, la corrélation entre ces trois jours et le J41 est trop importante pour dire que ces résidus se comportent de manière différente même si elle reste inférieure à la corrélation entre ces trois jours entre eux.

F. Conclusion

Le but de ce travail est de déterminer s'il était possible de détecter des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante grâce à des données GPS.

Les données utilisées sont issues de deux antennes situées sur le toit du bâtiment B5a au Sart Tilman. Un récepteur géodésique de la marque Septentrio est relié à chacune des antennes. Ces dernières sont fixes et permettent de collecter des données tout au long de l'année. L'environnement entourant celle-ci est de type urbain et il existe un grand nombre d'objets différents sur lesquels un signal GPS peut être réfléchi avant d'atteindre l'une ou l'autre antenne (c'est ce qu'on appelle le multi trajet). Les observables (mesures de codes et mesures de phases) sont sensibles à ce phénomène et le multi trajet apporte des erreurs de l'ordre du mètre pour les mesures de codes et de l'ordre du centimètre pour le deuxième type d'observable.

En ce qui concerne le signal GPS, trois ondes porteuses possédant des fréquences (et longueurs d'onde) différentes permettent de transporter les différents codes. Dans le cadre de ce travail, nous avons décidé de travailler avec un type de code ainsi qu'avec les valeurs de SNR (signal to noise ratio) dont une est disponible pour chaque onde porteuse. Ce dernier type de données a été utilisé tout au long de ce travail afin de répondre à la question de recherche. En effet, cette valeur permet de constater la présence de multi trajet ainsi que des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante.

Afin d'extraire les propriétés de la surface réfléchissante, il est nécessaire de séparer le SNR lié au signal direct et la partie du SNR causée par le multi trajet. Pour ce faire, un polynôme de degré 4 a été ajusté aux valeurs du SNR en fonction du temps. Par conséquent, l'ajustement permet de modéliser la partie du SNR liée au signal direct et les résidus représentent la partie du SNR liée au multi trajet. L'étude des résidus du SNR en fonction du temps a permis de constater des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante.

En effet, nous avons pu montrer qu'en fonction de la présence ou l'absence de précipitations les résidus du SNR se comportaient différemment. Nous avons également mis en évidence que ces derniers étaient influencés par la quantité de précipitations. Ces deux observations ont pu être vérifiées grâce à l'étude des coefficients de corrélation entre les résidus du SNR de différents jours.

Grâce à la méthodologie mise en place, nous souhaitons aussi quantifier les variations entre les résidus des différents jours à l'aide de l'extraction de l'amplitude et de la fréquence des résidus du SNR au cours du temps. L'importance du choix de la taille des fenêtres ainsi que du choix du seuil afin de calculer ces deux paramètres a été mis en avant. On a constaté qu'il serait nécessaire de trouver une autre façon d'extraire ces paramètres. Suite à l'extraction d'une valeur de fréquence en un instant, nous avons utilisé l'équation (7) permettant de calculer la hauteur entre l'antenne et la surface réfléchissante. Deux problèmes se sont posés. Premièrement, cette équation est mise en place grâce à l'hypothèse que la surface réfléchissante est horizontale. Néanmoins, cela peut souvent ne pas être le cas dans notre environnement de travail. En effet, à part les toits des différents bâtiments et le sol, les

surfaces sur lesquelles le signal pourrait être réfléchi ne sont jamais horizontales. Deuxièmement, il est nécessaire de déterminer un seuil afin de calculer la périodicité de la fonction d'autocorrélation obtenue grâce aux résidus du SNR. Ce seuil a été déterminé individuellement selon la fréquence de l'onde porteuse mais de manière manuelle. Nous avons constaté qu'en modifiant cette valeur, la fréquence obtenue pouvait changer radicalement. Cette étape manuelle ne permet pas d'obtenir des valeurs de fréquences assez exactes pour calculer une hauteur avec une précision suffisante.

De cette façon, nous pouvons répondre à la question de recherche qui était est-il possible de détecter des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante grâce à des données GPS. Les données GPS nous permettent de détecter des variations dans les propriétés de la surface réfléchissante. Nous avons mis en avant les changements dans les résidus du SNR en fonction de la présence ou de l'absence de précipitations. Il existe également un lien entre le comportement de ses résidus et la quantité de précipitations.

G. Perspectives

Différents points de la méthodologie mise en place peuvent être améliorés afin d'obtenir de meilleurs résultats et cela de manière plus automatique.

Premièrement, le degré du polynôme utilisé afin d'extraire le SNR dû au multi trajet pourrait être déterminé selon la forme du graphique du SNR en fonction du temps. En effet, plutôt qu'utiliser le même degré pour tous les passages de tous les satellites des différents jours, il faudrait tester plusieurs degrés assez faibles, inférieurs à 10, et celui qui s'ajuste au mieux à la fonction devrait être retenu. Le degré ne doit pas être trop élevé afin que le polynôme ne s'ajuste pas au multi trajet. Dès lors, le polynôme amenant les résidus les plus faibles sera sélectionné.

Ensuite, plutôt qu'utiliser des données météorologiques mesurées à Liège pour une zone au Sart Tilman, il faudrait mettre en place une mesure de l'humidité plus précise en particulier sur les toits. En effet, des flaques sont présentes plusieurs jours après des précipitations et semblent avoir un impact assez important pour certains satellites lorsque le signal envoyé est réfléchi sur ces surfaces. Pour ce faire, il faut posséder du matériel, ce qui n'a pas pu être mis en place pour ce travail en raison de la situation sanitaire.

De plus, l'extraction de l'amplitude et de la fréquence n'est ni assez automatique ni efficace. Ainsi, les hauteurs obtenues ne sont pas assez précises que pour mesurer des hauteurs de neige. Elles permettent seulement d'estimer et d'aider à déterminer sur quel objet la réflexion a lieu. Qui plus est, l'amplitude calculée n'est pas assez proche de l'amplitude du SNR causé par le multi trajet pour quantifier des changements entre les différents jours et elle est influencée par différents facteurs comme le bruit.

Enfin, un environnement plus simple, c'est-à-dire où la surface autour de l'antenne serait horizontale et où on serait en présence de moins d'objets sur lesquels le signal peut être réfléchi, permettrait de s'assurer que la hauteur calculée est bien la hauteur entre la surface réfléchissante et l'antenne puisque la surface ne pourrait pas posséder une inclinaison. De plus, cela permettrait de conserver la même hauteur tout au long du trajet du satellite et aucun « saut » ne serait possible d'une hauteur à une autre. En effet, dans notre cas, il est possible que le signal réfléchisse sur le sol ensuite sur un toit possédant une hauteur inférieure à celui sur lequel se trouve l'antenne et enfin sur ce dernier si par chance, le signal n'est pas réfléchi sur une surface inclinée ou sur un objet plus complexe.

H. Bibliographie

- Aspexit, 2020. *Géopositionnement en agriculture*. Aspexit.
<https://www.aspexit.com/geopositionnement-en-agriculture/>. Consulté le 16 août 2020.
- Benson H., 2016. *Physique 3 - Ondes, optique et physique moderne*. 5^e éd. Louvain-la-Neuve : De Boeck supérieur, 666p.
- Beranek L.L. & Mellow T.J., 2012. Chapter 1 - Introduction and terminology. *In*: Beranek, L.L., Mellow, T.J. eds. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press, 1–19.
- Bilich A. & Larson K.M., 2007. Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). *Radio Science* **42**(6).
- Bilich A., Larson K.M. & Axelrad P., 2008. Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Boliva. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **113**(B4).
- Des Clics Nomades, n.d.. *La Belgique : Historique Météo*. Historique-meteo.
<https://www.historique-meteo.net/europe/belgique/2019/08/>. Consulté le 10 juillet 2020.
- Hakansson M., 2020. GNSS hardware biases in code and carrier phase observables, Thèse de doctorat, Stockholm, KTH School of Architecture and The Built Environment, inédit
https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1390435/FULLTEXT01.pdf?fbclid=IwARONMopI7XYrMigudMK8KaYzWxK6zCxMr_povaQQU1fYpeCXTAbM35Pwz84
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H. & Wasle E., 2008. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems : GPS, Glonass, Galileo, and more*. Graz : SpringerWienNewYork, 516p.
- Kurum M., Gurbuz A.C., Nelson C., Orsini L. & Scheider M., 2019. On the Feasibility of Smartphone-based Interferometric GNSS Reflectometry. Presented at the ION 2019 Pacific PNT Meeting Honolulu, Hawaii, 635–640.
- Larson K.M. & Nievinski F.G., 2013. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. *GPS Solut* **17**(1), 41–52.
- Larson K.M., Small E.E., Gutmann E., Bilich A., Axelrad P. & Braun J., 2008. Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. *GPS Solut* **12**(3), 173–177.
- Larson K.M., Small E.E., Gutmann E.D., Bilich A.L., Braun J.J. & Zavorotny V.U., 2008. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters* **35**(24).
- MathWorks, n.d.. *Find Periodicity Using Autocorrelation*. MathWorks.
<https://nl.mathworks.com/help/signal/ug/find-periodicity-using-autocorrelation.html>. Consulté le 18 mai 2020.

MathWorks, n.d.. *xcorr*. MathWorks. <https://nl.mathworks.com/help/matlab/ref/xcorr.html>. Consulté le 13 août 2020.

Mendonça M., Cavalheri E. P., Larocca A. P. & Santos M. C., 2019. Multi-GNSS implementation and assessment of the phase residual method for structures dynamic load and natural frequency estimation. *JISDM*.

Nasa, n.d.. Glossary. Nasa. <https://history.nasa.gov/CP-2156/glossary.htm>. Consulté le 11 août 2020.

Teunissen P.J.G. & Montenbruck O. (Eds.), 2017. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer International Publishing, Cham, 1335p.

Sanz Subirana J., Juan Zornoza J.M. & Hernández-Pajares M., 2013. GNSS Data Processing, Volume I : Fundamentals and Algorithms. Netherlands : Contactivity Bv, 233p.

Wang X., Zhang S., Wang L., He X. & Zhang Q., 2020. Analysis and combination of multi-GNSS snow depth retrievals in multipath reflectometry. *GPS Solut* **24**(3), 77. DOI :

Warnant R., 2018. Global Navigation Satellite Systems. Cours de master en sciences géographiques, orientation géomatique et géométrie, à finalité, Liège, Université de Liège, inédit

Warnant R., 2019. Advanced GNSS. Cours de master en sciences géographiques, orientation géomatique et géométrie, à finalité, Liège, Université de Liège, inédit

I. Annexe

La Figure I-1 reprend le développement permettant de passer des équations (4), (5) et (6) aux équations (4.1), (5.1) et (6.1). Pour ce faire, le multi trajet ainsi que le bruit des mesures de phases sont négligés par rapport à ceux des mesures de codes. En effet, ces derniers sont beaucoup plus importants pour les codes (de l'ordre du m) que pour les phases (de l'ordre du cm). En ce qui concerne les termes d'ionosphère, les coefficients contenant δ_1 ou δ_5 ainsi que l'ajout d'une mesure de phase d'une onde porteuse d'une autre fréquence permettent de les simplifier (par exemple, pour MP1, $2I_1 + \frac{2}{(1-\delta_1)}(I_2 - I_1) \approx 0$). L'ajout de ce coefficient ($\frac{2}{(1-\delta_1)}$, dans cet exemple) ainsi que la mesure de phase d'une autre fréquence (Φ_2) permettent de supprimer le fait que les termes de délais ionosphériques se cumulent plutôt que de s'annuler comme les délais troposphériques. Puisque $2I_1 + \frac{2}{(1-\delta_1)}(I_2 - I_1)$ ne vaut pas tout à fait 0, un biais est ajouté dans le MP1 (tout se passe de la même façon pour MP2 et MP5), mais ce biais est retiré (de même que pour les termes d'ambiguïté initiale qui créent également un biais) en soustrayant la valeur moyenne d'un passage d'un satellite à chaque valeur (Teunissen et al., 2017).

$$MP1 = P_1 - \Phi_1 + \frac{2}{(1-\delta_1)}(\Phi_1 - \Phi_2) \quad (4)$$

$$MP1 = \left(D + T + I_1 + M_{1,g} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \varepsilon_{1,g} \right) - \left(D + T - I_1 + M_{1,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_1 N_1 + \varepsilon_{1,\phi} \right) + \frac{2}{(1-\delta_1)} \left[\left(D + T - I_1 + M_{1,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_1 N_1 + \varepsilon_{1,\phi} \right) - \left(D + T - I_2 + M_{2,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{2,\phi} \right) \right]$$

$$MP1 = 2I_1 + M_{1,g} - M_{1,\phi} - \lambda_1 N_1 + \varepsilon_{1,g} - \varepsilon_{1,\phi} + \frac{2}{(1-\delta_1)} [I_2 - I_1 + M_{1,\phi} - M_{2,\phi} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{1,\phi} - \varepsilon_{2,\phi}]$$

$$MP1 = -\lambda_1 N_1 + \frac{2}{(1-\delta_1)} [\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2] + M_{1,g} + \varepsilon_{1,g} \quad (4.1)$$

$$MP2 = P_2 - \Phi_2 + \frac{2\delta_1}{(1-\delta_1)}(\Phi_1 - \Phi_2) \quad (5)$$

$$MP2 = \left(D + T + I_2 + M_{2,g} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \varepsilon_{2,g} \right) - \left(D + T - I_2 + M_{2,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{2,\phi} \right) + \frac{2\delta_1}{(1-\delta_1)} \left[\left(D + T - I_1 + M_{1,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_1 N_1 + \varepsilon_{1,\phi} \right) - \left(D + T - I_2 + M_{2,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{2,\phi} \right) \right]$$

$$MP2 = 2I_2 + M_{2,g} - M_{2,\phi} - \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{2,g} - \varepsilon_{2,\phi} + \frac{2\delta_1}{(1-\delta_1)} [I_2 - I_1 + M_{1,\phi} - M_{2,\phi} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{1,\phi} - \varepsilon_{2,\phi}]$$

$$MP2 = -\lambda_2 N_2 + \frac{2\delta_1}{(1-\delta_1)} [\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2] + M_{2,g} + \varepsilon_{2,g} \quad (5.1)$$

$$MP5 = P_5 - \Phi_5 + \frac{2}{(1-\delta_5)}(\Phi_1 - \delta_5 \Phi_5) \quad (6)$$

$$MP5 = \left(D + T + I_5 + M_{5,g} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \varepsilon_{5,g} \right) - \left(D + T - I_5 + M_{5,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_5 N_5 + \varepsilon_{5,\phi} \right) + \frac{2}{(1-\delta_5)} \left[\left(D + T - I_1 + M_{1,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_1 N_1 + \varepsilon_{1,\phi} \right) - \delta_5 \left(D + T - I_5 + M_{5,\phi} + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_5 N_5 + \varepsilon_{5,\phi} \right) \right]$$

$$MP5 = 2I_5 + M_{5,g} - M_{5,\phi} - \lambda_5 N_5 + \varepsilon_{5,g} - \varepsilon_{5,\phi} + \frac{2}{(1-\delta_5)} [\delta_5 I_5 - I_1 + M_{1,\phi} - \delta_5 M_{5,\phi} + \lambda_1 N_1 - \delta_5 \lambda_5 N_5 + \varepsilon_{1,\phi} - \delta_5 \varepsilon_{5,\phi}]$$

$$MP5 = -\lambda_5 N_5 + \frac{2}{(1-\delta_5)} [\lambda_1 N_1 - \delta_5 \lambda_5 N_5] + M_{5,g} + \varepsilon_{5,g} \quad (6.1)$$

Figure I-1 : Développement des équations MP1, MP2 et MP5

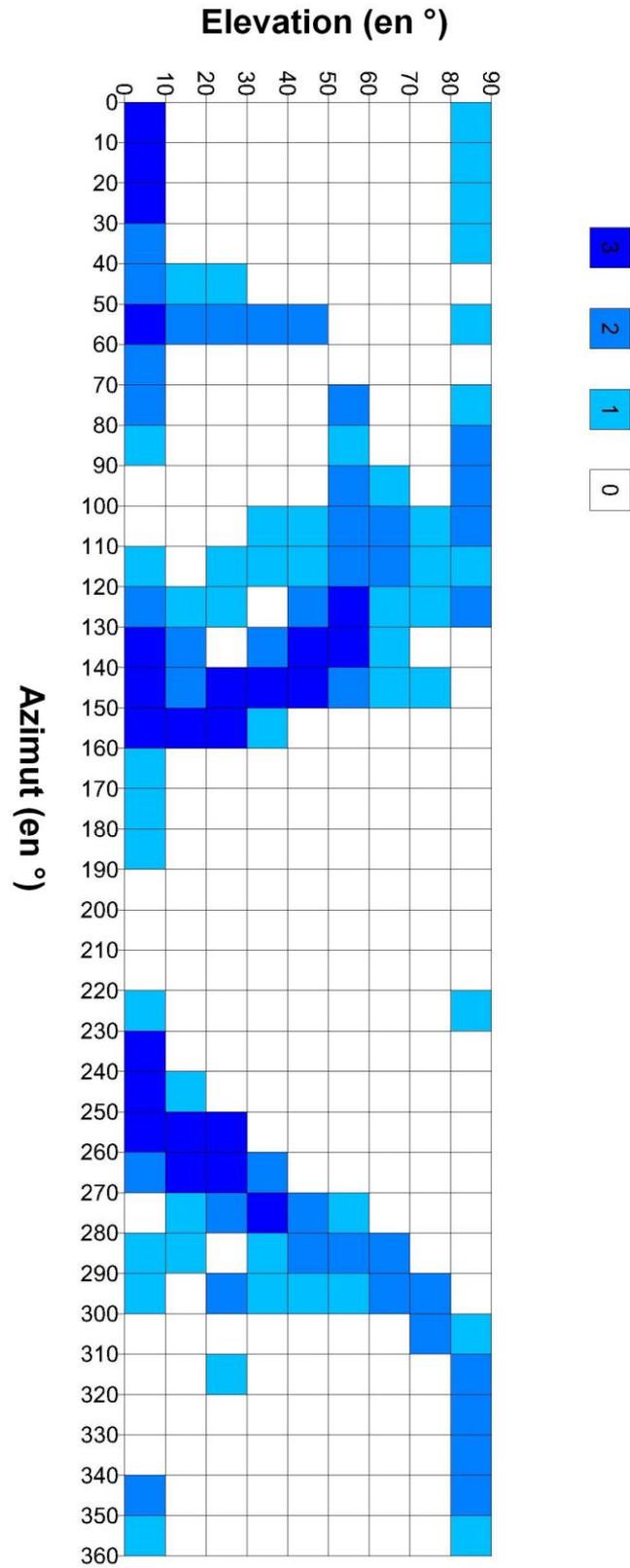


Figure I-2 : Grille du multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X400

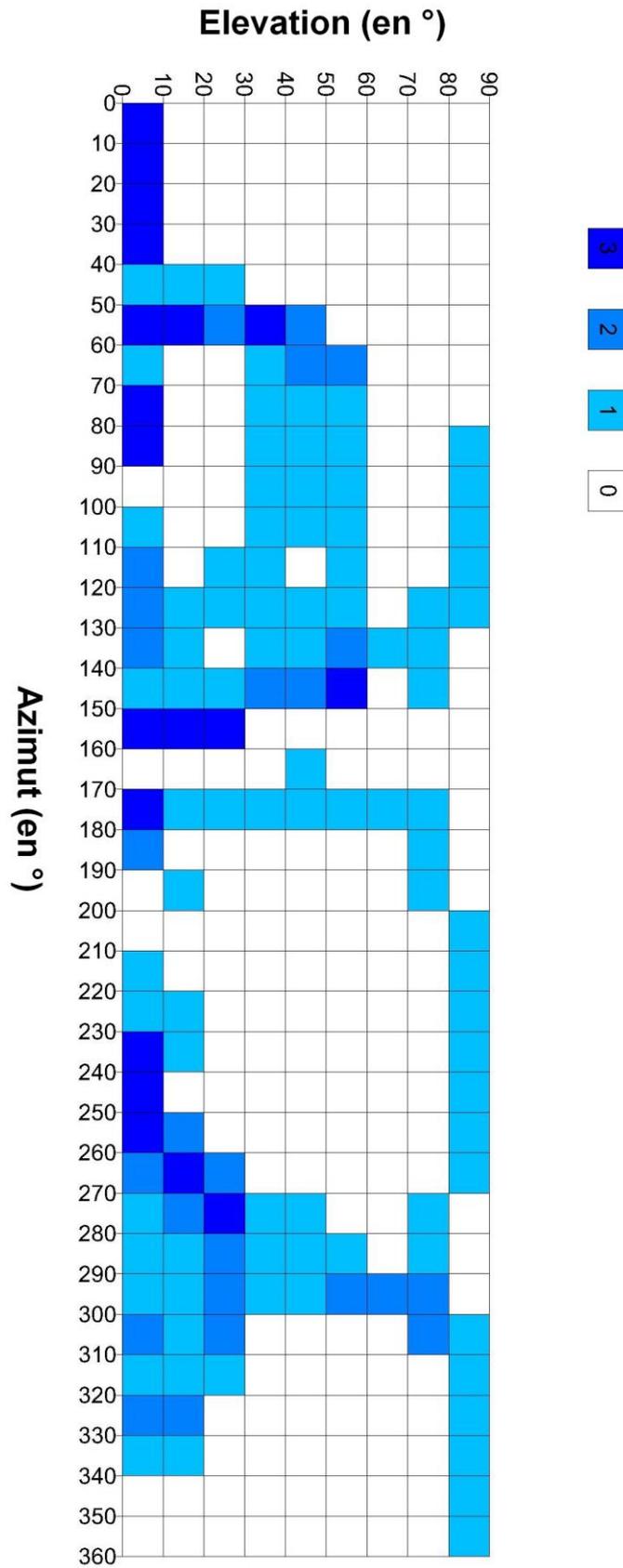


Figure I-3 : Grille du multi trajet selon la combinaison MP1 en fonction de l'élévation et de l'azimut pour le récepteur X501

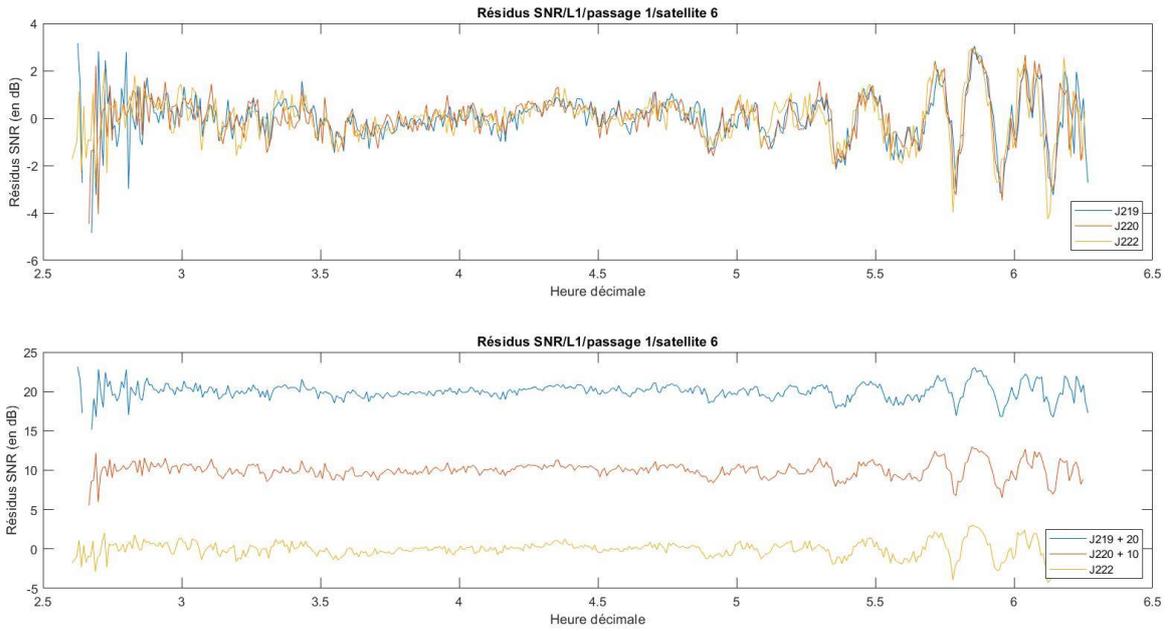


Figure I-4 : Comparaison des résidus SNR sur L1 pour les J219-J220-J222 du satellite 6 pour son 1^{er} passage pour ULG0

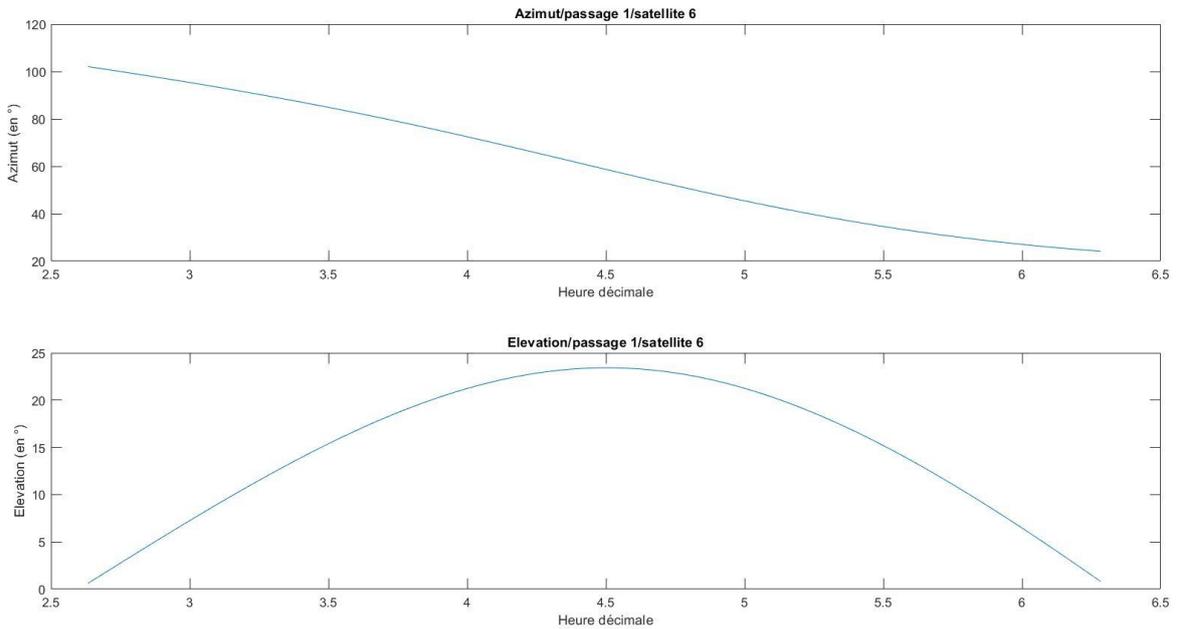


Figure I-5 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 6 durant son 1^{er} passage pour le J219

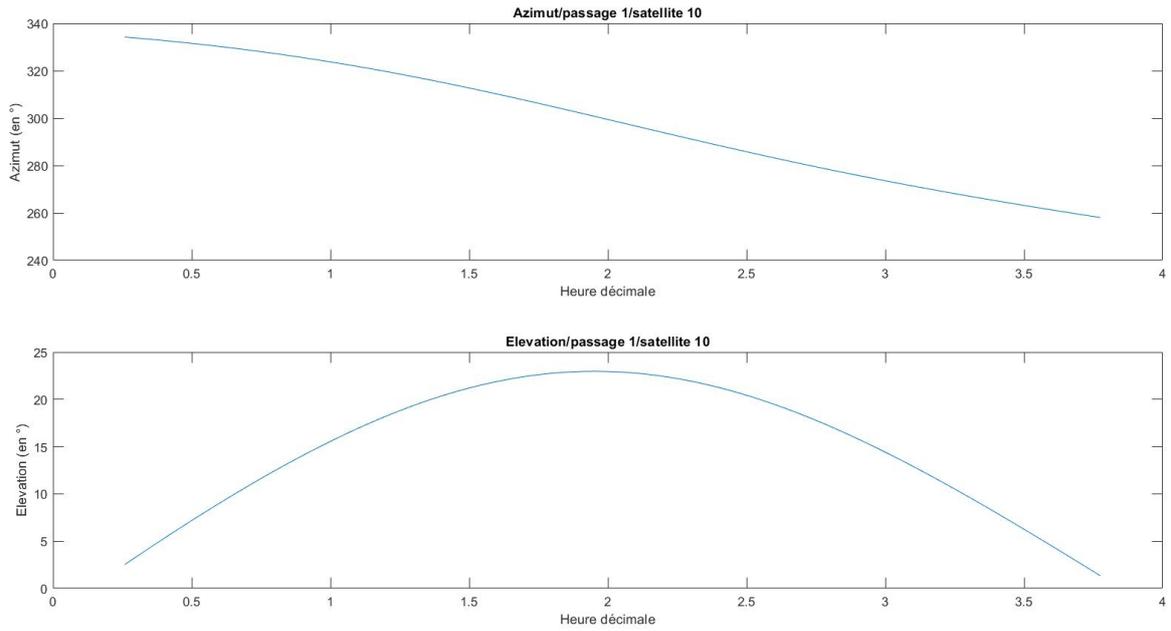


Figure I-6 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG1 du satellite 10 durant son 1^{er} passage pour le J219

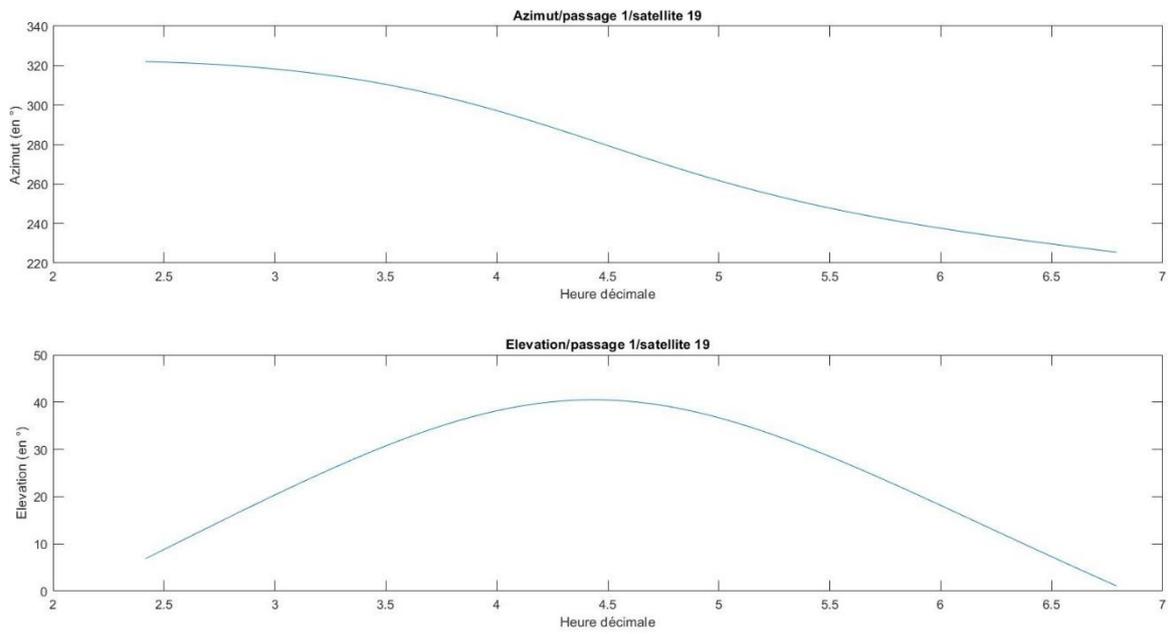


Figure I-7 : Azimut et élévation par rapport à l'antenne ULG0 du satellite 19 durant son 1^{er} passage pour le J36

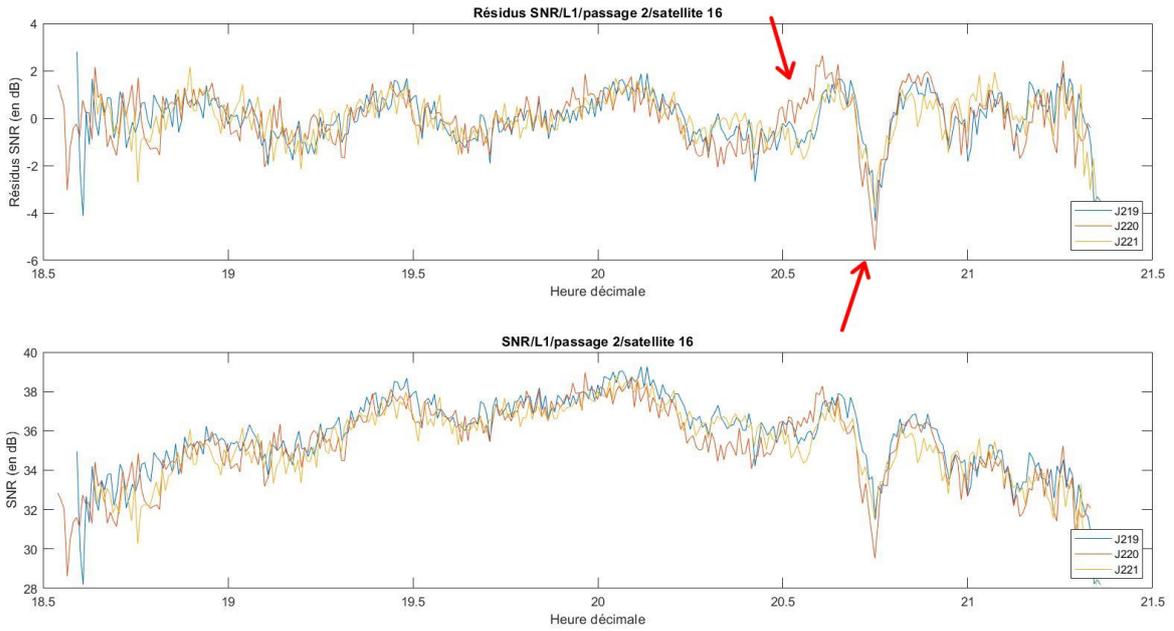


Figure I-8 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J219-J220-J221 du satellite 16 pour son 2^{ème} passage pour ULGO

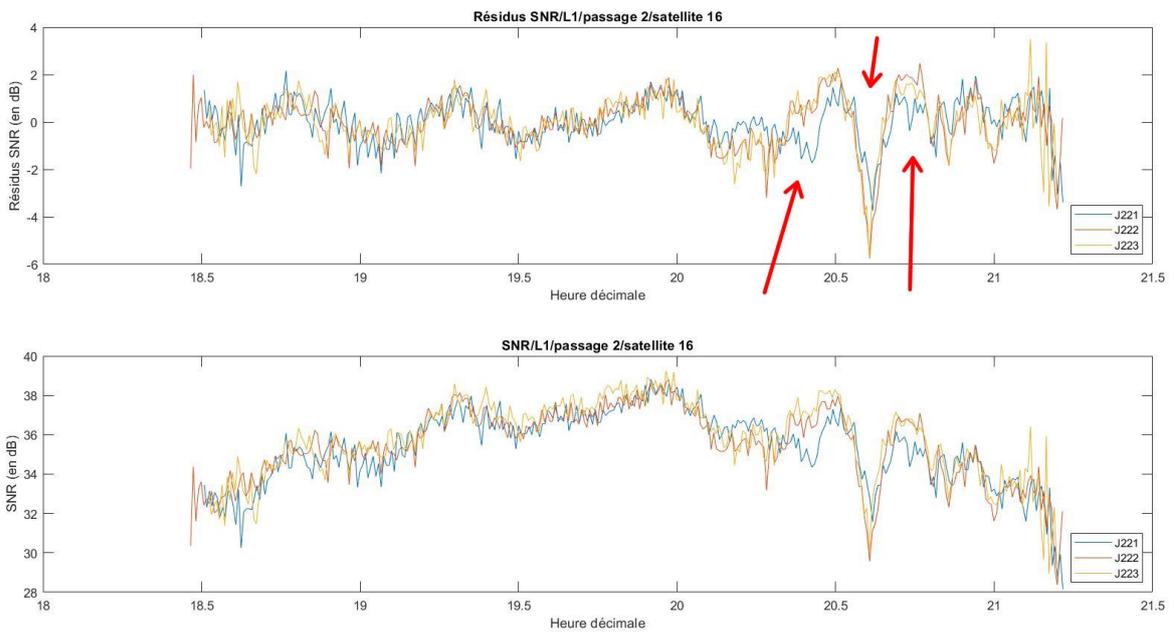


Figure I-9 : Comparaison des résidus SNR et du SNR sur L1 pour les J221-J222-J223 du satellite 16 pour son 2^{ème} passage pour ULGO