



## **Analyse spatio-temporelle de la propagation des vagues au-dessus d'une barre artificielle en canal à houle**

Cyril Dulou, *Docteur, Département de Géologie et Océanographie, UMR 5805-EPOC, Université de Bordeaux I, 33405 Talence, cedex. 05 56 84 88 35. c.dulou@epoc.u-bordeaux.fr*

Nadia Sénéchal, *Doctorante, Département de Géologie et Océanographie, Université de Bordeaux I, n.senechal@epoc.u-bordeaux.fr*

### Résumé

Cette étude présente les premiers résultats d'une approche expérimentale à petite échelle de la propagation d'une houle bichromatique au-dessus d'une barre artificielle indéformable. Le dispositif expérimental a permis d'obtenir une discrétisation très fine de l'évolution spatio-temporelle des interactions non-linéaires onde-onde au passage de la barre. L'analyse de l'enveloppe de la fréquence « différence » qui résulte de l'onde bichromatique montre la présence d'un battement après la barre, uniquement dans le cas où la vague ne déferle pas sur la barre. Ce battement, qui traduit la présence de modes liés et libres à la même fréquence, souligne la difficulté d'interprétation lorsque les mesures sont plus espacées.

### Abstract

This study presents the first results from a small-scale experiment of the propagation of bichromatic waves above an artificial bar. The experimental facilities have permitted to obtain a fine discretization of both spatial and temporal evolution of wave-wave interactions due to the bar. The analysis of the envelope of the "difference" frequency which results from the bichromatic wave, shows the presence of a beating after the bar. This beating, which means the presence of both free and bound modes at a same frequency, underlines the difficulty to interpret spaceless measurements.

### **1.Introduction**

Le trait de côte et plus particulièrement celui des côtes sableuses a une évolution spatio-temporelle plus ou moins marquée. Or de nombreuses infrastructures humaines ont été construites sur ce trait de côte et se retrouvent en difficulté face aux variations climatiques ou météorologiques. Un des challenges de ce nouveau millénaire est donc de prévoir à long terme l'évolution du trait de côte. C'est un des thèmes du Programme National de l'Environnement Côtier (Art 7 du PNEC).

Cette étude expérimentale à petite échelle s'insère donc dans cette grande thématique. Nous nous sommes donc intéressés aux transformations de la houle au passage d'une barre sous-marine. Ce sujet a été étudié tant sur le plan expérimental (Rey et al., 1992 ; Beji and Battjes, 1993), que sur le plan numérique (Roelvink and Stive, 1989 ; Madsen *et al.*, 1997 ; Becq, 1998). Des transferts d'énergie entre les composantes harmoniques qui composent la houle incidente sont liés aux interactions non-linéaires onde-onde qui se produisent au passage de la barre (Beji and Battjes, 1993).

Cependant, les harmoniques ainsi générées, peuvent être soit libres, soit liées aux ondes primaires (qui composent le spectre initial d'énergie). Par exemple, quand la profondeur diminue, des hautes fréquences apparaissent et sont liées aux ondes primaires : elles ont donc la même vitesse de phase ; d'un point de vue temporel, ces hautes fréquences liées se traduisent en une déformation ou asymétrie du profil de la vague (Roelvink and Stive, 1989).

Au contraire, quand la profondeur augmente sur la partie aval de la barre, les harmoniques peuvent être libérées, c'est-à-dire qu'elles se propagent avec leur propre vitesse de phase (Madsen *et al.*, 1997 ; Dulou *et al.*, 2000a). On peut donc trouver les deux modes (libre et lié) à une même fréquence : un battement apparaît dans l'évolution spatiale de l'énergie associée à cette fréquence à cause de la différence de vitesse de phase (Hulsbergen, 1974 ; Dulou *et al.*, 2000a).

Les premiers résultats de nos expériences sur la propagation d'une houle bichromatique, houle composée de 2 ondes libres, au-dessus d'une barre artificielle indéformable montrent la présence de battements dans l'enveloppe de la composante sous-harmonique (à la fréquence « différence » des deux ondes libres).

Le plan de ce travail est le suivant : les conditions expérimentales sont présentées dans la section 2, une présentation des premiers résultats est effectuée dans la section 3 et enfin la présence du battement dans l'enveloppe de la fréquence « différence » est analysée dans la section 4.

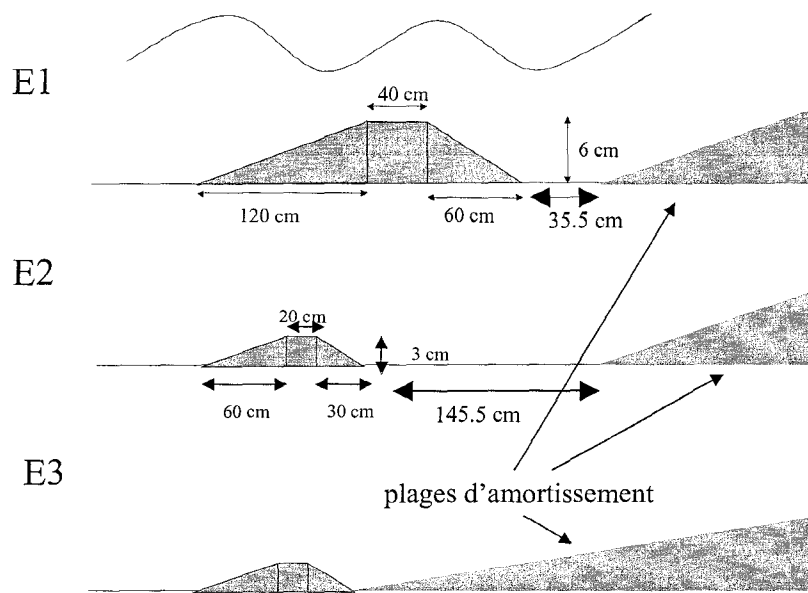
## **2. Dispositif Expérimental**

Les expériences ont été réalisées dans le canal à houle de l'IUSTI. Le canal est de petite taille et ses caractéristiques ont déjà été présentées dans Dulou *et al.* (2000b).

### **2.1 Description des expériences (E1, E2, E3)**

Trois types d'expériences de propagation de houle au-dessus d'une barre ont été menés dans le canal.

Les deux premières expériences (E1 et E2) se sont déroulées avec une barre artificielle indéformable (en PVC) de même géométrie, mais à l'échelle  $\frac{1}{2}$  pour la deuxième expérience, à la suite desquelles le fond est horizontal. La géométrie et les dimensions de la barre de l'expérience 1 (E1) sont présentées dans la figure 1. Les dimensions de la barre à l'échelle  $\frac{1}{2}$  de l'expérience 2 (E2) sont également sur la figure 1.



**Figure 1 : configurations des trois expériences.**

*Figure 1 : configurations of the three experiments.*

Pour E1, le pied de la pente en amont de la barre est situé à 102.5 cm du batteur, et le pied de la pente en aval est situé à 35.5 cm du début de la plage d'amortissement. Pour E2, le pied de la pente amont est situé au même endroit que pour E1. La plage d'amortissement est une plaque de PVC inclinée sur laquelle la houle s'atténue par déferlement. Cette plage induit une réflexion inférieure à 10% pour les composantes primaires (les plus énergétiques :  $f_1$  et  $f_2$ ).

L'expérience 3 (E3) a été menée avec la barre de E2 (barre à l'échelle  $\frac{1}{2}$ ) à la suite de laquelle démarre une nouvelle plage d'amortissement comme le montre la figure 1. Cette troisième expérience permet de se rapprocher de la configuration naturelle des systèmes barre-baïne présents en bas de zone intertidale sur les plages du littoral aquitain, où la profondeur diminue après le passage de la barre.

La surface libre a été mesurée à l'aide de deux capteurs à ultra-sons (Dulou, 2000). Ces capteurs enregistrent simultanément en deux abscisses différentes espacées de 22 cm. De plus, ces capteurs sont montés sur un chariot qui peut se déplacer au-dessus du canal. On obtient ainsi des enregistrements spatio-temporels de la surface libre. Pour chaque essai, deux types de mesures ont été effectués. La première mesure est celle de l'enveloppe de l'onde, et la deuxième est un enregistrement temporel en différents points du canal. Le tableau 1 rassemble les caractéristiques de ces enregistrements.

	Enveloppe	Temporel
Durée d'enregistrement	3.3 s	53.6 s
Nombre d'abscisses	250	20
Nombre de points de mesures	256	4096
Distance entre 2 abscisses	1.05 cm	13.22 cm

**Tableau 1 : Caractéristiques des enregistrements.**

*Table 1 : Measurement characteristics.*

## 2.2 Conditions de houle

Pour chaque configuration (E1, E2 et E3), une houle bichromatique était générée par le batteur. Les deux fréquences principales étaient  $f_1 = 0.8$  Hz et  $f_2 = 1.2$  Hz, afin d'avoir dans nos conditions expérimentales une onde plutôt longue ( $f_1$ ) et une onde plutôt courte ( $f_2$ ). L'étude en monochromatique de ces deux ondes fût aussi effectuée.

Pour chaque essai, une étude en amplitude (hauteur initiale  $H_0$  de 0.2 cm à 2.5 cm) pour différentes hauteurs d'eau au-dessus de la barre ( $h_{bar}$  de 2 cm à 7 cm) a permis de modéliser des conditions de houle non-déferlantes (linéaires et fortement non-linéaires) et déferlantes au niveau de la barre.

## 3. Résultats : libération d'harmoniques

Nous avons vu que le dispositif expérimental permettait une analyse spatio-temporelle très fine de la propagation de la houle au-dessus de la barre. Nous avons donc décidé d'analyser la variation spatiale de la hauteur de la houle, c'est-à-dire l'enveloppe. En fait, nous décomposons en séries de Fourier l'enveloppe totale mesurée et nous obtenons l'enveloppe de chaque composante harmonique de l'onde.

De nombreux travaux expérimentaux (Beji and Battjes, 1993 ; Becq, 1998 ; Sénéchal *et al.*, 2001) et numérique (Madsen *et al.*, 1997 ; Grilli and Horrillo, 1999) mettent en évidence la libération d'harmoniques liées à leur fondamental au passage d'une barre. En effet, quand la profondeur diminue en amont de la barre, la vague devient non-linéaire et son profil se déforme : génération d'harmoniques supplémentaires liées qui se propagent avec la même vitesse de phase que leur fondamental. A partir de la zone horizontale de la barre et de la zone de deshoaling (zone où la profondeur augmente en aval de la barre), les harmoniques liées peuvent être « libérées » : elles se propagent alors avec leur propre vitesse de phase, qui peut être déterminée par la relation de dispersion.

Dulou *et al.* (2000a) ont montré expérimentalement l'effet de la présence simultanée des modes libres et liés sur l'enveloppe : un battement apparaît du fait de la différence de vitesse de phase. La présence du battement est donc le signe de la présence des deux modes qui ont la même fréquence mais pas le même nombre d'onde. Ce battement a une longueur d'onde locale de :  $2\pi / (K_{libre} - K_{lié})$  avec respectivement,  $K_{libre}$  le nombre d'onde local du mode libre à la pulsation de la composante harmonique et  $K_{lié}$  le nombre d'onde local du mode lié à la même

pulsation. On trouve par conséquent un battement qui est plus grand que le battement dû à la réflexion (succession de ventres et de nœuds) qui aurait pour longueur d'onde :  $2\pi / 2K_{libre}$ .

Nous nous sommes donc intéressés à l'expérience E2 dont la partie de profondeur constante en aval de la barre permet de voir une variation spatiale de la hauteur des composantes harmoniques induite par la barre.

Le cas présenté dans la figure 2 est un essai avec une houle bichromatique ( $f_1 + f_2$ ) où la hauteur initiale de la vague est  $H_0 = 0.97$  cm. La profondeur d'eau au-dessus de la barre est  $h_{bar} = 5$  cm. Nous avons représenté sur des graphes différents les composantes harmoniques principales de la houle. Sur le premier graphe (fig 2.a), l'enveloppe totale de la houle est reportée ainsi que les enveloppes des composantes  $f_1$  et  $2f_1$ . Les enveloppes des composantes  $f_2$  et  $2f_2$  sont représentées sur le graphe au-dessous (fig 2.b). Sur le troisième graphe (fig 2.c), on peut voir les enveloppes des composantes  $f_1 + f_2$  (1.6 Hz) et  $f_2 - f_1$  (0.4 Hz). Enfin, le dernier graphe représente la bathymétrie (fig 2.d).

La première observation est la différence de hauteur initiale entre les deux fréquences principales  $f_1$  et  $f_2$ . En effet,  $f_1$  a un poids initial presque divisé par deux par rapport à  $f_2$ . Cependant l'évolution de leur enveloppe est assez similaire : on voit que la hauteur diminue légèrement au passage de la barre (figures 2.a et 2.b).

On observe aussi une différence entre l'enveloppe de  $2f_1$  et celle de  $2f_2$  : un battement apparaît dans l'enveloppe de  $2f_2$ . Ce battement est bien représentatif de la présence de modes libres et liés à la fréquence  $2f_2$  (Dulou et al., 2000a). D'après la théorie linéaire, le nombre d'onde de l'onde libre à la fréquence  $2f_2$  est  $K_{libre} = 0.2417$  cm<sup>-1</sup> et celui de l'onde liée est  $K_{liée} = 2 K(f_2) = 0.1845$  cm<sup>-1</sup>. Pour la profondeur 8 cm, on obtient donc un battement de longueur :

$$A = 2\pi / (K_{libre} - K_{liée}) = 109.9 \text{ cm}$$

Le battement que l'on mesure sur la figure 2.b a une longueur de 125 cm  $\pm$  2cm. Cependant on voit que la profondeur n'est pas constante au niveau du battement, ce qui entraîne un battement plus grand car la profondeur est inférieure à 8 cm. Si on prend une profondeur moyenne de 6.5 cm, on calcule un battement de longueur d'onde  $\Lambda_{6.5} = 128$  cm, qui est donc proche de la longueur mesurée.

Sur le deuxième battement, on peut voir que sa longueur tend bien vers 110 cm malgré l'arrêt de l'enregistrement. Pour la composante  $2f_1$ , la longueur théorique du battement à 8 cm de profondeur est de l'ordre de 4.5 m ; compte tenu de la longueur du canal (5m), il nous est donc impossible d'aborder l'éventualité de la présence de modes libres à cette fréquence.

La deuxième observation que l'on peut faire est la présence d'un battement pour la composante  $f_2 - f_1$ . On veut donc déterminer si ce battement est dû comme précédemment à la superposition de deux ondes libre et liée ou s'il provient de la superposition d'une onde réfléchiée et d'une onde incidente car les basses fréquences se réfléchissent beaucoup plus sur les obstacles. On considère donc que le mode de fréquence  $f_2 - f_1$  (0.4 Hz) est lié au paquet d'onde que forme l'onde bichromatique.

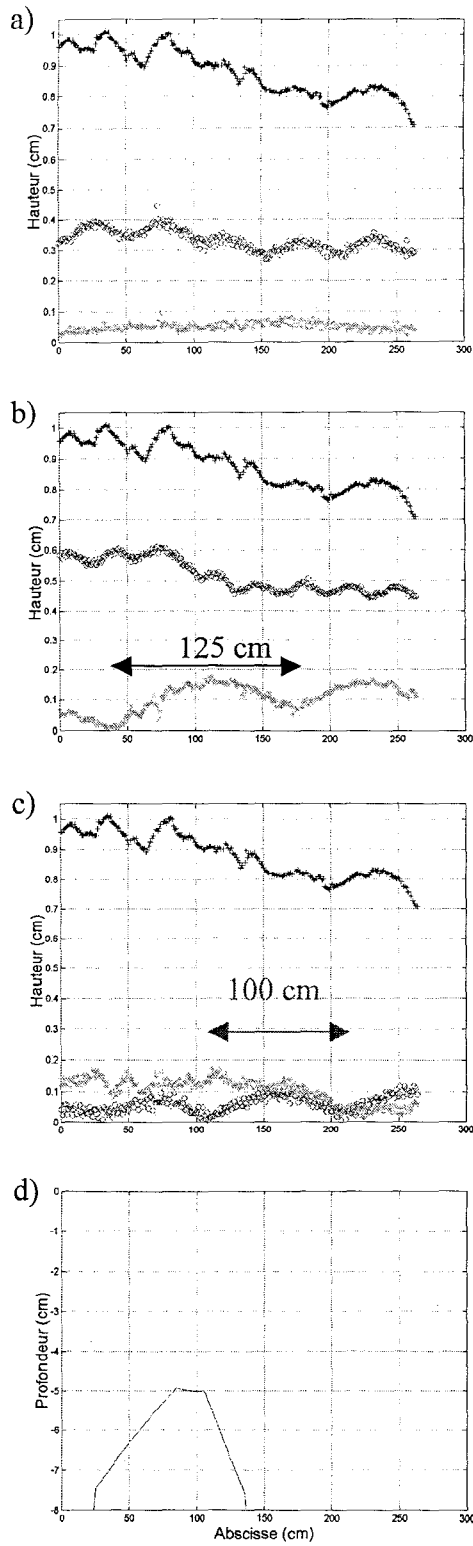


Figure 2 : a) enveloppe totale (+),  $f_1$  (o) et  $2f_1$  (\*); b) enveloppe totale (+),  $f_2$  (o) et  $2f_2$  (\*); c) enveloppe totale (+),  $f_1-f_2$  (o) et  $f_1+f_2$  (\*); d) profil bathymétrique.

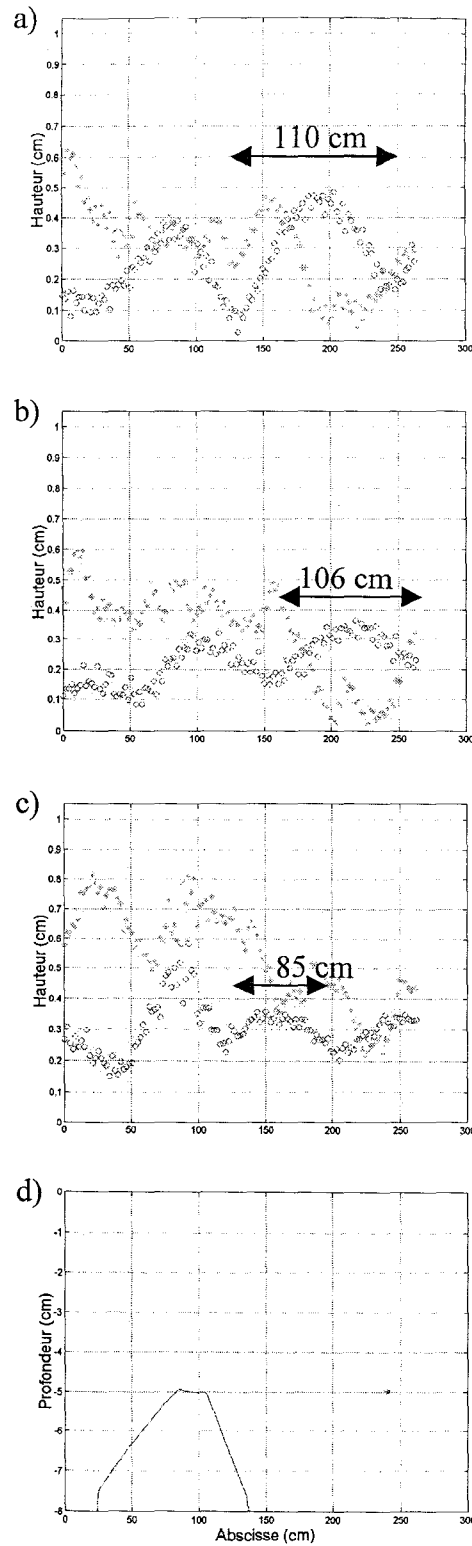


Figure 3 : enveloppe de  $f_1-f_2$  (o) et de  $f_1+f_2$  (\*) pour a)  $h = 10$  cm, b)  $h = 9$  cm et c)  $h = 6$  cm; d) profil bathymétrique ( $H_0 = 2$  cm).

Son nombre d'onde est donc  $k_{lié} = k_1 - k_2$  d'après la condition cinématique des équations générales du mouvement (Dulou, 2000) qui fait intervenir un terme quadratique : c'est par ce terme qu'apparaissent les harmoniques supérieurs ou les sous-harmoniques.

Pour 8 cm de profondeur, le nombre d'onde de l'onde libre à la fréquence 0.4 Hz est  $k_{libre} = 0.0286 \text{ cm}^{-1}$  et pour l'onde liée,  $k_{lié} = - 0.0335 \text{ cm}^{-1}$ . On obtient un battement de longueur :  $\Lambda = 101.1 \text{ cm}$ . Ce qui est très proche de la valeur mesurée :  $100 \pm 2 \text{ cm}$ .

Cependant, si on considère un battement dû à la réflexion, sa longueur d'onde est (toujours pour 8 cm) :  $2\pi / (2 k_{libre}) = 109.8 \text{ cm}$ . Il n'y a donc qu'un petit écart (10 cm) entre les deux longueurs, écart qui est d'ailleurs proche de l'erreur de mesure (2 cm). Comme la longueur du battement dépend de nombres d'onde qui varient avec la profondeur, on réalise d'autres mesures à des profondeurs différentes. Ces autres mesures sont regroupées dans la figure 3 où ne figurent que les composantes  $f_1+f_2$  et  $f_2-f_1$ , pour une hauteur initiale autour de 2.0 cm et une profondeur maximale de 10 cm (fig 3.a), 9 cm (fig 3.b) et 6 cm (fig 3.c). Le graphe 3.d représente le profil bathymétrique mesurée pour le cas  $h = 8 \text{ cm}$ ; il a été placé à cet endroit pour pouvoir repérer les graphes supérieurs par rapport à la barre, il ne faut donc pas tenir compte des informations concernant la profondeur.

Nous avons regroupé les différentes longueurs de battement (mesurées et théoriques) suivant la profondeur dans le tableau 2.

Profondeur	Longueur Mesurée	Longueur Théorique (libre/liée)	Longueur Théorique (réflexion)
6 cm	85 cm	89 cm	95 cm
8 cm	100 cm	101 cm	109 cm
9 cm	106 cm	106 cm	116 cm
10 cm	110 cm	110 cm	122 cm

Tableau 2 : comparaison des longueurs de battement mesurées et théoriques.

*Table 2: comparison between measured and theoretical length of beating.*

On remarque, d'après le tableau 2, que la longueur du battement augmente avec l'augmentation de la profondeur pour les deux modes de génération de ces battements. Cependant la valeur mesurée est toujours proche de celle donnée théoriquement par l'interaction libre/liée. On a un écart assez significatif pour la profondeur 6 cm (fig 3.c) qui doit être dû au battement qui est à cheval sur la barre et sur la partie horizontale, la profondeur à prendre en compte est donc inférieure à 6 cm, ce qui donnerait pour le calcul théorique une longueur plus petite. L'écart est très faible pour les cas où le battement est entièrement sur la partie de profondeur constante.

On peut donc considérer que le battement est induit par la superposition d'un mode libre et d'un mode lié à la même fréquence « différence »  $f_1 - f_2$ .

Une autre remarque concerne l'amplitude de ces battements qui diminue avec la profondeur. Cet effet peut être dû directement aux dimensions de la barre

par rapport aux longueurs d'onde des vagues (Dulou, 2000), ce qui atténuerait ou augmenterait la production des modes libres. Mais il peut y avoir aussi un effet dû au déferlement car avec la hauteur initiale des vagues des essais de la figure 3, le déferlement peut se produire au-dessus de la barre pour les profondeurs moyennes (à partir de 8 cm). Ce déferlement aurait donc un effet réducteur sur la production des modes libres ou des modes liés (comme le montre d'ailleurs Ruessink (1998)) dans la fréquence « différence ».

#### **4. Conclusion**

Les premiers résultats d'une étude expérimentale à petite échelle ont été exposés. Ces résultats concernent surtout l'évolution de l'enveloppe de la fréquence différence induite par l'onde bichromatique. On observe à cette fréquence la superposition de modes libres et liés qui se traduit par la présence d'un battement dans l'enveloppe. On remarque que la proportion de modes libres par rapport aux modes liés varie suivant la profondeur et qu'il y a un effet du déferlement par atténuation d'un des deux modes. Ce mode qui est atténué reste encore à être identifier dans nos expériences.

Le résultat le plus important de cette étude montre en fait que si la distance entre les mesures est trop grande (comme assez souvent sur le terrain), par exemple si deux capteurs sont placés à un nœud du battement et à un ventre, ils donneront des mesures contradictoires (énergie maximale au ventre et minimale au nœud) alors que le poids des modes libres et liés est constant sur la partie horizontale puisque c'est la somme de deux « ondes » qui n'ont pas la même vitesse de phase (Dulou, 2000).

Cependant, on a vu que l'effet de réflexion donne des valeurs proches des valeurs mesurées. Une étude supplémentaire, notamment théorique est donc envisagée pour confirmer notre analyse.

#### **5. Références**

- [1] BECQ F. (1998). *Extension de la modélisation spectrale des états de mer vers le domaine côtier*, Thèse, Université de Toulon et du Var.
- [2] BEJI S. and BATTJES J.A. (1993). *Experimental investigation of wave propagation over a bar*, Coastal Engineering, 19, pp 151-162.
- [3] DULOU C. (2000). *Interactions houle-sédiments : application à la formation des barres littorales*, Thèse, Université d'Aix-Marseille I.
- [4] DULOU C., BELZONS M. and REY V. (2000a). *Laboratory study of wave-bottom interaction in the bar formation on an erodible sloping bed*, Journal of Geophysical Research, 105, pp 19745-19762.
- [5] DULOU C., BELZONS M. et REY V. (2000b). *Etude expérimentale de l'évolution spatio-temporelle du couplage onde-fond sédimentaire en zone de*



déferlement, Comptes rendus des 6èmes journées Génie Côtier – Génie Civil, mai 2000, Caen, I, pp 137-146.

[6] GRILLI S.T. and HORRILLO J. (1999). *Shoaling of periodic waves over barred-beaches in a fully nonlinear numerical wave tank*, Int. J. Offshore and Polar Eng., 9, pp 257-263.

[7] HULSBERGEN C.H. (1974). *Origin, effect and suppression of secondary waves*, Proceedings of the 14<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, pp 392-411.

[8] MADSEN P.A., SØRENSEN O.R. and SCHÄFFER H.A. (1997). *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. part 1. Model description and cross-shore motion of regular waves*, Coastal Engineering, 32, pp 255-287.

[9] REY V., BELZONS M. and GUAZZELLI E. (1992). *Propagation of surface gravity waves over a rectangular submerged bar*, Journal of Fluid Mechanics, 235, pp 453-479.

[10] ROELVINK J.A. and STIVE M.J.F. (1989). *Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach*, Journal of Geophysical Research, 94, 4785-4800.

[11] RUESSINK B.G. (1998). *Bound and free infragravity waves in the Nearshore zone under breaking and nonbreaking conditions*, Journal of geophysical research, 103, pp 12795-12805.

[12] SENECHAL N., BONNETON P. and DUPUIS H. (2001). *Generation of secondary waves due to wave propagation over a bar : a field investigation*, doit paraître dans Proceeding of WAVES'01, septembre 2001, San Francisco, USA.