Simulation de l'influence d'éoliennes sur un signal VOR

Ludovic Claudepierre, Rémi Douvenot, Christophe Morlaas

▶ **To cite this version:**

Ludovic Claudepierre, Rémi Douvenot, Christophe Morlaas. Simulation de l'influence d'éoliennes sur un signal VOR. GdR Ondes 2013, Assemblée générale "Interférences d'Ondes", Oct 2013, Dijon, France. hal-01073392

HAL Id: hal-01073392
https://enac.hal.science/hal-01073392

Submitted on 9 Oct 2014

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.

Simulation de l'influence d'éoliennes sur un signal VOR

L. Claudepierre[1], R. Douvenot[1] , C. Morlaas[1]
[1] : *ENAC / TELECOM-EMA,*
claudepierre@recherche.enac.fr

Résumé
Cet article présente une méthode efficace de simulation de l'erreur VOR induite par des obstacles de type éolien. Ce simulateur utilise l'équation parabolique pour traiter la partie propagation et l'optique physique pour traiter la diffraction. Ces choix sont argumentés et les méthodes d'hybridation détaillées. Un exemple sur le cas concret d'une éolienne implantée à proximité d'un VOR illustre le fonctionnement du simulateur. Considérant les grandes dimensions du problème, la rapidité de la méthode doit être soulignée.

1. Introduction

Le VOR (VHF Omnidirectional Range) est un dispositif au sol émettant un signal électromagnétique de 108 à 118 MHz permettant aux avions de s'orienter en azimut dans l'espace aérien. Ce travail se concentre sur le VOR conventionnel où l'information d'azimut est modulée en amplitude.

Comme tout dispositif électromagnétique, le VOR est sensible à la présence d'objets métalliques dans son environnement, ceux-ci créant alors des multitrajets et perturbant le signal utile lors de la réception. En effet, ces multitrajets induisent une erreur sur l'information d'azimut lors de la démodulation. L'éolienne est un bon exemple d'obstacle diffractant puisque son mât est métallique et a des dimensions très grandes. Le simulateur présenté permet de quantifier cette gène en terme d'erreur en azimut.

2. Présentation du simulateur

Le synopsis du simulateur est présenté figure 1. L'éolienne est constituée d'un mât et d'une nacelle métalliques, et de pales diélectriques.

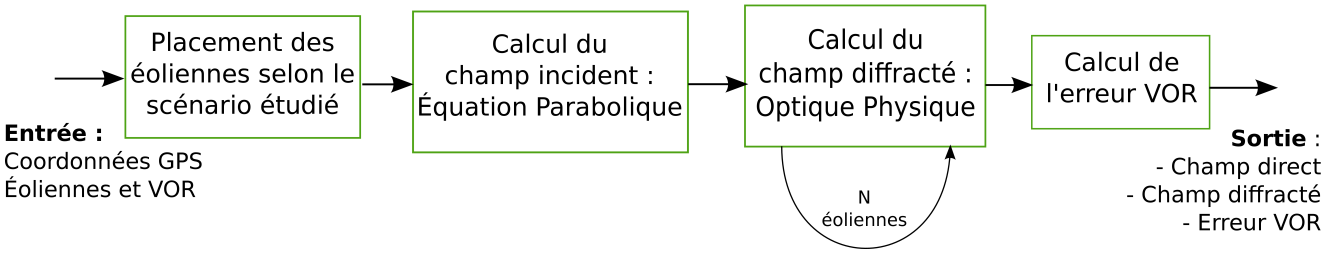

Figure 1. Schéma bloc du simulateur développé.

Pour prendre en compte la propagation de l'onde VOR de la source jusqu'à l'éolienne, l'équation parabolique 2D [1][2] est utilisée. La scène est donc supposée invariante en azimut, le coefficient de réflexion homogène au sol, et la puissance rétrodiffusée négligeable. Le diagramme de rayonnement de l'antenne et le relief (peu accidenté) sont pris en compte. Cette dernière hypothèse est peu contraignante car les VOR sont généralement implantés en plaine.

En vue d'un calcul d'optique physique, l'éolienne est maillée. Le champ incident précédemment calculé sur l'axe vertical du mât de l'éolienne est alors interpolé sur ce maillage.

Le calcul de la diffraction se fait grâce à la méthode de l'optique physique [3] en faisant rayonner le champ incident sur chaque facette. Les points d'observation sont en champ lointain de chaque facette, et la courbure de chacune d'elle est considérée petite (distance entre maillage et contour réel $\leq \lambda/10$). Cette méthode est plus rapide que la méthode des moments et validée pour cette application [4].

Une fois le champ diffracté calculé, les multitrajets sont regroupés d'après leur azimut d'origine afin de simplifier le calcul de l'erreur. L'hybridation entre équation parabolique et optique physique rend la simulation peu coûteuse en temps de calcul par rapport à la taille de la géométrie [4].

L'erreur VOR est calculée d'après l'expression (1) dans laquelle a_n représente l'amplitude relative des multitrajets par rapport au signal direct, θ_0 et θ_n les phase RF du signal direct et du $n^{\text{ième}}$ multitrajet, respectivement. Enfin, φ_0 et φ_n représentent leurs azimuts respectives. L'évolution de l'erreur VOR due aux multitrajets causés par les éoliennes est alors obtenue aux points d'observations. Ce calcul, inspiré de [5], donne

$$\varepsilon_{Var}^{c} = \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} a_n \cos(\theta_n - \theta_0)\sin(\phi_n - \phi_0)}{1 + \sum_{i=1}^{N} a_n \cos(\theta_n - \theta_0)\cos(\phi_n - \phi_0)} \right). \quad (1)$$

3. Simulations

Afin de tester notre programme sur un cas concret, le scénario d'Allersberg (représenté figure 2) dont nous disposons des contrôles en vol (CEV) [6] est simulé. L'éolienne est de type Enercon E66 avec un mât de hauteur 65 m, de diamètre 4.1 m au sol et 2.1 m au sommet. Elle est considérée statique sur cette simulation et les pales (35 m) orientées faces au VOR. Les résultats de simulation sont obtenus figure 3 et sont comparés aux mesures figure 4.

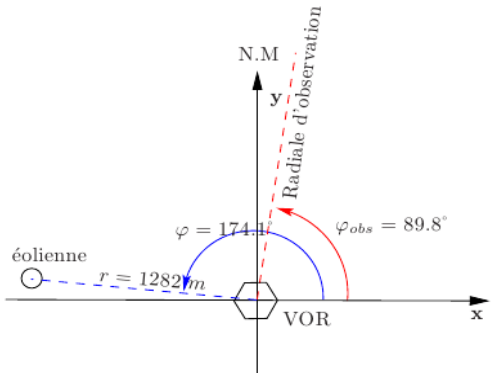

Figure 2 : Scénario à simuler : le VOR d'Allersberg.

L'ordre de grandeur des résultats de la simulation correspond bien à celui de la mesure CEV avec une légère surestimation de 1.5°. En approfondissant et en regardant les zéros de l'erreur VOR, nous constatons qu'ils correspondent pour une distance au VOR de 22 Nm à 34 Nm. À l'approche du VOR un léger décalage de l'oscillation de l'erreur VOR apparaît. Il peut être dû à de légers écarts de trajectoire (présence d'un léger offset sur la mesure CEV). La différence d'amplitude peut être attribuée à la présence d'arbres entre le VOR et l'éolienne qui n'ont pas été pris en compte lors de la simulation.

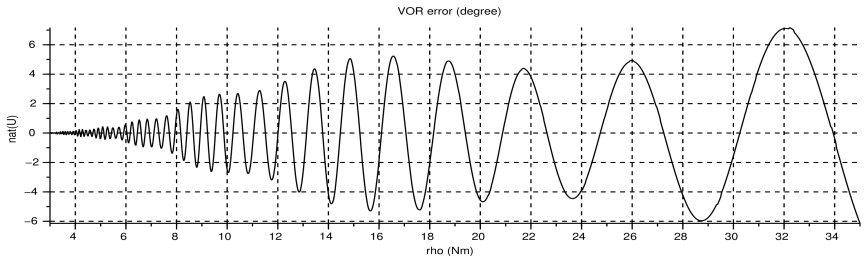

Figure 3 : Erreur VOR obtenue par simulation.

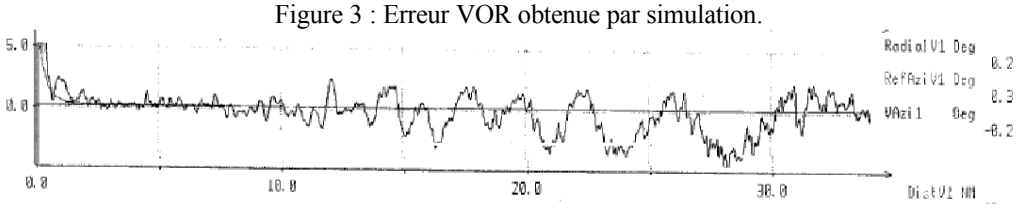

Figure 4 : Erreur VOR obtenue par contrôle en vol.

4. Conclusion

Dans cet article nous avons présenté le fonctionnement du simulateur permettant d'obtenir l'erreur VOR provoquée par la présence d'une ou plusieurs éoliennes. Nous avons illustré notre propos au travers de l'exemple concret du VOR d'Allersberg avec des résultats satisfaisants. Le simulateur peut être amélioré par la prise en compte des multiréflexions sur l'éolienne, de l'effet de masquage et du mouvement de rotation des pales.

5. Bibliographie

[1] G. D. Dockery and J. R. Kuttler. *An improved impedance-boundary algorithm for Fourier split-step solutions of the parabolic wave equation*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 44 :1592–1599, 1996.

[2] Chabory, A.; Morlaas, C.; Douvenot, R.; Souny, B., *"An exact spectral representation of the wave equation for propagation over a terrain",* Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2012 International Conference on , 717-720, 2-7 Sept. 2012

[3] S. W. Lee and R. Mittra. *"Fourier transform of a polygonal shape function and its application in electromagnetics"*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 31 :99–103, 1983.

[4] Morlaas, C.; Chabory, A.; Souny, B., *"Propagation model for estimating VOR bearing error in the presence of windturbines — Hybridation of parabolic equation with physical optics",* Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on , 12-16 April 2010.

[5] Odunaiya, S.; Quinet, D., *"Calculations and analysis of signal processing by various navigation receivers architectures"* Digital Avionics Systems Conference, 2004. DASC 04. The 23rd , 1 :11-13, 1 :24-28 Oct. 2004

[6] *DFS report of flight check results of a conventional VOR /DME station in the environment of a nearby wind turbine*. Technical report, Navcom for the Deutsche Flugsicherung, 2007.

Ce travail a été financé par la DTI - DGAC.