



Utilisation de simulations aux grandes échelles pour la propagation électromagnétique 2D en milieux turbulents réalistes

Victor Darchy, Rémi Douvenot, Stéphane Jamme, Hélène Galiègue

► To cite this version:

Victor Darchy, Rémi Douvenot, Stéphane Jamme, Hélène Galiègue. Utilisation de simulations aux grandes échelles pour la propagation électromagnétique 2D en milieux turbulents réalistes. Journées d'étude propagation radioélectriques 2023, Nov 2023, Rennes, France. hal-04252116

HAL Id: hal-04252116

<https://enac.hal.science/hal-04252116>

Submitted on 27 Oct 2023

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.

Utilisation de simulations aux grandes échelles pour la propagation électromagnétique 2D en milieux turbulents réalistes

Darchy Victor TELECOM-EMA/DRRP-DAEP ENAC, ISAE-Supaero, Toulouse Univ. Toulouse, France victor.darchy-ext@enac.fr	Douvenot Rémi TELECOM-EMA ENAC, Toulouse Univ. Toulouse, France remi.douvenot@enac.fr	Jamme Stéphane DRRP-DAEP ISAE-Supaero, Toulouse Univ. Toulouse, France stephane.jamme@isae-supaeo.fr	Galiègue Hélène TELECOM-EMA ENAC, Toulouse Univ. Toulouse, France helene.galiegue@enac.fr
---	---	--	---

I. INTRODUCTION

La couche limite atmosphérique marine (MABL) correspond à la couche la plus basse de l'atmosphère qui englobe la région proche de la surface de l'océan. Elle est le théâtre d'interactions complexes entre les différents phénomènes atmosphériques et les effets de diffraction liés à la rugosité de la surface de la mer. Ces perturbations peuvent avoir un impact non négligeable sur les communications radiofréquences (RF) et les systèmes radars. En particulier, la turbulence troposphérique se traduit par une perturbation chaotique des champs thermodynamiques qui entraîne des variations rapides de l'indice de réfraction. Le comportement aléatoire et multi-échelle de ce phénomène rend sa modélisation très complexe. Cependant, dans le cas de propagations en bande X sur de grandes scènes, ces petites fluctuations peuvent altérer à la fois la phase et l'amplitude du signal propagé [1] [2]. Une modélisation précise de la turbulence est donc cruciale pour quantifier et anticiper son impact sur le signal reçu.

Les méthodes split-step consistent à résoudre itérativement l'équation parabolique (EP) en 2 étapes distinctes [3]. À chaque pas de propagation, le champ électrique est d'abord propagé dans le vide. La contribution de l'atmosphère est ensuite appliquée à l'onde propagée sous la forme d'un déphasage. Celui-ci est modélisé par le biais d'un écran de phase théoriquement obtenu en intégrant les champs d'indice de réfraction sur le pas de propagation. La méthode de propagation par *stochastic multiple phase screens* (sMPS) est largement utilisée pour modéliser les effets de la turbulence atmosphérique sur la propagation des ondes électromagnétiques (EM) [1] [2]. Elle se fonde sur la théorie de Tatarski [4] qui considère l'écran de phase turbulent comme un processus stochastique pour lequel les variations de phase sont modélisées comme des variables aléatoires. Le comportement statistique de ces fluctuations de phase dues à la turbulence est ainsi décrit par un spectre de Kolmogorov. Bien que les spectres de Kolmogorov soient couramment utilisés, ils ne semblent pas rendre pleinement compte de toute la complexité de la turbulence atmosphérique réelle.

En effet, ce phénomène peut présenter différents comportements et propriétés statistiques en fonction de divers facteurs tels que l'altitude, la météo et la localisation géographique. Par conséquent, l'utilisation d'un modèle simplifié tel que celui proposé dans une majorité d'études pourrait ne pas fournir une représentation précise de la turbulence rencontrée dans des scénarios spécifiques. En particulier, la théorie de Kolmogorov suppose que la turbulence est localement homogène et isotrope. Dans une MABL, les échanges de chaleur et d'humidité entre l'atmosphère et la surface de l'océan présentent de forts gradients qui induisent d'importantes inhomogénéités verticales. Dans ces conditions, l'utilisation de spectres de Kolmogorov classiques semble au moins discutable. En effet, des études récentes ont mis en évidence l'impact non négligeable des inhomogénéités de la turbulence sur la propagation d'une onde EM [5]. De plus, les spectres de Kolmogorov ne décrivent que le comportement statistique des échelles situées dans le régime inertiel de l'écoulement turbulent qui peut être assez étroit.

L'objet de cette contribution est d'abord de présenter une méthode hybride de génération d'écrans de phase turbulents basée sur une génération du milieu par simulations aux grandes échelles (LES). Cette technique associe approche physique et modélisation stochastique du phénomène. Il est ensuite question de l'appliquer au cas d'une MABL tropicale et d'en déduire ses avantages et limites actuelles.

II. MÉTHODE

Pour capturer avec précision le comportement des écoulements turbulents aux grandes échelles, il est possible de générer des écrans de phase à l'aide LES de couche limite atmosphérique [6]. Cette méthode numérique de résolution des équations de Navier-Stokes vise à capturer les structures turbulentes à grande échelle tout en moyennant les effets des échelles plus petites, dites de sous-maille. La Figure 1 fournit une visualisation des fluctuations d'indice de réfraction obtenus à partir de la génération par LES de la MABL tropicale étudiée. Cette simulation a été réalisée à partir du code *open source* MicroHH [7]. Cette cartographie met notam-

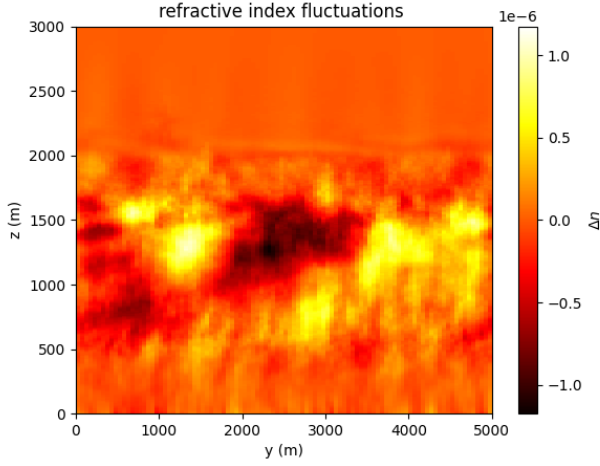


Fig. 1. Cartographie 2D d'un champ de fluctuation d'indice de réfraction obtenu à partir d'une LES de MABL tropicale.

ment en évidence l'inhomogénéité verticale de la turbulence dans le milieu étudié avec une concentration des fluctuations entre 500 m et 1500 m d'altitude. Cependant, en raison des limitations en capacité de calculs, la grille LES ne peut pas être aussi discrétisée que la grille de propagation aux fréquences considérées. Par conséquent, les échelles de sous-maille sont modélisées à partir de la théorie de Tatarski. Cette méthode, appelée *extended-LES* (X-LES) [6] consiste ainsi à considérer la phase turbulente Φ comme la combinaison de 2 contributions de sorte que

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_s. \quad (1)$$

Φ_r indique la contribution turbulente des échelles directement résolues par LES, c'est à dire l'ensemble des structures de dimension allant jusqu'au paramètre de maille de la simulation. Φ_s correspond au déphasage induit par les échelles de sous-maille. Il est ici généré selon la méthode sMPS à partir d'un spectre de Von-Karman Kolmogorov.

En somme, cette approche est une hybridation entre la turbulence générée par une approche physique (LES) pour les grandes échelles et une approche stochastique (sMPS) pour les petites échelles. D'un point de vue spectral, cette méthode revient à étendre le spectre de phase obtenu par LES jusqu'à des échelles plus fines afin d'atteindre la résolution de la grille de propagation. Cette notion d'extension est illustrée Figure 2 par un représentation schématique du spectre de phase S_Φ obtenu par X-LES.

III. PRINCIPAUX RÉSULTATS

Dans cette section, il est question de présenter de façon succincte les principaux résultats issus de la propagation d'un signal en bande X au travers d'écrans de phase turbulents générés par X-LES dans le cas d'une MABL tropicale.

Cette méthode a d'abord été éprouvée pour différentes valeurs de résolution verticale LES d_z allant de 50 à 1

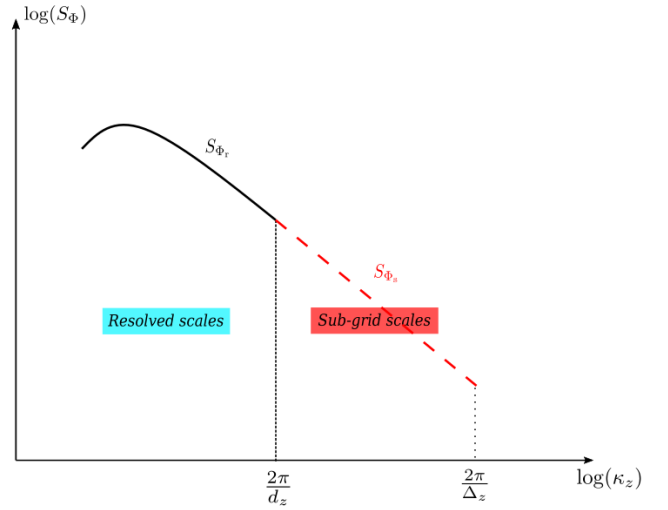


Fig. 2. Représentation spectrale de la méthode X-LES. d_z correspond à la résolution verticale LES tandis que Δ_z indique celle du domaine de propagation. κ_z est la composante verticale de la variable spectrale.

m [8]. L'objectif était d'étudier l'efficacité de l'hybridation par spectre de Von-Karman Kolmogorov. Cette étude a été menée par le biais d'une comparaison de profils de variance de log-amplitude σ_χ^2 présentée en Figure 3 et les courbes obtenues indiquent une réelle dépendance en d_z . Ces résultats montrent d'abord que l'hybridation par spectre de Von-Karman Kolmogorov homogène n'est pas optimale dans le cas d'une turbulence inhomogène rencontrée classiquement en CLA. Ensuite, les résultats obtenus dans [8] couplés à des approfondissements récents laissent penser que la variance de log-amplitude n'est pas une métrique adaptée à l'étude et à la quantification de l'impact d'une turbulence inhomogène. Des travaux sur d'autres métriques actuellement en cours de finalisation conduisent à des résultats originaux qui seront présentés lors du colloque. En particulier, l'influence de l'inhomogénéité verticale de la turbulence sera illustré.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et la Fédération de recherche ENAC ISAE-SUPAERO ONERA (FONISEN) pour le financement de cette étude. Ce travail a été réalisé en utilisant les ressources de calcul à haute performance (HPC) de CALMIP (Projet 2023-P22033).

REFERENCES

- [1] V. Fabbro and L. Feral. Comparison of 2D and 3D electromagnetic approaches to predict tropospheric turbulence effects in clear sky conditions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(9):4398–4407, 2012.
- [2] S. Mukherjee and C. Yardim. Accurate computation of scintillation in tropospheric turbulence with parabolic wave equation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(8):4748–4757, 2021.
- [3] J. R. Kuttler and G. D. Dockery. Theoretical description of the parabolic approximation/Fourier split-step method of representing electromagnetic propagation in the troposphere. *Radio science*, 26(2):381–393, 1991.
- [4] V. I. Tatarskii. *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*. Israel Programm for Scientific Translations, 1971.

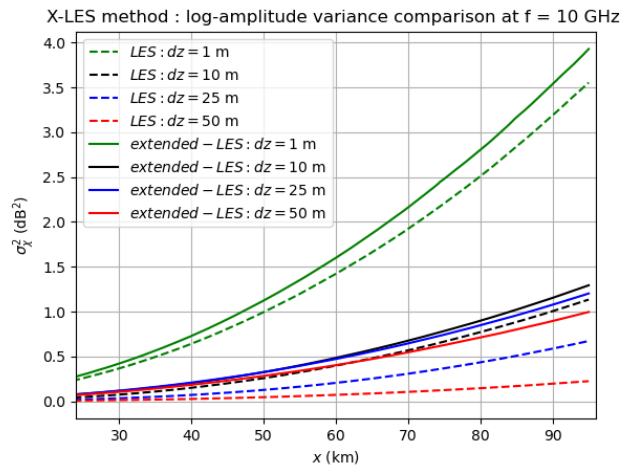


Fig. 3. Comparaison des profils de variances de log-amplitude obtenues via X-LES (traits pleins) vs LES (traits pointillés) pour $d_z = 50, 25, 10$ m.

- [5] M. Wagner, P. Gerstoft, and T. Rogers. Estimating refractivity from propagation loss in turbulent media. *Radio Science*, 51(12):1876–1894, 2016.
- [6] K. E. Gilbert, X. Di, S. Khanna, M. J. Otte, and J. C. Wyngaard. Electromagnetic wave propagation through simulated atmospheric refractivity fields. *Radio Science*, 34(6):1413–1435, 1999.
- [7] C. C. van Heerwaarden, B. J. H. van Stratum, T. Heus, J. A. Gibbs, E. Fedorovich, and J. P. Mellado. Microhh 1.0: a computational fluid dynamics code for direct numerical simulation and large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flows. *Geoscientific Model Development*, 10(8):3145–3165, 2017.
- [8] V. Darchy, R. Douvenot, S. Jamme, and H. Galiègue. Investigation on Vertical Resolution of Atmospheric Simulations for the Propagation in Realistic Turbulent Media. In *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Venice, Italy, October 2023.