



HAL
open science

Suivi de l'humidité des sols par l'analyse des signaux GNSS

Benoît Presset

► **To cite this version:**

Benoît Presset. Suivi de l'humidité des sols par l'analyse des signaux GNSS. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01179438

HAL Id: dumas-01179438

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01179438>

Submitted on 22 Jul 2015

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir
le **DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Benoît PRESSET

Suivi de l'humidité des sols par l'analyse des signaux GNSS

Soutenu le 10 Juillet 2014

JURY

PRÉSIDENT : M. Jérôme Verdun, MC

MEMBRES : M. Joël Van Baelen, maître de stage
M. Laurent Morel, professeur référent et MC
M. Frédéric Durand, responsable de l'informatique scientifique
Mme Joëlle Duroy, MC

Remerciements

Je tiens, en premier aparté, à remercier mon maître de stage, M. Joël Van Baelen à l'origine de cette étude qui m'a donné l'occasion de me confronter au domaine de la recherche que j'ai abordé avec beaucoup de plaisir. Je le remercie en outre pour le temps qu'il a pu m'accorder tout au long de cette période et l'intérêt qu'il a pu porter dans la réalisation de mon travail de fin d'étude. Je souhaite également remercier mon professeur référent, M. Laurent Morel, pour les précieuses remarques qu'il a pu apporter dans la rédaction de ce mémoire.

Je remercie l'ensemble du laboratoire pour l'accueil chaleureux et notamment les doctorants pour leur sympathie et leur bonne humeur.

J'adresse également mes remerciements à Gaëtan Meunier, mon camarade de l'ESGT mais avant tout ami avec qui j'ai pu partager le bureau au sein du LaMP et pour les moments que l'on a pu passer ensemble à Clermont-Ferrand. Merci également à tous mes amis que j'ai pu rencontrer au cours de ces dernières années passées au Mans pour les moments inoubliables que l'on a pu vivre.

Je n'oublie évidemment pas ma famille qui a toujours été là pour moi. Mes parents qui m'ont transmis le goût de la vie et m'ont donné envie de découvrir le monde auprès des plus cool sœur et frère. Je souhaite enfin remercier ma copine, Marie-Clotilde Arias avec qui j'espère partir découvrir de nouveaux horizons et continuer de m'épanouir dans ma vie.

Liste des abréviations et acronymes

GLONASS : GLObalnaïa NAVigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma

GNSS : Global Navigation Satellite System

GPS : Global Positioning System

IRNSS : Indian Regional Navigational Satellite System

LaMP : Laboratoire de Météorologie Physique

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NSF : National Science Foundation

PRN : Pseudo-Random Noise

QZSS : Quasi-Zenith Satellite System

RINEX : Receiver INdependent EXchange format

SNR : Signal to Noise Ratio

Glossaire

A : Amplitude du SNR multi-trajet aux basses élévations (entre 10° et 25°).

Ψ : Déphasage du SNR multi-trajet aux basses élévations (entre 10° et 25°).

r : Coefficient de corrélation entre deux séries de données qui permet de montrer l'intensité de liaison entre celles-ci.

RINEX : Format de fichier international de mesures GNSS.

SNR : Rapport Signal sur Bruit, permet d'évaluer la qualité et la force d'un signal provenant d'un satellite, il s'agit du rapport entre le signal reçu et les bruits externes composites (bruit instrumental, de transmission, de corrélation avec les autres signaux, etc.).

Table des matières

| | | |
|--------------|--|-----------|
| I | <i>GNSS : Notions Fondamentales</i> | 11 |
| I.1 | Introduction | 11 |
| I.2 | Généralités | 11 |
| I.3 | Les Signaux GPS | 11 |
| I.3.1 | Ondes Porteuses..... | 12 |
| I.3.2 | Les Codes | 12 |
| I.3.3 | Message de Navigation..... | 12 |
| I.3.4 | Signal L2C..... | 13 |
| I.4 | Mesures GNSS : le Fichier RINEX | 13 |
| II | <i>GNSS et Humidité du Sol</i> | 15 |
| II.1 | Introduction | 15 |
| II.2 | Multi-Trajet | 15 |
| II.2.1 | Géométrie du Multi-Trajet..... | 15 |
| II.2.2 | Paramètres du Multi-Trajet..... | 16 |
| II.2.2.1 | Distance Radiale r | 16 |
| II.2.2.2 | Différence de Phase ψ | 17 |
| II.2.2.3 | Fréquence Multi-Trajet ω | 18 |
| II.2.3 | Rapport Signal sur Bruit (SNR)..... | 18 |
| II.2.3.1 | Définition | 18 |
| II.2.3.2 | Multi-Trajet et SNR..... | 18 |
| II.2.3.3 | SNR et Humidité du Sol | 19 |
| III | <i>Méthodologie</i> | 21 |
| III.1 | Mesures GNSS pour la Réflectométrie : Recommandations | 21 |
| III.2 | Démarche | 21 |
| III.2.1 | Logiciel TEQC..... | 22 |
| III.2.2 | GNSS Planning Online..... | 23 |
| III.2.3 | Scripts Matlab | 23 |
| IV | <i>Dispositif Expérimental</i> | 25 |
| IV.1 | Caractéristiques de l'Étude | 25 |
| IV.1.1 | Campagne de Mesure : Projet GNSS Agri | 25 |
| IV.1.2 | Présentation du Site | 25 |
| IV.1.3 | Zone d'Étude..... | 26 |
| IV.2 | Choix des Satellites | 26 |
| IV.3 | Mesures Brutes | 27 |
| IV.3.1 | Mesures Antenne GA00 | 27 |
| IV.3.2 | Mesures Externes : Pluviométrie et Humidité..... | 29 |
| IV.4 | Choix d'une Période d'Étude | 30 |
| IV.5 | Du SNR Brut au SNR Multi-Trajet | 30 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| V | Résultats | 33 |
| V.1 | SNR et Épisodes Pluvieux | 33 |
| V.1.1 | Amplitude A | 33 |
| V.1.2 | Déphasage ψ | 34 |
| V.1.3 | Ψ : Un Bon Marqueur Pluviométrique..... | 35 |
| V.1.3.1 | Précision à 1 jour près ! | 35 |
| V.1.3.2 | Une Présélection des Satellites Nécessaire ?! | 35 |
| V.2 | SNR et Humidité du Sol..... | 36 |
| V.2.1 | Résultats | 36 |
| V.2.2 | Approche Statistique..... | 37 |
| V.2.3 | Limites et Améliorations Possibles..... | 38 |
| V.2.3.1 | Le SNR : Une Mesure Restreinte de l'Humidité | 38 |
| V.2.3.2 | Corrélation entre $\Delta(\psi)$ et $\Delta(\text{Humidité})$ | 39 |
| V.2.3.3 | Entre la Théorie et la Pratique..... | 39 |
| V.3 | SNR et Humidité du Sol : Signaux L1P et L2P | 39 |
| V.4 | Conclusions..... | 41 |
| VI | Perspectives | 43 |
| VI.1 | Vers une Automatisation du Processus | 43 |
| VI.2 | Applications pour des Mesures Continues | 43 |
| VI.3 | Relation Mathématique entre SNR et Humidité du Sol..... | 43 |
| VI.4 | Vers d'autres Utilisations du SNR | 44 |

Introduction

Si 99 % de l'eau de la planète est contenue par les océans et les glaciers, l'humidité contenue dans le sol n'en reste pas moins une ressource importante et une composante clé dans le cycle hydrologique. Avec une part bien supérieure aux fleuves et aux rivières, cette forme d'eau joue un rôle majeur dans le développement de la biosphère et vient influencer des phénomènes climatiques tels que les sécheresses ou les inondations.

Fort de ce constat, l'Homme étant dépendant du bon développement de la biosphère, celui-ci est tenu d'être attentif aux quantités d'eau présentes dans le sol que ce soit pour optimiser ses pratiques agricoles ou encore pour la prévision d'événements météorologiques.

Dans le domaine de l'agriculture, la bonne connaissance de l'humidité du sol est un facteur important pour l'optimisation des récoltes. Si la mesure in situ de l'humidité est un bon moyen d'information sur la quantité d'eau présente en surface à petite échelle, son utilité se trouve très vite limitée lorsqu'il s'agit de modéliser spatialement sa répartition, et ce pour diverses raisons. Tout d'abord, de nombreux protocoles de mesures in situ se distinguent ; certains font l'objet de mesures directes tandis que d'autres sont indirectes. Ceci rend alors la modélisation globale de l'humidité du sol difficile. De plus, une grande partie de ces protocoles met en œuvre des mesures sur un plan vertical, hors, la quantité d'eau au sol varie significativement sur un plan horizontal. Enfin, la mise en place de réseau de mesure in situ et leur mise en relation s'avère complexe tant sur un plan logistique qu'analytique : automatisation difficile, période de mesures différentes, le développement de la végétation rend difficile la gestion des capteurs, etc.

À l'heure des préoccupations sur le réchauffement climatique et sur la préservation des ressources naturelles, l'optimisation de la consommation d'eau dans le cadre de nos pratiques agricoles se pose pourtant comme une nécessité.

C'est dans ce contexte que l'utilisation d'un outil tel que la navigation guidée par satellite (de l'acronyme anglais *Global Navigation Satellite System* GNSS) fait son apparition, se posant alors comme potentielle solution à ces difficultés. En effet, si le lien est avéré entre humidité du sol et mesures GNSS, la mise en place de protocole fiable paraît réaliste avec notamment les services de mesures en temps réel rendues possibles par cet outil. Se pose alors la question de la façon dont on pourrait envisager le suivi de l'humidité du sol par l'analyse des signaux GNSS.

Ce travail développe dans un premier temps quelques principes fondamentaux relatifs aux systèmes GNSS et leur fonctionnement avant de déboucher sur les spécificités du phénomène de multi-trajet des ondes et leur lien avec l'humidité du sol. Il vient ensuite présenter la méthodologie suivie et la démarche mise en place pour la recherche de corrélation entre humidité du sol et signal GPS. La description du dispositif de mesure et des données observées conduit ensuite à une analyse comparative des signaux GPS avec des indicateurs d'humidité externes. Enfin, les résultats mis en avant permettent d'envisager certaines perspectives d'étude futures portant sur l'amélioration et le développement de cette utilisation des signaux GNSS pour le suivi de l'humidité des sols.

I GNSS : Notions Fondamentales

I.1 Introduction

Les systèmes satellitaires artificiels doivent leurs origines à un contexte historique tendu. En effet, c'est en pleine Guerre Froide que le monde assiste au lancement du premier satellite artificiel nommé Spoutnik 1 par l'union soviétique en 1957. Cependant, les origines de la navigation guidée par satellites GNSS à proprement parlée reviennent à l'armée américaine qui met en place le système Transit opérationnel dès 1960. À l'époque, une constellation de 5 satellites en orbite permet aux navires de l'US Navy de connaître leur position en mer.

Plus d'un demi-siècle plus tard, Transit a fait place au système GPS (*Global Positioning System*) dont le premier satellite fut lancé en 1974 pour être totalement opérationnel en 1995. De nos jours, la navigation par satellite est principalement assurée par ce système américain ainsi que le système russe GLONASS. De nouvelles constellations de satellites fleurissent, mises en œuvre par des pays différents, certains privilégient des systèmes régionaux tels que les indiens avec le système IRNSS ou les japonais avec QZSS tandis que d'autres instaurent des systèmes globaux comme le système chinois Beidou sans oublier le système européen Galileo dont les services devraient débiter avant la fin de l'année 2014.

I.2 Généralités

Le principe de base du GNSS est la résolution d'un problème de triangulation spatiale reposant sur la détermination des distances récepteurs terrestres – satellites. L'usage caractérise un système GNSS par trois segments : on parle du segment spatial, du segment de contrôle ainsi que du segment utilisateur. En prenant l'exemple du système américain GPS, son segment spatial représente l'ensemble de sa constellation de satellite ainsi que leurs caractéristiques soit 31 satellites opérationnels situés à environ 20 000 Km dont la période de révolution est de 11h58min répartis sur six plans orbitaux quasi circulaires inclinés de 55° par rapport au plan équatorial. Le segment de contrôle permet le pilotage et la surveillance du système, il est composé de deux stations de contrôle et 16 stations de poursuite dans le cas du GPS. Enfin, le segment utilisateur représente les nombreux usagers de la navigation guidée par satellite ainsi que des techniques de calcul du positionnement.

De nos jours, cette technologie a une portée très vaste ; on la rencontre bien évidemment au quotidien pour le transport routier mais elle a trouvé son application dans de nombreux autres domaines comme l'agriculture, l'aviation, la marine et bien évidemment la géodésie.

I.3 Les Signaux GPS

Le système GPS et plus largement les systèmes GNSS sont des systèmes dit « uni sens » (ou descendant). En effet, les satellites émettent des ondes radios modulées relativement complexes qui se propagent dans l'espace et dans les différentes couches de l'atmosphère avant d'être captées par une antenne réceptrice. Les signaux transmis par les satellites GPS sont « transportés » par des ondes porteuses modulées par différents codes ainsi qu'un message de navigation. Depuis 1999, l'heure est à la modernisation du système GPS dans l'idée de répondre le mieux possible aux nombreux utilisateurs. C'est dans cette logique de modernisation que de nouveaux signaux sont apparus permettant d'optimiser certaines applications mais également d'en apporter de nouvelles.



Figure I-1 : Triangulation GNSS

[mayerwin.free.fr]

I.3.1 Ondes Porteuses

Initialement, les signaux GPS sont « transportés » via deux ondes porteuses L1 et L2 de fréquence respective 1575,42 MHz et 1227,60 MHz. Avoir deux ondes porteuses hautes fréquences permet la mise en place de combinaisons linéaires notamment utilisées pour la correction des effets ionosphériques (combinaison L3 dite « *ionofree* »). En effet, les ondes sont ralenties lorsqu'elles traversent cette couche de l'atmosphère ce qui vient dégrader la qualité du positionnement. Depuis 2009, une troisième onde porteuse L5 de fréquence 1176,45 MHz a vu son apparition.

Physiquement, une onde porteuse s'apparente à une sinusoïde pure. Le problème en GNSS est que l'on ne parvient pas à mesurer le nombre de cycle entre le satellite émetteur et la station réceptrice, ce qui par extension nous empêche d'obtenir la distance qui les sépare. Pour faire face à ce problème (en positionnement absolu), les porteuses sont modulées par des codes pseudo-aléatoires (PRN pour *pseudo-random noise*). Il s'agit de séquences périodiques binaires c'est à dire une succession de séquences constituées uniquement de 1 et de 0. Chaque séquence est répétée pendant une période connue. Connaissant la vitesse à laquelle le code est généré, l'antenne réceptrice peut ainsi le convertir en unité de distance.

I.3.2 Les Codes

Ainsi, différents codes sont modulés sur chacune des porteuses. Initialement, on distinguait 3 codes dans le système GPS : le code C/A (*Coarse/Acquisition*), le code P (*Precision*) et le code Y combiné sur le code P. Chaque satellite dispose d'un code C/A qui lui est propre, il s'agit d'un code relativement court d'une durée de 1 microseconde (correspondant à une longueur d'onde de 300 mètres) ce qui permet aux antennes de le capter rapidement et d'avoir un premier positionnement « grossier ». Le code P dispose d'une longueur d'onde dix fois plus courte avec une séquence périodique beaucoup plus longue (7 jours). Pour que ce soit rendu possible, ce code est générée 10 fois plus vite que son homologue le code C/A. Dans une logique de protection de ce système mis en place par l'armée, un code Y tenu secret est combiné à ce code P. Le code C/A est porté uniquement sur L1 tandis que le code P(Y) est à la fois sur L1 et L2.

Face à l'utilisation grandissante de l'outil GNSS et l'apparition des nouvelles constellations, le GPS se modernise. De nouveaux codes sont ainsi apparus notamment sur la porteuse L5 voués pour une utilisation dans le domaine de l'aéronautique... Cette modernisation du système a également pour objet de séparer l'utilisation civile de l'utilisation militaire puisque jusqu'ici, le code Y militaire était combiné au code P. Cela a donc amené l'apparition du code militaire M sur L1 et L2 d'une part et des signaux L2C, L5 et L1C pour une utilisation civile (voir plus loin).

I.3.3 Message de Navigation

En plus du code, le signal est composé d'un message de navigation. Celui-ci a pour but de fournir des informations sur le satellite (orbite, décalage d'horloge, information sur la santé du satellite) qui l'émet mais également sur les autres satellites afin que leurs signaux soient plus vite captés une fois qu'ils seront dans le champ de vision de l'antenne. Il vient en outre donner une information permettant de trouver où l'on se trouve dans le très long code P (période de 7 jours) dans la logique d'une initialisation plus rapide. La modernisation du système et l'arrivée des nouveaux codes a également conduit à la création d'un nouveau message de navigation. Il s'agit du CNAV diffusé depuis le 28 avril dans le cadre de la première phase du lancement de ce message tel que décrit dans le communiqué de l'*U.S. Department of Defense* du 25 avril (NR-209-14). Ces caractéristiques différentes des messages de navigation originaux procurent une plus grande précision des paramètres dans la représentation quasi-Keplériennes des orbites, l'estimation de la position des satellites est ainsi améliorée.

I.3.4 Signal L2C

Le signal L2C est composé de deux codes : un code modéré CM de période 20 ms et un code long CL de période 1,5 s. Ceci présente l'avantage de pouvoir effectuer un positionnement en ne captant qu'un seul signal, d'où son application « civile ». Il présente de nombreux avantages techniques pour l'utilisation « grand public » par rapport aux autres signaux sur L1 ou même L5 ; supérieur pour la récupération des données et plus adapté pour des antennes tels que l'on peut en trouver dans les Smartphones ou autres (moins consommateurs d'énergie de part sa lente fréquence). Enfin, le signal L2C va particulièrement nous intéresser puisqu'il offre une protection d'inter corrélation de plus de 45 dB par rapport à L1 C/A. C'est-à-dire que le signal L2C d'un satellite est bien moins affecté par les signaux des autres satellites également captés. Le signal reçu est donc plus « pur », moins perturbé par les autres signaux, ce qui va permettre, en plus d'un meilleur positionnement, la mise en avant d'autres bruits externes aux signaux eux-mêmes tels que ceux causés par les phénomènes de multi-trajet.

Ces caractéristiques ont été étudiées pour répondre le mieux aux attentes des utilisateurs grand public. Néanmoins, le signal L2C n'est pour l'heure pas majoritairement émis par les satellites GPS puisqu'on le trouve seulement sur une dizaine de satellite sur les 31 que compte la constellation.

I.4 Mesures GNSS : le Fichier RINEX

Le fichier RINEX (*Receiver INdependent Exchange Format*) est un format de fichier développé par l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne (Suisse). Afin de pallier aux soucis de divergence des types de fichiers entre les constructeurs de récepteur GNSS, le format RINEX reprend les données brutes dans un format normalisé. Il existe plusieurs types de fichiers RINEX qui se distinguent par leurs extensions¹ suivant les données qu'ils contiennent : on va avoir un fichier contenant les données d'observations (.13O), un fichier contenant les messages de navigation (.13N) des satellites, un autre pour les messages de navigation du système GLONASS (.13G). On peut également trouver un fichier contenant des données météorologiques (.13M) lorsque le récepteur est couplé à des capteurs adéquats. Quelque soit le fichier RINEX, sa nomenclature est normalisée.

Depuis l'avènement du GNSS, le fichier RINEX a subi quelques modifications notamment dues à des changements tels que l'apparition des satellites GLONASS. Actuellement, on utilise le format RINEX 2.10 et l'arrivée de Galileo induira l'utilisation de la version 3.0 récemment créée.

¹ L'extension des fichiers RINEX est composée d'un nombre suivi d'une lettre, le nombre représente l'année (13 pour 2013, 14 pour 2014, etc.) et la lettre le type de fichier.

II GNSS et Humidité du Sol

II.1 Introduction

Comme on a pu le constater précédemment, le GNSS trouve son utilité dans de nombreux domaines. Cette technique permet notamment la navigation et le repérage de nombreux véhicules. Elle joue également un rôle important pour les travaux de relevés (d'état des lieux, topographiques, etc.) mais elle est aussi utilisée dans des domaines qui peuvent sembler moins intuitifs. La complexité du traitement GNSS et les nombreux éléments extérieurs qui rentrent en compte dans les calculs en font un moyen innovant pour la modélisation de ces phénomènes. De nos jours, les signaux GNSS permettent par exemple la représentation tridimensionnelle de l'humidité présente dans l'atmosphère à partir de la mesure du retard des signaux, c'est la tomographie atmosphérique.

Récemment, la corrélation entre humidité du sol et signal GNSS a également pu être mise en avant. Ainsi, on a pu remarquer que le signal GNSS, en partie réfléchi au sol avant d'être capté par une antenne, pouvait nous apporter des informations précieuses sur la quantité d'humidité du sol environnant. Source d'erreur grossière dans le positionnement, le phénomène de multi-trajet des ondes GPS se poserait alors comme une opportunité et on peut dès lors imaginer trouver son application dans la résolution de problèmes tels que l'irrigation des cultures.

II.2 Multi-Trajet

L'utilisation principale des systèmes GNSS est, par définition, celle du positionnement ponctuel plus ou moins précis. Pour ce faire, de nombreuses erreurs sont modélisées et prises en compte dans le calcul et notamment celle due à la réflexion du signal jusqu'à l'antenne réceptrice. Dans cette partie, nous allons dans un premier temps nous intéresser à la géométrie du multi-trajet ce qui va nous permettre dans un second temps de définir les différents paramètres de ce phénomène.

II.2.1 Géométrie du Multi-Trajet

Le multi-trajet d'un signal GNSS peut être la cause d'erreur grossière de positionnement, notamment lorsque le signal se trouve réfléchi sur une surface telle que celle d'un bâtiment ou encore une grande étendue d'eau. C'est pourquoi, une grande rigueur est préconisée lors de mesures en vue d'un positionnement précis à proximité de telles surfaces.

Les ondes émises par les satellites sont des ondes tridimensionnelles qui sont - même en l'absence de surface de réflexion telles que précédemment décrites - systématiquement réfléchies sur la surface du sol à proximité de l'antenne réceptrice, notamment lorsque les élévations des satellites sont faibles (voir plus loin). Le signal reçu est alors une combinaison d'un signal direct et d'un signal réfléchi. Le signal réfléchi parvient à l'antenne avec un retard δ .

$$\delta = 2 \cdot h \cdot \sin\beta \quad (\text{II-1})$$

Où h représente la hauteur d'antenne et β l'angle de réflexion au sol (cf. figure II-1 (a)).

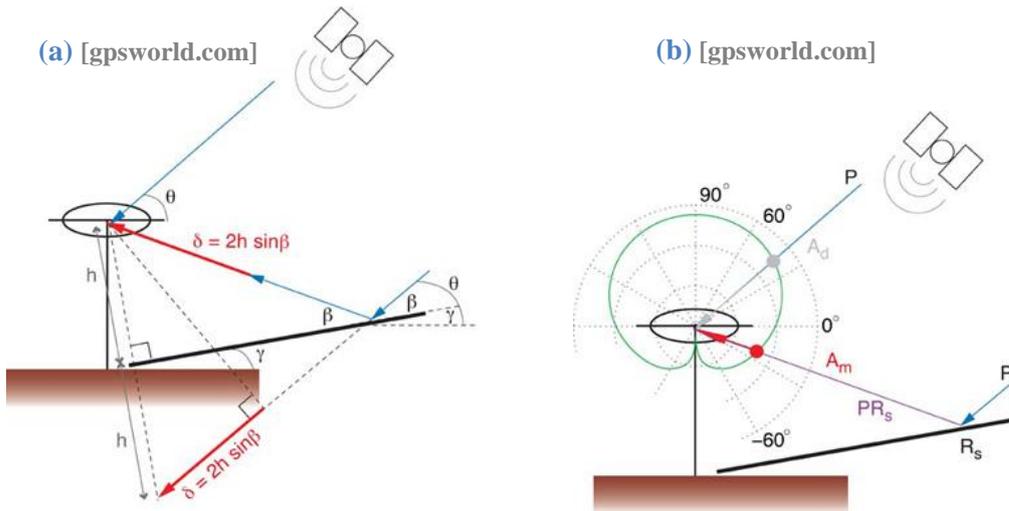


Figure II-1 : Géométrie du Multi-Trajet

- (a) Une antenne d' hauteur h capte le signal d'un satellite à une élévation θ . Un rayon parallèle au rayon du signal direct est réfléchi sur une surface inclinée de γ par rapport à l'horizontale. β représente l'angle de réflexion. Cette réflexion engendre un retard δ du signal réfléchi qui va affecter le signal total.
- (b) Signal incident P , d'une part reçu directement et d'autre part réfléchi sur une surface R_s . Le diagramme de gain d'antenne (en vert) révèle la plus grande quantité d'énergie reçue par les signaux captés aux élévations proches du zénith. Le signal global est la combinaison du signal direct avec le signal réfléchi PR_s ; la quantité d'énergie reçue par l'antenne du point de vue de l'amplitude est plus faible pour le signal réfléchi PR_s que pour le signal direct P . A_m et A_d représentent respectivement l'amplitude du signal réfléchi et du signal direct.

La surface de réflexion apporte alors une perturbation qui va venir bruyter le signal réfléchi composite du signal total. Ce bruitage va impacter d'une part la fréquence et d'autre part l'amplitude de l'onde totale reçue par l'antenne. Aux hautes élévations, ce phénomène de multi-trajet est limité et l'énergie reçue est principalement due au signal direct. Cependant, aux élévations les plus basses (inférieures à 25°), l'antenne reçoit une part plus importante des signaux réfléchis (cf. figure II-1 (b)).

Par cette approche géométrique simple, mais néanmoins explicite du phénomène de multi-trajet des ondes GNSS, on peut retenir que cette géométrie se caractérise par un point d'envoi, un point de réception ainsi qu'une surface réfléchissante. Une bonne visualisation géométrique de ce phénomène va nous permettre de dégager différents paramètres utiles à une analyse fine du problème.

II.2.2 Paramètres du Multi-Trajet

La réflexion d'une partie du signal sur une surface réfléchissante joue donc un rôle sur le signal global capté par l'antenne. Cette perturbation subite va se retrouver au niveau de certains paramètres qui vont nous permettre de réaliser des analyses spatiales et comportementales des signaux réfléchis.

II.2.2.1 Distance Radiale r

La distance radiale r représente la distance horizontale entre l'antenne et le point de réflexion au sol d'un rayon. En reprenant la représentation géométrique définie précédemment (figure II-1) et en simplifiant cette fois à une surface horizontale autour de l'antenne ($\gamma = 0$), on met facilement en avant l'expression de cette distance radiale r fonction de la hauteur d'antenne h et de l'élévation du satellite θ (figure II-2).

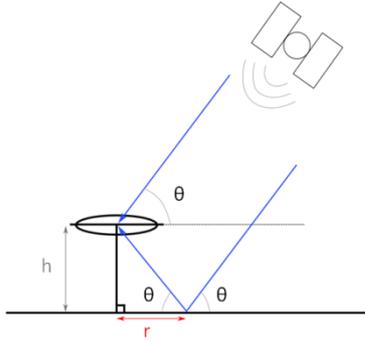


Figure II-2 : Distance Radiale r

r est fonction direct de l'élévation θ et de la hauteur d'antenne h .

$$r = \frac{h}{\tan \theta}$$

II-2

Ce paramètre a une importance non négligeable dans l'interprétation des résultats d'analyse que nous verrons par la suite. En effet, en fonction des caractéristiques d'un site d'observation, il va être important de connaître le lieu géométrique d'où l'information provient. Aussi, cette information est accessible grâce à la distance radiale r ainsi que l'azimut du satellite.

Nous verrons par la suite qu'il sera nécessaire de sélectionner certains lieux d'intérêt autour d'une antenne et donc d'en écarter d'autres du fait de la non-uniformité du sol autour du dispositif. À titre d'exemple, pour une station positionnée à une hauteur $h = 3$ m, un azimut donné et pour des valeurs d'élévations comprises entre 5° et 25° , le point de réflexion du signal va se situer à une distance variant de 34 m ($\theta = 5^\circ$) à 6 m ($\theta = 25^\circ$).

II.2.2.2 Différence de Phase ψ

Le signal reçu par une antenne GNSS est donc une « combinaison » entre un signal direct et un signal réfléchi. On a pu se rendre compte géométriquement que le signal réfléchi parcourt un « chemin » plus long que le signal direct. De là, on peut facilement comprendre que ce signal parvient à l'antenne avec un retard et que par conséquent l'onde du signal réfléchi n'est pas en phase avec l'onde du signal direct.

Le signal global reçu est donc la somme de signaux présentant une différence de phase nommé ψ . Comme démontré par *Bilich and Larson* [2007], ψ est fonction de la géométrie satellite – récepteur telle qu'elle a été présentée précédemment (figure II-1). On a pour expression de ψ :

$$\psi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \delta$$

II-3

$$\psi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot h \cdot \sin \beta$$

II-4

$$\psi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot h \cdot \sin (|\theta - \gamma|)$$

II-5

Avec $\gamma = 0$

$$\psi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot h \cdot \sin (|\theta|)$$

II-6

Dans laquelle λ représente la longueur d'onde de la porteuse considérée soit λ_{L1} ou λ_{L2} (respectivement 19,0 cm et 24,4 cm).

II.2.2.3 Fréquence Multi-Trajet ω

On en vient maintenant au paramètre essentiel qui caractérise le multi-trajet et à partir duquel vont s'appuyer les grandeurs calculées pour nos analyses. La fréquence multi-trajet ω est le taux de changement de la phase au cours du temps qu'on obtient donc en dérivant ψ par rapport au temps t . Ainsi, on a :

$$\omega = \frac{d\psi}{dt} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot h \cdot \cos(\theta - \gamma) \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

II-7

En considérant le sol comme une surface proche de l'horizontale, on peut simplifier l'expression en admettant que θ est très grand devant γ . On a alors $\theta \sim \beta$ et $\frac{d\theta}{dt} \sim \frac{d\beta}{dt}$, l'expression de ω devient alors :

$$\omega = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot h \cdot \cos \theta \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

II-8

Dès lors, grâce à cette expression, on peut d'ores et déjà faire le constat que, pour une hauteur d'antenne donnée et une des deux ondes porteuses considérée (longueur d'onde λ donnée), la fréquence multi-trajet ω va être amoindrie à mesure que le satellite va avoir une élévation importante. Le phénomène de multi-trajet va donc être principalement marqué pour des élévations de satellites basses (valeur de $\cos \theta$ élevée). Ainsi, afin d'exploiter efficacement les signaux issus du multi-trajet, il conviendra de s'intéresser aux élévations inférieures à 30° .

II.2.3 Rapport Signal sur Bruit (SNR)

II.2.3.1 Définition

Le rapport signal sur bruit (SNR pour *Signal to Noise Ratio* en anglais) est une grandeur enregistrée par le récepteur GNSS sur chacune des deux ondes porteuses L1 et L2. De manière générale, il permet d'évaluer la qualité et la force d'un signal provenant d'un satellite, il s'agit du rapport entre le signal reçu et les bruits externes composites (bruit instrumental, de transmission, de corrélation avec les autres signaux, etc.). Comme le définit *Bilich and Larson* [2007], l'utilisation du SNR permet d'éviter l'analyse du positionnement GNSS pour en faire ressortir les erreurs dues au multi-trajet (traitement complexe faisant intervenir les calculs de doubles différences).

Dans les récepteurs GNSS, le SNR s'obtient à partir des boucles de poursuite. Il s'agit de systèmes électriques itératifs de contrôle comprenant notamment un oscillateur de fréquence et un détecteur de phase. Ce mécanisme permet de générer une erreur de signal obtenue en mettant en relation un signal externe avec le signal capté (différence entre les deux). Le signal en entrée est ainsi ajusté. On distingue deux types de boucles de poursuite dans les systèmes GNSS : une boucle de poursuite de la porteuse et une boucle de poursuite du code. Cette dernière met en relation un bruit pseudo-aléatoire (PRN) présent dans le signal en entrée, avec un autre généré par le mécanisme afin de le modéliser au mieux. Une fois identifié, le PRN permet d'obtenir le SNR.

C'est à partir de ce rapport signal sur bruit que l'on va pouvoir mettre en avant le phénomène de multi-trajet.

II.2.3.2 Multi-Trajet et SNR

Comme on a pu le voir précédemment, une part du signal reçu est réfléchi au sol avant de parvenir à l'antenne. Le signal total reçu est alors une combinaison d'un signal direct et d'un signal réfléchi. Cette réflexion au sol produit des interférences qui vont se retrouver sur le signal final. Ces interférences vont venir altérer le signal GNSS en apportant des oscillations dont les fréquences sont variables.

Il est possible de trouver l'expression du SNR de manière géométrique en visualisant le diagramme de phase décrit par la boucle de poursuite de la porteuse. Il s'agit de la représentation bidimensionnelle d'une coupe perpendiculaire à la direction de propagation du signal incident.

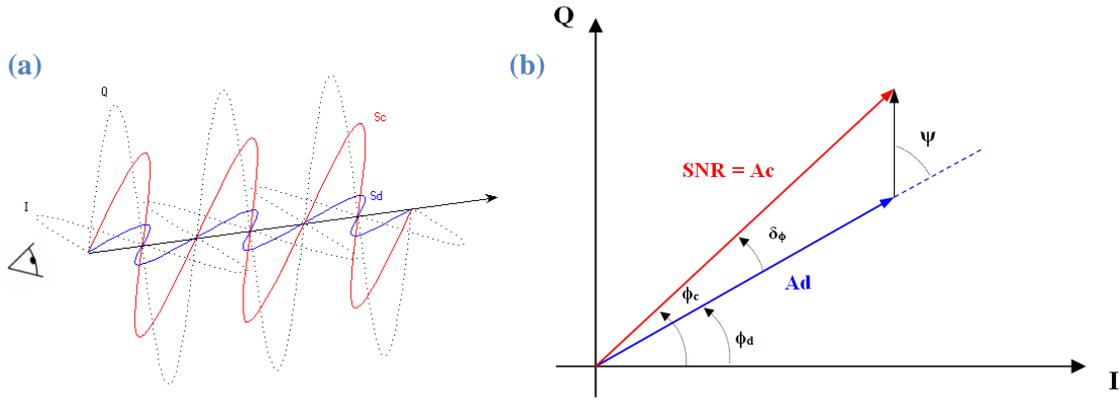


Figure II-3 : Trajectoire d'une Onde et Diagramme de Phase

(a) Représentation Schématique 3D – Trajet de l'onde GNSS

Les axes I et Q représentent une phase à 0° et à 90° . La courbe bleue modélise le signal direct S_d que recevrait l'antenne en l'absence de multi-trajet, la courbe rouge représente le signal composite S_c effectivement reçu.

(b) Diagramme de phase décrit par la boucle de poursuite de la porteuse : axe I phase à 0° , axe Q phase à 90°

Dans des conditions libres de tous multi-trajets, le signal reçu correspondrait simplement au signal direct d'amplitude A_d et de phase ϕ_d . Or, le signal réfléchi d'amplitude A_m provoque une erreur sur la phase $\delta\phi$. On obtient finalement un signal composite d'amplitude A_c et de phase ϕ_c qui correspond à la valeur du SNR. On retrouve la différence de phase ψ présentée précédemment.

La figure II-3 (b) nous permet de dégager assez simplement une expression du SNR^2 .

$$SNR^2 = A_d^2 + A_m^2 + 2 \cdot A_d \cdot A_m \cdot \cos \psi$$

II-9

II.2.3.3 SNR et Humidité du Sol

Outre cette vision géométrique permettant la compréhension générale de la problématique, la représentation que l'on va retenir par la suite est celle du SNR en tant qu'une onde sinusoïdale tel que le décrit *Bilich and Larson* [2010]. Le SNR est ainsi modulé par une amplitude A et un décalage de phase (ou déphasage) ψ :

$$SNR = A \cdot \cos \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h}{\lambda} \cdot \sin \theta + \psi \right)$$

II-10

Il s'agit donc d'une modélisation du signal sur bruit où $\sin \theta$ est une variable indépendante. On va alors chercher à déterminer, sur un intervalle d'élévation donné (basses élévations), les valeurs d'amplitude A et de déphasage ψ de ce SNR dus au signal multi-trajet. Or, ces paramètres vont largement dépendre des paramètres de réflectivité du sol, notamment de la constante diélectrique de surface, c'est-à-dire la constante correspondant à la modification du champ électrique du signal par la surface. Cette constante étant elle-même directement liée à l'humidité superficielle du sol (sur les premiers centimètres), on voit alors clairement le lien qu'il existe entre humidité du sol et rapport signal sur bruit SNR et par extension le lien entre phénomène de multi-trajet et cette humidité du sol.

III Méthodologie

Après avoir mis en avant la possibilité d'effectuer un suivi de l'humidité du sol à l'aide des signaux GNSS réfléchis, il convient désormais de se pencher sur les aspects pratiques. Avant de pouvoir faire les analogies entre comportement du SNR sur un satellite et humidité du sol, il apparait en effet important de s'intéresser aux caractéristiques d'un dispositif de mesure au vu des recommandations que l'on peut trouver dans la littérature sur le sujet.

Ce chapitre a pour but de dresser le bilan des recommandations apportées par les études sur le sujet ainsi que de présenter les différents outils qui vont permettre la mise en avant des analogies entre multi-trajet et humidité du sol. Il vient en outre faire la présentation de la démarche que j'ai pu mettre en place pour répondre à cette problématique.

III.1 Mesures GNSS pour la Réflectométrie : Recommandations

K. M. Larson (Larson et al. [2010], communications personnelles) définit les trois composantes principales d'un dispositif de mesures continues permettant le suivi de l'humidité du sol comme étant le récepteur, l'antenne ainsi que le lieu et la façon dont l'antenne est installée.

Le récepteur doit être un récepteur bi-fréquence (mesure sur L1 et L2), soit le dispositif courant que l'on peut employer, notamment dans le domaine de la géodésie, pour effectuer du positionnement à quelques centimètres. Il doit permettre une acquisition 1 Hz avec une sensibilité de 0,1 dB-Hz pour la mesure du SNR.

La deuxième composante est l'antenne qui doit pouvoir recevoir les signaux satellites pour tous les azimuts et élévations y compris celles en dessous de l'horizon (signal réfléchi), les études dans ce domaine utilisent principalement des antennes de types « Choke Ring » notamment car le diagramme de gain est le plus approprié. Le dispositif de mesure est optimal si l'antenne se situe sur un terrain nu à une hauteur supérieure à 2 mètres.

Enfin, la pratique montre que l'analyse des signaux peut être biaisée si celui-ci subit un phénomène de diffusion comme a pu le mettre en avant Capredon [2011] ; cela peut être le cas si le sol n'est pas parfaitement lisse comme par exemple en présence de sillons sur des terrains cultivés.

Outre ces recommandations majoritairement techniques, le choix du signal GPS considéré a également une importance capitale en réflectométrie GNSS. En effet, les signaux émis par les satellites ont des propriétés différentes (longueur de code, période, etc.). Le signal L2C dispose de codes longs aux périodes courtes par rapport aux autres observables et est moins affecté par les signaux qui se propagent autour (forte protection d'inter corrélation relativement aux autres signaux) ce qui le rend plus efficace pour ce type d'étude : la part de bruit engendrée par la réflexion au sol va être supérieure.

Plus généralement, lorsque l'on souhaite faire de la réflectométrie par GNSS, il faut certes connaître les caractéristiques techniques de la station utilisée mais également s'interroger sur la configuration du dispositif que l'on met en place ; l'orientation de la station par rapport à la zone d'étude, la hauteur de station et sa position géographique. Enfin, il convient de privilégier le signal L2C, plus propice à la mise en évidence des bruits dus au multi-trajet.

III.2 Démarche

De la récupération des mesures brutes à la mise en place des tests et analyses, plusieurs étapes sont nécessaires faisant intervenir différents logiciels. Il s'agit tout d'abord de créer les fichiers RINEX afin d'en sortir les mesures du SNR avant de les mettre en parallèle avec des mesures externes de précipitation et d'humidité du sol. Le diagramme ci-après présente la démarche technique et les procédures que j'ai mises en place lors de cette étude. Celle-ci précède la phase d'analyse à proprement parlée et montre les différentes étapes qui permettent une représentation de l'évolution du SNR au cours du temps.

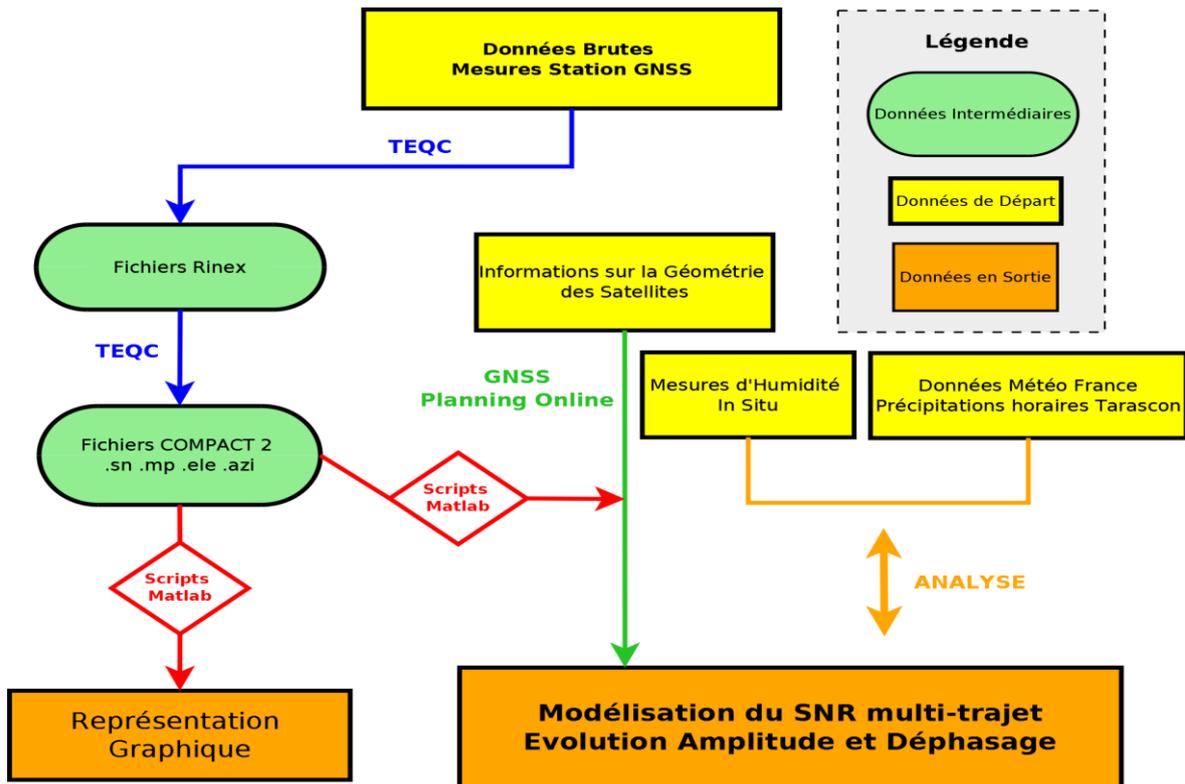


Figure III-1 : Diagramme présentant la Démarche

III.2.1 Logiciel TEQC

TEQC est un logiciel développé par l'université de l'UNAVCO créée par la NSF (*National Science Fundation*) et la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Comme son nom l'indique (*Translation Editing and Quality Check*), il permet la création et des manipulations basiques des fichiers au format international RINEX tel que le ré échantillonnage ou la fusion mais il permet également de sortir des informations sur ces données (notamment le SNR).

Une fois les données brutes du récepteur GNSS récupérées, le logiciel TEQC permet de créer les fichiers RINEX correspondant. Les nombreuses commandes qu'il possède permettent notamment de choisir les signaux sur lesquels on souhaite avoir les mesures. Après un ré-échantillonnage des données qui permettra l'allègement du temps de calcul. On effectue finalement la commande « quality check » qui sort des informations annexes sur les mesures telles que les azimuts et élévations au cours du temps ou encore l'évolution du SNR d'un signal particulier pour chaque satellite.

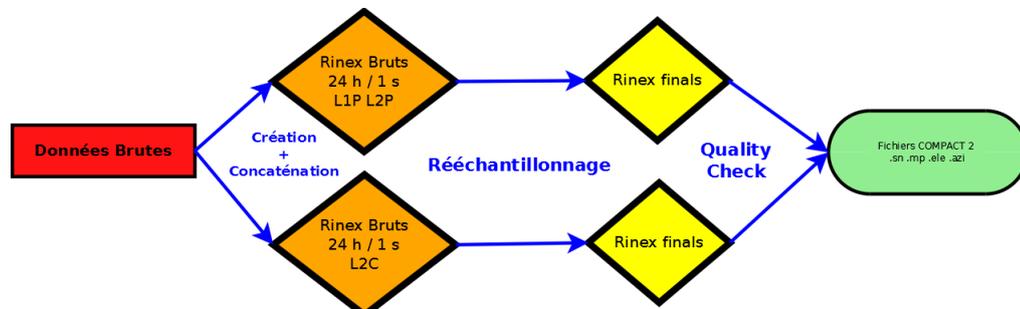


Figure III-2 : Traitements TEQC

Lors de ma « familiarisation » avec ce logiciel, j'ai pu rédiger quelques notes² concernant les commandes qui m'ont été utiles pour cette étude.

² Cf. Annexe 1 : Aide TEQC sous Windows

III.2.2 GNSS Planning Online

GNSS Planning Online est un logiciel en ligne permettant, à partir des coordonnées de notre station, de visualiser les lieux et horaires de passages des satellites de toutes constellations au cours d'une journée. Développé par Trimble, ce logiciel s'avère très utile puisqu'il va notamment nous permettre de sélectionner les satellites utiles à l'étude. Grâce à ce logiciel, on peut facilement connaître les heures de passage d'un satellite en particulier pour une journée donnée.

Il permet en outre le contrôle des scripts Matlab (cf. paragraphe suivant) pour la représentation graphique de certaines mesures. En effet, ceux-ci renseignent indirectement la disponibilité des satellites ainsi que leurs élévations et azimuts.

III.2.3 Scripts Matlab

L'ensemble des calculs inhérents à la démarche a été effectué par le biais du logiciel Matlab. La transposition des fichiers en sorties de TEQC à des structures facilement maniables sous Matlab fait appel aux scripts « *read compact 2.m* » et « *plot compact 2.m* » disponible sur le site internet de l'UNAVCO auxquels j'ai apporté certaines modifications permettant notamment une exploitation plus simple du SNR. Ces scripts sont eux même inspirés du travail de M. Jim Hedfors de 2006. Le détail des calculs effectués par ces scripts sera développé dans le chapitre suivant.

IV Dispositif Expérimental

IV.1 Caractéristiques de l'Étude

IV.1.1 Campagne de Mesure : Projet GNSS Agri

Les mesures réalisées pour cette étude s'installent dans le cadre de la campagne du projet *GNSS – Agri* menée par le Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP) en collaboration avec l'Institut National de Recherche Agronomique d'Avignon. Ce projet comprend 14 stations GNSS réparties sur une zone de plus de 200 Km². Il a pour but la réalisation de tomographie atmosphérique sur la zone d'une part, et l'étude sur la réflectométrie des signaux GNSS d'autre part.

IV.1.2 Présentation du Site

Située à 3 Km au Nord-Est de Tarascon (13), la station GA00 de la campagne a été placée idéalement pour la réflectométrie. D'un point de vue technique, le dispositif est composé d'un récepteur Trimble NetR9 et d'une antenne « Choke Ring » fixée sur mat à 2,5 mètres du sol (cf. figure IV-2). La station permet en outre l'acquisition des données météorologiques de température (°C), pression atmosphérique (hPa) et humidité (%) locales grâce à des sondes *Vaisala PTU-300*. Les données enregistrées sont des fichiers horaires échantillonnés à 1 seconde.



Figure IV-1 : Image Aérienne du Site



Figure IV-2 : Photos Station GA00

La station est positionnée au dessus de la limite Nord du champ qui constitue la zone d'étude. Une telle configuration apparaît comme optimale au vue des recommandations précédemment explicitées. En effet, en plus de respecter les conseils techniques, en se situant au Nord de la zone d'intérêt, un maximum de satellite va pouvoir passer au dessus permettant la réflexion des signaux GPS sur le sol du champ.

IV.1.3 Zone d'Étude

Outre les caractéristiques techniques de la station, il est utile de connaître les particularités du terrain d'étude lui-même. Ce champ est utilisé pour la culture de blé dur semé fin octobre et récolté début juillet. Hors de cette période, le champ est nu. De plus, aucune irrigation n'est apportée sur la zone.

Ces caractéristiques sont propices à notre étude : l'absence d'irrigation est une très bonne chose puisqu'elle ne viendra pas biaiser l'humidification naturelle du terrain produit par les précipitations. De plus, le champ est nu ou peu développé pendant près de la moitié de l'année, la végétation ne va donc pas être un obstacle à la réception des signaux.

IV.2 Choix des Satellites

Au vu de la configuration de notre site (station située au Nord de notre zone d'étude), il apparaît évident que tous les satellites ne vont pas permettre une bonne analyse du problème. Cela aurait été le cas si notre station se situait parfaitement au centre de notre zone d'étude avec un sol complètement nu. En l'espèce, notre zone d'étude est un champ cultivé. Il convient donc de faire une sélection des satellites afin d'écartier ceux dont le passage ne permet pas la réflexion des signaux sur notre zone d'étude ou encore ceux dont la réflexion des signaux pourrait être diffusée par les sillons de culture.

L'évolution de l'azimut du satellite va nous fournir sa position par rapport à la station. On réalisera ensuite notre analyse en se concentrant sur les basses élévations. Grâce à une carte du ciel centrée sur notre antenne GNSS, on peut voir où passe chacun des satellites et à quelle période de la journée (cf. figure IV-4).

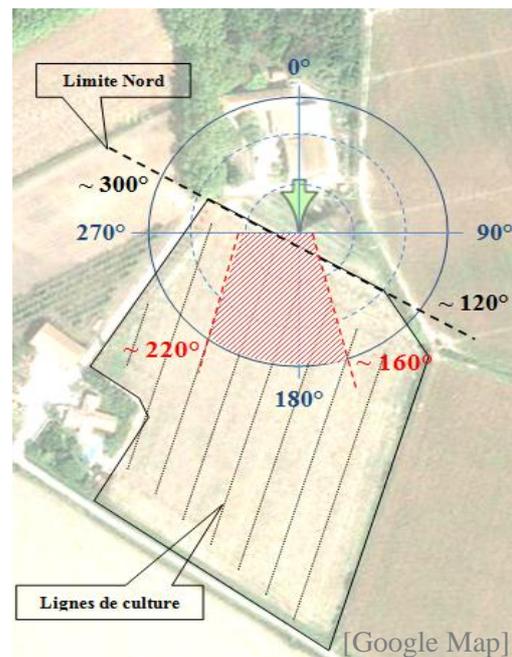


Figure IV-3 : Zone d'Intérêt pour le Passage de Satellites

La disposition de notre station au Nord de la zone d'étude permet le passage d'un maximum de satellite aux azimuts compris entre 90° et 270°. Néanmoins, il est nécessaire d'affiner notre intervalle afin de rendre notre analyse la plus pertinente possible. La première chose que l'on peut noter est que la limite Nord du champ correspond à un axe en azimut 120° - 300°. À cela il convient de prendre en compte la disposition des lignes formées par la culture du champ de sorte à s'assurer que le signal soit correctement réfléchi et ne subisse pas de diffusion.

On obtient finalement une zone d'intérêt comprise entre l'azimut 160° et 220° dans laquelle il faut qu'un satellite passe pour que l'on puisse le considérer dans notre étude.

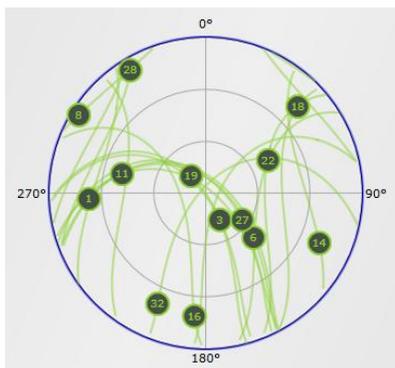


Figure IV-4 : Carte du Ciel - Trajet des Satellites sur 12h

L'analyse de la carte du ciel nous permet de sortir la liste des satellites GPS que l'on va retenir pour mener notre étude. Un classement est effectué afin de faire ressortir si un satellite donné est optimal (passage dans la zone d'intérêt), moyennement optimal (passage à proximité des bornes fixées) ou non optimal (passage hors des bornes) pour notre étude. Cette analyse met également en avant la phase durant laquelle le satellite est utile : celle-ci sera ascendante ou descendante. En effet, certains satellites vont suivre un parcours entraînant le multi-trajet sur le sol du champ lors de leur phase ascendante tandis que pour d'autres, ce multi-trajet sera rendu possible en phase descendante.

Le dernier critère - et non des moindres - qui va nous permettre de faire un choix parmi l'ensemble des satellites de la constellation GPS est l'émission ou non du signal L2C. C'est en 2003 que le premier satellite émettant ce signal a été lancé. Ainsi, il n'y a aujourd'hui que 10 satellites opérationnels émettant L2C sur les 31 que compte la constellation.

| N° Sat | G01 | G05 | G07 | G12 | G15 | G17 | G24 | G25 | G27 | G29 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| asc | X | X | O | O | X | X | | | X | O |
| desc | O | O | X | X | O | O | | | O | X |

Tableau IV-1 : Fiabilité des Satellites GPS émettant L2C pour la Zone d'Étude
Vert = très fiable, orange = fiable, rouge = non fiable

Le tableau IV-1 permet une analyse critique sur la disposition de notre station. En effet, parmi les 10 satellites qui répondent aux critères précédemment fixés, 6 sont exploitables. Toutefois, le dernier critère limitant notre choix aux satellites émettant le signal L2C est à nuancer. En effet, si la littérature sur la réflectométrie préconise l'utilisation de ce signal, je pense qu'il peut être intéressant d'étudier en parallèle l'évolution du SNR sur les signaux L1P(Y) et L2P(Y). Aussi, il faut garder à l'esprit qu'en mettant à part ce critère, c'est plus de 20 satellites de la constellation qui sont exploitables.

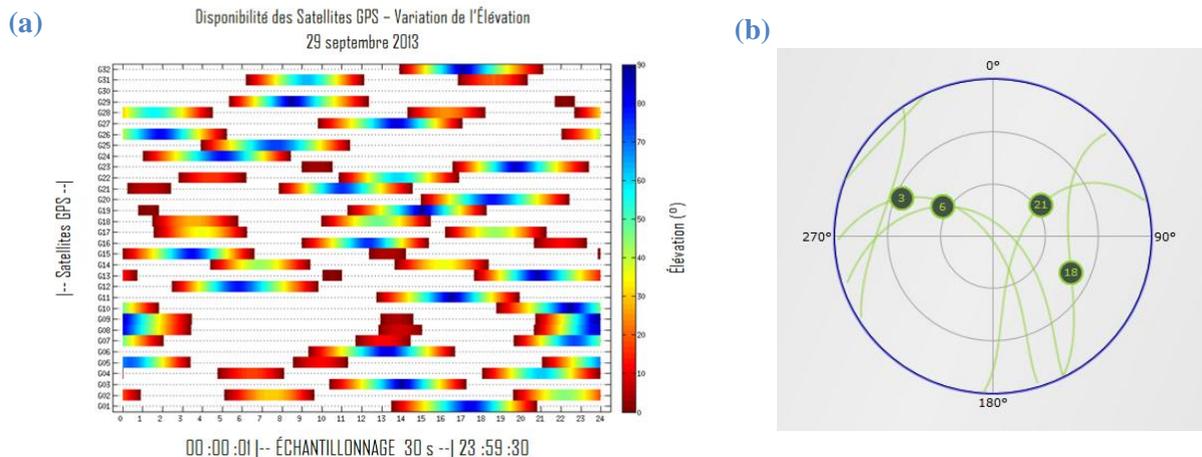
Quoi qu'il en soit, notre station apparaît comme idéalement placée pour cette étude puisqu'elle offre la possibilité d'exploiter les signaux de 21 satellites dont 6 émettant le signal L2C. Au final, l'analyse menée pour ce travail utilise les mesures de 4 satellites émettant sur L2C : les satellites retenus sont le G05, G12, G15 et G29.

IV.3 Mesures Brutes

IV.3.1 Mesures Antenne GA00

Préalablement à la manipulation des données, on va s'intéresser à leur représentation brute afin de juger de leur comportement et chercher à montrer les premières analogies avec la théorie. Pour ce faire, on se penchera (arbitrairement) sur les mesures réalisées le 29 septembre 2013. On peut s'intéresser à la disponibilité des satellites, aux marqueurs de multi-trajet et bien évidemment au SNR.

Sur une période de 24 heures, on remarque que la station enregistre un passage complet pour chaque satellite, ce qui est normal au vu de la position de la station par rapport à la géométrie et à la période de révolution des satellites (environ 12 heures).



Figures IV-5 : Disponibilité des Satellites et Traces au sol

- (a) Disponibilité des Satellites GPS au cours d'une journée – Variation de l'Élévation
- (b) Carte du Ciel à 12h00 le 29 septembre 2013 – centrée sur GA00

Parmi les mesures brutes observables, on peut mettre en avant la contribution des signaux multi-trajet pour chaque signal reçu des satellites. Cette donnée prend des valeurs qui oscillent autour de 0, dont l'amplitude n'est généralement pas supérieure à ± 1 . La figure ci-contre montre l'évolution de la contribution du multi-trajet pour chaque satellite sur une journée. L'élément principal que l'on peut remarquer est les valeurs du MP (*MultiPath*), plus importantes au début et à la fin du passage d'un satellite. Ce phénomène est d'autant plus visible lorsque l'on se concentre sur un seul satellite.

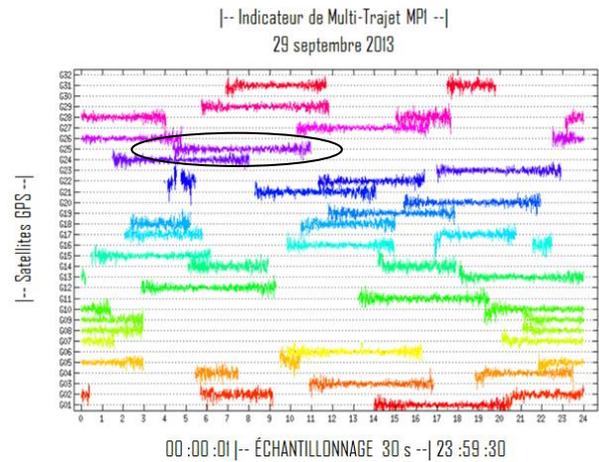


Figure IV-6 : Évolution du MP par Satellite sur une journée
Satellite G25 entouré

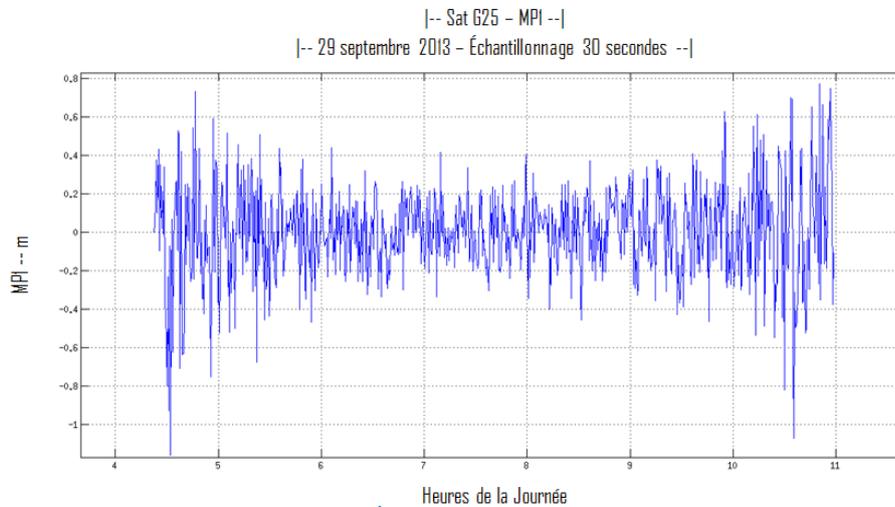


Figure IV-7 : Évolution du MP - Satellite G25

Ce phénomène reflète parfaitement la théorie développée précédemment (cf. II.). En effet, les satellites ont une élévation faible au début et à la fin de leur passage, avant de disparaître du champ de vision de la station. Cette faible élévation est synonyme d'augmentation de la fréquence multi-trajet ω (cf. équation II-7), le marqueur MP de contribution du multi-trajet dans les signaux GPS (cf. figure IV-7) est donc logiquement plus important en début et en fin de passage.

On peut désormais se pencher sur l'évolution du rapport signal sur bruit SNR des signaux GPS captés. Chaque signal de chaque satellite GPS a sa propre valeur de SNR. Comme l'ensemble des satellites de la constellation émettent les signaux L1P(Y) et L2P(Y), on peut dans un premier temps observé le SNR sur ces 2 signaux fréquemment utilisés pour le positionnement précis. La figure IV-8 présente l'évolution du SNR sur L2P(Y) (SN2) au cours d'une journée.

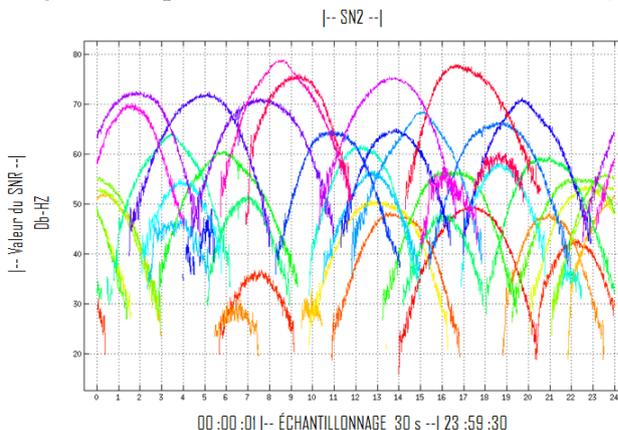


Figure IV-8 : Évolution du SN2 (SNR L2P(Y)) au cours d'une journée

Si l'on a pu constater que les valeurs de MP d'un satellite à un autre avaient des intensités similaires (± 1), ce n'est pas le cas pour le SNR. En effet, l'intensité du SNR de chaque satellite est variable et on observe des amplitudes plus ou moins importantes. Ainsi, sur certains satellites, le SNR aura des valeurs comprises autour de 30 dB-Hz tandis que d'autres seront autour de 60 dB-Hz.

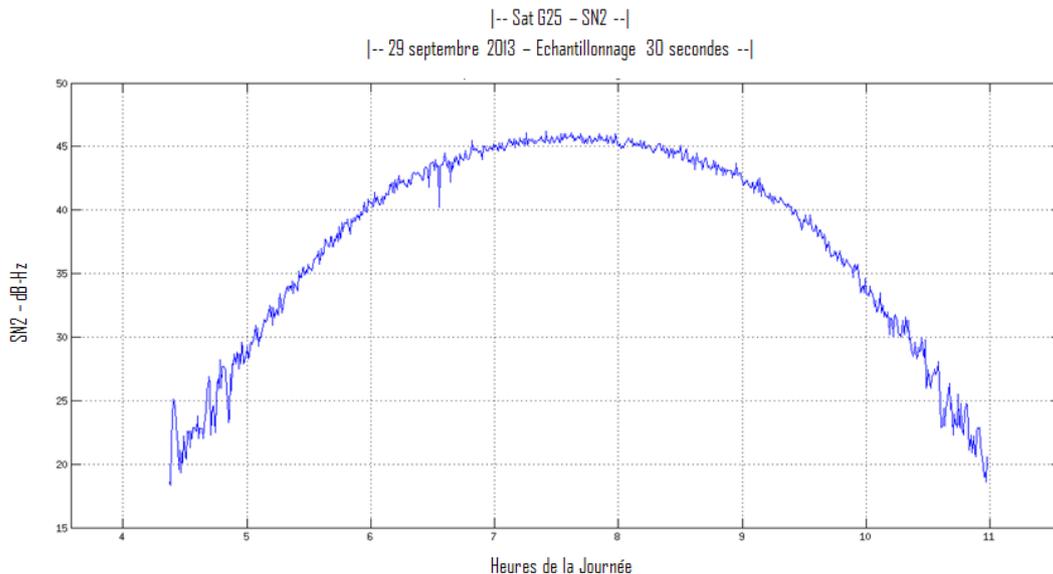


Figure IV-9 : Évolution du SNR - Satellite G29

La configuration générale reste néanmoins la même pour chacun des satellites considérés, semblable au satellite G25 tel qu'on peut le voir sur la figure IV-9. Les valeurs les plus importantes correspondent aux élévations les plus hautes lorsque le signal est moins bruité, la part du signal direct est donc largement supérieure et l'énergie captée est plus importante (cf. figure II-1 (b)). On retrouve des oscillations plus marquées aux basses élévations, moments où la part du signal réfléchi est la plus importante ; c'est sur cette partie du signal que l'analyse va être menée.

IV.3.2 Mesures Externes : Pluviométrie et Humidité

Afin de mener des études comparatives aux paramètres qui vont être déterminés, il est nécessaire de disposer de mesures externes fiables relatives à la quantité d'humidité du sol.

On dispose pour cette étude de la pluviométrie relevée par Météo France sur la ville de Tarascon à une fréquence horaire. Étant située à environ 6 Km de Tarascon, on peut penser que la zone d'étude rencontre des valeurs de pluviométrie relativement similaires. Cette donnée se pose donc comme suffisante pour le repérage des épisodes pluviométriques importants.

L'autre donnée disponible est l'évolution de l'humidité du sol. Celle-ci est calculée grâce à des capteurs d'humidité directement implantés dans le champ d'étude. Au total, 4 capteurs sont répartis sur le champ, positionnés à une profondeur de 5 cm. En guise de donnée sur l'humidité du sol, on retient la moyenne de l'humidité mesurée par ces capteurs à chaque instant, soit toutes les 30 minutes.

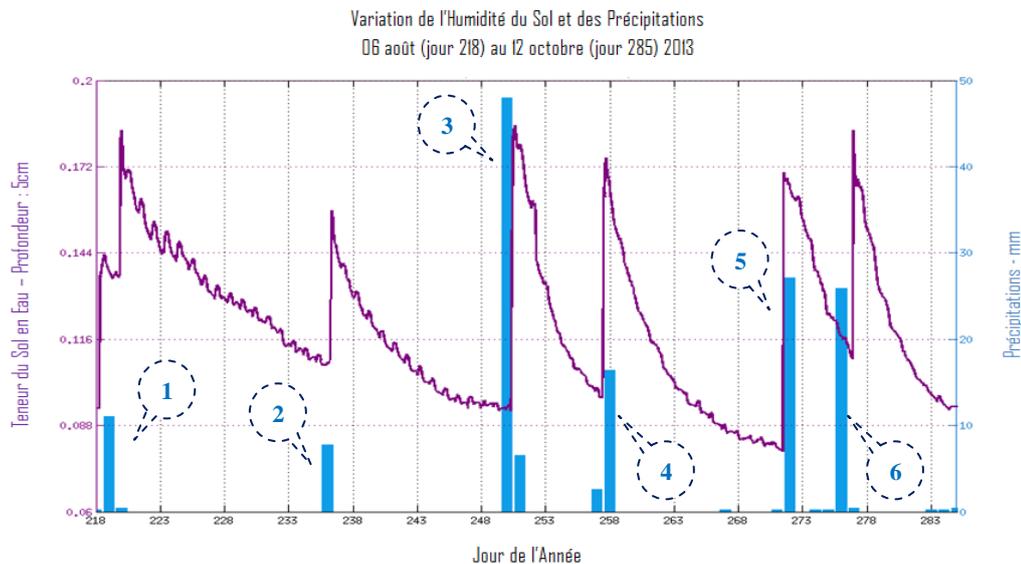


Figure IV-10 : Évolution des Précipitations et de l'Humidité du Sol

Numérotation des épisodes pluvieux :

1. 07 août 2. 24 août 3. 7 septembre 4. 15 septembre 5. 29 septembre 6. 03 octobre

La figure IV-10 permet de constater la façon dont évolue l'humidité du sol en fonction des précipitations. On observe logiquement de fortes augmentations de la teneur en eau du sol qui font suite aux événements pluvieux majeurs.

Bien que cette figure ne nécessite pas de longues explications, il faut tout de même noter que le délai entre la précipitation et le « pic » d'humidité sur la zone n'est pas toujours le même en fonction des épisodes. En effet, si pour les épisodes 2 et 3, on note bien une augmentation de l'humidité directe après la pluie, ce n'est pas le cas pour les épisodes 1 et 6 où l'on observe un certain délai entre la pluie et la montée de l'humidité. D'autre part, pour les épisodes 4 et 5, la pluviométrie est recensée après le « pic » d'humidité au sol.

Ces observations permettent de rappeler que les mesures pluviométriques ne sont pas réalisées in situ mais sur Tarascon. Bien que proche de notre zone d'étude, il faut garder à l'esprit que la pluviométrie peut être sensiblement différente entre les deux endroits. De plus, en fonction des caractéristiques de la pluie à une plus courte échelle (considération des précipitations par heure et non plus par jour) ainsi que de l'état du sol à la période considérée (nature du sol différente entre août où il fait globalement plus chaud qu'en octobre), l'évolution de l'humidité ne sera pas la même. On observe ainsi des épisodes pluviométriques aux amplitudes d'humidification et d'assèchement variables.

IV.4 Choix d'une Période d'Étude

À ce stade de notre analyse, l'ensemble des éléments dont nous disposons ainsi que leurs caractéristiques techniques sont connus. Sachant cela, il convient désormais de cadrer notre étude et de définir une période de suivi pendant laquelle nous allons pouvoir mener notre analyse.

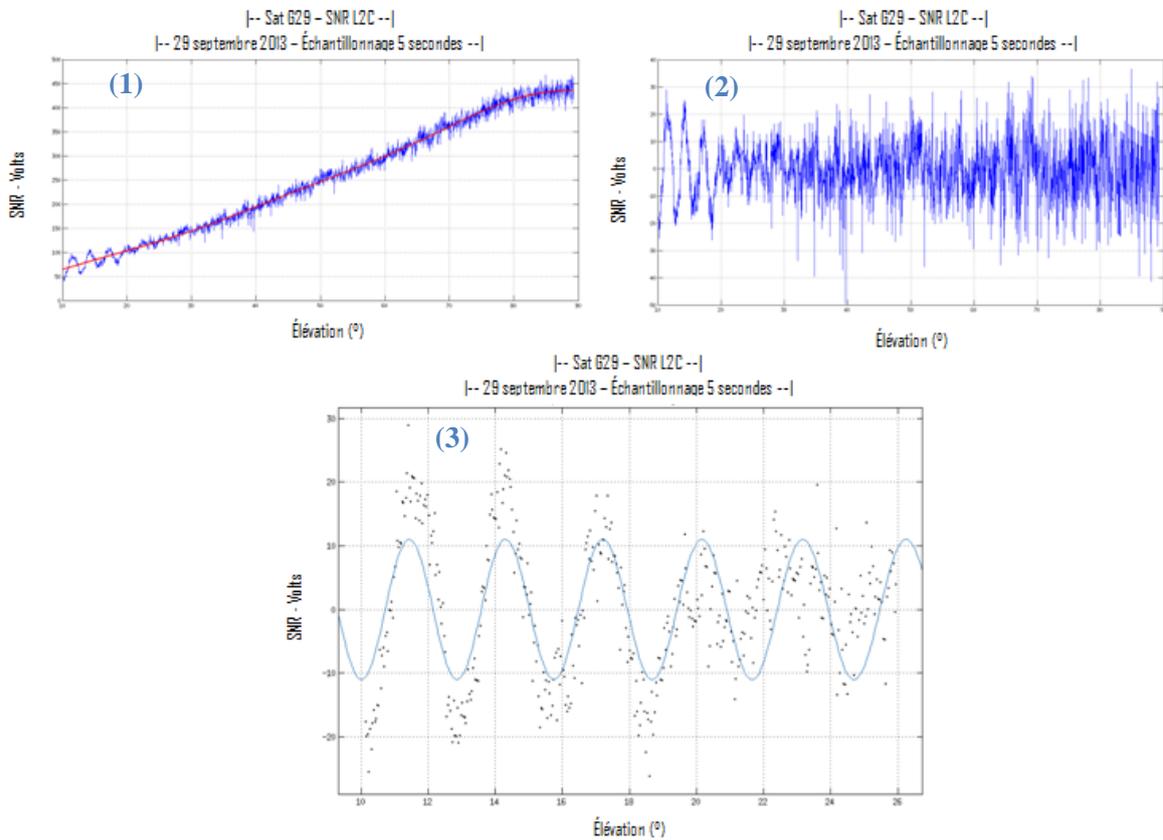
Afin d'être dans des conditions optimales, le critère qui me paraît essentiel est dans un premier temps l'état de la zone d'étude. Bien que le champ soit en culture de blé dur et qu'il ne subisse aucune irrigation artificielle tout au long de l'année qui viendrait biaiser notre suivi, je préfère privilégier une période pendant laquelle le sol est totalement dépourvu de végétation. Cela correspond à une période qui commence début juillet et qui se termine fin octobre. De plus, les mesures d'humidité du sol présentées précédemment n'ont pas pu être assurées en continu, notamment à cause des contraintes de déchaumage du blé. Enfin, avant de valider une période d'étude, il est nécessaire de s'assurer que le terrain a bien connu des précipitations qui auront fait varier l'humidité du sol. Il s'agit donc de considérer une période suffisamment longue lors de laquelle surviennent plusieurs épisodes pluvieux variables en intensité.

J'ai fait le choix d'une période longue d'un peu plus de deux mois, débutant le 06 août 2013 (jour 218) et s'achevant le 12 octobre (jour 285) de la même année. Lors de cette période, le terrain est bien dépourvu de végétation et l'on dispose de mesures d'humidité en continues. De plus, grâce aux données Météo France, on verra que cette période a connu 6 épisodes pluvieux majeurs, globalement bien distribués dans le temps.

IV.5 Du SNR Brut au SNR Multi-Trajet

De la mesure brute du SNR sur un satellite donné (figure II-9) à la modélisation en tant qu'onde sinusoïdale (équation II-9) pour obtenir une valeur d'amplitude A et de déphasage ψ , plusieurs traitements doivent être apportés à nos mesures.

Tout d'abord, il est nécessaire de considérer la bonne « phase » du satellite en question, celle-ci sera ascendante ou descendante. Afin d'avoir le SNR dit « multi-trajet », on va modéliser la part du signal direct et l'ôter au signal total. De plus, la phase des signaux captés par l'antenne qui nous intéresse est celle correspondant aux basses élévations. Si l'on a vu précédemment qu'un intervalle optimal de mesures se situait entre 5° et 25° , les mesures de SNR enregistrées pour notre station ne débutent qu'à 10° . C'est donc pour des élévations comprises entre 10° et 25° que l'on va modéliser le SNR et chercher à déterminer la valeur d'amplitude A et de déphasage ψ pour chaque passage. La figure ci-après récapitule les traitements réalisés sur le SNR brut d'un satellite.



Figures IV-11 : Traitement du SNR Brut

- (1) Modélisation du signal direct (courbe rouge) par un polynôme d'ordre 8 pour la phase de passage du satellite correspondante, phase ascendante dans le cas du satellite G29,
- (2) Soustraction du signal direct,
- (3) Modélisation du SNR multi-trajet – cf. équation II-9 : Exemple du satellite G29 le 29 septembre 2013,
 $A = 11,00$ et $\psi = -0,39$.

Cette chaîne de traitement est réalisée grâce à des scripts Matlab, l'opération est alors répétée pour chaque jour de la période sur chacun des 4 satellites sélectionnés pour notre étude. En guise de résultats, on dispose finalement des séries temporelles de l'amplitude A et du déphasage ψ sur le signal L2C tout au long de la période d'étude ainsi que sur les signaux L1P(Y) et L2P(Y) sur le mois de septembre.

V Résultats

Les résultats qui vont être présentés s'inscrivent dans la chronologie de la démarche que j'ai pu suivre lors de la réalisation de ce travail. Par l'analyse de l'évolution de l'amplitude A et du déphasage ψ chaque jour de la période d'étude, j'ai dans un premier temps souhaité mettre en avant une correspondance entre épisodes pluvieux et évolution de ces paramètres. Cette première approche a tout d'abord été menée sans soucis du choix du signal GPS et ce sont les résultats initiaux qui ont conduit à se pencher sur la problématique des différents signaux GPS.

Dans un second temps, je me suis penché sur l'analyse plus fine de mise en avant d'une corrélation entre humidité du sol et des marqueurs du SNR multi-trajet rendu possible par la prise en considération des mesures sur le signal L2C.

En parallèle de cette recherche d'une corrélation avérée et mesurée entre l'humidité du sol et le SNR, les résultats et leur analyse viennent également dresser une analyse critique des deux paramètres A et ψ étudiés ainsi que des signaux GPS dont ils sont issus. De plus, les nombreuses expérimentations qui ont permis d'aboutir à la chaîne de traitement du SNR m'ont fait soulever d'autres questions techniques notamment sur le choix des satellites ou encore sur la façon dont considérer les mesures directes d'humidité.

V.1 SNR et Épisodes Pluvieux

Avant de chercher à montrer la corrélation entre humidité du sol et les paramètres du SNR multi-trajet, il apparaît raisonnable de se pencher sur l'existence d'un lien avec la pluviométrie, soit le principal phénomène qui va amener une augmentation de l'humidité du sol sur une surface telle que notre zone d'étude. En effet, inutile de s'efforcer de montrer directement une corrélation avec les mesures d'humidité sans être sûr de la présence d'un lien avec les précipitations majeures.

En s'appuyant sur les mesures du satellite G05, nous allons pouvoir juger du comportement de l'amplitude A et du déphasage ψ .

V.1.1 Amplitude A

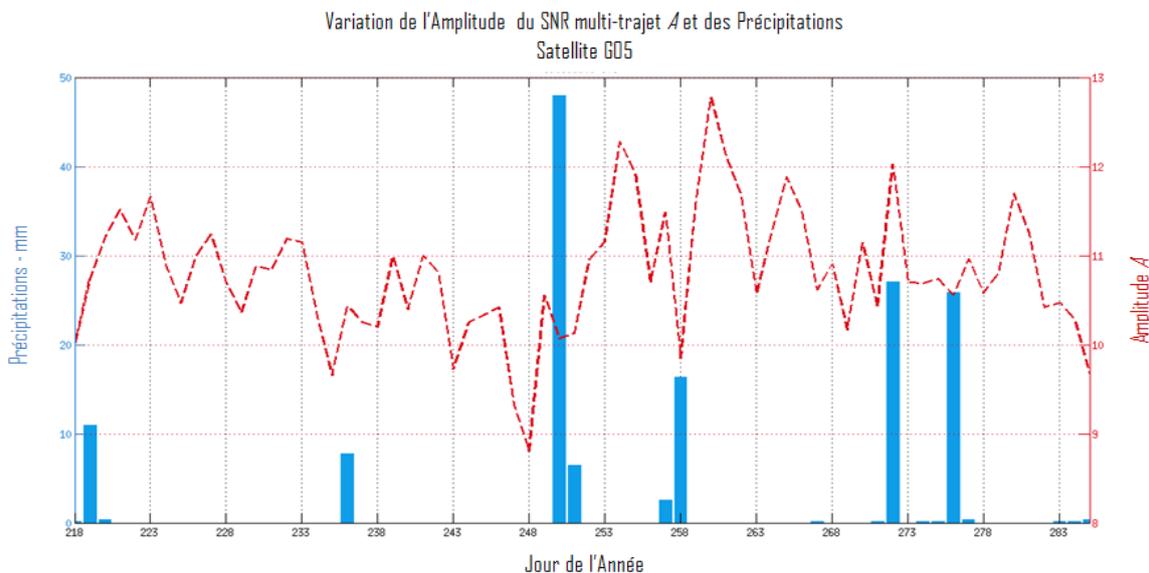


Figure V-1 : Variation de l'Amplitude du SNR multi-trajet A - Satellite G05

Le comportement général de l'amplitude apparaît très oscillatoire, on remarque de brusques changements de valeurs qui restent dans un intervalle compris entre 8 V et 13 V. Les « pics » d'amplitude n'ayant aucune correspondance avec les précipitations, l'amplitude A ne révèle ici pas de corrélation avec les précipitations relevées.

En se penchant sur l'évolution de l'amplitude A sur les 3 autres satellites de notre étude, il en ressort les mêmes conclusions que pour le satellite G05. L'amplitude ne permet donc pas le repérage des épisodes pluvieux.

V.1.2 Déphasage ψ

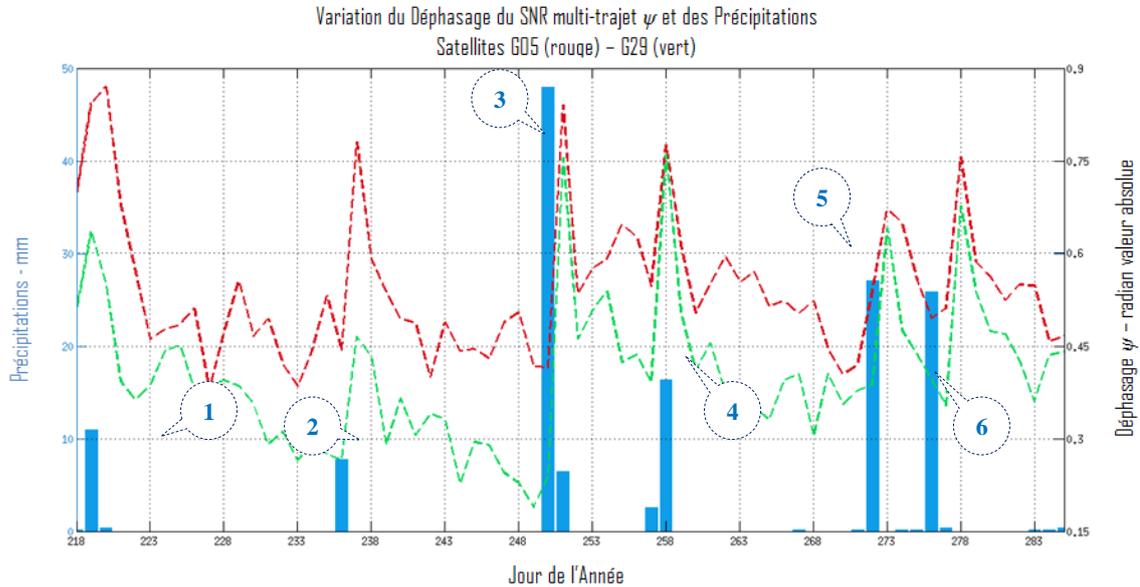


Figure V-2 : Variation du Déphasage du SNR multi-trajet ψ - Satellites G05 G29

Le comportement du déphasage apparaît nettement plus intéressant. En effet, pour les satellites G05 et G29 (cf. figure V-2), on distingue 6 « pics » lors de son évolution au cours du temps. De plus, ceux-ci correspondent aux périodes des épisodes pluvieux. Le déphasage du SNR multi-trajet se pose donc au premier abord comme un bon marqueur pour repérer les événements pluvieux importants.

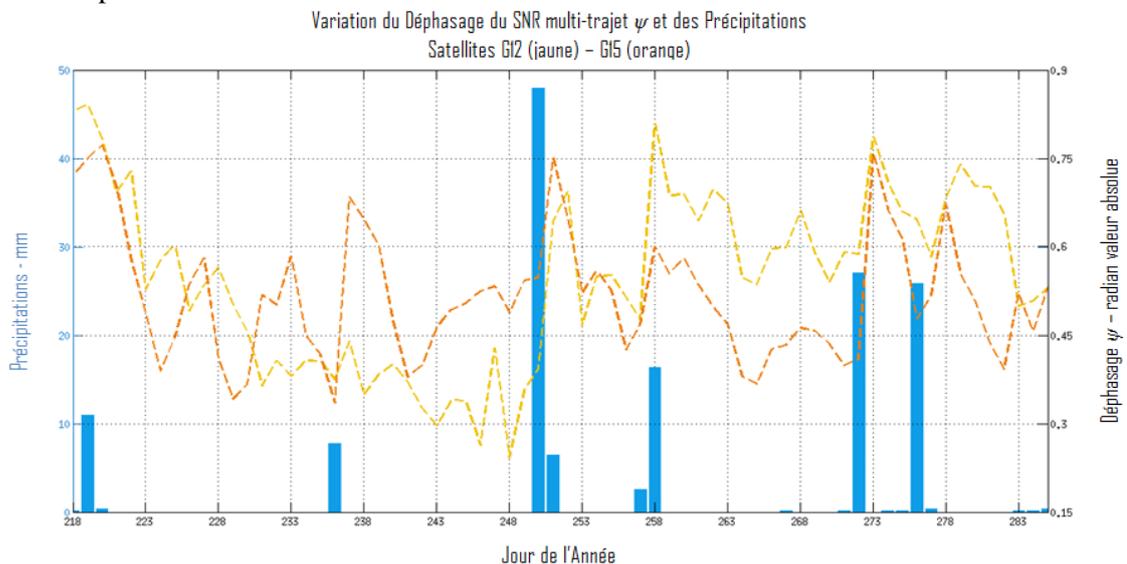


Figure V-3 : Variation du Déphasage du SNR multi-trajet ψ - Satellites G12 G15

Il convient néanmoins de nuancer nos résultats. En effet, si certains satellites dévoilent une bonne corrélation entre ψ et les précipitations observées, d'autres vont présenter des résultats un peu plus ambigus. Lorsque l'on se penche sur l'évolution de ψ sur les satellites G12 et G15 (cf. figure V-3), les résultats sont moins nets. On retrouve globalement des augmentations sur les périodes de pluie mais on note également certaines irrégularités. Par exemple, entre les jours 223 et 235, l'évolution de ψ sur le satellite G15 révèle 2 « pics » qui ne correspondent pas à des précipitations. D'autre part, on remarque que le satellite G12 ne permet pas de repérer l'épisode pluvieux du jour 236.

On peut tenter d'expliquer ce phénomène en revenant sur un critère intervenant pour le choix des satellites, à savoir la géométrie des satellites considérés. En effet, l'intervalle retenu pour les azimuts aux basses élévations s'appuie en partie sur une photo aérienne pour la prise en compte des sillons de culture. En regardant de plus près les azimuts correspondant à chaque satellite, G05 et G29 sont plus proches de 190° (respectivement 187° et 198°) alors que G12 et G15 en sont plus éloignés (214° et 177°). On peut alors émettre l'hypothèse que, pour notre zone d'étude, l'azimut optimal est de $190^\circ \pm 10^\circ$.

V.1.3 Ψ : Un Bon Marqueur Pluviométrique

On retient finalement que le déphasage du SNR multi-trajet ψ permet de repérer les épisodes pluviométriques majeurs sur une échelle de temps relativement large. Certains satellites apparaissent néanmoins plus fiables que d'autres pour ce type d'analyse, en l'espèce les satellites G05 et G29 ont permis ici une parfaite détermination des épisodes pluvieux qui sont survenus lors de notre période. D'un autre côté, les satellites G12 et G15 permettent également de repérer ces épisodes mais en ajoutant des doutes sur certaines périodes (présence d'un « pic » ne correspondant pas à des précipitations ou à l'inverse, absence de « pic » lors d'une période pluvieuse).

Outre ces conclusions globales sur le comportement de ψ , il convient de revenir plus en détails sur certains points.

V.1.3.1 Précision à 1 jour près !

En reprenant la figure V-2, on peut se rendre compte que l'épisode 4 correspond à un « pic » du déphasage survenant le même jour (258). En ce qui concerne les 5 autres événements pluvieux, les « pics » du déphasage correspondant n'apparaissent que le lendemain des précipitations.

Ce phénomène est dû au moment de la journée où surviennent les précipitations par rapport à l'instant de passage du satellite considéré. En effet, la pluviométrie journalière représentée est la somme des précipitations horaires de 0h00 à 23h00 tandis que le SNR multi-trajet du satellite correspond à un intervalle de temps donné dans la journée (moment pendant lequel le satellite passe de 10° d'élévation à 25°). Il se peut alors que le satellite passe avant que survienne la pluie dans la journée. Le sol étant encore sec à cet instant, la valeur de ψ n'en sera donc pas affectée. On peut facilement justifier cette explication en prenant un exemple pratique, pour ce faire, intéressons nous aux épisodes 3 et 4 correspondant au 07 et au 15 septembre (cf. figure V-4). Les 2 jours étant relativement rapprochés. L'instant de passage du satellite d'une élévation de 10° à 25° est approximativement similaire et correspond à un intervalle compris entre 04h00 et 04h30. Dans le cas de l'épisode 3, la pluie survient aux alentours de 20h00 et continue jusqu'au lendemain 03h00, le satellite G05 passe donc avant la pluie et il faut attendre le lendemain pour que le SNR multi-trajet révèle l'humidité au sol engendrée par celle-ci. En revanche, pour l'épisode 4, la pluie débute à 00h00 et se poursuit jusqu'à 06h00, le sol est donc déjà humide au passage du satellite 4 heures plus tard ce qui est révélé par le déphasage.

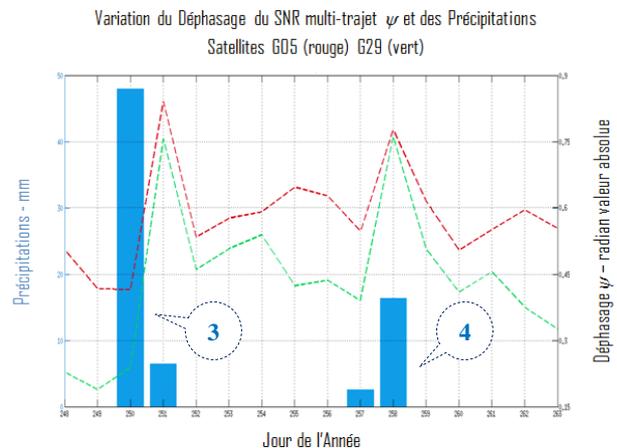


Figure V-4 : Variation de ψ - Satellites G12 G15 – jour 248 à 263

Figure V-4 : Variation de ψ - Satellites G12 G15 – jour 248 à 263

V.1.3.2 Une Présélection des Satellites Nécessaire ?!

On a pu voir que les satellites G05 et G29 donnaient des résultats plus nets que les satellites G12 et G15. On pourrait dès lors en conclure qu'une sélection des satellites serait un plus pour la détermination des événements pluvieux. Cependant, il me semble important de disposer d'un minimum de 3 ou 4 satellites pour ce genre d'étude. En effet, bien que moins fiables, les séries des

satellites G12 et G15 révélaiient le plus souvent un « pic » lors d'un événement pluvieux. En ayant choisi de les retirer pour un travail de détermination d'événement pluvieux, nous ne pourrions nous fier qu'aux deux satellites G05 et G29. Or, si les 2 séries ne s'accordent pas sur la même conclusion, il ne sera pas possible de donner raison à l'une ou à l'autre.

D'un autre côté, notre but étant de trouver une corrélation entre humidité du sol et SNR multi-trajet, on peut difficilement considérer les signaux qui ne sont déjà pas fiables pour révéler la pluviométrie. Dans le cadre de notre étude, il convient donc d'écarter les satellites G12 et G15 et de se concentrer sur les mesures de G05 et G29.

V.2 SNR et Humidité du Sol

V.2.1 Résultats

Le lien étant désormais avéré entre humidité du sol et déphasage du SNR ψ , on peut donc logiquement tenter d'aller plus loin pour trouver une corrélation plus fine en comparant nos séries avec les mesures directes d'humidité du sol.

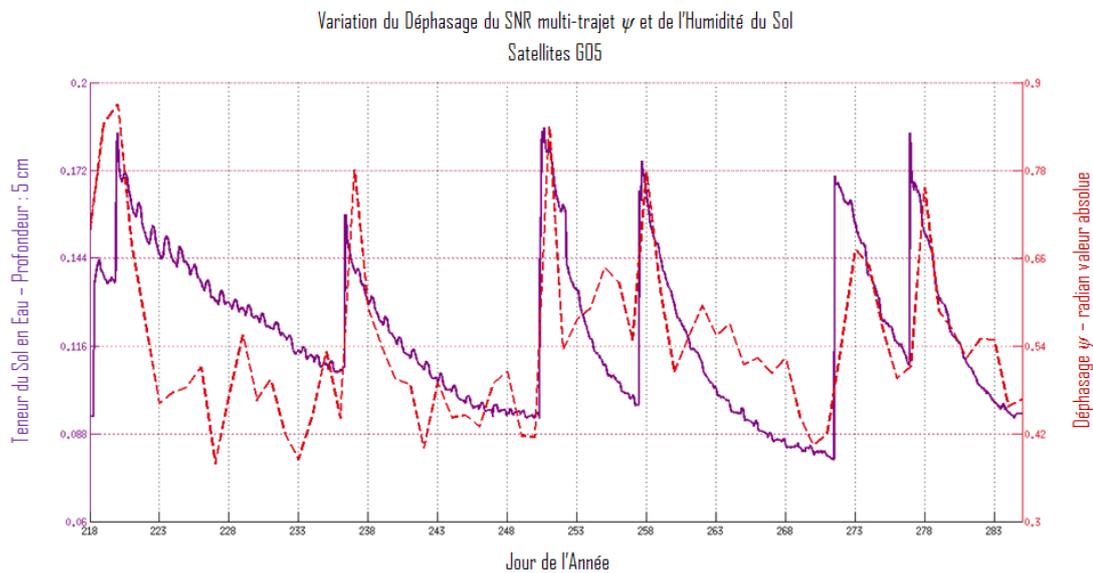


Figure V-5 : Variation de ψ et de l'Humidité du Sol - Satellite G05

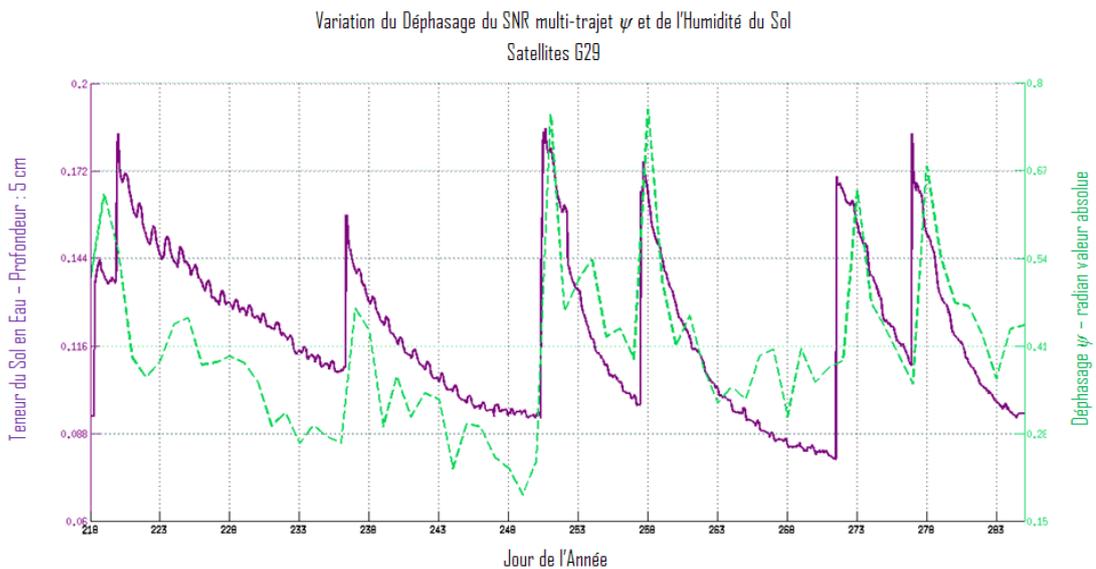


Figure V-6 : Variation de ψ et de l'Humidité du Sol - Satellite G29

On retrouve logiquement des « pics » d’humidité révélés par la mesure directe de teneur en eau du sol qui correspondent aux événements pluvieux (cf. figure V-5 et V-6). Ces accroissements sont suivis d’une diminution progressive correspondant à l’assèchement du sol. On remarque que cet assèchement est plus ou moins rapide en fonction des épisodes.

Les mesures de déphasage sur nos deux satellites révèlent visuellement une bonne correspondance avec les mesures d’humidité. Dans les deux cas, on retrouve bien évidemment les « pics » qui viennent en réponse aux événements pluvieux mais on remarque également des tendances générales similaires entre les courbes lors des phases d’assèchements.

V.2.2 Approche Statistique

Outre cette corrélation visuelle qui ne fait aucun doute, il convient de justifier ces similitudes par une approche plus statistique. Pour ce faire, on peut s’intéresser aux diagrammes de dispersion des séries de l’humidité du sol et de ψ et sortir les coefficients de corrélation correspondants. D’un point de vu théorique, le diagramme de dispersion de deux données est la représentation graphique d’une de ces données par rapport à l’autre. En l’espèce, il s’agit de la représentation des couples humidité moyenne au sol – déphasage ψ pour chaque jour de la période. Il vient révéler le lien de corrélation entre les deux données qui pourra être linéaire positif, négatif ou nul. S’ajoute à cela le coefficient de corrélation r (ou coefficient de Bravais-Pearson) qui vient quantifier le lien entre les 2 séries de mesures. Compris entre -1 et +1, l’intensité sera majeure à mesure qu’il sera proche des extrêmes (un r négatif signifiant que la corrélation est négative soit que l’augmentation d’une série correspond globalement à la diminution de l’autre).

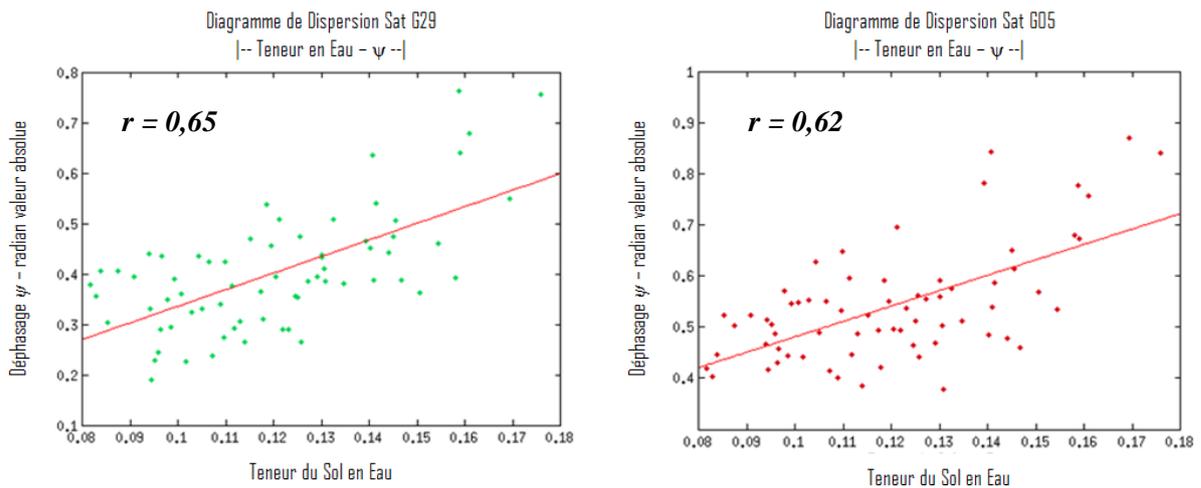


Figure V-7 : Diagrammes de Dispersion et Coefficients de Corrélation r

Nuages de points des couples Humidité moyenne au Sol (24h) – Déphasage ψ pour chaque jour.

On obtient dans notre cas des coefficients de corrélation supérieurs à 0,60 ce qui démontre l’existence du lien entre le déphasage du SNR multi-trajet ψ et l’humidité du sol. Plus précisément, on a une corrélation linéaire positive entre les données.

Nota : La valeur brute du déphasage du SNR multi-trajet est en réalité négative. Pour l’étude, on retient sa valeur absolue afin de mieux apprécier visuellement la corrélation (notamment dans la représentation graphique). En s’en tenant à la valeur brute, il convient donc de préciser que la corrélation entre le SNR multi-trajet et l’humidité du sol est linéaire négative. À fortiori, les coefficients de corrélation des mesures issues des satellites G05 et G29 sont négatifs et ont pour valeurs respectives - 0,62 et - 0,65.

V.2.3 Limites et Améliorations Possibles

La correspondance entre les mesures est donc statistiquement avérée ce qui est plutôt satisfaisant. Néanmoins, celle-ci n'est pas parfaite et il convient de s'interroger sur les éléments existants qui pourraient en être responsables.

V.2.3.1 Le SNR : Une Mesure Restreinte de l'Humidité

Un élément important concernant les limites du système repose sur les caractéristiques techniques de la technologie utilisée. En effet, les satellites ne peuvent effectuer qu'un unique passage au dessus d'une zone donnée par jour. Au même titre que nous avons déjà pu en discuter en V.1.3.1, la courte période de mesures du SNR considérée sur laquelle se base la détermination des paramètres A et ψ peut sembler un peu réductrice par rapport à la mesure continue de l'humidité du sol et peut justifier certaines incohérences (le passage d'une élévation de 10° à 25° s'effectuant en environ 30 min soit 2% du temps d'une journée !).

Afin de confirmer expérimentalement cet élément, il convient de revenir sur les mesures d'humidité du sol considérées pour le calcul des coefficients de corrélation. En effet, ne possédant qu'une valeur de ψ par jour, la mesure d'humidité du sol in situ doit être réduite à une unique valeur par jour afin de disposer d'une série aussi longue que celle de notre paramètre. Intuitivement, on considère alors la moyenne sur les 24 heures de la journée considérée. Or, l'humidité du sol peut subir d'importantes variations au cours de la journée, notamment la nuit et c'est ce qui explique les petites ondulations que l'on observe lors des phases d'assèchements (cf. figure V.5 et V.6 courbe d'humidité du sol). C'est pourquoi on peut privilégier une moyenne sur la période de passage du satellite considérée comme valeur journalière d'humidité plutôt que la moyenne sur 24 heures. Il s'agit donc d'un traitement au « cas par cas » fonction des moments de passage des satellites. Sur les 67 jours que compte notre période d'étude, il faut également considérer le fait que les horaires de passage des satellites évoluent (à raison d'environ 5 minutes par jour). En prenant l'exemple du satellite G29, on peut considérer que son passage aux basses élévations intervient entre 05h00 et 10h00. Dès lors on peut déterminer un nouveau coefficient de corrélation à partir de la valeur moyenne d'humidité du sol entre 05h00 et 10h00 chaque jour.

| Passage Satellite G05 | | |
|-----------------------|-------------|-----------|
| jour | heure début | heure fin |
| 218 | 06h00 | 06h30 |
| 285 | 01h30 | 02h00 |

| Période considérée |
|--------------------|
| 01h30 - 06h30 |

| Passage Satellite G29 | | |
|-----------------------|-------------|-----------|
| jour | heure début | heure fin |
| 218 | 09h30 | 10h00 |
| 285 | 05h00 | 05h30 |

| Période considérée |
|--------------------|
| 05h00 - 10h00 |

Tableaux V-1 : Choix des Périodes pour le Calcul de l'Humidité Moyenne par Satellite

| Coefficients de Corrélation r | | |
|-------------------------------|---------|---------|
| Satellite | r (24h) | r (05h) |
| G05 | 0,62 | 0,64 |
| G29 | 0,65 | 0,69 |

Tableau V-2 : Coefficients de Corrélation de ψ pour des Valeurs Moyennes d'Humidité du Sol Différentes

On remarque donc que les coefficients de corrélation sont plus élevés en considérant une valeur d'humidité moyenne plus « fidèle » à la réalité. Néanmoins, la différence avec les coefficients de corrélation initiaux n'est pas flagrante (0,02 pour le satellite G05 et 0,04 pour le satellite G29) et ne permet pas de justifier les irrégularités existantes dans la corrélation entre SNR multi-trajet et humidité du sol.

La conclusion que l'on peut tirer de ce test apparaît finalement positive. En effet, cette expérimentation nous montre que l'unique valeur de ψ que l'on peut calculer sur une journée est une bonne représentation de l'humidité du sol sur une journée. Celle-ci ne reflète pas simplement l'humidité du sol pendant la demi-heure de passage du satellite considéré.

V.2.3.2 Corrélation entre $\Delta(\psi)$ et $\Delta(\text{Humidité})$

Si l'on a pu constater une légère amélioration de la corrélation en considérant des valeurs moyenne de l'humidité pendant la période de passage du satellite, on peut également reconsidérer les séries elles-mêmes. En effet, on peut s'intéresser à comparer les variations des séries entre elles, soient $\Delta(\psi)$ et $\Delta(\text{Humidité})$ et non plus les mesures absolues directes. En l'espèce, pour un instant i considéré, on obtient une valeur $\Delta(\psi)$ en soustrayant la valeur à l'instant $i+1$ à la valeur au moment i et l'on fait de même pour l'humidité moyenne. On obtient alors deux séries de longueurs $i-1$ (66 jours dans notre cas).

| | r1 $\psi - \overline{H}_{24h}$ | r2 $\psi - \overline{H}_{pas}$ | r3 $\Delta\psi - \overline{\Delta H}_{24h}$ | r4 $\Delta\psi - \overline{\Delta H}_{pas}$ |
|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| G05 | 0,62 | 0,64 | 0,69 | 0,71 |
| G29 | 0,65 | 0,69 | 0,71 | 0,77 |

Tableau V-3 : Coefficients de Corrélation entre les Différentes Séries

\overline{H}_{24h} représente la série de l'humidité moyenne par jour,

\overline{H}_{pas} la série de l'humidité moyenne sur l'intervalle de passage du satellite,

$\Delta\psi$ la série de variation du déphasage,

$\overline{\Delta H}_{24h}$ la série de variation de l'humidité moyenne par jour,

$\overline{\Delta H}_{pas}$ la série de variation de l'humidité moyenne sur l'intervalle de passage du satellite.

La corrélation est finalement plus forte lorsque l'on considère les variations du déphasage ψ avec les variations de l'humidité (cf. tableau V-3). Il y a donc une correspondance plus importante entre la variation du paramètre ψ et la variation d'humidité au cours du temps qu'entre les mesures absolues de ψ et de l'humidité du sol.

V.2.3.3 Entre la Théorie et la Pratique...

Si on en revient aux recommandations pratiques pour ce type d'étude, les paramètres du SNR multi-trajet A et ψ doivent être déterminés à partir des basses élévations. Celles-ci étant, dans la littérature, définies comprises entre 5° et 25° . Dans notre cas, les mesures de SNR ne sont disponibles qu'à partir de 10° d'élévation. On peut dès lors supposer que les mesures de SNR « manquantes » pour les valeurs d'élévations comprises entre 5° et 10° apporteraient des résultats différents à notre analyse. N'ayant aucun moyen de vérifier, nous ne pouvons pas affirmer que l'intensité des corrélations seraient plus élevées mais il est important de garder cette idée à l'esprit notamment pour dors et déjà cibler d'éventuels approfondissements sur le sujet.

V.3 SNR et Humidité du Sol : Signaux L1P et L2P

Les notions théoriques sur les signaux GPS d'une part et les recommandations présentes dans la littérature de notre sujet d'autre part, tout semble s'accorder à privilégier l'utilisation du signal L2C pour la mesure d'humidité du sol. Néanmoins, ce signal n'est diffusé que sur une dizaine de satellites sur les 31 que compte la constellation GPS ce qui le rend moins accessible que les signaux L1P et L2P. Il apparaît donc intéressant de se pencher sur l'évolution des paramètres A et ψ relatifs à ces signaux, une éventuelle corrélation avec l'humidité du sol se poserait alors comme une aubaine au vu du grand nombre de satellite sur lesquelles l'étude pourrait s'appuyer.

Cette partie constitue une analyse comparative des signaux L1P et L2P par rapport au signal L2C. Elle se base sur les mesures du satellite G29 sur la même période d'étude que pour l'analyse sur L2C. Il s'agit plus précisément de retrouver les éléments théoriques précédemment développés et de conclure sur une potentielle utilisation de ces signaux pour la mesure de l'humidité du sol.

À l'image des résultats donnés par le signal L2C, l'amplitude A du SNR multi-trajet sur les signaux L1P et L2P ne laisse pas entrevoir une quelconque corrélation. Son évolution est en effet très oscillatoire et ne révèle aucun point commun avec les précipitations ou encore l'évolution de l'humidité du sol.

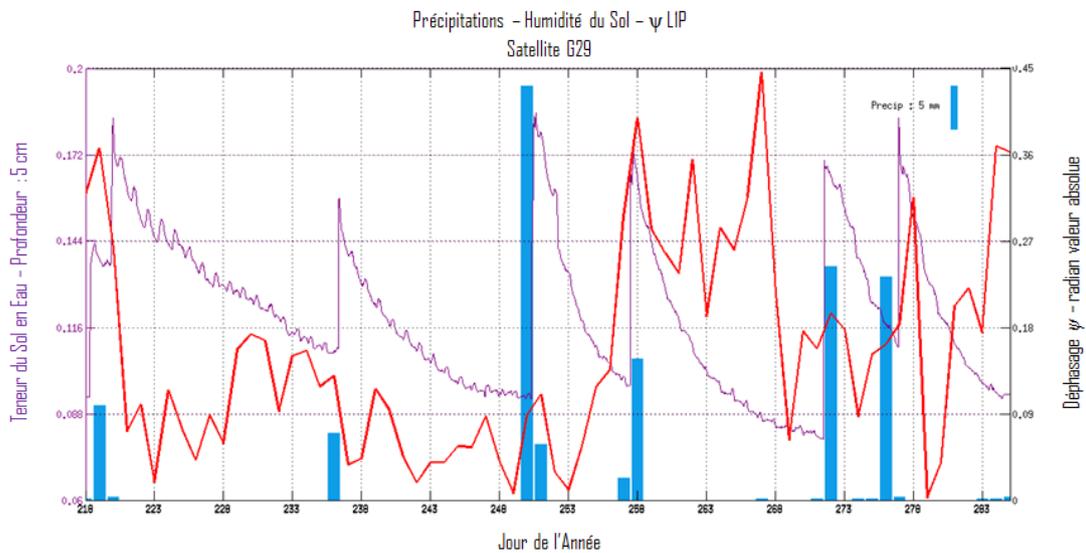


Figure V-8 : Précipitations - Humidité du Sol – ψ L1P

En ce qui concerne le déphasage ψ , les résultats obtenus à partir du signal L1P ne présentent pas de similitudes avec les mesures extérieures. On observe en effet de brusques oscillations qui ne correspondent ni aux relevés pluviométriques et encore moins à la teneur du sol en eau.

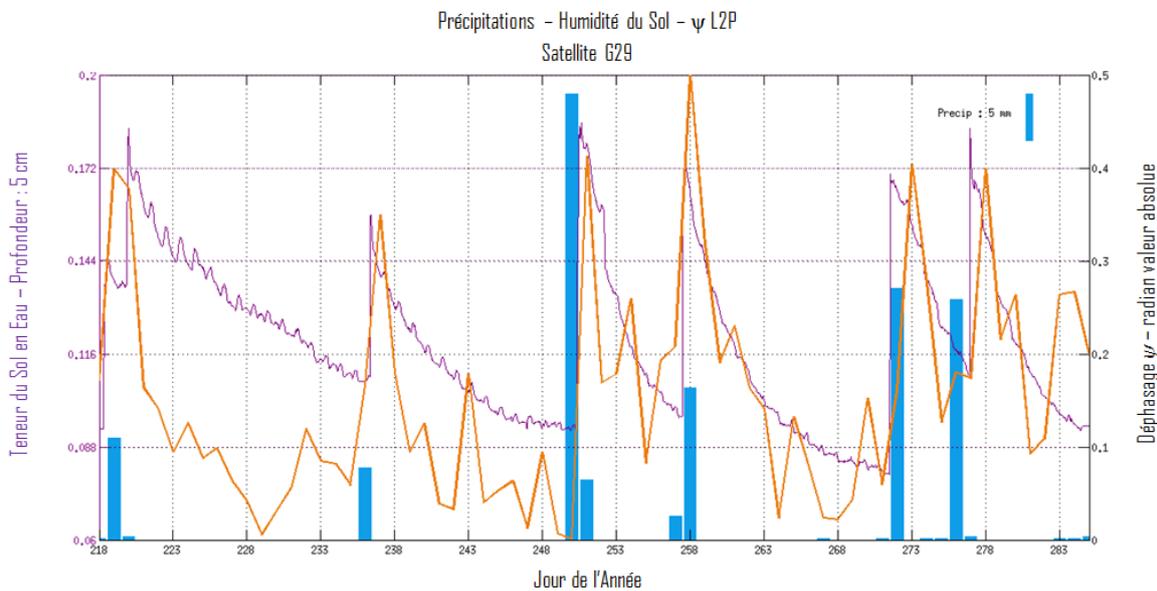


Figure V-9 : Précipitations - Humidité du Sol – ψ L2P

À contrario, le comportement de ψ sur le signal L2P révèle une bonne corrélation avec les mesures in situ. On peut en effet observer des « pics » qui correspondent aux événements pluvieux majeurs. On semble néanmoins un peu plus éloigné des mesures d'humidité du sol par rapport aux mesures issues du signal L2C mais la similitude avec la pluviométrie est flagrante.

| sn L1 | sn L2 | sn L2C |
|-------|-------|--------|
| 0,06 | 0,61 | 0,65 |

Tableau V-4 : Coefficients de Corrélation de ψ avec l'Humidité du Sol pour les Différents Signaux (satellite G29)

Les coefficients de corrélation donnés dans le tableau V-4 s'accordent sur ces conclusions. Si le signal L1P ne montre clairement aucune corrélation, les caractéristiques du signal L2P permettent aussi bien la détermination des événements pluvieux que ceux du signal L2C.

V.4 Conclusions

Les résultats qui viennent d'être mis en avant permettent de dresser plusieurs conclusions quant aux relations entre humidité du sol et SNR multi-trajet.

La méthode qui a été mise en œuvre pour ce projet permet de sortir deux paramètres du SNR multi-trajet qui sont l'amplitude A et le déphasage ψ . Il s'avère finalement que l'amplitude A ne présente pas de lien avec les événements pluvieux ou l'humidité du sol. À l'inverse, le déphasage du SNR multi-trajet ψ se pose comme un bon indicateur permettant la détection des événements pluvieux et révélant une bonne corrélation avec les mesures in situ d'humidité du sol.

En ce qui concerne la détection à posteriori des événements pluvieux majeurs. Les mesures fournies par les signaux L2P et L2C permettent une nette distinction de ceux-ci tandis que les mesures sur le signal L1P sont à écarter. Cette détection fonctionne pour des pluviométries quotidiennes supérieures ou égales à 5 millimètres (la période d'étude de ce travail n'ayant pu constater une pluie isolée inférieure). De manière générale, un « pic » dans les séries temporelles de ψ correspond à un événement pluvieux, celui-ci survient à la suite des précipitations, une fois que le sol est chargé en eau. Il faut garder à l'esprit que, ne pouvant disposer que d'un passage du satellite par jour, le « pic » peut être décalé d'un jour par rapport à la donnée sur les précipitations quotidiennes.

De plus, pour des mesures de ψ sur un satellite donné, on peut parfois observer des erreurs : un « pic » peut ne pas correspondre à un événement pluvieux ou à l'inverse, on peut noter une absence de « pic » dans la série lors d'un événement pluvieux. On peut trouver des explications à ces erreurs en revenant sur les critères considérés pour le choix des satellites (en l'espèce, l'azimut de passage optimal dans le cadre de notre étude semble avoisiner les 190°). Néanmoins, afin d'écarter au maximum ces erreurs, il convient de considérer les mesures sur plusieurs satellites : 3 satellites me paraissant être le minimum.

Enfin, il existe une corrélation entre humidité du sol et déphasage du SNR ψ qui est plus ou moins fine en fonction des satellites. On peut apprécier graphiquement cette corrélation, on note alors que les variations des mesures in situ d'humidité du sol et du ψ ont des tendances similaires. D'un point de vue statistique, on obtient des coefficients de corrélation entre l'humidité du sol et ψ supérieurs à 0,50 et s'approchant parfois de 0,70. Le lien est encore plus important entre variation de l'humidité du sol et variation du déphasage du SNR ψ avec des coefficients de corrélations allant jusqu'à 0,77.

Globalement, les résultats sont positifs et il ne fait aucun doute du lien qu'il existe que ce soit entre humidité du sol et déphasage du SNR multi-trajet ψ ou entre les variations de ces deux séries. De plus, l'analyse a été réalisée sur des mesures du SNR limitée (pas d'accès aux valeurs de SNR pour les élévations inférieures à 10°). On peut dès lors imaginer que le lien est encore plus important puisque la contribution du multi-trajet aux élévations comprises entre 5° et 10° sera plus élevée ce qui va influencer la modélisation sinusoïdale du SNR et donc les paramètres A et ψ .

VI Perspectives

S'il s'avère finalement que les mesures GNSS permettent une modélisation correcte de l'humidité du sol, il reste tout de même des éléments à résoudre afin de pouvoir proposer un protocole de mesure fiable et fonctionnel tout au long de l'année, adapté à une utilisation grand publique qui pourrait améliorer les pratiques agricoles.

De nombreuses études ont été menées sur l'exploitation du multi-trajet des signaux GNSS. Si certaines abordent la même problématique de mise en avant de l'humidité du sol par des méthodes différentes, d'autres s'intéressent à la mise en avant de phénomènes différents dont on peut d'ores et déjà imaginer les intérêts dans la poursuite de ce travail.

VI.1 Vers une Automatisation du Processus

Le processus de calcul qui a pu être mis en place lors de ce travail est loin d'être automatique ce qui poserait des difficultés pour l'exploitation des mesures par une personne non initiée. En effet, du traitement des mesures brutes à l'extraction du SNR-multi-trajet aux basses élévations en passant par la manipulation des fichiers RINEX et la sélection de la phase de mesure utile pour un satellite donné, c'est une longue chaîne de calcul qui doit être répétée à chaque passage des satellites. L'automatisation du traitement des mesures se pose comme essentielle dans l'hypothèse de l'installation d'un dispositif de mesure de l'humidité du sol par réflectométrie.

VI.2 Applications pour des Mesures Continues

Pour des mesures sur une échelle de temps plus importante (une ou plusieurs années voire jusqu'à des mesures continues), il sera également nécessaire de considérer le décalage des moments de passage des satellites. Problème contourné dans ce travail puisqu'à raison d'un décalage de 2 minutes par jour sur une période d'étude de 67 jours, on constate un écart d'un peu plus de 2 heures entre le premier et le dernier jour de l'étude ce qui n'engendre pas des problèmes tels que des passages de satellites sur 2 jours distincts.

Il faudra également prendre en considération les azimuts de passage des satellites considérés. En effet, sur une échelle de temps suffisamment longue, la « trace » au sol des satellites est changeante ce qui rend la sélection des satellites pour une configuration donnée « flottante ». À titre d'exemple, si l'on réalise la même étude avec des configurations identiques dans quelques années, il conviendra de revenir sur les satellites considérés, certains ne seront plus optimaux tandis que d'autres qui ne l'étaient pas le deviendront.

VI.3 Relation Mathématique entre SNR et Humidité du Sol

Si ce travail démontre l'existence d'un lien entre le SNR multi-trajet et l'humidité du sol, il ne permet néanmoins pas de sortir une relation donnant une quantité volumétrique d'eau à partir d'une valeur de ψ . Dans cette idée, il serait nécessaire d'effectuer des mesures sur une période plus longue et sur la totalité des satellites émettant le signal L2C. En effet, on a pu remarquer que l'intensité des valeurs de SNR multi-trajet n'est pas la même en fonction des satellites. Dès lors, une relation unique pour tous les satellites permettant d'obtenir une quantité volumétrique d'eau à partir des valeurs de ψ ne peut être envisageable. C'est donc potentiellement une relation propre à chaque satellite que l'on pourrait trouver.

De plus, si de telles relations étaient envisageables, il apparaîtrait important de considérer les mesures d'un maximum de satellites. Au cours de ce travail, on a pu remarquer que certains satellites présentaient une corrélation plus fidèle avec l'humidité du sol que d'autres. Ainsi, en s'appuyant sur des mesures à plus long terme, on peut imaginer un système qui fournirait l'information sur la quantité d'eau au sol à partir des résultats pondérés de tous les satellites émettant L2C : un poids plus important pourrait être donné aux satellites qui présentent des corrélations plus fidèles.

VI.4 Vers d'autres Utilisations du SNR

Bien que cette problématique d'exploitation du SNR soit récente, la littérature sur le sujet est abondante et les utilisations du SNR en GNSS ne s'arrêtent pas à la modélisation de l'humidité du sol.

Il m'apparaît déjà important de noter qu'il n'existe pas une unique façon permettant d'aboutir à des résultats similaires à ceux présentés dans ce travail. En effet, la détermination des paramètres du SNR multi-trajet A et ψ peut par exemple être envisageable par une analyse par ondelette, outil mathématique permettant l'analyse de signaux.

Certains travaux se penchent également sur la détermination de l'épaisseur de la glace à partir des récepteurs GPS. Certains modèles sur la permittivité du sol sont alors ajoutés à l'analyse et des comparaisons sont effectuées avec des mesures in situ de l'épaisseur de glace.

D'autres chaînes de traitements mettant en jeu un dispositif technique différent permettent également de s'intéresser à la hauteur des vagues.

Enfin, des études montrent que la détection de la biomasse est possible grâce à la réflexion au sol des signaux GNSS. On imagine dès lors l'importance que cela pourrait avoir dans la mise en place de système de mesures continues pour l'humidité du sol puisque l'évolution des cultures viendrait peut-être biaiser les mesures...

Bref, l'exploitation des signaux GNSS ne semble pas encore avoir atteint ses limites aujourd'hui. Les nombreuses perspectives d'études ainsi que leurs éventuelles mises en relation se posent comme encourageantes et l'émergence et l'expansion grandissante des nouvelles constellations ne semblent pas se poser comme un frein à ces futurs découvertes.

Conclusion

La mise en avant de la corrélation entre le SNR des signaux GPS et l'humidité du sol s'est déroulée en deux temps. Cette problématique a tout d'abord nécessité une approche théorique et logistique afin d'une part de bien saisir les subtilités géométriques et physiques du système et d'autre part de s'organiser sur la démarche expérimentale et les choix à entreprendre. Le second aspect de ce travail réside dans l'interprétation des résultats et les conclusions que l'on peut en tirer.

La navigation guidée par satellite présente des caractéristiques de plus en plus élaborées. L'utilisation grandissante de cette technologie est sans doute la cause des nombreuses améliorations technologiques qui ont pu être apportées au système GPS depuis son apparition grand public dans les années 1990. L'émission de nouveaux signaux par les satellites ouvre aujourd'hui la porte à de nouvelles applications sur le suivi d'événements naturels et notamment pour les variations d'humidité du sol.

En s'intéressant aux signaux reçus aux basses élévations, on privilégie le phénomène de multi-trajet, soit la réflexion partielle au sol du signal avant d'être capté par une antenne. La perturbation apportée sur le signal que l'on met en avant en étudiant le SNR dépend de la surface de réflexion et de son état d'humidité. La modélisation du SNR multi-trajet aux basses élévations par une onde sinusoïdale permet de mettre en avant la corrélation entre l'humidité du sol et le déphasage ψ de cette onde.

Cette étude montre que le déphasage du SNR multi-trajet ψ sur les signaux L2P et L2C permet la détection à posteriori des événements pluvieux supérieurs à 5 millimètres. Le signal L2C révèle plus précisément une bonne corrélation avec des mesures in situ d'humidité du sol. On observe ainsi des coefficients de corrélation allant jusqu'à 0,69 en mettant en relation ψ avec l'humidité du sol moyenne sur 24 heures.

L'intensité de la corrélation est plus ou moins prononcée en fonction des satellites considérés. Dans notre cas, de nombreux critères rentrent en considération pour le choix des satellites et c'est la configuration géométrique du site qui en apporte les principales limitations. Elle vient en outre justifier les divergences que l'on observe entre les mesures des différents satellites.

Les résultats mis en avant dans cette étude induisent d'ores et déjà les améliorations que cette technique pourrait apporter notamment dans le suivi d'humidité pour l'amélioration de pratiques agricoles. Des points restent cependant à résoudre notamment au niveau de l'automatisation du processus de calcul et sur l'utilisation du paramètre ψ pour appuyer des décisions d'irrigations artificielles du sol.

Bibliographie

Chapitre dans un ouvrage imprimé

Richard B. Langley. PROPAGATION OF THE GPS SIGNALS. In : Alfred Kleusberg, Peter J. G. Teunissen. GPS for Geodesy, Softcover reprint of the original 2nd ed. 1998, 407 p.

Travaux universitaires et publications :

ROCH Jonas. Le Global Positioning System Structure et Fonctionnement. Travail de Maturité, Gymnase Cantonal du Bugnon, Lausanne, 2009, 41 p.

CAPREDON Nicolas. Étude et suivi de l'humidité des sols par réflexion des ondes GPS. Rapport de Stage Master Recherche Physique, 2011

LESCARMONTIER Lydie. Étude des processus de fracturation et vèlage d'iceberg en Antarctique : *Une histoire du glacier Mertz*. Doctorat de l'université de Toulouse, 2012, 265 p.

Articles de périodiques électroniques :

LARSON K. M. *et al.* GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content. Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2010, vol. 3, n°1. Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html >

BILICH A., LARSON K. M., AXELRAD P.. *Modeling GPS phase multipath with SNR: Casse study from the Salar de Uyuni, Bolivia*. Journal of Geophysical Research, 2008, vol. 113. Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html >

LARSON K. M. *et al.* Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results, GPS Solut 2007. Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html >

LARSON K. M. *et al.* Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. Geophysical Research Letters, 2008, vol. 35. Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html >

SMALL E. E., LARSON K. M., BRAUN J. J. *Sensing vegetation growth with reflected GPS signals*. Geophysical Research Letters, 2010, vol. 37. Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html >

RODRIGUEZ-ALVAREZ *et al.* Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, vol. 47, n°11.

ZAVOROTNY V. U. *et al.* A Physical Model for GPS Multipath Caused by Land Reflections: Toward Bare Soil Moisture Retrievals. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, vol. 3, n°1. Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html >

BILICH A., LARSON K. M.. *Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR)*. Radio Science, 2007, vol. 42. Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html >

LARSON K. M.. *Can we measure snow depth with GPS receivers?* Geophysical Research Letters, 2009, vol. 36.

Manuscripts non référencés :

BILICH A., AXELRAD P., LARSON K. M., *Scientific Utility of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) Reported by Geodetic GPS Receivers*

Disponible sur : < http://spot.colorado.edu/~kristine/Kristine_Larson/Publications.html>

FONTANA R. D.. *The New L2C Civil Signal*

Disponible sur : < <http://navcen.uscg.gov/pdf/gps/TheNewL2CivilSignal.pdf> >

Sites web :

National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. GPS.gov, [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.gps.gov/>>

UNAVCO, [en ligne]. Disponible sur : <www.unavco.org>

COSANDIER J.L.. Global Positioning System Principes Généraux de la localisation par satellites. Snaastro.org, [en ligne]. Disponible sur : < http://www.snaastro.org/media/J-LC_GPS.PDF >

WWW.TECHNOGPS.FR. [en ligne]. Disponible sur : <technogps.fr>

IGN. Réseau GNSS Permanent, [en ligne]. Disponible sur : <rgp.ign.fr>

SAMMUNEH Muhammad Ali, enseignant au département de la Topographie à la Faculté de Génie Civil, Université d'Alep, Syrie. Cours de Géodésie Spatiale, [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.lb.refer.org/sammuneh/index.htm>>

Orpheon, [en ligne]. Disponible sur : <<http://reseau-orpheon.fr/>>

Santere R., Langley R., Collins P. & Stewart P., Geodetic Research Laboratory MEMORANDUM, [en ligne]. Disponible sur : < <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/SNR.memo.pdf> >

U.S. Coast Guard Navigation Center, GLOBAL POSITIONING SYSTEM Modernized Civil Navigation (CNAV) Live-Sky Broadcast Test Plan, [en ligne]. Disponible sur : <http://www.navcen.uscg.gov/Content/GPS/CNAVTesting/L2C_L5_CNAV_Test_Plan.pdf>

Annexe : Aide TEQC sous Windows

Cette "aide" ne vient en aucun cas présenter l'ensemble des possibilités du logiciel TEQC. Elle dresse une simple liste des commandes qui ont pu être utilisés lors de l'étude du suivi de l'humidité du sol par GNSS. Je renvoi le lecteur vers le tutoriel complet de TEQC disponible sur le site de l'UNAVCO. J'ajouterai, en guise de conseil à un éventuel intéressé qui s'interrogera sur l'existence ou le fonctionnement de certaines commandes, de ne pas hésiter à s'inscrire sur la « *mailing list* » du forum de TEQC qui est gérée par les administrateurs du logiciel qui m'ont apporté de nombreuses réponses lors de ce travail.

DÉMARRAGE *TEQC.EXE*

1. Ouvrir l'invite de commande *.cmd*
2. Taper *cd [repertoire du fichier 'teqc.exe']* // changement du répertoire courant
3. Taper *teqc.exe* // lancement du programme

Nota : se référer aux aides de l' « invite de commande » pour les commandes relatives à celui-ci (Taper 'help' dans l'invite de commande).

COMMANDES DE BASE

➤ Fusion de plusieurs RINEX

Taper *teqc fichier1.13O fichier2.13O ... fichier.13O > nomdufichierfinal.13O*

Important : Les fichiers RINEX en entrée doivent avoir une continuité dans le temps

➤ Ré-échantillonnage du fichier toute les x secondes

Taper *teqc -O.dec x fichier.13O > nomdufichierfinal.13O*

➤ Info sur un fichier RINEX

Taper *teqc +qcq fichier.13O*

➤ Sortir fichiers infos azi, ele, tropo, multitraj, snr du RINEX

Taper *teqc +qc fichier.13O*

Sort fichier *.13S* (summary), *.azi .ele .iod .ion .mp1 .mp2 .sn1 .sn2*

Attention! Pour que cette commande fonctionne correctement, il faut qu'il y est bien tous les fichiers *.13O*, *.13N* (au moins) ensemble.

TRANSFORMATION *.T02* EN RINEX

1. Télécharger *runpkr00* et l'exécuter
2. Taper *runpkr00 -g -d fichier.T02 fichier.TGD* //création d'un fichier *.TGD*
t02 doit être au même endroit que runpkr00
3. Taper *teqc -tr d +nav fichier.13N,fichier.13G +met fichier.13M fichier.TGD > fichier.13O*

Sort les fichiers RINEX *.13N*, *.13O*, *.13G* et *.13M* (météo)

4. *teqc +L2C_L2 -tr d +nav fichier.13N,fichier.13G +met fichier.13M fichier.TGD > fichier.13O* Pour avoir mesure sur L2C à la place de L2.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I-1 : Triangulation GNSS..... | 11 |
| Figure II-1 : Géométrie du Multi-Trajet..... | 16 |
| Figure II-2 : Distance Radiale r | 17 |
| Figure II-3 : Trajectoire d'une Onde et Diagramme de Phase | 19 |
| Figure III-1 : Diagramme présentant la Démarche | 22 |
| Figure III-2 : Traitements TEQC | 22 |
| Figure IV-1 : Image Aérienne du Site | 25 |
| Figure IV-2 : Photos Station GA00..... | 25 |
| Figure IV-3 : Zone d'Intérêt pour le Passage de Satellites | 26 |
| Figure IV-4 : Carte du Ciel - Trajet des Satellites sur 12h..... | 26 |
| Figures IV-5 : Disponibilité des Satellites et Traces au sol | 27 |
| Figure IV-6 : Évolution du MP par Satellite sur une journée | 28 |
| Figure IV-7 : Évolution du MP - Satellite G25..... | 28 |
| Figure IV-8 : Évolution du SN2 (SNR L2P(Y)) au cours d'une journée | 28 |
| Figure IV-9 : Évolution du SNR - Satellite G29..... | 29 |
| Figure IV-10 : Évolution des Précipitations et de l'Humidité du Sol | 29 |
| Figures IV-11 : Traitement du SNR Brut..... | 31 |
| Figure V-1 : Variation de l'Amplitude du SNR multi-trajet A - Satellite G05..... | 33 |
| Figure V-2 : Variation du Déphasage du SNR multi-trajet ψ - Satellites G05 G29..... | 34 |
| Figure V-3 : Variation du Déphasage du SNR multi-trajet ψ - Satellites G12 G15..... | 34 |
| Figure V-4 : Variation de ψ - Satellites G12 G15 – jour 248 à 263..... | 35 |
| Figure V-5 : Variation de ψ et de l'Humidité du Sol - Satellite G05 | 36 |
| Figure V-6 : Variation de ψ et de l'Humidité du Sol - Satellite G29 | 36 |
| Figure V-7 : Diagrammes de Dispersion et Coefficients de Corrélation r | 37 |
| Figure V-8 : Précipitations - Humidité du Sol – ψ L1P | 40 |
| Figure V-9 : Précipitations - Humidité du Sol – ψ L2P | 40 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau IV-1 : Fiabilité des Satellites GPS émettant L2C pour la Zone d'Étude..... | 27 |
| Tableaux V-1 : Choix des Périodes pour le Calcul de l'Humidité Moyenne par Satellite..... | 38 |
| Tableau V-2 : Coefficients de Corrélacion de ψ pour des Valeurs Moyennes d'Humidité du Sol Différentes | 38 |
| Tableau V-3 : Coefficients de Corrélacion entre les Différentes Séries | 39 |
| Tableau V-4 : Coefficients de Corrélacion de ψ avec l'Humidité du Sol pour les Différents Signaux (satellite G29) | 41 |

Suivi de l'humidité des sols par l'analyse des signaux GNSS

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2014

RÉSUMÉ

Depuis son apparition dans les années 1990, la navigation guidée par satellite et notamment le système américain GPS (*Global Positioning System*) a connu de nombreuses évolutions qui ouvrent aujourd'hui la porte à des utilisations nouvelles de cette technique allant bien au-delà du principe de positionnement. Des mesures GPS réalisées avec une station dédiée sur un champ cultivé près de Tarascon (13) ont permis de mettre en avant une corrélation entre humidité du sol et signaux GPS.

Lors de leur propagation, les ondes GNSS sont soumises à de nombreux phénomènes perturbateurs et notamment à la réflexion sur le sol à proximité de l'antenne réceptrice. Ce phénomène est d'autant plus important lorsque l'élévation du satellite est faible. La modélisation du rapport signal sur bruit (SNR) des signaux GPS captés aux basses élévations par une sinusoïde permet de sortir deux paramètres : l'amplitude A et le décalage de phase ψ . L'analyse de l'évolution de ces paramètres sur une période de deux mois révèle une corrélation entre humidité du sol et signaux GPS. Cette technique permet une nette détection des événements pluvieux et révèle une bonne corrélation avec la variation d'humidité du sol au cours du temps.

Mots clés : Réflectométrie, GNSS-R, Humidité du Sol, SNR, signal L2C, Multi-Trajet

SUMMARY

Since its appearance in the 1990's, Global Navigation Satellite System and more precisely the American system GPS (*Global Positioning System*) have known huge expansions. Nowadays, such developments enable this technology to provide new applications going far beyond positioning. GPS measurements realized on a field in the south of France (near Tarascon) with a dedicated station has shown a significant correlation between soil moisture and reflected GPS signals.

During their propagation, GNSS waves are affected in a number of ways. Catching GPS signal at low elevations promotes multipath effect on the soil near the antenna. Signal-to-Noise-Ratio (SNR) modeling at low elevations with a sinusoid wave form allows to determine two parameters: amplitude A and phase offset ψ . The analysis of these two parameters during a period of two months show a correlation between soil moisture and GPS signals. With this method, we can easily detect rain events and we find a good correlation with soil moisture variations.

Key words: Reflectometry, GNSS-R, Soil Moisture, SNR, L2C signal, Multi-Path