Estimation bayésienne circulaire des paramètres de l'Excess phase obtenue par réflectométrie GNSS: Application à la caractérisation et la surveillance des étendues d'eau comme les lacs et la mer.

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. Dans cette thèse on souhaite s'intéresser à l'observation GNSSR du taux d'humidité des sols, avec des applications en gestion de l'eau et agriculture, ainsi que de l'état de mer. Le but de la collaboration entre l'Université Libanaise (UL) et l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO) est de partager nos connaissances dans les domaines des télécommunications et de l'observation Radar en ayant comme socle de connaissances commune et comme intérêt partagé la recherche en traitement du signal.

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 rugosité du sol pour la détermination du taux d'humidité des sols observés. On montre que la rugosité du sol et la profondeur de pénétration du signal dans le sol modifient la cohérence de phase des signaux GNSSR. On souhaite dans ce travail modéliser le processus physique qui guide la réflexion des sols pour en extraire les « motif » de rugosité liés au type de la surface de réflexion. L'équipe encadrante dispose pour cela d'une expertise de plus de 10 ans dans l'estimation de la phase des signaux GNSS. Elle dispose aussi d'une expertise dans le domaine de l'estimation bayésienne et la détection. Ces deux domaines seront mis à contribution pour la définition d'estimateurs précis et robustes des profils de rugosité des sols à partir d'observations dynamiques de séries chronologiques d'évolution de la phase.

Encadrement : Oussama Bazzi (UL-Liban)

Serge Reboul (ULCO-France)

Projet détaillé :

La caractérisation de la réflexion du signal GNSS sur la terre joue un rôle important dans la mesure du taux d'humidité des sols pour la gestion de la ressource en eau, avec application par exemple à la planification de l'irrigation des cultures. Elle est également un paramètre important pour le suivi de l'évolution du changement climatique, elle est notamment utilisée pour la prévention et la surveillance des inondations et sécheresses ainsi que l'état de mer. 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 car ils ont une bonne pénétration dans les 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. En effet celui-ci est particulièrement faible pour des signaux GNSS 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 [2], étude des sols [1,3,4], état de mer [5]), mais sera spécifiquement perfectionné, dans le cadre de cette thèse, pour l'étude de la réflectivité des sols, des lacs et de la mer.

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 thèse de Sarah Shehade et 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 [1,3,4]. Pour améliorer la caractérisation des différents types de 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 [6]. Sur un sol de constitution sédimentaire constante, la puissance de réflexion et donc la réflectivité augmentera avec le taux d'humidité du sol.

Cependant elle diminuera suivant le profil de rugosité du sol. Pour augmenter la puissance du signal observé trois méthodes seront étudiées dans cette thèse, soit l'utilisation de la voie pilote en bande L1 du signal Galileo E1OS, l'utilisation de la voie pilote en bande L5 du signal GPS L5, et la fusion des deux voies. Le capteur radar qui sera utilisé dans cette thèse a été réalisé en collaboration avec l'entreprise Syntony. Cette collaboration concerne l'équipement matériel et le design en partenariat de plusieurs récepteurs spécifiques pour la réflectométrie GNSS. Cette collaboration a en particulier fait l'objet du 2ème prix FIEEC pour la recherche appliquée en 2017. Enfin, nous disposons d'une antenne à polarisation circulaire gauche en bandes L1/L5 pour la réception du signal réfléchi et une antenne à polarisation circulaire droite classique en bandes L1/L5 pour la réception du signal direct.

On montre dans [1] que la rugosité des sols mais aussi leur constitution sédimentaire peut être observée à travers l'évolution de la phase des signaux GNSSR [7,8]. 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. Les travaux de thèse porteront dans ce cadre, sur le traitement de la phase des signaux GNSS, travaux qui seront abordés de manière originale à travers une représentation statistique circulaire des signaux [9,10]. 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, estimation bayésienne et en fusion d'informations. L'estimation des profils de rugosité à partir de la phase 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.

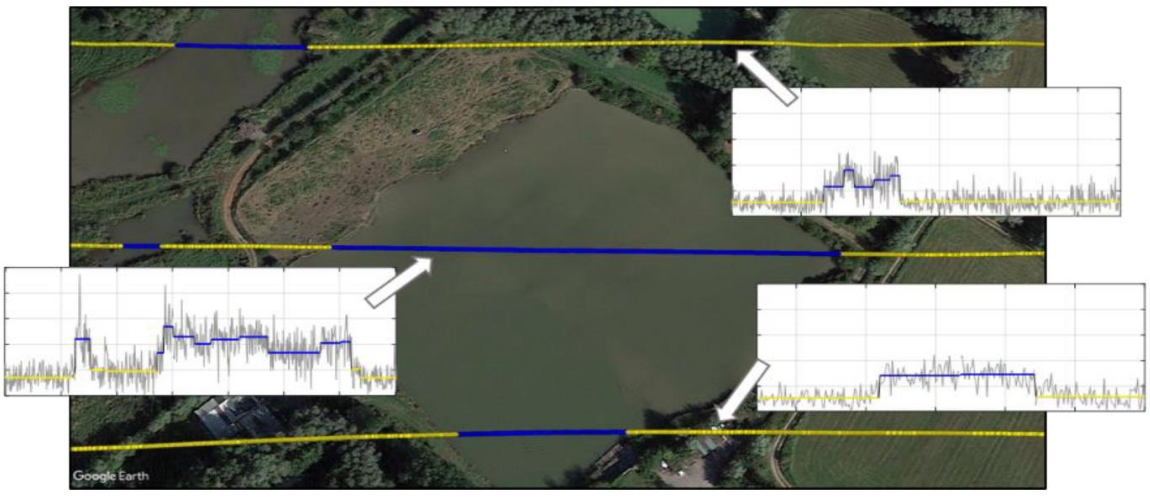

Figure 1 : Détection et localisation automatique de plans d'eau par GNSSR aéroporté : les graphiques représentent la réflectivité (mesure de puissance) obtenue pour 3 traces satellitaires et leur segmentation automatique. Le résultat de la segmentation est géolocalisé sur les traces au sol et projeté automatiquement sur une carte Google Earth pour comparaison.

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. L'étude sera étendue à la zone aride du bassin du fleuve Litani au Liban en plus de la zone tempérée du Littoral de la Manche en France. Ces zones offrent une grande variété de surfaces de réflexions : cultures agricoles, étangs, rivières, bois, routes, plages à marées, … Le traitement des données comprend l'estimation du taux d'humidité des sols et sa représentation dans un SIG en vue de construire des cartes d'observations.

Dans ce travail de thèse on souhaite étudier la phase des signaux GNSS réfléchis pour caractériser les motifs de rugosité des sols. On considère dans ce cas un modèle géométrique pour la réflexion, soit une réflexion spéculaire unique du signal sur une surface plane et une réflexion diffuse multiple sur une surface rugueuse. On montre dans [1] que l'évolution de la phase est modifiée par la rugosité de la surface. L'objectif de cette thèse est d'étudier les séries chronologiques d'évolution de la phase du signal (c.f. Figure 2) pour en déduire le profil de rugosité de la surface. Dans le cas statique (Observation depuis un mât) on considère que c'est la surface qui évolue avec le temps (cas de la surveillance des lacs et de l'état de mer) et dans le cas dynamique le porteur est mobile (Observation aéroportée) on considère que la surface évolue avec la position du porteur (mesures du taux d'humidité des sols et caractérisation de la végétation).

Les signaux GNSS réfléchis ont un très faible rapport signal à bruit et l'extraction de leur phase est réalisée dans une boucle ouverte de poursuite de la phase grâce aux informations obtenues sur le signal direct. Dans ce contexte ce n'est pas directement la phase du signal réfléchi qui est observée mais la différence de phase entre le signal direct et le signal réfléchi. On parle alors d'Excess phase. On montre que l'Excess phase qui est obtenue par un récepteur logiciel fonctionnant en boucle ouverte n'est pas une donnée linéaire mais une donnée linéaire-circulaire car les valeurs d'angles sont entre $[-\pi ; \pi]$. Dans ce contexte l'estimation des paramètres du modèle d'évolution de la phase sera réalisée dans le domaine de la statistique circulaire.

Dans ce travail de thèse on étudiera deux approches pour caractériser la rugosité de la surface du sol. La première approche est l'analyse des paramètres du modèle d'évolution de l'Excess phase. Dans ce cas nous développerons des estimateurs dynamiques bayésiens dans le domaine circulaire. La seconde approche est une mise en correspondance directe de séries de valeurs de phase avec le type de surface rugueuse grâce à l'utilisation de l'apprentissage profond. Dans ce contexte l'originalité de notre approche résidera dans l'apprentissage des données grâce à une base de connaissance générée à partir de données réelles et de données synthétiques obtenues par notre modélisation de l'évolution des signaux.

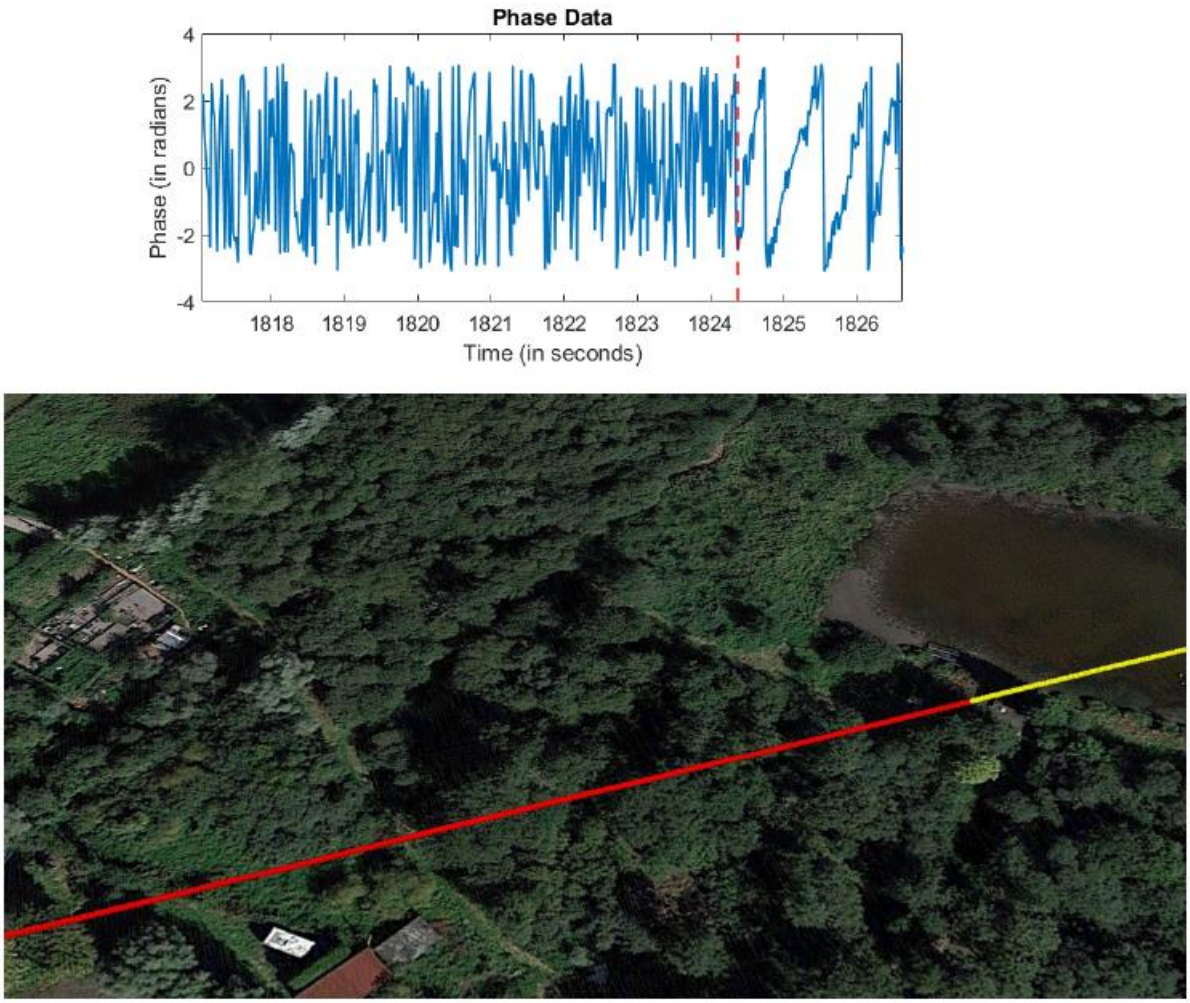

Figure 2 : Détection et localisation automatique de plans d'eau par GNSSR aéroporté : le graphique du haut représente 10s d'évolution de l'Excess phase obtenue pour 1 trace satellitaire et sa segmentation automatique. Le résultat de la segmentation est géolocalisé sur la trace au sol et projeté automatiquement sur une carte Google Earth.

On peut observer Figure 2 que l'évolution de l'Excess phase dépend du type de sol sur lequel le signal GNSSR est réfléchi. En effet sur la Figure 2 le signal qui est réfléchi par la forêt a un motif de phase qui semble aléatoire tandis que pour la réflexion sur l'eau le motif d'évolution de la phase est régulier. On montre que le motif d'évolution dépend de plusieurs paramètres : le nombre de réflexions, l'amplitude de ces réflexions, leurs fréquences et la puissance du bruit de mesure. Le motif de phase semble aléatoire quand le rapport signal à bruit, soit le rapport entre l'amplitude des réflexions et la puissance du bruit est faible. La rugosité du sol est quant à elle dépendante de l'amplitude, du nombre et de la fréquence des réflexions. L'objectif de la thèse est donc double, soit d'associer les différents motifs de rugosité avec les mesures d'Excess phase et d'estimer les paramètres de la phase nécessaires à la caractérisation de la rugosité.

La première partie de nos travaux expérimentaux portera sur l'étude de l'état de mer [11]. En effet le capteur est statique et situé sur un mât et il observe la mer qui est dynamique. On obtient alors des séries chronologiques de l'Excess phase où seule l'information de rugosité impacte la phase (les mouvements du porteur ne sont pas à prendre en compte). On souhaite dans ce cas observer différents motifs de rugosité associés à l'état de mer.

Echéancier 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 débuterait 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 trois étapes. On réalisera dans une première étape l'étude en simulation de la caractérisation de la rugosité à partir de la diffusion d'un signal GNSS réfléchi par une surface. On s'appuiera pour cela sur un modèle de diffusion optique et la modélisation numérique de la surface de réflexion. La deuxième étape du programme de recherche consiste à montrer l'apport de l'utilisation conjointe des signaux GNSS GPS L1 et Galileo pour l'estimation de l'état de mer au travers des évolutions de sa rugosité. On développera pour cela de nouveaux algorithmes de traitement des signaux qui fusionnent l'information GNSS pour l'estimation de la rugosité. L'étude sera menée en statique à l'aide d'un système de réception positionné sur un mât en bordure de mer. Dans la troisième étape l'étude de la rugosité de sols sera menée en dynamique à partir de données obtenues par un capteur aéroporté. La partie expérimentale et le traitement des signaux GNSS seront réalisés en France, l'analyse et le traitement des données au Liban.

Références :

[1] El Hajj Chehade, S., Issa, H., Stienne, G., Reboul, S., (2024). Change Point Detection in Radar Reflectivity Measurements Contaminated by Speckle Noise. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17, pp.11208-11218.
[2] 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.
[3] Issa, H., Stienne, G., Reboul, S., Raad, M., & Faour, G. (2022). Airborne GNSS Reflectometry for Water Body Detection. Remote Sensing, 14(1), 163.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.