

# Mesure des variations de l'altitude de l'ionosphère par traitement numérique de signaux radiofréquences acquis par carte son

La prolifération des modes de communication sans fil sur porteuse radiofréquence – courte portée avec les réseaux locaux tels que Wifi ou longue portée tel que la télévision numérique terrestre – offre une opportunité d'observer l'environnement physique qui régit leur conditions de propagations de ces signaux. En effet, la disponibilité d'interfaces d'acquisitions accessibles à faible coût donne accès à ces signaux, et la capacité à les exploiter n'est limitée que par la capacité des auditeurs à extraire toute l'information introduite lors de la propagation [1]. À titre d'exemple d'interfaces d'acquisition, nombre de cartes son équipant les ordinateurs personnels permettent un échantillonnage à 192 kHz, et donc d'analyser les signaux sur des porteuses allant jusqu'à 96 kHz [2]. Parmi ces signaux, DCF77 émis depuis l'Allemagne porte une information cadencée par des horloges atomiques et donc compatibles avec une datation excessivement précise du temps de vol, notamment représentatif des conditions ionosphériques [3, 4, 5]. De la même façon, les récepteurs de télévision numériques terrestres basés sur un convertisseur analogique-numérique RTL2832U, disponibles pour moins d'une dizaine d'euros, permettent de sonder la gamme radiofréquence d'une cinquantaine de MHz à plus de 1,6 GHz en sortie de démodulateur, ou dans la gamme de 0 à 1 MHz en attaquant directement les convertisseurs analogique-numériques sans passer par l'étage de transposition de fréquence. En supposant que le signal de synchronisation issu de récepteurs GPS (1 PPS) fournit une base de temps de référence, nous étudions les fluctuations journalières à saisonnières de l'ionosphère, couche de l'atmosphère à une altitude de 60 à 90 km qui réfléchit les ondes électromagnétiques émises en-deçà de 100 kHz. Un traitement logiciel des signaux acquis réduit la complexité matérielle de l'expérience (et donc son coût) tout en amenant la flexibilité et la stabilité du traitement numérique de signaux. Nous avons ainsi démontré la capacité à mesurer les variations jour-nuit de l'altitude de l'ionosphère avec une résolution de 10  $\mu$ s, et la stabilité de l'ionosphère pendant l'été pour devenir instable en hiver.

Toute mesure géophysique se doit de durer dans le temps pour être statistiquement viable : l'utilisation de matériel facilement disponible et dont la mobilisation n'handicape pas les autres capacités d'expérimenter rend cette mesure compatible avec une analyse sur une longue durée. Notre mesure dure ainsi depuis plus d'1 an sans interruption majeure (Fig. 1).

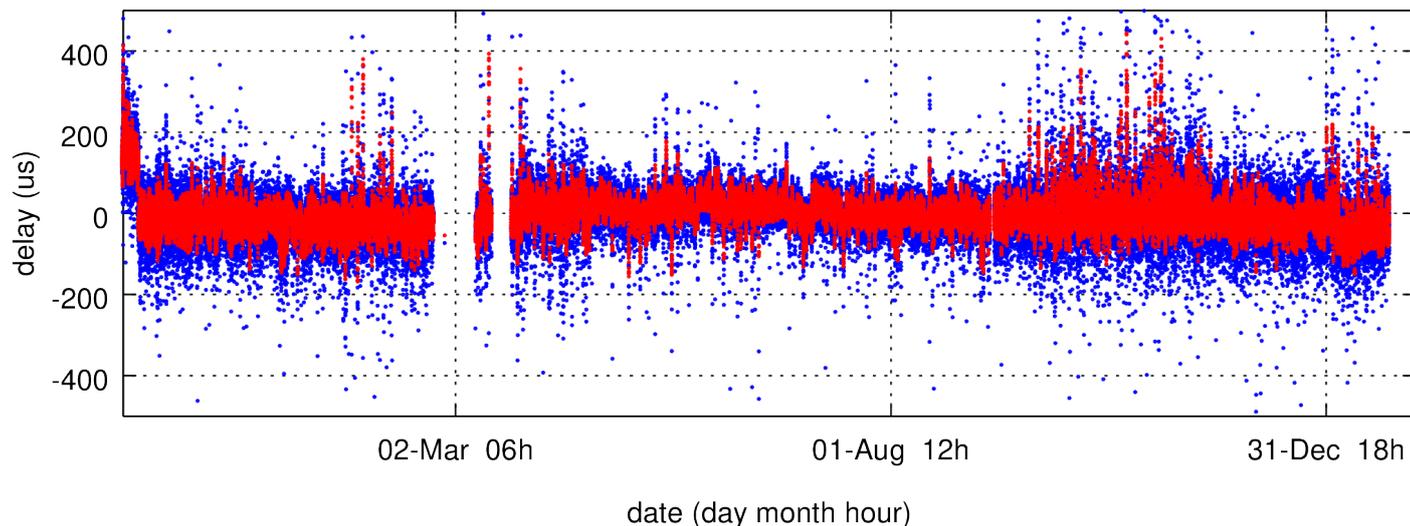


FIGURE 1 – Mesure de Novembre 2016 à fin-Janvier 2018 de la variation de temps de vol du signal émis par DCF77, représentatif de la variation d'altitude de l'ionosphère. Noter la stabilisation du signal en été.

Au delà de proposer une infrastructure faible coût de dissémination du temps robuste, car indépendante de GPS, cette expérience permet d'appréhender la physique des phénomènes électriques dans l'atmosphère. D'un point de vue ingénierie, la dissémination du temps impacte des domaines aussi variés que les transports (garantir que deux trains partent de deux gares distantes à la même heure), datation des transactions boursières ou toute activité sociale nécessitant une synchronisation. Les compléments à ce premier développement visent à étendre l'étude à d'autres fréquences (TDF à 162 kHz en France, LORAN à 100 kHz en Angleterre) tout en observant les diverses directions d'arrivées de ces signaux vers le récepteur, et donc des zones et altitudes distinctes de l'ionosphère.

L'environnement de traitement du signal numérique GNURadio facilite la prise en main des outils nécessaires à aborder la SDR, sans nécessairement simplifier les pré-requis théoriques qui deviennent plus faciles à appréhender avec les applications ludiques citées ci-dessus. Parmi les manifestations regroupant les intervenants sur le sujet, chaque année les vidéos des conférences GRCon <https://www.youtube.com/channel/UCceopZVEDCQ4s8y16M7Fng> et la session radio logicielle du FOSDEM [https://fosdem.org/2018/schedule/track/software\\_defined\\_radio/](https://fosdem.org/2018/schedule/track/software_defined_radio/) sont mises en ligne pour permettre l'accès à un maximum d'auditeurs n'ayant pu se rendre physiquement aux conférences.

## Références

- [1] T. Lavarenne, *Études expérimentales de différents types de modulations numériques (RFID, RDS et GSM)*, Bull. Union des Physiciens (2017)

- [2] J.M. Friedt, *Mesure stroboscopique du champ de déplacement d'un diapason à quartz au moyen d'une carte son et d'une webcam*, Bull. de l'Union des Physiciens 999 (Dec. 2016)
- [3] J.-M. Friedt, C. Eustache, É. Carry, E. Rubiola, *Software defined radio decoding of DCF77 : time and frequency dissemination with a sound card*, Radio Science (Jan. 2018), à [onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017RS006420/abstract](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017RS006420/abstract)
- [4] J.-M. Friedt, C. Eustache, E. Rubiola, *Décodage logiciel du signal de transfert de temps par DCF77 : introduction à la radio définie par logiciel au moyen d'une carte son*, CETSIS 2017
- [5] J.-M. Friedt, C. Eustache, E. Rubiola, *Monitoring the ionosphere altitude variation with a sound card : software defined radio processing of DCF-77 signals*, FOSDEM 2017, à [https://fosdem.org/2017/schedule/speaker/jean\\_michel\\_friedt](https://fosdem.org/2017/schedule/speaker/jean_michel_friedt) et [jmfriedt.free.fr/dcf77.mp4](https://jmfriedt.free.fr/dcf77.mp4)