



RADIOSCIENCES AU SERVICE DE L'HUMANITE

Analyse du potentiel des mesures GNSS pour le suivi des états des surfaces *Potential of GNSS reflectometry for land surfaces monitoring*

Mehrez Zribi¹, Erwan Motte¹, Pascal Fanise¹

¹ CESBIO (CNRS/UPS/IRD/CNES), 18 av. Edouard Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse cedex9, France,

mehrez.zribi@cesbio.cnes.fr, erwan.motte@cesbio.cnes.fr, pascal.fanise@cesbio.cnes.fr

Mots clés : Surfaces continentales, GNSS, GNSS-R, radar bistatique

Keywords : Land surfaces, GNSS, GNSS-R, bistatic radar

Abstract

The land surface conditions play an essential role in water and carbon cycles understanding. During the last thirty years, different approaches, based on microwave remote sensing have been developed to estimate surface parameters, describing soil and vegetation cover. In this context, since the 90s', the high availability of measurements coming from GNSS has created a new area of microwave remote sensing for oceanic and continental surfaces. The GNSS reflectometry (GNSS-R), for which GNSS signals are used in a bistatic configuration to monitor and estimate surface parameters (moisture, biomass of vegetation cover, etc) has been exploited. This paper illustrates firstly the physical bases of GNSS-R techniques. It illustrates also an example of GNSS-R application through the airborne GLORI campaigns over the south West of France (agricultural sites, Landes forest).

Résumé

Les états des surfaces continentales jouent un rôle essentiel dans la compréhension des cycles de l'eau et du carbone. Durant ces trente dernières années, différentes approches basées sur la télédétection micro-ondes ont été développées pour l'estimation des paramètres de surface, décrivant le sol ou le couvert végétal. Dans ce contexte, depuis vingt ans, la forte disponibilité des mesures des systèmes globaux de navigation par satellite-GNSS a créé une nouvelle branche de la télédétection microonde des surfaces continentales. La technique Réflectométrie-GNSS (GNSS-R), où les signaux GNSS sont utilisés en mode bistatique pour le suivi de différents paramètres (humidité du sol, biomasse du couvert végétal, etc) est la plus exploitée. Cet article illustre en premier les bases physiques des techniques GNSS-R. Il présente également un exemple d'application à travers les campagnes aéroportées de l'instrument GNSS-R GLORI sur le sud ouest de la France (zones agricoles, forêt des Landes).

1 Introduction

Durant les trente dernière années, différentes approches se sont développées pour estimer les états des surfaces, en se basant sur les mesures satellites multi-capteurs (optique, microondes actives et passives, lidar, etc) [1-2]. Ces approches ont permis une grande avancée dans la mise au point de produits opérationnels prêts à être assimilés dans les modèles de fonctionnement (en hydrologie, météorologie, etc). Cependant, la question de la répétitivité des mesures et de leur couverture spatiale reste essentielle pour répondre aux besoins des thématiciens. Depuis 15 années, l'utilisation d'autres nouveaux systèmes d'opportunité pour la géophysique est devenue une importante question scientifique [3-4]. Par exemple, les systèmes de positionnement globaux (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou etc) seront en mesure de proposer d'ici peu 120 satellites en orbite, sources continue de transmission en bande L. Leurs apports sont nombreux :

- 1) Une couverture globale continue ;
- 2) Une absence de besoin d'émetteurs radar actifs en plus des satellites GNSS ;

- 3) Une polarisation circulaire, en bande L, permettant une mesure très peu sensible aux conditions météorologiques et fortement sensible aux états des surfaces terrestres.

Ces dernières années, différents travaux scientifiques expérimentaux ou théoriques ont montré l'apport potentiel de ces techniques pour estimer différents états des surfaces terrestres. Les premières applications ont ciblé particulièrement l'altimétrie des océans [3]. Depuis, les scientifiques se sont intéressés à divers paramètres (hauteur des vagues, humidité des sols, neige, biomasse du couvert végétal, détection des cibles tel que les bateaux etc), [4-8].

2 Méthodologies

2.1 Signaux GNSS

Le signal GPS est émis par les différents satellites GPS en bande L. Le signal est basé sur une fréquence fondamentale de 10.23 MHz et à partir de cette fréquence, on obtient deux principales fréquences, f_1 à 1575.42 MHz et f_2 à 1227.60 MHz et avec les dernières modernisations du GPS, une troisième fréquence est ajoutée, f_5 à 1176.45 MHz. Les signaux GPS sont des signaux codés avec des destinations civile ou militaire. La modulation civile correspond au code *C/A* (pour *Coarse Acquisition* : acquisition brute), avec une séquence résultant de l'addition modulo 2 du code binaire pseudo-aléatoire *C/A* à 1,023 Mchip/s et avec une période de 1 ms. Le code *P* (pour « précis ») à 10,23 Mchip/s et de période 1 semaine.

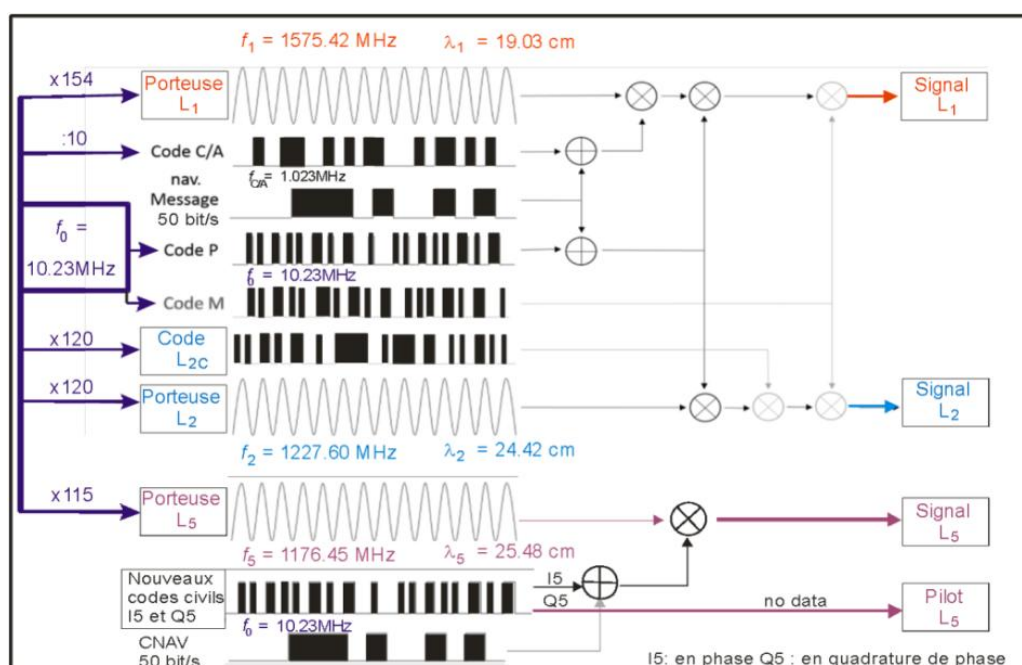


Figure 1 : Structure d'un signal GNSS (Darrozes et al., 2016 [9])

2.1.1 Signaux de la bande L1

Le signal S1 est modulé à partir des codes C/A et P(Y), respectivement en phase (I) et quadrature de phase (Q). L'expression analytique du signal S1 transmis en L1 avec la fréquence f1, pour un satellite donné, s'écrit:

$$S_1(t) = \sqrt{2 P_C / A, L_1} D(t) C / A(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi_{L_1}) + \sqrt{2 P_P(Y), L_1} D(t) P(t) \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{L_1}) \quad (1)$$

Avec $P_{C/A,L_1}$ et $P_{P(Y),L_1}$ sont les puissances transmises en L_1 pour les deux codes C/A et $P(Y)$, $D(t)$ est le message de transmission, $C/A(t)$ et $P(t)$ sont les séquences binaires des deux codes C/A et $P(Y)$. Les codes PRN et les messages de navigation sont synchronisés sur la même horloge.

2.1.2 Signaux de la bande L2

Le signal S2 de la porteuse L2 est modulé seulement avec le code P(Y). Il s'écrit:

$$S_2(t) = \sqrt{2 P_{P(Y), L_2}} P(t) \cos(2\pi f_2 t + \varphi_{L_1}) \quad (2)$$

Avec $P_{P(Y), L_2}$ est la puissance transmise en L_2 , $P(t)$ la séquence avec le code $P(Y)$. Il n'y a pas de données transmises sur cette fréquence L_2 ($D(t)$ est absent).

2.2 La méthodologie GNSS-R

2.2.1 GNSS-R par analyse de la forme d'onde

a) Techniques utilisées

La technique GNSS-R basée sur l'analyse des formes d'onde utilise des récepteurs in situ, aéroportés ou satellite, équipés avec une ou plusieurs paires d'antennes (en fonction du nombre de configurations considérées en termes de fréquences et polarisations), qui sont suivis d'une ou plusieurs paires de convertisseurs analogique-numérique, de préférence synchronisés par la même horloge. Chaque paire correspond à un premier canal qui mesure le signal direct (à partir de l'antenne orientée vers le haut) et un deuxième qui mesure le signal réfléchi par la surface de la terre (à partir de l'antenne orientée vers le bas). Le point de réflexion minimisant la distance entre l'émetteur et la récepteur est appelé point spéculaire. Deux méthodes principales existent pour l'analyse de ces signaux.

Le GNSS-R classique (cGNSS-R) est basé sur la corrélation des signaux reçus (direct et réfléchi) avec une réplique locale générée par le récepteur. La corrélation s'écrit alors :

$$Y(\tau, f_d) = \frac{1}{T_i} \int_{T_i} S_d a(t - \tau) e^{i(f_c + f_d)t} dt \quad (3)$$

avec T_i le temps d'intégration cohérent. Pour le signal direct, lorsque la corrélation est maximale, les codes PRN du signal reçu et de la réplique sont alignés, c'est-à-dire que τ correspond au retard lié à la transmission entre l'émetteur et le récepteur, qui apporte une information sur la distance de positionnement du récepteur, et le décalage Doppler f_d induit par les vitesses relatives de l'émetteur et du récepteur.

Le GNSS-R interférométrique (iGNSS-R) est basé sur une corrélation directe entre les signaux direct et réfléchi.

b) Observables

**** Carte Doppler-Delay (DDM)**

Considérant le carré de la valeur absolue de la forme d'onde obtenue par l'équation (3) et en l'intégrant sur un intervalle de temps suffisant, on obtient :

$$\langle |Y(\tau, f)|^2 \rangle = \frac{T_i^2 P_t G_t \lambda^2}{(4\pi)^3} \iint_A \frac{G_r(\vec{\rho})}{R_0^2(\vec{\rho}) R^2(\vec{\rho})} \sigma_{pq}^0 \chi^2(\vec{\rho}, \delta\tau, \delta f) d\vec{\rho} \quad (4)$$

La figure 2 illustre le profil de la forme d'onde réfléchie pour différents types de surfaces rugueuses. On observe une baisse de la puissance du signal avec une plus forte asymétrie de la forme d'onde avec l'augmentation de la rugosité. En effet, les contributions deviennent plus faibles et proviennent aussi de points plus éloignés du point spéculaire.

Le produit qui illustre la puissance du signal (équation (4)) en fonction du retard et du Doppler est appelée carte DDM (Delay Doppler Map). Elle illustre la contribution de chaque paire (τ, f) des différents points de la surface observée. Les coordonnées de la carte sont relatives au point spéculaire, correspondant à un retard et un Doppler nuls.

**** Le coefficient radar bistatique**

Le coefficient radar bistatique est estimé à partir du maximum de la forme d'onde réfléchie (équation 4). Il décrit la réponse de la surface de réflexion. Pour des surfaces lisses (comme les couvertures d'eau, la composante cohérente est très importante. Elle pourrait être modélisée à partir de la forme d'onde directe, le coefficient de Fresnel et un terme de rugosité dépendant de l'angle d'élévation du satellite.

$$\langle |Y(\tau, f)|^2 \rangle_{spec} = |Y_0(\tau, f)|^2 |\text{Re}|^2 \exp\left(-8\pi^2 \sigma_h^2 \cos^2(\theta) / \lambda^2\right) \quad (5)$$

Le coefficient de diffusion bistatique est particulièrement analysé pour le cas des surfaces océaniques (rugosité, vitesse du vent). Pour les surfaces continentales, la composante cohérente est généralement considérée la plus importante.

Concernant la polarisation des signaux mesurés, les satellites transmettent leurs signaux en polarisation circulaire droite (RHCP). Après réflexion par la surface de la terre, le signal est majoritairement inversé en polarisation gauche (LHCP). Différents capteurs mesurent les deux polarisations afin de mieux séparer les effets humidité et rugosité pour les surfaces continentales.

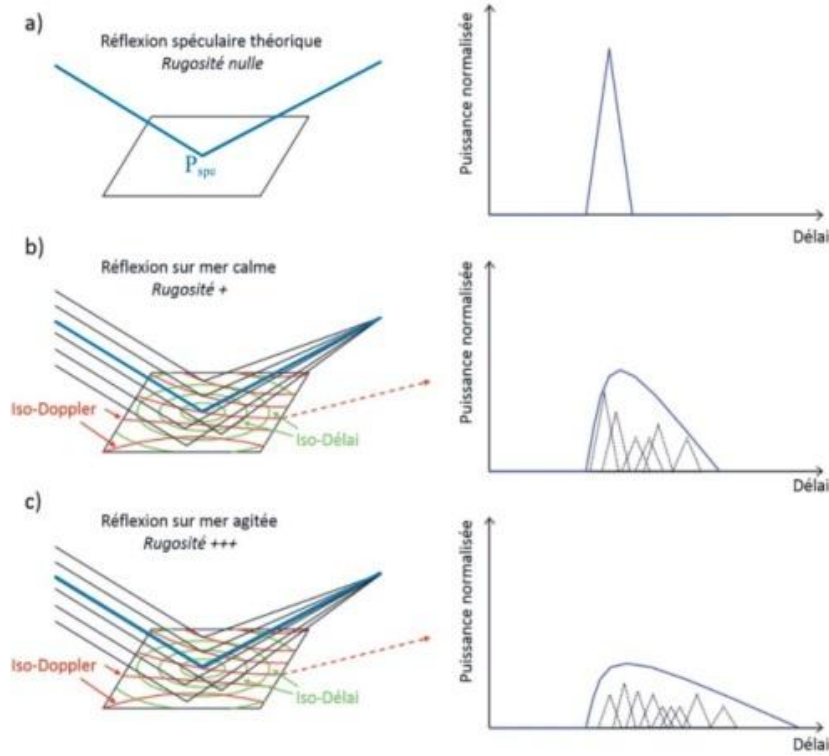


Figure 2. Dépendance de la forme d'onde à la rugosité de la surface étudiée (Darrozes et al., 2016 [9])

** La réflectivité des surfaces

La réflectivité de la surface peut être estimée à partir du rapport des formes d'ondes direct et réfléchi. On considère dans ce cas que le décalage Doppler du signal réfléchi est égal au décalage Doppler du signal direct, et retardé d'un délai additionnel $\Delta\tau$ dépendant de la géométrie de la mesure. Cette réflectivité s'écrit :

$$\Gamma_{pq} = \left\langle \frac{Y_{r,q}(\Delta\tau, f)}{Y_{d,p}(0, f)} \right\rangle^2 \quad (6)$$

Avec $\langle \rangle$ l'opérateur de moyenne, $\Delta\tau$ est le retard entre le trajet direct et le réfléchi; $Y_{d,p}$ correspond à la corrélation du signal direct avec la polarisation p et $Y_{r,q}$ est celle du signal réfléchi avec la polarisation q.

** Champ interférométrique complexe

Un autre observable est le champ interférométrique complexe (ICF). Il est défini par la série temporelle des maximums relatifs du rapport de la forme d'onde réfléchi sur la forme d'onde directe.

$$ICF(t) = \frac{Y_{r,q}(i, \Delta\tau, f)}{Y_{d,p}(t, 0, f)} = \frac{R(t)}{D(t)} = \frac{r(t)}{d(t)} e^{-i(\phi_r(t) - \phi_d(t))} \quad (7)$$

$R(t)$ and $D(t)$ sont respectivement les séries temporelles des maximums des formes d'ondes, avec les amplitudes et phases associées $r(t)$, $d(t)$ et ϕ_r et ϕ_d .

Avec cet observable, les effets communs liés à la propagation sur les signaux direct et réfléchi peuvent être éliminés.

2.2.2 GNSS-R par diagramme interférométrique

a) Méthode du diagramme interférométrique (IPT)

En plus des informations classiques de positionnement, les récepteurs GNSS sont aussi capables d'indiquer la qualité du signal reçu, à travers un rapport signal sur bruit, lié à la corrélation entre le signal reçu et la réplique du code générée par l'instrument. Pour l'IPT (Interference Pattern Technique), les signaux directs et réfléchis sont reçus par la même antenne localisée entre 1 m et quelques centaines de mètres de la surface de la terre (figure 3). Les antennes combinent les signaux direct et réfléchi, qui sont par la suite analysés par un récepteur GNSS standard [10]. En fonction de la nature de la surface analysée, l'intensité des contributions des signaux direct et réfléchi sont plus ou moins importantes et les signaux sont combinés de manière constructive ou destructive, créant ainsi un signal interférométrique.

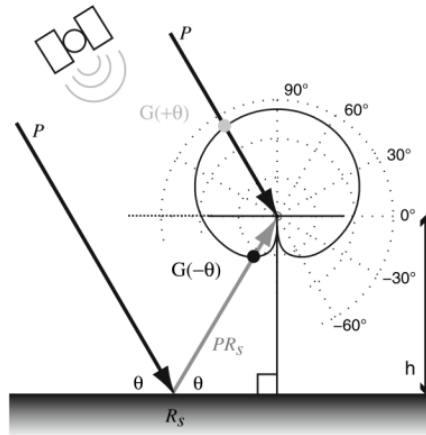


Figure 3. Géométrie d'un signal direct provenant d'un satellite GNSS et de sa réflexion spéculaire captés par une seule antenne (technique IPT), (Motte et al., 2016 [5])

b) Observable de l'IPT

L'observable de base de la technique IPT est la série temporelle du rapport signal au bruit réfléchi $SNR_r(t) = SNR_t - SNR_d$ avec SNR_t représente le SNR IPT qui combine les signaux direct et réfléchi et le SNR_d représente le SNR du signal direct (généralement approximé par un polynôme d'ordre 2). Pour une hauteur h donnée, $SNR_r(t)$ est une fonction période de la phase ϕ_m , qui peut s'écrire comme:

$$SNR_r(t) = A_m(t) \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) + \phi_m(t)\right) \quad (8)$$

Avec $A_m(t)$ dépend de l'intensité de la surface réfléchi, et combine le diagramme du gain de l'antenne et l'intensité de la réponse de la surface de réflexion. Les deux dépendent de l'angle d'élévation du satellite et de la longueur d'onde.

$A_m(t)$, $\phi_m(t)$ et h sont les trois métriques qui peuvent être estimées à partir de la technique IPT; il est démontré que leurs variations sont dépendantes de la hauteur effective du récepteur, de l'humidité et le couvert végétal de la surface.

3 Exemple d'applications : Campagne GLORI

3.1 L'instrument GNSS-R GLORI

L'instrument GLORI (figure 4) est un enregistreur en bande L multicanaux composé de 3 sous-systèmes [[11]] :

- Antennes hémisphériques bipolarisations Zénith et Nadir (Polarisations circulaires droite et gauche)
- Récepteur capable d'enregistrer de manière synchronisée jusqu'à 4 voies avec une fréquence d'entrée paramétrable entre 1 et 2 GHz et une bande passante effective comprise entre 8 et 65 MHz.

- Une unité d'acquisition et de stockage basé sur un PC industriel sur lequel sont montés 2 disques durs en RAID0.

L'instrument utilise 3 voies : une voie zénith (signal direct polarisation droite) et deux voies nadir (signal réfléchi polarisation gauche et droite, filtré à 5MHz de bande passante et échantillonné en bande de base à 16.368 MSPS (I et Q) sur 2 bits.

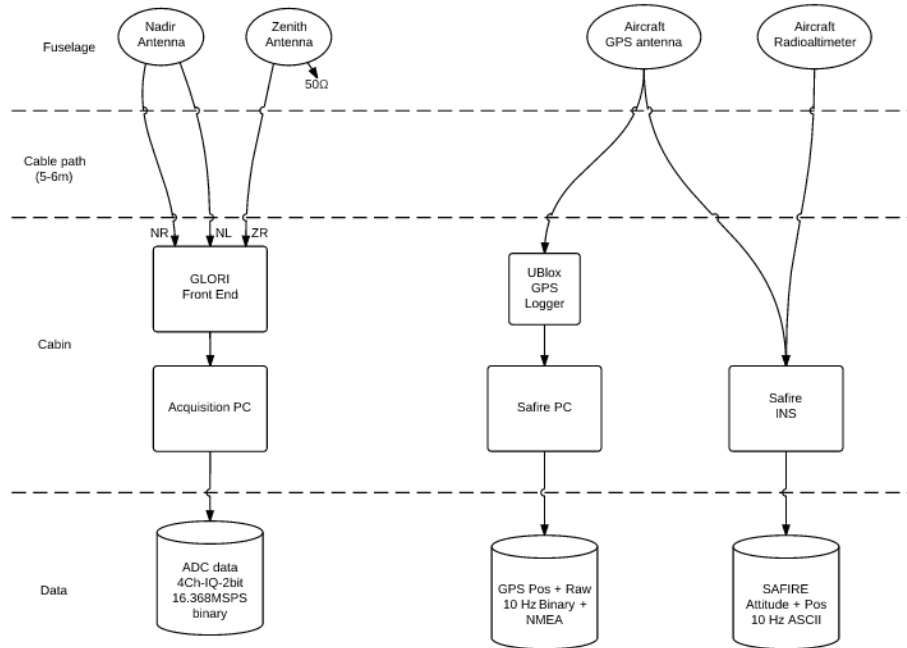
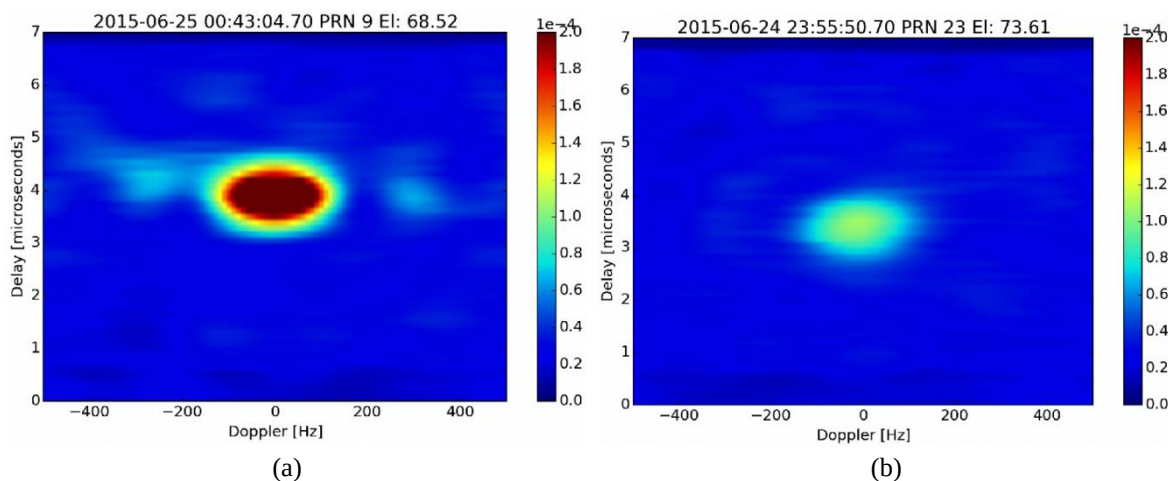


Figure 4: Schéma synoptique de l'instrument GLORI

3.2 Quelques résultats

3.2.1 Analyse des carte Delay-Doppler (DDM)

La figure 5 illustre quatre DDM générées pour différents types de surfaces: couverture d'eau, sol nu, couvert agricole et forêt [11]. Pour les différentes cartes, on a considéré 5ms pour le temps d'intégration cohérente et 200ms pour l'intégration incohérente. Comme déjà prouvé dans d'autres travaux récents, on observe pour la surface d'eau, un terme cohérent prépondérant, avec une forme d'onde peu étalée dans les deux dimensions (retard et Doppler). Pour les sols nus, la composante cohérente reste aussi prépondérante avec un DDM propre pour des retards ou Doppler moyens ou élevés. Pour les surfaces de couverts agricoles et la forêt, la contribution de la composante incohérente, liée à différents types de diffusions avec le couvert végétal, devient importante, avec une répartition du signal réfléchi sur une gamme large de dopplers et retards par rapport au point spéculaire.



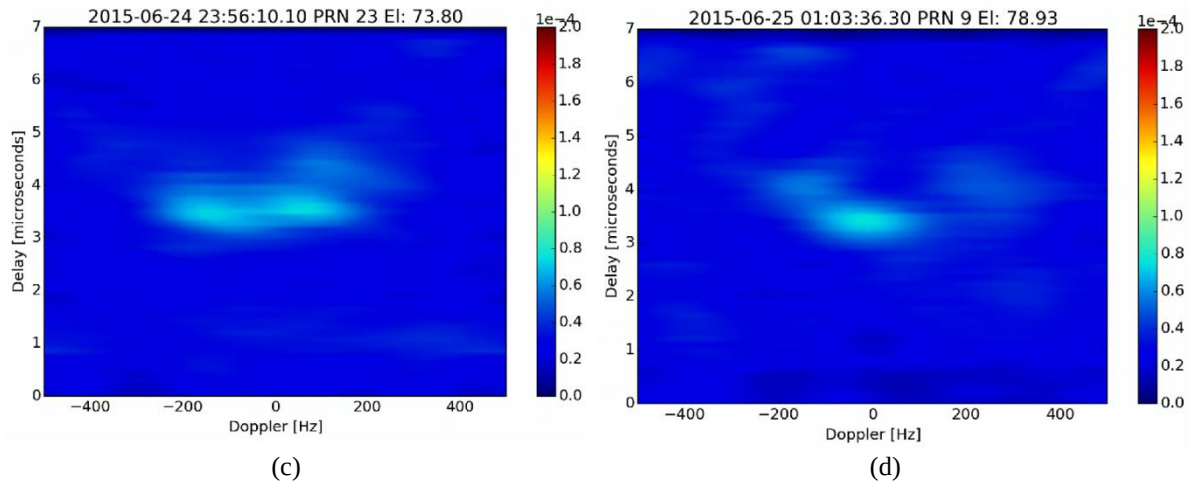


Figure 5 : Cartes DDM pour quatre types de surfaces a) couverture d'eau b) sol nu c) maïs d) forêt, avec un temps d'intégration cohérent: 5ms, un temps d'intégration incohérent 200ms.

3.2.2 Cartographie du signal réfléchi en zones agricoles et forêt

Cette section illustre la sensibilité du signal GNSS-R à différents types de couverts agricoles. La figure 6 (a) illustre la dynamique de la réflectivité GLORI sur la même zone d'étude, située au nord de la forêt des Landes. Elle illustre la réflectivité en polarisation LHCP (habituellement la plus utilisée). La carte affiche une dynamique de 20 dB, avec des signaux compris entre -22 et -2 dB. On observe sur cette carte, moyennant toutes les mesures avec des élévations entre 45 et 90°, un fort potentiel à retrouver des structures et détails des occupations du sol (parcelles agricoles, routes, couverts d'eau, forêt ...). L'homogénéité relative des mesures montre une faible dépendance du signal réfléchi en LHCP à l'angle d'élévation.

La figure 6 (b) montre la réflectivité en polarisation LHCP pour 2 types de cultures et 3 gammes d'angles d'élévations. On voit qu'il est possible de discriminer des cultures à faible biomasse aérienne telle que les carottes de celles à forte biomasse aérienne telle que le maïs.

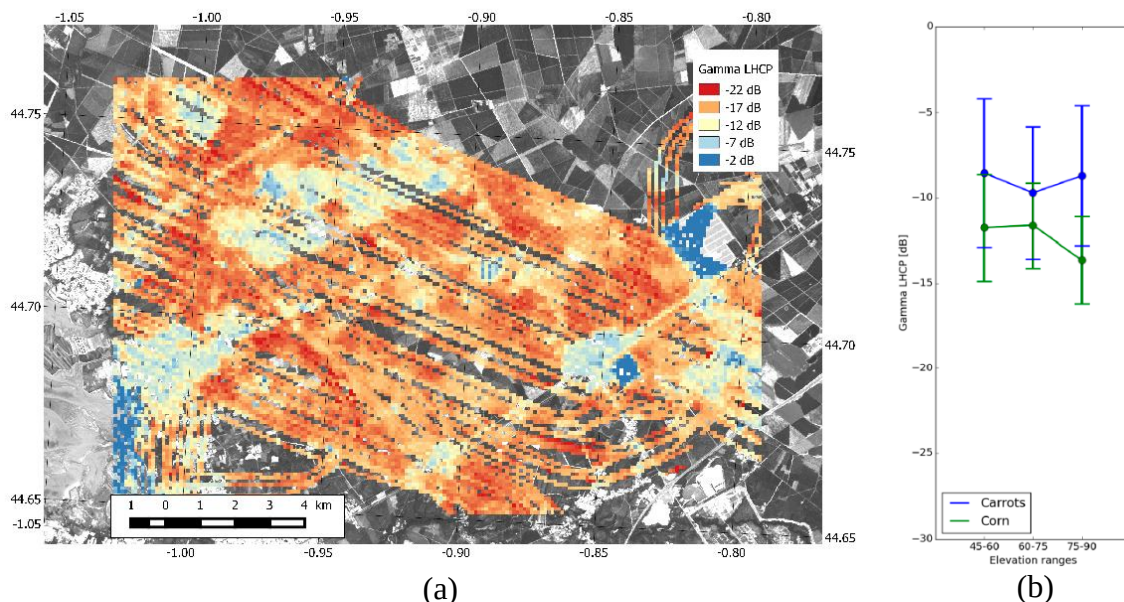


Figure 6: (a) Mesures de réflectivité en polarisation LHCP, sur tous les vols 2015 sur la forêt des Landes, avec des élévations entre 45 et 90°, et des pixels moyennés de 100mx100m, (b) Réflectivité mesurée pour deux types de cultures (Maïs et Carottes) en fonction de l'angle d'élévation (Motte et al., 2016)

4 Conclusions

La réflectométrie GNSS est un champ de la télédétection bistatique en pleine essor, basée sur l'utilisation de signaux de navigation dont la pérennité sur le long terme est assurée. Plusieurs techniques de mesures ont été

présentées, ainsi que la méthodologie permettant de calculer les observables qui seront liés aux grandeurs physiques à mesurer. L'exemple de GLORI, un récepteur GNSS-R polarimétrique aéroporté a été donné, ainsi qu'un exemple des mesures qu'il est capable de fournir pour les applications continentales telles que la caractérisation de la biomasse agricole.

5 Remerciements

Cette étude est financée par les projets RTRA/PRISM et GORIE (TOSCA/CNES).

Références

- [1] N. Baghdadi, M. Zribi, *Optical Remote Sensing of Land Surfaces, Techniques and methods*, ISTE Press, London and Elsevier, Oxford, 2016. ISBN : 9781785481024
- [2] N. Baghdadi, M. Zribi, *Microwave Remote Sensing of Land Surfaces, Techniques and methods*, ISTE Press, London and Elsevier, Oxford, 2016. ISBN : 9781785481598.
- [3] M. Martin-Neira, "A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS)- Application to ocean altimetry". *ESA J.* 1993, 17, 331–355.
- [4] V. U. Zavorotny, S. Gleason, E. Cardellach, and A. Camps, "Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 2, no. January, pp. 8–45, 2014.
- [5] E. Motte, A. Egido, N. Roussel, K. Boniface, and F. Frappart, "Applications of GNSS-R in Continental Hydrology," Chapter book: Baghdadi N. et Zribi M. (eds), in *Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology*, ISTE Press, London and Elsevier, Oxford, 2016, pp. 281–322.
- [6] N. Rodriguez-Alvarez, A. Camps, M. Vall-Llossera, X. Bosch-Lluis, A. Monerris, I. Ramos-Perez, E. Valencia, J. Martinez-Fernandez, G. Baroncini-Turricchia, C. Perez-Gutierrez, N. Sanchez, J.F. Marchan-Hernandez, "Land geophysical parameters retrieval using the interference pattern GNSS-R technique". *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, 49, 71–84.
- [7] E. E. Small, K. M. Larson, and J. J. Braun, "Sensing vegetation growth with reflected GPS signals," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 37, no. 12, p., Jun. 2010.
- [8] A. Egido, S. Paloscia, E. Motte, L. Guerriero, N. Pierdicca, M. Caparrini, E. Santi, G. Fontanelli, N. Floury, "Airborne GNSS-R Polarimetric Measurements for Soil Moisture and Above-Ground Biomass Estimation", *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2014, 7, 1522–1532.
- [9] Darrozes, J., Roussel, N., M. Zribi, "The reflected global navigation satellite system (GNSS-R) : from theory to practice", Chapitre book: Baghdadi N. et Zribi M. (eds), *Microwave Remote Sensing of Land Surfaces, Techniques and methods*, ISTE Press, London and Elsevier, Oxford, 2016. ISBN : 978178548159.
- [10] LARSON K.M., SMALL E.E., GUTMANN E., BILICH A., BRAUN J., « Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, L24405, doi:10.1029/2008GL036013, 2008
- [12] E. Motte, M. Zribi, P. Fanise, J. Darrozes, A. Egido, N. Baghdadi, F. Baup, F. Frappart, P. L. Frison, D. Guyon, T. Perrin, J. P. Wigneron, "GLORI: A GNSS-R dual polarization Airborne Instrument for Soil Moisture and Vegetation Monitoring", *sensors*, 2016, 16, 732; doi:10.3390/s16050732.