



**HAL**  
open science

## Sismologie ionosphérique et GNSS

Lucie Rolland, Anthony Sladen, V. Rakoto, G. Occhipinti, Mathilde Vergnolle, P. Coïsson, E. Astafyeva, P. Lognonné

► **To cite this version:**

Lucie Rolland, Anthony Sladen, V. Rakoto, G. Occhipinti, Mathilde Vergnolle, et al.. Sismologie ionosphérique et GNSS. Resif-Epos newsletter, 2017, pp.12. hal-03596719

**HAL Id: hal-03596719**

**<https://hal.science/hal-03596719>**

Submitted on 4 Jul 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

### SISMOLOGIE IONOSPHERIQUE ET GNSS

Auteurs : Lucie Rolland<sup>1</sup>, Anthony Sladen<sup>1</sup>, Virgile Rakoto<sup>2</sup>, Giovanni Occhipinti<sup>2</sup>, Mathilde Vergnolle<sup>1</sup>, Pierdaveide Coisson<sup>2</sup>, Elvira Astafyeva<sup>2</sup>, Philippe Lognonné<sup>2</sup>

L'essor des GNSS (Global Navigation Satellite Systems) a ouvert des applications multiples en géophysique interne et externe dans les domaines de la tectonique, des surcharges, de la surveillance du niveau des mers et de la météorologie (voir site web RENAG [renag.resif.fr](http://renag.resif.fr) pour plus d'informations). Un autre domaine d'application des GNSS est le sondage de l'ionosphère, la couche ionisée de l'atmosphère. Les ondes radio émises par les satellites GNSS subissent un retard dans l'ionosphère qui peut être précisément corrigé en combinant les mesures d'un récepteur GNSS bi-fréquence.

L'analyse fine des fluctuations du délai ionosphérique, proportionnel au contenu électronique total («TEC») de l'ionosphère, montre que celle-ci est sensible aux secousses sismiques (fig. 1). Les premières observations de ce phénomène à l'origine de la sismologie ionosphérique (Occhipinti, 2015) sont cependant bien plus anciennes et ont été réalisées via des instruments

de radiosondage dédiés à la surveillance des essais nucléaires, à la suite du séisme historique d'Alaska de 1964 (Mw 9,2). La surface de la Terre secouée par les ondes sismiques agit telle une membrane élastique qui fait vibrer l'air à son contact, émettant des ondes acoustiques et des ondes de gravité dans l'atmosphère. Ces ondes se propagent jusque dans la haute atmosphère et font à leur tour entrer l'ionosphère en vibration, ce qui se traduit par le mouvement des couches ionosphériques et des fluctuations de l'observable TEC.

La détection de perturbations ionosphériques induites par les séismes peu profonds et de magnitude supérieure à 6,5 est aujourd'hui quasi systématique lorsque des récepteurs GPS bi-fréquence sont situés à proximité de la source (soit dans un rayon de quelques centaines de kilomètres) avec un délai de détection inférieur à 10 minutes (fig. 1). En observant un satellite

GNSS bas sur l'horizon, il est notamment possible de réaliser des observations en mer à l'aplomb de la zone de rupture, voire de mesurer l'extension de la source sismique dans le cas de séismes de forte magnitude ( $M > 8$ ). L'expérience a aussi démontré qu'il est possible d'observer l'empreinte ionosphérique de tsunamis de 2 cm d'amplitude seulement en plein océan (fig. 2).

atmosphérique et ionosphérique fortement affectés par les conditions climatologiques et géomagnétiques.

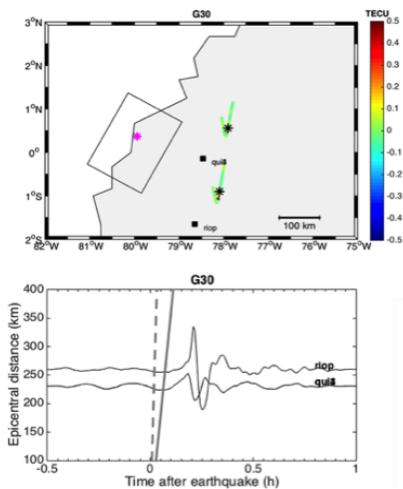


Fig. 1) Sismogrammes ionosphériques co-sismiques observés après le séisme de Pedernales en Equateur (16 avril 2016,  $M_w$  7,8) par les stations GPS RIOP et QUI4. En haut, carte de la zone et trajectoires des points de sondage ionosphérique pour le satellite GPS 30. Les étoiles rouge et noires représentent respectivement l'épicentre du séisme et la position des points de sondage au moment du séisme. Le rectangle délimite le plan de faille estimé par l'USGS. En bas, signature des ondes acoustiques émises par les mouvements co-sismiques verticaux en surface. Les perturbations s'initient par un pulse et s'alignent selon la droite en trait plein, de pente 1km/s. L'amplitude crête à crête est de 1 TECU (unité TEC = 1016 electrons.m-2).

Les observations accumulées sous la forme de sismogrammes et plus rarement de tsunamigrammes ionosphériques ont permis de réaliser des progrès considérables dans la compréhension des couplages entre la Terre solide, l'océan, l'atmosphère et l'ionosphère depuis les débuts de l'utilisation de GPS pour des applications géophysiques dans les années 90.

Pour modéliser ces sismogrammes et tsunamigrammes ionosphériques, des méthodes de sismologie quantitative développées pour la Terre solide ont été étendues à l'atmosphère et à l'ionosphère. Elles prennent en compte le mouvement des stations d'observation et la propagation des ondes sismiques dans des milieux

On comprend tout le potentiel de la sismologie ionosphérique comme nouvelle méthode d'observation et de surveillance des séismes et des tsunamis, qui se veut complémentaire des observations sismologiques.

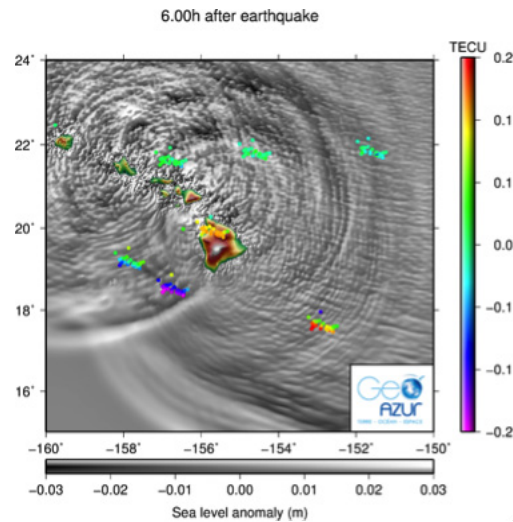


Fig. 2) Simulation du tsunami de Haida Gwaii (niveaux de gris), généré par un séisme de magnitude 7,8 en octobre 2012 à l'ouest du Canada, arrivé au niveau de l'archipel d'Hawaii avec des amplitudes au large de l'ordre du centimètre. Ces mouvements de faible amplitude se propagent et s'amplifient jusqu'à atteindre l'ionosphère où ils sont détectables par GNSS (points de couleur). D'après Rolland et al. (2014).

Le défi aujourd'hui est d'intégrer les données ionosphériques dans les systèmes d'alerte tsunami, que ce soit pour contribuer à la protection des côtes proches de la zone de rupture en réalisant l'évaluation rapide du potentiel tsunamigène d'un séisme sous-marin ou à la protection des côtes distantes via l'estimation en temps réel de l'amplitude d'un tsunami en plein océan. Avec l'arrivée des systèmes GLONASS, Compass/Beidou, Galileo (entré en phase d'opération en décembre 2016), QZSS, etc., un même récepteur multi-GNSS aura bientôt la capacité d'observer jusqu'à 30 satellites et donc sondera avec une plus grande résolution encore l'ionosphère et ses perturbations.

#### Références :

- Occhipinti, 2016, .Subduction Dynamics: From Mantle Flow to Mega Disasters, Geophysical Monograph 211, AGU Books.
- Rolland et al., 2014, EGU Abstract, 16, 7973.

<sup>1</sup>Géoazur, Université de la Côte d'Azur, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS

<sup>2</sup>Institut de Physique du Globe de Paris