



## Un modèle morphologique côtier pour la création de barres rythmiques

Benoît Camenen<sup>1</sup> et Philippe Larroudé<sup>2</sup>

<sup>1</sup>: ATER, <sup>2</sup>: Maître de conférence,  
Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels  
BP53, 38041 Grenoble cedex 9, France.  
Tel: (33) 04 76 82 50 68, Fax: (33) 04 76 82 52 71  
Email: camenen@hmg.inpg.fr

### Résumé

Nous présentons dans ce papier un modèle morphodynamique 2DH pour des plages sableuses. Un intérêt du modèle vient de l'intégration des effets du courant de retour, jouant un rôle primordial dans la construction de la barre de déferlement. Une étude de la position et de la vitesse de croissance initiale de la barre par rapport à la ligne de déferlement suivant les conditions de houle et la pente de la plage a été réalisée. Ce modèle est de plus couplé avec un modèle de stabilité linéaire permettant la création d'un fond initial perturbé à partir d'une plage plane permettant ainsi la création de barres rythmiques.

### Abstract

A morphodynamic model for sandy beaches is presented. One interesting point is that the effects of the undertow are computed, which is the main factor in the creation of the bar. A study of the position and the initial vertical velocity of the bar has been made with varying wave conditions and beach slope. This model has also been coupled with a model of linear stability which gives the initial bottom, perturbations be added to an initial plane beach. The complete model permits the creation of a rhythmic bar.

### 1 Introduction

De nombreux travaux ont été réalisés pour la modélisation des structures sédimentaires rythmiques tels que les chenaux de courants d'arrachement (Christensen *et al*, 1994 [6] et Falquès *et al*, 1996 [7]) utilisant l'analyse de stabilité linéaire. Un modèle 2DH commercial couplé à une analyse de stabilité linéaire a été utilisé pour l'étude de l'évolution morphologique de barres pré littorales rythmiques. La simulation de l'évolution de la houle ainsi que la modélisation des courants sont abordés à l'aide du code de calcul en éléments finis TELEMAC. Le module de transport solide SISYPHE permet d'estimer l'évolution des fonds. Un modèle d'"undertow" y a été intégré du fait que le transport solide dans la zone de surf est très sensible à ce courant.

Une difficulté est la stabilisation de la croissance de la barre pré littorale. De ce fait, une attention toute particulière à été prise pour une meilleur estimation du transport solide (*cf.* Camenen & Larroudé, 2000 [3], 2002 [4]): l'utilisation d'un effet de pente adapté, la représentation correcte du coefficient de frotte-

ment due à l'interaction de la houle et du courant (principalement dans la zone de surf), une estimation réaliste du profil de la vitesse orbitale de la houle au fond (l'asymétrie de la houle a un effet énorme sur le module et la direction du flux sédimentaire), et enfin, l'utilisation d'une formule de transport solide adaptée (les formules de Bijker, Bailard, Van Rijn, Dibajnia-Watanabe et Ribberink sont comparées). Une étude de la formation de la barre sur une plage plane a ainsi tout d'abord été réalisée.

Une légère perturbation est alors introduite en utilisant les résultats du modèle de stabilité linéaire de Falquès (obtenus pour une pente moyenne de la plage, une rugosité de fond et des conditions de houle donnés). L'évolution des fonds est ensuite calculée en imposant comme contraintes hydrodynamiques le courant le long de la côte selon la formule de Longuet-Higgins (1970 [8]) et le courant de retour (modèle basé sur l'approche de Svendsen, 1984 [12]). Le processus est répété à chaque fois que la variation des fonds est susceptible de modifier l'hydrodynamique. Ainsi, la construction de la barre pré littorale, sa propagation du fait du courant "longshore", et les perturbations de la barre (chenaux des courants d'arrachement) sont calculées simultanément. Ce modèle permet ainsi la création de barres rythmiques, comme observées sur la plage du Truc-Vert (côte atlantique du bassin d'Arcachon, cf. Michel *et al.*, 2000 [9], Sénéchal *et al.*, 2002 [10]). L'objectif de cette étude est de pouvoir recréer numériquement ces formes sédimentaires à partir d'une plage quasi plane (lessivage des barres pré littorales après une tempête, cf. Camenen & Larroudé, 1999 [2], Camenen *et al.*, 2000 [5]).

## 2 Position de la barre d'avant-côte

La position de la barre  $x_b$  peut être facilement estimée sur une plage plane à partir du profil "cross-shore" du transport solide. Elle est directement fonction de la position du point de déferlement. La valeur de  $x_d$  qui nous sert donc de référence est estimée comme la valeur moyenne quadratique des positions de déferlement de chacune des houles du spectre de Rayleigh. Elle correspond ainsi à la valeur d'une houle monochromatique telle que  $H_{w\infty} = H_{rms\infty}$  et non au point de plus forte énergie (maximum de  $H_{rms}$ ). Cette seconde valeur est en effet difficile à estimer puisque ce maximum n'apparaît pas toujours clairement. Elle reste à peu près 1.5 à 2 fois plus grande que notre première estimation. Nous avons ainsi estimé la position de la barre pré littorale pour différentes valeurs de la pente de plage (1, 2 et 4%), du diamètre moyen des sédiments (0.1, 0.3 et 0.9 mm), de la hauteur de houle (0.5, 1.0 et 1.5 m) et de sa période (6 ou 9 s), et ceci, pour chacune des formules de transport étudiées.

### 2.1 Cas d'une houle frontale

La position de la barre varie beaucoup suivant la formulation du transport utilisée. Si  $x_b/x_d \approx 1.8$  et 2.2 (en moyenne) respectivement pour les formules de Bijker et Van Rijn (transport solide dans la direction du courant moyen), on trouve  $x_b/x_d \approx 1.2, 1.6$  pour les formules de Bailard, de Dibajnia & Watanabe

et de Ribberink suivant les conditions initiales (transport solide calculé selon la vitesse instantanée, puis moyenné sur la période la houle). Il apparaît en effet pour ces dernières formulations, deux régimes de formations de la barre. Le premier (barre plus au large de la barre de déferlement) est dû à un transport majoritairement vers le large; le second (barre proche de la ligne des déferlantes moyenne) est dû à un transport prédominant vers la plage. Seules ces trois dernières formules de transport peuvent donc permettre ces deux régimes de formation de la barre puisqu'elles permettent un transport dans la direction de la houle. La position de la barre  $x_b$  serait de plus une fonction décroissante de la pente de la plage  $\tan \beta_p$  et une fonction croissante de la cambrure de la houle au large  $\lambda_{w\infty}$ , soit inversement proportionnel au paramètre  $\xi_\infty$  défini par Battjes (1974 [1]). A partir des résultats des formules de Bailard, Dibajnia & Watanabe et de Ribberink, nous obtenons la relation (cf. figure 1):

$$\frac{x_b}{x_d} \approx 1 + \frac{A_b}{\xi_\infty} \quad (1)$$

avec  $\xi_\infty = \frac{\tan \beta_p}{\sqrt{\lambda_{w\infty}}}$  et  $A_b \approx 0.12$ .

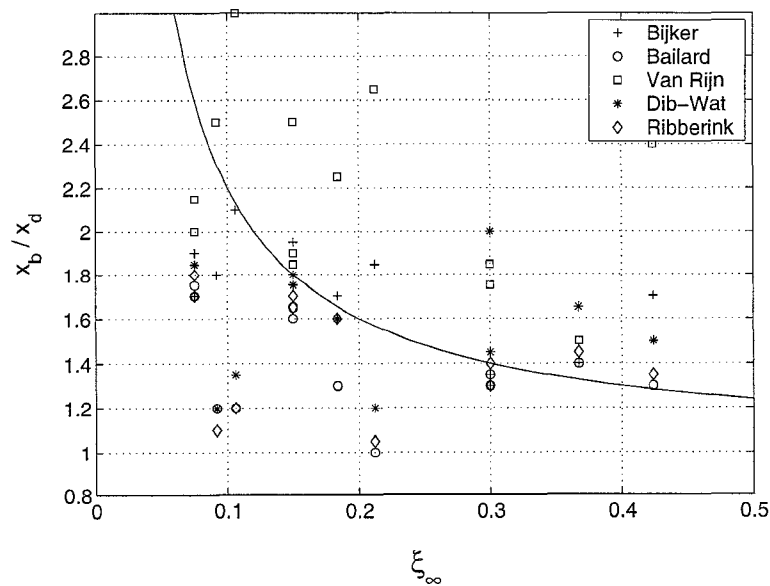


Figure 1: Estimation de la position de la barre en fonction du paramètre  $\xi_\infty$  (—: équation 1).

*Estimation of the bar position in function of the parameter  $\xi_\infty$  (—: equation 1).*

Les résultats restent cependant très dispersés par rapport à la relation obtenue. Nous avons donc cherché à trouver une relation entre la position de

la barre et le paramètre de transport  $T_{CL}$  défini par l'équation suivante:

$$T_{CL} = \frac{H_{w\infty}^3 (\tan \beta_p)^2}{g^2 d T_w^4} \quad (2)$$

Ainsi, sur la figure 2, les deux types de formation de la barre semblent bien être mis en valeur. Le premier type ("undertow" prédominant) indique une position de la barre d'avant-côte inversement proportionnelle au paramètre  $T_{CL}$  alors que le second type (houle asymétrique prédominante) indique une position fonction croissante de ce paramètre. A l'exception de la formule de Van Rijn, il semble que le comportement pour le premier type de formation soit indépendant de la formule de transport. Nous proposons donc les relations suivantes pour estimer la position de la barre en fonction des paramètres de plage.

$$\begin{aligned} x_{b1} &= 1 + A_{b1} T_{CL}^{B_{b1}} \\ x_{b2} &= 1 + A_{b2} T_{CL}^{B_{b2}} \end{aligned} \quad (3)$$

avec  $(A_{b1}, B_{b1}) \approx (0.06, -0.2)$  à l'exception de la formule de Van Rijn  
 où  $(A_{b1}, B_{b1}) \approx (0.10, -0.2)$ ,  
 et  $(A_{b2}, B_{b2}) \approx (10, 0.3)$ .

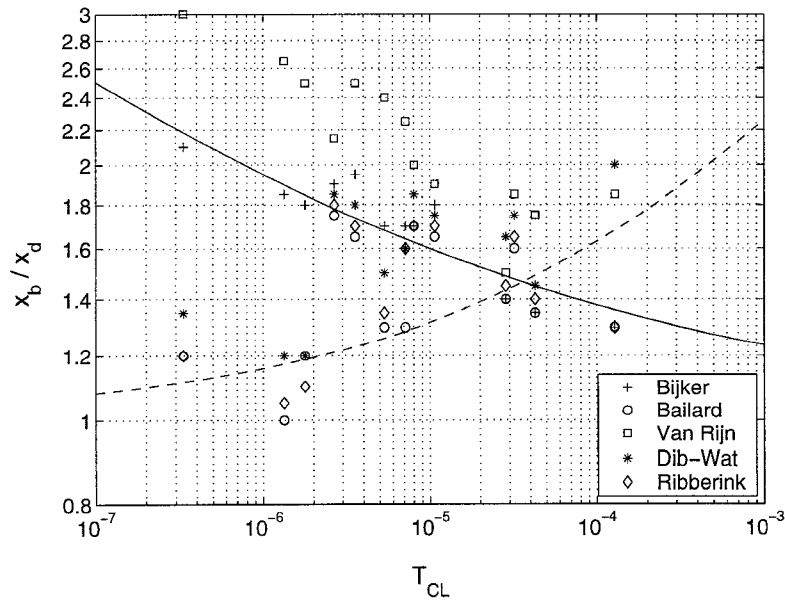


Figure 2: Estimation de la position de la barre en fonction du paramètre  $T_{CL}$  (—: équation 3(a), - - -: équation 3(b)).  
 Estimation of the bar position in function of the parameter  $T_{CL}$  (—: equation 3(a), - - -: equation 3(b)).

Une difficulté reste toutefois de prévoir à quel régime de formation de la barre nous nous situons. Un facteur fondamental pour cette prévision est le

rapport entre le maximum de débit solide vers le large et le maximum de débit solide vers la côte  $|\max(q_{s(large)}) / \max(q_{s(plage)})|$ . En effet, si ce rapport tend vers l'infini, nous sommes dans le régime 1 ("undertow" prédominant); si le rapport tend vers 0, nous sommes dans le régime 2 (houle asymétrique prédominante). La difficulté reste alors de trouver une relation entre ce rapport et les paramètres hydrodynamiques et sédimentaires de la plage. Nous avons cherché à utiliser le paramètre  $K^*$  proposé par Sunamura (1986 [11]), mais malheureusement sans grand succès. Nous proposons donc le paramètre  $D_{CL}$  qui nous a semblé le plus intéressant pour déterminer la direction principale du transport solide:

$$D_{CL} = \frac{H_{w\infty} \tan \beta_p \lambda_{w\infty}^2}{g T_w^2} \quad (4)$$

La figure 3 nous permet ainsi d'estimer une valeur critique (approximative) de  $D_{CL}$  :  $D_{CL(cr)} = 6 \cdot 10^{-9}$ . La courbe rajouté sur le graphique 3 correspond ainsi à la relation  $\tanh(\text{abs}(D_{CL(cr)}/D_{CL})^2)$ .

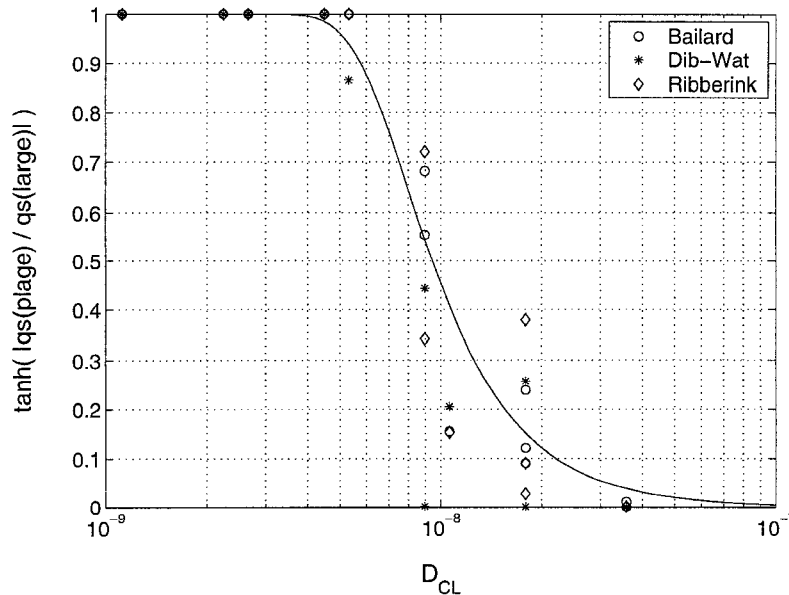


Figure 3: Estimation du rapport entre le maximum de débit solide vers le large et le maximum de débit solide vers la plage en fonction du paramètre  $D_{CL}$ .  
*Estimation of the quotient between offshore solide flux and onshore solid flux in function to the parameter  $D_{CL}$ .*

## 2.2 Influence du courant longshore

Dans le cas d'une houle quasi perpendiculaire à la plage, le courant étant faible par rapport à l'amplitude des vitesses orbitales environnantes (courant "longshore" quasi nul et courant de retour d'amplitude relativement faible et dont le maximum se situe proche du point de déferlement), le transport

solide est assez logiquement le plus fort pour  $1 < x/x_d < 2$  (où la vitesse  $U_w$  est maximale). Par contre pour une forte dérive littorale, on observe assez rapidement un transport solide maximum à l'intérieur de la zone de surf, soit principalement dirigé par le courant le long de la côte.

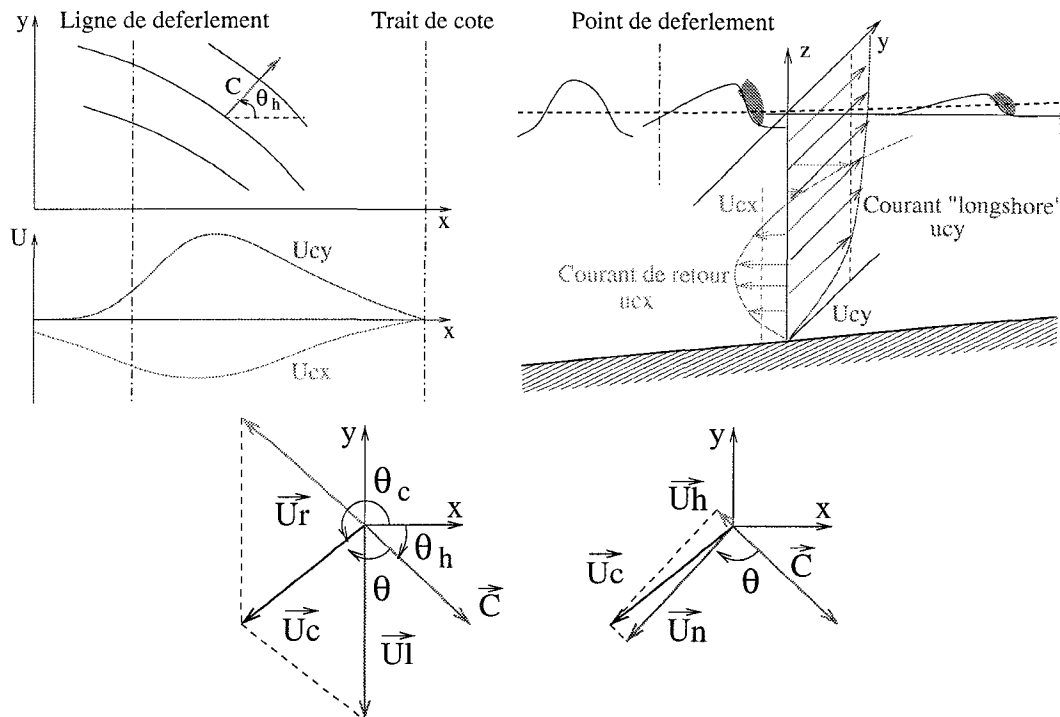


Figure 4: Schématisation et terminologie des courants et directions utilisés pour les calculs de transport solide.

*Schematic representation and terminology of currents and directions used for computations of sediment transport.*

Dans le cas d'une interaction entre le courant de retour et le courant le long de la côte, il y a un léger effet négatif mutuel entre ces courants dans le cas d'une houle non perpendiculaire à la côte (*cf.* figure 4) principalement du fait de leur "relative" opposition vectorielle créée par l'incidence de la houle. Pour l'estimation du transport solide, seules les composantes de la vitesse selon la direction de la houle et sa normale seront utilisés ( $U_h$  et  $U_n$ ). Comme le courant le long de la côte est souvent plus important que le courant de retour et impose une composante du courant dans la direction opposée à celle de l'"undertow", l'effet apparaît de manière plus visible pour ce dernier. Le flux solide "cross-shore"  $q_{sx}$  est ainsi très influencé par l'incidence de la houle (débit solide vers la plage accru).

Nous retrouvons ainsi les mêmes relations entre la position de la barre par rapport à la ligne de déferlement avec en plus une influence de l'angle d'incidence de la houle sur le régime 2 (houle asymétrique prédominante) et sur la limite séparant les 2 régimes. En effet, l'équation 3(b) indique alors une limite inférieure à l'unité. La position  $x_b/x_d$  de la barre est une fonction

décroissante de l'incidence de la houle  $\theta_w$ . De plus, en multipliant le coefficient  $D_{CL}$  par  $\cos^2 \theta_w$ , la relation critique séparant les deux modes de formation de la barre est conservée.

### 3 Vitesse de croissance initiale de la barre d'avant-côte

La vitesse de croissance de la barre initiale (à partir d'une plage plane) est en grande partie fonction de l'amplitude du courant de retour. Ainsi, pour une pente de la plage plus forte, qui implique un courant de retour plus important, nous observons les plus fortes vitesses de croissance de la barre. L'influence de la taille des sédiments et de la houle semble être moins importante, et se fait uniquement à travers l'influence de ces paramètres sur le débit solide net. La vitesse de croissance de la barre sableuse reste néanmoins directement influencée par l'amplitude du débit solide et surtout par la sensibilité du débit solide face à une interaction houle-courant. Ainsi, toujours du fait de la prise en compte d'un transport dû à l'asymétrie de la houle, les formules de Bailard, de Dibajnia & Watanabe et de Ribberink impliquent une vitesse de croissance de la barre souvent plus rapide que pour les formules de Bijker et Van Rijn (amplitude entre le maximum de débit solide vers le large et vers la côte plus grande).

Dans le cas des sédiments très fins, du fait du retard de phase des sédiments pris en compte par la formule de Dibajnia & Watanabe, celle-ci estime un débit solide plus faible que les formules de Bailard et Ribberink, qui se répercute sur la vitesse  $V_{zb}$ . En utilisant le paramètre  $T_{CL}$ , il apparaît assez nettement une certaine proportionnalité entre la vitesse de croissance de la barre et ce paramètre (*cf.* figure 5). Avec une erreur inférieure à facteur 3, on obtient la relation suivante:

$$V_{zb} = A_{zb} T_{CL}^{1.25} \quad (5)$$

avec  $A_{zb} \approx 2.5$ .

Il faut cependant prendre en compte les limites de notre modèle hydrodynamique. En effet, les observations de terrains montrent que pour les pentes de plage supérieure à 3%, aucune barre de sable n'a été observée, les plages étant trop réfléchive. Or nos calculs précédents indiquent non seulement la présence d'une barre pour une plage de pente moyenne de 4%, mais en plus, ils estiment alors la croissance la plus rapide. Il faut tenir compte que ces résultats correspondent à une possible formation de la barre pré littorale à partir d'une plage plane, mais ne permettent pas de prédire la stabilité de celle-ci du fait d'une plage très réfléchive. Il semble cependant que notre modèle d'"undertow" estime des vitesses trop faibles au dessus de la barre et trop fortes au dessus de la fosse interne; ce qui ne permet pas la limitation de la croissance de la barre (voire peut être la stabilisation). De plus, il semble que la réflexion de la houle sur la plage (non prise en compte par notre modèle) a une grande importance sur la morphodynamique. Enfin, cette vitesse de croissance initiale est aussi une fonction croissante de l'incidence de la houle du fait de l'augmentation du débit solide avec le courant le long de la côte.

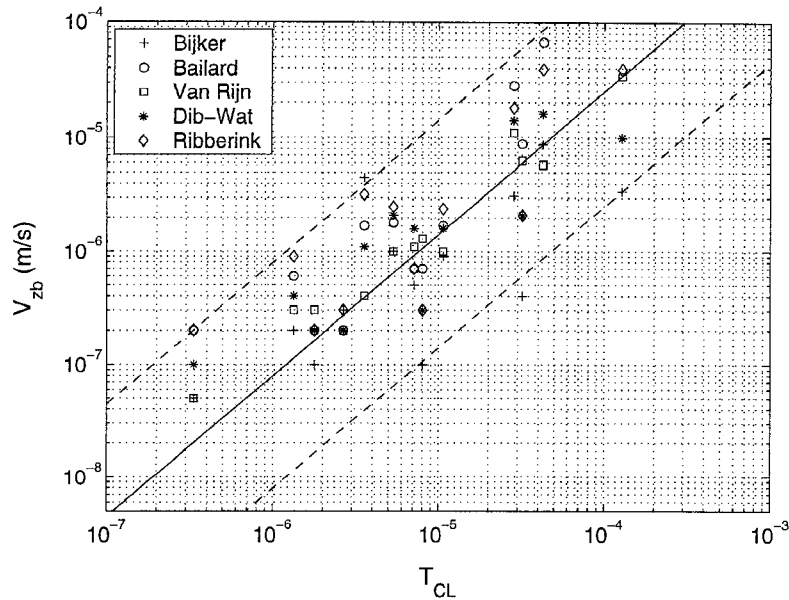


Figure 5: Estimation de la vitesse de croissance initiale de la barre (plage initiale plane) en fonction du paramètre  $T_{CL}$  (—: équation 5; - - -: incertitudes à un facteur 10).

*Estimation of the initial growing velocity of the bar in function to the parameter  $T_{CL}$  (—: equation 5; - - -: incertainties with a factor 10).*

#### 4 Formation de barres rythmiques

Nous avons réalisé un calcul pour tenter de reproduire la création du système barre/bâines observé sur la plage du Truc-Vert (*cf.* Michel *et al.*, 2000 [9], Sénéchal *et. al.*, 2002 [10]). Ces structures ont une longueur moyenne de 400 mètres environ, avec des bâines de même direction que le courant de houle (photographies disponibles sur le site web: <http://legi.inpg.fr/houle/PhotoAer.pdf>).

Grâce au couplage code de stabilité - code hydrosédimentaire, nous simulons la croissance des barres intertidales pendant 15 jours. Sur la figure 6, nous observons bien la création du système barres / bâines d'une périodicité d'environ 200 mètres (soit de l'ordre de grandeur des plus courts systèmes observés sur la plage du Truc Vert).

#### 5 Conclusions et perspectives

Le modèle hydrosédimentaire présenté dans ce papier permet la réalisation de simulations à moyen terme (de l'ordre de quelques semaines) de la croissance de barres sur des plages sableuses. Le couplage avec le code d'instabilité permet de plus la création de barres rythmiques d'une longueur d'onde du même ordre de grandeur qu'observées in situ. Nous avons de plus observé deux régimes possibles de formation de la barre, fonction des conditions hydrodynamiques et de la pente moyenne de la plage. Le premier régime correspond à un courant



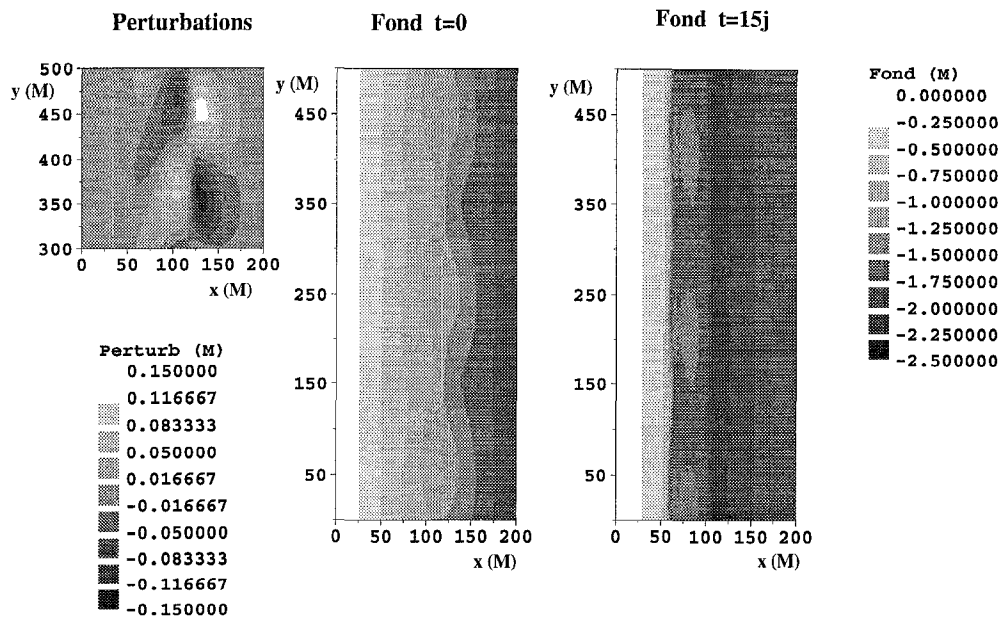


Figure 6: Perturbations apportées par le code de Falqués (a); Plage initiale (b); Fond après une journée de calcul (c)  
 Bottom perturbations from the model of Falqués (a) ; initial bottom of the beach (b) ; Bottom after one day computation (c)

de retour prédominant alors que le second correspond à une houle asymétrique prédominante. Nous proposons le paramètre  $D_{CL}$  pour identifier ces différents régimes ainsi que le paramètre  $T_{CL}$  pour quantifier la position et la vitesse de croissance initiale de la barre.

Notre modèle ne permet cependant pas une bonne description du courant de retour lorsque la présence de la barre modifie sensiblement l'hydrodynamique dans la zone de surf. Ceci implique le développement de notre modèle de courant de retour en présence de barres. Cette étude doit être également complétée par la simulation de croissance de ces instabilités par un code 2DH non linéaire type TELEMAC.

## 6 Remerciement

La majeure partie du travail présentée dans ce papier est soutenue par le groupe de recherche "morphologie côtière" du programme PNEC financé par le gouvernement français et le programme HUMOR financé par la Communauté Européenne.

## References

- [1] J.A. BATTJES. Surf similarity. In *14th Coastal Eng. Conf. Proc.*, pages 1050–1061. ASCE, 1974.

- [2] B. CAMENEN and Ph. LARROUDÉ. Nearshore transport modelling : application to trucvert beach. In *IARH Conference*, pages 31–40, 1999.
- [3] B. CAMENEN and Ph. LARROUDÉ. Numerical comparison of sediment transport formulae. In *Sandwave Dynamics Workshop*, pages 37–42, 2000.
- [4] B. CAMENEN and Ph. LARROUDÉ. Numerical comparison of sediment transport formulae for a coastal environment. *soumis à Coastal Engineering*, 2002.
- [5] B. CAMENEN, R. PEDREROS, H. DUPUIS, H. HOWA, and Ph. LARROUDÉ. Modélisation numérique du transport solide sur une plage sableuse. In *VIème journées nationales Génie Civil - Génie Côtier*, pages 219–228, 2000.
- [6] E.D. CHRISTENSEN, R. DEIGAARD, and J. FREDSOE. Sea bed stability on a long straight coast. In *24th Coastal Eng. Conf. Proc.*, pages 1865–1879. ASCE, 1994.
- [7] A. FALQUÈS, A. MONTOTO, and V. IRANZO. Bed-flow instability of the longshore current. *Cont. Shelf Res.*, 16:1927–1964, 1996.
- [8] M.S. LONGUET HIGGINS. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. *J. Geophys. Res.*, 75(33):60778–60801, 1970.
- [9] D. MICHEL, H. HOWA, C. THOMAS, G. CHAPALAIN, L. THAIS, and D. MALENGROS. Sediment dynamics and hydrodynamics on the inner part of the aquitan shelf : preliminary results. In *Sandwave Dynamics Workshop*, pages 123–125, 2000.
- [10] N. SÉNÉCHAL *et al.* Présentation de la campagne de mesures intensives du PNEC: Truc vert 2001. In *VIIème journées nationales Génie Civil - Génie Côtier*, 2002.
- [11] T. SUNAMURA. Determination of breaker height and depth in the field. In *Ann. Report*, number 8, pages 53–54. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, 1983.
- [12] I.A. SVENDSEN. Mass flux and undertow in the surf zone. *Coastal Eng.*, 8:347–365, 1984.