

Modélisation numérique du champ diffracté par les vagues déferlantes côtières

Arnaud Coatanhay

Lab-STICC UMR 6285, ENSTA-Bretagne,
2 rue François Verny, 29806 Brest cedex 9, France.
arnaud.coatanhay@ensta-bretagne.fr

Résumé—Les vagues déferlantes et, en particulier, celles se trouvant en zones côtières, présentent des profils particuliers qui en font des cibles radar délicates à traiter pour les simulations électromagnétiques. Nous proposons de montrer l'utilisation de deux approches numériques «la méthode des moments d'ordre supérieur» et «la méthode des moments multi-échelle adaptative».

Mot-clé— Vagues déferlantes; diffraction électromagnétique; méthodes numériques; méthode des moments

I. INTRODUCTION

L'observation, par des moyens électromagnétiques des surfaces de mer, constitue une thématique incontournable dans le domaine de la télédétection. Sur cette thématique, beaucoup d'études ont cherché à modéliser numériquement le champ électromagnétique diffracté par le profil des vagues. Les approches utilisées sont multiples : méthodes géométriques, méthodes statistiques, méthodes des moments etc. Dans le cas d'un profil de vagues déterministe et pour des longueurs d'onde électromagnétiques pas trop petites, l'approche numérique la plus classique s'avère être la méthode des moments ou les méthodes accélérées qui en découlent. Dans un contexte de mer profonde et en l'absence de vent trop violent, les profils de vagues se prêtent assez bien à ce type de modélisation.

Malheureusement, la génération de vagues est un processus fondamentalement non-linéaire. Et, lorsque le contexte (vent fort, faible fond marin) oblige à sortir des approximations linéaires, les profils de vagues deviennent beaucoup plus complexes. C'est clairement le cas des vagues déferlantes. D'un point de vue électromagnétique ces vagues constituent des cibles singulières pouvant, surtout en incidence rasante, se confondre avec des éléments manufacturés.

En termes de modélisation numérique, le profil des vagues déferlantes, où la concavité et la convexité peuvent être critiques, soulève généralement des difficultés pour la convergence des simulations obtenues par les méthodes des moments classiques.

Dans le cas présent, l'objectif est la mise en œuvre, dans le contexte des vagues déferlantes côtières, de deux méthodes des moments un peu plus élaborées : la méthode des moments d'ordre supérieur et la méthode des moments multi-échelle adaptative. La première approche implique des bases fonctionnelles polynomiales et la seconde utilise des bases

fonctionnelles linéaires mais n'appartenant pas au même niveau d'échelle.

II. MODELISATION DE VAGUES DEFERLANTES

Le profil des vagues déferlantes côtières est principalement induit par l'interaction des variations bathymétriques du fond marin avec la surface. En négligeant l'influence du vent, le problème de mécanique des fluides sera décrit par une théorie potentielle.

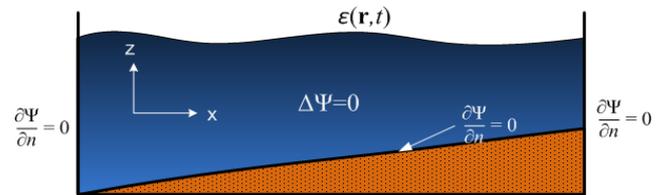


Fig. 1. Modélisation en théorie du potentiel (équation de Laplace homogène) avec une surface libre.

Le problème fluide est numériquement résolu en appliquant une méthode désingularisée, voir [1]. Cette approche permet d'obtenir, pour un coût calculatoire très raisonnable, un ensemble de profil dynamique correspondant à un événement de déferlement.

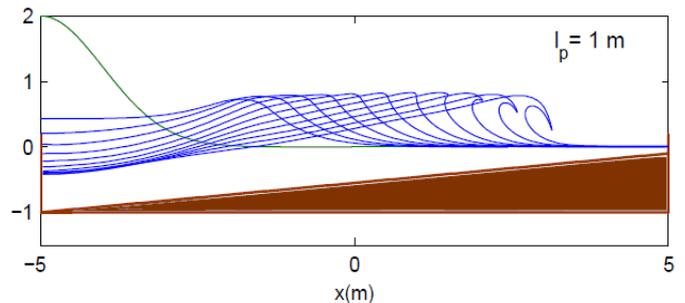


Fig. 2. Ensemble de profils calculé par une méthode désingularisée.

III. MODELISATION ELECTROMAGNETIQUE

Visuellement, les profils ainsi obtenus peuvent présenter de fortes variations (positive et négative) de la courbure, voir figure 3. Ces fortes variations géométriques entraînent, sur la simulation électromagnétique numérique, une perte importante de la vitesse de convergence des approches par méthode de moment classique [2,3].

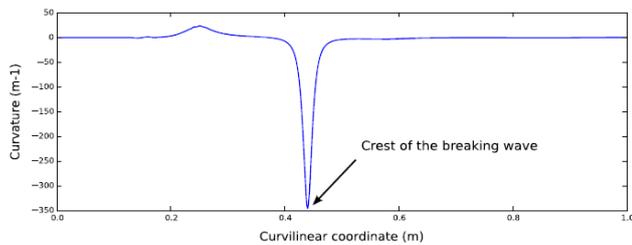


Fig. 3. Variation de la courbure en fonction de l'abscisse curviligne le long l'un des profils.

A. Méthode des moments d'ordre supérieur

Une des approches que nous avons cherchée à évaluer dans ce contexte est l'utilisation de bases fonctionnelles polynomiales de degré supérieur à un.

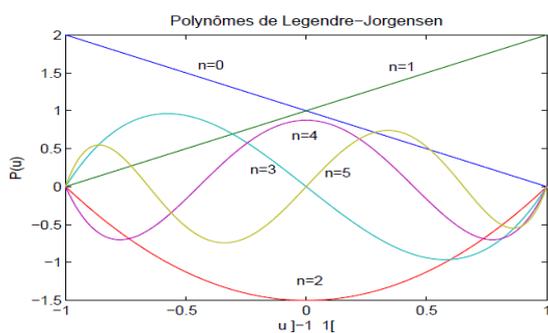


Fig. 4. Bases polynomiales à l'ordre 5.

Cette approche permet de mieux décrire les interactions entre les zones du profil très régulières (faibles variations de la courbure) et les zones du profil où les variations de courbure sont plus importantes.

Par cette approche, il a été possible de simuler les champs diffractés par des profils de vagues déferlantes à fortes variations de courbure en polarisation horizontale et verticale.

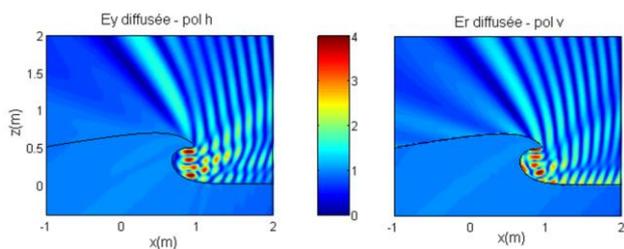


Fig. 5. Simulations du champ électromagnétique réalisées par une méthode des moments d'ordre 5 en polarisation horizontale et verticale.

Une étude détaillée de l'utilisation de cette approche pour la problématique de la diffusion par des vagues déferlantes pourra être consultée [4]. On peut ainsi voir que cette approche permet une modélisation fine de l'interaction entre la vague et le champ électromagnétique.

Néanmoins, même si l'ordre plus élevé permet dans les zones régulières une convergence plus rapide en termes de pas d'échantillonnage, le prix à payer pour obtenir une meilleure approximation numérique est un coût calculatoire bien plus important. Cela s'explique pour deux raisons principales. La première est qu'en pratique cette approche aboutit à un système linéaire beaucoup plus important. L'ordre de grandeur de cette augmentation est proche de celui de l'ordre de la méthode des moments. La seconde raison est que les coefficients de ce système linéaire impliquent une estimation numérique d'intégrales et sont donc plus difficiles à calculer que ceux issus de la méthode des moments classiques.

Enfin, un dernier point est que, quel que soit l'ordre du modèle, la méthode des moments d'ordre supérieur ne résout qu'en partie la problématique de convergence aux points de fortes courbures.

B. Méthode des moments multi-échelle adaptative

Une autre approche que nous avons essayée de développer consiste à prendre des bases fonctionnelles multi-échelles. C'est à dire que l'on utilise des fonctions linéaires par morceaux (fonctions triangulaires) mais sur des supports qui suivent une loi de décroissance géométrique.

L'idée est que, dans les zones régulières où les variations de courbure sont faibles, le poids des coefficients se répartira surtout sur les éléments fonctionnels de grandes échelles, et, là où les variations de courbure sont importantes le poids des coefficients se répartira sur toutes les échelles.

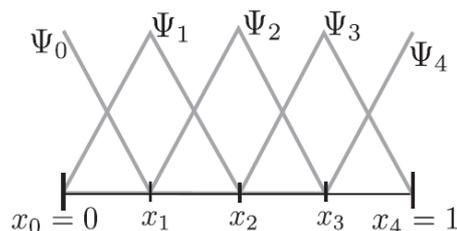


Fig. 6. Base fonctionnelle linéaire classique.

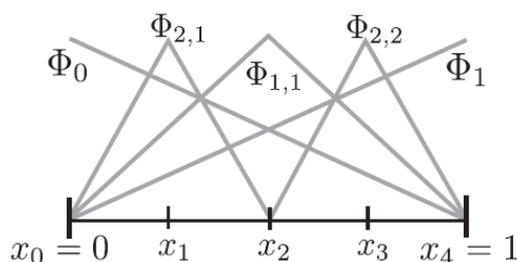


Fig. 7. Base fonctionnelle multi-échelle.

En appliquant une méthode des moments s'appuyant sur une base fonctionnelle multi-échelle, il devient alors possible de gérer plus naturellement des variations du champ électrique importantes sur une zone géographique restreinte (petites échelles), et des variations plus lentes sur des zones géographiques plus étendues (grandes échelles).

Le système linéaire obtenu ne correspond plus alors à celui des méthodes de moments classiques mais fait clairement apparaître une structure multi-échelle particulière.

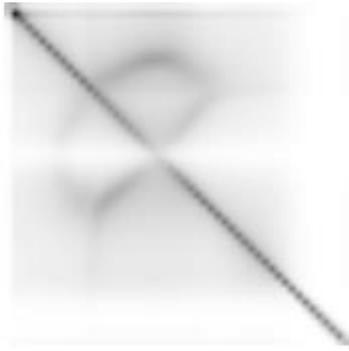


Fig. 8. Représentation du système linéaire à une échelle d'ordre 0.

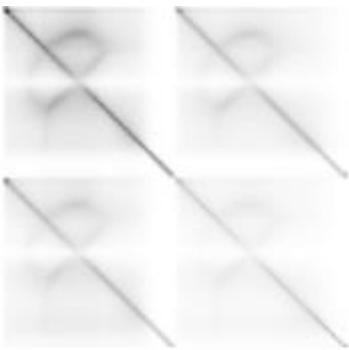


Fig. 9. Représentation du système linéaire à une échelle d'ordre 1.



Fig. 10. Représentation du système linéaire à une échelle d'ordre 2.

Cette approche multi-échelle appliquée sans précautions peut aboutir à un système linéaire aussi important que celui obtenu par une méthode des moments classiques avec un échantillonnage très fin du profil. Comme les coefficients du système linéaire impliquent des estimations numériques d'intégrales, l'application directe d'une telle approche fait exploser les temps de calcul et en limite considérablement la pertinence.

Tout l'intérêt de la méthode réside dans le fait que le système linéaire issu de la méthode des moments multi-échelle est résolu par un processus itératif (GMRES). Dans un premier

temps, on part d'une méthode des moments avec un pas d'échantillonnage très grossier (échelle d'ordre 0). On obtient ainsi une première estimation du champ permettant l'initialisation du processus itératif. De plus, à chaque échelle d'ordre n , il est possible d'évaluer la modification locale qu'engendrerait le passage à l'ordre $n+1$. Par une technique de seuillage, il est également possible de faire apparaître des éléments de base d'ordre élevé uniquement où cela est le plus pertinent.

On peut montrer qu'un choix de seuillage judicieux permet de réduire de façon drastique la dimensionnalité du système linéaire dans rapport de 1 à 10 [5]. En ce sens, l'approche multi-échelle constitue une technique adaptative efficace.

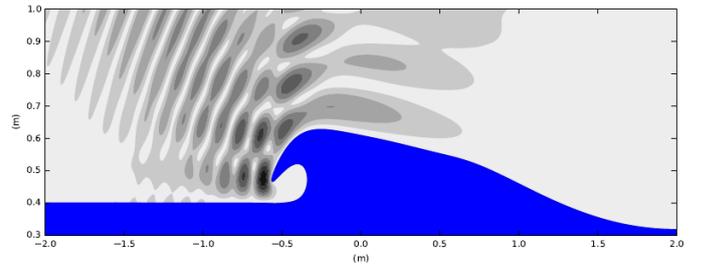


Fig. 11. Simulation du champ électromagnétique réalisée par une méthode des moments multi-échelle à l'ordre 6.

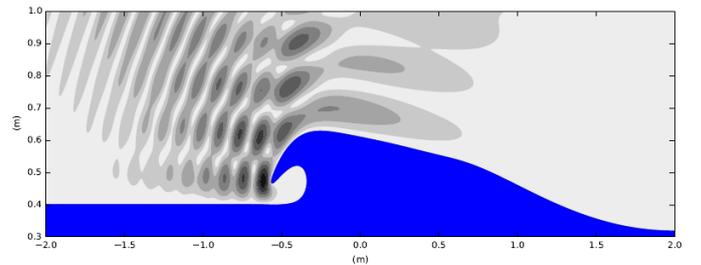


Fig. 12. Simulation du champ électromagnétique réalisée par une méthode des moments classique avec un échantillonnage de 10000 éléments (force brute). Simulation servant de référence.

Au final, l'approche multi-échelle couplée à la technique adaptative constitue une alternative intéressante aux méthodes de calculs classiques, voir l'étude détaillée [5].

REFERENCES

- [1] Scolan YM. « Some aspects of the flip-through phenomenon: a numerical study based on the desingularized technique. » *Journal of Fluids and Structures* 2010; 26:918–953.
- [2] Davis CP, Warnick KF. « Error analysis of 2-D MoM for MFIE/EFIE/CFIE based on the circular cylinder. » *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2005; 53:321–331.
- [3] Khairi R, Coatanhay A, Khenchaf A. « Optimal high-order method of moment combined with NURBS for the scattering by a 2D cylinder. » *Advanced Electromagnetics* 2013; 2(1):33–43.
- [4] Khairi R, Coatanhay A, Khenchaf A, Scolan Y-M. « Numerical modeling of electromagnetic waves scattering from 2D coastal breaking sea waves. » *The European Physical Journal Applied Physics* 2013; 64(2):24505–24510.
- [5] Coatanhay A, Scolan Y-M. « Electromagnetic scattering by coastal breaking sea waves using Adaptive Multiscale Moment Method. » *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 2015; (accepté).