

## Modélisation des évolutions de profil de plage

### *Modelling beach profile evolutions*

**BRUNO CASTELLE, VINCENT MARIEU, PHILIPPE BONNETON, NICOLAS BRUNEAU**

CNRS, UMR EPOC-5805, Université de Bordeaux

Avenue des Facultés, Talence, F-33405, France

Tél : +33 (0)5 40 00 24 50, Fax : +33 (0)5 58 08 48, e-mail : b.castelle@epoc.u-bordeaux1.fr

**FLORENT GRASSO**

CNRS, Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, UJF-INPG

BP53, Grenoble Cedex 9, F-38041, France

**C**e papier présente le développement d'un modèle simple d'évolution de profil de plage sableuse basé sur une approche à phase moyennée et sur un couplage vagues/transport sédimentaire/évolution bathymétrique. Une nouvelle paramétrisation du transport sédimentaire tenant compte de l'asymétrie des vagues et de l'accélération près du fond est proposée et étudiée ici. Le modèle reproduit la migration des barres vers la plage pendant les épisodes de temps calme et vers le large pour des conditions énergétiques. La prise en compte de l'asymétrie d'accélération améliore sensiblement les performances du modèle. La comparaison du modèle avec les expériences réalisées en canal et avec l'évolution d'une plage australienne sur une période de 2 mois montre des résultats encourageants.

**T**his paper presents the development of a simple coupled, wave-averaged, waves-currents-beach profile evolution model. A new parameterization of the sediment transport induced by wave asymmetry and near-bottom acceleration skewness is implemented. The model reproduces the onshore and offshore sandbar migration during low and high energy conditions, respectively. Accounting for acceleration skewness substantially improves the model performance. Comparison with data acquired during a laboratory experiment and a 2-month period field observation of a double-barred beach shows encouraging results.

### I ■ 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. Également, elles contiennent de grandes quantités de sédiment disponible pour migrer vers le bord et nourrir la plage pendant les épisodes de temps calme ou migrer le long du littoral et impacter les plages adjacentes pendant les épisodes de vagues obliques. Ces barres présentent souvent une structuration cohérente le long de la côte (*i.e.* barres rythmiques de longueur d'onde de l'ordre de plusieurs centaines de mètres). Cette régularité contraste avec la complexité des processus hydro-sédimentaires mis en jeu et des rétroactions entre les vagues, les courants induits et les flux sédimentaires. La morphologie tridimensionnelle de ces barres a également souvent considérée responsable de la présence de protubérances du trait de côte et/ou de pics d'érosion locale ayant une rythmicité identique [1], ou encore à des couplages morphologiques complexes [2,3].

La morphologie des plages est très rarement en équilibre avec l'hydrodynamique car les temps de réponse morpho-

dynamique sont beaucoup plus longs que ceux associés aux changements de régime de houle et de niveau de marée. La réponse de la plage à un événement hydrodynamique donné dépend de sa morphologie au moment de l'événement mais aussi fortement de son historique, c'est-à-dire des forçages hydrodynamiques auxquelles elle a été soumise jusqu'à plusieurs mois auparavant. Il est communément admis que, lors des épisodes de temps calme, les barres sableuses littorales migrent lentement vers le bord, développant des structures rythmiques tridimensionnelles, jusqu'à se connecter au rivage, et accélérant ainsi la reconstruction de la plage [4]. À l'inverse, pendant les épisodes énergétiques, les barres migrent en général rapidement vers le large, cette migration étant associée à une disparition des structures tridimensionnelles et à une érosion du haut de plage [4]. Même si ce comportement général est admis par l'ensemble de la communauté, les processus complexes et fortement non-linéaires régissant ces phases d'accrétion et d'érosion, ainsi que les interactions entre les différentes entités de la plage (haut de plage, barre(s) sableuse(s), corps sédimentaires plus au large) et leur réponse aux changements de régimes de houle sont encore très mal compris, et donc mal modélisés. La compréhension et la modélisation de la dynamique de ces barres

sableuses représentent un véritable défi scientifique [5]. 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 [6]. La position des barres par rapport à la côte contrôle pourtant en grande partie la longueur d'onde *longshore* de leurs structures tridimensionnelles [7], et leurs positions relatives semblent contrôler leurs interactions [2]. C'est en partie pourquoi les modèles numériques classiques visant à appréhender la morphodynamique tridimensionnelle des plages sableuses [8,9,10] ne parviennent pas à simuler la dynamique de la plage sur des échelles de temps de l'ordre de plusieurs semaines pendant lesquelles des changements importants de régime de houle sont présents. Ces constatations ont motivé le développement d'un modèle 1D d'évolution de profil de plage afin de se concentrer essentiellement sur la dynamique des barres dans l'axe perpendiculaire à la côte sur des échelles de temps suffisamment longues (de l'ordre de quelques mois), en réponse aux changements de régime de houle.

La modélisation physique permet, tout en collectant facilement des données hydro-sédimentaires, de contrôler le forçage des vagues et réaliser des scénarii en s'affranchissant des changements de régime de houle et de hauteur de marée auxquels on est confronté sur le terrain. Ce type de données est d'une importance capitale pour la validation des modèles numériques. C'est pourquoi en parallèle des développements numériques, des expériences ont été menées dans le canal à houle du LEGI mesurant 36 m de long, 0.55 m de large et 1.3 m de haut. Le fond est constitué d'un sédiment plastique de faible masse volumique ( $\rho_s = 1.19 \text{ g/cm}^3$ ) et de diamètre médian  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$ . Cela permet de vérifier les similitudes hydro-sédimentaires entre le modèle réduit et les plages naturelles, afin de simuler correctement l'évolution des profils de plage. L'échelle de longueur est de l'ordre de 1/10. Des vagues irrégulières sont générées à l'aide d'un batteur suivant un spectre de Jonswap afin de reproduire la formation et la migration de barre(s) perpendiculairement à la plage. Une description extensive des expériences est donnée dans [11].

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 du LEGI [11] et à des données de terrain sur une plage sableuse à double barres pendant une durée de 2 mois.

## II ■ DESCRIPTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

### ● II.1 MODULE HYDRODYNAMIQUE

Les notations utilisées par la suite dans les équations sont décrites en *Figure 1*. Les variations du flux d'énergie des

vagues  $E_F$  le long du profil de plage sont calculées à partir de l'équation classique de conservation du flux d'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,  $\rho$  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 étant négligé) calculé avec l'approche de [12] en prenant en compte la formulation proposée par [13]. 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 du flux 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 le mouvement organisé de la vague calculée d'après [14]. Le courant de retour  $U_r$ , qui compense l'apport de masse des vagues (à travers le mouvement organisé et le rouleau de déferlement) est alors donné par :

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

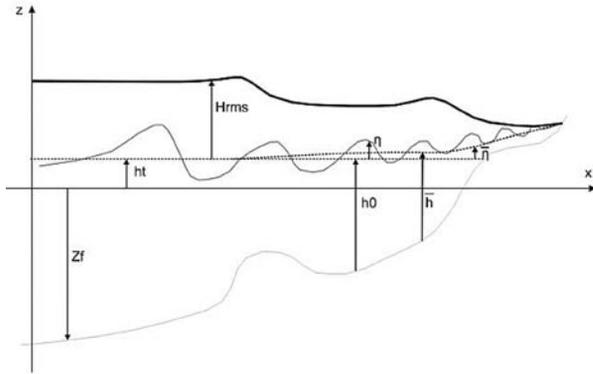


Figure 1. Principaux paramètres utilisés dans la présentation du modèle.

## ● II.2 MODULE SÉDIMENTAIRE

Les flux sédimentaires perpendiculairement à la côte sont calculés à partir de l'approche énergétique de [15] modifiée d'après [16] à laquelle est ajouté un terme d'accélération [17,18] :

$$Q = K_w \left[ \frac{\varepsilon_b}{\tan \varphi} \langle |\tilde{U}_0|^2 \tilde{U}_0 \rangle + \frac{\varepsilon_s}{w_s} \langle |\tilde{U}_0|^3 \tilde{U}_0 \rangle \right] + K_c \left[ \frac{\varepsilon_b}{\tan \varphi} \langle |U_0|^2 U_0 \rangle + \frac{\varepsilon_s}{w_s} \langle |U_0|^3 U_0 \rangle \right] + K_a a_{spike} \quad (6)$$

où  $|\tilde{U}_0|$  est l'intensité des vitesses orbitales au fond,  $|U_0|$  l'intensité des courants totaux (courant de retour et vitesses

orbitales) au fond,  $w_s$  la vitesse de chute du sédiment,  $\varphi$  l'angle de friction,  $\varepsilon_b$  et  $\varepsilon_s$  respectivement les facteurs d'efficacité du transport sédimentaire par charriage et par suspension,  $K_w$  et  $K_c$  des coefficients de frottement et  $\langle \cdot \rangle$  la moyenne temporelle (sur une période supérieure à celle des vagues).  $K_a \langle a_{spike} \rangle$  est le terme lié à l'accélération du fluide près du fond 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 [18].  $K_a$  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 et intégrée sur la verticale, les termes au fond  $\tilde{U}_0(t)$ ,  $U_0(t)$  et  $a(t)$  ne sont pas calculés explicitement.

On choisit donc la paramétrisation proposée par [17] :

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

où  $\Phi$  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 asymétriques en dents de scie (*i.e.* asymétrie par rapport à la verticale) typiques de la zone de *surf* interne. L'influence du paramètre  $\Phi$  sur  $\tilde{U}_0(t)$  et  $a(t)$  est montrée en Figure 2.

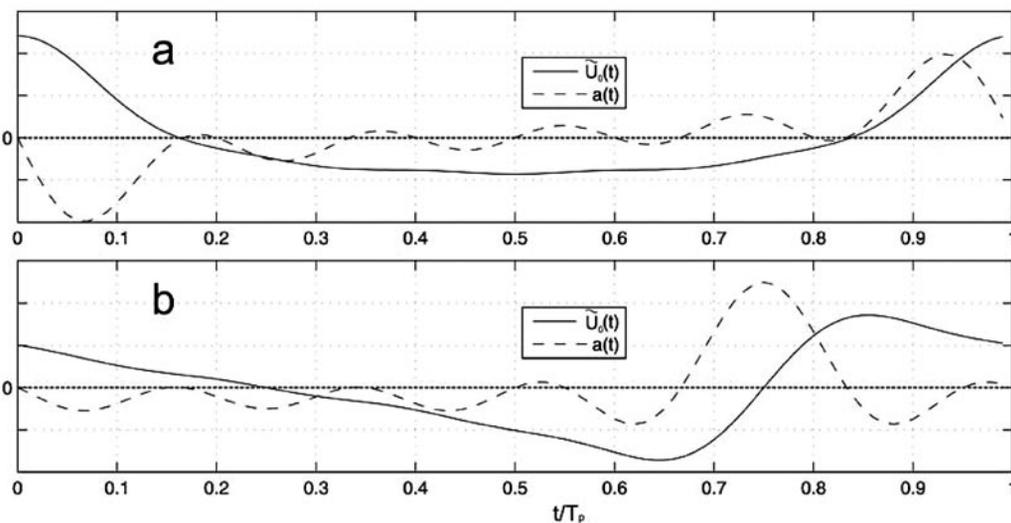


Figure 2. Influence du paramètre de forme  $\Phi$  sur la vitesse orbitale et l'accélération au fond : (a)  $\Phi=0$ , (b)  $\Phi=\pi/2$ .

Ainsi, plus on se rapproche de 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  $\Phi$  dans le modèle présenté ici dépend directement de sa position par rapport à la zone de déferlement avec  $\Phi = \pi Q_b/2$  où  $Q_b$  est la fraction de vagues déferlées ( $Q_b$  variant entre 0 et 1) donnée dans l'estimation de  $D_b(l)$  d'après [12]. La *Figure 3* montre l'influence du paramètre de forme  $\Phi$  sur une partie des termes de l'équation (6).

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

$$\frac{dZ_f}{dt} + \frac{1}{1-p} \frac{dQ}{dx} = 0 \quad (9)$$

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. Le schéma numérique développé par [19] a montré les meilleurs résultats, le maillage fin autorisé par l'approche 1D permettant d'éviter la diffusion numérique dans la résolution de (9).

Le modèle présenté ici est confronté aux simulations réalisées en canal à houle à fond sableux du LEGI [11] et aux données acquises sur la plage de Broadbeach en Australie sur une durée de 2 mois [20].

### III ■ RÉSULTATS

#### ● III.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 vagues est confronté aux données acquises dans le canal à houle au-dessus de profils d'équilibre. Comme indiqué précédemment, la paramétrisation décrite par [13] 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 [13] 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 trois profils d'équilibre est présentée en *Figure 4*. Même si l'accord du modèle avec les mesures est perfectible dans la fosse dans le cas du profil à barre, les capacités du modèle à simuler l'évolution de la hauteur des vagues hors et dans la zone de déferlement peut être considérée comme suffisante pour calculer correctement les flux sédimentaires.

#### ● III.2 SIMULATIONS MORPHODYNAMIQUES

Des simulations préliminaires ont montré que le modèle permet à la fois de simuler la migration des barres sableuses 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.

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. Nous ne détaillons pas ici la sensibilité du modèle à ces différents paramètres ni les travaux de calibration qui ont été réalisés pour obtenir les résultats décrits ci-dessous, ceci étant discuté dans la partie conclusions. La *Figure 5* montre un exemple de comparaison du modèle numérique avec les données. Les taux de migration, la forme de la barre et la profondeur de sa crête sont en accord avec l'évolution

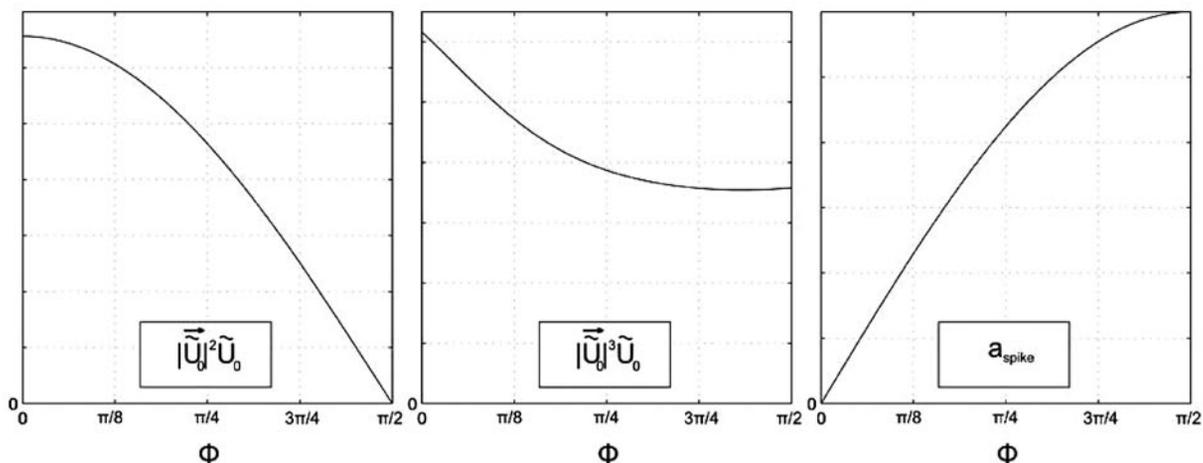


Figure 3. Influence du paramètre de forme  $\Phi$  sur une partie des termes moteurs du transport sédimentaire (l)

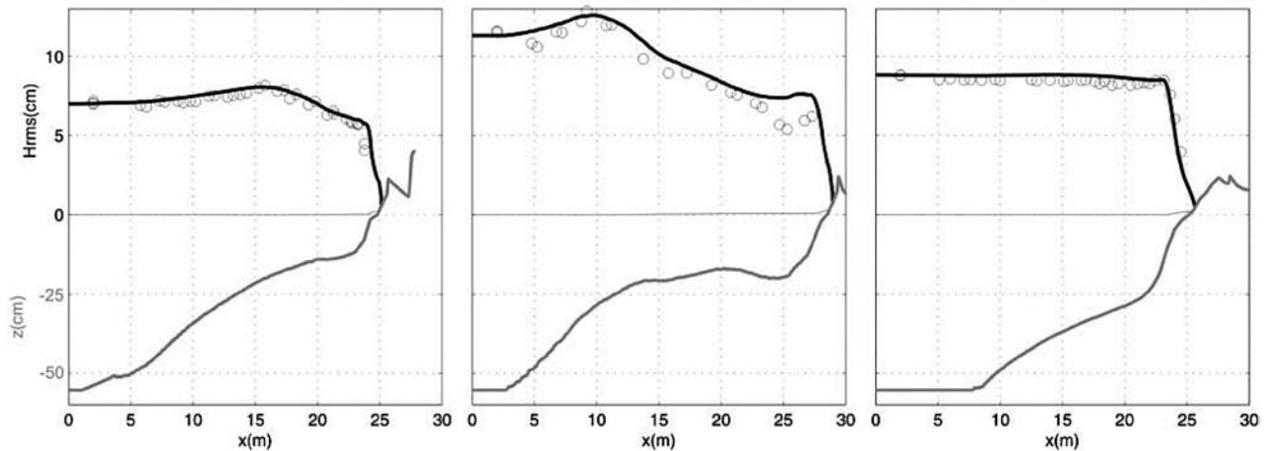


Figure 4. Comparaison des hauteurs de vagues simulées (traits gras noirs) avec celles mesurées (o) dans le canal du LEGI avec la cote moyenne de la surface libre  $\bar{\eta}$  (traits gras gris) de plage à l'équilibre.

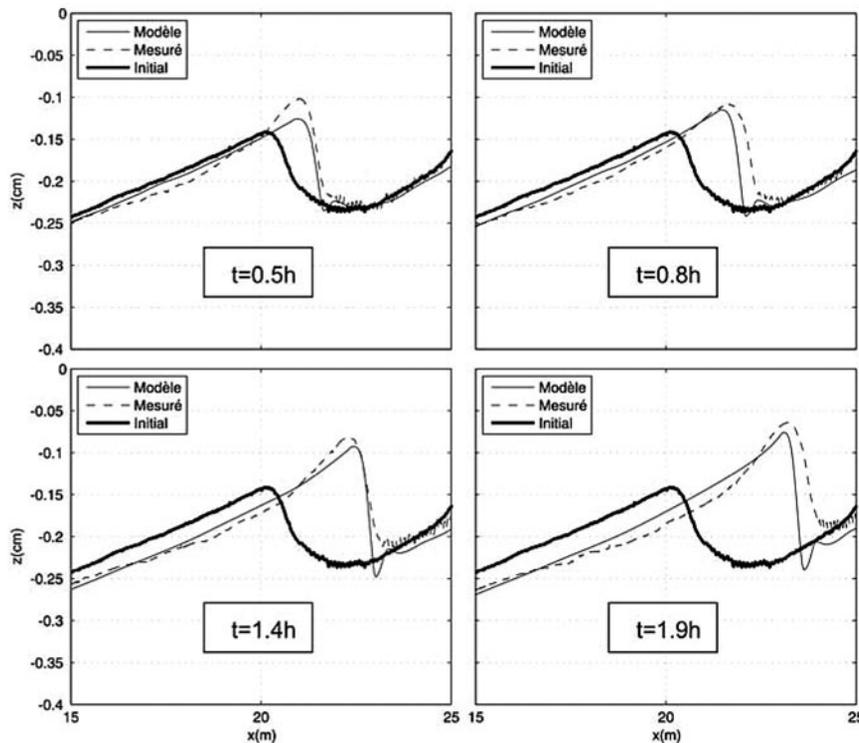


Figure 5. Comparaison de la simulation de la migration vers la plage de la barre sableuse avec les mesures dans le canal à houle du LEGI pour des conditions de temps calme (en condition limite :  $H_{rms} = 7$  cm,  $T_p = 2$  s)

du fond sableux mesuré. En particulier, la pente plus raide de la barre dans sa partie plus proche de la côte est typique des barres sableuses migrant vers le bord pendant les épisodes de temps calme. Des problèmes numériques surviennent toutefois lorsque la barre vient se connecter au haut de plage lorsque la dynamique de celle-ci devient alors contrôlée par les processus hydro-sédimentaires en zone de jet de rive, la hauteur d'eau étant insuffisante pour utiliser l'approche énergétique de [15].

Afin d'étudier plus en détails les capacités du modèle à reproduire la migration des barres sableuses en réponse aux changements de régime de houle et de niveau de marée, le modèle a également été confronté aux données acquises pendant la campagne Broadbeach 2006 [20] pendant laquelle des données sur la position des barres sableuses d'un système à double barre ont été acquises pendant environ 2 mois en présence d'importants changements de régime de houle. La condition initiale du modèle correspond à un profil de plage

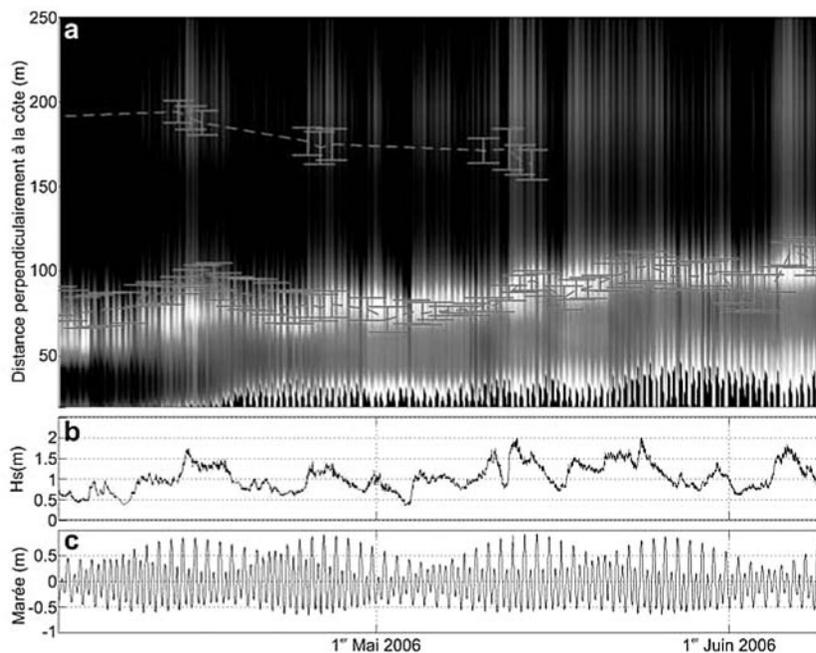


Figure 6. Simulation de l'évolution du profil de la plage à double barre de Broadbeach en 2006 avec (a) l'évolution simulée des zones de déferlement (plus la zone est blanche plus le déferlement est intense, indiquant la présence de barre(s) sableuse(s)). Les distances à la côte de la barre interne et de la barre externe sont superposées à cette cartographie du déferlement ainsi que les déviations standards de ces positions (qui sont considérées comme une indication de leur tridimensionnalité). Ces positions ont été détectées par imagerie vidéo [20] en réponse à (b) l'évolution de la hauteur significative des vagues au large et (c) de la marée.

à double barre mesuré le 5 mai 2006. La Figure 6 montre l'évolution spatio-temporelle des zones de déferlement simulées par le modèle comparée à l'évolution de la position des barres sableuses détectée par imagerie vidéo. La comparaison avec les zones de déferlement est ici privilégiée par rapport à l'élévation bathymétrique puisque la détection de la position des barres par imagerie vidéo était elle-même réalisée à partir des zones de déferlement. Les taux de migration vers le bord et vers le large de la barre interne sont en très bon accord avec les observations avec près de 5 épisodes de migration vers le bord et autant d'épisodes de migration vers le large. On peut noter par contre que le modèle sous-estime sensiblement la migration vers le bord de la barre externe observée pendant les 2 mois de données. Cette sous-estimation peut être expliquée par le fait que la barre externe était en « dégénérescence » suite à un épisode cyclonique décennal, ce qui se traduit par une morphologie de la barre externe sensiblement plate ne développant pas de structures tridimensionnelle contrairement à ce qu'indique la modélisation conceptuelle de [4]. Les difficultés que rencontre le modèle à simuler la migration de la barre externe pourrait donc s'expliquer par son comportement observé atypique, comportement sur lequel plus d'informations sont données dans [20,22].

#### IV ■ CONCLUSIONS

Ce papier présente le développement d'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 plages sableuses 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 ceux de temps calme. Ce modèle doit être désormais confronté et calibré avec un jeu de données plus large issu de mesures *in-situ* et en canal permettant de comparer les taux de migration vers le bord et vers le large, ainsi que la forme des barres, sur de plus grandes échelles temporelles. En effet, des différences significatives ont été observées entre les paramètres ajustables de (6), en particulier les facteurs d'efficacité  $\varepsilon_b$  et  $\varepsilon_s$ , et les paramètres  $K_w$  et  $K_c$  qui ont été utilisés pour l'expérience en canal à houle et la campagne Broadbeach 2006. Le seuil délimitant la migration de la barre vers le bord de la migration vers le large est très sensible aux valeurs respectives de ces différents paramètres. Des tests de sensibilité supplémentaires sont en cours sur d'autres plages sableuses [6] afin d'identifier les gammes de valeurs à utiliser en fonction des caractéristiques de la plage (pente, nombre de barre(s), granulosité, etc.).

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 sédimentaires n'est pas adaptée aux processus en zone de jet de rive. Très récemment, [21] ont proposé de nouvelles formulations permettant pour la première fois

d'estimer ces flux sédimentaires de la zone de levée jusqu'à la zone de jet de rive avec une approche énergétique compatible avec celle développée dans notre modèle. Ces avancées doivent être implémentées afin de simuler les épisodes de destruction et de reconstruction de la berme en haut de plage et les taux d'érosion pendant les épisodes de tempête. A terme, les avancées réalisées ici vont être intégrées dans un modèle 2DH afin d'étudier plus finement l'évolution spatio-temporelle des barres sableuses tridimensionnelles. Cette approche permettra peut-être d'expliquer et de simuler pour la première fois la bidimensionnalisation des structures sableuses tridimensionnelles pendant les épisodes de tempête, ce qui reste encore à l'heure actuelle une préoccupation majeure de l'océanographie physique littorale.

## V ■ REMERCIEMENTS

Ces recherches ont été réalisées dans le cadre, et grâce au financement, du projet MODLIT (RELIEFS/INSU, SHOM/DGA).

## VI ■ RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] E.B. THORNTON, J. MACMAHAN, A.H. SALLENCHER (2007) — Rip currents, mega-cusps, and eroding dunes. *Marine Geology*. **240** 151-167
- [2] B.G. RUESSINK, G. COCO, R. RANASINGHE, I.L. TURNER (2007) — Coupled and noncoupled behavior of three-dimensional morphological patterns in a double sandbar system. doi10.1029/2006JC003799. *Journal of Geophysical Research*. **112** C07002
- [3] B. CASTELLE, P. BONNETON, H. DUPUIS, N. SENECHAL (2007) — Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macro-tidal French Aquitanian Coast : A review. *Marine Geology*. **245** 141-159
- [4] L.D. WRIGHT, A.D. SHORT (1984) — Morphodynamic variability of surf zones and beaches : a synthesis. *Marine Geology*. **56** 93-118
- [5] M.J.F. STIVE, A.J.H.M. RENIERS (2003) — Sandbars in motion. *Science*. **21** 1855-1856
- [6] B.G. RUESSINK, Y. KURIYAMA, A.J.H.M. RENIERS, J.A. ROELVINK, D.J.R. WALSTRA (2007) — Modeling cross-shore sandbar behavior on the time scale of weeks. doi10.1029/2006JF000730. *Journal of Geophysical Research*. **112** F03010
- [7] R. DEIGAARD, N. DRØNEN, FREDSSØE, J.H. JENSEN, M.P. JØRGENSEN (1999) — A morphological stability analysis for a long straight barred coast. *Coastal Engineering*. **36** 171-195
- [8] A.J.H.M. RENIERS, J.A. ROELVINK, E.B. THORNTON (2004) — Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing. doi10.1029/2002JC001586. *Journal of Geophysical Research*. **109** C01030
- [9] B. CASTELLE, P. BONNETON, R. BUTEL (2006) — Modeling of crescentic pattern development of nearshore bars : Aquitanian Coast, France. *Comptes Rendus Geosciences*. **338** 795-801
- [10] N. DRØNEN, R. DEIGAARD (2007) — Quasi-three-dimensional modelling of the morphology of longshore bars. *Coastal Engineering*. **54** 197-215
- [11] F. GRASSO, H. MICHALLET, E. BARTHÉLEMY, R. CERTAIN (2009) — Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology : transients and equilibrium states. doi : 10.1029/2009JC005308. *Journal of Geophysical Research*. **114** C09001
- [12] J.A. BATTJES, J.P.F.M. JANSSEN (1978) — Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Engineering. ASCE, New York*, 570. 587
- [13] B.G. RUESSINK, D.J.R. WALSTRA, H.N. SOUTHGATE (2003) — Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches. *Coastal Engineering*. **48** 139-149
- [14] A.J.H.M. RENIERS, J.A. BATTJES (1997) — A laboratory study of longshore currents over barred and non-barred beaches. *Coastal Engineering*. **30** 1-22
- [15] J.A. BAILARD (1981) — An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach. *Journal of Geophysical Research*. **86** 10938-10954
- [16] T.-J. HSU, S. ELGAR, R.T. GUZA (2006) — Wave-induced sediment transport and onshore sandbar migration. *Coastal Engineering*. **53** 817-834
- [17] T.G. DRAKE, J. CALANTONI (2001) — Discrete particle model for sheet flow sediment transport in the nearshore. *Journal of Geophysical Research*. **106(C9)** 19859-19868
- [18] F. HOEFEL, S. ELGAR (2003) — Wave-induced sediment transport and sandbar migration. *Science*. **299** 1885-1887
- [19] V. MARIEU, P. BONNETON, D.L. FOSTER, F. ARDHUIN (2008) — Modeling of vortex ripple morphodynamics. doi : 10.1029/2007JC004659. *Journal of Geophysical Research*. **113** C09007
- [20] B. CASTELLE, I.L. TURNER, B.G. RUESSINK, R.B. TOMLINSON (2007) — Impact of storms on beach erosion : Broadbeach (Gold Coast, Australia). *Journal of Coastal Research*. **50** 534-539
- [21] J. TINKER, T. O'HARE, G. MASSELINK, T. BUTT, P. RUSSELL (2009) — A cross-shore suspended sediment transport shape function parametrisation for natural beaches. *Continental Shelf Research*. **29** 1948-1960
- [22] B.G. RUESSINK, L. PAPE, I.L. TURNER (2009) — Daily to interannual cross-shore sandbar migration : observations from a multiple sandbar system. *Continental Shelf Research*. **29** 1663-1677