

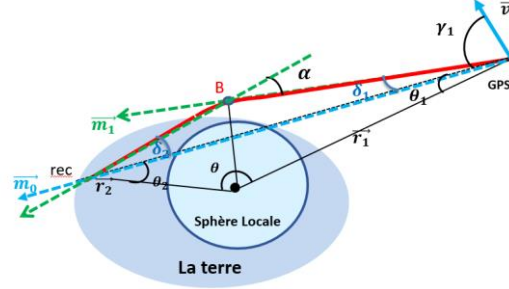
## Correction automatique des sauts de cycle GNSS par réseau de neurones

Othmane EL ATTIQ<sup>1,2</sup>, Safae ABOUELOUAGA<sup>1,2</sup>, Adnane LATIF<sup>2</sup>, Serge REBOUL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Informatique, Signal et Image de la Côte d'Opale (LISIC), Université Littoral Côte d'Opale, Calais, France

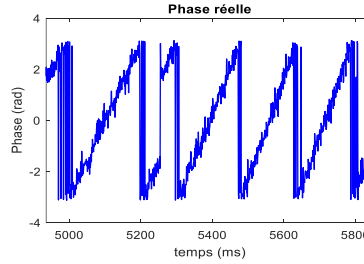
<sup>2</sup> Laboratoire de Modélisation des Systèmes Complexes (LMSC), Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

La radio-occultation GNSS (GNSS-RO) est une technique de télé-détection permettant de déduire des profils atmosphériques, tels que la température, la pression ou l'humidité [1]. Elle repose sur l'analyse des signaux GNSS lorsqu'ils passent au ras de l'horizon, où ils sont déviés par la réfraction atmosphérique. Un récepteur installé au sol capte ces signaux. En comparant le chemin réfracté à un chemin direct de référence (figure1), il est possible de déduire des informations sur la structure de l'atmosphère. Ces mesures peuvent ensuite être intégrées dans des modèles météorologiques.



**Figure 1** : Principe de la radio-occultation GNSS depuis le sol

Cependant, dans des conditions de réception dégradées (basse élévation, faible SNR), la phase du signal GNSS présente des sauts de cycle (cycle slips) dus à des pertes temporaires de suivi du signal (figure2). Ces discontinuités dégradent fortement l'estimation des retards atmosphériques si elles ne sont pas corrigées.

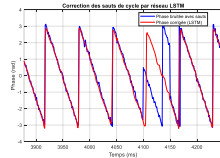


**Figure 2** : Saut de cycle dans un signal GNSS réel

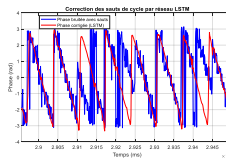
Dans ce travail, nous proposons une approche automatique de correction des sauts de cycle basée sur un réseau neuronal de type LSTM (Long Short-Term Memory). Ce réseau est capable de reconstituer une phase continue, directement à partir de séquences de phase bruitées contenant des ruptures, sans recourir à une détection explicite [2].

Des signaux synthétiques ont été générés à partir d'un modèle en boucle ouverte, en simulant des composantes I/Q bruitées et en injectant artificiellement des sauts de cycle. Le LSTM est ensuite entraîné à lisser ces séquences de phase via des fenêtres glissantes.

Les figures ci-dessous illustrent deux exemples de correction : dans chaque cas, la phase initiale contient des sauts de cycle visibles, tandis que la sortie du modèle montre une phase lissée et continue, sans discontinuité apparente.



**Figure 3** : Correction – SNR=47 dB



**Figure 4** : Correction – SNR=35 dB

Ces résultats confirment la capacité du modèle à restaurer une phase cohérente, même en présence de bruit important, et sans recourir à une détection explicite.

### Références :

- [1] Hordyniec, P., Cheng-Yung, H., Liu, C. Y., Rohm, W., & Chen, S. Y. (2019). GNSS radio occultation profiles in the neutral atmosphere from inversion of excess phase data. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 30(2), 2.
- [2] Cherfi, H., Lesouple, J., Solà, J., & Thevenon, P. (2024, April). Single Frequency GNSS Carrier Phase Cycle Slip Detection and Identification Using a Factor Graph Approach. In *Proceedings of the ION 2024 Pacific PNT Meeting* (pp. 344-355).