



**DOSSIER DE CANDIDATURE
POUR THESE EN COTUTELLE
POUR LA RENTREE 2021
FINANCEMENT : BOURSE**

Dossier complété et revêtu des signatures à transmettre impérativement pour le :
26 mars 2021 au plus tard,

A la Direction de la Recherche et Valorisation
secretariat.recherche@univ-littoral.fr

Titre de la thèse : Réflectométrie GNSS aéroporté pour l'estimation du taux d'humidité des sols.

Laboratoire d'accueil ULCO : LISIC

Directeur de thèse ULCO : REBOUL Serge

Si nouveau partenariat (absent ci-dessous) merci de nous indiquer l'université d'origine, le directeur de thèse, le laboratoire, ainsi que les conditions de financement du doctorant dans le pays d'origine

☐ LIBAN - Université Libanaise (2 financements)

Pour ce dispositif, merci d'indiquer en plus :

- le nom du codirecteur étranger et le laboratoire partenaire

- Thématique :

- (1) La qualité de l'air
- (2) Le milieu aquatique
- (3) L'obésité, la nutrition et les activités sportives,
- (4) Les énergies propres et renouvelables
- (5) La gestion et le traitement des déchets
- (6) L'urbanisme

■ LIBAN - CNRS Libanais (4 financements)

Pour ce dispositif, merci d'indiquer en plus :

- le nom du codirecteur étranger et le laboratoire partenaire : **Ghaleb FAOUR , Centre National de Télédétection (NCRS)**

- Thématique : (6)

- (1) La qualité de l'air
- (2) Le milieu aquatique
- (3) L'obésité, la nutrition et les activités sportives



- (4) Les énergies propres et renouvelables
- (5) La gestion et le traitement des déchets
- (6) L'urbanisme

□ **ALGERIE - Université Badji Mokhtar d'Annaba (UBMA) (2 financements)**

- Thématique :

- (1) La gestion et le traitement des déchets,
- (2) L'aménagement littoral et portuaire,
- (3) Le milieu aquatique,
- (4) La surveillance et la gestion durable des Infrastructures.

□ **MAROC - Université Hassan II / HESTIM (UH2C) (4 financements)**

- Thématique :

- (1) Economie Gestion
- (2) Sciences et Technologies

□ **MAROC - Université Mohammed V (4 financements)**

- Thématique :

- (1) Environnement, Milieux Littoraux Marins
- (2) Sciences et technologie
- (3) Santé
- (4) Sciences Humaines et Sociales

*** LABORATOIRE D'ACCUEIL**

Nom du laboratoire d'accueil : LISIC

Nombre de HDR dans le laboratoire : 18

Nombre de thèses encadrées dans le laboratoire (rentrée 2020) : 25

Cotutelles en cours au sein du laboratoire : 12

Durée moyenne des thèses soutenues dans le laboratoire, sur la période 2015-2020 : 3,4

ENCADREMENT



Nom, Prénom du directeur de laboratoire : VEREL Sébastien

Nom, Prénom du directeur de thèse (si différent du directeur de laboratoire) : REBOUL Serge

Nombre de doctorats en préparation sous la direction du directeur de thèse : 2

Avis détaillé du directeur de thèse :

Le sujet proposé est important car il doit permettre à terme de proposer un système complet d'observation aéroporté de l'état hydrique des sols et du niveau de remplissage des lacs et rivières. Il est novateur car il utilise la réflectométrie GNSS en bandes L1 et L5 et la trajectographie du porteur pour enrichir les observations des surfaces de réflexion. Il est équilibré parce qu'il s'appuie sur une collaboration entre le Centre National de Télédétection du CNRS, qui a l'expertise sur le traitement des données pré-traitées, et le LISIC de l'ULCO qui a l'expertise sur le capteur utilisé et le traitement des signaux GPS bruts.

De plus nous avons trouvé un étudiant très motivé pour travailler sur ce sujet. Monsieur Wassim Kabbout est un étudiant de l'université « Lebanese International University (LIU) ». Il a fait un master "in computer and communication engineering" de 2016 à 2018 qu'il a réussi avec succès (18,25/20). Il est ingénieur réseau depuis avril 2017. Sa formation est principalement dans le domaine du traitement du signal, des réseaux et télécommunications. Nous donnons un avis très favorable à cette candidature pour deux raisons : la formation de Monsieur Wassim Kabbout est en parfaite adéquation avec le sujet de thèse et son expérience professionnelle apportera une vision pragmatique dans le développement de l'application associée au système d'observation aéroporté.

Signature du directeur de thèse

Reboul

Avis détaillé du directeur de laboratoire :

Le sujet de thèse étend à une nouvelle utilisation les travaux de l'équipe Spécifi reconnu au niveau international pour les travaux sur le traitement des signaux GNSS. Ce travail propose une avancée majeure qui permettrait d'augmenter la visibilité de cette approche portée depuis de nombreuses années par l'équipe. De plus, les travaux s'inscrivent parfaitement dans les thématiques du laboratoire d'observation et d'estimation de grandeurs issues du milieu naturel. La collaboration entre les deux



universités a déjà été fructueuse sur des sujets connexes, et la combinaison des compétences sur ce projet est encore prometteuse. Pour toutes ces raisons, j'émet un avis favorable à ce projet de thèse.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Amis', is written over a horizontal line.

Signature du directeur de laboratoire

PROJET DE THESE

Intitulé du projet de thèse :

Réflectométrie GNSS aéroportée pour l'estimation du taux d'humidité des sols.

Domaine scientifique :

Observation de la terre, Estimation du taux d'humidité des sols, Traitement du signal

Résumé (1/2 page maxi.) :

La mesure du taux d'humidité des sols joue un rôle important dans la gestion de la ressource en eau comme la planification de l'irrigation des cultures et l'estimation de leurs rendements. La mesure du taux d'humidité des sols est aussi un paramètre important pour le suivi de l'évolution du changement climatique, elle est notamment utilisée pour la prévision des inondations. La réflectométrie GNSSR est un système d'observation de la terre, RADAR bi-statique, qui utilise la comparaison des signaux GNSS qui arrivent de l'espace avec les signaux GNSS réfléchis par la terre. L'objectif de cette thèse est de montrer les capacités de la réflectométrie GNSS aéroportée pour la mesure du taux d'humidité des sols.

Dans notre approche le porteur du capteur GNSSR est un autogire qui vole à une faible hauteur (500 m) et avec une faible vitesse (100 Km/h). Dans ce contexte les empreintes au sol du signal radar réfléchi sont de taille réduite (10 m²) et se déplacent à une vitesse similaire au porteur (20 m/s). Le capteur GNSSR utilise le signal GPS en bandes L1 et L5, ce qui permet d'obtenir une mesure simultanée de la réflectivité des surfaces observées toutes les 20 millisecondes et pour l'ensemble des satellites GPS en vue. Les résolutions temporelle et spatiale ainsi obtenues sont beaucoup plus précises que celles des techniques satellitaires RADAR classiques. La datation et le géo référencement des empreintes radar au sol sont obtenus avec une grande précision dans le temps UTC (Universal Time Coordinate) et dans le repère ECEF (Repère GPS global Earth-Centered, Earth-Fixed). Ce système, qui est unique, permet d'observer avec précision le taux d'humidité des sols sur une trajectoire de l'ordre de 100 Km.

L'objectif de ce travail de thèse est de réaliser l'étude et la mise en œuvre de l'ensemble des traitements et outils logiciels pour construire des cartes de grande précision pour la



représentation du taux d'humidité des sols. On étudiera l'apport de la puissance et de la phase des signaux GNSS obtenus en bandes L1 et L5 pour l'estimation du taux d'humidité.

Projet de thèse (5 pages maxi.) :

Développer sur cinq pages :

1. Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique

Les ondes électromagnétiques émises par le sol dans la bande L (1-3 GHz) dépendent principalement du taux d'humidité. Cette émission est mesurée par les antennes des satellites d'observations de la terre SMOS pour l'ESA et SMAP pour la NASA. Ces deux agences fournissent des cartes mondiales du taux d'humidité des sols avec une fréquence de revisite de deux à trois jours et une résolution de 50 Km. Il existe un grand nombre d'expérimentations aéroportées qui ont permis de concevoir les capteurs des satellites et qui ont montré que la mesure du taux d'humidité peut être obtenue avec précision si on utilise plusieurs fréquences et plusieurs angles d'observations. La réflectométrie GNSS qui consiste à observer les signaux GNSS en bande L réfléchis par le sol a aussi fait l'objet d'un grand nombre d'études. Elles ont montré sa capacité à mesurer le taux d'humidité du sol à partir de campagnes de mesures aéroportées et satellitaires. L'avantage d'une telle méthode est que l'on dispose à tout instant d'un ensemble de points de mesures fournies par les réflexions des signaux des satellites GNSS en vue. Dans notre approche on souhaite réaliser un système aéroporté qui mesure le taux d'humidité des sols par réflectométrie GNSS, facilement déployable et fournissant des mesures avec une grande résolution spatiale et temporelle.

Dans ce travail de thèse, on utilise les mesures de réflectométrie GNSS obtenues depuis un autogire soit à une échelle nouvelle pour l'estimation du taux d'humidité des sols. On distingue alors trois objectifs qui sont l'analyse des données, le traitement du signal GNSS et la trajectographie. Pour l'analyse des données on souhaite réaliser un produit logiciel qui pourra classer les différentes surfaces au sol survolées à partir des observations des signaux GNSS. On souhaite aussi obtenir le taux d'humidité des sols associé à chaque classe à partir d'un protocole de calibration du capteur associé à un algorithme d'apprentissage. Pour le traitement du signal on souhaite profiter des capacités multi-fréquences des satellites GNSS en utilisant les fréquences L1 et L5 du signal GPS. De plus on étudiera l'apport des mesures de phase du signal GNSS pour l'estimation de la rugosité de la surface de réflexion. Enfin on étudiera, en modifiant la trajectoire du porteur, les solutions qui permettront une diminution du temps de revisite et la mesure du taux d'humidité avec différentes incidences de réflexion. L'impact de ce travail de thèse est de montrer que l'on peut estimer, géolocaliser et dater le taux d'humidité des sols avec une précision supérieure aux systèmes existants. Il est aussi de proposer de nouveaux traitements multi porteuses et d'évaluer l'utilisation du signal GPS sur plusieurs bandes.

2. L'état du sujet dans le laboratoire et l'équipe d'accueil

L'équipe Specifi du laboratoire LISIC travaille dans le domaine de la réflectométrie GNSS depuis 2015 et dans le domaine du traitement des signaux GNSS depuis 2010. Elle a



développé en collaboration avec l'entreprise Syntony un capteur original de réflectométrie GNSS multivoies et multi bandes. Les travaux qui ont été réalisés au LISIC dans le domaine de l'altimétrie par GNSS ont permis d'obtenir des mesures avec une précision centimétrique [2,3]. Les travaux qui ont été réalisés au LISIC dans le domaine de l'estimation du taux d'humidité des sols ont montré une bonne adéquation entre les mesures terrain et les mesures obtenues par réflectométrie GNSS depuis le sol [6,7,9,10]. Dans le cadre de la collaboration entre le CNRSL et le LISIC, l'équipe Specifi a réalisé un système d'observation GNSS aéroporté ayant une grande résolution spatiotemporelle [1,4,5,8].

📌 Le programme et l'échéancier de travail

Les trois ans de thèse se dérouleront pour moitié au Liban et pour moitié en France. Il est important que l'étudiant soit présent en France d'avril à juin car c'est à cette époque plus clémente en termes de climat que l'on pourra y réaliser des expérimentations. Nous proposons donc, pour une thèse qui débiterait en octobre, que les trois premiers mois se déroulent au Liban puis par périodes de six mois l'étudiant alternera sa présence entre la France et le Liban.

Le programme de recherche se décline en deux étapes. On réalisera dans une première étape la classification des données pour l'estimation du taux d'humidité des sols. On s'appuiera pour cela sur des données déjà obtenues pour différentes trajectoires et sur l'étalonnage du système à partir de données terrain. La deuxième étape du programme de recherche consiste à montrer l'apport de l'utilisation conjointe des fréquences GNSS L1 et L5 pour l'estimation du taux d'humidité des sols. On développera pour cela de nouveaux algorithmes de traitement des signaux GNSS multi-porteuses pour les signaux réfléchis et la classification des données qui intègre les nouvelles informations dont on disposera. La partie expérimentale et le traitement des signaux GNSS seront réalisés en France, l'analyse et le traitement des données au Liban. En effet le laboratoire LISIC dispose de l'expertise concernant le capteur GNSS qu'il a réalisé et le traitement des signaux GPS. De plus la zone d'étude est le Littoral de la Manche proche de Calais et l'arrière-pays entre Calais et Saint Omer qui offre une grande variété de surfaces de réflexions : cultures agricoles, étangs, rivières, bois, routes, plages à marées, Le traitement des données qui comprend l'estimation du taux d'humidité des sols et sa représentation dans un SIG en vue de construire des cartes d'observations sera réalisé au Centre National de Télédétection du CNRSL, qui en a l'expertise.

📌 Les retombées scientifiques et économiques attendues

Le système proposé pourra être appliqué au domaine de l'agriculture. Il permettra de suivre l'évolution des plantations comme la croissance de la végétation et l'état hydrique des terres agricoles. Son avantage réside dans sa précision (liée à la surface réduite de l'empreinte au sol du signal radar) qui permettra d'observer des champs de petite taille et donc d'observer une plus grande variété de plantations. La surveillance des rivières, des étangs, et des lacs pour la prévention des inondations pourra aussi être réalisée avec le système proposé. En effet les traces au sol des empreintes de réflexion GNSS sont identiques pour une trajectoire d'autogire répétées à la même heure sur plusieurs journées. Dans ce cas, en comparant le signal GNSS réfléchi obtenu sur plusieurs jours on peut estimer l'évolution de la taille des



rivières et des lacs. Le système proposé permettra aussi le suivi de l'évolution des plages à marées. En effet les réflexions sur le sable nous informent sur l'évolution de la plage et sur sa composition : présence de sable, de vasières, de végétation et de galets. Le système que l'on souhaite mettre en œuvre est innovant car il utilise le signal GNSS sur les bandes L1 et L5. Il est aussi innovant car il utilise la trajectoire de l'autogire pour diminuer le temps de revisite et pour disposer de mesures prises avec plusieurs incidences.

🔗 Les collaborations prévues et une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet

Le Centre National de Télédétection (NCRS) du CNRS-L et le LISIC de l'ULCO collaborent sur la mise en œuvre d'un capteur GNSSR aéroporté pour l'altimétrie et la mesure du taux d'humidité des sols. Dans ce projet, la thèse de Hamza Issa, qui sera soutenue en octobre 2021, a été co-financée par le CNRS-L et l'ULCO. Le sujet de cette thèse était notamment la mise en œuvre du capteur GNSSR aéroporté par un autogire. L'objectif de cette nouvelle thèse co-financée par le CNRS-L et l'ULCO est de réaliser l'étude et la mise en œuvre de l'estimation du taux d'humidité des sols à partir des observations GNSSR.

-----Publications dans le domaine des GNSSR-----

- H. ISSA, G. STIENNE, S. REBOUL, M. SEMMLING, M. RAAD, G. FAOUR, J. WICKERT, A probabilistic model for on-line estimation of the GNSS carrier-to-noise ratio, Signal Processing, Volume 183, 2021. Article réalisé en collaboration avec le GFZ et le CNRS-L.
- M. SEMMLING, A. RÖSEL, D. DIVINE S. GERLAND, G. STIENNE, S. REBOUL, M. LUDWIG, J. WICKERT, H. SCHUH, Sea-Ice Concentration Derived From GNSS Reflection Measurements in Fram Strait, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 57, no. 12, pp. 10350-10361, Dec. 2019. Article réalisé en collaboration avec le GFZ.
- J-C KUCWAJ, S. REBOUL, G. STIENNE, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Circular Regression Applied to GNSS-R Phase Altimetry, Remote Sensing. 2017; 9(7):651
- J-C KUCWAJ, G. STIENNE, S. REBOUL, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Accurate pseudo-range estimation by means of code and phase delay integration: Application to GNSS-R Altimetry, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS), 9(10), pp. 4854-4864, 2016.
- M.A. RIBOT, J-C KUCWAJ, C. BOTTERON, S. REBOUL, G. STIENNE, J. LECLERE, J.-B. CHOQUEL, P.-A. FARINE, M. BENJELLOUN, Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry, Sensors, 14, pp. 10234-10257, 2014. Article réalisé en collaboration avec l'EPFL.

-----Publications dans le domaine du traitement des signaux GPS-----

- G. STIENNE, S. REBOUL, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Cycle Slip Detection and Repair with a Circular On-Line Change-Point Detector, Signal Processing, 100, pp. 51-63, 2014.
- G. STIENNE, S. REBOUL, M. AZMANI, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, GNSS dataless signal tracking with a delay semi-open loop and a phase open loop, Signal Processing, 93(5), pp.1192-1209, 2013.



Bibliographie

- [1] H. ISSA, G. STIENNE, S. REBOUL, M. SEMMLING, M. RAAD, G. FAOUR, J. WICKERT, A probabilistic model for on-line estimation of the GNSS carrier-to-noise ratio, Signal Processing, Volume 183, 2021.
- [2] J-C KUCWAJ, S. REBOUL, G. STIENNE, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Circular Regression Applied to GNSS-R Phase Altimetry, Remote Sensing. 2017; 9(7):651
- [3] J-C KUCWAJ, G. STIENNE, S. REBOUL, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Accurate pseudo-range estimation by means of code and phase delay integration : Application to GNSS-R Altimetry, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS), 9(10), pp. 4854-4864, 2016.
- [4] H. ISSA, G. STIENNE, S. REBOUL, M. SEMMLING, M. RAAD, G. FAOUR, AND J. WICKERT, High-rate GNSS Reflectometry Estimates for Airborne Soil-moisture Detection, EGU General Assembly, Session G5.2 – Atmospheric and Environmental Monitoring with Space-Geodetic Techniques, EGU21-11577, Online. April 2021.
- [5] H. ISSA, G. STIENNE, S. REBOUL, M. SEMMLING, M. RAAD, G. FAOUR, AND J. WICKERT, Airborne Experiment for Soil Moisture Retrieval using GNSS Reflectometry, EGU General Assembly, Session G5.2 – Atmospheric and Environmental Monitoring with Space-Geodetic Techniques, EGU2020-16032.
- [6] SEMMLING, M.; STIENNE, G.; GONTHARET, S.; GERLAND, S.; REBOUL, S. AND WICKERT, J.: "Estimation of Soil Moisture and Sea Ice Concentration – A GNSS Reflectometry Concept", EGU General Assembly, 2019, 21, EGU2019-4521.
- [7] SEMMLING M., G. STIENNE, S. GONTHARET, S. GERLAND, S. REBOUL AND J. WICKERT, "Estimation of Soil Moisture and Sea Ice Concentration - A GNSS Reflectometry Concept", IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+R), May 2019, Benevento, Italy.
- [8] W. KOUASSI, G. STIENNE, M. SEMMLING, J.C. KUCWAJ, S. REBOUL AND J. WICKERT, "A GNSS-R multicopter UAV platform for soil moisture detection and altimetry", IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+R), May 2019, Benevento, Italy.
- [9] G. STIENNE, J.-C. KUCWAJ, M. SEMMLING, S. REBOUL, GNSS signals inversion for amplitude estimation: a concept for high-rate reflectometry, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) 2018, Cartagena de Indias, Colombia, Sept. 10-14, 2018.
- [10] M. AZMANI, S. REBOUL, J.B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN " Soil Moisture Estimation using Land-reflected GPS L2C Bi-static Radar Measurements ", Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the institute of Navigation, (ION GNSS 2010), Portland, September 2010.