

# Modélisation de la diffusion des ondes électromagnétiques par des vagues côtières déferlantes en utilisant la Méthode des Moments d'Ordre Élevé

R. Khairi, A. Coatanhay, A. Khenchaf

Lab-STICC UMR CNRS 6286, ENSTA Bretagne

2 rue François Verny, 29806 Brest cedex 9, France

E-mail : [refzul.khairi, arnaud.coatanhay, ali.khenchaf]@ensta-bretagne.fr

**Résumé** — Dans ce papier, nous modélisons la diffusion des ondes électromagnétiques par des vagues côtières déferlantes à forte courbure, dans la bande-L. Nous présentons la méthode des moments d'ordre élevé combinée avec un maillage de type NURBS (Non Uniform Rational Basis Splines) pour étudier, analyser et apporter des solutions à ce problème.

## I. INTRODUCTION ET MOTIVATION

En 2008, le projet MOPS (Marine Opportunity Passive Systems) regroupant plusieurs organismes (ENSTA Bretagne, IFREMER, TELECOM Bretagne, SHOM,...) a été lancé [1]. Ce projet a pour objet l'observation océanographique de la surface maritime côtière utilisant des sources électromagnétiques passives provenant des satellites GNSS.

L'un des enjeux majeurs de ce projet est de modéliser le plus précisément possible le champ électromagnétique diffusé par des vagues dynamiques en environnement côtier. En terme électromagnétique, il s'agit de modéliser l'interaction d'une onde EM avec une surface en mouvement (du type diélectrique fortement conducteur), et ceci dans la bande de fréquence L ( $\lambda = 20$  cm) et pour un observateur situé proche de la surface (champ proche).

## II. MODÉLISATION DES VAGUES CÔTIÈRES

La caractéristique fondamentale des vagues côtières est que leur dynamique (et donc leur géométrie) dépend de façon très importante de la variation du fond marin. Lorsque la vague se rapproche de la côte, la profondeur décroît rapidement. La vague finit par perdre son équilibre et déferle, même avec des conditions de vents faibles ou modérés. La mécanique des fluides impose en fait que la structure du déferlement de la vague dépend essentiellement du gradient de bathymétrie de la côte. La figure (1) illustre les profils successifs d'une vague déferlante au dessus d'une plage de forme parabolique. Ces résultats sont issus du code FSID (Free Surface IDentification) développé dans le cadre de la théorie potentielle (fluide parfait, incompressible et écoulement irrotationnel). La résolution numérique s'appuie sur une technique dite désingularisée, qui offre une grande robustesse pour le suivi de vagues fortement non linéaires.

Dans ce contexte, l'importance de la courbure des vagues déferlantes fait que les modélisations électromagnétiques classiques par intégrale de frontière ne sont plus efficaces.

## III. MODÉLISATION DES ONDES DIFFUSÉES

La méthode des moments (MoM) est devenue une approche numérique incontournable pour modéliser la diffusion des ondes électromagnétiques. Les étapes standards de la méthode MoM sont : 1) Expression du problème électromagnétique sous la forme des équations intégrales, 2) Discrétisation des équations intégrales en utilisant les fonctions

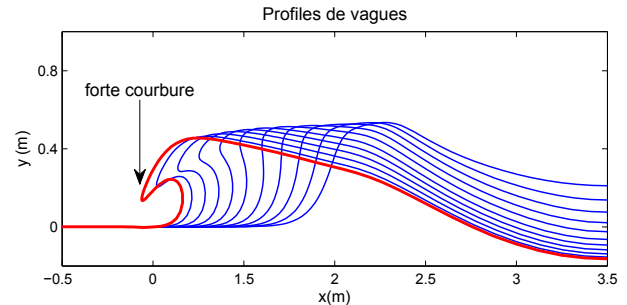


FIGURE 1. Profils successifs d'une vague déferlante au dessus d'une plage de forme parabolique (code FSID) [2].

de base et fonctions de test, 3) Résolution des équations linéaires.

Dans le cas de diffuseur parfaitement conducteur, le système est présenté sous forme les Équations Intégrales des Champs Électriques (IECE) et les Équation Intégrales des Champs Magnétiques (EICM) suivantes :

$$\hat{n} \times \vec{E}^{inc}(\vec{r}) = \hat{n} \times \left[ i\omega\mu \int \vec{J}_s G d\vec{r}' - \frac{1}{i\omega\epsilon} \nabla \cdot \int (\nabla' \cdot \vec{J}_s) G d\vec{r}' \right] \quad (1)$$

$$\hat{n} \times \vec{H}^{inc}(\vec{r}) = \frac{\vec{J}_s(\vec{r})}{2} - \hat{n} \times \int \vec{J}_s \times \nabla' G d\vec{r}' \quad (2)$$

où  $\vec{E}^{inc}$  et  $\vec{H}^{inc}$  sont les champs électrique et magnétique incidents,  $\vec{J}_s$  est le courant surfacique,  $G$  est la fonction de Green,  $\mu$  et  $\epsilon$  sont la perméabilité magnétique et la permittivité électrique,  $\hat{n}$  est le vecteur normal sur la surface,  $\vec{r}$  et  $\vec{r}'$  sont les points d'observation et de sources.

Dans l'approche classique, la discrétisation est faite par un maillage linéaire. La fonction de base et de test sont des fonctions de type pulse ou triangle. Cependant, dans le cas de surface possédant de fortes courbures [3], la méthode MoM classique implique de graves problèmes de convergence.

Afin de résoudre cette difficulté, nous allons considérer une méthode des moments d'ordre élevé (HO-MoM) où les fonctions de base sont des polynômes d'ordre arbitraire [4]. Par ailleurs, la géométrie de surface ne sera plus maillée par des segments linéaires mais sera décrite par des « Non Uniform Rational Basis Splines » (NURBS). La méthode HO-MoM combinée avec le maillage NURBS constitue une approche très puissante dont les avantages sont récemment étudiés [5, 6, 7]. À titre d'illustration, la figure (2) montre les représentations de cercle et sphère en NURBS.

Pour justifier le bien-fondé de l'approche MoM+NURBS pour des géométries courbes, nous prenons pour référence la diffusion par un cercle en polarisation horizontale. L'onde incidente est de longueur  $\lambda = r$  et le cercle est maillé avec un pas  $dL = \lambda$ . Nous montrons que l'augmentation de l'ordre dans une approche HO-MoM+NURBS permet une convergence efficace dans l'estimation du courants de surface malgré le pas de discrétisation important et la courbure, voir figure (3). Une étude plus détaillée est fournie en [8].

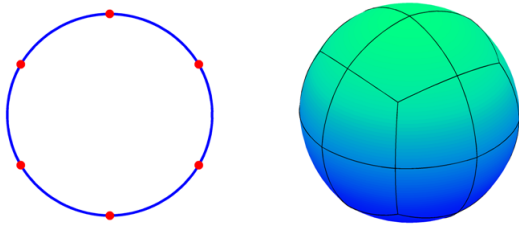


FIGURE 2. Représentation en NURBS (i) cercle avec 6 courbes (ii) sphère avec 24 surfaces

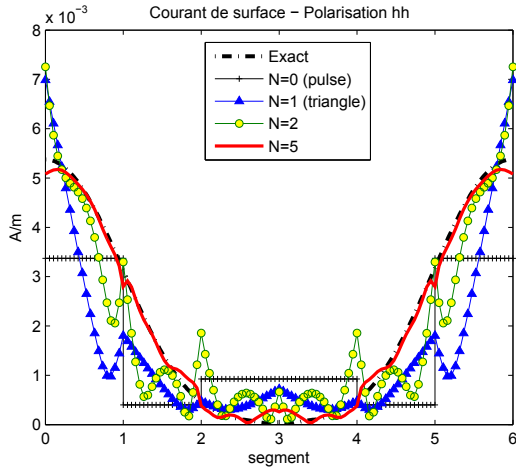


FIGURE 3. Courant de surface sur le cercle discrétisé en 6 segments de NURBS

#### IV. RÉSULTATS NUMÉRIQUES

La validité de notre approche étant établie, nous considérons la modélisation numérique des ondes diffusées par des vagues déferlantes. Les différents profils de vagues sont donnés à la figure (1). Nous nous intéressons plus particulièrement au profil dont la courbure est la plus forte. La méthode HO-MoM+NURBS permet de modéliser la diffusion à proximité de ce profil, voir la figure (4).

Enfin, nous donnons, pour les champs lointains, la surface équivalente radar (SER) à la figure (5).

D'autres simulations et résultats d'analyse dans d'autres configurations seront présentés lors de la conférence, permettant ainsi de bien démontrer les performances et la robustesse de la méthode développée dans ce travail.

#### RÉFÉRENCES

- [1] A. Coatanhay, R. Garelo, B. Chapron, and F. Arduin, "Project MOPS - Marine Opportunity Passive Systems," in *Passive '08*, Hyères, 2008.
- [2] Y. M. Scolan, "Some aspects of the flip-through phenomenon : A numerical study based on the desingularized technique," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 26, pp. 918–953, 2010.
- [3] C. Davis and K. Warnick, "Error analysis of 2-D MoM for MFIE/EFIE/CFIE based on the circular cylinder," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 321 – 331, 2005.
- [4] E. Jorgensen, J. L. Volakis, P. Meincke, and O. Breinbjerg, "Higher order hierarchical legendre basis functions for electromagnetic modeling," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 2985–2995, 2004.
- [5] Z. L. Liu and J. Yang, "Analysis of electromagnetic scattering with higher-order moment method and NURBS model,"

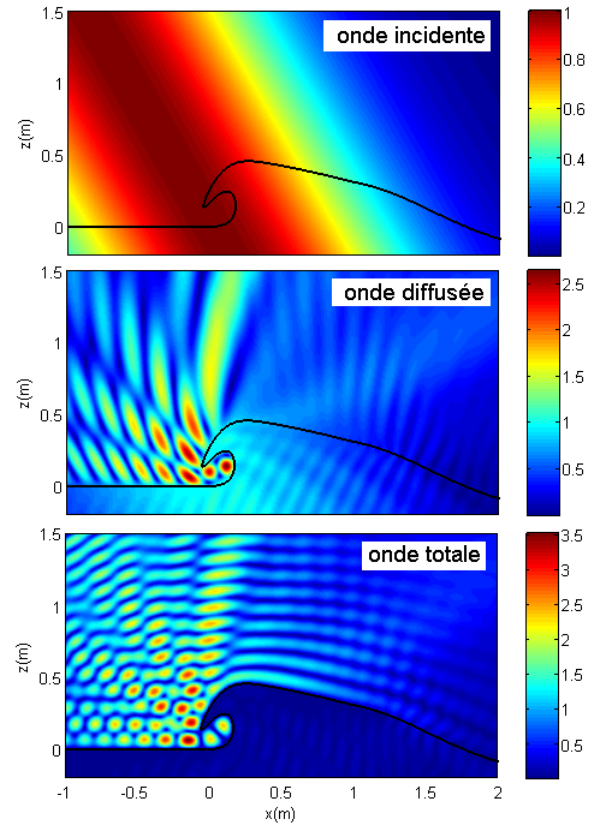


FIGURE 4. Les ondes électromagnétiques (i) onde incidente (ii) onde diffusée (iii) onde totale

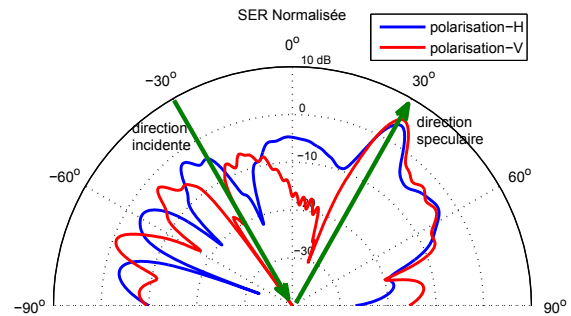


FIGURE 5. Surface Équivalente Radar

*Progress in Electromagnetic Research*, vol. 96, pp. 83–100, 2009.

- [6] L. Valle, F. Rivas, and M. F. Catedra, "Combining the moment method with geometrical modelling by NURBS surfaces and Bézier patches," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 373–381, 1994.
- [7] H. Yuan, N. Wang, and C. Liang, "Combining the higher-order method of moments with geometric modelling by NURBS surfaces," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3558–3563, 2009.
- [8] R. Khairi, A. Coatanhay, and A. Khenchaf, "A 2D high-order method of moments combined with NURBS," 2012, *Progress in Electromagnetic Research* (soumis).
- [9] W. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*. Chapman & Hall/CRC, 2008.
- [10] H. W. Melief, "Dynamic modelling of radar clutter," Ph.D. dissertation, Technische Universiteit Delft, 2006.
- [11] A. F. Peterson, S. L. Ray, and R. Mittra, *Computational Methods for Electromagnetics*. IEEE Press, 1998.