Modélisation de la diffusion électromagnétique par des surfaces de mer en incidence rasante. Application aux radars HF à ondes de surface.

Yaël Demarty (1) ***and Laetitia Thirion-Lefevre*** (2)

(1) SONDRA
Supélec, Plateau de Moulon, 3 rue Joliot-Curie,
91192 Gif-sur-Yvette, FRANCE
Email : laetitia.thirion@supelec.fr

(2) ONERA
DEMR/TSI Chemin de la Huni'ere
91761 Palaiseau
Email : yael.demarty@supelec.fr

Abstract

We are interesting in modelling the scattering by sea surfaces highlighted by HF Surface Wave Radars (HFSWR).Actually, we have to model the propagation of a wave just above the sea surface. The main problem is to deal with grazing angles, as the usual way to conduct this study is to consider the scattering by these surfaces with very large incident angles with respect to nadir. Consequently the dimension of the illuminated area to model is very large and approximate techniques seem to be more suited in this context. However, they are expected to fail at grazing angles. As a result, recent studies have focused on exact solutions, as the integral formulation of Maxwell equations used for example in the Method of Moments (MoM). Unfortunately, these codes are very time and memory consuming, which is a strong disadvantage when we have to simulate the propagation over large surfaces. It is then mandatory to implement techniques enabling us to dramatically reduce the calculation costs. The other important issue is to better understand the interaction between the electromagnetic (EM) waves and sea surfaces in order to improve retrieval and finally to better interpret radar images. We present in this communication the main characteristics of our modelling tool and we propose a comparison between simulated data and measurements collected by ONERA with a HFSWR in Biscarosse in 2007.

Keywords: HFSWR, sea surface, surface wave, elctromagnetic modelling.

Résumé

L'objectif de notre étude est de modéliser la diffusion par des surfaces de mer quand celles-ci sont éclairées par des radars HF à ondes de surface (ROS). Le problème soulevé par une telle configuration est essentiellement celui des angles rasants. En effet, il s'agit ici de modéliser la propagation d'une onde à l'interface air-mer et l'approche communément utilisée est d'étudier la diffusion par une telle surface en incidence rasante. Ceci a pour conséquence que les surfaces à étudier deviennent très grandes. Les codes approchés semblent être les outils les plus aptes à traiter ce genre de problème, sauf que les angles rasants constituent souvent une de leur limite d'application. C'est ainsi que des études récentes s'appuient sur des codes basés sur la résolution intégrale des équations de Maxwell. Cependant, la complexité de tels codes, impliquant des temps de calculs et des espaces mémoires souvent prohibitifs, vient s'ajouter à l'obligation de traiter des scènes suffisamment grandes pour mettre en évidence le phénomène de propagation des ondes de surface. Il est donc impératif de mettre en oeuvre des méthodes permettant d'accélerer les temps de calcul. L'enjeu est également la compréhension des interactions entre l'onde électromagnétique et la surface de mer afin de pouvoir interpréter les images radars et finalement dériver les caractéristiques de telles surfaces. Nous présentons dans cette communication les principales caractéristiques de notre outil de modélisation et nous proposons une comparaison avec des mesures réalisées à l'aide d'un radar à ondes de surface en bande HF par l'ONERA en 2007 à Biscarosse.

Mots-Clés : ROS, surface de mer, onde de surface, modélisation électromagnétique.

1. Introduction

Crombie a été le premier à mettre en évidence en 1955 le phénomène de résonance Bragg sur le spectre Doppler [1] : les deux raies principales (spectre du premier ordre) sont la signature des vagues dont la période est égale à la moitié

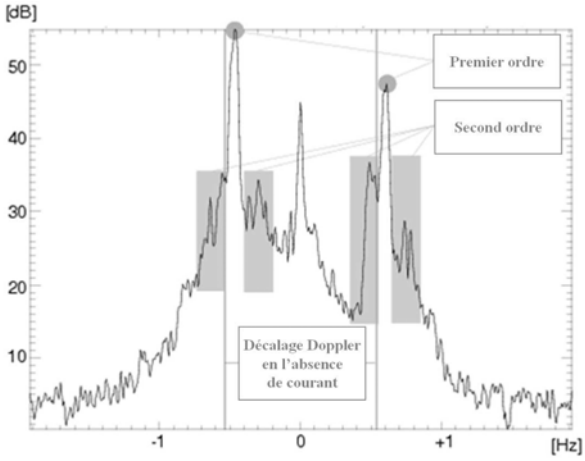

Figure 2: Exemple de spectre Doppler avec illustration du premier et du second ordre ainsi que du décalage des raies de Bragg dû à un courant marin (illustration tirée de [9])

.

de la longueur d'onde du radar. En 1972, Barrick établi un modèle analytique permettant de prédire le premier et le second ordre d'un spectre Doppler [2]. Le premier et le second ordre sont illustrés sur la Fig. 2.

La modélisation des spectres Doppler de surface de mer aux ondes HF (3-30 MHz) est un sujet d'intérêt pour la communauté océanographique qui a d'abord cherché à se doter d'un outil de prédiction et d'inversion. L'idée est en fait de revenir aux paramètres océanographiques tels que la direction [3] et la vitesse du vent [4], la hauteur des vagues [5, 6], etc. En parallèle, des modèles de diffusion électromagnétique plus élaborés que le modèle de Barrick ont fait leur apparition afin de lever les limitations de ce dernier [7, 8]. Par exemple, il ne permet pas de considérer des hauteur de vagues élevées ($k_r H_s > 4$ avec k_r le nombre d'onde radar et H_s la hauteur significative des vagues). Voronovich [10], Elfouhaily [11, 12, 13], Bourlier [14, 15, 16] développent tour à tour des modèles approchés valables chacun à différentes bandes de fréquences, prenant en compte l'aspect multi-échelle des surfaces de mer, mais peinant à se placer en incidence rasante et faisant des hypothèses sur la rugosité de la mer (pour un résumé des méthodes asymptotiques cf [17]). Plus récemment, des études portant sur le développement de modèles dit *exacts* ont fait leur apparition (parmi eux : Rino et al. en bande HF [18] en 1991, Johnson et al. en bande EHF et en bande X [19, 20] à partir de 1996, Toporkov et Brown en bande C et bande X [21, 22, 23] à partir de 1998 et Soriano et Saillard en bande L [24] en 2003). Ces modèles utilisent principalement la méthode des moments qui est résolue par différents algorithmes (Fast Multipole Method, Method of Ordered Multiple Interactions, Sparse Matrix Flat Surface Iterative Approach, etc.). Notre simulateur repose quant à lui sur la méthode des moments résolue par FMM. La bande de fréquence étudiée est la bande HF aux angles rasants et nous considérons des surfaces dynamiques tridimensionnelles. Le simulateur est présenté plus en détail dans la section 2. Le modèle de mer choisi est simple puisqu'il repose sur une modélisation linéaire de la mer (cf. paragraphe 2.2). Quelques résultats de validation sont ensuite exposés dans la section 3 et une comparaison avec des mesures réalisées par l'ONERA à Bicarosse en 2007 est présentée dans la section 4.

2. Présentation du simulateur

2.1. Le modèle électomagnétique

En ce qui concerne le modèle électromagétique, nous avons travaillé avec le logiciel Elsem 3D, code développé par l'ONERA et qui s'appuie sur la Méthode des Moments. Afin d'accélérer les temps de calcul, la résolution de la formulation matricielle qui est adoptée s'appuie sur la représentation intégrale du champ électrique et du champ magnétique (formulation CFIE). En outre, pour réduire les coûts de stockage, la résolution du problème est effectuée par FMM (Fast Multiple Method). Cependant, cela nécessite des adaptations de la surface étudiée. En effet, la formulation CFIE impose que la surface soit fermée, ce qui peut être résolu en utilisant la théorie des images. En appliquant cette dernière on étudie ainsi la surface de mer et son symétrique, qui une fois correctement combinées, constituent un objet clos (voir Fig. 3). Pour appliquer la théorie des images, on suppose ensuite que la surface étudiée

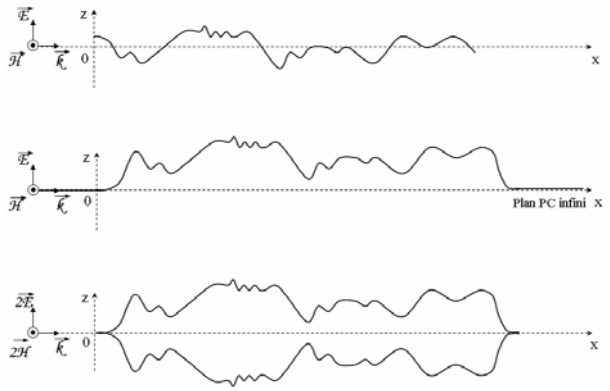

Figure 3: La théorie des images appliquée à une source illuminant une surface rugueuse permet de retirer le plan conducteur infini, pourvu que l'on ajoute une source image et que la géométrie soit symétrisée. En haut : surface initiale avec l'onde incidente. Au milieu : surface rehaussée, bords lissés et prolongés par un plan conducteur infini. En bas : cas réellement simulé avec la une surface symétrisée et la source et son image superposée.

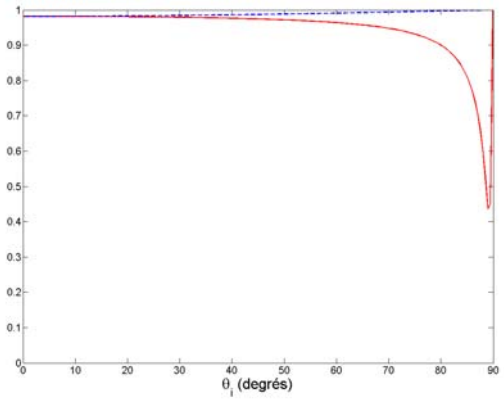

Figure 4: La valeur du coefficient de réflexion en polarisation verticale (traits pleins rouges) aux forts angles d'incidence (angles rasants) et en HF est proche de celle d'un matériau parfaitement conducteur.

est parfaitement conductrice. Compte-tenu des fréquences en jeu et de l'incidence rasante, cette approximation trouve ici sa justification (Cf. Fig. 4). C'est donc finalement un objet clos, parfaitement conducteur, éclairé par une source et son image, que nous allons étudier. Les temps de simulation sont grandement diminués malgré le doublement du nombre d'inconnues, comme le montre le tableau 2.1.

Une fois les champs électromagnétiques $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ simulés pour chaque échantillon temporel t_e composant le temps d'observation T_{obs} et pour un radar situé en $\mathbf{r}$, il est possible de déterminer le spectre Doppler de cette surface :

$$S(f, \mathbf{r}) = \left| \int_0^{T_{obs}} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) e^{-i2\pi f t} dt \right|^2 \tag{1}$$

2.2. Le modèle de mer

La modélisation de la mer que nous avons choisie s'appuie sur une formulation linéaire. Ce modèle ne convient évidemment pas pour représenter fidèlement le comportement dynamique de la mer. Néanmoins c'est une étape essentielle pour comprendre les phénomènes élémentaires mis en jeu. Si l'on suppose donc que la mer peut être décrite comme une somme de n sinusoïdes, la hauteur h de cette surface à chaque instant t_e et en tout point $\mathbf{r}$ de cette

Sans la théorie des images	Avec la théorie des images
24118 inconnues	48596 inconnues
23.14 min	0.75 min

Table 1: Impact de la théorie des images et de la FMM qui peut alors s'appliquer sur les temps de calcul.

surface peut s'écrire :

$$h(\mathbf{r}, t_e) = \sum_{n=1}^{N} A_n(\mathbf{k}_{vn}) \cos(\mathbf{k}_{vn}\mathbf{r} - \omega_{vn} t_e + \varphi_n) \tag{2}$$

avec $\mathbf{k}_{vn}$ le nombre d 'onde de la n^{ieme} vague, $A_n(\mathbf{k}_{vn})$ son amplitude dérivée du spectre directionnel de mer et une vitesse de phase $v_n = \frac{\omega_{vn}}{k_{vn}}$. φ_n est ici une variable aléatoire distribuée uniformément dans $[0, 2\pi[$. Le spectre de mer que nous avons retenu pour notre étude est également très simple : il s'agit du spectre de JONSWAP qui a été déterminé empiriquement à l'aide de mesures collectées en mer du Nord. Ce spectre est censé modéliser correctement les vagues de gravité, dont la longueur d'onde est de l'ordre du mètre et qui se propagent sur de longues distances. Ce sont ces vagues qu'un ROS en bande HF va plutôt détecter. Ce spectre est multiplié par une fonction angulaire $D(\theta)$ qui va donner la direction principale θ de propagation des vagues. Dans notre cas [25] : $D(\theta) = N(s) \cos\left(\frac{\theta-\theta_0}{2}\right)^{2s}$ avec s un facteur d'étalement qui dépend de la vitesse du vent et de l'état de mer, $N(s)$ une fonction de normalisation et θ_0 la direction du vent. Si $\theta_0 = 0$, le vent souffle dans la direction d'obervation. Dans le cas des vagues de gravité et dans l'approximation d'eaux profondes (i.e. en pleine mer) la relation de dispersion est donnée par $\omega_v^2 = gk_v$ où g est l'accélération dû à la pesanteur. Finalement la dimension de la scène a été choisie en s'appuyant sur l'étude statistique de la rugosité de notre surface, à savoir sur la hauteur quadratique moyenne H_{rms} et la longueur de corrélation L_c. Ainsi les surfaces que nous étudions font $21L_c$ de côté afin d'être statistiquement représentatives. Il est à noter que cela n'implique pas forcément que la surface est suffisamment grande pour pouvoir observer la propagation des ondes de surfaces.

3. Quelques résultats de validation

Dans le cas statique, la validation a surtout portée sur le niveau rétrodiffusé d'abord par des objets simples (sphères, surfaces planes) puis par des scènes complexes (surfaces de mer). Le but est notamment de vérifier la bonne implémentation de la théorie des images et l'effet des bords lissés qui ont été ajoutés. La validation dynamique consiste à contrôler les spectres Doppler simulés d'abord de surfaces simples sinusoïdales puis de surfaces de mer. On cherche principalement à vérifier dans quelles conditions on peut (ou non) détecter le phénomène de Bragg. On s'intéresse ici plus particulièrement à la validation des spectres Doppler. Pour plus de détails sur la partie statique, voir [26].

3.1. De la sinusoïde à la mer

L'onde renvoyée par une surface mobile de vitesse radiale v présente un décalage en fréquence par rapport à l'onde incidence (de longueur d'onde λ_r), que l'on appelle la fréquence Doppler et qui se calcule comme : $f_d = \frac{2v}{\lambda_r}$. Dans notre cas, il faut prendre en compte le décalage fréquentiel introduit par chacune des p vagues de gravité composant la surface. La vitesse de ces vagues v_p est fonction de leur période spatiale λ_p et se calcule comme : $v_p = \sqrt{\frac{g\lambda_p}{2\pi}}$ avec $g = 9.81$m/s. Quand il y a résonance de Bragg, i.e. quand $\lambda_v = \lambda_r/2$ alors la fréquence est donnée par : $f_B = \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda_r}} \simeq 0.1\sqrt{f_r}$ où f_r est la fréquence du radar en MHz.

Comme on peut le voir sur la figure 3.1, les fréquences de Bragg théoriques (f_{dt}) sont toutes retrouvées par simulation, que ce soit dans le cas de la sinusoïde (à gauche), de la somme de sinusoïdes (au milieu) ou dans le cas plus complexe d'une surface de mer (à droite). De multiples signatures viennent s'ajouter aux fréquences de Bragg : il s'agit notamment des harmoniques de la fréquence de Bragg et de la réponse des points fixes de la scène simulée (raie de Doppler nul). Le phénomène de résonance rend même visible le décalage fréquentiel des vagues de très faible amplitude, comme on peut le voir sur la figure 3.1, au milieu.

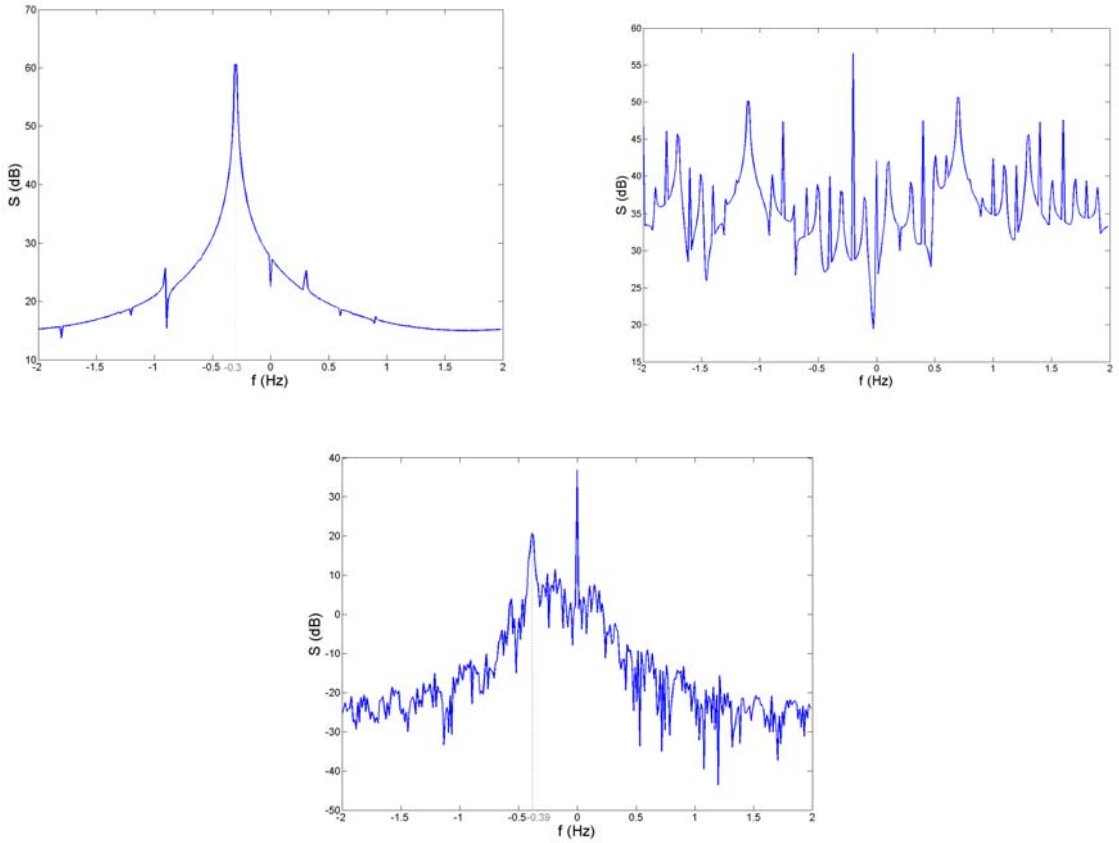

Figure 5: Validation de la fréquence Doppler pour 3 cas différents. A gauche : SD d'une surface sinusoïdale ($h(t) = A\sin(2\pi/T(x+vt))$) avec F=15MHz, v=3m/s, T=10m, A=1.8m, $T_{obs} = 50s$ et $dt = 0.25s \rightarrow f_{dt} = -0.30Hz$. Au milieu : SD d'une somme de 3 surfaces sinusoïdales ($h(t) = \sum_{i=1}^{3} A_i \sin(2\pi/T(x+v_i t))$) avec $T_{obs} = 75s$, $dt = 0.25s$, $v_1 = 2m/s$, $A_1 = 1m$ $v_2 = 11m/s$, $A_2 = 0.5m$, $v_3 = 17m/s$, $A_3 = 0.2m \rightarrow f_{dt1} \simeq -0.20Hz$, $f_{dt2} \simeq -1.11Hz$ et $f_{dt3} \simeq -1.71Hz$. A droite : SD d'une surface de mer se propageant vers le radar avec $T_{obs} = 75s$, $dt = 0.25s$, $u_f = 19cm/s$, $\theta = 10° \rightarrow f_{dt} \simeq +0.39Hz$.

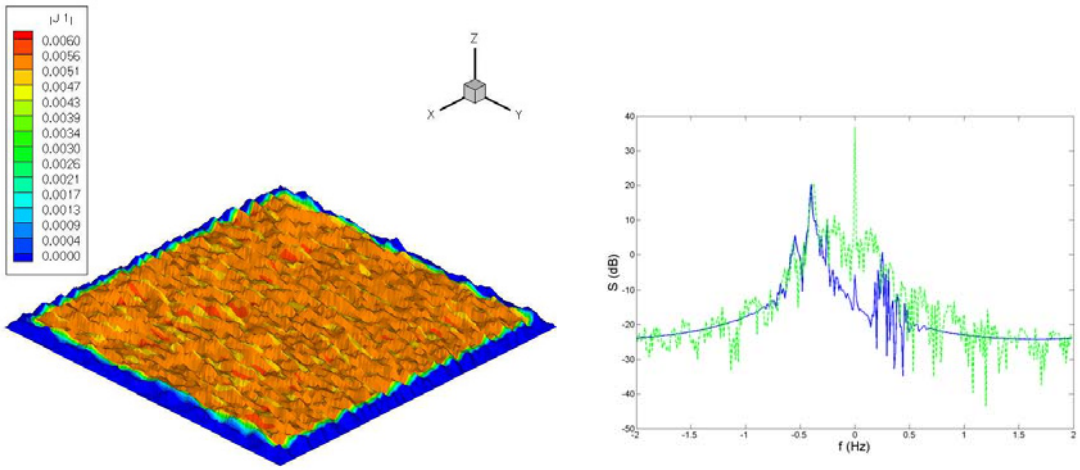

Figure 6: A gauche : visualisation du module du courant électrique sur une surface de mer avec annulation des courants sur les bords lissés. A droite : Comparaison d'un SD avec annulation des courants (traits pleins bleus) et sans (tirets verts).

3.2. Effets des bords

Il a été vérifié que l'ajout des bords lissés ne modifiait pas significativement le coefficient de rétrodiffusion de la surface de mer. Cependant, comme l'illustre la Fig. 3.2, ces bords lissés ont un fort impact sur le spectre Doppler de la surface. En effet, pour chaque échantillon temporel, les points limites de la surface simulée vont varier en hauteur, ce qui va induire une modification de la pente de ces bords. Tout se passe comme si les bords oscillaient et la vitesse radiale de ces oscillations est prise en compte. Afin de s'affranchir de cet artefact, les courants sur les bords de la surface de mer ont été systématiquement annulés. Le spectre Doppler obtenu est beaucoup moins bruité. Seuls demeurent les décalages Doppler et leurs harmoniques induits par les composantes du spectre de mer choisi.

4. Résultats de simulation et mesures

4.1. 1 ou 2 raies ?

Les 2 raies de Bragg (une dans les fréquences positives, l'autre dans les fréquences négatives) témoignent de la présence de deux composantes du spectre de mer se déplaçant en sens opposés : l'une allant plutôt vers le retard, l'autre s'en éloignant. Jusqu'ici le spectre de mer choisi (isotrope), associé à une fonction angulaire, fourni un spectre directionnel qui a une direction principale de propagation. Dans ce cas, seule une raie est observée. Avec notre simulateur deux cas amènent l'apparition d'une seconde raie : l'ajout d'un système de vagues se propageant en sens opposé ou l'ajout d'un bruit. Ces deux solutions sont présentées dans la Fig. 4.1. Dans le cas du bruit (à gauche), on a considéré un spectre de mer constant, dont la valeur est très inférieure à la valeur maximale du spectre de JONSWAP. La direction de propagation principale est opposée à celle de la surface de mer. La fonction angulaire vaut 1 pour tout θ_0 variant dans $[0, \pi/2]$. Ceci revient à dire que le bruit est constitué de multiples vagues de faibles hauteurs, qui se propagent dans toutes les directions mais dans le sens opposé à la surface de mer. Dans ce cas là, on obtient deux raies, d'amplitudes différentes. Le cas où l'on superpose deux surfaces de mer, identiques, mais se propageant en sens opposés, pose un problème d'interprétation. Au bord des côtes, il pourrait correspondre au flux et reflux de la mer. En pleine mer, il implique la coexistance de deux vents dominants soufflant dans des directions opposés, ce qui physiquement n'a pas de sens. Par ailleurs, les mesures de spectres Doppler confirment la présence des deux raies près des côtes, mais qu'en est-il de la pleine mer ? Les mesures effectuées par l'ONERA montrent bien une atténuation asymétrique des deux raies au fur et à mesure où l'on s'éloigne des côtes. La raie qui persiste correspond à des vagues qui se dirigent vers le radar (voir Fig. 8).

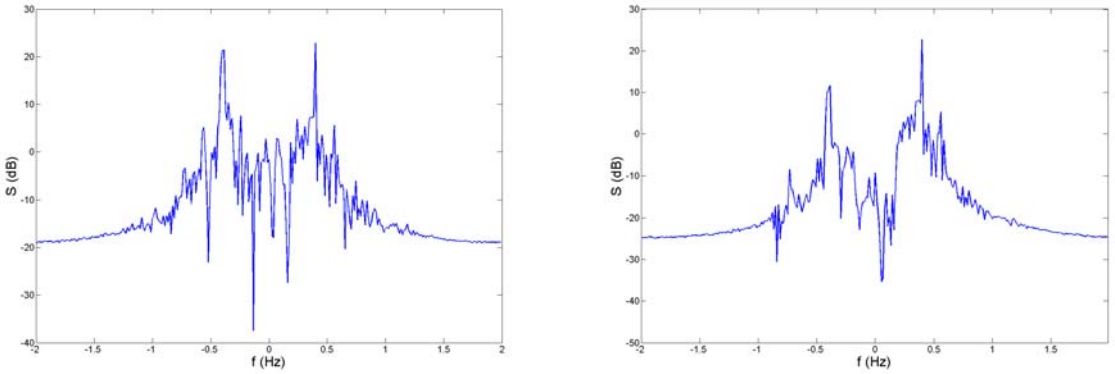

Figure 7: A gauche : SD issu de l'addition de deux systèmes de vagues se propageant en sens opposé. A droite : SD issu de l'addition d'une surface de mer et d'une surface bruitée se propageant en sens opposé. Le spectre de la surface bruitée est une constante, de valeur égale à 1% du maximum du spectre de JONSWAP et sans direction de propagation privilégiée.

4.2. Mesures ONERA

L'ONERA a réalisé durant l'été 2007 une campagne de mesures dans la baie de Biscarosse avec un ROS fonctionnant dans la bande HF. L'état de mer a été renseigné grâce à une bouée positionnée à 310 km et équipée d'une station météorologique. Pour pouvoir comparer les spectres Doppler simulés avec les mesures, il a fallu prendre en compte l'ensemble des pertes et des traitements, ainsi qu'appliquer une normalisation du spectre Doppler par l'aire observée. Les premiers résultats (voir Fig. 4.2) montrent que la raie principale du spectre Doppler est correctement localisée et que son amplitude est bien modélisée, pourvu que l'on se trouve suffisamment loin du ROS. Le niveau du second ordre est quant à lui mal simulé, ce qui était attendu compte tenu du modèle de mer choisi. En effet le second ordre observé sur le spectre Doppler est issu du second ordre magnétique et hydrodynamique. Or ce dernier n'est pas pris en compte. Par ailleurs ces simulations ont été réalisées sans bruit, c'est à dire en supposant notamment qu'il n'y avait qu'un système de vagues se propageant. Finalement on a fait l'hypothèse que les conditions de mer renseignées par la bouée Gascogne étaient encore valables près des côtes et que nous pouvions encore supposer que la mer était parfaitement développée. Compte-tenu de ces réserves, les résultats issus de ces comparaisons sont très encourageants.

5. Conclusion

Un simulateur de mer a été développé s'appuyant sur un outil de modélisation électromagnétique permettant de prendre en compte l'ensemble des interactions. L'effort a notamment porté sur l'accélération des calculs afin de rendre le simulateur adapté à l'étude des spectres Doppler de surfaces de mer. La modélisation de la mer a été choisie la plus simple possible, ce qui dans un premier temps a été largement suffisant pour tester notre outil. Des validations ont été réalisées et des comparaisons avec des mesures de l'ONERA ont été produites. Les résultats encourageants que nous avons obtenus nous permettent d'affirmer que ce simulateur est pertinent pour l'étude des surfaces maritimes. Cependant, la modélisation de la mer doit être améliorée et il faut notamment étudier l'impact d'une modélisation des composantes non-linéaires.

References

[1] Crombie, Doppler spectrum of sea echo at 13.56cm/s, Nature, vol 175, pp 681-2, 1955.

[2] Barrick, *First order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea*, IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. 20, pp 2-10, 1972.

[3] Stewart and Barnum, *Radio measurements of oceanic winds at long ranges: an evaluation*, Radio Science, vol. 10, no. 10, pp 853-7, 1975.

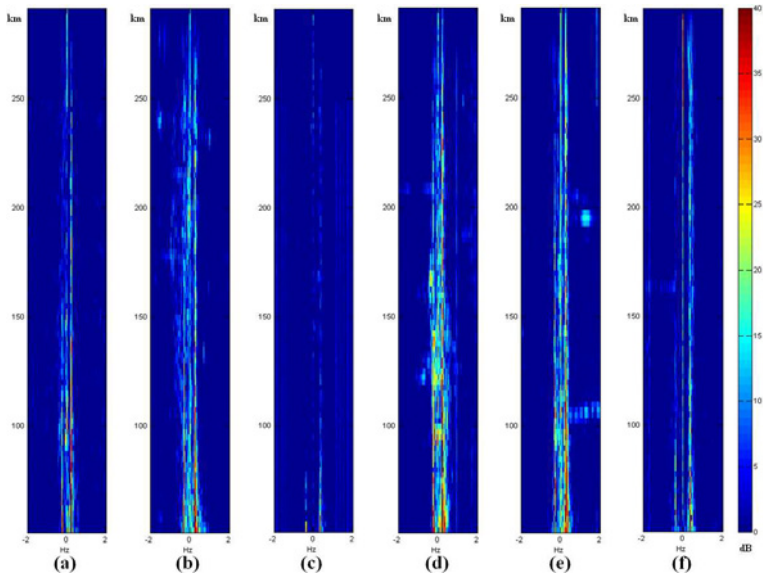

Figure 8: Spectre Doppler-distance mesurés avec le ROS de l'ONERA pour des distances de 50 à 300 km. La fréquence du radar est de 5.4 MHz pour (a) et (d), 7.7 MHz pour (b) et (e) et 12.5 MHz pour (c) et (f). Il s'agit de la baie de Biscarrosse au centre d'Essai des Landes et les mesures présentées ont été effectuée le 13 juillet 2007 par Beaufort 4 (figures (a), (b) et (c)) et le 16 juillet 2007 par Beaufort 4-5 (figures (d), (e) et (f)).

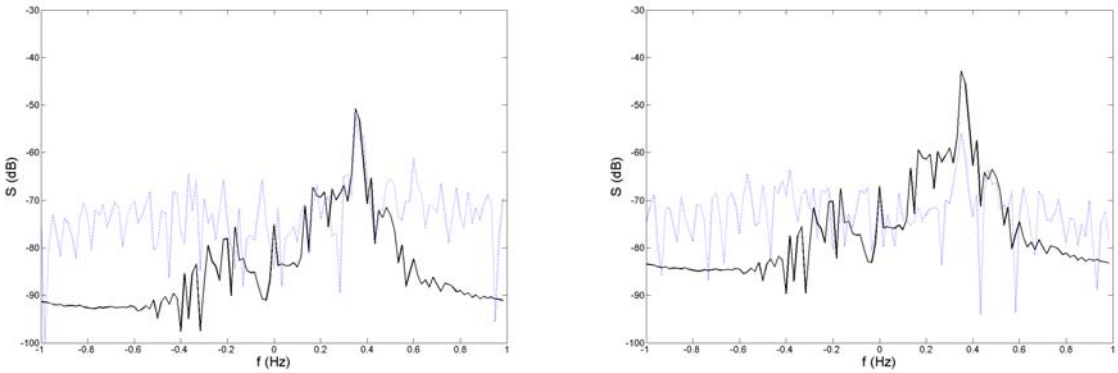

Figure 9: F=12.5 MHz, $u_f = 28cm/s$, $\theta = 30°$, $H_{m0} = 1.7m$. Comparaisons entre SD mesurés (pointillés bleus) et simulés (traits pleins noirs) à une distance des côtes de 217km (au milieu) et 195km (à droite)

[4] Huang et al., *HF radar wave and wind measurement over the Eastern China Sea*, IEEE Trans. Geosc. and Rem. Sens., vol. 40, pp 1950-5, 2002.

[5] Barrick, *Directional sea spectrum determination using HF Doppler radar techniques*, Radio Science, vol. 12, pp 415-24, 1977.

[6] Maresca et Georges, *Measuring rms wave height and the scalar ocean wave spectrum with HF skywave radar*, Journal of geophysical research, vol. 85, pp 2759-2771, 1980.

[7] Wyatt, *An evaluation of wave parameters measured using a singe HF radar system*, Can. J. Rem. Sens., vol. 28, no. 2, pp 205-218, 2002.

[8] Gurgen, Essen et Schlick, *An empirical method to derive ocean waves from second-order Bragg scattering: prospects and limitations*, IEEE Journal of Ocean Engineering, vol. 31, no. 4, pp 804-811, 2006.

[9] Gurgel, Essen, Kingsley, *HF radars: physical limitations and recent developments*, preprint submitted to Elsevier preprint 2000.

[10] Voronovich, *Small-slope approximation in wave scattering by rough surfaces*, Sov. Phys. JETP, vol. 62, pp 65-70, 1985.

[11] Elfouhaily et Chapron, *A physically-based two scale electromagnetic model for backscatter from ocean-like surfaces*, IGARSS, vol. 1, pp 300-602, 1996.

[12] Elfouhaily et al, *Local and non local curvature approximation: a new asymptotic theory for wave scattering*, Waves in Random Media, vol. 13, pp 321-337, 2003.

[13] Elfouhaily, Bourlier et Johnson, *Two families of non-local scattering models and the weighted curvature approximation*, Waves in Random Media, vol. 14, no. 4, pp 563-580, 2004.

[14] Bourlier, *Rayonnement Infrarouge d'une surface stochastique - Application au domaine océanique*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1999.

[15] Bourlier, Berginc et Saillard, *Theoretical study of the Kirchhoff integral from two-dimensional randomly rough surface with shadowing effect: application on the backscattering coefficient for a perfectly conducting surface*, Waves in Random Media, vol. 11, no. 2, pp 91-118, 2001.

[16] Bourlier, Berginc et Saillard, *Bistatic scattering coefficient from one- and two- dimensional random surfaces using the stationary phase and scalar approximation with shadowing effect - comparisons with experiments and application to the sea surface*, Waves in Random Media, vol. 11, no. 2, pp 119-147, 2001.

[17] Elfouhaily et Guérin, *A critical survey of approximate scattering wave theories from random rough surfaces*, Waves in Random Media, vol. 14, no. 4, pp R1-R40, 2004.

[18] Rino et al., *Numerical simulation of backscatter from linear and nonlinear ocean surface realizations*, Radio Science, vol. 26, pp 51-71, 1991.

[19] Johnson et al., *Backscattering enhancement of electromagnetic waves from two-diemnsional perfectly conducting random rough surfaces: a comparison of Monte Carlo simulations with experimental data*, IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. 44, pp 748-756, 1996.

[20] Johnson et al., *A method of moments model for VHF propagation*, IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. 45, pp 115-125, 1997.

[21] Toporkov, Marchand et Brown, *On the discretization of the integral equation describing scattering by rough conducting surfaces*, IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. 46, pp 150-161, 1998.

[22] Toporkov et Brown, *Numerical simulation of scattering from time-varying, randomly rough surfaces*, IEEE Trans. Geosc. and Rem. Sens., vol. 38, pp 1616-1625, 2000.

[23] Toporkov et Sletten, *Simulation of coherent radar backscatter from dynamic sea surfaces*, DoD User group conference, 2003.

[24] Soriano et Saillard, *Modelization of the scattering of electromagnetic waves from the ocean surface*, PIER, vol. X, no. 4, pp 102-128, 2003.

[25] Hasselman et al. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP)*, Deutsche Htdrographische Zeitschrift, vol. A, no. 12, 1973.

[26] Demarty, *Modélisation cohérente de la diffusion électromagnétique par des surfaces de mer tridimensionnelles en incidence rasante. Application aux radars HF à ondes de surface*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2008.