

# **Détermination de la cohérence de phase des signaux de réflectométrie GNSS pour l'étude du taux d'humidité des sols / Determination of the coherence of GNSS Reflectometry carrier-phase signals for soil moisture detection**

## **Résumé :**

La réflectométrie GNSS (GNSSR) est une technique radar bi-statique utilisant les signaux émis par les satellites de géopositionnement pour l'observation de la Terre. L'équipe encadrante de cette thèse s'intéresse depuis 2018 à l'observation GNSSR aéroportée du taux d'humidité des sols, avec des applications en gestion de l'eau et agriculture, ainsi que de l'état de mer. Elle collabore, en vue de définir un capteur capable de fournir une mesure absolue de ces paramètres, avec les centres nationaux Allemands de géoscience (GFZ) et d'aéronautique et astronautique (DLR), le centre de télédétection CNRS Libanais (CNRSL) ainsi que l'entreprise toulousaine Syntony.

L'objectif de cette thèse est d'inclure, en plus de la mesure de puissance des signaux déjà utilisée dans les travaux actuels pour détecter les différents types de surface observées, les informations de cohérence de phase des signaux pour la détermination du taux d'humidité des sols observés. La perte de cohérence de phase des signaux GNSSR est en effet liée à la rugosité des sols ainsi qu'à la profondeur de pénétration du signal dans ces sols, dont la détermination est indispensable pour isoler l'influence du taux d'humidité des sols sur les signaux GNSSR. L'équipe encadrante dispose pour cela d'une expertise de plus de 10 ans dans l'estimation de la phase des signaux GNSS. La thèse fera également l'objet de travaux en fusion d'informations entre le capteur GNSSR développé et un capteur d'imagerie radar optique pour une meilleure spatialisaiton des mesures obtenues.

## **Abstract:**

GNSS reflectometry (GNSSR) is a bi-static radar technique using signals emitted by geo-positioning satellites for Earth observation. The team supervising this PhD has been interested since 2018 in airborne GNSSR observation of soil moisture, with applications in water management and agriculture, and sea state. It collaborates, in order to define a sensor capable of providing an absolute measurement of these parameters, with the German National Centers for Geoscience (GFZ) and Aeronautics and Astronautics (DLR), the Lebanese CNRS Remote Sensing Center (CNRSL) and the company Syntony.

The objective of this thesis is to include, in addition to the measurement of signal power that is already used for differentiating the types of observed surfaces, the received signals phase coherence information for determining the observed soil moisture content. The GNSSR carrier-phase coherence is indeed linked to the roughness of the soils as well as to the penetration depth of the signal in these soils, whose determination is essential to isolate the influence of the soil moisture content on the GNSSR signals. In this context, the supervising team has more than 10 years of expertise in the estimation of the phase of GNSS signals. The thesis will also focus on information fusion between the developed GNSSR sensor and an optical radar imaging sensor for a better spatialization of the obtained measurements.

## **Encadrement :**

- Serge Reboul, Pr, ULCO, LISIC
- Georges Stienne, MCF, ULCO, LISIC

## **Dates :**

Octobre 2022 à Octobre 2025.

## **Candidature :**

Envoyer CV et lettre de motivation à [georges.stienne@univ-littoral.fr](mailto:georges.stienne@univ-littoral.fr) avant le 20 mars 2022.

## Projet détaillé :

La mesure du taux d'humidité des sols joue un rôle important dans la gestion de la ressource en eau, avec application par exemple à la planification de l'irrigation des cultures. La mesure du taux d'humidité des sols est également un paramètre important pour le suivi de l'évolution du changement climatique, elle est notamment utilisée pour la prévention des inondations et sécheresses. Cette mesure s'effectue généralement depuis le sol (sondes, prélèvements...) ou depuis l'espace par télédétection, suivant les objectifs visés en termes de résolution spatiale des mesures. Par télédétection, la bande fréquentielle préférentielle pour la mesure du taux d'humidité des sols est la bande L, qui est utilisée en particulier par les missions satellitaires de l'ESA et de la NASA (satellites d'observation SMOS et SMAP, respectivement).

La réflectométrie GNSS (GNSS-R) est un système d'observation de la Terre radar bi-statique qui utilise la comparaison des signaux de géo positionnement par satellites GNSS provenant de l'espace avec les signaux GNSS réfléchis par la Terre. Comme les signaux utilisés par SMOS et SMAP, les signaux GNSS sont des signaux émis en bande L, ce qui en fait des signaux de choix pour la mesure de taux d'humidité des sols. Cependant, à l'avantage de SMOS et SMAP qui présentent des temps de revisite de plusieurs jours, la couverture des systèmes GNSS permet une observation globale de la Terre, à tout instant.

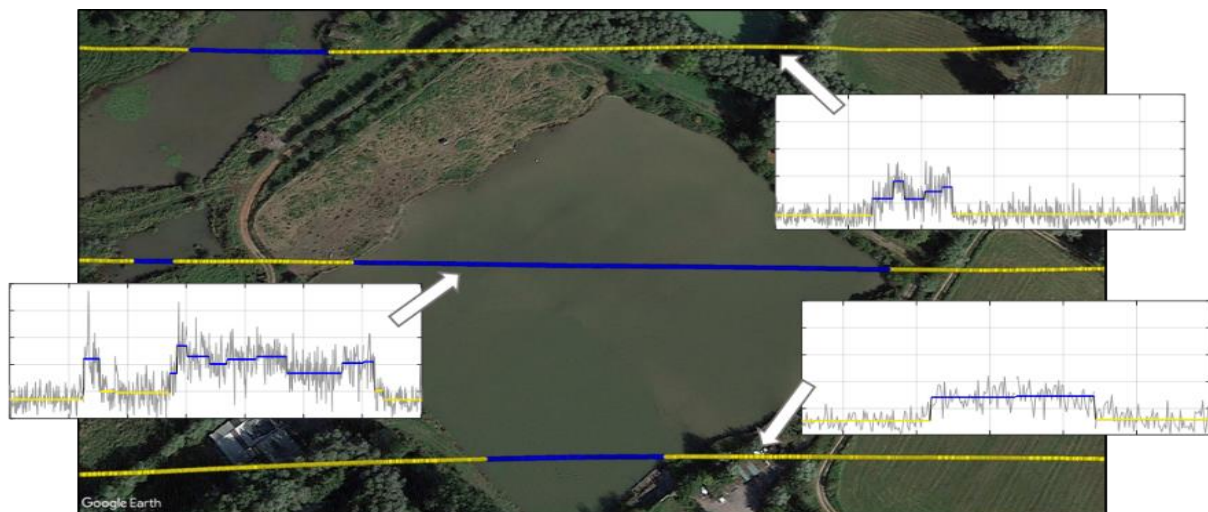
La réflectométrie GNSS est actuellement utilisée pour l'observation de la Terre dans trois contextes : satellitaire, aéroporté et au sol. La hauteur à laquelle évolue un capteur GNSS-R définit à la fois la résolution spatiale et, associée à la vitesse du porteur, les capacités de couverture de ses observations. Par exemple, un capteur GNSS-R proche du sol (<10m) fournira des informations avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre carré ou moins tandis que pour un capteur GNSS-R aéroporté à basse altitude (<1km), la résolution pourra varier de la dizaine de mètres carrés au kilomètre carré. La résolution temporelle dépendra du temps d'intégration utilisé pour augmenter le rapport signal sur bruit des signaux, particulièrement faible pour des signaux GNSS s'étant réfléchis sur la surface terrestre. La réflectométrie GNSS permet une résolution temporelle allant théoriquement jusqu'à la milliseconde, nettement meilleure que la résolution temporelle des radars satellites. La haute résolution temporelle, la résolution et couverture spatiale variable, la disponibilité globale et permanente des signaux GNSS ainsi que leur caractère radar bi-statique font des capteurs GNSSR des capteurs flexibles et économiques.

La réflectométrie GNSS trouve ses applications dans tous les domaines de l'observation de la Terre par télédétection : altimétrie, étude du taux d'humidité des sols, de la biomasse, de l'état et de la salinité des océans, étude de la cryosphère... Le capteur GNSSR en cours de développement au sein de l'équipe SPECIFI du LISIC peut être appliqué à chacun de ces domaines et a été appliqué à plusieurs d'entre eux ces dernières années (altimétrie [1], étude des sols [2,3], état de mer [4]), mais sera spécifiquement perfectionné pour l'étude du taux d'humidité des sols dans le cadre de cette thèse.

Dans son état actuel, le capteur GNSSR du LISIC permet déjà de détecter un grand nombre de surfaces différentes. On montre dans les travaux de la thèse de Hamza ISSA que l'on détecte notamment les plans d'eau et rivières et que on les localise avec une grande précision depuis un autogire [2,3]. Pour atteindre l'objectif de détermination absolue du taux d'humidité des sols, il est nécessaire d'une part d'augmenter la précision des mesures de réflectivité fournies par le capteur, et d'autre part de définir et observer des indicateurs de la rugosité et du type des sols scannés. La réflectivité d'une surface est le ratio entre la puissance du signal GNSS s'y réfléchissant et la puissance du signal GNSS arrivant directement au capteur depuis le satellite. Les travaux d'estimation au sein de l'équipe encadrante dans ce cadre sont originaux [5]. Sur un sol de constitution sédimentaire constante, la puissance de réflexion et donc la réflectivité augmentera avec le taux d'humidité du sol. L'équipe qui encadrera cette thèse travaille actuellement avec l'entreprise toulousaine Syntony, spécialiste en solutions GNSS matérielles et logicielles, pour la mise en œuvre d'un récepteur génie logiciel qui permettra de fusionner les informations issues des signaux GPS en bandes L1 et L5 pour obtenir une mesure plus précise de la réflectivité des surfaces observées. L'utilisation de deux bandes fréquentielles permettra également une différenciation de l'impact de l'humidité sur la réflectivité des effets liés à la constitution sédimentaire

du sol. La collaboration avec l'entreprise Syntony concerne également l'équipement matériel depuis une dizaine d'année et le design en partenariat de plusieurs récepteurs spécifiques pour la réflectométrie GNSS. Cette collaboration a en particulier fait l'objet du 2<sup>e</sup> prix FIEEC pour la recherche appliquée en 2017. Enfin, l'achat par l'équipe encadrante d'une antenne à polarisation circulaire gauche en bandes L1/L5 fin 2021, qui complète le panel d'antennes déjà disponibles (en particulier une antenne à polarisation circulaire droite classique en bandes L1/L5), permettra également de maximiser la qualité des signaux de réflectométrie observés durant les expérimentations du LISIC.

Concernant la rugosité des sols scannés mais aussi leur constitution sédimentaire, un observable ayant fait l'objet d'études récentes est la cohérence de la réflexion, qui peut être déterminée en particulier à travers la phase des signaux GNSSR [6,7]. Sur un sol rugueux ou poreux (taux élevé de pénétration des signaux), un signal GNSS se réfléchira de façon multiple en plusieurs points dans le plan horizontal (rugosité) ou vertical (porosité). Le capteur GNSSR recevra ainsi un signal global composé de chacune de ces réflexions, dont les phases seront différentes. La phase des signaux GNSSR est effectivement très sensible à la distance de trajet des signaux (pour GPS L1, l'intervalle  $[-\pi ; \pi]$  de définition de la phase est parcouru en 19cm environ). Le signal global est ainsi fortement perturbé lorsque le sol est particulièrement rugueux ou lorsque sa composition le rend poreux aux signaux GNSS, et sa phase devient incohérente. L'équipe encadrante de la thèse dispose d'une expertise importante dans le traitement de la phase des signaux GNSS, qu'elle aborde de manière originale à travers une représentation statistique circulaire des signaux [8,9]. La phase est effectivement un angle mesuré dans l'intervalle  $[-\pi ; \pi]$  et ne peut pas être traitée directement avec les outils de traitement du signal classiquement définis pour des variables définies sur l'ensemble des réels. Les travaux de recherche en traitement du signal prévus dans cette thèse se feront donc dans le domaine circulaire et plus particulièrement en détection de rupture de cohérence et en fusion d'informations, dans le contexte de cette détection, des phases des signaux GPS L1 et L5. Le détecteur de rupture circulaire de cohérence de phase incluant la fusion d'informations sera un apport théorique original de la thèse, qui pourra faire l'objet d'un article en revue en traitement du signal, de même que son application à l'étude des sols par réflectométrie GNSS, qui pourra faire l'objet d'un article en revue en télédétection.



*Résultats actuels de détection et localisation automatique de plans d'eau par GNSSR aéroporté : les graphiques représentent la réflectivité obtenue pour 3 traces satellitaires et leur segmentation automatique, les données sont projetées automatiquement sur une carte Google Earth pour comparaison.*

Par ailleurs, un second objectif de cette thèse sera la fusion d'informations issues du capteur GNSSR déjà existant et qui aura été perfectionné (Collaboration avec Syntony) et d'un imageur optique. En effet le capteur GNSS-R fournit une petite dizaine de traces radar au sol qui sont espacés de plusieurs dizaines de mètres. Les observations radar sont précises, robustes car elles dépendent peu des conditions de propagation et sensibles car elles permettent de différencier les différentes surfaces de réflexion. Notre objectif est de coupler cette information avec de l'imagerie optique pour la visualiser sur l'ensemble de

l'image et ainsi spatialiser l'information. Ce domaine d'étude a fait l'objet de travaux récents [10]. Les travaux dans ce contexte pourront également faire l'objet d'un article en revue.

Le site atelier sur lequel nous travaillons depuis 2018 est la région audomaroise. Dans ce contexte les applications visées concernent la gestion de l'eau et la surveillance de la croissance des cultures. Pour la gestion de l'eau les travaux actuels montrent que l'on peut localiser et détecter l'ensemble des zones humides sur la trajectoire de notre porteur aéroporté. On montre Figure 1 un exemple de détection et localisation de surfaces en eau par notre capteur GNSSR aéroporté. En plus de l'application d'étude du taux d'humidité des sols, qui est un paramètre hautement lié aux capacités d'absorption des sols et donc aux risques d'inondation, une des applications possibles de la thèse sera de pouvoir utiliser la phase du signal pour estimer les hauteurs d'eau, directement liées à ce même objectif de contrôle des risques d'inondation mais aussi de sécheresse. Pour cet objectif, un intérêt majeur de l'approche proposée comparé à l'imagerie satellitaire est que la mesure peut se faire à n'importe quel moment car il n'y a pas de temps de revisite. Concernant la surveillance en agriculture notre objectif sera de montrer que l'on peut détecter les différentes zones cultivées et observer l'évolution de la croissance des cultures.

Cette thèse fera également l'objet de campagnes expérimentales aéroportées à la verticale des zones humides de l'Audomarois. Le LISIC dispose déjà dans ce cadre de la collaboration avec l'entreprise Cap Aviateur, basée à Marck, qui réalisera les vols et accompagnera l'instrumentation de son autogire. Une dizaine de vols expérimentaux GNSSR ont déjà été réalisés par cette entreprise pour le LISIC ainsi que dans le cadre de la collaboration entre le GFZ et le LISIC. Cette entreprise affiche maintenant dans ses activités la mesure scientifique. L'instrumentation de l'autogire, incluant actuellement un capteur drone pour la détermination de la position et de l'attitude de l'autogire en plus du capteur GNSSR, sera modifiée pour inclure l'imageur optique. Les campagnes expérimentales réalisées pourront servir aux différents projets menés par l'équipe en réflectométrie GNSS, en collaboration avec le GFZ, le DLR, le CNRS, dont les appuis se trouvent dans les applications en géosciences dont le LISIC n'est pas spécialiste (relations et modèles liant les observables GNSSR et le taux d'humidité des sols [2,3] et l'état de mer [4], en particulier), et l'entreprise Syntony.

### **Echéancier de travail :**

- formation du doctorant en traitement des signaux GPS L1 et L5 : octobre 2022 à janvier 2023.
- bibliographie et formation du doctorant sur la réflectométrie GNSS des sols, la cohérence de phase, la détection de rupture et la fusion d'informations : octobre 2022 à juin 2023
- traitement de la phase GNSSR L1/L5, développement du détecteur de rupture de cohérence avec fusion d'informations : mai à octobre 2023
- campagne GNSSR aéroportée incluant le capteur complet L1/L5 : juin-juillet 2023
- traitement des données GNSSR recueillies : septembre à décembre 2023
- rédaction de l'article sur la détection de rupture de cohérence : novembre-décembre 2023
- application des mesures et des résultats de détection à l'étude des sols : janvier à juin 2024
- location du capteur imageur radar optique, instrumentation et nouvelle campagne de mesures aéroportées : juin-juillet 2024
- rédaction de l'article sur l'application des outils et mesures obtenues à l'étude des sols : septembre-octobre 2024
- traitement des nouvelles données et fusion d'informations GNSSR et imageur radar optique : novembre 2024 à mai 2025
- rédaction de l'article sur la fusion d'informations GNSSR et imageur radar optique : juin-juillet 2025
- rédaction de la thèse au printemps 2025 pour une soutenance en automne
- les travaux de recherche feront également l'objet de présentations dans les conférences nationales et internationales ciblées par l'équipe encadrante depuis plusieurs années suivant leurs placements dans le calendrier

## Références :

- [1] Kucwaj, J. C., Reboul, S., Stienne, G., Choquel, J. B., & Benjelloun, M. (2017). Circular regression applied to GNSS-R phase altimetry. *Remote Sensing*, 9(7), 651.
- [2] Issa, H., Stienne, G., Reboul, S., Raad, M., & Faour, G. (2022). Airborne GNSS Reflectometry for Water Body Detection. *Remote Sensing*, 14(1), 163.
- [3] Issa, H., Stienne, G., Reboul, S., Raad, M., & Faour, G. (2021, September). High-Rate GNSS Reflectometry for Water Body Detection Using Low Altitude Airborne Carrier. In *2021 IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+ R)* (pp. 9-12). IEEE.
- [4] Moreno, M., Semmling, M., Stienne, G., Dalil, W., Hoque, M. M., Wickert, J., & Reboul, S. (2021, September). Coastal monitoring of sea state using airborne GNSS reflectometry. In *2021 IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+ R)*. IEEE.
- [5] Issa, H., Stienne, G., Reboul, S., Semmling, M., Raad, M., Faour, G., & Wickert, J. (2021). A probabilistic model for on-line estimation of the GNSS carrier-to-noise ratio. *Signal Processing*, 183, 107992.
- [6] Collett, I., Wang, Y., Shah, R., & Morton, Y. J. (2021). Phase Coherence of GPS Signal Land Reflections and Its Dependence on Surface Characteristics. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- [7] Balakhder, A. M., Al-Khaldi, M. M., & Johnson, J. T. (2019). On the coherency of ocean and land surface specular scattering for GNSS-R and signals of opportunity systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(12), 10426-10436.
- [8] Stienne, G., Reboul, S., Choquel, J. B., & Benjelloun, M. (2014). Cycle slip detection and repair with a circular on-line change-point detector. *Signal processing*, 100, 51-63.
- [9] Kouassi, H. K. W., Issa, H., Stienne, G., & Reboul, S. (2021). A linear-circular regression estimate for data fusion: Application to gnss carrier-phase signal processing. *Digital Signal Processing*, 117, 103172.
- [10] Munoz-Martin, J. F., & Camps, A. (2021). Sea Surface Salinity and Wind Speed Retrievals Using GNSS-R and L-Band Microwave Radiometry Data from FMPL-2 Onboard the FSSCat Mission. *Remote Sensing*, 13(16), 3224.