



## Etude expérimentale de l'évolution spatio-temporelle du couplage onde-fond sédimentaire en zone de déferlement

Cyril Dulou

*Doctorant, IUSTI, UMR 6595 du CNRS, Université de Provence.*

Vincent Rey

*Maître de conférences, LSEET, UPRESA-CNRS 6017, Université de Toulon et du Var.*

Max Belzons

*Maître de conférences, IUSTI, UMR 6595 du CNRS, Université de Provence.*

### Résumé :

Le déferlement d'une houle monochromatique au-dessus d'un fond sédimentaire est abordé dans une approche expérimentale de petite échelle. Trois granulométries différentes ont été employées pour simuler le sédiment marin afin de voir le transport par charriage et/ou par suspension. Dans le cas où le transport se fait par suspension, l'état final du fond est très semblable à celui résultant d'une érosion hors déferlement en présence d'interactions sous-harmoniques onde-onde entre une onde régulière et une onde libre produite simultanément par le batteur. Ces interactions sous-harmoniques conduisent à des ondes infragravitaires, résultantes d'une interaction "différence" entre deux ondes libres.

### Abstract :

This work presents the first comments on a small scale experimental study of monochromatic waves breaking on a sandy bed. Three grain sizes were used to simulate the marine sediment, in order to illustrate the different ways of transport : bedload and/or suspended load. In the suspended load case, the final bottom profile looks like that one obtained with non-breaking waves, but with wave-wave sub-harmonic interactions leading to infragravity waves.

### 1. Introduction

La protection et l'aménagement de la zone côtière est un enjeu de développement socio-économique très important. Pour une côte sableuse, les phénomènes d'érosion de la côte, naturels ou liés aux aménagements, peuvent engendrer des conséquences humaines et économiques désastreuses. La compréhension des phénomènes physiques conduisant à l'érosion des plages est primordiale, et l'étude de la formation des barres sédimentaires littorales constitue une étape importante dans la démarche scientifique. Ces barres sont le résultat de l'hydrodynamique côtière et du transport sédimentaire associé. Ces dernières années, des avancées significatives ont été réalisées pour décrire l'hydrodynamique complexe de la houle autour de la zone de déferlement [Madsen et al., 1997, Grilli et Horrillo, 1999], alors que les modèles d'évolution des profils bathymétriques [Dean, 1994, Gallagher et al., 1998] ne donnent pas d'aussi bons résultats. L'interaction houle-fond sédimentaire est une interaction dynamique, c'est-à-dire qu'il y a une perpétuelle auto-adaptation de l'onde au fond et réciproquement. Les mesures in situ de la formation ou le

déplacement des barres littorales sont très difficiles à mettre en oeuvre, à cause des conditions expérimentales sévères lors des tempêtes et par l'impossibilité de connaître et maîtriser tous les paramètres physiques. Des essais en canal à houle sont donc très utiles pour comprendre les mécanismes mis en jeu. A la suite de l'étude de la formation de barres hors déferlement [Dulou et al., 1998], nous avons étendu notre approche expérimentale de petite échelle à la zone de déferlement. Après avoir décrit le dispositif expérimental et les modifications de l'hydrodynamique dues au déferlement, nous présenterons les différents mécanismes de formation de barres en fonction du mode de transport (charriage et/ou suspension) obtenu par le choix d'une granulométrie adaptée. Nous terminerons par l'étude de l'effet des non-linéarités dans la zone de shoaling sur la redéposition du sable dans le cas où le sédiment se déplace par suspension.

## 2. Dispositif expérimental

Les expériences ont été réalisées dans le canal de l'IUSTI. Le canal est de petite taille, 5 m de long, 0.4 m de large et 0.15 m de profondeur (figure 1). Un batteur-piston peut produire une houle quelconque (mono ou multifréquencielle d'amplitude constante ou variable), ici une houle monochromatique de fréquence  $f = 1.5 \text{ Hz}$ , dont la hauteur crête à creux maximale peut atteindre  $H = 2.5 \text{ cm}$  au départ. La profondeur est constante,  $h = 8 \text{ cm}$ , au niveau du batteur, ce qui donne une longueur d'onde  $L = 52 \text{ cm}$  et un paramètre  $kh = 0.97$ . On est donc en régime faiblement non-linéaire (nombre d'Ursell  $U_r = 0.3$ ). La zone de sable débute à  $d = 85 \text{ cm}$  en aval du batteur, elle est initialement plane et en faible pente,  $\beta = 2.5\%$ . Une partie du sable émerge. On a donc dans cette configuration un déferlement, qui se produit au-dessus du sable, en simulation de celui-ci sur une plage.

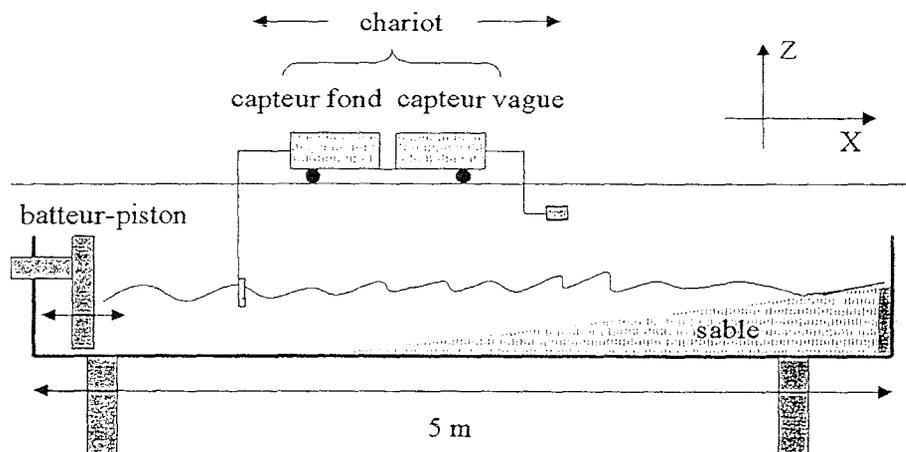


Figure 1: schéma du dispositif expérimental.  
Figure 1 : sketch of the experimental facilities.

Nous avons utilisé trois sédiments non cohésifs de tailles différentes (mais de même masse volumique  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ). Les deux premiers sont des billes de verre calibrées de granulométries  $D_1 = 80 \mu\text{m}$  et  $D_2 = 120 \mu\text{m}$ . Le troisième est de la silice, calibrée autour de  $D_3 = 200 \mu\text{m}$ . Pour nos conditions expérimentales cela correspond à des modes de transport différents : par charriage pour  $D_3$ , par suspension pour  $D_1$  et par les deux modes pour

$D_2$ . Les variations de hauteur de vague et de profondeur étant faibles, nous utilisons des capteurs acoustiques (ultra-sons) pour mesurer la surface libre et le fond (erreur de mesure  $< 0.1 \text{ mm}$ ). Le capteur vague est placé dans l'air au-dessus du canal, alors que le capteur fond est immergé. Avec la précision des mesures, le deuxième atout de cette expérience est l'automatisation : les capteurs sont disposés sur un chariot muni d'un moteur pas à pas contrôlé par un PC. On peut ainsi réaliser des profils du fond et de la hauteur de la vague très rapidement.

Pour ce qui concerne la houle, les résultats obtenus hors zone de déferlement [Rey, 1992, Rey et al., 1995, Dulou et al., 1998] ont validé notre approche à petite échelle ; dans la zone de déferlement, les critères sont assez bien respectés (figure 2), même s'il y a des écarts pour certaines expériences. Pour le transport sédimentaire, les effets d'échelle sont susceptibles de "distordre" les résultats ; ils restent cependant qualitativement corrects, par exemple le transport est dirigé vers la plage par faible amplitude et vers le large par forte amplitude, comme à plus grande échelle ou en nature.

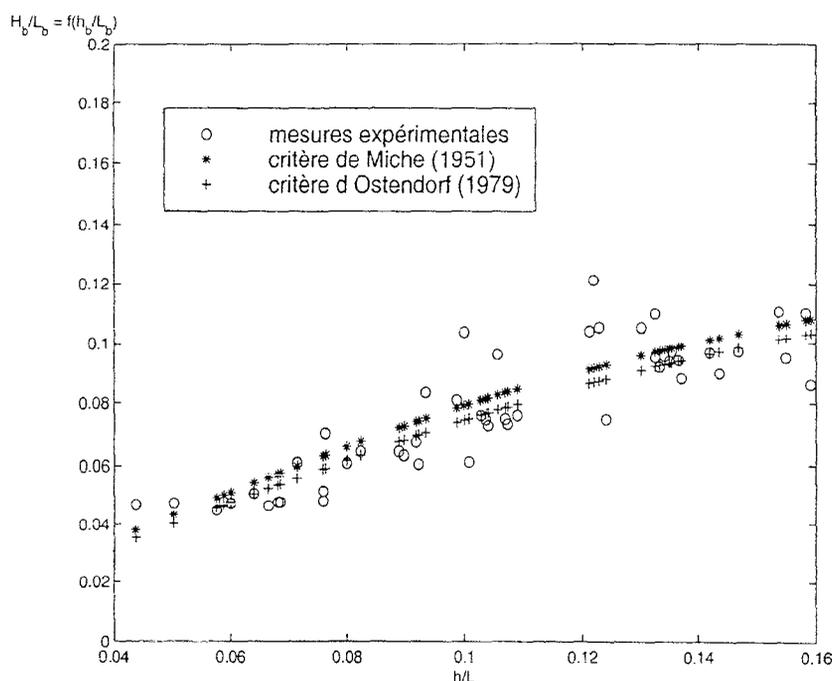


Figure 2: critères de déferlement.

Figure 2 : wave breaking criteria.

### 3. Description de la zone côtière

La compréhension de l'hydrodynamique est primordiale à celle de la formation des barres. La houle venant du large (zone de grande profondeur) subit des modifications (cambrure et vitesse de propagation) dès qu'elle commence à ressentir le fond à l'approche des côtes. Elle franchit alors trois zones différentes : la zone de shoaling, la zone de déferlement et la zone de swash (figure 3).

Des transferts d'énergie se produisent entre les différentes composantes de l'onde [Madsen et al., 1997] dans ces trois zones. Nous avons montré dans une

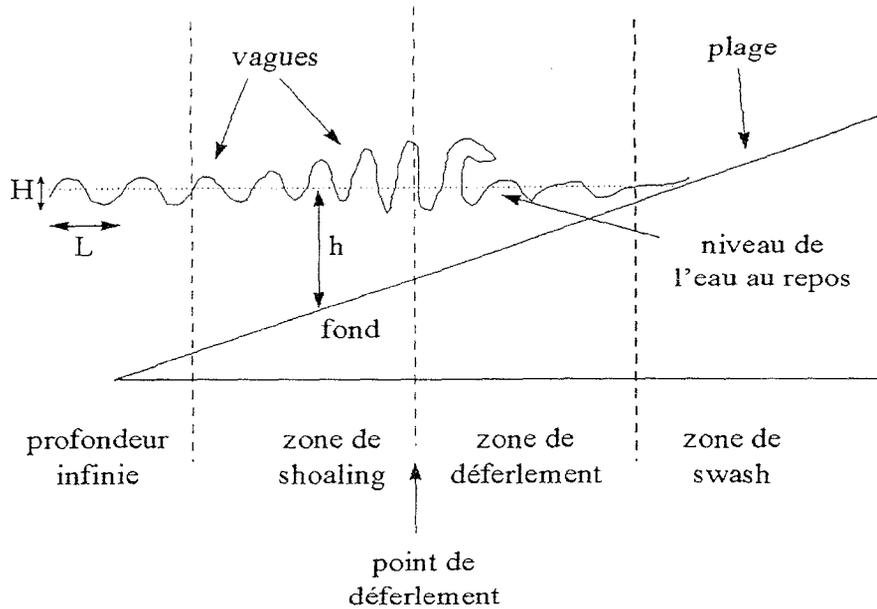


Figure 3: zones caractéristiques dans la propagation d'une vague du large vers une plage.

*Figure 3 : characteristic areas in the propagation of a wave to a beach.*

étude précédente, l'importance de ces transferts d'énergie sur la formation des barres hors zone de déferlement, c'est-à-dire au début de la zone de shoaling, dans une zone de faibles non-linéarités. Ces transferts deviennent de plus en plus importants lorsque la profondeur diminue. On voit apparaître des hautes fréquences dans la zone de shoaling jusqu'au point de déferlement (*PDD*) à partir duquel elles disparaissent au profit des basses fréquences que l'on retrouve dans la zone de swash (figure 4). Pour une houle spectrale (composée d'harmoniques libres et liés), les interactions entre les harmoniques libres produisent des sous-harmoniques (interaction différence) et des super-harmoniques (interaction somme). Une partie de l'énergie des harmoniques libres peut être transférée vers ses harmoniques liés supérieurs. Ce phénomène est visible dans la figure 4c, pour le cas d'une onde monochromatique faiblement non-linéaire au départ (composée d'une seule onde libre à la fréquence  $f = 1.5 \text{ Hz}$  et de ses harmoniques supérieurs liés  $2f, 3f, 4f, \dots$ ). La figure 4a nous montre que l'amplitude du premier harmonique diminue avant le *PDD*, d'abscisse  $x = 165 \text{ cm}$ , alors que celle du second harmonique continue d'augmenter jusqu'à celui-ci. On voit aussi apparaître (figure 4c) les harmoniques 3 et 4 à partir du point d'atténuation (que nous appellerons point de décrochement pour la suite) du premier harmonique ou fondamental.

Outre ces transferts d'énergie, le déferlement induit aussi une dissymétrie dans le transport de masse d'eau : dirigé vers la plage en surface et vers le large au fond. Ce courant de retour au fond (ou undertow) peut être important [Gallagher et al., 1998] et peut contribuer au transport sédimentaire. La vague déferlente crée ainsi une zone de forte turbulence liée à la dissipation de l'onde. Ces deux derniers phénomènes font de la zone de surf une zone de source de sédiments pour le reste du champ hydrodynamique.

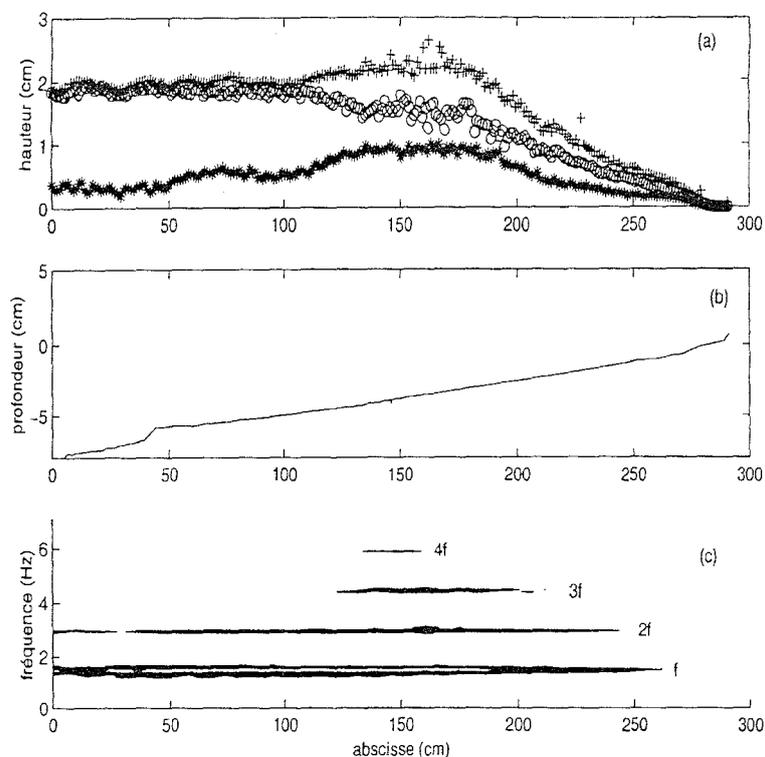


Figure 4: (a) décomposition spectrale de l'enveloppe de la vague, (+) vague totale, (o) premier harmonique et (\*) second harmonique; (b) fond initial; (c) densité spectrale d'énergie calculée le long du canal (blanc=pas d'énergie).

Figure 4 : (a) wave envelope spectral analysis, (+) total wave, (o) first harmonic and (\*) second harmonic; (b) initial bottom; (c) power spectrum calculated along the wave tank (white=no energy).

#### 4. Formation de barres associées aux différentes zones

Nous allons maintenant mettre en évidence les points communs ou les différences dans la formation de barres avec ou sans déferlement.

Des travaux antérieurs ont mis en évidence (voir [Dulou et al., 1998] pour les détails des expériences) qu'en l'absence de déferlement, le premier harmonique de l'onde pilotait la formation des barres. A l'aide de nouvelles équations redérivées de Boussinesq [Madsen et Sørensen, 1993], nous avons modélisé l'enveloppe du premier harmonique perturbé par la présence d'une onde libre parasite de fréquence double sur le fond initial en pente (figure 5).

Nous avons ainsi pu faire le lien entre les différentes longueurs caractéristiques présentes dans le premier harmonique et les modulations du fond. A partir de ce modèle, on peut montrer que l'enveloppe du premier harmonique s'écrit :

$$A^{(\omega)}(x) = a \left[ 1 + R_b^2 + 2R_b \cos(2kx + \varphi) + \frac{2A_f}{a} (2R_b \cos \varphi_f \cos(Kx + \varphi) + \cos((K - 2k)x - \varphi_f) + R_b^2 \cos((K - 2k)x + \varphi_f)) \right]^{\frac{1}{2}}$$

où  $a$  est l'amplitude du premier harmonique,  $A_f = \frac{a a_f}{h}$  avec  $a_f$  l'amplitude

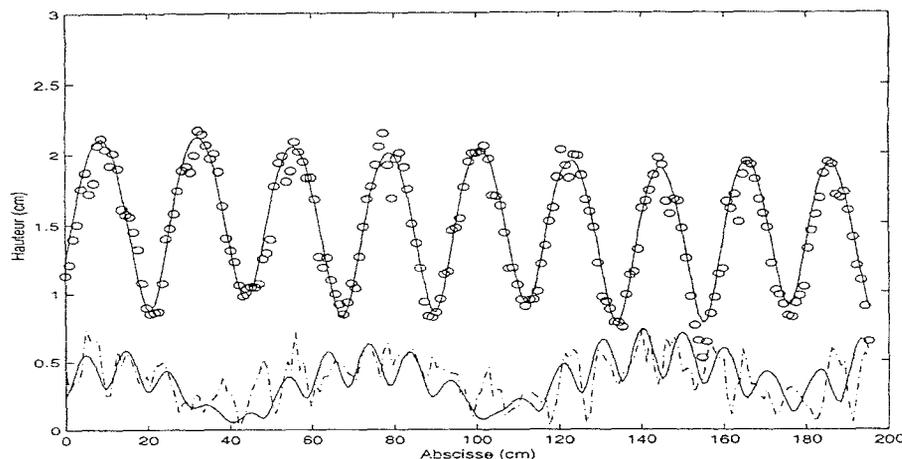


Figure 5: modélisation de l'enveloppe des deux premiers harmoniques d'une onde régulière perturbée par une onde libre sur un fond en faible pente : (o) et (-) mesure du premier et deuxième harmonique, (-) modèle.

Figure 5 : calculation of the two first harmonics of a regular wave envelope perturbed by a free wave on a weakly sloping bed : (o) and (-) first and second experimental harmonics, (-) model.

de l'onde libre et  $h$  la profondeur,  $R_b$  le module de la réflexion initiale,  $k$  le nombre d'onde du premier harmonique,  $K$  le nombre d'onde de l'onde libre,  $\varphi$  la phase de l'onde réfléchie et  $\varphi_f$  la phase de l'onde libre.

On voit apparaître trois nombres d'onde modulant l'enveloppe de la hauteur de la houle : le premier lié au premier harmonique ( $2k$ ), le second lié à l'onde libre ( $K$ ) et le troisième lié à l'interaction sous-harmonique des deux ondes ( $K - 2k$ ). Si la réflexion initiale tend vers 0, une seule longueur reste présente dans l'enveloppe, celle de l'interaction sous-harmonique  $K - 2k$ , que l'on retrouve dans le fond (figure 6). Le système houle-fond tend vers un équilibre dynamique stable au cours du temps.

On a vu que la présence du déferlement au-dessus du sédiment modifiait l'hydrodynamique. Suivant le couple (amplitude de la vague, taille du sédiment), le transport global de sable se fait soit vers le large (érosion), soit vers la plage (accrétion) ou soit dans les deux sens dans certains cas.

Le nombre de mobilité  $\psi = \frac{U_0^2}{(s-1)gD}$  (où  $U_0$  est la vitesse maximum au-dessus de la couche limite,  $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ ,  $\rho$  étant la masse volumique de l'eau,  $g$  la gravité et  $D$  le diamètre du sédiment) semble être un paramètre approprié pour rendre compte de la direction du transport de sédiments.

La figure 7 nous montre les trois possibilités de transport suivant le sédiment utilisé et pour la même condition de houle ( $H = 1.9 \text{ cm}$ ). Le nombre de mobilité a été calculé au point de déferlement avec la valeur issue de la théorie linéaire de  $U_0$  pour  $H_b = 2.5 \text{ cm}$  et  $h_b = 2.9 \text{ cm}$ . On obtient un transport vers la plage pour le gros sable ( $\psi_{D_3} = 13.7$ ), l'observation de l'érosion a montré que les grains se déplaçaient par charriage (figure 7c). On a obtenu le même résultat avec le sable intermédiaire mais à une amplitude de vague différente ( $H = 0.9 \text{ cm}$ ,  $H_b = 1.5 \text{ cm}$  et  $h_b = 1.75 \text{ cm}$ ), avec un nombre de mobilité de 14.3. A amplitude de vague équivalente, le sable intermédiaire  $D_2$  ( $\psi_{D_2} = 22.9$ )

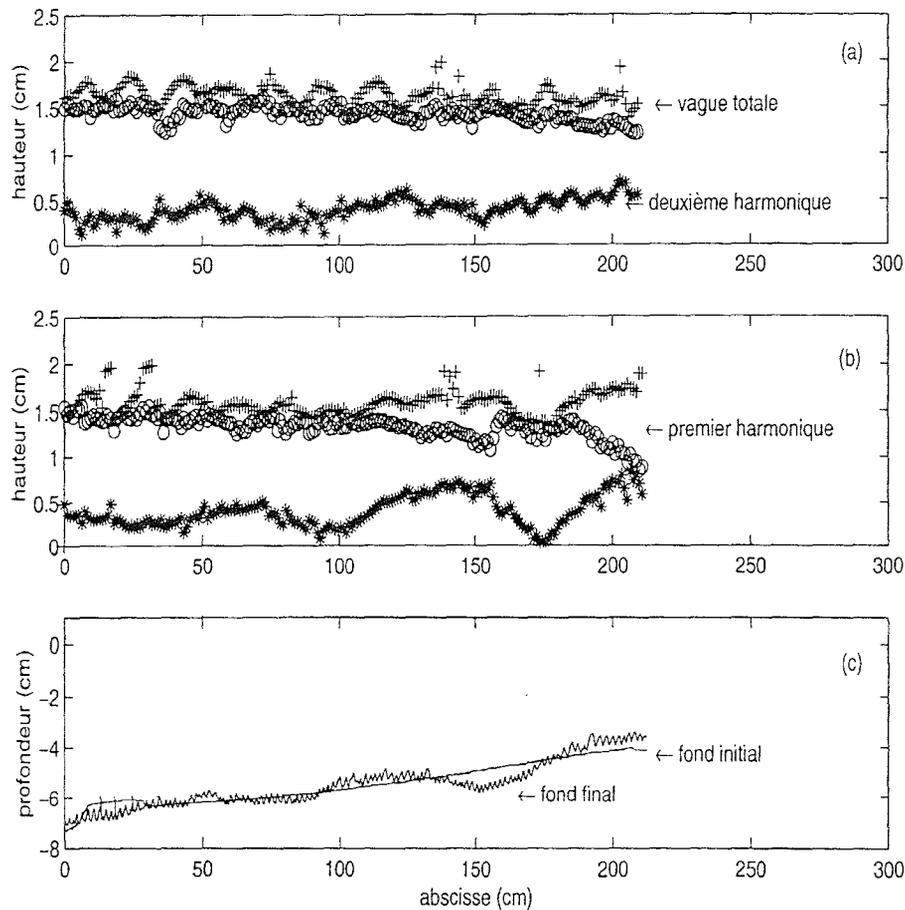


Figure 6: enveloppe de la vague initiale (a), finale (b) et profil du fond (c) après 2660 minutes d'érosion hors déferlement ( $H = 1.7$  cm et  $R_b < 0.05$ ).  
 Figure 6 : initial wave envelope (a), final (b) and bottom profil (c) after 2660 minutes of non-breaking waves action ( $H = 1.7$  cm et  $R_b < 0.05$ ).

a été transporté vers la plage et vers le large (figure 7b). On a pu voir la présence de sédiment en suspension uniquement autour du PDD. Pour le sable le plus fin, le transport s'est fait entièrement vers le large ( $\psi_{D_1} = 34.3$ ), par suspension (figure 7a).

Avec le déferlement, il est plus difficile de trouver un profil d'équilibre : on observe un déplacement des barres et par suite du PDD entraînant de profondes modifications du champ hydrodynamique. Le système houle-fond a une évolution temporelle complexe.

Néanmoins avec le sable fin et une faible réflexion, on arrive à trouver des similitudes entre le cas hors déferlement et le cas avec déferlement. C'est ce point que nous allons développer dans la partie suivante.

## 5. Discussion/Conclusion

Nous nous intéressons donc aux érosions réalisées avec le sable fin  $D_1$  avec et sans déferlement (figures 6 et 8 sur lesquelles l'origine des abscisses est différente!). Dans le cas hors déferlement, la partie sédimentaire en pente se termine à  $h = 4$  cm. Elle est suivie d'une partie en PVC horizontale puis

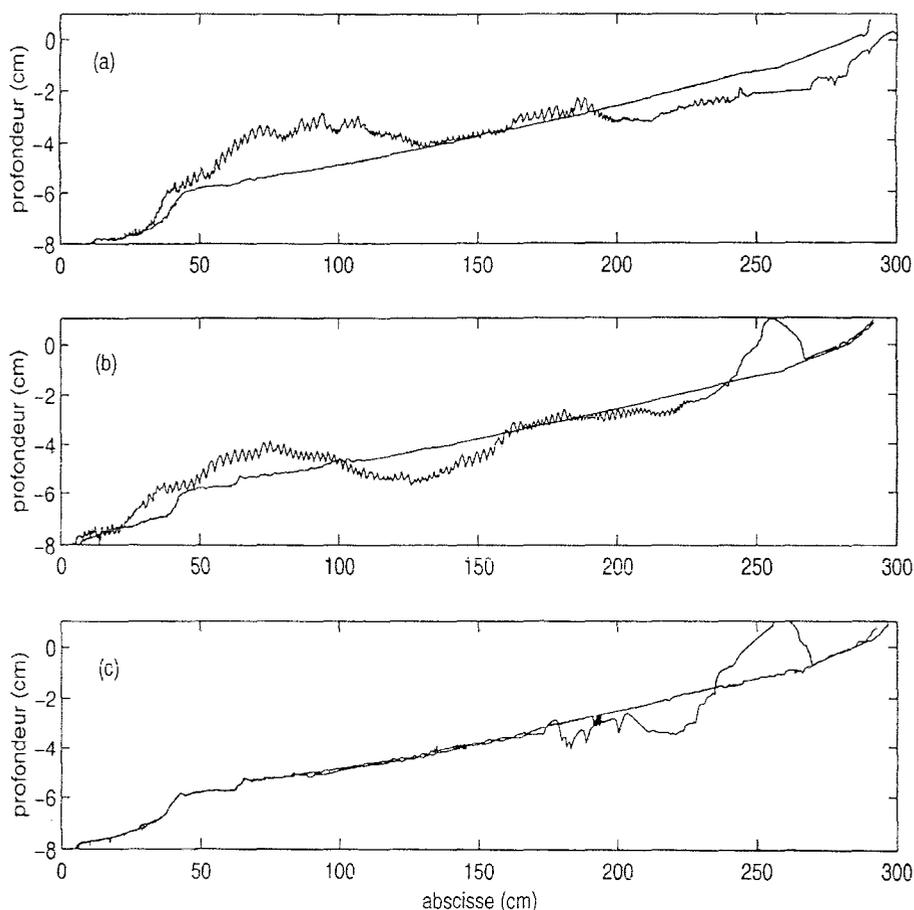


Figure 7: profils bathymétriques finaux pour  $D_1 = 80 \mu m$  (a),  $D_2 = 120 \mu m$  (b) et  $D_3 = 200 \mu m$  (c) ( $H = 1.9 \text{ cm}$ ,  $H_b = 2.5 \text{ cm}$  et  $h_b = 2.9 \text{ cm}$ ).

Figure 7 : final bathymetric profiles for  $D_1 = 80 \mu m$  (a),  $D_2 = 120 \mu m$  (b) et  $D_3 = 200 \mu m$  (c) ( $H = 1.9 \text{ cm}$ ,  $H_b = 2.5 \text{ cm}$  et  $h_b = 2.9 \text{ cm}$ )

d'une plaque peu inclinée où la vague déferle. Le déferlement s'effectuant à la profondeur  $h_b = 2.9 \text{ cm}$  pour la hauteur de houle initiale  $H = 1.7 \text{ cm}$ , la partie sableuse n'en subit pas les effets.

La figure 6c montre la grande modulation (de  $80 \text{ cm}$  à  $150 \text{ cm}$ ) du fond final résultant de la perturbation sous-harmonique de l'onde. On peut voir aussi l'amorce d'une deuxième longue barre à partir de l'abscisse  $150 \text{ cm}$ . L'interaction sous-harmonique était présente dans tout le canal dès le début de l'érosion (battements dans le deuxième harmonique, figure 6a).

Dans le cas du déferlement, ce battement initial est absent (figure 8a), car on a supprimé l'onde libre produite par le batteur [Dulou et al., 1998]. Le point de décrochement se situe vers  $x = 110 \text{ cm}$ , ce qui donne une distance de  $d_i = 100 \text{ cm}$  entre le point de décrochement et le PDD ; on observe un battement de même longueur  $l_f = 100 \text{ cm}$  dans la vague finale (figure 8b) qui a une décomposition en harmoniques semblable à celle du cas hors déferlement. La question posée est alors celle du rôle conjoint du déferlement et des modes libres dans la formation de cette barre, un scénario possible est proposé ci-dessous.

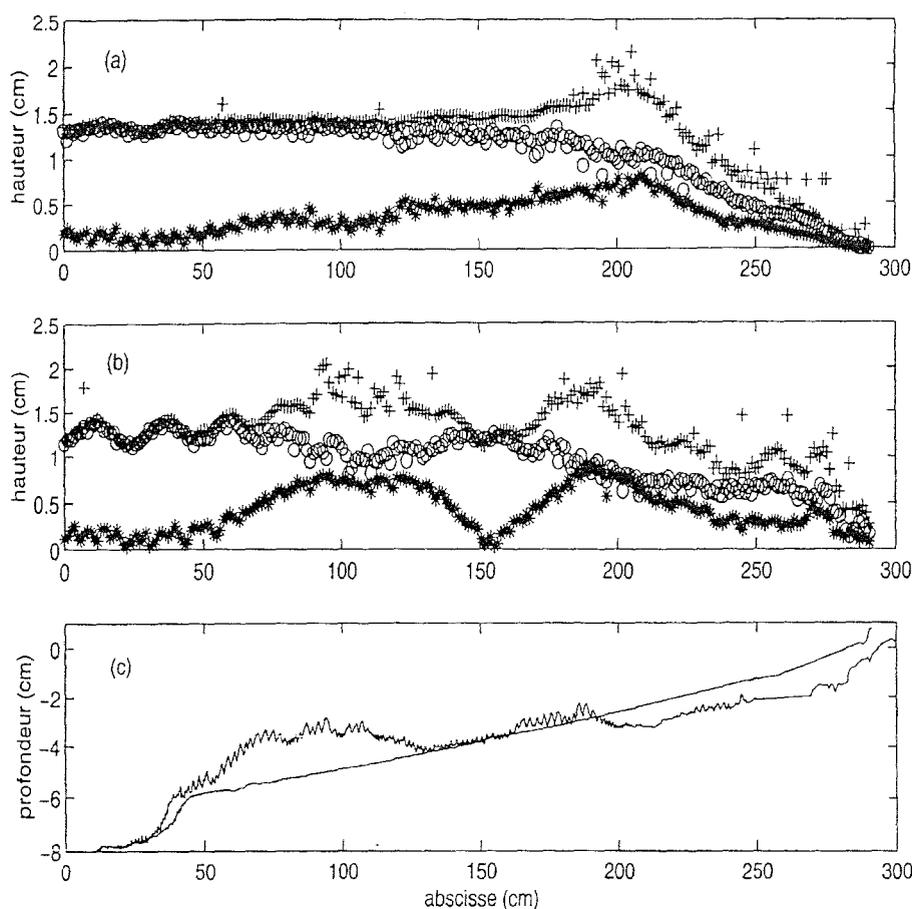


Figure 8: enveloppe de la vague initiale (a), de la vague finale (b) et profils initial et final du fond après 4660 minutes d'érosion ( $H = 1.9$  cm).

Figure 8 : initial wave envelope (a), final wave envelope (b) and initial and final bottom profiles after 4660 minutes of breaking waves action ( $H = 1.9$  cm)

Au début, le déferlement est seul responsable de l'érosion puisque les modes libres sont absents. Il provoque un transport sédimentaire d'aval en amont du PDD. La modification de bathymétrie qui en résulte fait se déplacer le PDD et est susceptible de créer des modes libres comme l'ont montré plusieurs travaux [Madsen et al., 1997, Grilli et Horrillo, 1999]. Le battement ainsi induit assiste alors le déferlement pour former la barre par une mise en résonance du système interaction sous-harmonique / bathymétrie.

Ces derniers résultats mettent en évidence les liens entre les interactions sous-harmoniques (ou ondes infragravitaires), les non-linéarités et la formation des barres littorales. La zone entre le point de décrochement et le PDD (zone où les non-linéarités croissent) a une longueur du même ordre que la barre. Le système évolue comme si le déferlement servait de source de sédiment (pour la suspension) qui est transporté vers la zone de shoaling où les non-linéarités (via des interactions onde-onde ou non ?) contrôlent le transport sédimentaire. Une caractérisation plus précise de l'écoulement (mesure de vitesse moyenne) et une discrimination entre modes libres et liés (par effet Doppler) devraient permettre d'obtenir des éléments de réponse.

Remerciements :

Ce travail est effectué dans le cadre du Programme National d'Environnement Côtier "Hydrodynamique sédimentaire des côtes sableuses".

## 6. Références

- DEAN R.G. (1994) - *Cross-shore sediment transport processes*, Advances in Coastal Engineering, Editor Liu, pp 159-220.
- DULOU C., REY V. and BELZONS M. (1998), *Bar formation on a sloping erodible bed : a laboratory study*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference, Melbourne, Vol 2, pp 815-818.
- GALLAGHER E.L., ELGAR S. and GUZA R.T. (1998) - *Observations of sand bar evolution on a natural beach*, J. of Geophysical Research, Vol 103, No : C2, pp 3203-3215.
- GRILLI S.T. and HORRILLO J. (1999) - *Shoaling of periodic waves over barred-beaches in a fully nonlinear numerical wave tank*, Intl. J. Offshore and Polar Engineering, Vol 9, No : 4, pp 257-263.
- MADSEN P.A. and SØRENSEN O.R. (1993) - *Bound waves and triad interactions in shallow water*, Ocean Engineering, Vol 20, No : 4, pp 359-388.
- MADSEN P.A., SØRENSEN O.R. and SCHÄFFER H.A (1997) - *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves*, Coastal Engineering, Vol 32, pp 255-287.
- MICHE R. (1951) - *Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés à l'action de la houle*, Annales des Ponts et chaussées, 121<sup>ème</sup> annexe, pp 285-319.
- OSTENDORF D. W. and MADSEN O. S. (1979) - *Analysis of longshore currents and associated sediment transport in the surf zone*, MIT rep., Sea Grant, 79-13, 169 pp.
- REY V. (1992) - *Propagation and local behaviour of normally incident gravity waves over varying topography*, European J. Mech. B, Vol 11(2), pp 213-232.
- REY V., DAVIES A.G. and BELZONS M. (1995) - *On the formation of bars by the action of waves on an erodible bed : a laboratory study*, J. Coastal Research, Vol 11, No : 4, pp 1180-1194.