

# Impact de la sphéricité de l'onde électromagnétique illuminant l'ionosphère sur la scintillation

## Impact of the sphericity of the electromagnetic wave illuminating the ionosphere on scintillation

Morel Grégory<sup>1</sup>, Vincent Fabbro<sup>1</sup>, Olivier Boisot<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ONERA/DEMR, Université de Toulouse, Toulouse, France

<sup>2</sup>ONERA/DEMR, Salon-de-Provence, France

Mots clés (en français et en anglais) : propagation électromagnétique, scintillation ionosphérique, electromagnetic propagation, ionospheric scintillation.

Pour modéliser la propagation d'une onde électromagnétique traversant l'ionosphère, différents formalismes assument l'hypothèse d'une onde incidente plane illuminant les irrégularités ionosphériques. Cependant, les satellites en orbites basses (LEO, Low Earth Orbit) suivant une trajectoire à faible altitude, leur proximité avec l'ionosphère rend l'approximation d'une onde plane électromagnétique illuminant l'ionosphère contestable et la prise en compte de la sphéricité de cette dernière devient nécessaire. Ainsi, ces travaux proposent une comparaison des différents formalismes de calcul, à savoir onde incidente plane, onde incidente sphérique et onde plane corrigée (méthode heuristique). Des approches, soit numérique (méthode de résolution numérique de l'équation parabolique en milieu stochastique, ou PWE-MPS pour Parabolic Wave Equation - Multiple Phase Screens) [Knepp, 1983][Fabbro et al., 2012], soit analytique (approche dite de Rytov ou de faibles perturbations) [Rytov et al., 1989] [Wheelon, 2003], peuvent être considérées pour comparer les différents formalismes, mais on considère ici uniquement la méthode analytique.

La méthode analytique de faibles perturbations permet notamment de calculer les variances de log-amplitude  $\langle \chi^2 \rangle$  et de phase  $\langle \varphi^2 \rangle$ , suivant les équations (1) et (2) [Galiegue et al., 2016] :

$$\langle \chi^2 \rangle = \pi r_e^2 \lambda^2 R_{iono} \int \int S_{\Delta N_e}(0, k_u, k_v) F_\chi(k_u, k_v) dk_u dk_v, \#(1)$$

$$\langle \varphi^2 \rangle = \pi r_e^2 \lambda^2 R_{iono} \int \int S_{\Delta N_e}(0, k_u, k_v) F_\varphi(k_u, k_v) dk_u dk_v, \#(2)$$

Où  $\lambda$  [m] est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique transmise,  $R_{iono}$  [m] est l'épaisseur de la couche des irrégularités ionosphériques,  $F_\chi, F_\varphi$  sont des fonctions dites de filtrage qui dépendent du formalisme choisi et  $S_{\Delta N_e}$  est le spectre des irrégularités ionosphériques. Dans l'approximation onde incidente plane, celles-ci dépendent du rayon de Fresnel (ou rayon de la première zone de Fresnel). Ainsi une approche heuristique suppose qu'une simple correction de ce rayon de Fresnel par son expression en onde incidente sphérique permet d'obtenir des expressions, simples mais efficaces, de ces fonctions de filtrage dans le formalisme onde sphérique. Cette correction étant appliquée sur les fonctions de filtrage  $F_\chi$  et  $F_\varphi$ , elle s'applique *de facto* pour les variances de log-amplitude et de phase ainsi que pour les densités spectrales associées.

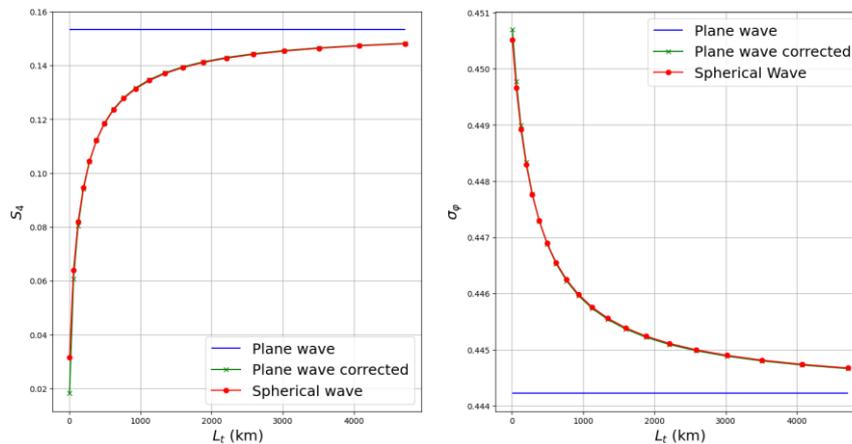


Figure 1 : Indices de scintillation  $S_4$  et  $\sigma_\varphi$  pour une onde incidente plane (bleu), une onde incidente sphérique (rouge), une onde incidente plane corrigée (vert).

La Figure 1 montre les indices de scintillation  $S_4$  et  $\sigma_\varphi$  pour les trois modèles de propagation : onde incidente plane, onde incidente sphérique et onde incidente plane corrigée de la distance de Fresnel. L'indice  $S_4$ , caractérisant la scintillation d'amplitude du signal reçu, est estimé à partir de la variance de log-amplitude par  $S_4 = 2\sqrt{\langle \chi^2 \rangle}$ . L'indice  $\sigma_\varphi$  est l'écart type de la phase du signal reçu, estimé à partir de la variance  $\langle \varphi^2 \rangle$ . Pour les deux indices les valeurs obtenues avec le modèle onde incidente sphérique tendent vers les valeurs obtenues avec le modèle onde incidente plane lorsque la distance émetteur-irrégularités ( $L_t$ ) devient grande. Ce résultat était attendu et une démonstration théorique en a été faite. Ces résultats révèlent que l'impact de la sphéricité de l'onde incidente est plus important sur l'amplitude que sur la phase, la dynamique de l'évolution étant plus importante pour l'indice  $S_4$  que pour l'indice  $\sigma_\varphi$ . Le modèle onde incidente plane corrigée semble donner d'excellents résultats, l'erreur relative est inférieure à 0.2% pour l'indice de scintillation de phase, et inférieure à 5% lorsque la distance parcourue par le signal entre le satellite et la couche ionosphérique dépasse 100 km pour l'indice de scintillation d'amplitude.

Les limites dues à l'approximation de l'onde incidente à une onde plane par rapport à une onde incidente sphérique pour prédire les effets de scintillation 3D ont été évaluées quantitativement pour une configuration particulière. Lors de cet exercice, les formulations analytiques pour les variances de log-amplitude et de phase et les spectres associés ont été explicitées. De plus, la méthode heuristique (Plane Wave Corrected) proposée pour corriger le formalisme dérivé sous hypothèse onde incidente plane a montré de très bons résultats sur les indices de scintillation et les spectres, même à basses altitudes. Néanmoins, les vitesses de déplacement du milieu ionosphérique par rapport au porteur qui ont été choisies pour cette étude sont similaires quelle que soit l'altitude, ce qui est une hypothèse forte. Une étude plus poussée avec des configurations plus réalistes est envisagée pour terminer cette étude et répondre aux questionnements des industriels sur l'impact de la scintillation ionosphérique pour différentes applications satellitaires.

**Remerciements :** Les auteurs tiennent à remercier la Direction Générale de l'Armement (DGA), l'Agence de l'Innovation de Défense (AID), pour leur soutien financier.

[Knepp, 1983] D.L. Knepp, "Multiple phase-screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves," Proceedings of the IEEE, vol. 71, no. 6, pp. 722–737, 1983.

[Fabbro et al., 2012] V. Fabbro, L. Féral, "Comparison of 2D and 3D electromagnetic approaches to predict tropospheric turbulence effects in clear sky conditions", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 60, no 9, Pages 4398 – 4407, September 2012. doi:10.1109/TAP.2012.2207070

[Rytov et al., 1989] S. M. Rytov, Y. A. Kravtsov, and V. I. Tatarskii, Principles of statistical radiophysics. 4. Wave propagation through random media., 1989.

[Wheelon, 2003] Albert D. Wheelon, Electromagnetic Scintillation, vol. 2, Cambridge University Press, 2003.

[Galiegue et al., 2016] Hélène Galiegue, Laurent Féral, and Vincent Fabbro, "Validity of 2d electromagnetic approaches to estimate log-amplitude and phase variances due to 3d ionospheric irregularities," Journal of Geophysical Research Space Physics, 2016.