
Application de la réflectométrie pour la mesure des variations de l'humidité du sol utilisation d'une seule antenne

Sommaire

6.1	Introduction	154
6.2	Etat de l'art	155
6.2.1	Hauteur <i>effective</i> h de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante	156
6.2.2	Amplitude A_m et phase ϕ_m des oscillations du SNR dues au multi-trajet	156
6.3	Méthodologie	156
6.3.1	Détermination de la hauteur effective h	156
6.3.2	Détermination de l'amplitude A_m et de la phase ϕ_m	158
6.4	L'expérience de Lamasquère	159
6.4.1	Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales	159
6.4.2	Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS	161
6.4.3	Données utilisées pour la validation	161
6.5	Résumé des principaux résultats	162
6.5.1	Détermination de l'humidité du sol à partir de h_s , A_m et ϕ_m	162
6.5.1.1	Faibles angles d'élévation : 2° à 30°	162
6.5.1.2	Angles d'élévation élevés : 30° à 70°	163
6.5.1.3	Combinaison des satellites entre eux	164
6.5.1.4	Conclusion	165
6.5.2	Détermination de l'humidité du sol à partir de h_d	165
6.6	Discussion sur l'inversion du signe de la corrélation entre les petits et grands angles d'élévation	166
6.7	Conclusions et perspectives	169
6.8	Article sous presse : IEEE JSTARS - Detection of soil moisture variations	171

6.1 Introduction

Les mesures d'humidité du sol constituent des observations très importantes pour mener des études sur le climat, les prédictions météorologiques, les analyses des zones inondables et les recharges d'aquifères. En milieu agricole, une analyse en temps réel de l'état hydrique du sol permettrait à l'exploitant d'optimiser la gestion de ses parcelles (travail du sol, traitements, irrigation, etc.). Les différentes techniques de mesure actuelles présentent toutes des caractéristiques différentes en terme de **résolution spatiale** (i.e., la capacité d'un capteur à discerner un détail, ou, en d'autres termes, la plus petite surface représentée par une mesure), de **résolution temporelle** (i.e., la répétitivité de la mesure) et de **précision** (i.e., la qualité de la mesure effectuée). L'optimisation d'un de ces trois paramètres se fait malheureusement souvent au détriment des deux autres.

Ainsi, les sondes d'humidité classiques (de type *Theta probe* par exemple) fournissent uniquement des mesures ponctuelles et très hétérogènes, peu représentatives d'une parcelle entière. En revanche, la précision est plutôt bonne (par exemple, pour les sondes *Theta*, la précision annoncée est de 2 % de volume d'humidité du sol avec des étalons spécifiques au sol), et les mesures peuvent être réalisées en continu. Avec l'avènement des techniques de télédétection, l'humidité du sol peut être mesurée à une échelle globale, mais c'est cette fois au détriment de la résolution temporelle et spatiale. Par exemple, même avec la mission SMOS : *Soil Moisture and Ocean Salinity satellite* (Kerr *et al.*, 2010), la répétitivité est de 3 jours maximum à l'équateur, et le côté d'un élément de surface fait en moyenne 43 km.

Des études récentes proposent d'utiliser la réflectométrie GNSS comme méthode alternative, qui présente un excellent compromis entre résolutions spatiale, temporelle et précision. En utilisant par exemple le réflectomètre SMIGOL à antenne unique, Rodriguez-Alvarez *et al.* (2011b) annoncent une précision de $2,0 \sim 3,2\%$. La résolution spatiale, quant à elle, est uniquement fonction de la hauteur d'antenne au-dessus de la surface de réflexion (pour une constellation de satellites donnée sur un intervalle de temps défini) : voir section 4.3.2 page 81 et figure 4.6 page 82. Une zone autour de l'antenne allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres sera ainsi couverte. En ce qui concerne la résolution temporelle, elle dépend beaucoup de l'algorithme de calcul utilisé pour estimer les variations d'humidité (voir section 6.5 page 162), mais elle est généralement de plusieurs heures voire jours (e.g., Larson *et al.*, 2008). La technique se base sur l'interaction des signaux GNSS qui se réfléchissent sur le sol et contiennent donc une information sur les caractéristiques de la surface réfléchissante, particulièrement le contenu en eau des premiers centimètres. Les interférences au niveau de l'antenne entre l'onde directe et l'onde réfléchie sont particulièrement visibles dans le rapport signal sur bruit SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) enregistré par le récepteur (voir sections 3.4.2.2 page 60 et 5.2 page 112). Les variations de la nature de la surface et de ses propriétés vont modifier le signal GNSS réfléchi, et donc le SNR, que l'on va pouvoir ensuite analyser pour estimer l'humidité du sol. Cette méthode d'estimation présente l'avantage majeur d'être applicable très aisément en utilisant n'importe quelle antenne GNSS classique (notamment celles des réseaux permanents), sans aucune modification de matériel.

Le réseau américain **PBO H20** a mis concrètement cette technique SNR en application, et traite quotidiennement un ensemble de stations GNSS permanentes pour délivrer des estimations d'humidité du sol (mais également des indices de végétation ou de hauteur de neige). Ce réseau (<http://xenon.colorado.edu/portal>) est pleinement opérationnel et analyse actuellement plus de 133 stations dédiées à l'estimation de l'humidité du sol. La figure 6.1

illustre le réseau principalement présent en Amérique de l'ouest.



FIGURE 6.1 – Stations GNSS du réseau **PBO H2O** analysées par réflectométrie pour estimer l'humidité du sol.

Dans le cadre de ma thèse, je me suis particulièrement intéressé à cette méthode d'inversion du SNR, que j'ai pu mettre en application en estimant l'humidité du sol in situ d'une parcelle agricole durant plusieurs semaines d'acquisitions. J'ai donc été amené à tester les processus de traitement existants, et à apporter quelques modifications permettant notamment d'améliorer la résolution temporelle et la précision. Cette étude a fait l'objet d'un article sous presse dans *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*, qui est inséré dans la section 6.8 :

Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Darrozes J., Baup F., Cuong H. : *Detection of Soil Moisture Variations Using GPS and GLONASS SNR data for elevation angles ranging from 2° to 70°*. Sous presse dans *IEEE JSTARS*.

Ce chapitre s'articule en quatre parties principales **qui sont les principaux points de cet article**. La première partie est un bref rappel des travaux antérieurs sur l'estimation de l'humidité du sol basée sur l'analyse des séries temporelles SNR enregistrées par une station GNSS classique. La deuxième partie présente la méthode que j'utilise pour inverser les mesures de SNR afin d'estimer les variations de l'humidité du sol. Cette méthode a été appliquée à des observations in situ acquises durant 6 semaines (du 5 février au 15 mars 2014) dans un champ agricole. Les conditions expérimentales sont décrites dans la troisième section. Enfin, les résultats de cette campagne de mesure sont analysés dans une dernière section, avant de conclure sur les potentialités de cette technique.

6.2 Etat de l'art

La base théorique utilisée est la même que celle développée dans les sections précédentes 3.4.2.2 page 60 et 5.2 page 112, concernant la contribution de l'onde réfléchie sur la série temporelle du SNR mesurée par une antenne et un récepteur GNSS. Dans ces sections, il est expliqué que l'onde directe et réfléchie interagissent au niveau de l'antenne et que ces interférences constructives sont particulièrement visibles dans la série temporelle du SNR. Il est

possible d'isoler la contribution du signal réfléchi (notée SNR_m) en corrigeant les observations de la composante parabolique dominante, due au signal direct. De plus, la fréquence $\tilde{f}$ des oscillations de SNR_m en fonction du sinus de l'angle d'élévation θ est fonction de la hauteur h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion (équation 5.1 page 112). La mesure puis l'inversion de cette fréquence $\tilde{f}$ permet donc de déduire les variations de distance entre l'antenne et la surface du sol réfléchissante.

Pour des applications continentales de mesure d'humidité du sol, il sera possible d'utiliser trois observables mesurées sur la série temporelle SNR_m : la hauteur h (liée à la fréquence $\tilde{f}$ de la série temporelle), l'amplitude A_m et la phase ϕ_m de SNR_m .

6.2.1 Hauteur effective h de l'antenne par rapport à la surface réfléchissante

Dans le cas d'une réflexion sur une surface continentale, on observe une pénétration des ondes GNSS dans le sol avant réflexion. La profondeur de cette pénétration est directement liée à la nature de la surface réfléchissante, et principalement son contenu en eau (Larson *et al.*, 2010). Les variations de l'humidité du sol vont donc modifier la profondeur de pénétration des ondes, et provoquer ainsi de légères variations temporelles de la hauteur effective h de l'antenne mesurée par inversion de $\tilde{f}$.

Les variations temporelles de h estimées grâce au SNR sont donc un très bon indicateur des fluctuations du contenu en eau du sol autour de l'antenne (Chew *et al.*, 2014).

6.2.2 Amplitude A_m et phase ϕ_m des oscillations du SNR dues au multi-trajet

Il existe également d'autres moyens d'inverser la série temporelle du SNR pour en déduire les variations d'humidité du sol. En effet, il est possible d'exprimer la contribution SNR_m du multi-trajet au SNR sous la forme suivante (Larson *et al.*, 2008) :

$$SNR_m = A_m \cos\left(\frac{4\pi H}{\lambda} \sin(\theta) + \phi_m\right) \quad (6.1)$$

où l'amplitude A_m varie en fonction de la réflectivité et du gain de l'antenne, et ϕ_m est la phase. H est la hauteur d'antenne mesurée sur le terrain (e.g., à l'aide d'un mètre-ruban) et est considérée comme fixe. En d'autres termes, H est la valeur de h que l'on obtiendrait théoriquement s'il n'y avait aucune pénétration des ondes GNSS dans le sol.

Différentes campagnes de mesures ont montré que les paramètres A_m et ϕ_m varient tous les deux avec l'humidité du sol (Chew *et al.*, 2014; Larson *et al.*, 2008, 2010), en raison des variations de réflectivité que cette dernière va engendrer. L'impact de l'humidité surfacique sur ϕ_m est plus important que celui sur A_m .

6.3 Méthodologie

L'objectif est d'estimer les variations d'humidité du sol à travers les variations temporelles des trois paramètres h , A_m et ϕ_m , déduits des mesures SNR pour chaque satellite en vue.

6.3.1 Détermination de la hauteur effective h

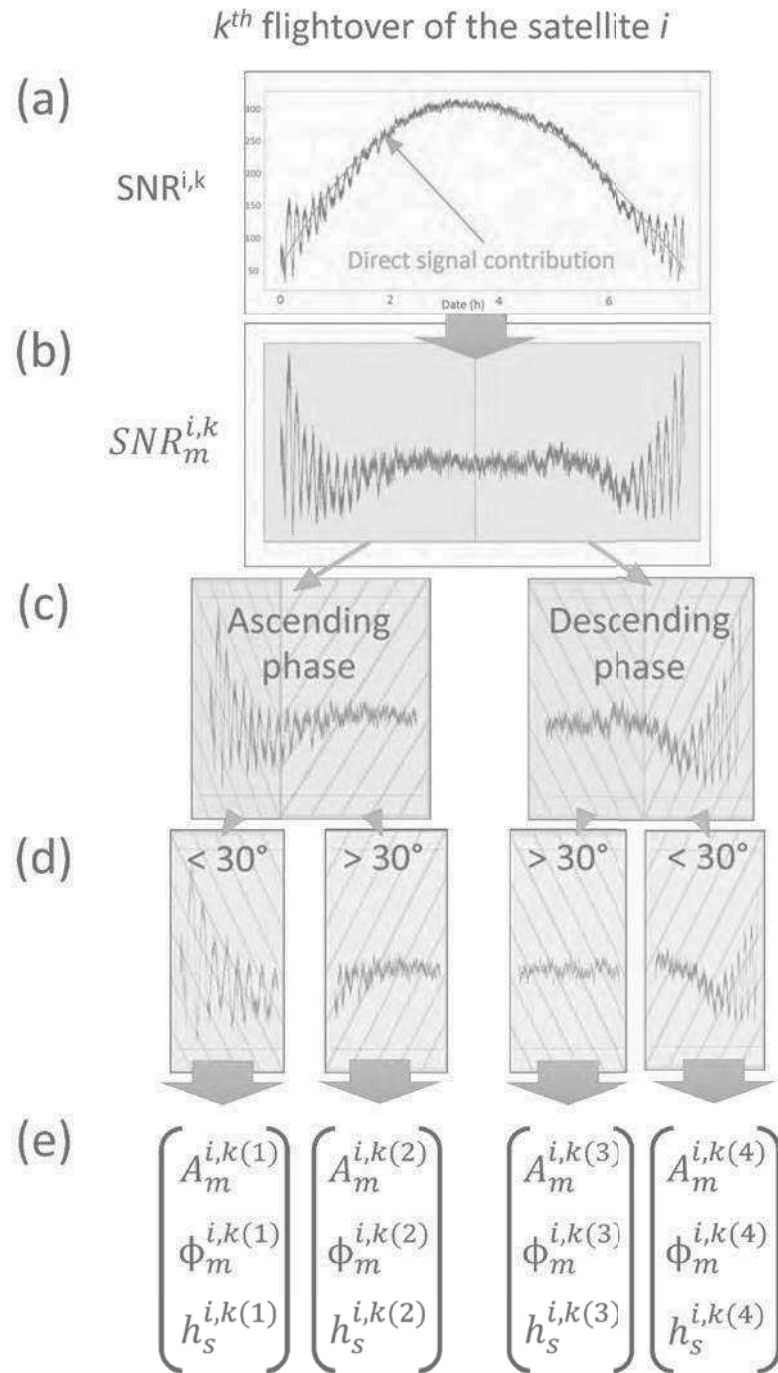


FIGURE 6.2 – Principe de détermination des séries temporelles de la phase ϕ_m et de l'amplitude A_m de la contribution du multi-trajet au SNR (méthode SNR statique).

De la même manière que pour les applications altimétriques présentées en section 5.3 page 113, deux méthodes pour déterminer h peuvent être utilisées :

- la méthode **SNR statique**, où $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ (la vitesse de variation de la hauteur d'antenne) est négligée dans l'équation 5.1. Les variations de $\tilde{f}$ sont alors directement proportionnelles aux variations de h . Je note h_s les hauteurs déterminées par cette méthode (voir figure 6.2).
- la méthode **SNR pseudo-dynamique**, que j'ai développée durant ma thèse (voir section 5.3 page 113). Cette méthode prend en compte le terme $\dot{h}$ dans la résolution de l'équation 5.1, en combinant les mesures SNR relatives aux satellites en vue simultanément. Soit h_d la hauteur effective déduite à l'aide de cette méthode.

6.3.2 Détermination de l'amplitude A_m et de la phase ϕ_m

Les principales étapes de la méthode de détermination des paramètres A_m et ϕ_m en fonction du temps sont illustrées dans la figure 6.2. Il s'agit globalement de la méthode générale proposée par Larson *et al.* (2008).

- (a) Chaque passage (numéroté k) du satellite i au-dessus d'un même point (i.e., tous les jours sidéraux pour un satellite GPS) engendre une série temporelle de SNR, notée $SNR^{i,k}$;
- (b) La contribution du signal réfléchi est isolée dans cette série en la corrigeant de la basse fréquence (polynôme de degré 2) : on obtient la série résiduelle $SNR_m^{i,k}$;
- (c) La série $SNR_m^{i,k}$ est divisée en deux au niveau de l'apogée du passage, pour séparer les phases ascendantes et les phases descendantes. On obtient donc deux séries temporelles par passage de satellite.
- (d) Les propriétés réfléchissantes du sol vont être fonction non seulement de son contenu en eau, mais également de l'angle d'incidence de l'onde (voir section 2.4.3.2 page 34). C'est pourquoi A_m et ϕ_m sont aussi amenées à varier en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Il est donc indispensable de décorréler leurs variations avec l'angle d'incidence sur le milieu (i.e., l'angle d'élévation du satellite), pour isoler la seule influence de l'humidité du sol. Pour ce faire, les séries sont divisées en différentes plages d'élévation avant de les analyser séparément. Habituellement, les faibles élévations sont privilégiées puisque plus l'élévation est élevée, plus l'amplitude de la contribution du multi-trajet au SNR sera faible, et donc moins la série SNR sera exploitable. Dans l'exemple de la figure 6.2, deux plages d'élévation sont considérées : la première de 2° à 30° et la deuxième $> 30^\circ$. Soit N_{elev} le nombre de plages d'élévation que l'on considère ($N_{elev} = 2$ dans l'exemple de la figure). On obtient donc $N_{tot} = 2 \cdot N_{elev}$ séries différentes par passage de satellite et par paramètre ; le facteur 2 venant de la division entre arcs ascendant et descendant.
- (e) L'amplitude A_m et la phase ϕ_m de ces N_{tot} séries sont calculées en résolvant l'équation 6.1 en utilisant une résolution classique basée sur le critère des moindres carrés. Au final, il y a N_{tot} valeurs de A_m et N_{tot} valeurs de ϕ_m par passage d'un satellite. On peut alors former N_{tot} séries temporelles de A_m et ϕ_m construites à partir des passages successifs d'un seul satellite. Par exemple, la première série temporelle $A_m^{(1)}$ du satellite i sera constituée des valeurs $A_m^{i,1(1)}, A_m^{i,2(1)}, \dots, A_m^{i,k(1)}, \dots$ mesurées pour tous les passages du satellite i au-dessus d'un même point d'observation (voir figure 6.2 (e)). La deuxième série temporelle $A_m^{i(2)}$ du satellite i sera constituée des valeurs $A_m^{i,k(2)}$ mesurées pour chaque passage k du satellites i , etc. Le principe est le même pour obtenir les séries temporelles de hauteur effective h_s (méthode SNR statique).

L'échantillonnage maximal (et donc la résolution temporelle maximale possible sur la détermination d'humidité du sol) que l'on peut obtenir avec la constellation GPS est de 23 h 56 min, car les satellites GPS, vus du sol, reprennent la même position dans le ciel au bout d'un jour sidéral, soit 23 h 56 min. Pour la même raison, avec la constellation GLONASS, l'échantillonnage maximal possible est d'environ 8 jours sidéraux.

6.4 L'expérience de Lamasquère

6.4.1 Présentation du site de mesure et des conditions expérimentales

La méthode présentée dans ce chapitre a été testée in situ en traitant les données SNR collectées par une antenne géodésique installée dans un champs de soja situé près de Lamasquère (43°29'14.45"N ; 1°13'44.11"E) : voir figure 6.3. Lamasquère est une commune située au sud-ouest de la France, près de la ville de Toulouse, dans une zone surveillée par le laboratoire CESBIO (UMR 5126) dans le cadre du projet Sud-Ouest (Baup *et al.*, 2012). Le climat dans cette région est tempéré avec une précipitation annuelle moyenne de 600 mm. La moyenne mensuelle est de 50 mm, avec un maximum de 80 mm au printemps et un minimum de 32 mm en été, d'après les mesures effectuées par la station météorologique n° 3145400 de Météo-France, l'agence Française de Météorologie, située à 15 km du site d'étude.

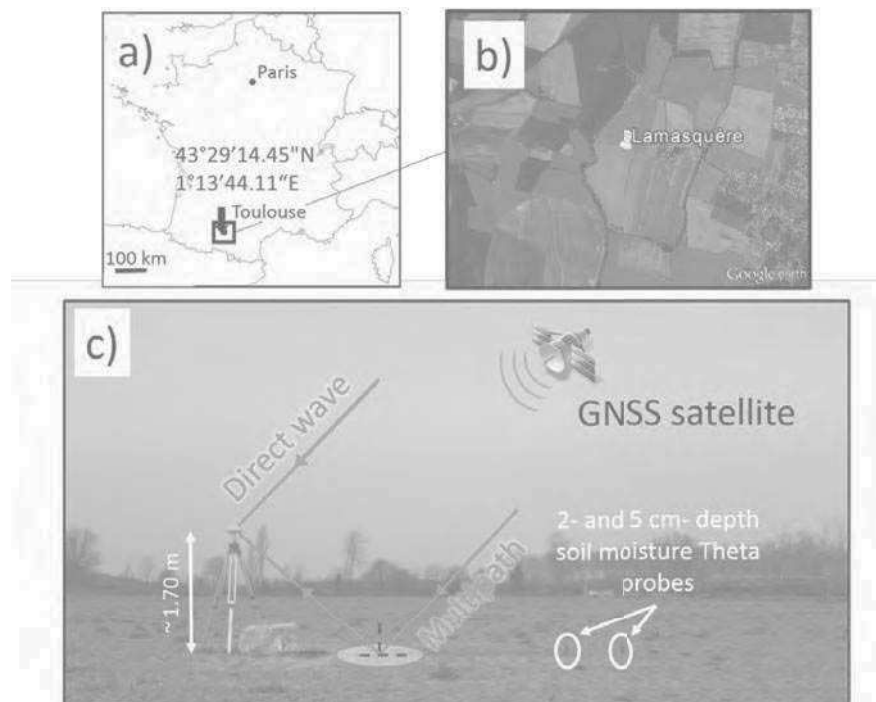


FIGURE 6.3 – Le site de mesure localisé à Lamasquère, dans le sud-ouest de la France (a), avec un récepteur Leica GR25 et une antenne AR10 installés dans une parcelle agricole (b), à côté de deux sondes d'humidité de type *Theta* (c).

Les données SNR ont été acquises du 5 février 2014 au 15 mars 2014 à une fréquence d'1 Hz,

par une antenne Leica AR10 et un récepteur GR25. Le sol autour de l'antenne durant cette période était sans aucune végétation.

Dans mon étude, seul le SNR mesuré sur la fréquence L1 est analysé car c'est celui qui est généralement utilisé pour estimer l'humidité du sol vu que son amplitude est plus élevée que celle du signal de fréquence L2, et engendre donc un signal SNR plus élevé.

La hauteur d'antenne au-dessus du sol varie entre 1,69 m et 1,70 m, avec une rugosité du sol de quelques centimètres, et on considère donc $H = 1,695$ m. Il n'y a aucun masque dans l'environnement immédiat, excepté pour les satellites à très basse élévation où des arbres peuvent perturber le signal reçu par l'antenne (voir figure 6.3 (c)). C'est pour cette raison que seules les mesures issues de satellites d'élévation supérieure à 2° sont considérées dans la suite de mon étude.

Le sol au voisinage de l'antenne est constitué de 18% de sable, 41% d'argile, et 41% de limon (moyennes effectuées sur 5 échantillons pris à proximité de l'antenne) et la capacité au sol est de 48 %. En se basant sur ces teneurs, et en suivant Hallikainen *et al.* (1985), il est possible de calculer de manière théorique la permittivité relative du sol en fonction de l'humidité volumique. D'après Behari (2006), la profondeur de pénétration P_d (en m) de l'onde dans le sol s'écrit :

$$P_d = \frac{\lambda \sqrt{Re(\epsilon_r)}}{2\pi Im(\epsilon_r)} \quad (6.2)$$

avec $Re(\epsilon_r)$ et $Im(\epsilon_r)$ les parties réelles et imaginaires de la permittivité relative de la surface de réflexion (calculées d'après Hallikainen *et al.* (1985)).

En utilisant cette équation, la profondeur de pénétration des ondes GNSS (L1) dans le sol autour de l'antenne a été déterminée en fonction de l'humidité volumique (figure 6.4). D'après les valeurs d'humidité à 2 cm de profondeur mesurées sur le terrain par une sonde indépendante (voir section 6.4.3), la profondeur de pénétration des ondes GNSS devrait varier entre 4,6 cm et 5,9 cm durant la période de mesure.

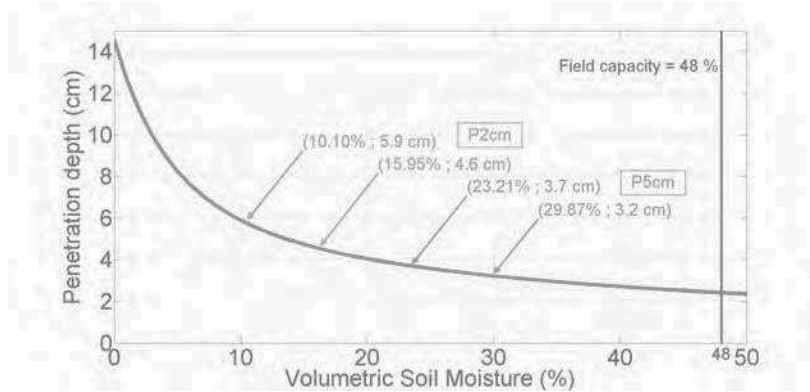


FIGURE 6.4 – Profondeur de pénétration théorique des ondes GNSS dans le sol autour de l'antenne géodésique.

Les valeurs affichées correspondent aux humidités volumiques extrêmes mesurées par deux sondes d'humidité indépendantes plantées dans le sol à proximité de l'antenne, à 2 cm (P_{2cm}) et 5 cm (P_{5cm}) de profondeur.

6.4.2 Intérêt du site pour la réflectométrie GNSS

La figure 6.5 montre la position des points de réflexion spéculaire ainsi que la première surface de Fresnel obtenues en positionnant un récepteur à 1,695 m du sol à Lamasquère. Les simulations ont été réalisées pour le 1^{er} mars 2014, et pour des satellites dont l'angle d'élévation varie entre 2° et 90° (a) et 30° et 90° (b). Ces simulations ont été réalisées grâce au simulateur que j'ai développé et présenté dans le chapitre 4.

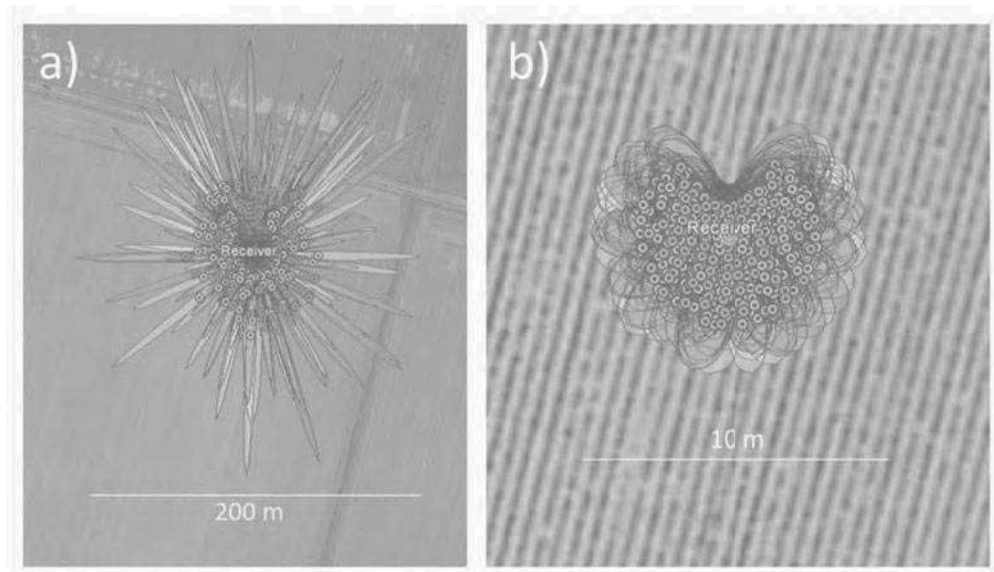


FIGURE 6.5 – Localisation des points de réflexion spéculaires et premières surfaces de Fresnel pour les constellations GPS (orange) et GLONASS (vert), sur le site de mesure de Lamasquère.

Les simulations ont été réalisées le 1^{er} mars 2014. Les angles d'élévation des satellites varient entre 2° et 30° (a) et entre 30° et 90° (b).

Le simulateur fournit les informations suivantes : les points de réflexion les plus éloignés de l'antenne sont à environ 3,5 m pour des satellites d'élévation supérieure à 30°, et atteignent ~ 50 m pour des élévations supérieures à 2°. L'aire couverte par la première surface de Fresnel atteint 4 m² et 1130 m² respectivement.

6.4.3 Données utilisées pour la validation

Le site d'étude est équipé de deux sondes d'humidité de type *Theta*, installées à 2 cm et 5 cm de profondeur, à quelques mètres du récepteur GNSS (figure 6.3 (c)). L'échantillonnage est de 10 min et ces acquisitions ponctuelles servent de référence pour les estimations faites à partir de l'inversion du SNR. Je note P_{2cm} et P_{5cm} les mesures effectuées par les sonde à 2 cm et 5 cm de profondeur respectivement.

6.5 Résumé des principaux résultats

6.5.1 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_s , A_m et ϕ_m

Les différentes séries temporelles A_m^i , ϕ_m^i et h_s^i ont été calculées pour chaque satellite GPS i pendant les 6 semaines d'acquisitions, en considérant deux gammes d'élévation : de 2° à 30° et de 30° à 70° (voir section 6.3.2). Ces deux gammes d'élévation seront respectivement notées I_{2_30} et I_{30_70} dans la suite du texte. Théoriquement, il est donc possible de calculer $N_{tot} = 4$ séries différentes de A_m^i , ϕ_m^i et h_s^i pour chaque satellite i durant toute la période d'acquisition. Le coefficient de corrélation linéaire R est calculé entre chacune de ces séries, et les mesures ponctuelles d'humidité P_{2cm} ($R_{P_{2cm}}$) et P_{5cm} ($R_{P_{5cm}}$). Pour cela, ces dernières sont normalisées sur toute la période à partir des valeurs extrêmes de la série avec laquelle elles sont comparées. La moyenne des corrélations obtenues est présentée dans le tableau 6.1.

TABLE 6.1 – Moyenne des coefficients de corrélation linéaire $\bar{R}$ entre les différentes observables du SNR et P_{2cm}/P_{5cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}) et les angles d'élévation élevés uniquement (I_{30_70}).

	I_{2_30}	I_{30_70}	Résolution temporelle
A_m^i	-0,32/-0,37	0,28/0,29	1 jour
ϕ_m^i	0,84/0,81	-0,45/-0,42	1 jour
h_s^i	-0,57/-0,57	0,03/0,02	1 jour

6.5.1.1 Faibles angles d'élévation : 2° à 30°

Phase ϕ_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles de phase ϕ_m calculées pour tous les satellites GPS est respectivement de $\bar{R}_{P_{2cm}} = 0,84$, et $\bar{R}_{P_{5cm}} = 0,81$: voir tableau 6.1.

La meilleure corrélation est obtenue avec la phase $\phi_{m-I_{2_30}}^{PRN32}$ du satellite PRN32 avec $R_{P_{2cm}} = 0,97$ et $R_{P_{5cm}} = 0,95$. Les différentes séries temporelles utilisées pour ces calculs sont représentées dans la figure 6.6.

Les excellentes corrélations linéaires obtenues entre les variations de phase déduites des mesures SNR et les variations d'humidité mesurées par les sondes suggèrent qu'il existe une relation linéaire simple (et empirique) entre ces deux paramètres (figure 6.7). Je propose donc un modèle linéaire reliant l'humidité volumique (en %) et la phase ϕ_m (en $^\circ$) dont les coefficients (i.e., pente et ordonnée à l'origine) sont déterminées à partir des observations de ces deux paramètres en minimisant les résidus quadratiques suivant le critère des moindres carrés.

Par exemple, en utilisant P_{2cm} et $\phi_{m-I_{2_30}}^{PRN32}$, les coefficients linéaires ajustés donnent :

$$y(\%) = 0,36x(^\circ) + 87,42(\%) \quad (6.3)$$

Les corrélations obtenues avec les autres satellites sont légèrement moins bonnes qu'avec le satellite PRN 32.

Amplitude A_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles A_m calculées pour tous les satellites GPS est de -0,32 (P_{2cm}) et -0,37 (P_{5cm}). Ces corrélations

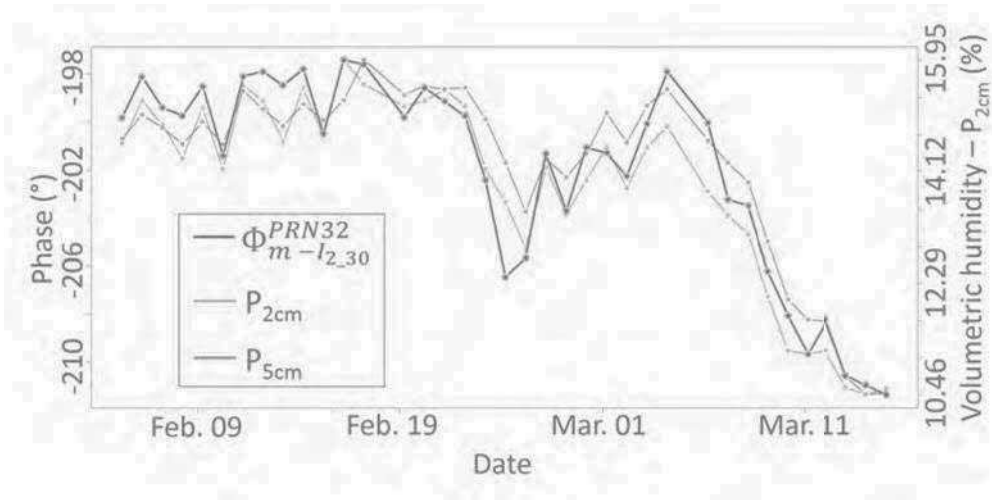


FIGURE 6.6 – Évolution des séries temporelles ϕ_m^{PRN32} , P_{2cm} et P_{5cm} du 5 février au 15 mars 2014.

sont négatives et particulièrement faibles. L'amplitude apparaît ainsi être un moins bon indicateur de l'humidité que la phase ϕ_m .

Hauteur effective h_s (méthode SNR statique) : La moyenne des corrélations obtenues pour h_s avec chaque satellite est de -0,57 (P_{2cm}) et -0,57 (P_{5cm}).

Conclusion : Les meilleurs résultats sont obtenus avec la phase ϕ_m , ce qui est cohérent avec les travaux antérieurs, e.g., Chew *et al.* (2014). La phase ϕ_m est corrélée avec l'humidité, alors que A_m et h_s sont anti-corrélées, ce qui est également cohérent avec les études antérieures. Le signe de la corrélation est lié à l'évolution des coefficients de réflexion avec l'humidité (voir section 6.6).

6.5.1.2 Angles d'élévation élevés : 30° à 70°

On considère cette fois uniquement les élévations élevées, entre 30° et 70° (I_{30_70}).

Phase ϕ_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles ϕ_m calculées pour tous les satellites GPS est de -0,45 (P_{2cm}) et -0,42 (P_{5cm}).

Amplitude A_m : La moyenne des corrélations obtenues avec toutes les séries temporelles A_m calculées pour tous les satellites GPS est de 0,28 (P_{2cm}) et 0,29 (P_{5cm}).

Hauteur effective h_s (méthode SNR statique) : La moyenne des corrélations obtenues pour h_s avec chaque satellite est de 0,03 (P_{2cm}) et 0,02 (P_{5cm}).

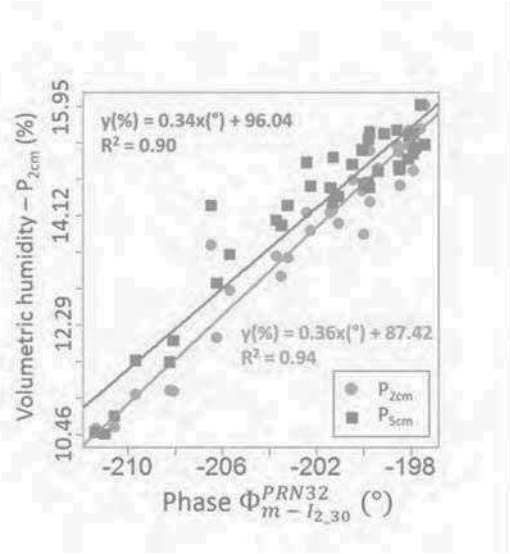


FIGURE 6.7 – Variations de l'humidité volumique P_{2cm} et P_{5cm} sur le site de Lamasquère en fonction de celles de la phase $\phi_{m-I_{2,30}}^{PRN32}$.

Conclusion : Pour les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), on peut constater que :

1. les corrélations entre les observables et les mesures d'humidité des sondes sont moins bonnes qu'avec la gamme d'élévation faible (voir tableau 6.1). On n'observe même aucune corrélation avec $h_s - I_{30_70}$.
2. le signe de la corrélation est inversé par rapport à I_{2_30} : la phase ϕ_m apparait ainsi anti-corrélée avec l'humidité tandis que l'amplitude A_m est corrélée.

6.5.1.3 Combinaison des satellites entre eux

Faibles angles d'élévation : 2° à 30° J'ai combiné les séries temporelles normalisées $A_{m-I_{2,30}}^i$ obtenues pour chaque satellite i en une seule série temporelle $A_{m-I_{2,30}}^{all_sat}$. Pour cela, toutes les séries temporelles $A_{m-I_{2,30}}^i$ obtenues pour tous les satellites i ont été normalisées entre 0 et 1 et associées pour former une série unique à laquelle j'ai appliquée une moyenne mobile de taille δt . J'ai fait de même pour les séries $\phi_{m-I_{2,30}}^i$ et $h_{s-I_{2,30}}^i$.

Les corrélations linéaires obtenues respectivement avec ces 3 séries temporelles "cumulées" et les sondes d'humidité sont largement améliorées et la résolution temporelle finale obtenue est de 10 min (au lieu d'un jour pour les séries prises séparément). Avec P_{2cm} , on obtient ainsi des corrélations respectives de 0,72, 0,95 et 0,90 avec $A_{m-I_{2,30}}^{all_sat}$, $\phi_{m-I_{2,30}}^{all_sat}$ et $h_{s-I_{2,30}}^{all_sat}$. Le tableau 6.2 présente ces différents résultats.

Angles d'élévation élevés : 30° à 70° De la même manière que pour I_{2_30} , les observations relatives à chaque satellite pour les angles d'élévation élevés (I_{30_70}) ont été combinées en 3 séries uniques $A_{m-I_{30,70}}^{all_sat}$, $\phi_{m-I_{30,70}}^{all_sat}$, et $h_{s-I_{30,70}}^{all_sat}$. Une fois encore, les corrélations obtenues et la résolution temporelle sont améliorées, avec $R_{P_{2cm}}$ respectivement égal à 0,91, 0,92 et 0,39 : (voir tableau 6.2).

TABLE 6.2 – Valeur absolue des coefficients de corrélation linéaire R entre les différentes observables du SNR et P_{2cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}), les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), et la combinaison des deux ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$).

δt est la taille de la fenêtre mobile utilisée pour obtenir la meilleure corrélation. all_sat désigne la combinaison des séries temporelles obtenues avec tous les satellites GPS pour obtenir une série temporelle unique de phase, amplitude ou hauteur (la corrélation avec P_{2cm} est alors donnée en valeur absolue).

	I_{2_30}	I_{30_70}	$I_{2_30} \otimes I_{30_70}$	Réso. temporelle
$A_m^{all_sat}$	0,72 ($\delta t = 55$ h)	0,91 ($\delta t = 55$ h)	0,83 ($\delta t = 55$ h)	10 min
$\phi_m^{all_sat}$	0,95 ($\delta t = 8$ h)	0,92 ($\delta t = 25$ h)	0,91 ($\delta t = 11$ h)	10 min
$h_s^{all_sat}$	0,90 ($\delta t = 11$ h)	0,39 ($\delta t = 40$ h)	0,87 ($\delta t = 11$ h)	10 min

Combinaison des deux gammes d'élévation Toutes les séries temporelles $A_{m-2_30}^i$ obtenues avec I_{2_30} pour tous les satellites ont été multipliées par -1 et normalisées entre 0 et 1 pour être combinées avec les séries $A_{m-30_70}^i$ également normalisées. En joignant ainsi les deux gammes d'élévation ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$ dans le tableau 6.2), le coefficient linéaire n'est pas meilleur que si l'on considère uniquement I_{2_30} . J'ai procédé de la même manière avec les séries $\phi_{m-2_30}^i$ et $h_{s-2_30}^i$, et une fois encore, les résultats sont globalement moins bons que si l'on considère uniquement les faibles angles d'élévation. La combinaison des deux gammes d'élévation ne semble ainsi pas améliorer les résultats obtenus en considérant uniquement les faibles angles d'élévation.

6.5.1.4 Conclusion

Pour conclure, les meilleurs résultats -toutes séries confondues- sont obtenus en combinant toutes les séries temporelles $\phi_m(t)$ obtenues avec tous les satellites GPS, à savoir $\phi_{m-I_{2_30}}^{all_sat}$. Cette série finale est présentée dans la figure 6.8 (a).

Une corrélation croisée entre $\phi_{m-I_{2_30}}^{all_sat}$ et P_{2cm} , a été déterminée par analyse en ondelettes de Morlet, et le résultat est présenté dans la figure 6.8 (b). Les plus grandes périodes de variations de l'humidité du sol sont ainsi parfaitement retrouvées sur les 6 semaines d'étude, et des variations journalières sont aussi détectées, avec divers événements ponctuels de pluie.

6.5.2 Détermination de l'humidité du sol à partir de h_d

TABLE 6.3 – Coefficients de corrélation linéaire R entre $h_d^{all_sat}$ et P_{2cm} en considérant les faibles angles d'élévation uniquement (I_{2_30}), les angles d'élévation élevés (I_{30_70}), et la combinaison des deux ($I_{2_30} \otimes I_{30_70}$).

δt est la taille de la fenêtre mobile utilisée pour obtenir la meilleure corrélation.

	I_{2_30}	I_{30_70}	$I_{2_30} \otimes I_{30_70}$	Réso. temporelle
$R_{P_{2cm}}$	-0,95 ($\delta t = 55$ h)	0,82 ($\delta t = 55$ h)	0,95 ($\delta t = 33$ h)	10 min

La série temporelle h_d a été calculée en appliquant la méthode SNR pseudo-dynamique (voir section 5.3 page 113), en combinant les satellites GPS et GLONASS, et en différenciant les gammes d'élévation I_{2_30} et I_{30_70} . Différentes tailles de fenêtre glissante δt ont été testées, et les résultats sont présentés dans le tableau 6.3.

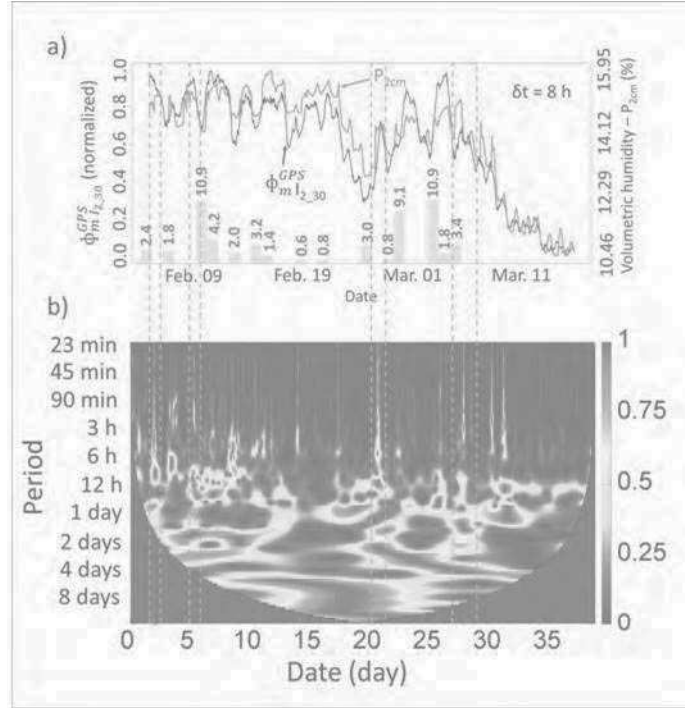


FIGURE 6.8 – a) Évolution de $\phi_{m-I_{2,30}}^{all_sat}$ et de P_{2cm} (le coefficient de corrélation linéaire est de 0.95). Les barres bleues sont les événements de pluie (en mm). b) Corrélation croisée entre $\phi_{m-I_{2,30}}^{all_sat}$ et P_{2cm} , calculée par analyse en ondelettes de Morlet.

L'amplitude de la corrélation croisée est normalisée entre 0 et 1 pour chaque période.

L'abscisse correspond au jour dans les 6 semaines d'acquisitions, et l'ordonnée correspond à la période analysée (i.e., échelle de temps).

On peut constater que la méthode SNR pseudo-dynamique donne de meilleurs résultats que la méthode SNR statique, puisqu'on passe d'une corrélation de 0,90 à 0,95 ($I_{2,30}$) et de 0,39 à 0,82 ($I_{30,70}$).

De manière similaire à h_s , la corrélation entre h_d et l'humidité est négative pour les faibles angles d'élévation ($I_{2,30}$), et positive pour les angles d'élévation élevés ($I_{30,70}$). Cette inversion du signe de la corrélation est expliquée dans la section 6.6.

6.6 Discussion sur l'inversion du signe de la corrélation entre les petits et grands angles d'élévation

D'après les résultats précédents, le signe de la corrélation entre les trois observables A_m , ϕ_m et h avec l'humidité du sol s'inverse lorsque l'on considère les faibles angles d'élévation ($I_{2,30}$) et les angles d'élévation élevés ($I_{30,70}$). La valeur d'angle 30° semble être l'angle de coupure dans notre cas.

Ceci peut s'expliquer par l'effet combiné : (i) des coefficients de réflexion des composantes RHCP et LHCP (qui dépendent de l'angle d'élévation), et (ii) du gain d'antenne qui rejette, à

6.6. DISCUSSION SUR L'INVERSION DU SIGNE DE LA CORRÉLATION ENTRE LES PETITS ET GRANDS ANGLES D'ÉLEVATION

un certain niveau, les composantes RHCP et LHCP (dépendant également de l'angle d'élévation).

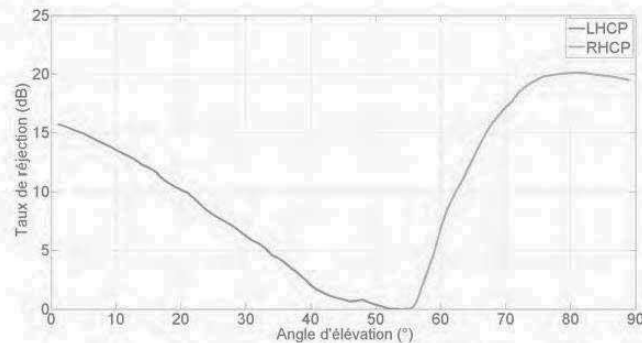


FIGURE 6.9 – Taux de réjection RHCP et LHCP réels de l'antenne Leica AR10 en fonction de l'angle d'élévation.

Le taux de réjection LHCP pour l'antenne AR10 utilisée est de 1,4 dB. En prenant cette valeur en compte, et en considérant un taux de réjection RHCP nul, il est possible de calculer le coefficient de réflexion effectif défini par l'équation 2.23 pour les valeurs minimales et maximales d'humidité mesurées sur le terrain. Comme on peut le constater sur la figure 6.10 (a), le coefficient de réflexion effectif est corrélé à l'humidité du sol pour des faibles angles d'élévation, et anti-corrélé pour des angles d'élévation élevés. L'angle de coupure est égal à $\sim 43^\circ$.

On considère à présent le coefficient de réflexion effectif défini par l'équation 2.24, prenant en compte le diagramme de gain réel de l'antenne AR10 (figure 2.12). L'angle de coupure est cette fois d'environ 20° (6.10 (b)). La figure 6.9 présente les taux de réjection RHCP et LHCP réels de l'antenne AR10 utilisée à Lamasquère.

Cet angle de coupure expliquerait donc l'inversion de corrélation entre les trois observables du SNR (A_m , ϕ_m et h) et l'humidité du sol, dans les cas de petits ou de grands angles d'élévation.

Cependant, une valeur précise de cet angle de coupure n'est pas facile à obtenir, premièrement parce que le gain d'antenne dépend de l'azimut qui n'est pas connu, et je ne l'ai pas pris en compte dans mon modèle. Deuxièmement, il ne dépend pas uniquement de la différence entre le sol humide et le sol sec, mais également du gradient d'humidité entre les deux, c'est à dire de la vitesse de variation d'un état extrême à l'autre.

La figure 6.11 est un abaque que j'ai calculé en me basant sur le coefficient de réflexion effectif à partir du diagramme de gain réel de l'antenne AR10. Cet abaque permet de déterminer l'angle de coupure théorique en fonction de la permittivité relative du sol à un état 1 (humide ou sec) passant à un état 2 (respectivement sec ou humide).

Ce graphe révèle que l'angle de coupure varie généralement entre $\sim 20^\circ$ et $\sim 30^\circ$. Grâce à un abaque de ce type, on pourrait imaginer mesurer les caractéristiques du sol à un instant donné en observant l'angle à partir duquel les corrélations s'inversent. Cependant, au vu de la faible variabilité de l'angle de coupure avec la permittivité relative, il serait nécessaire de déterminer l'angle de coupure avec une précision qu'il est actuellement difficile d'atteindre.

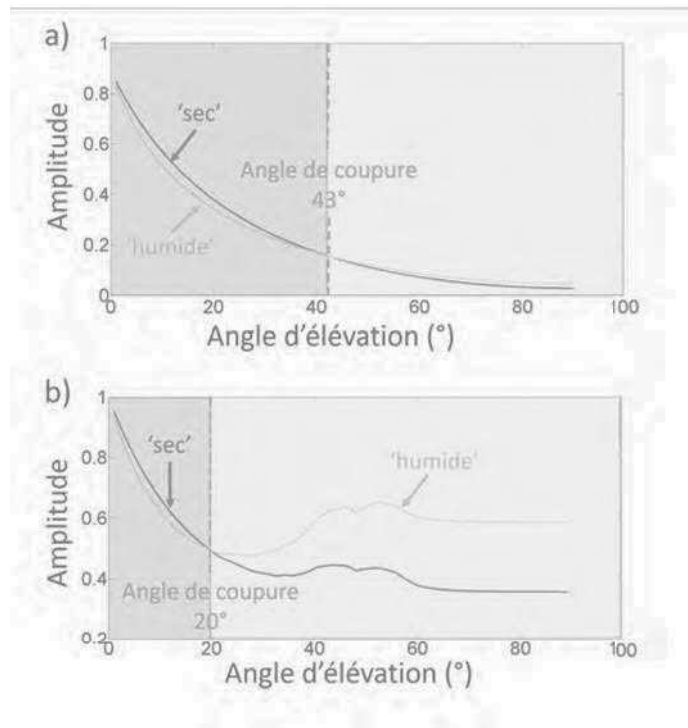


FIGURE 6.10 – Coefficient de réflexion effectif pour une onde incidente RHCP reçue par l'antenne Leica AR10 après réflexion sur un sol humide (29,87%) et sec (10,10%).

Le taux de réjection LHCP est considéré comme constant et le taux de réjection RHCP est considéré comme nul (a), et la dépendance des deux taux de réjection avec l'angle d'élévation est pris en compte (b).

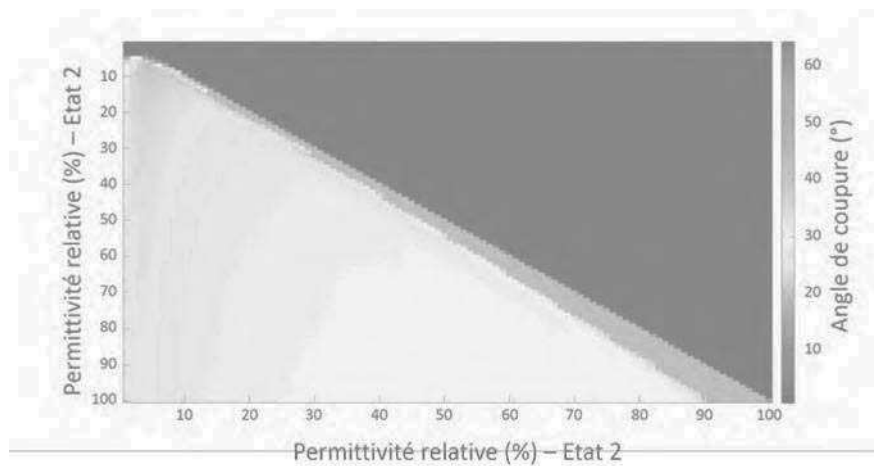


FIGURE 6.11 – Angle de coupure obtenu lors du passage du sol d'un état 1 (humide ou sec) à un état 2 (respectivement sec ou humide).

6.7 Conclusions et perspectives

Dans cette étude, un récepteur géodésique classique et son antenne ont été utilisés pour déterminer les variations d'humidité du sol d'une parcelle agricole à partir de 6 semaines de mesures GNSS. La méthode se base sur l'analyse du rapport signal sur bruit (SNR) enregistré par le récepteur. Le SNR contient des informations sur la nature du sol en raison de l'interaction entre l'onde GNSS et le sol lors de la réflexion, avant d'être captée par l'antenne. Trois observables peuvent être déduites de la contribution du signal réfléchi au SNR : la phase ϕ_m , l'amplitude A_m et la hauteur effective h de l'antenne (liée à la fréquence $\tilde{f}$). Ces trois observables varient en fonction de l'humidité.

J'ai été amené à tester la méthode proposée par Larson *et al.* (2008, 2010) pour extraire ces trois paramètres. Les résultats obtenus sont cohérents avec les travaux antérieurs (e.g., Chew *et al.*, 2014) et la meilleure corrélation avec l'humidité superficielle est obtenue avec la phase ϕ_m . J'ai montré qu'il était possible de combiner les mesures effectuées sur l'ensemble des satellites GPS en vue de produire une seule série temporelle plus précise. Cette combinaison améliore considérablement la corrélation avec l'humidité du sol, ainsi que la résolution temporelle, qui passe alors de 1 jour à 10 min.

Si les études antérieures considéraient uniquement les faibles angles d'élévation (inférieurs à 30° ou 40° généralement), j'ai montré qu'il était possible de traiter les mesures SNR correspondant aux angles d'élévation élevés, en prenant en compte une inversion du signe de la corrélation entre les deux gammes d'élévation. D'une manière générale, les résultats obtenus avec les angles élevés sont moins bons qu'avec les faibles angles d'élévation.

Les résultats obtenus par inversion du SNR ont été comparés à des mesures indépendantes d'humidité réalisées à 2 cm et 5 cm de profondeur. Les résultats tendent à démontrer que la meilleure corrélation avec les mesures GNSS-R est obtenue avec l'humidité à 2 cm.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec la combinaison de toutes les séries temporelles ϕ_m de tous les satellites, en considérant uniquement les faibles angles d'élévation (entre 2° et 30°). Dans ce cas optimal, j'ai obtenu une corrélation égale à 0,95 avec l'humidité mesurée indépendamment à 2 cm de profondeur pendant les 6 semaines d'acquisition, avec une résolution temporelle de 10 min.

Dans cette étude, j'ai également proposé une explication à l'inversion du signe de la corrélation entre les observables du SNR et l'humidité autour de 30° d'élévation. Mon explication se base sur le calcul d'un coefficient de réflexion effectif prenant en compte les coefficients de réflexion de Fresnel calculés à partir des taux de réjection des ondes RHCP et LHCP réels de l'antenne réceptrice. En effet, le signe de la corrélation entre l'humidité et ce coefficient de réflexion effectif s'inverse à un angle proche de 30°.

Enfin, j'ai testé deux méthodes différentes de détermination de la hauteur effective h de l'antenne par rapport à la surface de réflexion. Cette dernière est susceptible de varier en fonction de l'humidité du sol (en raison des changements de profondeur de pénétration des ondes GNSS qui est fonction de l'humidité). La première méthode est celle proposée par Larson *et al.* (2008, 2010), et que j'appelle *SNR statique* dans mon manuscrit. La deuxième, que je propose, est celle présentée au chapitre 5 (*SNR dynamique*) qui combine les mesures effectuées sur les satellites en vue simultanément pour permettre la prise en compte d'un facteur correctif dans la détermination de h (i.e., $\dot{h}$, la vitesse de changement de hauteur de la sur-

face réfléchissante), habituellement négligé. Il apparaît que la prise en compte de la pseudo-dynamique de la surface de réflexion avec la méthode SNR pseudo-dynamique améliore l'estimation puisqu'on passe d'une corrélation de 0,90 à 0,95 pour les faibles angles d'élévation (2° à 30°), et de 0,39 à 0,82 pour les angles d'élévation élevés (30° à 70°).

Pour conclure, il est tout à fait possible d'utiliser une antenne GNSS classique pour mesurer les variations d'humidité du sol environnant. Aucune modification matérielle n'est à apporter. La précision obtenue est très bonne (corrélation de 0,95 avec des sondes d'humidité classiques implantées à proximité, à 2 cm de profondeur), et la résolution temporelle est excellente (10 min). La résolution spatiale est de quelques dizaines de mètres dans l'exemple de mon étude, mais il est possible de l'améliorer en faisant varier la hauteur de l'antenne ou de déplacer l'antenne pour couvrir une région complète par exemple. Le GNSS-R avec le système à antenne unique est donc une excellente alternative aux moyens de mesures actuels de l'humidité du sol (sondes, télédétection) en faisant le lien entre les différentes échelles spatio-temporelles classiquement atteintes (ponctuelles et continues pour des sondes d'humidité, couvrant une large zone mais faible répétitivité pour des mesures satellites). Pour être totalement objectif, il faut cependant noter que ni la topographie du terrain ni la rugosité du sol n'ont été prises en compte dans cette étude (le sol est considéré comme plat et de rugosité constante). De même, les effets possible de la végétation et de la neige n'ont pas été étudiés. La technique IPT apporte des solutions pour répondre à ces problèmes (voir section 3.4.1 page 57).

6.8 *Article sous presse : IEEE JSTARS - Detection of soil moisture variations*

Detection of Soil Moisture Variations Using GPS and GLONASS SNR Data for Elevation Angles Ranging From 2° to 70°

Nicolas Roussel, Frédéric Frappart, Guillaume Ramillien, José Darrozes, Frédéric Baup, Laurent Lestarquit, and Minh Cuong Ha

Abstract—We propose a Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R) interference pattern technique method to estimate the temporal variations of the soil moisture content of the ground surrounding a single geodetic antenna. Three parameters can be inverted from GNSS signal-to-noise ratio (SNR) acquisitions: amplitude/phase of the multipath contribution to SNR and effective antenna height. Our method is applied to determine the surface moisture of a bare soil at Lamasquère, France, from February 5 to March 15, 2014. First, only data from low satellite elevation angles ($< 30^\circ$) are taken into consideration and are compared with independent 2-cm depth soil moisture records. The combination of the measurements from all GPS satellites, tested for the first time, improves the quality of the results with a correlation coefficient reaching 0.95, with a 10-min sampling rate. Our study shows that it is also possible to take high satellite elevation angles into account, even if the sign of the correlation appears to be reversed w.r.t. data from low satellite elevation angles. The cut-off angle where the sign of the correlation reverses seems to be around 30° . With regard to the effective antenna height, only a very low correlation is observed for high satellite elevation angles. We propose a new inversion method taking the pseudo-dynamic of the surface into account, which increases the correlation from 0.39 to 0.82. By normalizing and inverting the time series obtained from either low or high satellite elevation angles, it is possible to combine them, which enhances the results (correlation = 0.95).

Index Terms—Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R), multipaths, remote sensing, signal-to-noise ratio (SNR), soil moisture.

Manuscript received September 14, 2015; revised February 19, 2016; accepted February 22, 2016. This work was supported in part by the CNES in the framework of the TOSCA project “Hydrologie, Océanographie par Réflectométrie GNSS (HORG)” and in part by the RTRA STAE foundation in the framework of the “Potentialités de la réflectométrie GNSS In Situ et Mobile (PRISM)” project and OMP through AO1 UPEE. It is also part of the European H2020 MISTRALE project. The work of N. Roussel was supported in part by a Ph.D. granted from Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR). (Corresponding author: Nicolas Roussel.)

N. Roussel, F. Frappart, G. Ramillien, J. Darrozes, and M. C. Ha are with GET, UMR 5563, CNRS/IRD/UPS, OMP, 31400 Toulouse, France (e-mail: nicolas.roussel@get.obs-mip.fr; frederic.frappart@get.obs-mip.fr; guillaume.ramillien@get.obs-mip.fr; jose.darrozes@get.obs-mip.fr; minhcuong.ha@get.omp.eu).

F. Baup is with CESBIO, UMR 5126, IUTA, 32000 Auch, France (e-mail: frederic.baup@iut-tlse3.fr).

L. Lestarquit is with CNES, 31400 Toulouse, France (e-mail: laurent.lestarquit@cnes.fr).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JSTARS.2016.2537847

I. INTRODUCTION

SOIL moisture is a key variable of the climate system and plays an integrative role among the various subfields of physical geography [1], [2]. The soil moisture measurements are critical components for climate studies, weather predictions, analysis of flood zones or the recharge of aquifers. In agricultural areas, analyzing in real time the soil water content would allow the farmer to optimize the management of his plots (tillage, treatments, irrigation, etc.). Unfortunately, the measurements from classical humidity probes are punctual and are not representative of the soil moisture of the plot at a local scale, and monitoring an entire parcel is not realistic for operational applications. With the advent of remote sensing, soil moisture can be systematically monitored at the global scale but unfortunately with low temporal resolution. Even with the SMOS satellite mission [3], the repetitivity of the measurements is three days, which is not sufficient to monitor daily variations. Alternatively, recent studies suggested to take advantage of the electromagnetic waves, continuously emitted by the Global Navigation Satellite System (GNSS) satellite constellations, to retrieve different geophysical parameters of the Earth surface. This opportunistic remote sensing technique, known as GNSS-reflectometry (GNSS-R), is based on the analysis of the GNSS waves which reflect upon the Earth surface, and offers a wide range of applications in Earth sciences and particularly in soil moisture monitoring. It also presents the advantage of covering a whole surface around the antenna. The size of the sensing footprint only depends on the height of the antenna above the reflecting surface and the satellite elevation angle (see, e.g., [4]–[6]).

The aim of this article is to demonstrate that previous GNSS-R algorithms based on a single geodetic antenna and receiver to recover the surface moisture of a bare soil can significantly be improved. The method is based on the analysis of the signal-to-noise ratio (SNR) data routinely collected by a geodetic antenna. SNR data incorporate both direct and reflected signals. These latter interact with the ground while reflecting. Variations of the nature of the surface is likely to modify the properties of the reflected waves, hence dependence of SNR on soil moisture content. Three different parameters are under study: the amplitude, the phase, and the frequency of the multipath contribution to SNR. The latter parameter is directly linked to the antenna height above the reflecting surface [7]. Results obtained from the different GPS satellites will be compared between them,

as well as combined into single time series. Previous studies (e.g., [8], [9]) filtered out SNR data from high satellite elevation angles ($>30^\circ$) as they considered the respective multipath contribution to SNR insufficient to be detected. In the present study, two ranges of satellite elevation angles are tested: the first one from 2° to 30° and the second one from 30° to 70° . We avoid satellites with high elevations because in this case the multipath is highly mitigated by the antenna and cannot be measured with our method. Results of both ranges of elevation angle will be compared and then combined into a single observable. Our study is presented in four main parts. Section II presents the major methods used to estimate surface soil moisture from GNSS-R, focusing on the SNR-based retrieval of the soil moisture changes. Section III details our inversion method which is applied to *in situ* data, collected in Lamasquère, France ($43^\circ 29' 14.45''\text{N}$; $1^\circ 13' 44.11''\text{E}$). This observation site is equipped with two humidity probes needed to validate soil moisture retrieved by inversion of the SNR signal. Section IV describes the experimental setup and ground truth data generated during the experimental campaign. Section V analyzes the results of this campaign by comparing them to independent soil moisture records made by ML3 ThetaProbe Sensors used as validation.

II. STATE-OF-THE-ART

A. Multipath and Polarization of GNSS Reflected Waves

The GNSS provides autonomous geo-spatial positioning with global coverage thanks to almost 60 satellites from different constellations (GPS, GLONASS, Galileo, etc.) emitting continuously L-band microwave signals (e.g., $L1_{\text{GPS}} = 1575.42$ MHz and $L2_{\text{GPS}} = 1227.60$ MHz). While the emitted signal from GNSS satellites is supposed to be received directly in the zenith-looking hemisphere of a geodetic-quality GNSS antenna, a part of it comes from below the horizon, after one or several reflections in the surrounding environment. These so-called multipath signals interfere with the direct wave and affect the GNSS measurements recorded by the receiver by adding new frequencies.

Geodetic GNSS antennae are designed to reduce the contribution of the multipaths which degrade the accuracy of the position determination [10]. Classical GNSS antennae use the polarization properties of the GNSS signals to filter out part of the reflected waves. The right-hand circular polarization (RHCP) of the GNSS waves is likely to change upon reflection depending on the nature of the reflector (reflection coefficient) and the grazing angle θ that corresponds to the satellite elevation angle.

The reflected signal can be considered as the sum of two circularly polarized signals: one that maintains the *copolarized* (original RHCP) component and a *cross-polarized* (opposite LHCP) one. The copolar (τ_o) and cross-polar (τ_x) reflection coefficients can be expressed as a function of the horizontal (τ_H) and vertical (τ_V) reflection coefficients. Following [11], they are respectively given by

$$\tau_o = \frac{\tau_H + \tau_V}{2} \quad \tau_x = \frac{\tau_H - \tau_V}{2} \quad (1)$$

with

$$\tau_H = \frac{\sin(\theta) - \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}}{\sin(\theta) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}} \quad \tau_V = \frac{\epsilon \sin(\theta) - \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}}{\epsilon \sin(\theta) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta)}} \quad (2)$$

where $\epsilon = \epsilon_r + j\epsilon_i$ is the complex dielectric constant of the reflecting medium with ϵ_r the relative permittivity, $\epsilon_i = -60\lambda\sigma$ the imaginary part, and σ the conductivity of the reflecting surface medium. λ is the wavelength of the signal (e.g., 19.05 cm with L1).

The nature of the final polarization after reflection is determined by the relative phase relationship of each linear component upon reflection [12]: it will be elliptical when the horizontal and vertical coefficients are different, circular when they are equal, and linearly polarized when the vertical component goes to zero.

For satellite elevation angles below a specific value known as the Brewster angle [13], the predominant signal component after reflection is the copolar (RHCP), and hence the reflected wave is right-hand elliptical polarization. Conversely, for elevation angles greater than the Brewster angle, the predominant signal component is the cross-polar (LHCP), and hence the reflected wave is left-hand elliptical polarization [14]. GNSS geodetic antennae reduce LHCP signals to remove theoretical effects of multipaths in positioning. GNSS antennae radiation pattern focuses on the antenna gain for RHCP signals toward zenith and decreases the gain with decreasing elevation angle.

These filtering techniques of a GNSS antenna based on the signal polarization affect the total received signal by reducing the amplitude of the reflected signals with respect to the direct signal amplitude. But, fortunately for GNSS-R sciences, the energy of the reflected signal is not completely dampened [8].

B. SNR Analysis

1) *Reflected Signal Contribution to SNR*: The signature of the reflections can be detected in the SNR data recorded by GNSS receivers on the different frequencies. SNR is related to the addition of the powerful direct and weaker reflected GNSS signals in the receiving antenna.

Following [11], SNR at any instant and for a satellite elevation angle θ is

$$\text{SNR}^2(\theta) = A_d^2(\theta) + A_{mp}^2(\theta) + 2A_d(\theta)A_{mp}(\theta)\cos(\psi) \quad (3)$$

where A_{mp} and A_d are the amplitudes of the multipath and direct signal respectively, and ψ the phase difference between the two signals.

Considering that $A_{mp} < A_d$ due to the reflection process, (3) shows that overall magnitude of the SNR is mainly driven by the direct signal. The reflected signal will affect the SNR by producing a high-frequency oscillation associated with a small amplitude perturbation w.r.t. the direct signal, which depends on the satellite elevation angle [7]. The reflected signal perturbations will mainly be visible for low satellite elevation angles.

In order to analyze the multipath component, first, we must remove the direct signal contribution from the raw SNR profile.

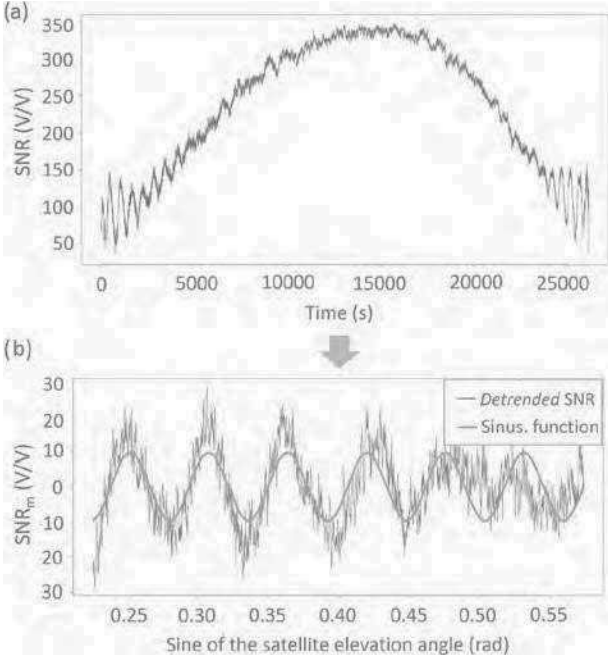


Fig. 1. Example of SNR treatment of GPS PRN-01 satellite. Acquisition realized on March 1, 2014. (a) Raw SNR time-series. (b) Multipath contribution to SNR after removal of the direct contribution and estimates of A_m , ϕ_m , and f from (6) and (7).

[15] proposed to remove the direct signal effect through gain pattern modeling. This method requires the knowledge of the gain patterns of both the receiving and emitting antenna. As the information is difficult to obtain, [8] suggested to fit a simple low-order polynomial to the SNR time series and to subtract it from the starting SNR data to isolate the oscillations due to multipath. As this latter method yields to better results than the modeling one [15], we adopted it and removed a second-order polynomial to our SNR time series. Example of this detrending is presented in Fig. 1(b). Both the contributions of A_d^2 and A_{mp}^2 are removed in (3) with this detrending.

2) Interferogram Metrics:

a) Effective antenna height above the reflecting surface:

Assuming a planar reflector, the phase difference between the direct and reflected signals can be derived geometrically from the path delay δ of the reflected signal [16], [17]

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

if h is the distance between the antenna phase center and the reflecting surface (i.e., the *effective* antenna height). h is not necessarily equal to the real antenna height because it is likely to change with the penetration depth of the electromagnetic wave and the dielectric properties of the reflecting surface. From (4), we can derive the frequency of the multipath oscillations w.r.t. time f_t

$$f_t = \frac{d\psi}{dt} = \frac{4\pi \dot{h}}{\lambda} \sin(\theta) + \frac{4\pi h}{\lambda} \cos(\theta) \dot{\theta} \quad (5)$$

$\dot{h}$ ($= \frac{dh}{dt}$) defines the changes versus time of the effective antenna height and $\dot{\theta}$ ($= \frac{d\theta}{dt}$) defines the elevation angle velocity.

Equation (5) can be simplified by making the following change of variable $x = \sin(\theta)$. We thus obtain $\tilde{f}$, the frequency of the multipath oscillations w.r.t. the sinus of the satellite elevation angle

$$\tilde{f} = \frac{d\psi}{dx} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\dot{h} \frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}} + h \right). \quad (6)$$

Soil moisture content has an influence on the penetration depth of the GNSS waves into the ground [18] and on the dielectric properties of the soil, causing slight time variations of the effective height h of the antenna above the reflecting surface. Variations of h against time, retrieved from the measurement of $\tilde{f}(t)$, are thus an indicator of soil moisture fluctuations [9]. Equation (6) shows that, if $\dot{h}$ is approximated to zero, the frequency of the multipath oscillation is constant and directly proportional to the effective antenna height h above the reflecting surface. If $\dot{h}$ is not neglected, the frequency also depends on the satellite elevation angle θ , the satellite elevation angle velocity $\dot{\theta}$, and the variations of the effective antenna height over time $\dot{h}$. The two former terms are known, but not $\dot{h}$. Many studies consider $\dot{h}$ close to zero and neglect the term $\dot{h} \frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}}$ in (6) while estimating the time series $h(t)$.

In our study, we propose a method to estimate h and $\dot{h}$ simultaneously (see Section III-A2) without neglecting the last. This method was successfully tested for altimetric applications in [19].

b) Amplitude and phase of the multipath oscillations:

For a given height H_0 of the antenna above the reflecting surface, the reflected signal contribution to SNR can be formalized as [20]

$$SNR_m(\theta, \epsilon) = A_m(\theta, \epsilon) \cos \left(\frac{4\pi H_0}{\lambda} \sin(\theta) + \phi_m(\theta, \epsilon) \right) \quad (7)$$

where A_m scales with the intensity of ground reflections, and ϕ_m is the phase.

A_m includes both the gain pattern and multipath intensity, which both depend on the satellite elevation angle. Field observations indicate that both A_m and ϕ_m vary with soil moisture [9], [18], [20]. The observed effects on ϕ_m of shallow soil moisture are larger than those on A_m [9], as demonstrated by [20].

A_m , ϕ_m and h (derived from $\tilde{f}$) are thus three parameters that can be inverted to retrieve soil moisture fluctuations.

III. METHODOLOGY: SNR METRICS RETRIEVAL

This section presents the methodology developed to retrieve the time variations of the three SNR metrics: 1) effective height h of the antenna above the reflecting surface; 2) amplitude A_m of the multipath oscillations; and 3) phase ϕ_m of the multipath oscillations. The different time series are supposed to depend on both the soil moisture variations and the satellite elevation angle (see Section II-B2). To remove the elevation angle dependence, different ranges of satellite elevation are considered and time series are cut and analyzed with respect to these ranges.

The elevation and azimuth angles at any instant are derived from the satellite coordinates, obtained from the IGS ephemeris products which provide GNSS orbits in the final SP3 format with a centimetric precision and clock offset data with a temporal resolution of 15 min for the past epochs (<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/>).

A. Retrieval of the Effective Height h Above the Reflecting Surface

Frequency of the multipath oscillations is given by (6). Two cases are tested in this study: a *static case*, neglecting $\dot{h}$ and a *pseudo-dynamic case* without neglecting it (see Section II-B2). The static case corresponds to what has been classically done in previous studies (e.g., [8], [9]).

1) *Static Case*: After removing the direct signal contribution to SNR [Fig. 2(a) and (b)], the ascending and descending phases of the satellite flight-over are separated [Fig. 2(c)]. Different ranges of satellite elevation angle are then considered: in the example of Fig. 2(d), the cutoff angle was set equal to 30° . The slight variations of soil moisture during the considered portion of the satellite passage are neglected, and h (and so $\tilde{f}$) is thus assumed to be constant during this time period and is noted h_s [Fig. 2(d)]. Larger timescale soil moisture fluctuations are estimated by comparing the antenna height retrieved from a portion of the satellite passage with its homologs of the following passages (i.e., according to Fig. 2(e), $h_s^{i,1(1)}$ is associated with $h_s^{i,2(1)}$ and with $h_s^{i,3(1)}$ to create a time series).

During the considered time period, the height of the antenna above the reflecting surface is equal to

$$h_s = \frac{\lambda \tilde{f}}{4\pi} \quad (8)$$

where the frequency of the multipath oscillations $\tilde{f}$ is determined using a Lomb Scargle Periodogram LSP [21], [22], and λ is the wavelength.

The analysis is not directly performed on $SNR_m = f(t)$ but on $SNR_m = f(\sin(\theta))$ as in (6).

2) *Pseudo-dynamic case*: In this case, $\dot{h}$ is supposed not negligible and needs to be taken into account during the considered portion of the satellite passage, following Roussel *et al.* (2015). h (and so $\tilde{f}$) is thus likely to change during this time period and is noted h_d . A correct estimate of the variations of $\tilde{f}$ over this time period requires a moving windowing of this portion of the signal.

a) *Windowing of the SNR_m time series*: The choice of the moving window is critical as it should be large enough to obtain a precise determination of $\tilde{f}$, on the one hand, but it must not be too large so that the frequency of the signal remains quasi-constant over this window, on the other hand. Let $\Delta(\sin \theta)$ be the size of the moving window. To obtain the suited size $\Delta(\sin \theta)$ corresponding to each central value, an *a priori* coarse knowledge of the parameters under determination is necessary. They correspond to boundary conditions in (6):

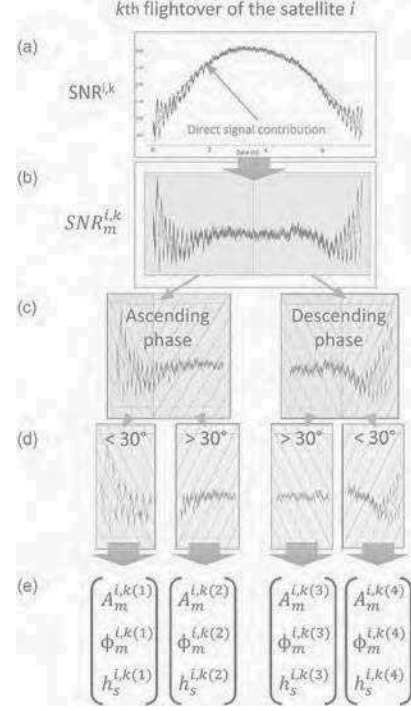


Fig. 2. Determination of the A_m , ϕ_m , and h_s time series from the multipath contribution to SNR (SNR_m). (a) SNR time series collected during the k th flightover of the satellite i . (b) Removing of the direct signal contribution. (c) Separating the ascending and descending phases. (d) Different ranges of satellite elevation angle are considered. (e) The interferogram metrics are calculated from the different time series.

- 1) $h_{\min}$: the minimum height above the reflecting surface that the receiver is able to reach during the observation period;
- 2) $h_{\max}$: the maximum height above the reflecting surface that the receiver is able to reach during the observation period;
- 3) $\dot{h}_{\max}$: the maximum vertical changes against time of the reflecting surface (rate of change of the antenna height).

The more precise the knowledge of these three values is, the faster the determination of $\tilde{f}$ will be. From these three values, we estimate expected $\tilde{f}_{\min}$ and $\tilde{f}_{\max}$ for each central value, based on (6). $T_{\min} = \frac{1}{\tilde{f}_{\max}}$ and $T_{\max} = \frac{1}{\tilde{f}_{\min}}$ are the minimal and maximal periods the signal can have consistently with the boundary conditions in (6).

The size of the moving window is chosen as $\Delta \sin(\theta) = N \cdot T_{\max}$, with N the number of observed *maximal* periods within the moving window. This criterion ensures to have at least N periods of the signal within the moving window. N must be as small as possible in order to have a quasi-constant frequency of the signal within the window. The value of N is generally chosen equal to either 2 or 3 in order to keep enough variations of the signal within the window to obtain a good estimation of $\tilde{f}$ from LSP.

It is worth noticing that $\tilde{f}_{\min}$ and $\tilde{f}_{\max}$ will be different for each moving window because the mean elevation angle θ and

elevation angle rate $\dot{\theta}$ will differ. For this reason, the size of the window is not constant over the whole time series and is re-estimated for each increment.

b) Determination of the frequency of the multipath oscillation: The frequency f for each moving window is estimated using LSP (as for the static case), which has proven to be a well adapted solution in several previous studies [18], [19]. Only periodogram peaks reaching statistical significance with an error probability equal to 1% [23] and defining a local maximum between $\tilde{f}_{\min}$ and $\tilde{f}_{\max}$ are retained.

c) h and $\dot{h}$ determination: Once $\tilde{f}$ is accurately estimated for each satellite in sight of the receiver, h_d can be obtained solving (6), with two unknowns h_d and $\dot{h}_d$. The solution presented in this paper consists of combining measurements from all the GNSS satellites in sight at a given time to determine conjointly $h_d(t)$ and $\dot{h}_d(t)$ using a classical matrix least square method (LSM) resolution as detailed hereafter.

Let $\tilde{f} = \frac{d\psi}{dx}$, $U = \frac{4\pi \tan(\theta)}{\lambda \theta}$, and $V = \frac{4\pi}{\lambda}$. Equation (6) thus becomes for a satellite i and for an instant t

$$\tilde{f}_i(t) = U_i \dot{h}_d(t) + V_i h_d(t) \quad (9)$$

with $f_i(t)$ being the frequency of the multipath oscillations, with respect to the sine of the satellite. Combining all the satellites visible at each time t , we obtain a linear system of equations

$$\begin{pmatrix} \tilde{f}_1(t) = U_1 \dot{h}_d(t) + V_1 h_d(t) \\ \tilde{f}_2(t) = U_2 \dot{h}_d(t) + V_2 h_d(t) \\ \tilde{f}_3(t) = U_3 \dot{h}_d(t) + V_3 h_d(t) \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (10)$$

or using matrix notation

$$F = U \dot{h}_d(t) + V h_d(t) = AX \quad (11)$$

with the configuration matrix $A = (U \ V)$ and the vector of unknown parameters $X = \begin{pmatrix} \dot{h}_d(t) \\ h_d(t) \end{pmatrix}$.

Equation (11) is solved with the LSM at each time step, thus determining conjointly $h_d(t)$ and $\dot{h}_d(t)$ as follows:

$$X = (^tAA)^{-1} (^tAF). \quad (12)$$

All GNSS satellites from the different available constellations are combined in this over-determined system. The main challenge is to find the correct time interval Δt between each estimation and also the length δt of the moving window (see Fig. 3). Δt and δt must be tuned with attention to ensure a large enough temporal resolution for h_d and $\dot{h}_d$ (see Section IV-D).

The number of satellite observations available decreases with δt , and so the accuracy of the determination of h_d and $\dot{h}_d$ using LSM. Yet, choosing a too large value for δt causes a smoothed

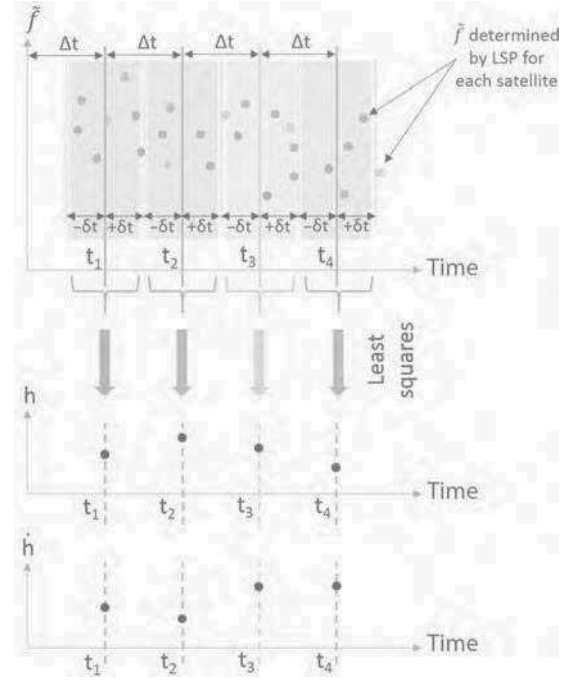


Fig. 3. Principle of the least squares inversion method used to determine h_d and $\dot{h}_d$ based on LSP estimates of $\tilde{f}$. For reasons of clarity, overlapping was not represented in this figure, even if δt can be higher than Δt .

determination of the unknown parameters since the receiver effective height would have changed during this interval.

Instead of the static case providing an estimation of the time series $h_s^i(t)$ for each satellite i , the pseudo-dynamic case method provides a single time series $h_d(t)$ combining all satellites. Besides, the temporal resolution of the static case is limited by the repeatability of the GNSS constellations (i.e., a maximum of two pairs of estimations¹ per day per satellite for the GPS constellation). The pseudo-dynamic case provides a far better temporal resolution (depending on the chosen Δt). Data of the other constellations can also be included in the pseudo-dynamic process. This is not the case in the static case due to the no-repeatability of the constellation from a day to another. When considering ground that is not flat, a possible decrease in the number of available satellites could be mitigated by the use of other frequencies as L2. In addition, in the near future, with the launch of new satellites from other constellations (Galileo, COMPASS, etc.), the number of observables at each instant will increase. However, with rough reflecting ground, only data coming from close azimuth clusters can be combined. Also note that when combining different GNSS constellations, the antenna phase center varies due to the frequency change. In our study, we tested the combination of GPS and GLONASS constellations. We took into account the frequency change (i.e., λ change) in (6) but neglected the possible variation of antenna phase center.

¹One estimation during the ascending phase and another estimation during the descending phase for each two GPS satellite passages per day.

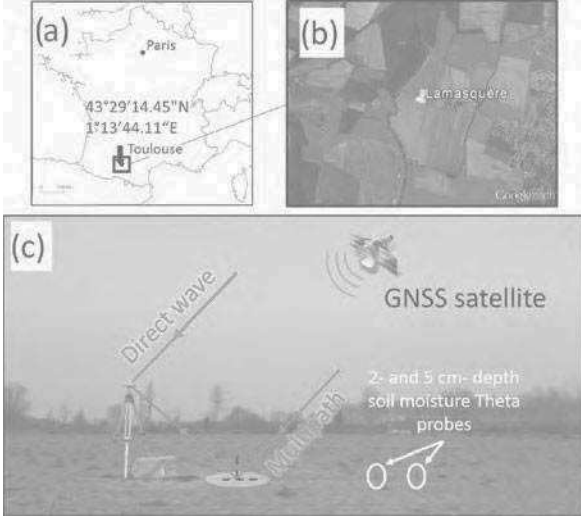


Fig. 4. (a) Measurement site is located in Lamasquère, in the southwest of France. (b) Leica GR25 receiver and AR10 antenna were installed in a soya field in the country side (c) along with two theta probes. Note that during winter, the surface of the field is a bare soil.

B. Retrieval of the Amplitude A_m and Phase ϕ_m of the Multipath Oscillations

A_m and ϕ_m are estimated for each considered portion of the satellite passage solving (7) by applying a LSM resolution, h being considered as constant and equals the measured antenna height H_0 . An example of this type of estimate for GPS satellite PRN 1 acquisitions, occurring the 1st of March 2014, is presented in red in Fig. 1(b).

Similarly to the effective height h retrieval in the static case, A_m and ϕ_m are considered as constant during the considered portion of the satellite passage [Fig. 2(d)]. A_m and ϕ_m values estimated from a portion of the satellite passage are compared with the similar parts of the following passages [i.e., according to Fig. 2(e), $A_m^{i,1(1)}$ is associated with $A_m^{i,2(1)}$ and with $A_m^{i,3(1)}$ to create a single time series].

IV. LAMASQUÈRE EXPERIMENT

A. Measurement Site for Acquisition

A Leica GR25 receiver and an AR10 antenna were installed in a soya field in Lamasquère, France ($43^\circ 29' 14.45''\text{N}$; $1^\circ 13' 44.11''\text{E}$) (see Fig. 4). Lamasquère is located in the southwest of France, close to the city of Toulouse, in a study area monitored by the CESBIO laboratory (UMR 5126) in the framework of the Sud-Ouest project [24]. The area has a temperate climate with a mean annual rainfall of approximately 600 mm. Rainfalls have a monthly mean of 50 mm and a maximum of 80 mm in Spring and a minimum of 32 mm in Summer according to the records from meteorological station no. 3145400 of Météo-France, the French Meteorological Agency (<http://www.meteofrance.fr>), located 15 km from this test field.

GPS L1, L2, L2C, L5, and GLONASS L1 and L2 frequencies were continuously acquired from the 5th of February 2014 to the 15th of March 2014 at a 1-Hz frequency. The study area

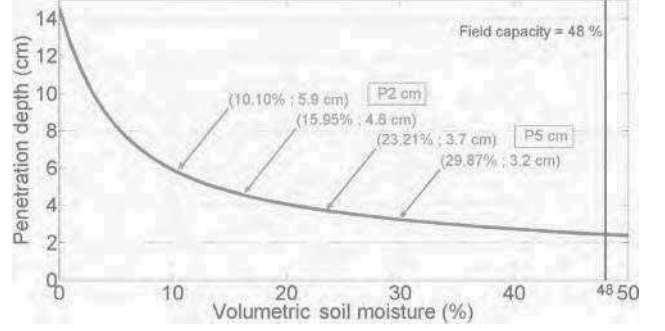


Fig. 5. Theoretical maximal penetration depth of the GNSS waves on the ground around the antenna. Highlighted values correspond to the extreme volumetric wetness measured by two independent theta probes set up next to the GNSS antenna at 2-cm depth ($P_{2\text{ cm}}$) and 5-cm depth ($P_{5\text{ cm}}$). Field capacity is 48%.

was a bare soil during this period (northern hemisphere winter). In our study, we use S1C SNR signal strength on L1 C/A channel (the Coarse/Acquisition ranging code, freely available to the public) as L1 frequency signals are stronger (i.e., higher SNR) than the signals of frequency band L2.

Antenna height above the ground surface, determined with a tape measure, ranges between 1.69 and 1.70 m. If we consider the Rayleigh criterion [25], a surface is considered smooth if

$$\sigma_{rms} < \frac{\lambda}{8 \sin(\theta)} \quad (13)$$

with σ_{rms} is the root mean square height of the microrelief, λ is the wavelength, and θ is the satellite elevation angle. Considering $\sigma_{rms} \sim 2$ cm (in situ measurement), and $\lambda = 0.1905$ m, the Rayleigh criterion is respected with θ ranging from 2° to 90° and the ground around the antenna can thus be considered as flat.

There is no mask in the close environment around the antenna except for very low satellite elevation angles where trees can hide the antenna [see Fig. 4(c)]. For this reason, only satellites with elevation angles above 2° were considered. Ground in the close vicinity of the antenna consists of 18% of sand, 41% of clay, and 41% of silt (according to averages of five samples taken around the antenna), and field capacity is 48%. Using these values and following [26], it is possible to compute the theoretical relative permittivity of the ground around the antenna, depending on the volumetric humidity. Following [27], the penetration depth P_d (in meters) of a signal coming from the zenith can then be expressed as

$$P_d = \frac{\lambda \sqrt{Re(\epsilon_r)}}{2\pi Im(\epsilon_r)} \quad (14)$$

with $Re(\epsilon_r)$ and $Im(\epsilon_r)$ are the real and imaginary part of the relative permittivity of the reflecting surface.

Based on (14), the theoretical maximal penetration depths of the L1 GNSS waves into the ground around the antenna were calculated for values of volumetric wetness ranging from 0% to 48% (i.e., field capacity). Results are presented in Fig. 5.

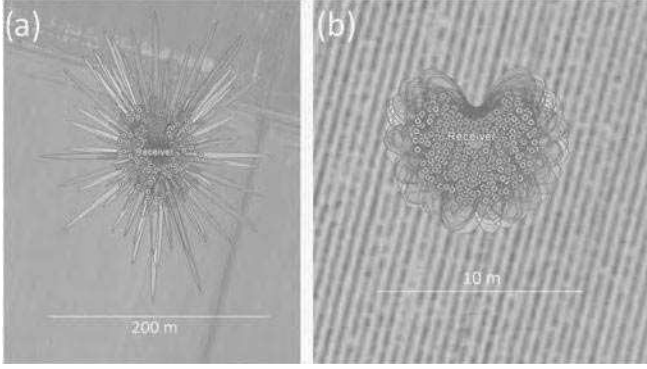


Fig. 6. Locations of the GPS (orange) and GLONASS (green) specular reflection points and first Fresnel surfaces for a GNSS receiver on the Lamasquère measurement site. Simulations done the 1st of March 2014. Satellite elevation angles range from 2° to 90° (a) and from 30° to 90° (b). Sampling rate is equal to 15 min (i.e., satellites positions are actualized every 15 min).

B. Interest of the Measurement Site for GNSS Reflectometry

Accurate locations of the specular reflection points on the surface have been determined through direct modeling using GNSS reflected signals simulations (GRESS) developed by [4]. Fig. 6 shows the theoretical locations of the specular reflection points for both GPS and GLONASS satellites, for the 1st of March 2014. As the antenna height H_0 is 1.70 m above the reflecting surface, farthest specular reflection points are a bit more than 3.5 m from the receiver for satellite elevation angles above 30° and reach ~ 50 m for satellite elevation angles above 2° .

The power of the received signal is mostly due to coherent reflection, and most of the scattering comes from the first Fresnel zone [28]. In our measurement site, the area of the first Fresnel surfaces reaches 4 m^2 for a satellite elevation angle around 30° and 1130 m^2 for a satellite elevation angle of 2° .

C. Datasets Used for Validation

The test site is equipped with two soil moisture ML3 ThetaProbe Sensors (accuracy of $\pm 0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), installed at 2 and 5 cm depth, respectively, a few meters away from the GNSS receiver [Fig. 4(c)]. Acquisitions were taken with a sampling frequency of 10 min and these data are used for validation of our SNR-based estimations of soil moisture fluctuations. During the whole 1.5-month period of SNR acquisitions, the 2-cm depth probe records of soil moisture (referred as $P_{2 \text{ cm}}$ in the following) ranged between 10.10% and 15.95% (i.e., a variation of the volumetric soil moisture of 5.85%), and the 5-cm depth probe records (referred as $P_{5 \text{ cm}}$ in the following) were between 23.21% and 29.87% (i.e., a variation of volumetric soil moisture of 6.66%).

D. Parameters Used for Soil Moisture Retrieval

To remove the elevation angle dependence of the three SNR metrics (A_m , ϕ_m , and h), two different ranges of satellite elevation angles are tested: the first one from 2° to 30° (referred

as I_{2_30} in the following) and the second one between 30° and 70° (referred as I_{30_70} in the following). 30° was chosen as in, e.g., [8], and satellite elevation angles above 70° were not considered as the amplitude of the multipath contribution to SNR becomes too small to be analyzed.

The limit conditions in (6) were assumed to be

- 1) $h_{\min} = 1.5 \text{ m}$;
- 2) $h_{\max} = 2.0 \text{ m}$;
- 3) $\dot{h}_{\max} = 1.10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$h_{\min} = 1.5 \text{ m}$ and $h_{\max} = 2.0 \text{ m}$ correspond to $\sim H_0 \pm 0.25 \text{ m}$. 25 cm is 1.7 times the extreme theoretical penetration depth of the GNSS wave equal to 14.6 cm (see Fig. 5), corresponding to a perfectly dry soil. The maximum change rate in soil moisture recorded by the two independent theta probes (see Section IV-C) over the 1.5-month time period was $0.0035\%/s$. With such speed, $\sim 4 \text{ h}$ would be necessary for soil moisture to change from 0% to 48% (i.e., saturation of the ground). A change of volumetric humidity from 0% to 48% corresponds theoretically to a variation of the penetration depth of $14.6 - 2.4 = 12.2 \text{ cm}$, hence a rate of change of $\sim 1.10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. $\dot{h}_{\max} = 1.10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ thus corresponds to the maximal rate of change of the theoretical penetration depth.

N , the number of observed *maximal* periods (Section III-A2), was set to 3, which is the first number of observed periods above the 1% of error probability.

Δt (see Section III-A2) is set to 10 min, which corresponds to the temporal resolution of the soil moisture probes used for validation (see Section IV-C), and different values of δt will be tested in this study.

V. RESULTS

A. Static Case

$A_m^i(t)$, $\phi_m^i(t)$, and $h_s^i(t)$ were computed for each GPS satellite i more than 1.5 months differentiating the two ranges of elevation angles I_{2_30} and I_{30_70} , as well as the ascendant and descendant phases of the satellite passages. Theoretically, four different time series of A_m^i , ϕ_m^i , and h_s^i can thus be derived from each satellite i over the whole period of measurement. Linear correlation coefficients R are estimated between each SNR-based time series and the variations of soil moisture ($P_{2 \text{ cm}}$ and $P_{5 \text{ cm}}$). Variations of soil moisture are scaled with respect to the minimum and maximum of the SNR-based time series ϕ_m , A_m , and h that they are compared with.

1) *Low Satellite Elevation Angles (I_{2_30}):* Fig. 7(a) presents one time series $\phi_{m-I_{2_30}}^{PRN32}(t)$ computed from satellite GPS-PRN32 giving R equal to 0.97 with $P_{2 \text{ cm}}$ and 0.95 with $P_{5 \text{ cm}}$ (Fig. 8). Fig. 7(b) presents the same time series obtained with the high elevation angles (I_{30_70}), giving R equal to -0.87 with $P_{2 \text{ cm}}$ and -0.84 with $P_{5 \text{ cm}}$. Note the inverse relationship between $\phi_{m-I_{30_70}}^{PRN32}(t)$ and soil moisture. Temporal resolution is 1 day. Empirical laws between I_{2_30} SNR-based and probe time series were computed and can be used to inverse phase values (in $^\circ$) to obtain corresponding volumetric humidity content (in %) (see Fig. 8). We used a linear relationship similar to the ones that relate surface soil

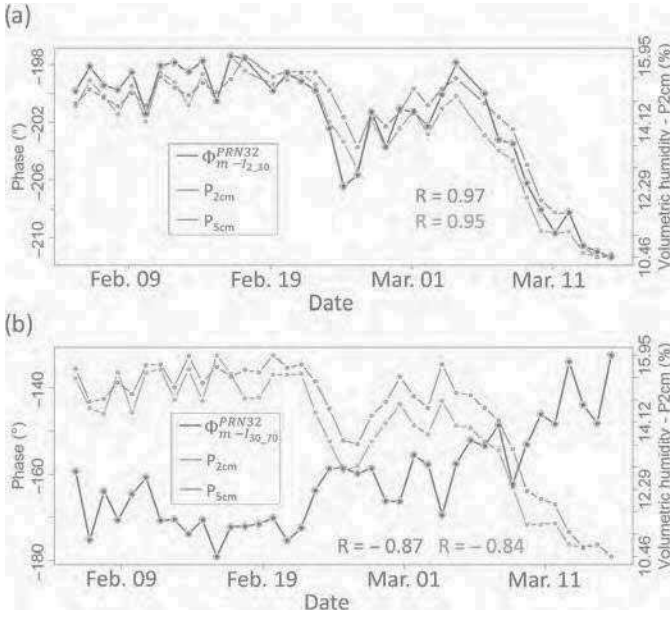


Fig. 7. Evolution of (a) $\phi_{m-I_{2,30}}^{PRN32}$ and (b) $\phi_{m-I_{30,70}}^{PRN32}$ time series with respect to P_{2cm} and P_{5cm} time series. Note the inverse relationship between $\phi_{m-I_{2,30}}^{PRN32}(t)$ and soil moisture (b).

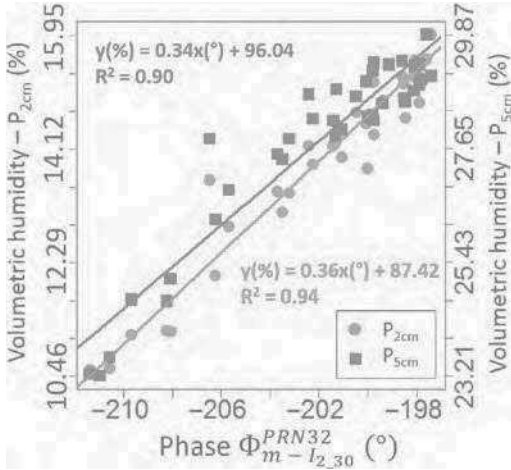


Fig. 8. Scatter plot of $\phi_{m-I_{2,30}}^{PRN32}$ time series and P_{2cm} and P_{5cm} .

moisture to backscattering coefficients using SAR, scatterometer or, more recently, radar altimetry [29]–[32]. For example, in the case of P_{2cm} with satellite PRN 32, the adjusted linear coefficients give

$$y(\%) = 0.36x(^{\circ}) + 87.42(\%). \quad (15)$$

Note that these empirical relationships are only valid for our test site, and obviously depends on dielectric properties (conductivity, relative permittivity) of the ground, roughness, and antenna gain pattern.

Satellite GPS-PRN32 was the one giving the best correlation. The mean linear correlation coefficients obtained with all GPS satellites for each metric were computed and results are

presented in Table I. Note that the correlation coefficient is estimated correlating with the variations of soil moisture, not the absolute measurements.

Best results are obtained with $\phi_{m-I_{2,30}}^i$ (which is consistent with [9]), with a mean value of R ranging from 0.81 (P_{5cm}) to 0.84 (P_{2cm}). $A_{m-I_{2,30}}^i$ gives the worst results with a mean value of R ranging from -0.32 (P_{2cm}) to -0.37 (P_{5cm}) and results for $h_{s-I_{2,30}}^i$ are equal to -0.57 for both P_{2cm} and P_{5cm} . As already mentioned by [9], $A_{m-I_{2,30}}^i$ and $h_{s-I_{2,30}}^i$ are anticorrelated with soil moisture, while $\phi_{m-I_{2,30}}^i$ is correlated.

Each time series has a maximal temporal resolution of one day and it is possible to have up to four different time series per satellite and per interferogram metric. To improve the temporal resolution, we combine the normalized time series $A_{m-I_{2,30}}^i(t)$, $\phi_{m-I_{2,30}}^i(t)$ and $h_{s-I_{2,30}}^i(t)$ computed from all the GPS satellites i . The sign of the time series is reversed if the correlation with soil moisture is negative [i.e., for the time series $A_{m-I_{2,30}}^i(t)$ and $h_{s-I_{2,30}}^i(t)$], and normalization is done by scaling the time series between 0 and 1. We then put these normalized time series all together. We thus obtain a global scatter plot for each of the three metrics, to which we apply a moving average. The three respective final time series are noted $A_{m-I_{2,30}}^{GPS}(t)$, $\phi_{m-I_{2,30}}^{GPS}(t)$, and $h_{s-I_{2,30}}^{GPS}(t)$. Fig. 9(a) presents the (absolute) linear correlation coefficient R obtained between P_{2cm} and the resultant combined time series for different sizes δt of the moving window. Increment between the center of each window is chosen equal to the soil moisture probes resolution, i.e., 10 min. Best results are once again obtained with the phase $\phi_{m-I_{2,30}}^{GPS}$ with $R > 0.9$ when $\delta t > 2$ h and a maximum of 0.95 with $\delta t = 8$ h. R reaches a maximum of 0.90 for $h_{s-I_{2,30}}^{GPS}$ with $\delta t = 11$ h, and 0.72 for $A_{m-I_{2,30}}^{GPS}$ with $\delta t = 55$ h. For this latter parameter, only the long-term trend of soil moisture can be observed.

2) *High Satellite Elevation Angles ($I_{30,70}$):* With regard to the high satellite elevation angles, best results are still obtained with the phase $\phi_{m-I_{30,70}}^i$ (mean R ranging between -0.42 and -0.45), then $A_{m-I_{30,70}}^i$ (mean R ranging between 0.27 and 0.29) (see Table I). $h_{s-I_{30,70}}^i$ does not seem to show any correlation with soil moisture (mean R ranging between 0.02 and 0.04).

Compared to the previous case $I_{2,30}$, there is an inversion of the sign of the correlation which is positive between $A_{m-I_{30,70}}^i$ and soil moisture, and negative with $\phi_{m-I_{30,70}}^i$.

Time series of $A_{m-I_{30,70}}^i(t)$, $\phi_{m-I_{30,70}}^i(t)$, and $h_{s-I_{30,70}}^i(t)$ related to each satellite i were also respectively combined into three resultant time series $A_{m-I_{30,70}}^{GPS}(t)$, $\phi_{m-I_{30,70}}^{GPS}(t)$, and $h_{s-I_{30,70}}^{GPS}(t)$ and results are presented in Fig. 9(b). Results are similar to $I_{2,30}$ with best correlation reached with $\phi_{m-I_{30,70}}^{GPS}$ ($R_{max} = 0.92$ with $\delta t = 25$ h), followed by $A_{m-I_{30,70}}^{GPS}$ ($R_{max} = 0.91$ with $\delta t = 55$ h) and $h_{s-I_{30,70}}^{GPS}$ ($R_{max} = 0.39$ with $\delta t = 40$ h). Note that the time series $A_{m-I_{30,70}}^{GPS}$ gives better results than $A_{m-I_{2,30}}^{GPS}$.

3) *Combining $I_{2,30}$ and $I_{30,70}$:* All time series $A_{m-I_{2,30}}^i$, $\phi_{m-I_{2,30}}^i$ and $h_{s-I_{2,30}}^i$ obtained with $I_{2,30}$ were multiplied by -1 and normalized between 0 and 1 to be combined with the respective time series obtained with $I_{30,70}$. Results are

TABLE I
LINEAR CORRELATION COEFFICIENTS R BETWEEN THE DIFFERENT TIME SERIES AND $P_{2\text{cm}}$ AND $P_{5\text{cm}}$ CONSIDERING I_{2_30} , I_{30_70}

		I_{2_30}	I_{30_70}	$I_{2_30} \otimes I_{30_70}$	Temp. reso.
Mean R between each satellite i and $P_{2\text{cm}}$ / $P_{5\text{cm}}$	A_m^i	-0.32 / -0.37	+0.28 / +0.29	- / -	1 day
	ϕ_m^i	+0.84 / +0.81	-0.45 / -0.42	- / -	1 day
	h_s^i	-0.57 / -0.57	+0.03 / +0.02	- / -	1 day
Combining all satellites (abs. values of R with $P_{2\text{cm}}$)	A_m^{GPS}	0.72 ($\delta t = 55$ h)	0.91 ($\delta t = 55$ h)	0.83 ($\delta t = 55$ h)	10 min
	ϕ_m^{GPS}	0.95 ($\delta t = 8$ h)	0.92 ($\delta t = 25$ h)	0.91 ($\delta t = 11$ h)	10 min
	h_s^{GPS}	0.90 ($\delta t = 11$ h)	0.39 ($\delta t = 40$ h)	0.87 ($\delta t = 11$ h)	10 min
	$h_d^{GPS_GLONASS}$	0.95 ($\delta t = 55$ h)	0.82 ($\delta t = 55$ h)	0.95 ($\delta t = 33$ h)	10 min

δt is the size of the moving window (used to obtain the best correlation). Please refer to Fig. 9 for more results.

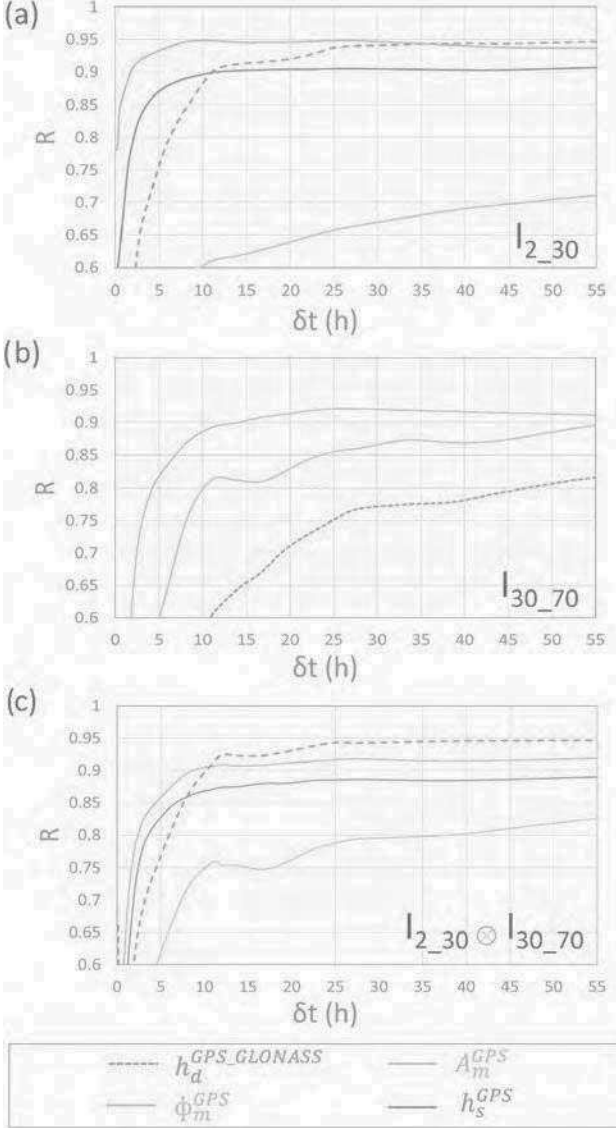


Fig. 9. (Absolute) Linear correlation coefficient R between A_m^{GPS} , ϕ_m^{GPS} , h_s^{GPS} , and $h_d^{GPS_GLONASS}$ with $P_{2\text{cm}}$, considering I_{2_30} (a), I_{30_70} (b) and the combination of both $I_{2_30} \otimes I_{30_70}$ (c). R coefficient is below 0.4 for h_s^{GPS} .

presented in Fig. 9(c). By combining the two ranges of satellite elevation angles, the linear correlation coefficient R is not higher than only considering I_{2_30} .

Fig. 10(a) presents the time series giving the best correlation with soil moisture with the smallest moving window, i.e.,

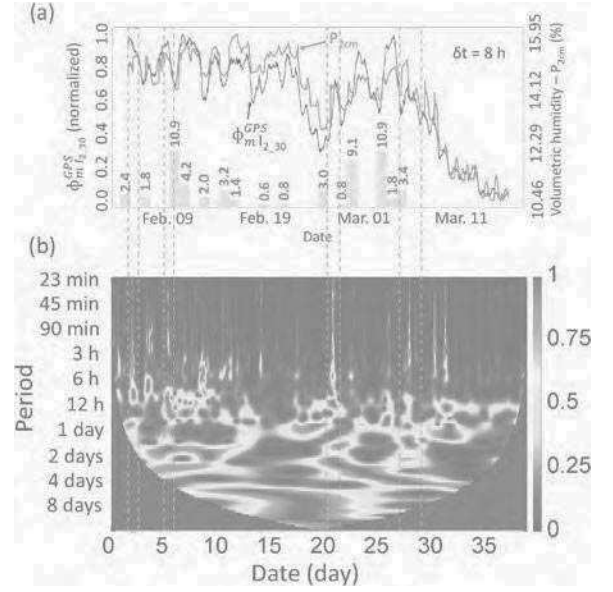


Fig. 10. (a) Evolution of $\phi_m^{GPS}(t)$ and $P_{2\text{cm}}$. Linear correlation coefficient is 0.95. Blue bars are the rain events (in mm). (b) Wavelet cross correlation map: $P_{2\text{cm}}$ VS ϕ_m^{GPS} . Abscissa is the day over the 1.5-month period of measurement and ordinate is the period under analysis. Cross wavelet power is in units of normalized variance for each period.

$\phi_m^{GPS}(t)$ obtained with $\delta t = 8$ h ($R = 0.95$). The main trend of soil moisture variations over this 1.5-month time period of measurement is perfectly retrieved, which explains the very good correlation coefficient value. A wavelet cross correlation was computed between this SNR-based time series and $P_{2\text{cm}}$, and the results are presented in Fig. 10(b). The wavelet cross correlation is based on Morlet mother function, and we used the wavelet toolbox for MATLAB developed by [33].

The largest periods observed by the variations of soil moisture are perfectly retrieved with $\phi_m^{GPS}(t)$ and daily changes are also detected. It is worth noticing the correlation between the different periods highlighted by the cross correlation, e.g., between the 25th and 30th day of measurement [Fig. 10(b)], periods ranging from few days to few hours are observed.

4) *Conclusion*: Best correlation is obtained with ϕ_m as in previous studies [9], [20]. Low satellite elevation angles ($< 30^\circ$) give the best results, even if a correlation is still observed between soil moisture and the metrics with high satellite elevation angles ($> 30^\circ$). The sign of the correlation is reversed between low and high elevation angles, as discussed in Section VI-D. It is possible to combine low and high satellite elevation angles, but it does not improve the results of I_{2_30} .

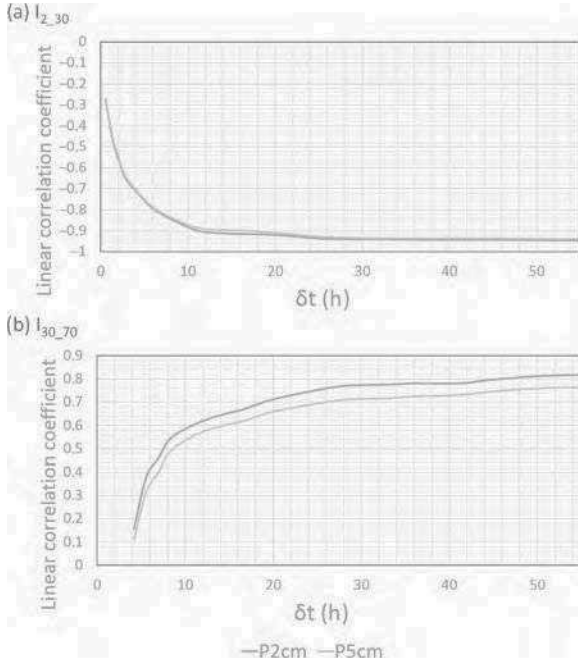


Fig. 11. Linear correlation coefficient between $h_d(t)$ time series and soil moisture as a function of δt .

B. Pseudo-Dynamic Case: Effective Height h_d of the Antenna

We computed the effective antenna height time series $h_d(t)$ following the pseudo-dynamic consideration (see Section III-A2), combining all GPS and GLONASS satellites, and differentiating I_{2_30} and I_{30_70} . Unlike the static case where only GPS constellation could be used, the pseudo-dynamic case can integrate both GPS and GLONASS constellations, which provides better results since more measurements are used for the determination. In this study, we only present the best results obtained by combining both GPS and GLONASS constellations. Note that the GLONASS signals are based on the frequency division multiple access (FDMA) method, and the frequency of each satellite is unique. This results in a modification of the wavelength λ , which must be taken into account in (6). The antenna phase center is also susceptible to vary resulting in a modification of the effective antenna height, but this latter issue is neglected in our study. Various values of the size of the moving window δt were tested and results are presented in Figs. 9(a) and (b) and Fig. 11.

1) *Low Satellite Elevation Angles (I_{2_30}):* $h_{d-I_{2_30}}(t)$ time series shows a very good agreement with $P_{2\text{cm}}$ and $P_{5\text{cm}}$ when δt is higher than 12 h with $R > 0.9$ (see Fig. 9). The best correlation is obtained with $P_{2\text{cm}}$ with $R = 0.95$.

2) *High Satellite Elevation Angles (I_{30_70}):* As for the static case, the sign of the correlation changes when considering either the low (I_{2_30}) or the high satellite elevation angles (I_{30_70}). $h_{d-I_{2_30}}(t)$ time series shows a good agreement when δt is higher than 30 h ($R > 0.78$ with $P_{2\text{cm}}$ and > 0.72 with $P_{5\text{cm}}$). R is higher than 0.5 when $\delta t > 8$ h (see Fig. 9). The best correlation is equal to 0.82 with $\delta t = 55$ h.

3) *Combining I_{2_30} and I_{30_70} :* The pseudo-dynamic case only provides two time series $h_{d-I_{2_30}}$ and $h_{d-I_{30_70}}$. Given that correlation between soil moisture and $h_{d-I_{30_70}}$ is worse than

with $h_{d-I_{2_30}}$, combining both elevation ranges is not interesting since it would lead to worse results than considering only data of low elevation. Nevertheless, it is possible to combine directly $f(t)$ time series obtained with both high and low satellites elevation ranges, prior to LSM resolution to compute $h_d(t)$ using (12). Results are presented in Fig. 9(c) and Table I. Resultant linear correlation coefficient with soil moisture is better than considering both I_{2_30} and I_{30_70} separately. Best correlation is equal to 0.95 with $\delta t = 33$ h, but correlation is higher than 0.9 with $\delta t > 10$ h.

VI. DISCUSSION

A. Inversion of the Correlation Between Low and High Satellite Elevation Angles

The sign of the correlation between the three metrics A_m , ϕ_m , and h and soil moisture variations changes when considering low (I_{2_30}) or high (I_{30_70}) satellite elevation angles, and $\sim 30^\circ$ seems to be the cutoff angle in our case.

This can be explained by the combined effect of 1) the reflection coefficients of the RHCP and LHCP components (which depends on the satellite elevation angles) and 2) the antenna gain pattern which will reject, at some level, the RHCP and LHCP components (also depending on the satellite elevation angles). Let us consider the Fresnel reflection coefficients defined in (1) considering the two extreme cases recorded by the soil moisture probes, i.e., a volumetric water content equal to 10.10% and to 29.87%. The corresponding relative permittivity are respectively equal to $4.4543 - 1.0905i$ and $14.6123 - 3.5857i$ (estimated following [26]) and conductivity is taken equal to $1.10 \cdot 10^{-5}$ and 0.12 S.m^{-1} (values interpolated from [12]). Fig. 12 shows the corresponding magnitude of the (a) horizontal and vertical and (b) copolar and cross-polar reflection coefficients as a function of propagation angle, for the GPS L1 frequency at 1.575 GHz.

The GNSS antenna is designed in an optimal sense to receive RHCP signals. The antenna thus rejects the LHCP component, at some level. Generally, LHCP rejection ratio is considered as a constant given by the constructor. In our case, data sheet gives an axial ratio R equal to 1.4 dB, which corresponds to a rejection ratio K_{LHCP} equal to

$$K_{LHCP} = 20 \log \left(\frac{r+1}{r-1} \right) = 21.9 \text{ [dB]} \quad (16)$$

with $r = 10^{R/20}$.

Following [12], an effective reflection coefficient for an incident RHCP signal can be written as

$$\tau_{eff} = \left(\rho_{RHCP} + 10^{\frac{-K_{LHCP}}{20}} \rho_{LHCP} \right) e^{-j\pi} \quad (17)$$

where ρ_{RHCP} is the copolar (RHCP) circular reflection coefficient magnitude and ρ_{LHCP} is the cross-polar (LHCP) circular reflection coefficient magnitude. The variation of τ_{eff} with θ is presented in Fig. 15(a).

As visible in Fig. 15(a), τ_{eff} is negatively correlated with wetness of the soil for low satellite elevation angles, and positively correlated for high satellite elevation angles. The cutoff

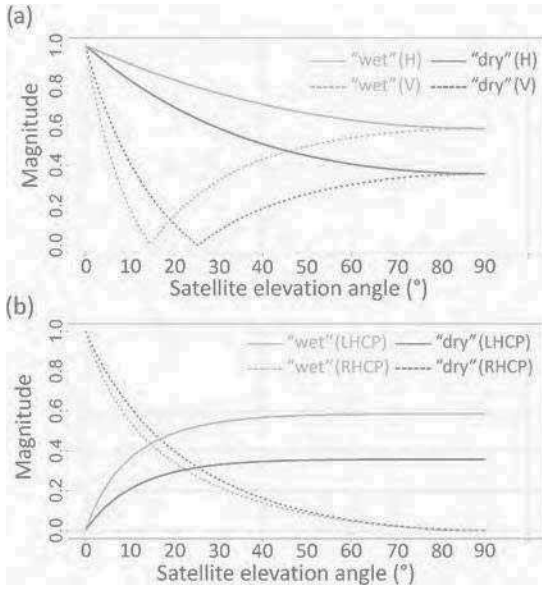


Fig. 12. Amplitude of the horizontal (H) and vertical (V) reflection coefficients (a) and amplitude of the copolar (RHCP) and cross-polar (LHCP) reflection coefficients (b) as a function of the propagation angle. “Wet” series corresponds to the maximum volumetric water content measured by the soil moisture probes during our experiment (29.87%), and “dry” series corresponds to the minimum (10.10%).

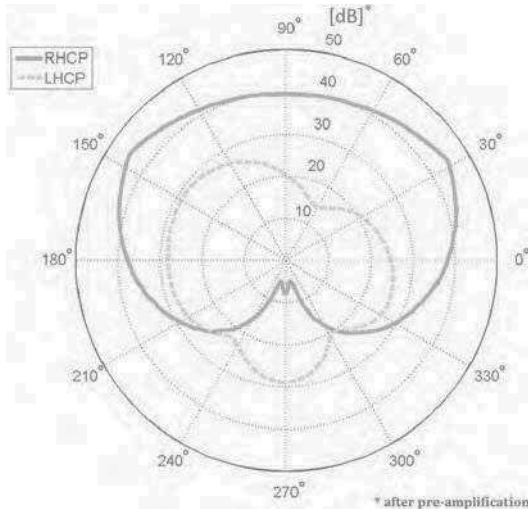


Fig. 13. Leica AR10 antenna gain pattern for RHCP and LHCP polarization.

angle is equal to 43°. This means that for satellites whose elevation angle is below the cutoff angle, received signal by the antenna is stronger when the reflecting soil is dry and lower when the soil is wet. The opposite occurs for satellites whose elevation angle is higher than this cutoff angle.

Nevertheless, taking the LHCP rejection ratio as a constant remains an approximation.

Let us consider the real antenna gain pattern of the Leica AR10 antenna for RHCP and LHCP polarizations given in Fig. 13, where for GNSS waves received by the nadir-looking hemisphere of the antenna, LHCP gain is higher than the RHCP one.

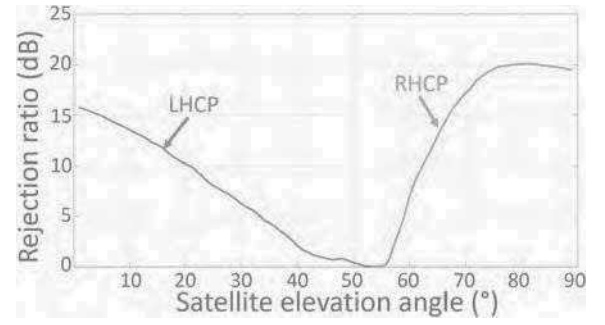


Fig. 14. RHCP and LHCP rejection ratio of the Leica AR10 antenna used in this study.

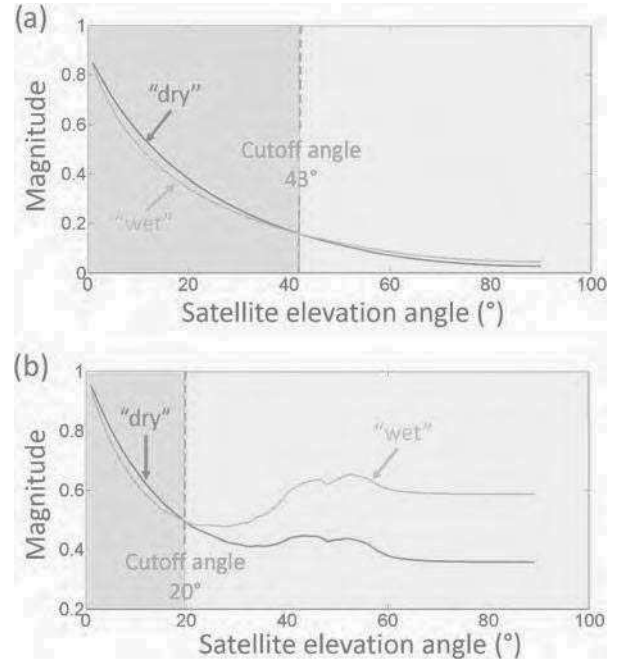


Fig. 15. Effective reflection coefficient for an incident RHCP signal received by a Leica AR10 antenna after reflection on a wet soil (29.87%) and a dry soil (10.10%). LHCP rejection ratio is considered as a constant and RHCP rejection ratio as zero in (a), and dependence of both RHCP and LHCP rejection ratios on the elevation angle is taken into account in (b).

This means that K_{LHCP} is not constant but depends upon the satellite elevation angle, but also that K_{RHCP} , the RHCP rejection ratio, is not zero.

Fig. 14 presents the RHCP and LHCP rejection ratio (in dB) of the antenna as a function of the elevation angle.

By incorporating both K_{RHCP} and K_{LHCP} into the cross-polarized and co-polarized components received by the antenna, an effective reflection coefficient for an incident RHCP signal can be written as

$$\tau_{eff} = \left(10^{\frac{-K_{RHCP}}{20}} \rho_{RHCP} + 10^{\frac{-K_{LHCP}}{20}} \rho_{LHCP} \right) e^{-j\pi}. \quad (18)$$

Fig. 15(b) presents the effective reflection coefficient magnitude considering the real rejection ratios.

The obtained cutoff angle is now equal to 20°. This cutoff angle explains the inversion of the correlation we observe

between the three metrics (A_m , ϕ_m , and h) and soil moisture, when considering low or high satellite elevation angles.

The cutoff angle is complex to obtain because 1) the antenna gain pattern dependence in azimuth angle is not taken into account in our model (because it is not known); 2) it does not only depend upon the difference between “dry” and “wet” soil characteristics, but also on the gradient between them, i.e., the speed of variation.

B. Depth of the Soil Moisture Determination

Except for $A_m^i(t)$ time series, all the time series (combining all satellites or not) are better correlated with $P_{2\text{ cm}}$ than with $P_{5\text{ cm}}$. This result is in perfect accordance with [9], which stated theoretically that best correlation of the interferogram metrics is obtained with soil moisture near the surface.

C. Static and Pseudo-Dynamic Cases

The static case gives poor results ($R = 0.39$) for soil moisture retrieval, whereas the pseudo-dynamic method gives a very good correlation ($R = 0.95$).

A previous study [19] already compared the static and pseudo-dynamic cases for altimetric purposes, and was realized in conditions where $\dot{h}_{\text{max}}$ was higher and equal to $5.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Authors concluded that considering $\dot{h}$ increased the linear correlation with ground truth data from 0.82 to 0.97. In our actual study, $\dot{h}$ can and must also be taken into account for soil moisture retrieval.

Besides, the pseudo-dynamic method can be used with all the GNSS constellations, whereas the static one is limited by the repetitiveness of the constellations. With the advent of the new GNSS constellations (Galileo, COMPASS/Beidou, etc.), the results of the pseudo-dynamic method will surely be improved.

D. High Satellite Elevation Angles

Previous studies [8], [9], [18], [20] applying IPT to soil moisture determination are only based on low satellite elevation angles. Our study shows that it is also possible to include high satellite elevation angles in the computation, with attention to the sign of the correlation with soil moisture. In other words:

- 1) correlation between soil moisture and phase offset ϕ_m is positive with low elevation angles and negative with high elevation angles;
- 2) correlation between soil moisture and amplitude A_m and effective antenna height h is negative with low elevation angles and positive with high elevation angles.

By separating low and high satellite elevation angles, the sensing zone will differ, and it will thus be possible to assess the heterogeneities of the surface around the antenna, just by selecting the elevation range under assessment. With an unique instrument, it is thus possible to assess the soil moisture close or far from the antenna, just by selecting the right elevation range.

By normalizing and inverting the time series obtained either from low or from high satellite elevation angles, it is possible to combine them. It does not improve the correlation for the

three metrics A_m , ϕ_m , and h_s whereas it enhances the results obtained with h_d .

VII. CONCLUSION

In this study, a single geodetic antenna was used to retrieve the moisture variations of the surrounding soil during a 1.5-month campaign. The method is based on the analysis of the SNR data, routinely collected by the receiver. SNR incorporates both direct and reflected GNSS signals which interacted with the reflecting ground that depends on soil moisture content.

Three different parameters can be computed from the multipath contribution to SNR: the amplitude A_m , the phase ϕ_m , and the frequency $\tilde{f}$. The frequency $\tilde{f}$ is used to retrieve the vertical height h of the antenna above the reflecting surface. In many studies, only data from low satellite elevation angles were considered as the multipath contribution becomes weaker with increasing elevation angles. In our study, two ranges of satellite elevation angles were considered: the low elevation angles from 2° to 30° (noted I_{2_30}) and the high elevation angles from 30° to 70° (noted I_{30_70}). The sign of the correlations is reversed when considering high satellite elevation angles I_{30_70} . The cutoff angle where the sign of the correlation between the three metrics and soil moisture variations changes seems to be $\sim 30^\circ$. This can be explained by the combined effect of 1) the reflection coefficients of the RHCP and LHCP components (which depends on the satellite elevation angles) and 2) the antenna gain pattern which will reject, at some level, the RHCP and LHCP components (also depending on the satellite elevation angles). Correlations R between the three estimated parameters and soil moisture are undeniable with, e.g., $R = 0.97$ between the phase $\phi_{m-I_{2_30}}^{PRN32}$ of the GPS satellite PRN32 and the 2-cm depth soil moisture (noted $P_{2\text{ cm}}$). The phase $\phi_{m-I_{2_30}}^i$ variations computed from all the GPS satellites i gives the best results with a mean linear correlation R with $P_{2\text{ cm}}$ of 0.84. In this particular case, the effective antenna height $h_{I_{2_30}}^i$ retrieved by SNR analysis gives a mean R equal to -0.57 , followed by the amplitude $A_{m-I_{2_30}}^i$ with a mean R equal to -0.32 . For high elevation satellites, R equals -0.45 , $+0.03$, and $+0.28$ with respectively $\phi_{m-I_{30_70}}^i$, $h_{I_{30_70}}^i$, and $A_{m-I_{30_70}}^i$.

Our study shows, for the first time, that it is possible to combine the measurements from all satellites into three resultant time series A_m^{GPS} , ϕ_m^{GPS} , and h^{GPS} , which drastically improves the temporal resolution and the correlation with soil moisture. We also combined the normalized data from low (I_{2_30}) and high (I_{30_70}) satellite elevation angles by multiplying by -1 the time series obtained from high satellite elevation angles, accordingly to the sign change rule at $\sim 30^\circ$.

The best results are obtained with R equal to 0.95 between $P_{2\text{ cm}}$ and $\phi_{m-I_{2_30}}^{GPS}$, 0.90 with $h_{m-I_{2_30}}^{GPS}$, and 0.72 with $A_{I_{2_30}}^{GPS}$. Temporal resolution of these three final time series is 10 min.

The use, also for the first time, of the high elevation angles is of high interest. By separating low and high satellite elevation angles, the sensing zone will differ, and it will thus be possible to assess the heterogeneities of the surface around the antenna.

With regard to the depth of the soil moisture determination, we compared the results obtained with a 2- and 5-cm-depth soil

moisture probes, and best correlation was obtained, as expected, with the shallowest 2-cm depth humidity probe.

We also tested a multi-GNSS constellations version of the SNR analysis method by combining all the satellites visible simultaneously in order to take the pseudo-dynamic of the surface into account. This clearly better the correlation with soil moisture, particularly for the high elevation angles. Furthermore, it allows to take into account nonrepeating ground tracks (such as GLONASS), and the results are likely to improve when new Galileo and COMPASS-Beidou constellations are added for the determination.

To conclude, a single geodetic antenna can perfectly be used to retrieve the main periods of the moisture variations of the surrounding soil. We demonstrated, in this study, that single geodetic antenna GNSS-R technique can be used for estimating small variations in surface soil moisture (~6%). In future works, this method will be applied to larger range of surface soil moisture fluctuations. The opportunistic remote sensing tool presented in this study establishes a link between the different temporal and spatial resolutions currently achieved by conventional tools (sensors, radar, etc.) and is thus a powerful alternative and a significant complement to the current measurement techniques.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Mr. Blanquet, owner of the agricultural plot in Lamasquere.

REFERENCES

- [1] D. Legates *et al.*, "Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography," *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 35, no. 1, pp. 65–86, 2011.
- [2] S. Sneviratne *et al.*, "Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate—A review," *Earth Sci. Rev.*, vol. 99, nos. 3–4, pp. 125–161, 2010.
- [3] Y. Kerr *et al.*, "The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle," *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 666–687, May 2010.
- [4] N. Roussel *et al.*, "Simulations of direct and reflected waves trajectories for in situ GNSS-R experiments," *Geosci. Model Develop.*, vol. 7, pp. 2261–2279, 2014.
- [5] M. Martin-Neira, "A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry," *ESA J.*, vol. 17, pp. 331–355, 1993.
- [6] D. Masters, P. Axelrad, and S. Katzberg, "Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02," *Remote Sens. Environ.*, vol. 92, no. 4, pp. 507–520, 2004.
- [7] J. Löfgren, "Local sea level observations using reflected GNSS signals," Ph.D. dissertation, Department of Earth and Space Sciences, Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, 2014.
- [8] K. Larson, E. Small, E. Gutmann, A. Bilich, P. Axelrad, and J. Braun, "Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: Initial results," *GPS Solutions*, vol. 12, no. 3, pp. 173–177, 2008.
- [9] C. Chew, E. Small, K. Larson, and V. Zavorotny, "Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: Development of a retrieval algorithm for soil moisture," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 1, pp. 537–543, Jan. 2014.
- [10] M. Braasch, B. Parkinson, P. Axelrad, and P. Enge, "Multipath effects," in *Global Positioning System: Theory and Applications*. Washington, DC, USA: AIAA, 1996, vol. 1, chapitre 14.
- [11] V. Zavorotny, K. Larson, J. Braun, E. Small, E. Gutmann, and A. Bilich, "A physical model for GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 3, no. 1, pp. 100–110, Mar. 2010.
- [12] B. Hannah, "Modelling and simulation of GPS multipath propagation," Ph.D. dissertation, The Cooperative Research Centre for Satellite Systems, Queensland Univ. Technol., Brisbane, QLD, Australia, 2001.
- [13] D. Brewster, "On the laws which regulate the polarization of light by reflexion from transparent bodies," *Philosoph. Trans. Roy. Soc. London*, vol. 105, pp. 125–159, 1815.
- [14] A. Alonso-Arroyo *et al.*, "Improving the accuracy of soil moisture retrievals using the phase difference of the dual-polarization GNSS-R interference patterns," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 2090–2094, Dec. 2014.
- [15] A. Bilich, "Improving the precision and accuracy of geodetic GPS: Applications to multipath and seismology," Ph.D. dissertation, Department of Aerospace Engineering Sciences, Univ. Texas at Austin, Austin, TX, USA/M.S. thesis, Univ. Colorado, Boulder, CO, USA, 2006.
- [16] G. Bishop and J. Klobuchar, "Multipath effects on the determination of absolute ionospheric time delay from GPS signals," *Radio Sci.*, vol. 20, no. 3, pp. 388–396, 1985.
- [17] Y. Georgiadou and A. Kleusberg, "On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning," *Manuscr. Geod.*, vol. 13, pp. 172–179, 1988.
- [18] K. Larson, J. Braun, E. Small, V. Zavorotny, E. Gutmann, and A. Bilich, "GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 3, no. 1, pp. 91–99, Mar. 2010.
- [19] N. Roussel *et al.*, "Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver," *Remote Sens. Environ.*, vol. 171, pp. 261–277, 2015.
- [20] K. Larson, E. Small, E. Gutmann, A. Bilich, J. Braun, and V. Zavorotny, "Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, no. 24, p. L24405, 2008.
- [21] N. Lomb, "Least-squares frequency analysis of unevenly space data," *Astrophys. Space Sci.*, vol. 39, pp. 447–462, 1976.
- [22] J. Scargle, "Studies in astronomical time series analysis—Part II: Statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data," *Astro. J.*, vol. 263, pp. 835–853, 1982.
- [23] T. Ruf, "The Lomb-Scargle periodogram in biological rhythm research: Analysis of incomplete and unequally spaced time-series," *Biol. Rhythm Res.*, vol. 30, no. 2, pp. 178–201, 1999.
- [24] F. Baup *et al.*, "MCM'10: An experiment for satellite multi-sensors crop monitoring from high to low resolution observations," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 2012, pp. 4849–4852.
- [25] F. Ulaby, A. Fung, and R. Moore, *Microwave and Remote Sensing: Active and Passive, Vol. 2: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1982, vol. 2, p. 1064.
- [26] M. Hallikainen, F. Ulaby, M. Dobson, M. El-Rayes, and L. Wu, "Microwave dielectric behavior of wet soil—Part I: Empirical model and experimental observations," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-30, no. 1, pp. 25–34, Jan. 1985.
- [27] J. Behari, "Microwave dielectric behavior of wet soils," in *Remote Sensing and Digital Image Processing*. New York, NY, USA: Springer, 2006, ISBN 1-4020-3271-4.
- [28] P. Beckmann and A. Spizzichino, *Scattering of Electromagnetic Waves From Rough Surfaces*. Norwood, MA, USA: Artech House, 1987, ISBN 0-89006-238-2.
- [29] F. Baup *et al.*, "Mapping surface soil moisture over the Gourma mesoscale site (Mali) by using ENVISAT ASAR data," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 15, pp. 603–616, 2011.
- [30] C. Fatras, F. Frappart, E. Mougin, M. Grippa, and P. Hiernaux, "Estimating surface soil moisture over Sahel using ENVISAT radar altimetry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 123, no. 8, pp. 496–507, 2012.
- [31] F. Frappart *et al.*, "Radar altimetry backscattering signatures at Ka, Ku, C and S bands over West Africa," *Phys. Chem. Earth, A, B, C*, vols. 83–84, pp. 96–110, 2015.
- [32] W. Wagner, G. Lemoine, and H. Rott, "A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data—empirical data and model results," *Remote Sens. Environ.*, vol. 70, no. 2, pp. 191–207, 1999.
- [33] A. Grinsted, J. Moore, and S. Jevrejeva, "Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series," *Nonlinear Processes Geophys.*, vol. 11, pp. 561–566, 2004.



Nicolas Roussel received the Ph.D. degree in geodesy and remote sensing at Université Paul Sabatier, Toulouse, France, in 2015. He is an Engineer in topography and land surveying from Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Strasbourg, France since 2012.

He recently joined the MISTRAL project funded by the European GNSS Agency (GSA) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program. His research interests include GNSS-reflectometry, altimetry, and remote sensing.



Frédéric Frappart received the Ph.D. degree in geophysics from Université de Toulouse, Toulouse, France, in 2006.

He is an Engineer from Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées Bretagne (ENSTA Bretagne, formerly ENSIETA), Brest, France. He has been a Researcher at Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), Toulouse, France, since 2010, in charge of the scientific applications of radar altimetry over land (hydrology and surface properties) for the Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH), a French Observation Service dedicated to radar altimetry studies, and Member of the Scientific Definition Team of the NASA/CNES InSAR altimeter Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission for land hydrology (2012–2015) and of the SWOT Science Team (2016–2020). He involved in GNSS-R activities in the Geodesy from space team at GET-OMP.



Guillaume Ramillien received the Ph.D. degree in space geophysics from the University Paul Sabatier, Toulouse, France, in 1998, which subject was the 3-D sea floor topography by inversion of radar satellite altimeter data.

Since October 2002, he has been a Researcher with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), and his current investigations are focused on the time variations of the Earth's gravity field measured by the Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) satellite mission, and he is interested in the preparation of the future low-altitude gravity missions. He has been the President of the "Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale" (GRGS) group since May 2015.



José Darrozes received the Ph.D. degree from Montpellier II University, Montpellier, France, in 1997, and the Ph.D. research focused primarily on remote sensing and wavelet signal processing in Earth Sciences.

He recently joined the reflectometry group hosted in the GET laboratory in Toulouse. He has been an Associated Professor with the University Paul Sabatier, Toulouse, France, since 1998 and he has been involved in the reflectometry activities since 2011. During three successive Postdoctoral Fellowships at the "National Institute of Water and Atmospheric Sciences" (NIWA), Wellington, New Zealand, in 1998, the "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA), Silver Spring, MD, USA, in 1999, and the CERFACS, Météo-France (2000–2002), his research interest include the exploitation of remote sensing data for characterizing the Earth's surface (hydrology) and subsurface geophysical processes.



Frédéric Baup received the M.S. degree in microwave and optical telecommunications and the Ph.D. degree in microwave remote sensing from University Paul Sabatier, Toulouse, France, in 2003 and 2007, respectively.

Since 2008, he has been a Researcher in microwave remote sensing with the Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) Laboratory, Toulouse, France. His research interests include microwave remote sensing applied to land surfaces and SAR image analysis to monitor spatio-temporal variations of soil (moisture and roughness) and vegetation (biomass) properties over agricultural or natural areas and his education interests are focused on physics and remote sensing sciences.



Laurent Lestarquit is Engineer from Ecole Polytechnique, Palaiseau, France since 1994 and Supaero School, Toulouse, France since 1996 in Space Systems. He has been involved in GNSS-related activities at CNES since 1996 mostly on GNSS signal design, signal processing, and space borne GNSS receivers.

He recently joined, as a GNSS expert, the CNES/GRGS Space Geodesy Team and IGS Analysis Center, Toulouse, France. He is a Former Member of the Galileo Signal Task Force, and Negotiator of the 2004 EU-USA GNSS agreement. He is the Inventor of the constant envelope Alt-Boc modulation and Co-inventor of the CBOC waveform that are used on Galileo.



Minh Cuong Ha received the B.S. degree in Geodesy Engineering from the University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam, in 2005, and received the M.S. degree in cartography, remote sensing and GIS from Vietnam National University, Hanoi, Vietnam, in 2010. Since September 2013, he has been working toward the Ph.D. degree in remote sensing and GIS at the Laboratory GET, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

He recently joined the MISTRALE project funded by the European GNSS Agency (GSA) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program. His research interests include GNSS-reflectometry, altimetry, and remote sensing sciences.