



HAL
open science

Caractérisation et modélisation de la scintillation ionosphérique sur les signaux GNSS en zone polaire et équatoriale

Vincent Fabbro, Laurent Féral, Sébastien Rougerie

► **To cite this version:**

Vincent Fabbro, Laurent Féral, Sébastien Rougerie. Caractérisation et modélisation de la scintillation ionosphérique sur les signaux GNSS en zone polaire et équatoriale. ENVIREM 2019, Jul 2019, PALAISEAU, France. hal-02431704

HAL Id: hal-02431704

<https://hal.science/hal-02431704>

Submitted on 8 Jan 2020

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.

Caractérisation et modélisation de la scintillation ionosphérique sur les signaux GNSS en zone polaire et équatoriale.

FABBRO Vincent
ONERA / DEMR, Université de
Toulouse
F-31055 Toulouse, France.
Vincent.fabbro@onera.fr

FERAL Laurent
Laboratoire LAPLACE-GRE, 118,
route de Narbonne, 31400 Toulouse
lferal@laplace.univ-tlse.fr

ROUGERIE Sébastien
CNES, 18 avenue Edouard Belin,
31400 Toulouse
Sebastien.Rougerie@cnes.fr

Résumé—La présente communication décrit un ensemble de travaux effectués à l'ONERA en partenariat avec l'université Paul Sabatier et le CNES sur la propagation électromagnétique à travers l'ionosphère turbulente. Le problème direct de la propagation à travers l'ionosphère turbulente est tout d'abord traité par le développement de modèles basés sur une description statistique du milieu ionosphérique inhomogène. Puis à partir du formalisme asymptotique développé, des mesures GNSS sont inversées pour obtenir des paramètres décrivant le milieu. Cette approche a été testée sur la base de données SAGAIE en zone équatoriale. Enfin un modèle dédié à la prédiction de la scintillation ionosphérique à hautes latitudes, régressé sur une base de données norvégienne acquises sur un cycle solaire, est proposé.

Mots clés— *scintillation ionosphérique, milieu turbulent, modélisation propagation, méthode équation parabolique*

I. INTRODUCTION

L'ionosphère est un milieu d'ionisation variable en fonction du temps, de l'altitude et de la position en latitude et longitude. Le gradient de densité électronique y est très fluctuant sur des échelles spatiales de tailles variables. Ces irrégularités apparaissent en particulier aux zones équatoriales et polaires. Elles se comportent vis-à-vis des signaux radioélectriques comme des éléments diffusifs responsables de multitrajets interférentiels dont l'influence varie avec la fréquence du signal, occasionnant d'abruptes variations d'amplitudes et de phases au niveau des récepteurs GNSS, susceptibles de provoquer un décrochage du signal ou une coupure de la liaison : c'est le phénomène de scintillation ionosphérique (cf. Fig. 1).

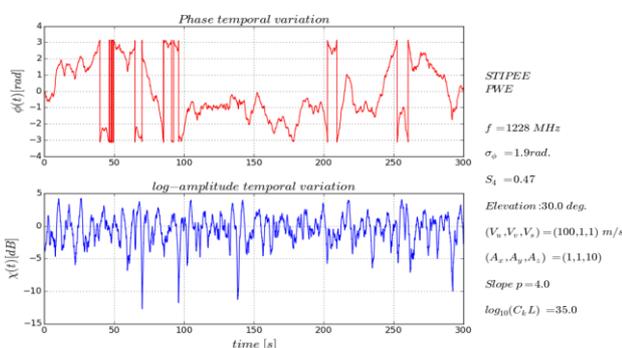


Fig. 1. Illustration de signaux typiques amplitude / phase reçus par un récepteur GNSS en présence de scintillation ionosphérique.

Les applications des systèmes spatiaux radiofréquences sont nombreuses : navigation par satellite (GPS, Galileo,

EGNOS), observation de la Terre (mission BIOMASS SAR bande P), communications vers satellite (expérimentation HFPE sur Taranis),... En outre, un modèle de scintillation ionosphérique de référence, mondial et large spectre est recherché, afin de quantifier les effets des scintillations ionosphériques et permettre un design optimal des systèmes spatiaux radiofréquences.

II. TRAVAUX DE MODELISATION DE LA PROPAGATION A TRAVERS L'IONOSPHERE INHOMOGENE

Le problème direct de la propagation en milieu ionosphérique inhomogène a été adressé en considérant une représentation statistique des irrégularités ionosphériques via la transformée de Fourier de la fonction de covariance des variations de densité électronique, ou spectre de Shkarofsky [1]. On résout alors l'équation d'Helmholtz en milieu stochastique soit par une approche numérique (méthode dite de l'équation parabolique -PWE- avec écrans de phase -MPS-) ou asymptotique en assumant un régime de diffusion dit de faible perturbation et une couche mince d'irrégularités (méthode dite de Rytov [2]). Ces deux approches très différentes permettent une inter-validation des modèles (Fig. 2), et ont été capitalisées dans l'outil STIPEE (Software Tool for Ionospheric Propagation Effects Evaluation) dans le cadre de la thèse d'Hélène Galiègue [4]. La modélisation est 3D ou 2D, avec prise en compte de l'anisotropie du milieu, valide en zone polaire et équatoriale.

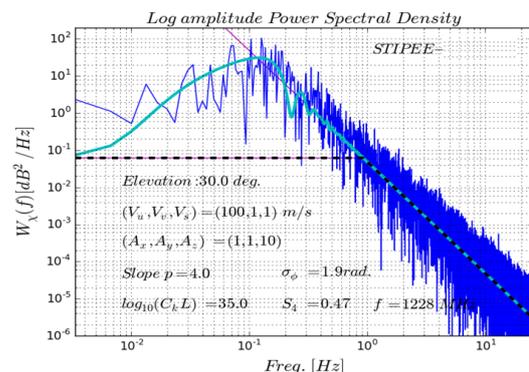


Fig. 2. Exemples de validation des méthodes PWE - MPS et Rytov (amplitude).

Ces approches développées, se pose alors la problématique du renseignement des paramètres descriptifs du milieu inhomogène, ce qui renvoie à un problème d'inversion de mesures.

III. PROBLEME INVERSE

Considérant les expressions obtenues sous le formalisme analytique de Rytov pour le spectre d'un signal reçu par un récepteur GNSS (cf. illustration Fig. 2), on peut envisager d'inverser ces mesures pour en déduire les paramètres descriptifs de l'ionosphère turbulente. Un algorithme d'inversion a ainsi été développé dans le cadre de la thèse d'Aurélien Galmiche [3] et testé sur la base de données SAGAIE acquise en Afrique (financée par le CNES et collectée par Thales Alenia Space). La scintillation a été étudiée des années 2013 à 2016 en zone équatoriale africaine. Les paramètres descriptifs du milieu inversés (force des irrégularités intégrée en altitude, anisotropies du milieu, vitesse de déplacement des irrégularités) ont été étudiés et présentent des comportements conformes à la littérature et permettent même de présenter certains points supplémentaires originaux comme l'évolution de l'anisotropie du milieu avec le régime de turbulence (Fig. 3).

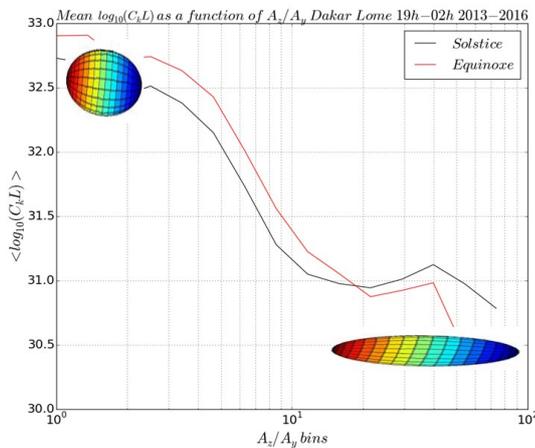


Fig. 3. Lien entre force intégrée des irrégularités $\log_{10}(C_i L)$ et anisotropie (A_z/A_y), pour les périodes de solstice (en noir) et d'équinoxe (en rouge). Une représentation schématique de l'anisotropie est proposée en dégradé de couleurs.

IV. PREDICTION DE L'ETAT DE L'IONOSPHERE AUX LATITUDES POLAIRES

Dans le cadre d'une coopération CNES - ONERA / NMA (Norwegian Mapping Authority) et NSC (Norwegian Space Center), un modèle de prédiction de l'indice ROTI (Rate of Change of Total electron content Index), appelé HAPEE (High Latitude scintillation Positioning Error Estimator) a été développé à partir d'une base de données ROTI acquise à 1 Hz et mesurée de 2007 à 2017 par un ensemble de récepteurs GNSS déployés en Norvège. Le modèle a été établi dans le système de coordonnées (MLT, L-MacIlwain) permettant de généraliser les mesures effectuées en Norvège à toutes les hautes latitudes. L'activité « Space Weather » est modélisée par les paramètres du vent solaire B_z (composante z du champ magnétique inter planétaire) et p (pression du vent solaire) indices mesurés par un satellite placé au point de Lagrange L_1 et diffusés par la NOAA. Le modèle permet de prédire le pourcentage du temps qu'un niveau d'indice ROTI sera dépassé dans les 5 prochaines minutes, ou a contrario de

connaître le niveau de ROTI dépassé pour un pourcentage du temps donné (cf. Fig. 4).

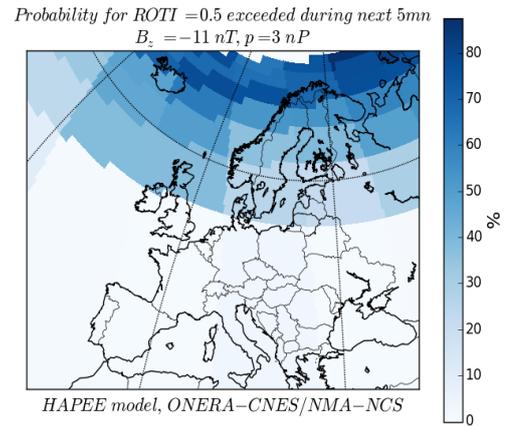


Fig. 4. Carte d'index de probabilité qu'un indice ROTI dépasse la valeur 0.5 pendant les 5 prochaines minutes.

V. CONCLUSION

Les travaux succinctement présentés ici témoignent de la démarche globale de modélisation et caractérisation du milieu ionosphérique turbulente mise en place. Le problème direct de la propagation électromagnétique à travers l'ionosphère puis le problème inverse et enfin la prédiction court terme ont été considérés.

Sur la prédiction de la scintillation aux hautes latitudes les perspectives envisagées sont d'établir le lien entre le modèle de prédiction de l'indice ROTI et le modèle analytique (Rytov), d'étendre le modèle par une approche de type « deep learning » et d'enrichir le paramétrage d'entrée du modèle hautes latitudes. Sur la méthode d'inversion de données GNSS, nous envisageons son extension aux données hautes latitudes, une application de la méthode d'inversion à une base de données plus large, et des analyses et propositions de modélisations des paramètres ionosphériques inversés. Des validations complémentaires sur l'ensemble des modèles seront également menées.

REFERENCES

- [1] Shkarofsky, I. P., 1968, Generalized turbulence space-correlation and wave-number spectrum-function pairs, *Can. J. Phys.*, 46(19), 2133–2153.
- [2] Wheelon, A.D., 2003, *Electromagnetic scintillation II. Weak scattering*, Cambridge University Press
- [3] Galmiche A., «Modélisation de la propagation ionosphérique de la bande HF à la bande S pour des applications en télécommunications, de navigation et d'observation par satellite ». Thèse CNES-TAS-ONERA, soutenue en février 2019.
- [4] Galiegue H., «Prédiction des effets ionosphériques sur la propagation des ondes électromagnétiques en bande L aux latitudes polaires ». Thèse ONERA-CNES soutenue en juillet 2015.