

Développement d'un nouveau modèle d'évolution de profil de plage

Bruno CASTELLE¹, Florent GRASSO², Vincent MARIEU¹, Philippe BONNETON¹, Nicolas BRUNEAU¹

¹ CNRS UMR EPOC-5805, Université Bordeaux I,
Avenue des Facultés, 33405 Talence Cedex, France

b.castelle@epoc.u-bordeaux1.fr

v.marieu@epoc.u-bordeaux1.fr

p.bonneton@epoc.u-bordeaux1.fr

n.bruneau@epoc.u-bordeaux1.fr

² Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (UJF-INPG-CNRS),
BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

Florent.grasso@hmg.inpg.fr

Résumé :

Ce papier présente le développement d'un modèle simple de profil de plage sableuses basé sur un couplage vagues/transport sédimentaire/évolution bathymétrique avec une approche à phase moyennée. Une nouvelle paramétrisation du transport sédimentaire résultant de l'asymétrie des vagues et de l'accélération près du fond est mise en place. Le modèle reproduit la migration de la barre vers la plage pendant les épisodes de temps calme et vers le large pendant les conditions énergétiques. La comparaison du modèle avec les expériences réalisées dans un canal à houle montre des résultats encourageants.

Abstract :

This paper presents the development of a simple coupled, wave-averaged, cross-shore waves-currents-bathymetry evolution model. A new parameterization involving wave skewness and acceleration is used to compute sediment transport. The model reproduces onshore bar migration during low wave energy condition and offshore migration for higher energy waves. Comparison with simulations undertaken in a wave flume shows encouraging results.

Mots-clés :

Barres sableuses – migration - modèle à phase moyennée – asymétrie des vagues – transport sédimentaire

1 Introduction

Les barres sableuses jouent un rôle essentiel en dynamique littorale, notamment parce qu'elles protègent le haut de plage pendant les épisodes de tempête en dissipant l'énergie des vagues au large par déferlement. Ces barres, qui souvent présentent une structuration cohérente le long de la côte (*i.e.* barres rythmiques de longueur d'onde de l'ordre de plusieurs centaines de mètres), ont également souvent été associées à des protubérances du trait de côte ayant la même rythmicité (THORNTON *et al.*, 2007) ou encore à des couplages morphologiques complexes (RUESSINK *et al.*, 2007a; CASTELLE *et al.*, 2007). Il est communément admis que ces barres sédimentaires migrent lentement vers le bord, tout en développant des structures de plus en plus tridimensionnelles, pendant les épisodes de temps calme jusqu'à se connecter avec le haut de plage (WRIGHT & SHORT, 1984). De même, pendant les épisodes énergétiques, les barres peuvent migrer vers le large rapidement. Cette migration est associée à une disparition des structures tridimensionnelles et une érosion du haut de plage (WRIGHT & SHORT, 1984).

La compréhension et la modélisation de la dynamique de ces barres sableuses représentent un véritable défi scientifique (STIVE & RENIERS, 2003). Si des avancées significatives ont été réalisées ces dernières années, les modèles numériques morphodynamiques ne permettent pas encore à l'heure actuelle de simuler l'évolution des corps sédimentaires tridimensionnels dans leur globalité. En particulier, ces modèles peinent à reproduire la migration des barres perpendiculairement à la côte (RUESSINK *et al.*, 2007b). La position des barres par rapport à la côte contrôle pourtant en grande partie leur longueur d'onde (DEIGAARD *et al.*, 1999), et leurs positions relatives semblent contrôler les couplages morphologiques (RUESSINK *et al.*, 2007a). C'est en partie pourquoi les modèles numériques morphodynamiques de plage tridimensionnelle classiques (RENIERS *et al.*, 2004; CASTELLE *et al.*, 2006; DRONEN & DEIGAARD, 2007; SMIT *et al.*, 2008) ne parviennent pas à simuler la dynamique de la plage sur des échelles de temps de l'ordre de plusieurs semaines qui présente des changements importants de régimes de houle.

Ce papier présente la mise en œuvre d'une nouvelle paramétrisation des flux sédimentaires perpendiculairement à la côte permettant de simuler correctement la migration des barres sableuses à la fois vers le large pendant les épisodes énergétiques, et vers le bord pendant les épisodes de temps calme. Le modèle est confronté aux expériences réalisées dans le canal à houle à fond sableux du LEGI (GRASSO *et al.*, 2008).

2 Description du modèle

2.1 Module hydrodynamique

Les notations utilisées par la suite sont décrites en Figure 1. L'évolution de l'énergie des vagues E_F le long du profil de plage est calculée à partir de l'équation classique de conservation de l'énergie des vagues :

$$\frac{d}{dx} E_F = -D_b \quad (1)$$

avec :

$$E_F = \frac{1}{8} \rho g c_g H_{rms}^2 \quad (2)$$

où g est l'accélération gravitationnelle, ρ la masse volumique de l'eau et c_g la vitesse de groupe des vagues. D_b est le taux de dissipation des vagues par déferlement bathymétrique (le frottement au fond est négligé) calculé avec l'approche de BATTJES & JANSSEN (1978) en prenant en compte la formulation proposée par RUESSINK *et al.* (2003). Cette formulation permet d'améliorer les performances du modèle sur les plages à barre(s). L'évolution de la cote moyenne de la surface libre $\bar{\eta}$ est calculée à partir de l'équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g \bar{h} \frac{d\bar{\eta}}{dx} \quad (3)$$

où S_{xx} est le tenseur des tensions de radiation calculé à partir de la théorie linéaire. Les équations de conservation d'énergie des vagues (1) et de conservation de la quantité de mouvement (3) sont résolues numériquement par une méthode de Runge-Kuta explicite du deuxième ordre afin de faire converger à chaque maille H_{rms} et $\bar{\eta}$. La dissipation d'énergie du mouvement organisé des vagues sert de terme source dans l'équation permettant de calculer le flux d'énergie associé au rouleau de déferlement E_r :

$$\frac{d(2E_r)}{dx} = -c\bar{\tau} - D_b \quad (4)$$

où c est la vitesse de phase des vagues calculée d'après la théorie linéaire et $\bar{\tau}$ la tension de cisaillement entre le rouleau de déferlement et la partie organisée de la vague calculée d'après RENIERS & BATTJES (1997). Le courant de retour U_r qui compense l'apport de masse des vagues (à travers le mouvement organisé et le rouleau de déferlement) et alors donné par :

$$U_r = \frac{E_F + 2E_r}{c\bar{h}} \quad (5)$$

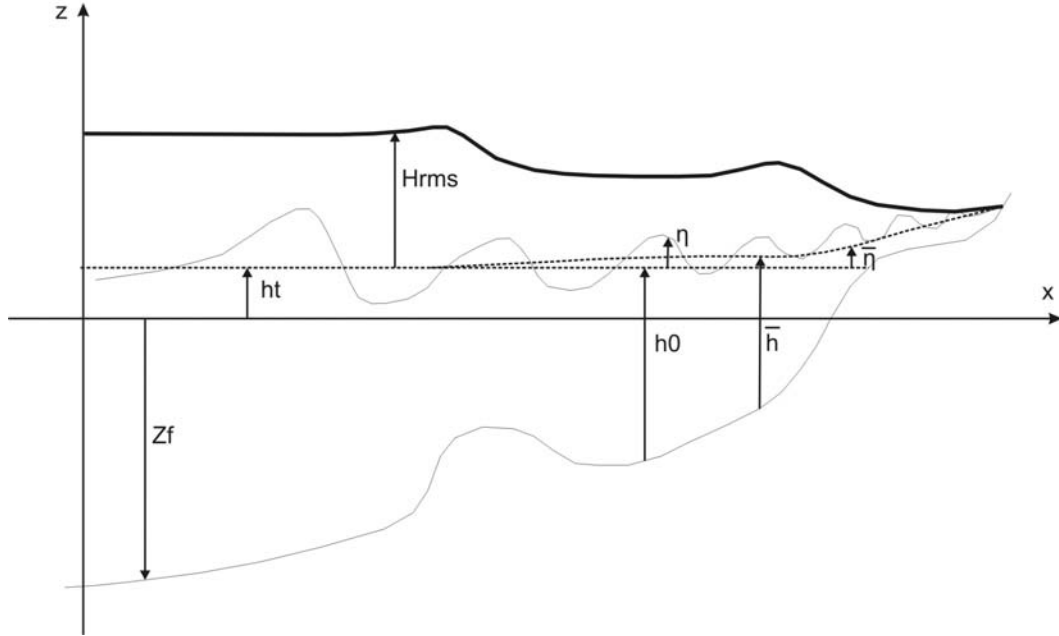


Figure 1. Principaux paramètres utilisés dans la présentation du modèle

2.2 Module sédimentaire.

Les flux sédimentaires perpendiculairement à la côte sont calculés à partir de l'approche énergétique de BAILLARD (1981) et modifiée d'après HSU *et al.* (2006) et auxquels est ajouté un terme d'accélération (DRAKE & CALANTONI, 2001 ; HOEFEL & ELGAR, 2003):

$$Q = K_w \left[\frac{\varepsilon_b}{\tan \varphi} \left\langle |\tilde{U}_0|^2 \tilde{U}_0 \right\rangle + \frac{\varepsilon_s}{w_s} \left\langle |\tilde{U}_0|^3 \tilde{U}_0 \right\rangle \right] + K_c \left[\left[\frac{\varepsilon_b}{\tan \varphi} \left\langle |\bar{U}_0|^2 \bar{U}_0 \right\rangle + \frac{\varepsilon_s}{w_s} \left\langle |\bar{U}_0|^3 \bar{U}_0 \right\rangle \right] \right] + K_a a_{spike} \quad (6)$$

où $|\tilde{U}_0|$ est l'intensité des vitesses orbitales au fond, $|\bar{U}_0|$ est l'intensité des courants totaux (courant de retour et vitesses orbitales) au fond, w_s la vitesse de chute du sédiment, φ l'angle de friction, ε_b et ε_s respectivement les facteurs d'efficacité du transport sédimentaire par charriage et par suspension, K_w et K_c sont des coefficients de frottement. $K_a \langle a_{spike} \rangle$ est le terme lié à l'accélération du fluide près du fond et dont l'impact sur le transport sédimentaire et la migration des barres sur les plages dominées par l'action de la houle a été mis en évidence

par HOEFEL & ELGAR (2003). K_a est un coefficient ajustable et:

$$a_{spike} = \frac{\langle a^3 \rangle}{\langle a^2 \rangle} \quad (7)$$

où $a(t)$ est l'accélération des particules fluides au fond. L'approche de modélisation des vagues utilisée ici étant à phase moyennée, les termes \tilde{U}_0 , \tilde{U}_0 et $a(t)$ ne peuvent pas être calculés explicitement. On choisit donc la paramétrisation proposée par DRAKE & CALANTONI (2001) :

$$\tilde{U}_0(t) = \frac{\omega H_{rms}}{2 \sinh(kh)} \left(\sum_{i=0}^4 \frac{1}{2^i} \cos[(i+1)\omega t + i\Phi] \right) \quad (8)$$

où Φ est le paramètre qui permet de caractériser la forme de la vague. $\Phi=0$ correspond à des vagues asymétriques, tandis que $\Phi=\pi/2$ correspond à des vagues en dents de scie typiques de la zone de *surf* interne. L'influence du paramètre Φ sur $\tilde{U}_0(t)$ et $a(t)$ est montrée en Figure 2.

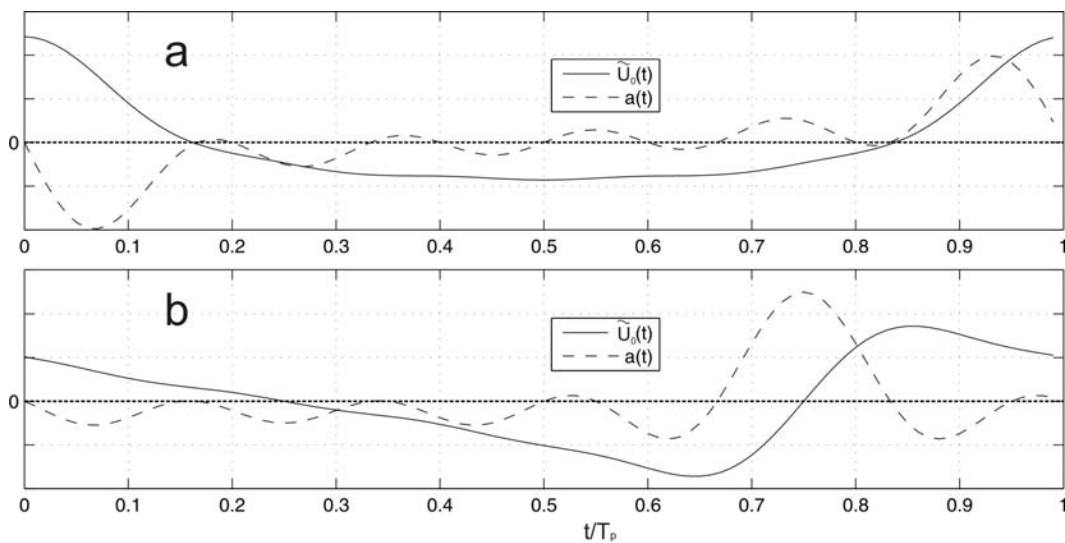


Figure 2. Influence du paramètre de forme Φ sur la vitesse orbitale et l'accélération au fond : (a) $\Phi=0$, (b) $\Phi=\pi/2$.

Ainsi, plus on se place dans la zone de *surf* interne, plus les vagues prennent une forme en dents de scie et plus les termes d'accélération vont être prépondérants dans les flux sédimentaires. Par conséquent, la valeur du paramètre Φ dans le modèle présenté ici dépend directement de sa position par rapport à la zone de

déferlement. La Figure 3 montre l'influence du paramètre de forme Φ sur une partie des termes de l'équation 6.

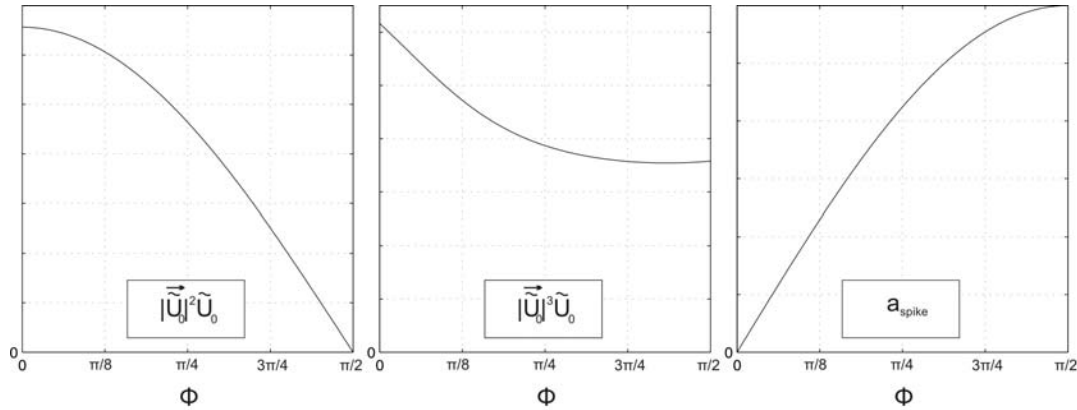


Figure 3. Influence du paramètre de forme Φ sur une partie des termes moteurs du transport sédimentaire (èq. (6))

L'évolution du fond sableux est calculée à partir de l'équation de conservation du sédiment :

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{1}{1-p} \frac{dZ_f}{dt} \quad (9)$$

où $p = 0.4$ est la porosité du sédiment et Z_f la cote du fond sableux. Compte-tenu des pics importants de flux sédimentaires en zone de déferlement, le choix d'un schéma numérique performant et non-oscillant est essentiel pour simuler l'évolution du profil de plage. Plusieurs schémas numériques inspirés des travaux de MARIEU *et al.* (2008) ont été codés et testés dans le modèle.

Le modèle présenté ici est confronté aux simulations réalisées en canal à houle à fond sableux du LEGI (GRASSO *et al.*, 2008).

3 Résultats

3.1 Modélisation des vagues

Le calcul des flux sédimentaires dépend très fortement des caractéristiques locales des vagues, particulièrement dans la zone de déferlement. Dans un premier temps, le modèle de vague est confronté aux données acquises dans le canal à houle au-dessus de profils d'équilibre. Comme indiqué précédemment, la paramétrisation décrite par RUESSINK *et al.* (2003) est la plus performante, notamment pour estimer correctement la hauteur des vagues dans la fosse entre la

barre et le haut de plage. Les valeurs des paramètres ajustables proposés par RUESSINK et al. (2003) ont été légèrement modifiées après calibration pour que les simulations soient en bon accord avec les données en canal. Une comparaison de l'évolution de la hauteur moyenne quadratique H_{rms} simulée pour deux profils transitoires à barre et un profil d'équilibre est présentée en Figure 4.

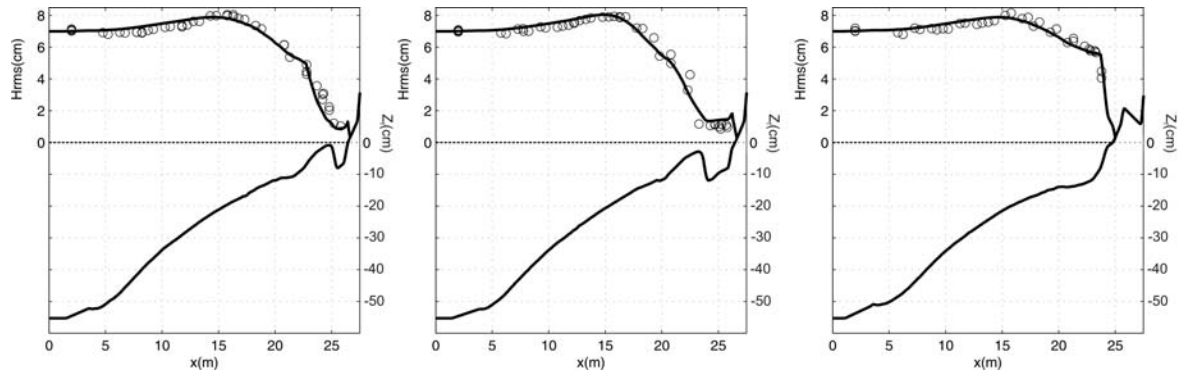


Figure 4. Comparaison des hauteurs de vagues simulées (traits gras) avec celles mesurées (o) dans le canal du LEGI pour deux profils transitoires à barre et un profil d'équilibre (à droite).

3.2 Simulation morphodynamique

Au-dessus de différents cas test de plages à barre(s), les simulations montrent que le modèle permet à la fois de simuler la migration de la barre vers le bord pendant les épisodes de temps calme et vers le large pendant les épisodes énergétiques. Les expériences en canal ne permettent pas encore à l'heure actuelle d'étudier une migration des barres vers le large. C'est pourquoi ici nous présentons à titre d'exemple la migration d'une barre sableuse vers la plage pendant un épisode de temps calme réalisée dans le canal à houle. Les taux de migration et la forme des barres sableuses sont très sensibles aux flux sédimentaires et par conséquent aux nombreux paramètres ajustables du modèle de flux sédimentaires, mais aussi au pas de temps morphodynamique et au schéma numérique utilisé. Nous ne détaillerons pas ici la sensibilité du modèle à ces différents paramètres ni les travaux de calibration. La Figure 5 montre un exemple de comparaison du modèle numérique avec les données. Les taux de migration et la forme de la barre sont en accord avec l'évolution du fond sableux mesuré.

4 Conclusions

Ce papier présente un modèle couplé vagues, transport sédimentaire, évolution du fond permettant avec une approche à phase moyennée et une paramétrisation

simple des flux sédimentaires de simuler l'évolution spatio-temporelle de profils de plage sableuse avec des temps de calculs très faibles. En particulier ce modèle permet de simuler la migration des barres à la fois vers le large et vers le bord pendant respectivement les épisodes de tempête et de temps calme. Ce modèle doit être désormais confronté et calibré avec un plus large jeu de donnée issu de mesures *in-situ* et en canal permettant de comparer les taux de migration vers le bord et vers le large. La simulation de l'évolution du profil au niveau du haut de plage reste encore à l'heure actuelle problématique étant donné que l'approche énergétique utilisée pour l'estimation des flux sédimentaire n'est pas adaptée aux processus en zone de jet de rive. A terme, les avancées réalisées ici vont être intégrées dans un modèle 2DH afin de pouvoir étudier plus finement l'évolution spatio-temporelle des barres sableuses tridimensionnelles.

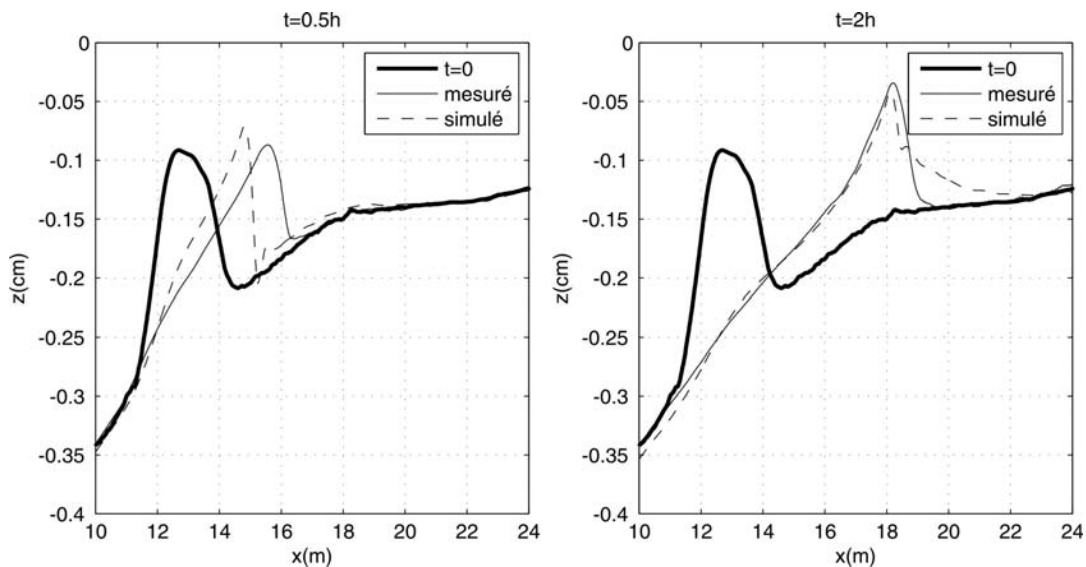


Figure 5. Comparaison de la simulation de la migration vers la plage de la barre sableuse avec les mesures dans le canal à houle du LEGI pour des conditions de temps calme (en condition limite : $H_{rms}=7\text{cm}$, $T_p=2\text{s}$)

5 Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet MODLIT (RELIEFS/INSU).

6 Références bibliographiques

- 1 BAILLARD J.A. (1981). *An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach*. Journal of Geophysical Research, 86, pp 10938–10954.
- 2 BATTJES J.A., JANSSEN J.P.F.M. (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Engineering. ASCE,

New York, pp 570–587.

3 CASTELLE B., BONNETON P., BUTEL R. (2006). *Modeling of crescentic pattern development of nearshore bars, Aquitanian Coast, France*. C.R. Geoscience, 338, pp 795-801.

4 CASTELLE B., BONNETON P., DUPUIS H., SENECHAL N. (2007). *Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian Coast : A review*. Marine Geology, 245, pp 141-159.

5 DRAKE T. G., AND CALANTONI J. (2001). *Discrete particle model for sheet flow sediment transport in the nearshore*. J. Geophys. Res., 106 (C9), pp 19859-19868.

6 DRONEN N., DEIGAARD R. (2007). *Quasi-three dimensional modelling of the morphology of longshore bars*. Coastal Engineering, 54, pp 197-215.

7 GRASSO F., BARTHELEMY E., CERTAIN R., MICHALLET R. (2008). *Etudes expérimentales des profils cross-shore de plages sableuses*. X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Sophia Antipolis, 14-16 Oct.

8 HOEFEL F., ELGAR S. (2003). *Wave-induced sediment transport and sandbar migration*. Science, 299, pp 1885-1887.

9 HSU T.-J., ELGAR S., GUZA R.T. (2006). *Wave-induced sediment transport and onshore sandbar migration*. Coastal Engineering, 53, pp 817-824.

10 MARIEU V., BONNETON P., FOSTER D.L., ARDHUIN F. (2008). *Modeling of vortex ripples morphodynamics*. Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2007JC004659, sous presse.

11 RENIERS A.J.H.M., BATTJES J.A. (1997). *A laboratory study of longshore currents over barred and non-barred beaches*. Coastal Engineering, 30, pp 1-22.

12 RENIERS A.J.H.M., ROELVINK J.A., THORNTON E.B. (2004). *Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing*. Journal of Geophysical Research, 109, C01030, doi:10.1029/2002JC001587.

13 RUESSINK B.G., WALSTRA D.J.R., SOUTHGATE H.N. (2003). *Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches*. Coastal Engineering, 48, pp 139-149.

14 RUESSINK B.G., COCO G., RANASINGHE I.L., TURNER I.L. (2007a). *Coupled and noncoupled behavior of three-dimensional morphological patterns in a double sandbar system*. Journal of Geophysical Research, 112, C07002, doi:10.1029/2006JC003799.

15 RUESSINK B.G., KURIYAMA Y., RENIERS A.J.H.M., ROELVINK J.A. AND WALSTRA D.J.R. (2007b). *Modeling cross-shore sandbar behavior on the time scale of weeks*. Journal of Geophysical Research, 112, F03010, doi:10.1029/2006JF000730.

16 SMIT M.W.J., RENIERS A.J.H.M., RUESSINK B.G., ROELVINK J.A. (2008). *The morphological response of a nearshore double sandbar system to constant wave forcing*. Coastal Engineering, sous presse.

17 STIVE M.J.F., RENIERS A.J.H.M. (2003). *Sandbars in motion*. Science, 21, pp 1855-1856.

18 THORNTON E.B., MACMAHAN J., SALLENHER A.H. (2007). *Rip currents, mega-cusps, and eroding dunes*. Marine Geology, 240, pp 151-167.

19 WRIGHT L.D., SHORT A.D. (1984). *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. Marine Geology, 56, 93-118.