

Modélisation de la diffusion électromagnétique par trois types de vagues côtières déferlantes : glissant, plongeant, gonflant

Refzul Khairi, Arnaud Coatanhay, Ali Khenchaf

Lab-STICC UMR CNRS 6285

ENSTA Bretagne, 2 Rue François Verny, 29806 Brest Cedex 09

Refzul.Khairi@ensta-bretagne.fr : correspondant

Arnaud.Coatanhay@ensta-bretagne.fr

Ali.Khenchaf@ensta-bretagne.fr

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'interaction des ondes électromagnétiques en bande L avec les vagues côtières déferlantes (selon différents types, glissant, plongeant et gonflant) et cela pour un observateur situé à proximité de la surface. Le travail s'attache à réaliser une modélisation électromagnétique permettant de calculer le champ diffusé par les vagues en s'appuyant sur les phénomènes hydrodynamiques.

1. Introduction

La caractérisation de l'environnement et la reconnaissance de cibles constituent deux volets importants dans le domaine de la télédétection. Pour mener à bien cette tâche, il est nécessaire de connaître parfaitement les caractéristiques des champs électromagnétiques diffusés par les différents objets et cibles présents dans une zone d'intérêt. Dans un contexte maritime, cette reconnaissance consiste entre autre à distinguer les objets flottants (comme un bateau) et les phénomènes naturels (comme les vagues).

Plusieurs études antérieures ont montré que la signature électromagnétique des vagues déferlantes pouvait varier comme celle d'un objet flottant. Dans les deux cas, nous devons considérer le mouvement des objets. On peut néanmoins noter une différence significative dans le fait que les vagues déferlantes subissent une déformation de leur géométrie au cours du temps contrairement à un objet flottant manufacturé.

L'étude de la diffusion par les vagues déferlantes s'avère complexe dans la mesure où la modélisation du problème doit tenir compte à la fois l'aspect électromagnétique (calcul des champs diffusés) et l'aspect hydrodynamique (étude du mouvement des vagues). Dans ce travail, nous essayons de montrer comment une approche associant l'électromagnétisme et l'hydrodynamique permet d'aboutir à une modélisation significative et réaliste du problème.

Il est à noter que ce travail s'inscrit dans le cadre du projet MOPS (Marine Opportunity Passive Systems) [1], soutenu par la Région Bretagne, pour lequel les observations électromagnétiques utilisent et exploitent les signaux GPS (Bande L) pour un observateur situé à

proximité de la surface (quelques dizaines de mètres en hauteur) en zone côtière.

2. Modélisation des vagues côtières

Lorsqu'une vague se propage vers la côte, à cause de sa non-linéarité, cette vague peut perdre sa stabilité et peut se mettre à déferler. Nous pouvons distinguer trois cas de déferlement standard :

- Déferlement glissant
- Déferlement plongeant
- Déferlement gonflant

Aucune résolution analytique satisfaisante n'a été développée pour modéliser le phénomène de déferlement. La modélisation numérique dans ce domaine a cependant connu beaucoup de progrès récents.

Dans ce travail, les profils des vagues déferlantes sont générés en utilisant le code FSID. Ce code de calcul est basé sur la Méthode Desingularisée combinée avec la transformation conforme [2,6].

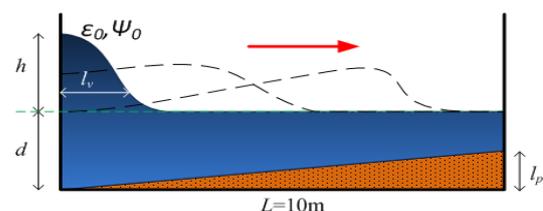


Figure 1. Configuration de simulation hydrodynamique

La configuration de simulation hydrodynamique est montrée dans la figure (1). Nous considérons un réservoir d'eau de largeur $L=10m$. Le profil de vague initiale correspond à une surface mi-gaussienne caractérisée par sa hauteur (h), sa profondeur (d) et son écart type (lv). Nous notons également (lp) la hauteur de la pente du réservoir. En faisant varier les paramètres h , d , lv et lp , nous obtenons trois types de déferlement standard qui font l'objet de notre étude et qui seront analysés dans le cadre de la diffusion électromagnétique.

3. Modélisation des champs diffusés

La surface de mer est un espace ouvert que l'on peut réduire en première approximation à une simple interface air-eau salée. Le problème de diffusion par cette surface peut être modélisé via l'Equation Intégrale du Champ Electrique (EICE) ou l'Equation Intégrale du Champ Magnétique (EICM) suivantes :

$$\hat{n} \times \mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}) = \hat{n} \times \left\{ i\omega\mu_A \int \mathbf{J}_s G d\mathbf{r}' - \frac{1}{i\omega\epsilon_A} \nabla \int (\nabla' \cdot \mathbf{J}_s) G d\mathbf{r}' \right\} \quad (1)$$

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

où \mathbf{E} et \mathbf{H} sont respectivement les champs électrique et magnétique, \mathbf{J} est le courant électrique, G est la fonction de Green, \mathbf{n} est le vecteur normal à la surface.

La méthodologie incontournable pour résoudre numériquement ces équations intégrales est la Méthode des Moments (MmM). La modélisation par la méthode MmM passe avant tout par la détermination des courants de surface à partir de l'onde incidente. Une fois les courants de surface déterminés, nous pouvons calculer

les champs diffusés partout dans l'espace en utilisant les formulations suivantes :

$$\mathbf{E}^{dif}(\mathbf{r}) = \int \left\{ -i\omega\mu \mathbf{J}_s G - \frac{(\nabla' \cdot \mathbf{J}_s)}{i\omega\epsilon} \nabla' G \right\} d\mathbf{r}' \quad (3)$$

$$\mathbf{H}^{dif}(\mathbf{r}) = \int \{ \mathbf{J}_s \times \nabla' G \} d\mathbf{r}' \quad (4)$$

Dans une forme plus élaborée, la méthode MmM d'Ordre Supérieur combinée avec la technique de maillage NURBS (Non Uniforme Rational Basis Spline) peut être envisagée pour améliorer la performance de la méthode MmM-Classique [3,4]. Cette dernière méthode est utilisée dans notre simulation et est présentée plus en détail dans [5].

4. Simulation numérique et résultats

Pour illustrer l'évolution des champs diffusés en fonction du temps, nous considérons trois cas de déferlement standard : gonflant, glissant et plongeant. La salinité étant élevée, l'eau de mer sera considérée comme conducteur parfait. Nous faisons varier ensuite les angles incidents en considérant les valeurs : -45° , 0° , 45° .

4.1. Déferlement gonflant

Nous commençons à étudier les vagues déferlantes de type gonflant car celles-ci ont la forme la plus simple (absence de la crête et de la cavité). Les profils de vagues sont obtenus avec les paramètres suivants : la largeur du domaine ($L = 10m$), la pente du fond ($lp = 0,5m$), la profondeur de la vague ($d = 1m$), la hauteur de la vague ($h = 3m$), la largeur de la vague initiale ($lv = 2m$). La figure (2) montre l'évolution des vagues en fonction du temps.

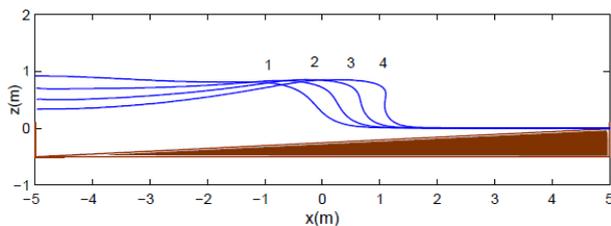


Figure 2. Vagues déferlantes gonflantes

Avec la théorie de rayon, nous pouvons prédire les caractéristiques des champs EM diffusés par ce type de vagues pour différents angles incidents. En effet, le «dos» des vagues a une forme plutôt plane ce qui orientera le champ dans la direction spéculaire. Cependant sur la « face » des vagues, il existe une forme concave qui a tendance à focaliser les champs diffusés dans une direction. Ce phénomène se produit notamment sous l'angle incident à 45° .

En utilisant la méthode des Moments, nous calculons les champs diffusés pour les profils 1 et 4. Nous constatons que pour un point assez éloigné de la surface, la direction de diffusion confirme bien la théorie des rayons, ceci n'est pas le cas pour un point proche de la surface. Nous remarquons également l'apparition d'un phénomène d'interférence d'ondes sur la face des vagues et ceci pour tous les angles incidents.

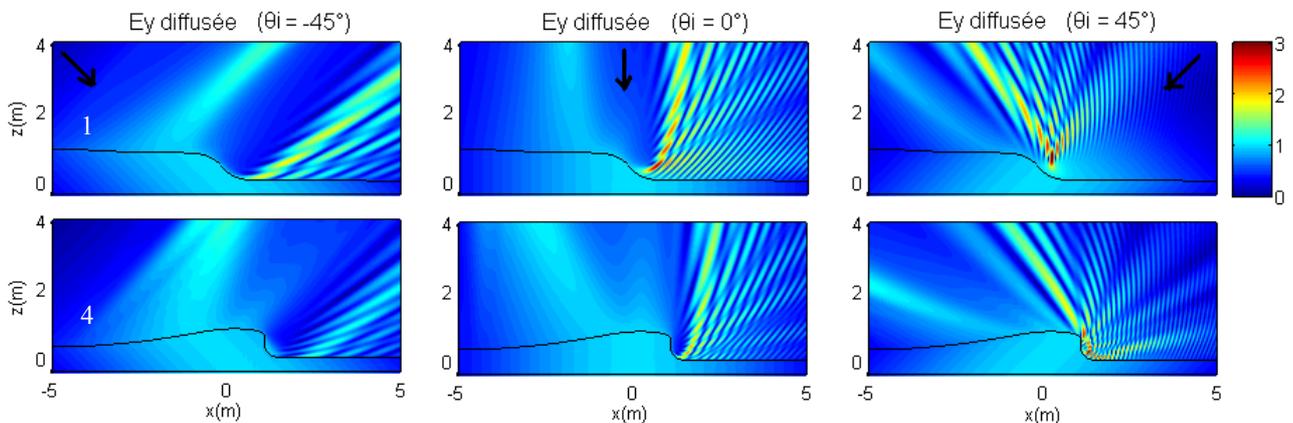


Figure 3 : Champs diffusés par les vagues déferlantes gonflantes (profils 1 et 4 pour les angles incident $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$)

4.2. Déferlement glissant

Les profils de vagues déferlantes de type glissant utilisés dans la simulation sont montrés dans la figure (4). Ces profils sont obtenus avec les paramètres : la largeur du domaine ($L = 10m$), la pente du fond ($lp = 0,1m$), la profondeur de la vague ($d = 1m$), la hauteur de la vague ($h = 2m$), la largeur de la vague initiale ($lv = 2m$). En considérant les 4 profils dans la figure, nous observons l'apparition de la crête des vagues.

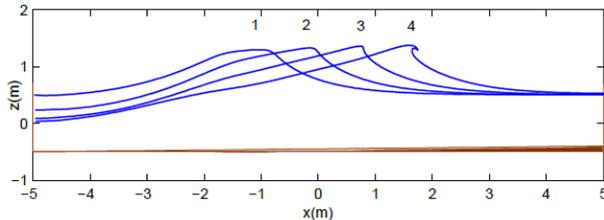


Figure 4. Vagues déferlantes glissantes

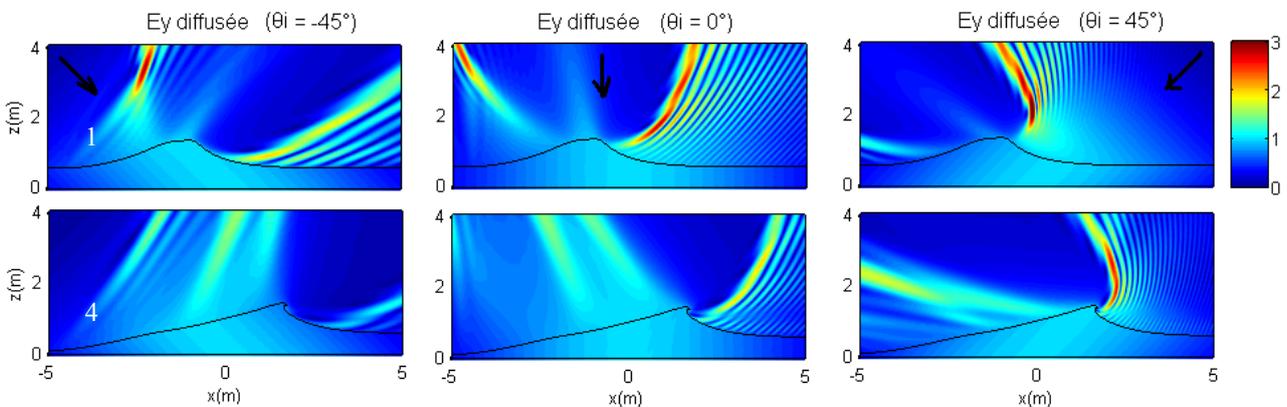


Figure 5 : Champs diffusés par les vagues déferlantes glissantes (profils 1 et 4 pour les angles incident $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$)

4.3. Déferlement plongeant

Les profils illustrant les vagues déferlantes de type plongeant utilisés dans notre simulation sont montrés dans la figure (6). Ces profils sont obtenus avec les paramètres : la pente du fond ($lp = 0,5m$), la profondeur de la vague ($d = 1m$), la hauteur de la vague ($h = 2m$), la largeur de la vague initiale ($lv = 2m$). Dans les profils 1 à 3, nous constatons que la surface devient de plus en plus courbée avec l'apparition d'une cavité. Dans le profil 4, cette cavité est presque fermée avant de disparaître complètement.

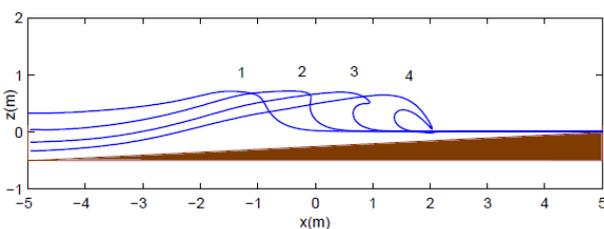


Figure 6. Vagues déferlantes plongeantes

En se basant sur la théorie de rayon, la concentration des champs EM diffusés doit être plus importante dans la zone proche de la crête. Pour vérifier cette théorie, nous calculons les champs diffusés en utilisant la méthode MdM.

Les champs diffusés pour les profils 1 et 4 sont présentés dans la figure (5). Comme dans le cas du déferlement gonflant, pour trois angles incidents, nous remarquons l'apparition des phénomènes d'interférence sur la face des vagues, ce qui est dû à la forme concave de la surface qui focalise les champs. Cette concentration des champs est plus importante que celle de déferlement gonflant. La forme de « langue » des champs est très courbée.

Sur le dos des vagues, la forme de la surface est plutôt convexe ce qui diffuse les champs dans plus de directions.

En plus du phénomène de la diffraction d'onde sur la crête qui est présente dans le déferlement glissant, la diffusion par une vague déferlante plongeante implique un phénomène électromagnétique particulier lié à la cavité de la vague.

Dans la figure (7), nous présentons les champs diffusés pour les profils 1 à 4. Comme dans le cas des deux types de déferlement précédents, nous remarquons que sur la face des vagues, il apparaît une interférence d'onde. Pour l'angle incident de -45° , la crête et la cavité des vagues ne sont pas détectées. Les champs totaux dans la cavité sont nuls comme pour l'eau salée.

En utilisant les angles incidents de 0° et 45° , nous pouvons détecter la crête des vagues. Le phénomène de « réflexion multiple » dans la cavité des vagues sera particulièrement visible pour l'angle incident de 45° . Ceci se traduit par la concentration des champs diffusés dans cette région.

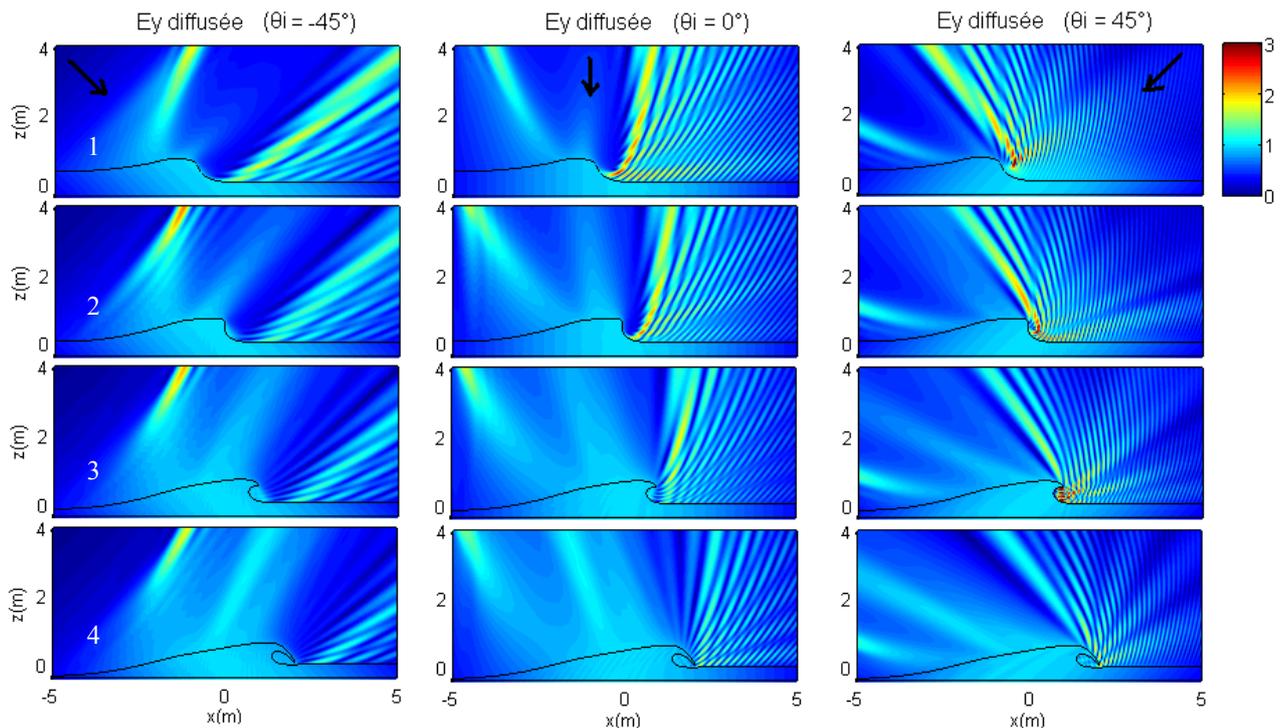


Figure 7 : Champs diffusés par les vagues déferlantes plongeantes (profils 1,2,3,4 pour les angles incidents $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$)

5. Conclusion

Les simulations numériques réalisées dans ce travail nous permettent de tirer les informations concernant le comportement des champs électromagnétiques diffusés par les vagues côtières déferlantes à différents instants de leur vie. Trois types de déferlement standard (gonflant, glissant, plongeant) donnent les signatures électromagnétiques qui sont liées à leur mouvement et leur déformation.

Le déferlement gonflant a une forme plutôt lisse. La diffusion électromagnétique par ce type de déferlement est influencée uniquement par la forme convexe et concave de la surface. Le déferlement glissant, caractérisé par une crête pointue, provoque le phénomène de la diffraction d'onde dans toutes les directions. Le déferlement plongeant, en plus du phénomène de la diffraction par une crête, implique également une cavité qui provoque une concentration des champs de diffusion dans cette région.

Il est important de souligner que les résultats présentés ne concernent que le cas 2D. Ceci nous permet uniquement d'étudier la diffusion en co-polarisation. Pour analyser les phénomènes de dépolarisation, l'étude d'une surface 3D est nécessaire et elle fait l'objet de notre futur travail.

6. Bibliographie

- [1] A. Coatanhay, R. Garello, B. Chapron, F. Ardhuin, « *Projet MOPS – Marine Opportunity Passive Systems* », in Passive'08, 2008.
- [2] Y-M. Scolan, « *Some aspect 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] R. Khairi, A. Coatanhay, A. Khenchaf, « *Modeling of electromagnetic waves scattering from sea surface using Higher-Order Moment Method (HO-MoM) and NURBS patch* ». ICEAA, Italie, 2011.
- [4] R. Khairi, A. Coatanhay, A. Khenchaf, « *Modelisation de la diffusion des ondes électromagnétiques par des vagues côtières déferlantes en utilisant la Méthode des Moments d'Ordre Supérieur* », NUMELEC, Marseille, 2012.
- [5] R. Khairi, A. Coatanhay, A. Khenchaf, « *Optimal High-Order Method of Moment combined with NURBS for the scattering by a 2D cylinder* », Advanced Electromagnetics, Vol 2. No1, pp 33-43, 2013.
- [6] R. Khairi, A. Coatanhay, A. Khenchaf, Y-M. Scolan, « *Numerical modeling of electromagnetic waves scattering from 2D coastal breaking sea waves* », European Physical Journal in Applied Physics, doi: 10.1051/epjap/2013120437, 2013.