

MANIFESTATION A LA SURFACE DE L'OCEAN  
DE PHENOMENES SOUS-MARINS VISIBLES PAR RADAR SAR

Auteur : J.P. BORLETEAU

SIREHNA : 2 Quai de la Jonelière  
44300 NANTES - FRANCE  
Tél : 40.74.61.71

Résumé

Un modèle théorique simplifié de l'interaction houle-courant en surface proposé par Hughes [1] a été retenu. Un programme de calcul 1-D a été développé et appliqué au cas de haut-fonds avec courant de marée, et à des ondes internes. Un autre programme de calcul 2-D a été développé pour l'application à des sillages.

Summary

A simplified theoretical model of surface wave-current interaction proposed by Hughes [1] has been used. A one-dimensional computer program has been developed for application to tidal flow over bottom topography, and internal waves. A two-dimensional program has been developed for application to wakes.

## I - INTRODUCTION

Des observations par un radar SAR porté par un satellite, un avion, ou une navette permettent de détecter certains phénomènes sous-marins se manifestant à la surface de l'océan : passage d'ondes internes, sillages, variations de courant induites par un courant de marée au dessus d'un haut fond.

Les phénomènes hydrodynamiques résultant de l'interaction houle-courant au niveau de la surface libre sont susceptibles d'expliquer de telles observations : en effet, le spectre d'une houle pénétrant dans le champ de vitesse d'un écoulement en surface (résultant soit d'une onde interne, soit d'un sillage, ou encore de l'interaction d'un courant de marée avec un relief sous-marin) est modifié. Ces modifications se traduisent au niveau du radar par des variations d'intensité de l'onde électro-magnétique rétrodiffusée par la surface de l'océan. D'après la théorie de la diffusion des ondes électromagnétiques de Bragg-Rice, l'intensité de l'onde rétrodiffusée est proportionnelle à l'amplitude du spectre de la houle pour le nombre d'onde  $k_B$  associé à l'onde incidente du radar. Dans le cas de la détection par radars SAR dans la bande L, la valeur nominale de  $k_B$  est comprise entre 18 et 20 rd/m.

Pour tenter de quantifier ces phénomènes, le modèle théorique simplifié de l'interaction houle-courant de Hughes [1] et de Thompson [2] a été retenu.

Après avoir décrit les points essentiels concernant ce modèle (chapitre 2), deux programmes d'application sont présentés pour un courant de surface monodirectionnel (chapitre 3) et multidirectionnel (chapitre 4). Le développement du programme de calcul 2-D constitue une contribution originale à l'étude des phénomènes d'interaction houle-courant en surface.

## II - MODELE THEORIQUE

Le modèle théorique d'interaction entre les ondes de surface et un courant de surface s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- (H1) Toutes les ondes sont considérées localement comme des ondes planes.
- (H2) Les variations spatiales de la vitesse du courant sont très lentes sur une longueur d'onde de la houle.
- (H3) Le courant de surface est stationnaire.

Le modèle est décrit par les équations de conservation cinématique et d'évolution de l'action d'onde, dans un repère fixe  $(Ox, Oy)$  dont le plan est parallèle au plan de la surface libre :

$$(2.1) \quad \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\sigma + \underline{k} \underline{V}) = 0$$

$$(2.2) \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \left( \underline{V} + \frac{\partial \sigma}{\partial \underline{k}} \right) \nabla N = \beta N \left( 1 - \frac{N}{N_e} \right)$$

Note : les variables soulignées représentent des vecteurs.

- où  $t$  est le temps,  
 $\underline{x}$  est le vecteur indiquant la position d'un point dans le plan  $(Ox, Oy)$ ,  
 $\underline{k}$  est le vecteur d'onde de la houle (composantes  $k_x$  et  $k_y$ ),  
 $\sigma$  est la pulsation de la houle ( $\sigma^2 = g |\underline{k}|$ ),  
 $\underline{V}$  est le vecteur vitesse du courant (composantes  $V_x$  et  $V_y$ ),  
 $N$  est la densité spectrale d'action d'onde en présence du courant de surface variable,  
 $N_e$  est la densité spectrale d'action d'onde à l'équilibre (courant constant),  
 $\beta$  est le taux de relaxation de la croissance de l'énergie des vagues par le vent.

L'équation (2.2) décrit les conditions dynamiques relatives à la propagation de l'énergie de la houle en présence du courant de surface variable [1,3] : l'équation a une forme simple en considérant la densité spectrale d'action d'onde  $N(\underline{k}, \underline{x}, t)$  au lieu de la densité spectrale des hauteurs de houle  $S(\underline{k}, \underline{x}, t)$ . Rappelons que :

$$(2.3) \quad N(\underline{k}, \underline{x}, t) = \rho \frac{\sigma}{k} S(\underline{k}, \underline{x}, t)$$

Le terme source-puits, second membre de l'équation (2.2), a tendance à forcer un retour du spectre d'énergie vers sa forme à l'équilibre. Ce terme traduit que l'action du vent sur la houle consiste à ramener le spectre d'énergie vers le spectre saturé ( $S_e = Ak^{-4}$ , d'après Phillips [4]), dès que l'équilibre est perturbé, par exemple par une variation locale du courant de surface. Une expression pour la fonction  $\beta(\underline{k})$  est proposée par Hughes :

$$(2.4) \quad \beta(\underline{k}) = \frac{\sigma u^* \cos \theta}{c} \left[ 0,01 + 0,016 |\cos \theta| \frac{u^*}{c} \right] \times \left[ 1 - \exp \left( - 8,9 \left( \frac{u^*}{c} - 0,03 \right)^{1/2} \right) \right]$$

La pulsation  $\sigma$  et la vitesse de phase  $C$  sont déterminées à partir de la connaissance du vecteur d'onde  $\underline{k}$  ; l'angle  $\theta$  est l'angle entre les directions de la houle et du vent. La vitesse de frottement due au vent  $u^*$  est égale à 1/30 de la vitesse du vent  $U_v$ .

### III - APPLICATION A UN COURANT MONODIRECTIONNEL

#### III.1 - PROGRAMMATION NUMERIQUE

Une quatrième hypothèse est considérée :

(H4) Le courant de surface varie seulement suivant la direction  $Ox$ .

L'équation (2.1) se ramène aux deux équations :

$$(3.1) \quad \sigma + k_x V_x = \sigma_0 + k_{x0} V_{x0}$$

$$(3.2) \quad k_y = k_{y0}$$

L'indice "0" correspond à une vitesse de courant de surface constante, à l'extérieur de la zone perturbée par une variation du courant de surface.

Le schéma de la programmation numérique est le suivant :

(i) La houle incidente est monodirectionnelle (angle  $\alpha$  par rapport à la direction  $Ox$ ) avec un spectre d'énergie à l'équilibre dans une région où le courant de surface est constant.

(ii) La méthode des caractéristiques est appliquée avec les équations :

$$(3.3) \quad \frac{dx}{dt} = V_x + \frac{\partial \sigma}{\partial k_x}$$

$$(3.4) \quad \frac{dy}{dt} = V_y + \frac{\partial \sigma}{\partial k_y}$$

pour calculer l'évolution de  $\underline{k}$  et  $N$ , en résolvant simultanément les équations (3.1), (3.2) et (2.2).

Dans la zone perturbée par le courant de surface variable, les quantités  $\sigma$ ,  $\underline{k}$ ,  $N(\underline{k})$  évoluent spatialement dans le plan  $(Ox, Oy)$ .

(iii) Les résultats du calcul sont présentés sous la forme :

$$(3.5) \quad \bar{S}(\underline{k}_B, \underline{x}) = S(\underline{k}_B, \underline{x}) / S_c(\underline{k}_B)$$

par analogie avec l'image SAR, qui représente l'intensité relative de l'onde électromagnétique rétrodiffusée :

$$(3.6) \quad \bar{I}_B(\underline{x}) = I_B(\underline{x}) / I_B^*$$

(où  $I_B^*$  est la valeur moyenne de  $I_B(\underline{x})$  sur le fond de l'image).

### III.2 - APPLICATION AUX HAUT-FONDS SOUS-MARINS

Il s'agit de comparer les résultats de calcul à une image SAR obtenue par le satellite SEASAT le 19 août 1978 à 6 h 45 TU sur le banc de South Falls dans la Manche.

La figure 3.1 précise la topographie du fond et les conditions océano-météo au moment du passage du satellite.

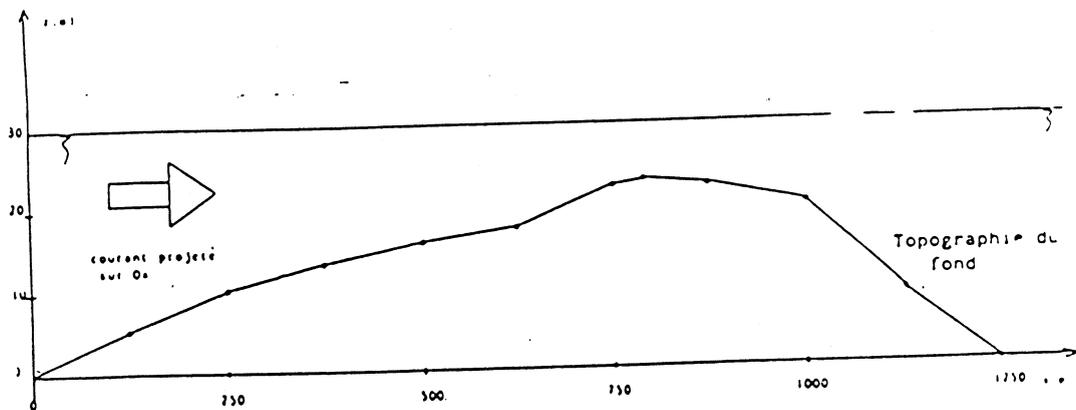
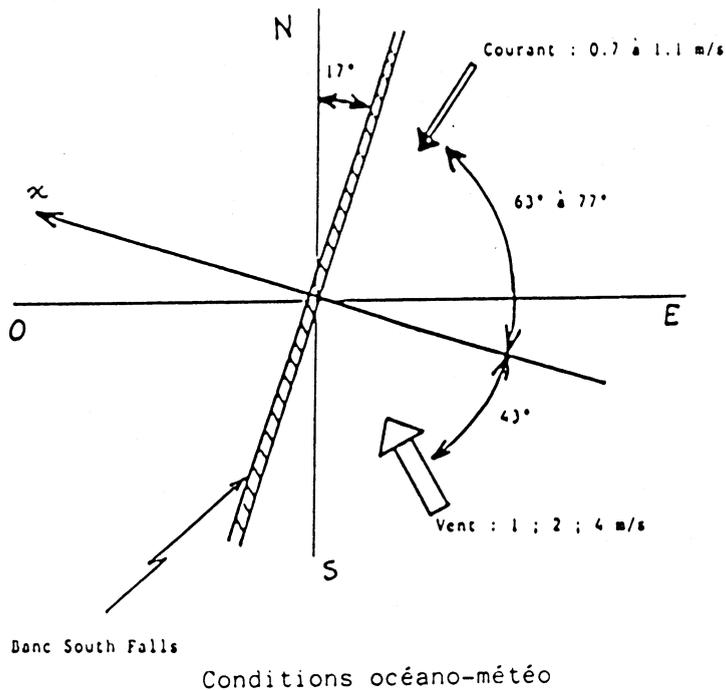
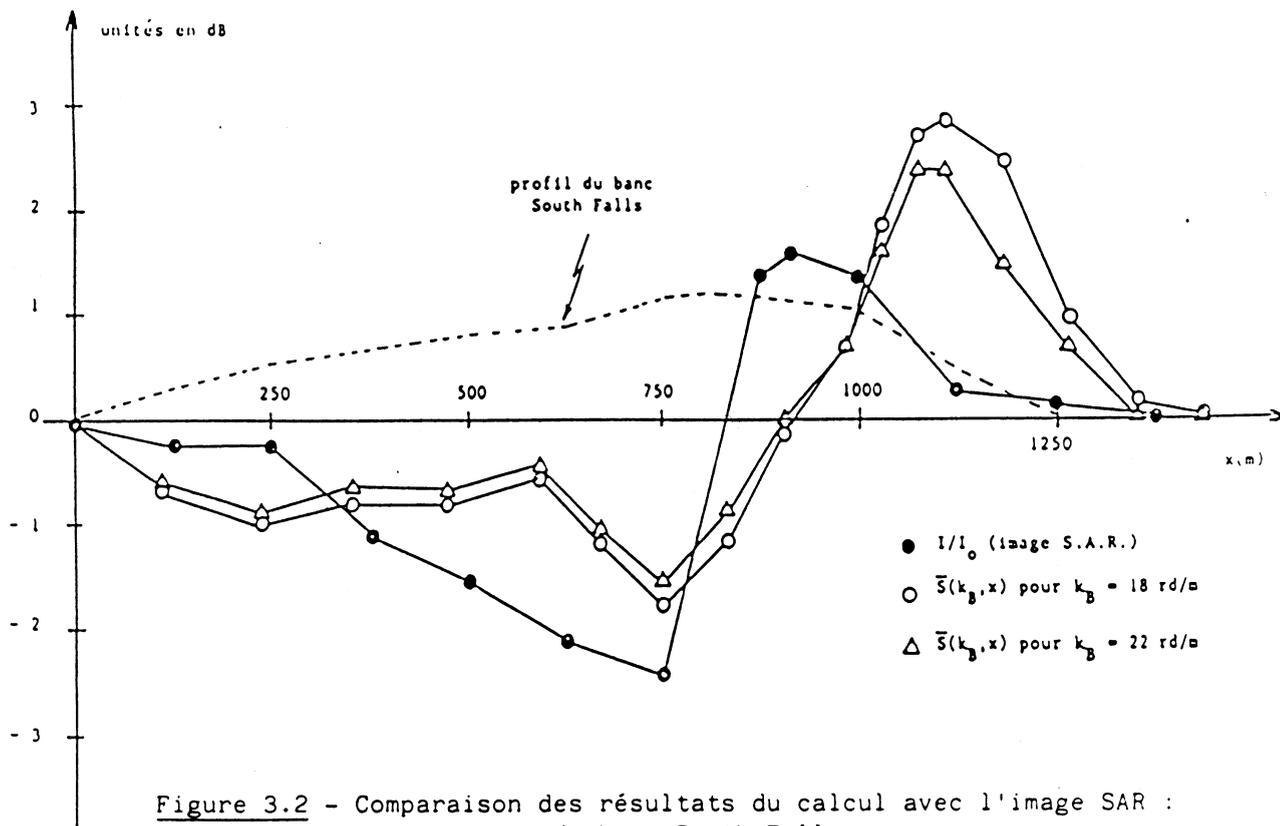


Figure 3.1 - Banc de South Falls

Pour appliquer le programme de calcul 1-D, on suppose que le courant de marée au dessus du haut-fond ne varie que suivant la direction  $Ox$ , en appliquant une relation de conservation de débit :  $U \cdot d = C^{te}$ ,  $d$  étant la profondeur d'eau et  $U$  la vitesse du courant.

Les résultats montrent que la modification du spectre d'énergie de la houle (pour  $k_B = 18$  rd/m) est d'autant plus marquée que la direction du vent se rapproche de l'axe  $Ox$ , l'intensité du vent diminue (de 4 m/s à 1 m/s), et la vitesse du courant de marée croît (de 0.15 m/s à 0.5 m/s).

Pour les conditions océano-météo nominales, le calcul retrouve l'allure du profil d'intensité SAR  $\bar{I}_B(x)$ , mais les positions et les valeurs des extrêmes de  $\bar{S}_B$  et  $\bar{I}_B$  diffèrent (figure 3.2).



Ces différences peuvent être attribuées à une approche trop simplifiée pour le calcul du courant de surface. Un calcul complet (3-D) du courant de marée au dessus du banc de South Falls permettrait d'obtenir un champ de vitesse en surface plus proche de la réalité. Auquel cas il serait nécessaire d'utiliser un modèle 2-D pour l'interaction houle-courant (cf chapitre IV).

### III.3 - APPLICATION A DES ONDES INTERNES

Le champ de vitesse en surface associé à l'onde interne est supposé stationnaire dans le repère mobile en translation à la vitesse  $C_T$  (vitesse de phase de l'onde interne). Les calculs sont effectués dans ce repère.

Un exemple de résultat est présenté dans le cas d'une onde interne de type "SARSEX", avec un modèle simplifié du courant de surface proposé par Apel [5] :

$$(3.7) \quad V'_x(x') = \frac{U_0}{\left( \text{Ch} \frac{2\pi x'}{L_I} \right)^2}$$

(l'indice "prime" se réfère au repère mobile) avec  $U_0 = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $L_I = 390 \text{ m}$ ,  $U_v = 6 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 145^\circ$  (figure 3.3).

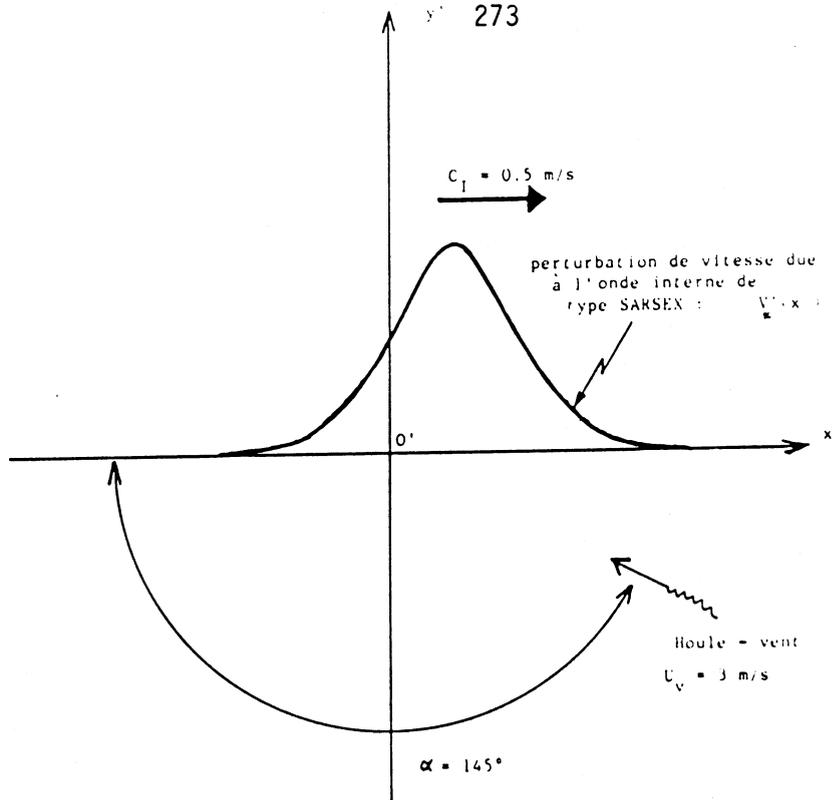


Figure 3.3 - Onde interne de type "SARSEX"

Les résultats obtenus avec notre programme (figure 3.4) sont en bon accord avec ceux de la figure 5 de l'article de Thompson [2].

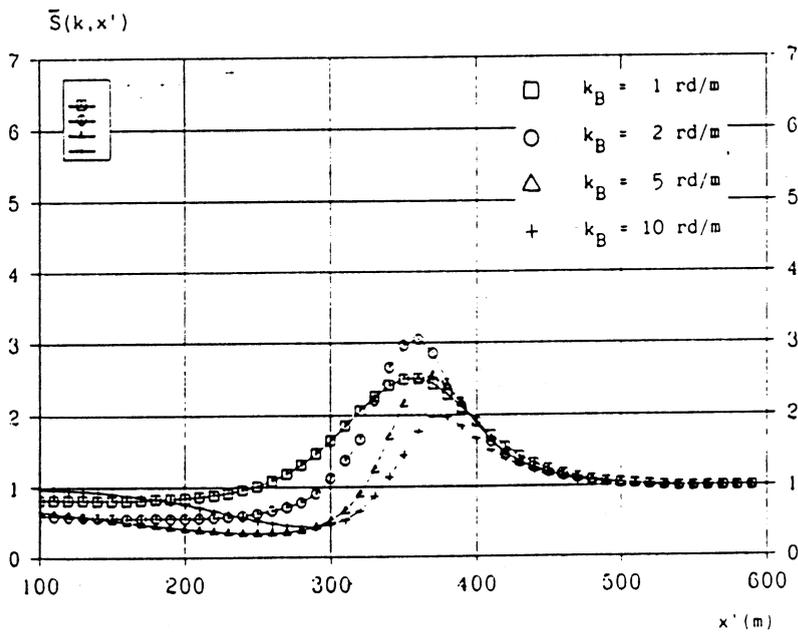


Figure 3.4 - Tracé de  $\bar{S}(k, x')$  : cas de l'onde interne "SARSEX"

$U_V = 6 \text{ m/s}, \alpha = 145^\circ, C_I = 0.5 \text{ m/s}$

Cependant, le niveau des valeurs de  $\bar{S}$  ne coïncide pas avec celui des intensités SAR de la campagne SARSEX, ce qui est aussi le cas pour les résultats de Thompson.

Une étude de sensibilité des paramètres montre que :

- en changeant la valeur de  $C_I$  de 0.5 m/s à 0.7 m/s il n'y a pas de modification significative de  $\bar{S}$ ,
- en augmentant  $\alpha$  de  $145^\circ$  à  $165^\circ$ , les valeurs les plus élevées de  $\bar{S}$  augmentent,
- en diminuant  $U_v$  de 6 m/s à 4.5 m/s,  $\bar{S}$  croît.

#### IV - APPLICATION A UN COURANT DE SURFACE MULTIDIRECTIONNEL

Pour appliquer le modèle de l'interaction houle-courant de surface à des sillages de corps, il s'est avéré nécessaire de développer un programme de calcul 2-D permettant de prendre en compte les variations de vitesse du courant de surface associé au sillage. Les calculs sont effectués dans le repère mobile lié au corps, et le champ de vitesse  $\underline{V}'(x', y')$  est supposé stationnaire.

Les équations de conservation cinématique s'écrivent :

$$(4.1) \quad \frac{dk_x}{dt} = -k_x \frac{\partial V'_x}{\partial x'} - k_y \frac{\partial V'_y}{\partial x'}$$

$$(4.2) \quad \frac{dk_y}{dt} = -k_x \frac{\partial V'_x}{\partial y'} - k_y \frac{\partial V'_y}{\partial y'}$$

Le schéma de la programmation numérique est le suivant :

- (i) La houle incidente est monodirectionnelle dans une région où le courant de surface est constant et le spectre d'énergie à l'équilibre. La direction de la houle par rapport à l'axe  $Ox$  est donnée par l'angle  $\alpha$  :

$$k_{x_0} = k_0 \cos \alpha$$

$$k_{y_0} = k_0 \sin \alpha$$

où  $k_0$  est le module du vecteur d'onde  $\underline{k}_0$ .

- (ii) Le calcul des lignes caractéristiques suivant les équations :

$$(4.3) \quad \frac{dx}{dt} = V'_x - V_A + \frac{\partial \sigma}{\partial k_x}$$

$$(4.4) \quad \frac{dy}{dt} = V'_y + \frac{\partial \sigma}{\partial k_y}$$

$$\left( \sigma^2 = g \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \right)$$

est effectué pour différentes valeurs de  $k_0$  voisines de  $k_B$ , en partant d'un point  $(x_0, y_0)$  situé dans une région où le courant a une vitesse constante  $\underline{V}_0$ . Le calcul est répété pour différentes valeurs de  $y_0$  ( $-y_A < y_0 < +y_A$ ).

A chaque pas de calcul des lignes caractéristiques, les nouvelles valeurs de  $k_x$ ,  $k_y$  et  $N$  sont déterminées en résolvant les équations (4.1), (4.2) et (2.2), à l'aide de l'algorithme de Runge-Kutta à l'ordre 4. Les valeurs de  $\beta$  et  $N_e$  sont recalculées à chaque pas de calcul, en tenant compte des modifications de  $k$ .

(iii) Le résultat des calculs constitué d'un réseau de lignes caractéristiques paramétrées par  $(y_0, k_0)$  :

- les coordonnées du point courant étant :

$$\begin{aligned} x' &= f_1(y_0, k_0, t), \\ y' &= f_2(y_0, k_0, t), \end{aligned}$$

- les quantités évaluées au point courant étant :

$$\begin{aligned} k_x &= f_3(y_0, k_0, t), \\ k_y &= f_4(y_0, k_0, t), \\ N^y &= f_5(y_0, k_0, t). \end{aligned}$$

( $t$  étant un paramètre pour décrire la ligne).

est analysé pour fournir une distribution spatiale de  $\bar{S}(x', y')$ , amplitude relative associée au nombre d'onde  $k_p$ . La distribution  $\bar{S}(x', y')$  représente l'analogie d'image SAR  $\bar{I}(x', y')$  (intensité relative).

L'application de ce programme reste à valider sur un cas concret.

## V - CONCLUSION

Pour tenter de quantifier la manifestation à la surface de l'océan de phénomènes sous-marins visibles par un radar SAR porté par un satellite ou un avion, un modèle théorique simplifié de l'interaction houle-courant en surface a été appliqué.

Des programmes numériques adaptés à deux types de courant de surface variable (unidirectionnel/multidirectionnel) ont été développés en utilisant la méthode des caractéristiques pour la résolution des équations. Des exemples d'application présentés dans ce document montrent quelques résultats typiques obtenus. La comparaison avec des résultats expérimentaux reste encore qualitative.

Pour obtenir une évaluation quantitative des phénomènes visibles par radars SAR, d'importants efforts de recherche sont encore nécessaires, pour améliorer la modélisation théorique (spectre de houle multidirectionnel et fonction de relaxation), et pour disposer de données expérimentales parfaitement documentées, obtenues soit au réel, soit en laboratoire.

Remerciements : Cette étude a pu être réalisée grâce au support financier de la DRET/SDR/Groupe 6 dans le cadre du contrat n°87/456.

Nous tenons également à remercier Monsieur Patrice SULMONT, Directeur du Laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'ENSM pour sa collaboration efficace et ses conseils.

REFERENCES

- [1] HUGHES B.A. (1978)  
"The effect of internal waves on surface wind waves. Part.2  
theoretical analysis"  
J. of Geoph. Res. - Vol. 83, n° C1 - January 1978.
- [2] THOMSON D.R. (1985)  
"Intensity modulations in synthetic aperture radar images of ocean  
surface currents and the wave-current interaction process"  
John Hopkins APL Technical Digest Vol. 6, n°, pp.346-353.
- [3] BRETHERTON F.P., GARRET C.J.R. (1969)  
"Wave trains in inhomogeneous moving media"  
Proc. Roy Soc. A 302, 529.
- [4] PHILLIPS O.M. (1976)  
"The dynamics of the upper ocean"  
Cambridge University Press 1976
- [5] APEL J.R., GONZALES F.I. (1983)  
"Non linear features of internal waves of Baja California as  
observed from the SEASAT imaging radar"  
J. of Geoph. Res. Vol.88, n° C7, pp.4459-4466, May 20, 1983.