

Modélisation statistique de la climatologie de la scintillation ionosphérique

Vincent Fabbro, Arnaud Rémy, Xavier Baumann
ONERA/DEMR, Université de Toulouse, F31055 Toulouse

I. Contexte

L'ionosphère est un milieu d'ionisation variable en fonction du temps 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, susceptibles de provoquer un décrochage du signal ou une coupure de la liaison : c'est le phénomène de scintillation ionosphérique.

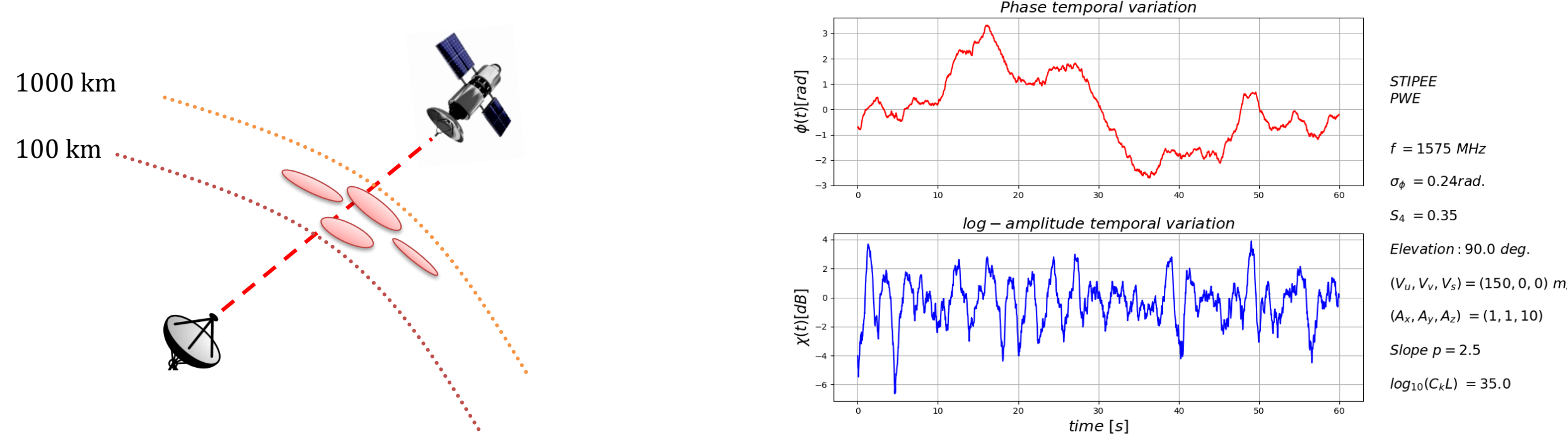


Fig. 1 : A gauche, schéma descriptif de la propagation transionosphérique. A droite, illustration de signaux typiques amplitude / phase reçus.

Les applications des systèmes spatiaux radiofréquences sont nombreuses : navigation par satellite (GPS, Galileo, EGNOS), mission BIOMASS (SAR bande P), satellite Taranis (HF),...

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.

III. Régressions statistiques long-terme

Régressions basses latitudes : De larges bases de données de mesures de l'indice S_4 (variation d'amplitude du signal) en différentes stations et couvrant le cycle solaire 24 ont été inversées pour régresser le comportement statistique long-terme de la scintillation en bande L (1 à 2 GHz).

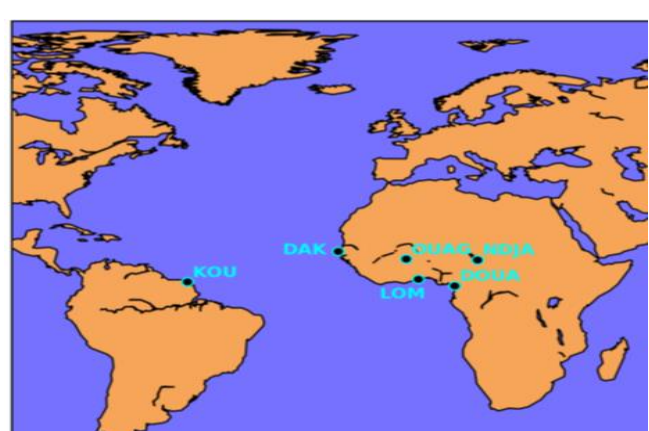


Fig. 6 : Positions des stations basse latitudes

Station	Latitude (deg)	Longitude (deg)	MLAT (deg)	Period
'KOUROU'	5.2308	-52.769	8.02	2014-2017
'DAKAR'	14.6937	-17.44406	4.06	2013-2016
'N DIAMENA'	12.113056	15.049167	1.80	2013-2016
'OUAGADOUGOU'	12.36566	-1.53388	1.28	2013-2016
'LOME'	6.13748	1.21227	-7.39	2013-2016
'DOUALA'	4.04827	9.70428	-9.8	2013-2016

Table 2 : Caractéristiques des données régressées

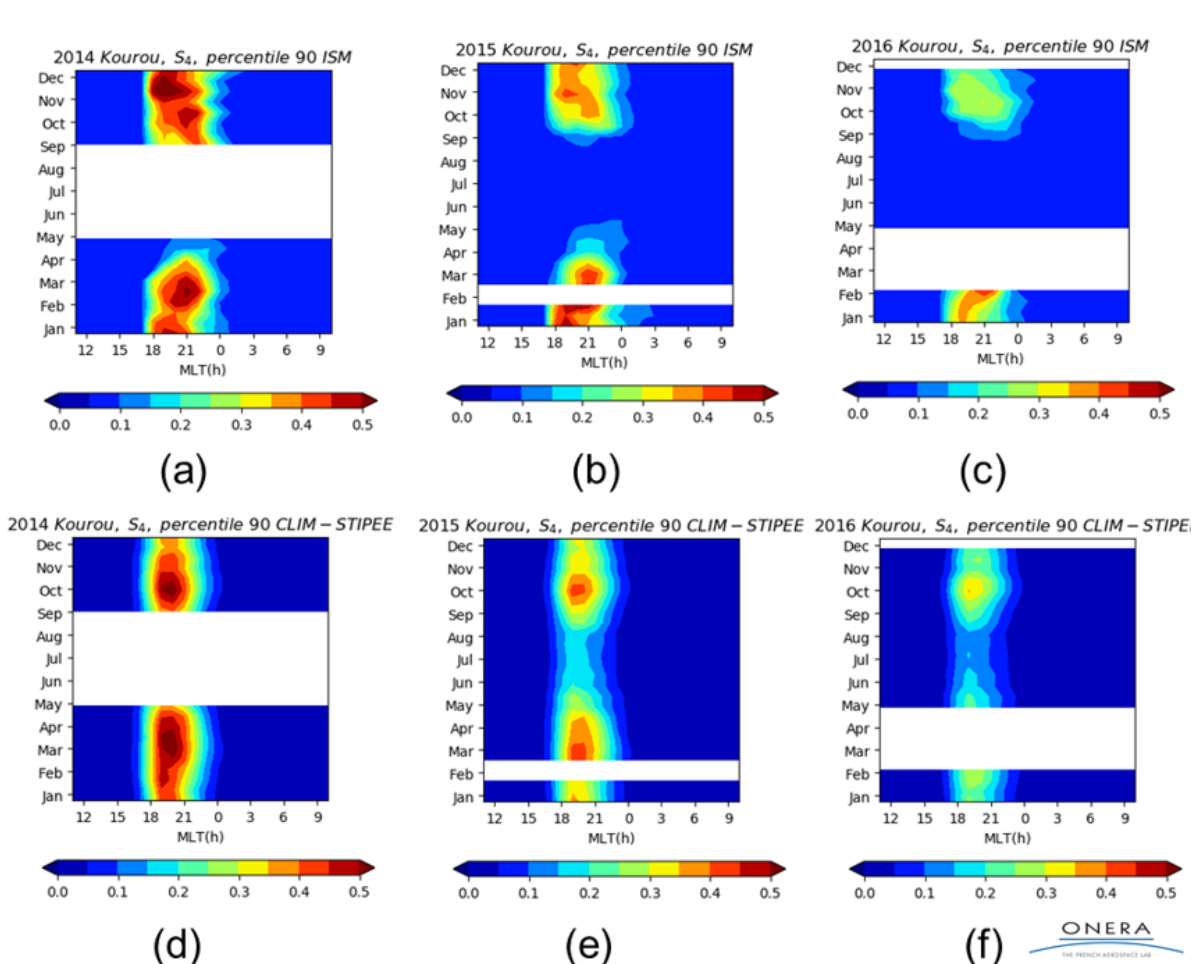


Fig. 7 : En couleurs, indice S_4 au percentile 90, Kourou. En haut: mesures ISM, en bas, modélisation STIPEE, de 2014 à 2016.

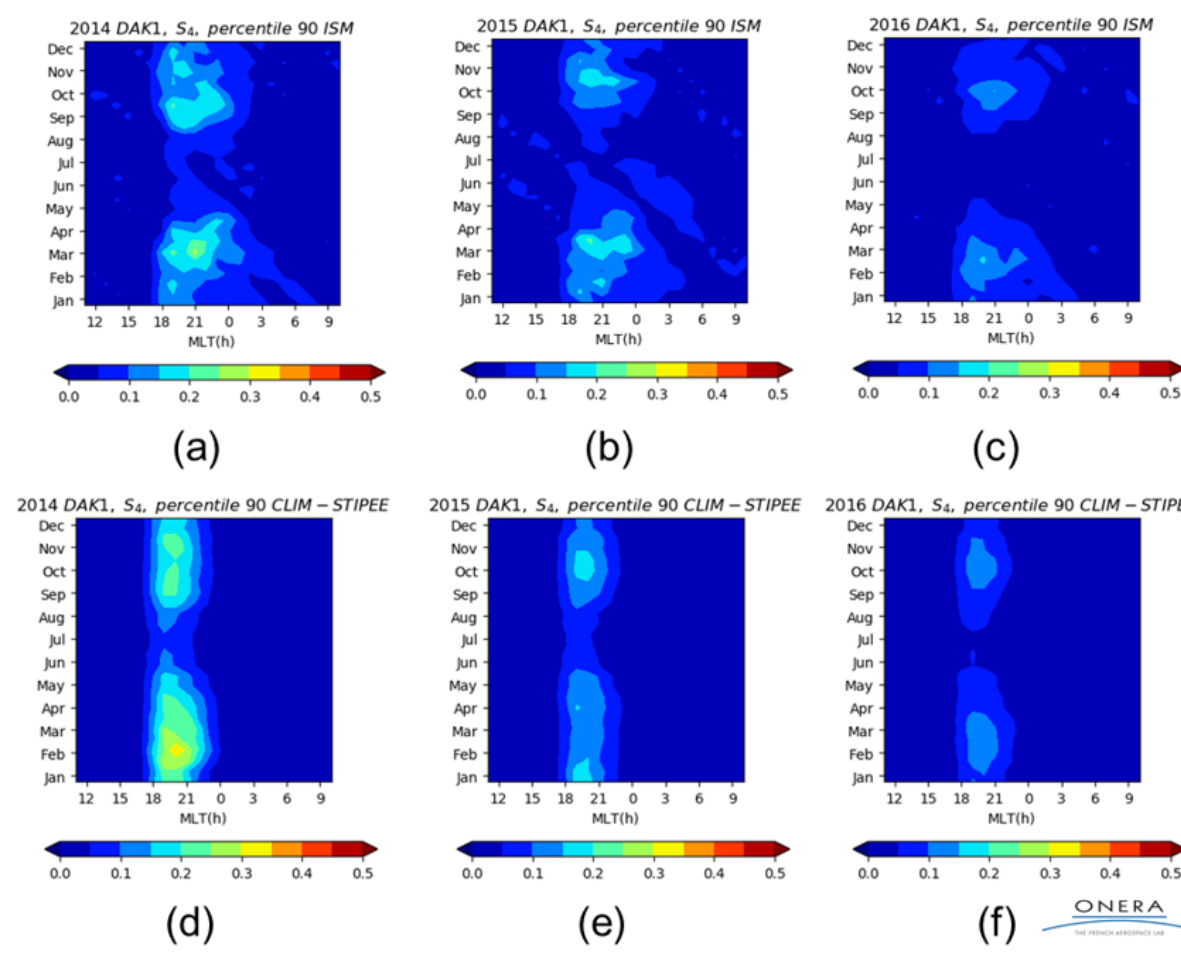


Fig. 8 : En couleurs, indice S_4 au percentile 90, Dakar. En haut: mesures ISM, en bas, modélisation STIPEE, de 2014 à 2016.

Régressions hautes latitudes : De larges bases de données de mesures de l'indice σ_ϕ (écart type de phase du signal reçu) ont été régressées, couvrant le cycle solaire 24. Les mesures des réseaux CHAIN et NMA ont été considérées. Les distributions observées sont log-normales.

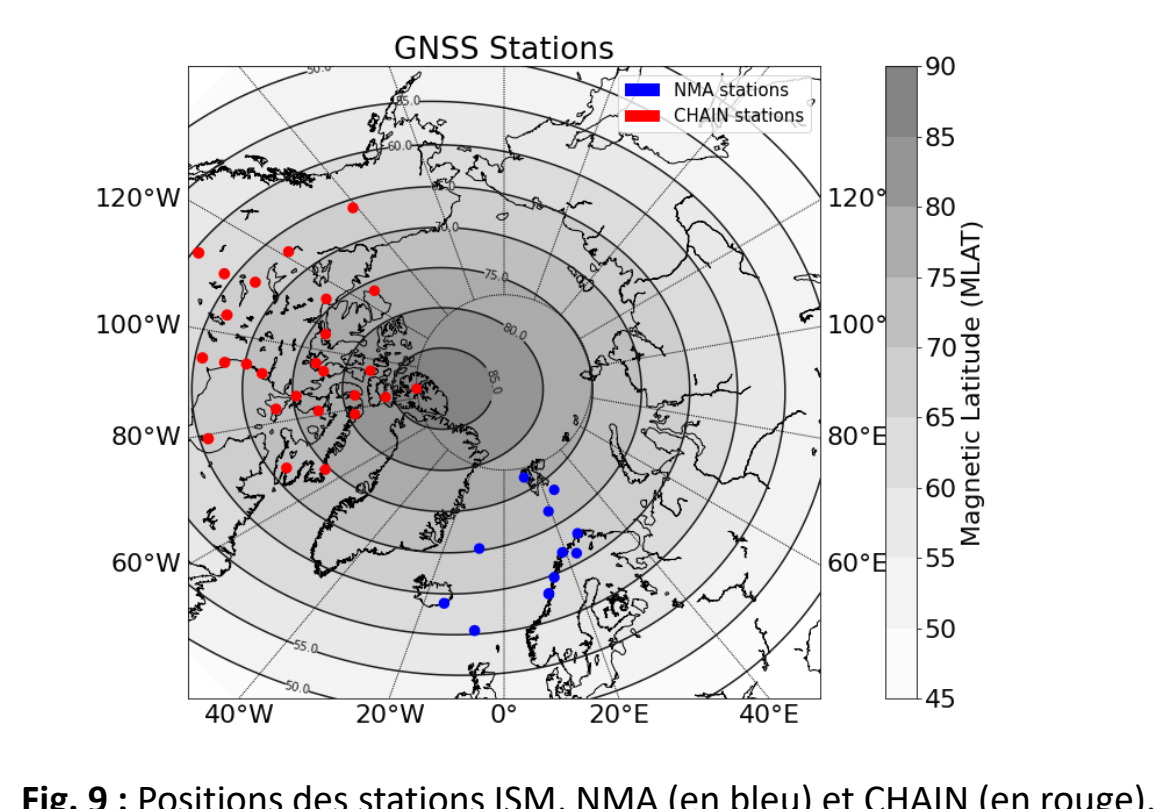


Fig. 9 : Positions des stations ISM, NMA (en bleu) et CHAIN (en rouge).

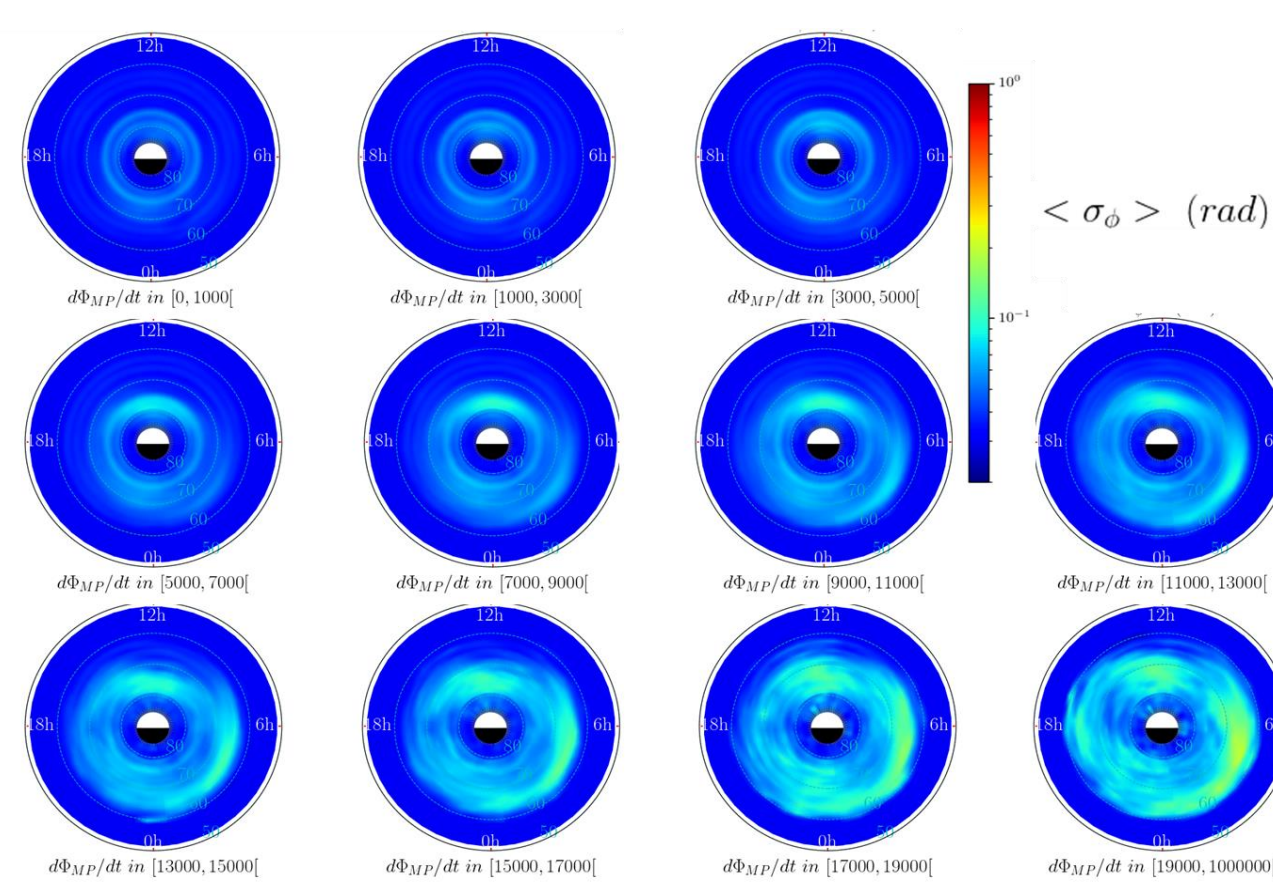


Fig. 10 : Variations de l'indice σ_ϕ régressé, chaque graphe correspond à une classe différente de la fonction de Newell.

II. Modélisation de la propagation EM à travers l'ionosphère inhomogène

Modélisation du milieu ionosphérique inhomogène :

Représentation statistique des irrégularités ionosphériques via la transformée de Fourier de la fonction de covariance de ΔN_e , ou spectre [Shkarofsky, 1968]:

$$S_{\Delta N_e}(K_x, K_y, K_z) = a^{3-p_m} A_y A_z \Lambda \left(K_x^2 + A_y K_y^2 + A_z K_z^2 + \frac{K_0^2}{a^2} \right)^{-\frac{p_m}{2}}$$

Fig. 2: Densité spectrale de puissance (PSD) spatiale des irrégularités ionosphériques

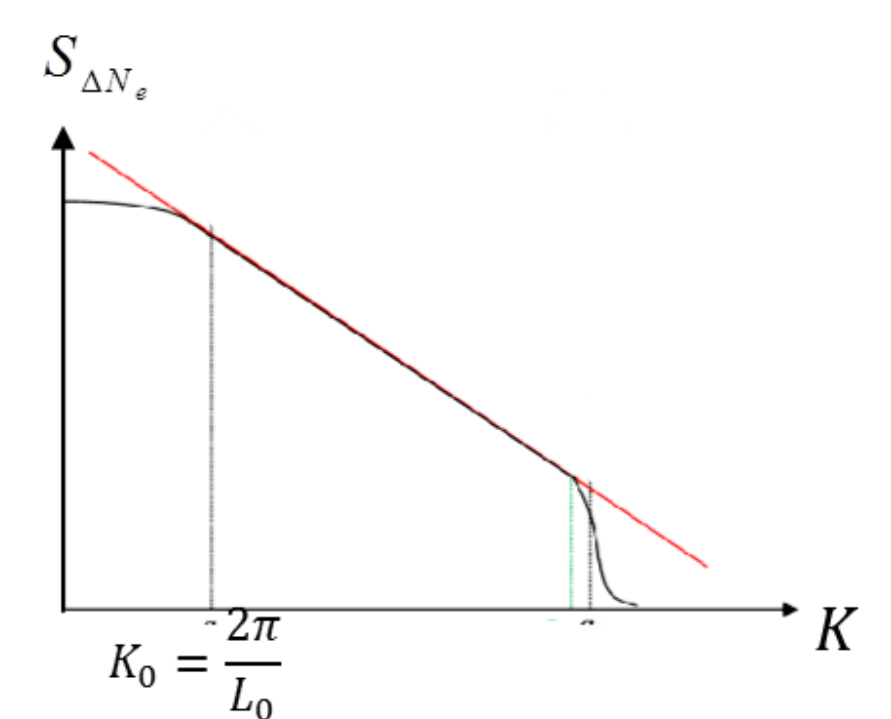
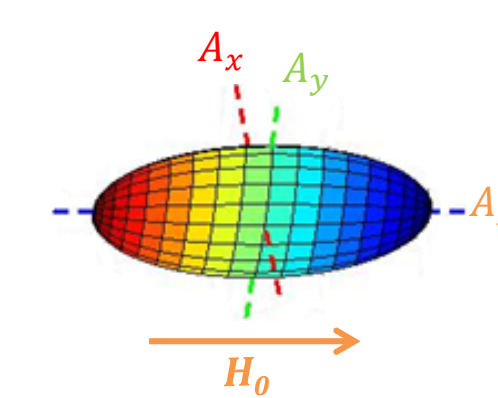


Fig. 3: PSD décrivant les fluctuations de densité électronique ΔN_e (ou d'indice de réfraction Δn)

Modélisation de la propagation transionosphérique

On résout l'équation d'Helmholtz en milieu stochastique :

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + k_0^2 [1 + 2\Delta n(\vec{r}, t)] \vec{E}(\vec{r}) = 0$$

Méthode de Rytov (Hypothèse faible perturbation et couche mince)

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_0(\vec{r}) e^{\psi(\vec{r})}$$

$$\Psi_1(\vec{r}) = -2k_0^2 \iiint d^3 r' G^{3D}(\vec{R}, \vec{r}') \Delta n(\vec{r}') \frac{E_0(\vec{r}')}{E_0(\vec{R})}$$

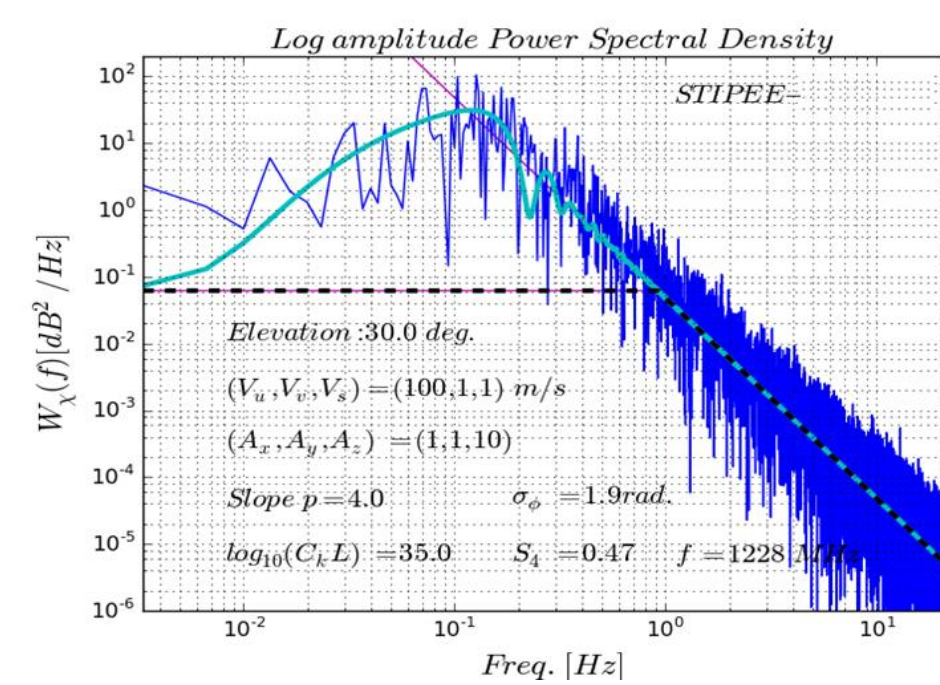


Fig. 5 : Exemples de validation des méthodes PWE - MPS et Rytov (amplitude ici)

Méthode PWE-MPS

$$\vec{E}(u, v, s + \delta s) = e^{i\phi(u, v, s)} TF^{-1} \left\{ e^{i\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2} \delta s} TF[\vec{E}(u, v, s)] \right\}$$

Écran de phase

$$\phi(u, v) = \int_s^{s+\delta s} \Delta n(u, v, \xi) d\xi = -\frac{r_s \lambda^{1+\delta}}{k_0} \int_s^{s+\delta s} \Delta N_e(u, v, \xi) d\xi$$

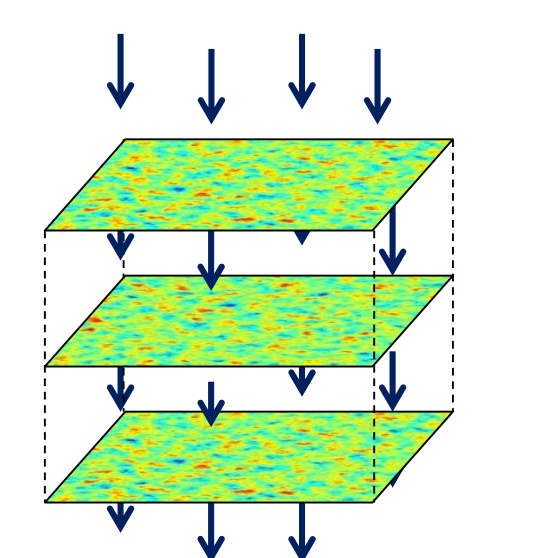


Fig. 4: Résolution itérative selon le schéma Split-Step Fourier

	Advantages	Drawbacks
PWE-MPS	Solution covering strong scattering regime and inducing coherence between frequencies when computing propagation through a frozen medium	Numerical criterion to respect can be problematic. Dimensional reduction (2D) imposed because 3D approach can necessitate too much space memory, but dimensional reduction induces limitations
Rytov formalism and generation of time series	No numerical criterion to consider for phase screen generation. The computation time is better than PWE-MPS.	Limited to weak scattering regime and no correlation between different frequencies

Table 1 : Comparaison des différents formalisme de calcul de la propagation

IV. Outil STIPEE

L'outil STIPEE permet de modéliser l'effet de scintillation ionosphérique sur les signaux EM, il est composé de :

- Un module trajectographie (STIPEE-TRAJ) décrivant la trajectoire orbitale et la géométrie de la liaison Terre-satellite. Ce module peut considérer les formats TLE ou YUMA.
- Un module géométrie (STIPEE-GEO), décrivant l'orientation des irrégularités, en particulier pour caractériser l'anisotropie, très influencée par le champ magnétique terrestre. Les modèles IGRF et AACGMV2 sont utilisés à basse et haute latitude respectivement pour modéliser le champ magnétique terrestre.
- Un module (STIPEE-CLIM) décrivant la variabilité climatologique de la densité spectrale de puissance (PSD) modélisant les inhomogénéités ionosphériques. A basses latitudes il est basé sur NeQuickG, à haute latitude des régressions spécifiques ont été réalisées.
- Un module propagation (STIPEE-PROP) basé sur les formulations de Rytov pour les PSD d'amplitude et de phase. Les indices σ_ϕ , S_4 et ROTI peuvent être calculés, et des séries temporelles générées.

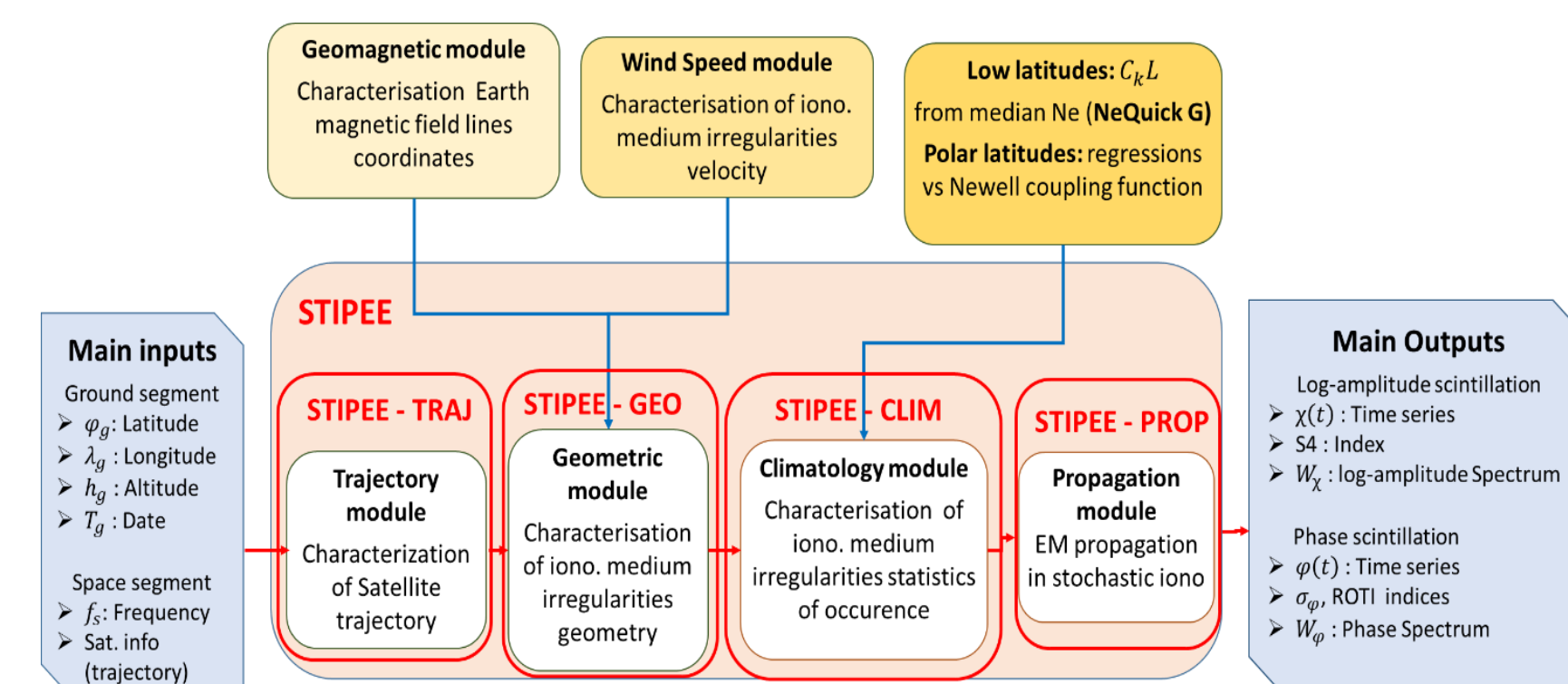


Fig. 11 : Diagramme décrivant l'architecture du modèle STIPEE.

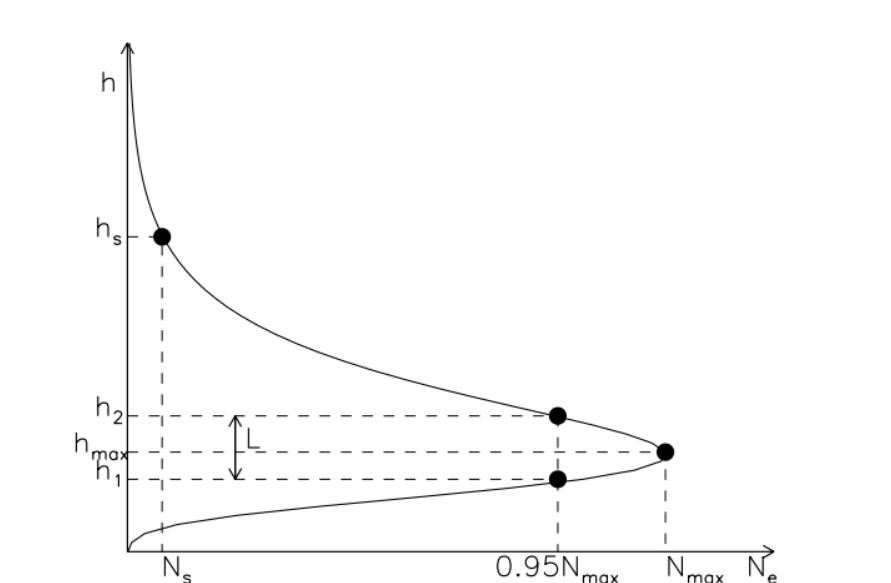


Fig. 12 : Définition de la couche des irrégularités à partir d'un modèle median d'ionosphère (Schéma de [Wernik et al., 2007]). Module STIPEE-CLIM à basse latitude.

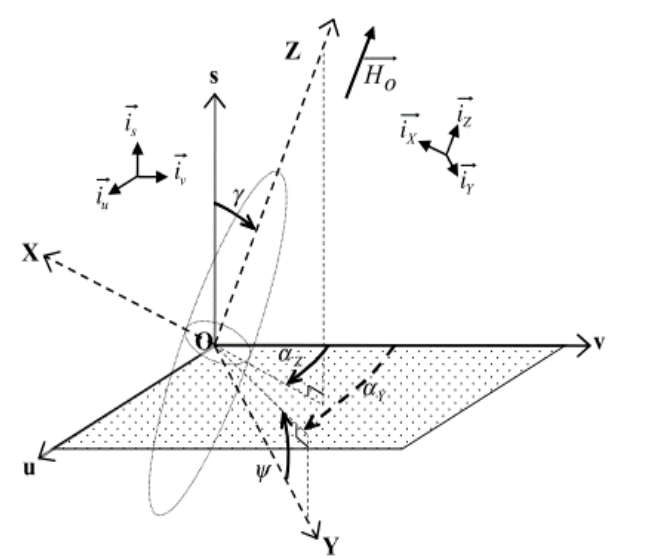


Fig. 13 : Géométrie conditionnée par le champ magnétique [Galiegue et al., 2016]. Module STIPEE GEO.

V. Conclusion & Perspectives

L'outil STIPEE propose aujourd'hui une modélisation complète des effets de la scintillation ionosphérique en bande L adapté aux besoins des utilisateurs GNSS. Il pourra être amélioré en particulier par confrontation à de nouvelles bases de données, en bande L ou à d'autres fréquences.

Remerciements

Une grande partie de ces travaux a été réalisée à travers des études R&T CNES ou dans le cadre de thèses co-financées par le CNES.