

# Modélisation de la propagation en milieux inhomogènes basée sur les faisceaux gaussiens – Application à la propagation en atmosphère réaliste et à la radio-occultation entre satellites

Soutenance de thèse de *Charles-Antoine L' HOUR*

Mercredi 19 Avril à 10h00

Auditorium de l'ONERA  
2 Avenue Édouard Belin  
31400 Toulouse

## Jury

Mme Christine Letrou, INT, France	(rapporteur)
Mme Danielle Vanhoenacker-Janvier, Université Catholique de Louvain, Belgique	(rapporteur)
M. Alexandre CHABORY, ENAC, France	(codirecteur de thèse)
M. Vincent Fabbro, ONERA Toulouse, France	(encadrant)
M. Nicolas Floury, ESA/ESTEC, Pays-Bas	(examinateur)
M. Olivier Pascal, Université Paul Sabatier Toulouse, France,	(examinateur)
M. Jérôme Sokoloff, Université Paul Sabatier Toulouse, France	(directeur de thèse)

## Résumé

Le développement et l'utilisation des systèmes de détection ou de communication, tels que les radars ou les transmissions d'une station sol vers un aéronef, nécessitent de modéliser et de prévoir les phénomènes atmosphériques impactant leurs performances. Parmi ces phénomènes, la réfraction troposphérique joue un rôle important. Son effet sur les signaux GNSS transmis entre satellites peut également être exploité lorsque la liaison est occultée par la Terre (Radio Occultation). Une estimation des propriétés physiques des couches atmosphériques traversées par les signaux peut alors être effectuée. Pour des domaines de grandes dimensions, les méthodes classiques de modélisation de la propagation telles que l'Optique Géométrique et la méthode de l'Équation Parabolique souffrent d'une efficacité limitée. Le travail de recherche effectué dans le cadre de cette thèse a pour objectif de proposer un nouveau modèle de propagation 2D des ondes électromagnétiques en milieu inhomogène pour des problèmes à grande échelle, en utilisant le formalisme faisceau gaussien. Historiquement, ce formalisme a été introduit pour la conception de systèmes optiques, puis utilisé pour modéliser la propagation d'ondes sismiques, ainsi que pour l'étude de systèmes rayonnants.

Le travail de recherche est organisé en quatre parties. La première dresse un état de l'art des méthodes de propagation classiques, en se focalisant sur les hypothèses, avantages et limites de l'Optique Géométrique et de l'Équation Parabolique. Au regard de leurs limitations, le formalisme faisceau gaussien est proposé. La deuxième partie concerne le développement d'une nouvelle formulation du faisceau gaussien en milieu inhomogène, en supposant que le gradient d'indice de réfraction est vertical et constant. Ceci permet d'obtenir une description analytique (appelée GBAR, Gaussian Beam for Atmospheric Refraction) de la propagation d'un faisceau, ensuite validée par comparaison avec l'Équation Parabolique. La troisième partie rend compte de l'utilisation de la nouvelle formulation analytique en conditions troposphériques réalistes et pour un champ incident quelconque. Pour ce faire, le milieu de propagation réaliste est subdivisé en cellules élémentaires pour chacune desquelles est associé le gradient d'indice correspondant, considéré vertical et constant. De cette façon, les équations GBAR peuvent être utilisées pour décrire la propagation d'un faisceau de cellule en cellule en assurant la continuité des propriétés du faisceau. D'autre part, la formulation GBAR est complétée par la procédure de décomposition multi-faisceaux qui permet de décrire le champ en faisceaux élémentaires et ainsi de traiter la propagation en conditions difficiles telles qu'une forte inversion de gradient. Enfin, la méthode est appliquée à des grilles issues du modèle météo WRF (Weather Research and Forecasting). Les performances intéressantes de la méthode proposée sont constatées par rapport à la méthode de l'Équation Parabolique. La méthode ayant été validée et

s'avérant efficace sur de grands domaines, la quatrième et dernière partie s'attache à appliquer le formalisme développé à la Radio-Occultation. Plus précisément elle consiste à modéliser le problème direct de la propagation des signaux GNSS puis de leur inversion pour estimer le profil d'indice de réfraction aux périgées, c'est-à-dire les points les plus proches de la surface terrestre le long des trajectoires des signaux transmis entre un satellite GNSS et un satellite LEO. La méthode est d'abord validée sur un cas canonique, puis appliquée à un cas réaliste. L'erreur induite par le modèle d'inversion testé est de l'ordre de 10 % sur les cas considérés.

L'étude est conclue par une synthèse des travaux et une mise en perspectives. Parmi les axes de recherches proposés figurent l'optimisation de la méthode, l'étude de la propagation sur toute une bande de fréquences, la prise en compte du relief et l'extension du modèle au 3D. Il serait également intéressant d'étudier l'ajout, dans le modèle, de la scintillation atmosphérique qui impacte les signaux GNSS dans l'ionosphère ainsi que des signaux de plus hautes fréquences dans la troposphère. Enfin, le modèle proposé n'est pas restreint aux applications atmosphériques, et il pourrait être intéressant de le porter sur des problématiques mécaniques, optiques ou acoustiques.

### **Mots-clés**

Propagation, Modélisation, Équation parabolique, Optique Géométrique, Faisceaux gaussiens, Réfraction troposphérique, Modèle météo WRF, Décompositions multi-faisceaux, Radio-Occultation.