



**ESTIMATION SPECTRALE PARAMETRIQUE 2-D
APPLICATION A LA TELEDETECTION SATELLITAIRE**

Claude CARIOU, René GARELLO, Jean-Marc BOUCHER

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne
Groupe Traitement d'Images - Département Mathématiques et Systèmes de Communication
BP 832 - 29285 BREST CEDEX - FRANCE

RÉSUMÉ

L'application de techniques d'estimation spectrale paramétrique aux images de télédétection est envisagée dans le cadre de l'océanographie, avec pour but de déterminer les paramètres physiques des phénomènes de houle et de vagues. Deux méthodes s'appuyant sur les modélisations autorégressive et autorégressive-moyenne ajustée, et tenant compte de la positivité des images numériques sont employées pour la cartographie de la houle dans des zones à hauts-fonds, à partir d'images de type optique et radar.

ABSTRACT

The application of parametric spectrum estimation techniques to remotely sensed images is considered in the context of oceanography, with the purpose of determining physical parameters of swell and wave phenomena. Two methods based on autoregressive and autoregressive-moving average models and taking into account the positivity of digital images are used for swell mapping over shallow waters, from optical and radar images.

I - INTRODUCTION

Au cours des dernières années, les physiciens océanographes ont trouvé dans la télédétection spatiale un moyen, complémentaire aux techniques traditionnelles (bouées), de mesure et d'étude des phénomènes de propagation d'ondes à la surface des océans, et également à l'interface entre la mer et la glace. Notamment, l'analyse d'images de type optique ou radar en vue de déterminer les paramètres physiques de la houle ou des vagues (longueur d'onde, orientation) est devenue relativement courante [1,2,3].

Pour analyser ces images, le spécialiste a généralement recours à des méthodes classiques d'analyse spectrale s'appuyant essentiellement sur la transformation de Fourier bidimensionnelle (2-D) [2]. Cependant, pour satisfaire le compromis résolution-variance dans l'estimation du spectre de l'image, duquel on tire le spectre des vagues, ces techniques exigent une taille d'image assez importante (typiquement 512 par 512 pixels). Si cette contrainte n'est pas trop forte lorsque la stationnarité de la houle est vérifiée, c'est-à-dire dans le cas de pleine mer, des difficultés apparaissent lorsque l'on s'intéresse à la houle côtière pour laquelle l'interaction des ondes avec le littoral limite la stationnarité à de petites zones (quelques centaines de mètres).

Il est alors possible d'utiliser les ressources de l'estimation spectrale paramétrique, qui permet d'évaluer la longueur d'onde et l'orientation de la houle à partir d'images de faible taille [4]. Parmi les estimateurs spectraux 2-D paramétriques, ceux qui font appel au principe du maximum d'entropie (ME) sont les plus généraux et les plus performants [5]. Toutefois, ils ont l'inconvénient de nécessiter l'optimisation non linéaire d'une fonctionnelle à plusieurs variables, ce qui peut rendre prohibitif leur application à l'analyse de volumes importants de données comme c'est le cas en télédétection spatiale.

Nous utilisons ici une approche plus simple de l'estimation spectrale 2-D, par modélisations autorégressive (AR) et autorégressive-moyenne mobile (ARMA) des champs aléatoires 2-D. Le grand avantage des deux techniques présentées se situe dans leur linéarité algorithmique, ce qui conduit à un coût calculatoire

bien moindre que pour les méthodes de type ME. Elles ont de plus été adaptées à l'analyse de signaux non centrés, comme c'est le cas en imagerie numérique, et s'inspirent du principe de moyenne harmonique (HM) [6] qui a récemment fait preuve de performances comparables à celles de l'estimation spectrale ME, tant au niveau de simulations que pour l'analyse d'images réelles [4].

II - METHODES AR-HM ET ARMA-HM

Soit $x(m, n)$ un champ aléatoire sur \mathbb{Z}^2 , réel et stationnaire au sens large. Sa densité spectrale de puissance (DSP), notée

$$P_x(f_1, f_2), (f_1, f_2) \in [-0.5, +0.5] \times [-0.5, +0.5],$$

est la transformée de Fourier de l'extension infinie de sa fonction d'autocorrélation (FAC), généralement inconnue,

$$R_x(k, l) = E[x(m, n)x(m+k, n+l)].$$

Modélisation linéaire des champs aléatoires 2-D: Les méthodes présentées ici supposent une modélisation linéaire des signaux 2-D, sous la forme suivante:

$$x(m, n) = \sum_{(k, l) \in \pi} a(k, l)x(m-k, n-l) + \sum_{(k', l') \in \pi'} b(k', l')u(m-k', n-l'), \quad (1)$$

où $u(m, n)$ est un bruit blanc centré de variance σ_u^2 , les $\{a(k, l)\}$ sont les paramètres autorégressifs (AR), et les $\{b(k', l')\}$ les paramètres de la partie moyenne mobile (MA). Les supports spatiaux des parties AR et MA ont été choisis dans un quart de plan (QP):

$$\pi: \{(k, l); 0 \leq k \leq p_1 - 1, 0 \leq l \leq p_2 - 1, (k, l) \neq (0, 0)\}$$

$$\pi': \{(k', l'); 0 \leq k' \leq q_1 - 1, 0 \leq l' \leq q_2 - 1\}$$



Sous ces hypothèses, la DSP du signal prend la forme paramétrique suivante:

$$P_x(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{|A(f_1, f_2)|^2} \sigma_u^2, \quad (2)$$

avec

$$A(f_1, f_2) = 1 - \sum_{(k, l) \in \pi} a(k, l) \exp -j 2\pi (f_1 k + f_2 l)$$

$$B(f_1, f_2) = \sum_{(k', l') \in \pi'} b(k', l') \exp -j 2\pi (f_1 k' + f_2 l')$$

Les techniques d'estimation des paramètres conditionnellement à l'observation finie du champ aléatoire ne seront pas données ici (voir [4] pour plus de détails). On peut cependant dire que dans le cas de la modélisation AR (tous les $b(k', l')$ nuls sauf $b(0, 0) = 1$), la détermination des paramètres requiert la résolution d'un système d'équations linéaires (de type Yule-Walker) où intervient une estimation préalable de la FAC. Dans le cas de la modélisation ARMA (tous les paramètres non nuls), on estime d'abord les paramètres AR par une technique similaire, puis le numérateur de la DSP est calculé en fonction de ces derniers et de la FAC estimée du champ.

Adaptation à l'imagerie numérique : Le modèle linéaire donné en (1) n'est valable que pour les signaux centrés. La procédure habituelle lorsque ce n'est pas le cas, comme en imagerie numérique, consiste à pratiquer un centrage du signal avant traitement. Ceci peut être évité par l'introduction dans le modèle linéaire d'un paramètre traduisant la moyenne non nulle du signal:

$$x(m, n) = \sum_{(k, l) \in \pi} a(k, l) x(m - k, n - l) + \sum_{(k', l') \in \pi'} b(k', l') u(m - k', n - l') + a_0 \quad (3)$$

La présence de cette constante ne change pas le principe de calcul des autres paramètres. On peut en effet montrer qu'elle ne fait qu'ajouter une équation découplée au système linéaire à résoudre dans les deux cas AR et ARMA [7].

Le principe HM : Le choix non trivial de supports QP pour les parties AR et MA dans le modèle linéaire conduit à des DSP pouvant comporter une dissymétrie sous la forme d'un étirement des pics de puissance dans une direction privilégiée. Pour remédier à ce problème, Jackson et Chien [6] ont proposé de combiner deux DSP calculées à partir de modèles AR à support QP adjacents. Ce principe, appelé "Harmonic Mean" (moyenne harmonique), bien que n'ayant aucune correspondance en termes de modélisation du champ aléatoire lui-même, conduit néanmoins à un estimateur spectral performant, réduisant la dissymétrie des pics et le risque d'apparition de pics dédoublés ou parasites [8]. La combinaison de deux DSP P_1 (1er quadrant) et P_2 (2ème quadrant) est effectuée comme suit:

$$P_{HM} = 2(P_1^{-1} + P_2^{-1})^{-1} \quad (4)$$

Le principe HM, développé à l'origine pour un estimateur AR, peut être transposé de manière directe à l'estimation ARMA [4].

Nous allons, sur des images de simulation, tester et évaluer les qualités de ces estimateurs et les appliquer ensuite à des images

réelles.

III - SIMULATION

Le but de la simulation est de montrer le très bon comportement des modélisations AR et ARMA lorsque le principe HM est appliqué. Nous les comparons pour cela à deux méthodes éprouvées : le corrélogramme classique avec pondération de la FAC par une fenêtre triangulaire (Bartlett) ou méthode BC et la méthode du maximum d'entropie (ME) [9] qui est généralement utilisée lorsqu'on ne dispose que d'un nombre restreint de données.

Nous reprenons ici une approche classique de comparaison des estimateurs spectraux sur des signaux sinusoïdaux bruités. Nous présentons dans un premier temps l'allure générale de la DSP obtenue par les différentes méthodes pour des images synthétiques numériques qui comportent deux sinusoides bruitées de fréquence normalisée ($F1=[0,2 ; 0,3]$; $F2=[0,3 ; 0,2]$), d'amplitude égale, de phase nulle, de rapport S/N égal à 0 dB et de taille $32*32$ pixels.

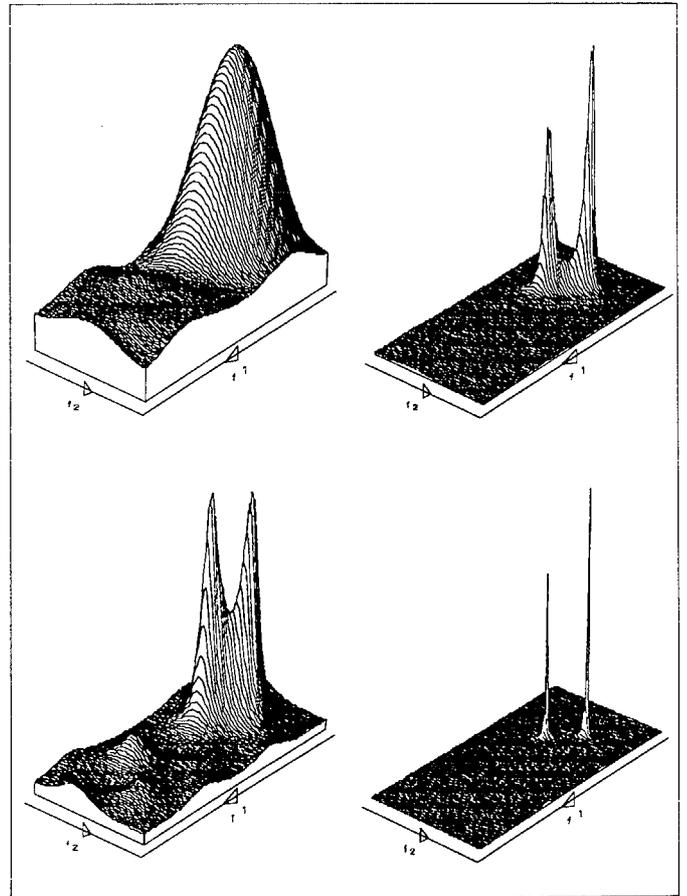


Fig. 1 - Résultats d'estimation spectrale par les méthodes : BC (Haut Gauche) ; ME (Haut-Droite) AR-HM (Bas-Gauche) ; ARMA-HM (Bas-Droite)

Les résultats de l'estimateur BC (Fig. 1) montrent clairement les limites de cette méthode. La localisation fréquentielle est imparfaite et les deux fréquences sont confondues. La méthode AR-HM améliore nettement la détection. Les défauts de la méthode AR classique (dissymétrie des pics et mauvaise localisation) ont disparu. Les pics principaux restent cependant assez larges ce qui nuit aux performances pour la séparabilité.

Enfin pour les estimateurs ME et ARMA-HM on note la bonne localisation fréquentielle et la symétrie circulaire des pics principaux. La méthode ARMA-HM semble qualitativement



présenter les meilleurs résultats.

Cela ne suffit cependant pas pour évaluer les performances des différents estimateurs et les classer entre eux. Nous avons alors procédé à une étude de la variance de l'estimation d'une fréquence à partir d'un grand nombre de réalisations d'une sinusoïde bruitée. Pour une fréquence et un rapport S/N donné nous avons fait varier la taille M de la fenêtre d'analyse et l'ordre du modèle (ou la taille du support de la FAC correspondant). La figure 2 présente un résultat typique où les estimateurs sont comparés à la borne de Cramer-Rao (variance minimale de l'estimation par maximum de vraisemblance).

Nous constatons que les résultats sont voisins pour l'ensemble des méthodes évaluées. Nous noterons que la méthode ME, de par son principe, présente la plus faible variance pour M petit et que la méthode ARMA-HM est la meilleure lorsque M augmente.

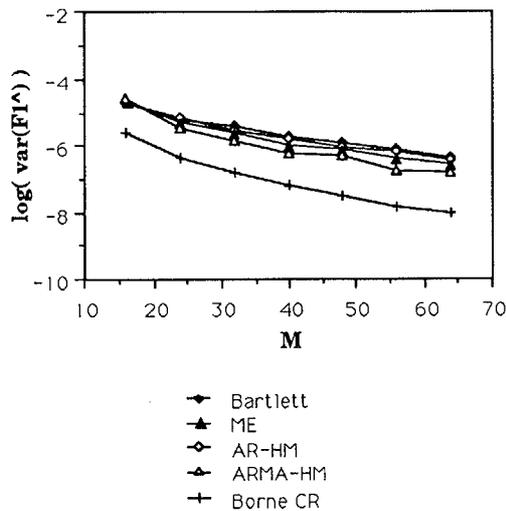


Fig. 2 - Variance d'estimation fréquentielle pour une sinusoïde 2D

IV - APPLICATIONS

Les méthodes AR-HM et ARMA-HM sont appliquées à deux types différents d'images de télédétection (optique et radar).

Une image SPOT (résolution 20*20 m, canal XS3, taille 512*512) de la surface de la mer au-dessus d'un haut fond corallien (banc Clark) situé près des îles Marquises est présentée figure 3. Cette image qui comporte des changements importants de direction de houle est analysée par la méthode AR-HM pour un ordre 5*5.

Pour cela, nous la découpons en 32*32 blocs de 32*32 pixels (recouvrement des blocs de 50%). La position de chaque pic principal détecté, transposée en vecteur proportionnel à la longueur d'onde et la direction de la houle nous permet de fournir une carte telle celle présentée figure 4. Cette carte est superposable à l'image et est très représentative de l'état de mer local. L'utilisation du périodogramme s'avère, ici, peu exploitable du fait de la taille réduite des fenêtres d'analyse.

Nous avons montré [4] que la méthode ARMA-HM s'adaptait naturellement de par sa modélisation aux images radar à ouverture synthétique (SAR) et présentait de meilleurs résultats d'estimation que les méthodes classiques (P, BC, ME, ...).

Pour illustrer l'application de cette méthode nous avons alors choisi une image de la région des îles de Glénan (Sud-Finistère) (Fig. 5), obtenue par le satellite SEASAT (n° 7701, orbite 785). Nous notons sur l'image plusieurs systèmes de houle croisés, ce qui entraîne le choix de fenêtres de petite taille pour l'analyse de

zones localement stationnaires.

L'image, de taille 512*512 et de résolution 25*25 m, est ainsi découpée en 32*32 blocs de 32*32 pixels et un filtre ARMA-HM d'ordre (4,4,4,4) est utilisé. De nouveau la sélection du pic principal dans chaque fenêtre d'analyse permet d'aboutir à une carte (Fig. 6) de longueurs d'onde-direction de houle. La superposition de cette carte à l'image originale montre le très grand intérêt de cette technique pour l'estimation des variations locales de houle aux abords des côtes. Cela est particulièrement clair lorsque l'on se réfère à des études [10] effectuées sur la même zone avec des méthodes classiques (Transformée de Fourier) où les paramètres sont estimés sur des surfaces de mer 64 fois plus importantes.

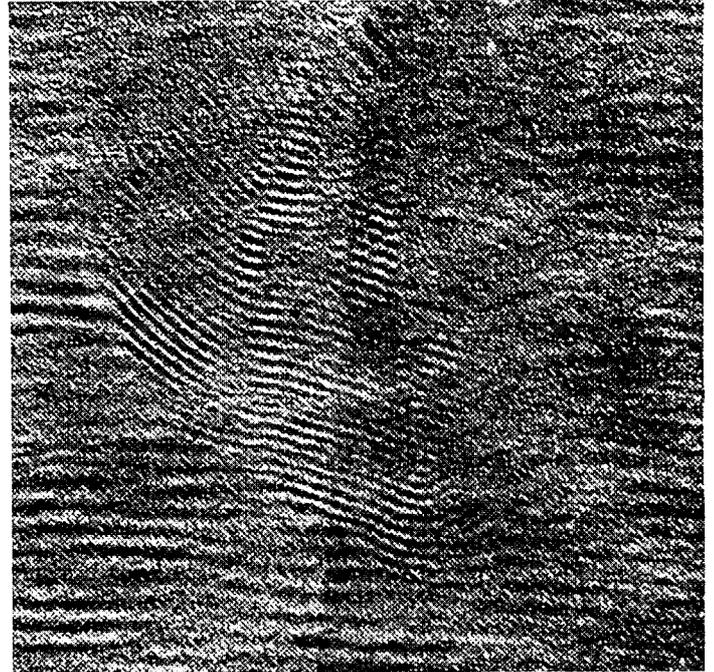


Fig. 3 - Image SPOT - Banc Clark, Iles Marquises

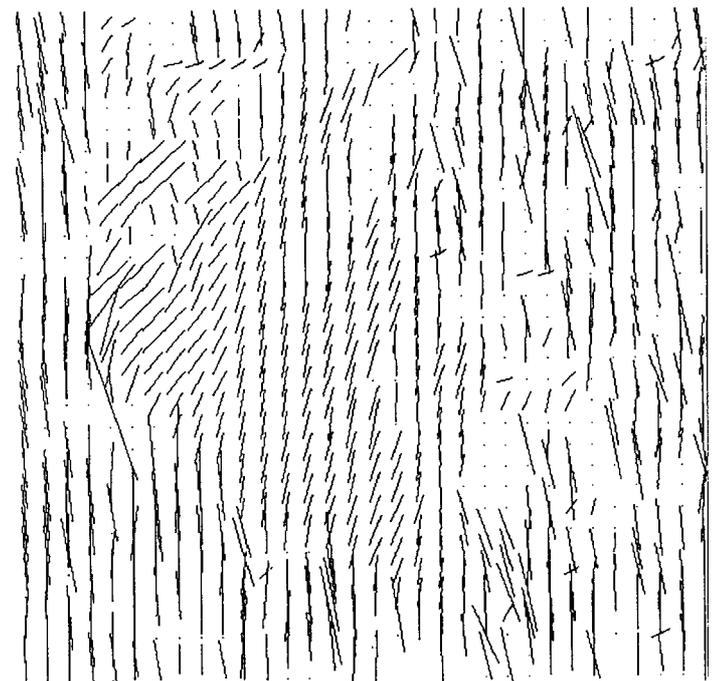


Fig. 4 - Carte de longueur d'onde-orientation superposable à l'image SPOT

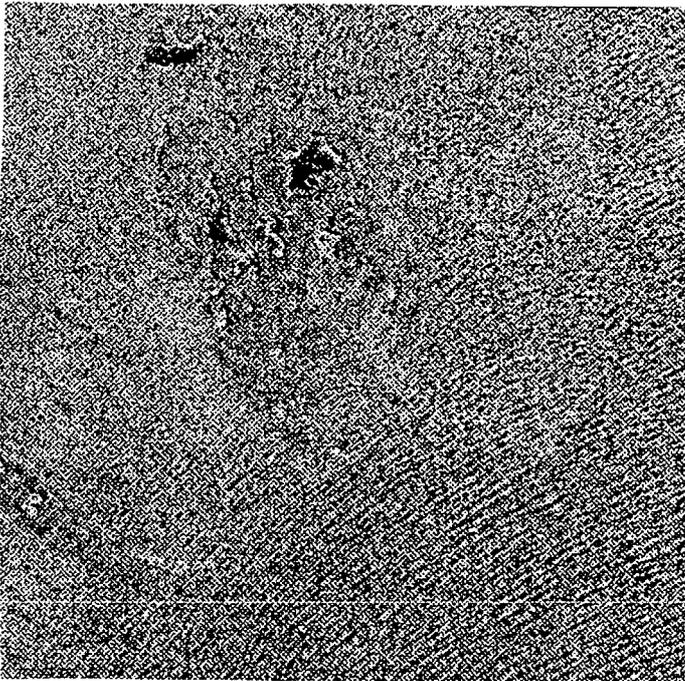


Fig. 5 - Image SEASAT - Iles de Glénan

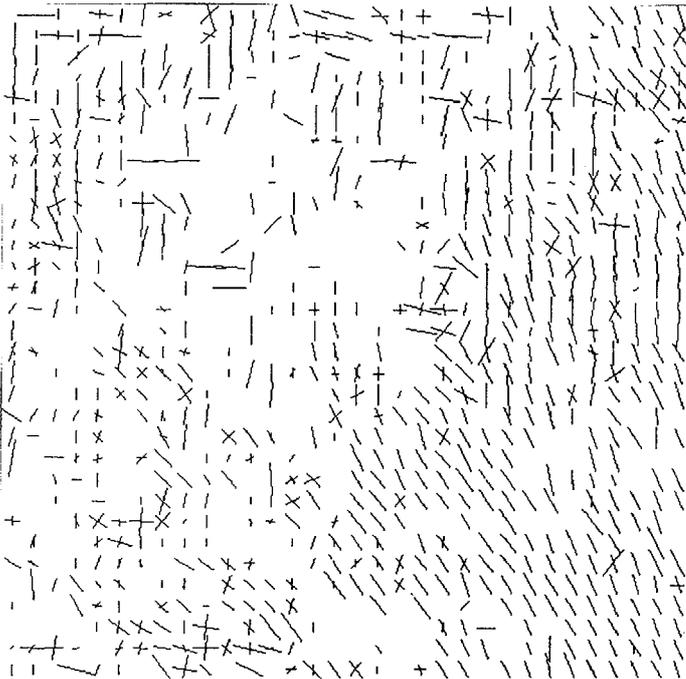


Fig. 6 - Carte superposable à l'image SEASAT

V - CONCLUSION

Nous avons présenté deux méthodes d'analyse spectrale paramétrique s'appuyant sur la modélisation autorégressive (AR) et autorégressive moyenne mobile (ARMA). Nous avons montré que le principe de la moyenne harmonique (HM) permettait d'obtenir une estimation plus robuste des paramètres recherchés. Ces paramètres reliés à la position des pics dans le domaine fréquentiel sont calculés sur des fenêtres de petite taille.

Nous avons appliqué cette technique à des images de télédétection, de type optique ou radar, de la surface de la mer obtenues par satellite. Ces images sont choisies de façon à présenter de petites zones de stationnarité localisée.

Nous avons montré, par l'intermédiaire de cartes de longueur d'onde et d'orientation de la houle, que nous pouvons détecter et estimer des variations locales dans les paramètres de houle. Cette technique semble prometteuse pour l'analyse des phénomènes à proximité des côtes où de telles variations existent.

VI - REFERENCES

- [1] Beal R.C., Tilley D.G., Monaldo F.M., "Large- and small-scale spatial evolution of digitally processed ocean wave spectra from SEASAT synthetic aperture radar," *J. Geophys. Res.*, 88, pp. 1761-1778, 1983.
- [2] Monaldo F.M., Lyzenga D.R., "On the estimation of wave slope- and height- variance spectra from SAR imagery," *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, GE-24, pp. 534-551, 1986.
- [3] Populus J., Aristaghes C., Jonsson L., "The use of SPOT data for coastal wave analysis," *Proc. IGARSS'90*, Washington, pp. 125-128, May 1990.
- [4] Cariou C., "Analyse spectrale d'images numériques. Application à la télédétection spatiale des océans," Thèse de Doctorat, Brest, 1991.
- [5] Woods J.W., "Two-dimensional Markov spectral estimation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, IT-22, pp. 552-559, 1976.
- [6] Jackson L.B., Chien H.C., "Frequency and bearing estimation by two-dimensional linear prediction," *Proc. ICASSP'79*, Washington, pp. 665-668, Apr. 1979.
- [7] Maragos P.A., Schafer R.W., Mersereau R.M., "Two-dimensional linear prediction and its application to adaptive predictive coding of images," *IEEE Trans. Acous. Speech Sign. Proc.*, ASSP-32, pp. 1213-1229, 1984.
- [8] Zou L., Liu B., "On resolving two-dimensional sinusoids in white noise using different spectral estimates," *IEEE Trans. Acous. Speech Sign. Proc.*, ASSP-36, pp. 1338-1350, 1988.
- [9] Lim J.S., Malik N.A., "A new algorithm for two-dimensional maximum entropy power spectrum estimation," *IEEE Trans. Acous. Speech Sign. Proc.*, ASSP-29, pp. 401-413, 1981.
- [10] Forget P., "Une étude expérimentale de l'imagerie SAR des vagues," *Oceanol. Acta, Actes du Coll. Océano. Spat.*, Brest, Nov. 1985, n° SP, pp. 7-14, 1987.