



HAL
open science

Un modèle morphologique côtier pour la création de barres rythmiques

B. Camenen, Philippe Larroudé

► **To cite this version:**

B. Camenen, Philippe Larroudé. Un modèle morphologique côtier pour la création de barres rythmiques. *Revue Française de Génie Civil*, 2003, 7, pp.1099-1116. 10.1080/12795119.2003.9692536 . hal-00259798

HAL Id: hal-00259798

<https://hal.science/hal-00259798>

Submitted on 18 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Un modèle morphologique côtier pour la création de barres rythmiques

Benoît Camenen* — **Philippe Larroudé****

* ATER, ** *Maître de conférences*

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels

BP53, F-38041 Grenoble cedex 9

camenen@hmg.inpg.fr

RÉSUMÉ. Nous présentons dans ce papier un modèle hydrodynamique et morphodynamique pour des plages sableuses. Un intérêt du modèle vient de l'intégration des effets du courant de retour et de l'asymétrie de la houle, 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 ainsi été réalisée. Ce modèle appliqué dans un code commercial 2DH 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 hydrodynamic and morphodynamic model for sandy beaches is presented. One interesting point is that the effects of the undertow and the wave asymetry are computed, which are the main factors in the creation of the bar. A study of the position and the initial vertical growth of the bar has been made with varying wave conditions and beach slope. This model is integrated in a commercial 2DH software. And it 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 allows the creation of a rythmic bar.

MOTS-CLÉS : barre de déferlement, transport sédimentaire, ligne de déferlement, houle asymétrique, courant de retour, dérive littorale.

KEYWORDS: longshore bar, sediment transport, breaker line, asymmetric waves, undertow, long-shore current.

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 [Chr 94] et Falqués *et al.*, 1996 [Fal 96] par exemple) utilisant l'analyse de stabilité linéaire. Un modèle 2DH commercial couplé à une analyse de stabilité linéaire peut ainsi être 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 peuvent de ce fait être abordés à l'aide du code de calcul en éléments finis TELEMAC. Cependant, du fait que le transport solide dans la zone de surf est très sensible au courant de retour (non pris en compte par un modèle 2DH classique), un modèle hydrodynamique simplifié (*cf.* Camenen, 2002 [Cam 02]) est utilisé permettant l'intégration du courant de retour (ou *undertow*). De plus, une expression paramétrée de l'asymétrie de la houle est rajoutée permettant une possible prise en compte d'un transport par la houle. Le module de transport solide SISYPHE de TELEMAC est enfin utilisé pour estimer l'évolution des fonds.

Une difficulté est la stabilisation de la croissance de la barre pré littorale. De ce fait, une attention toute particulière a été prise pour une meilleure estimation du transport solide (*cf.* Camenen & Larroudé, 2000 [Cam 00a], 2003 [Cam 03]) : l'utilisation d'un effet de pente adapté, une représentation acceptable du coefficient de frottement 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 important 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 sensibilité 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 Falqués (obtenus pour une pente moyenne de la plage, une rugosité de fond et des conditions de houle donnés; *cf.* Falqués *et al.*, 1999 [Fal 99]). L'évolution des fonds est ensuite calculée en imposant comme contraintes hydrodynamiques une houle aléatoire, un courant le long de la côte estimé selon la formule de Longuet-Higgins (1970 [Lon 70]) et un courant de retour (modèle basé sur l'approche de Svendsen, 1984 [Sve 84]). 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 [Mic 00], Sénéchal *et al.*, 2002 [Sen 02]). 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 [Cam 99], Camenen *et al.*, 2000 [Cam 00b]).

2. Modèle hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique consiste en un modèle d'évolution de la houle et un calcul des courants moyennés sur la hauteur d'eau (cf. figure 1) validés pour des plages planes à quasi planes (Camenen, 2002 [Cam 02]). Pour l'ensemble des calculs tests réalisés (paragraphe 3 et 4), la progression de la houle vers la plage est calculée en intégrant l'effet de levage (ou *shoaling*) pour n vagues individuelles respectant le spectre de Rayleigh au large. Le déferlement est calculé selon la méthode proposée par Camenen (2002 [Cam 02], p. 151-158) et l'évolution de la houle dans la zone des déferlantes est réalisée suivant la méthode de Svendsen (1984 [Sve 84]).

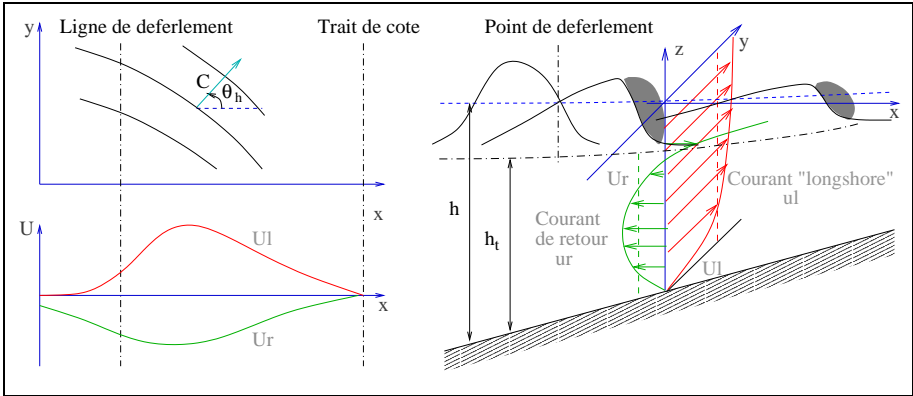


Figure 1. Schématisation de l'hydrodynamique utilisée pour les calculs de transport solide ($u_l(z)$, $u_r(z)$, U_l , U_r : courants moyens le long de la côte et de retour, valeurs selon l'axe z et moyennés sur la hauteur d'eau)

Le courant de retour et l'asymétrie de la houle sont les principaux facteurs de la création de la barre *longshore*, et ont donc fait l'objet d'une attention particulière.

2.1. Courant de retour

Pour une meilleure estimation du transport sédimentaire dans la zone des déferlantes, la prise en compte du courant de retour est fondamentale. La vitesse caractéristique utilisée pour le module de transport est alors calculée comme la somme de la vitesse moyennée sur la hauteur d'eau issue du module de courantologie et de la vitesse moyenne du courant de retour. Pour le courant de retour, la vitesse est moyennée sur la hauteur d'eau sous le creux de la vague et peut être décomposée en trois termes :

$$U_r = \frac{C B_0 H_w^2}{h h_t} + \frac{A_{rol}}{T_w h_t} - 0,05 U_w, \quad [1]$$

où C est la célérité de la houle, B_0 le paramètre de profil de la surface libre calculé selon la relation proposée par Hansen (1990 [Han 90]), H_w la hauteur de la houle, h et

h_t respectivement les hauteurs d'eau moyenne et sous le creux des vagues (cf. figure 1), A_{rol} l'aire de la section *cross-shore* du rouleau déferlant, T_w la période de la houle et U_w la vitesse orbitale de la houle au fond.

Les deux premiers termes de l'équation [1] correspondent respectivement à l'effet de la houle (*Stokes drift*) et des rouleaux déferlants (cf. Svendsen, 1984 [Sve 84]) et le troisième à l'effet du *streaming* (cf. Van Rijn, 1998 [Van 98]).

Une difficulté est l'estimation de l'aire de la section des rouleaux A_{rol} . A partir des données expérimentales de Duncan (1981 [Dun 81]), Svendsen (1984 [Sve 84]) a obtenu la relation suivante :

$$A_{rol} = 0,9 H_w^2 \tag{2}$$

L'effet des rouleaux de déferlement apparaît cependant très largement sous-estimé par l'utilisation de cette équation. Cette observation a déjà auparavant été réalisée par Dally & Osiecki, 1994 [Dal 94] et Kuriyama & Nakatsukasa, 2000 [Kur 00]. Suivant une étude réalisée à partir de données expérimentales de profils de courants de retour sur une plage plane (cf. figure 2), l'aire des rouleaux de déferlement devrait être de 7 à 12 fois supérieure à celle prédite par l'équation [2].

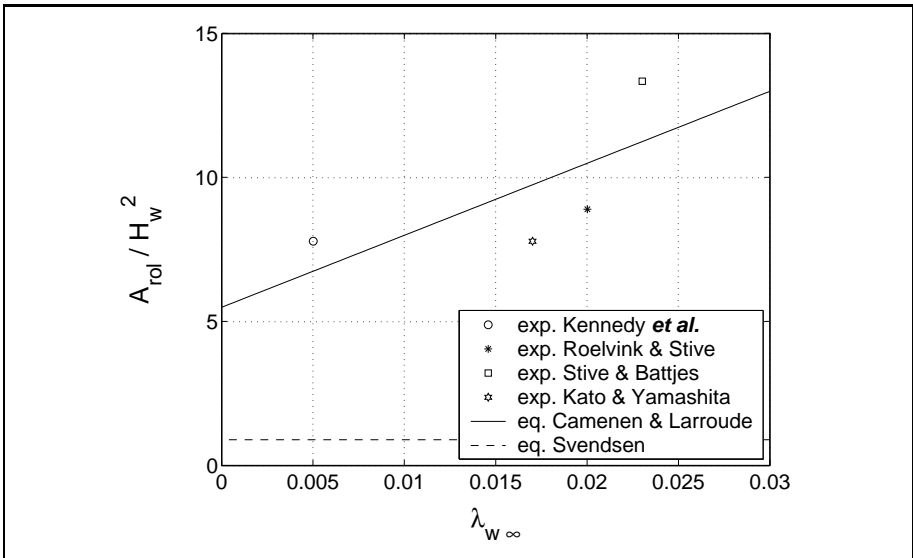


Figure 2. Calibration de l'effet des rouleaux de déferlement sur le courant de retour moyenné sur la hauteur d'eau sous le creux de la vague

Les données expérimentales sont tirées des articles de Kennedy, Cox & Kobayashi, 1998 [Ken 98] (expérience de laboratoire de Sultan, 1995 [Sul 95]), Roelvink & Stive, 1989 [Roe 89], Stive & Battjes, 1984 [Sti 84] et Kato & Yamashita, 2000 [Kat 00] (plage expérimentale d'Ogata, Japon). Sur la figure 2, des quatre points expérimentaux apparaît une légère proportionnalité entre l'aire des rouleaux de déferlement A_{rol} et

la cambrure de la houle au large $\lambda_{w\infty}$. Une nouvelle formulation de A_{rol} est ainsi proposée :

$$A_{rol} = (5,5 + 250 \lambda_{w\infty}) H_w^2 \quad [3]$$

Cette relation reste cependant à confirmer, vu le très faible nombre de données expérimentales. Toutefois, l'équation [3] permet une estimation bien meilleure de l'aire A_{rol} que l'équation [2] proposée par Svendsen.

2.2. Asymétrie de la houle

L'asymétrie de la houle est calculée paramétriquement à partir du paramètre d'Ursell selon l'équation proposée par Dibajnia *et al.*, 2001 [Dib 01], et réalisée à partir d'un grand nombre de données expérimentales.

$$r_w = A_{dmw} \tanh\left(\frac{U_{rs}}{B_{dmw}}\right), \quad [4]$$

$$r_{w(pic)} = 0,48 - 0,2 \tanh(40 \lambda_{w\infty}), \quad [5]$$

avec $A_{dmw} = \max(0,38, r_{w(pic)})$, et $B_{dmw} = \max(80, 120 - 65 \tanh(40 \lambda_{w\infty}))$, où $U_{rs} = L_w^2 H_w h^{-3}$ est le paramètre d'Ursell, L_w la longueur d'onde de la houle et $\lambda_{w\infty}$ la cambrure de la houle au large.

3. 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 x_d . 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 obtenue pour une houle monochromatique telle que $H_{w\infty} = H_{rms\infty}$ (où l'indice ∞ indique une valeur au large) et non au point de plus forte énergie (maximum de la hauteur de houle moyenne quadratique 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 la première valeur calculée de x_d , ce qui « rapproche » ainsi (d'une manière toute relative) la position de la barre de la ligne de déferlement moyenne. Nous avons estimé la position de la barre pré littorale x_b par rapport au point de déferlement x_d (valeur moyenne quadratique) 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.

3.1. 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 formation de la barre. Le premier (barre plus au large de la ligne 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.

Deux paramètres fondamentaux quant à l'évolution de la houle sont la pente moyenne de la plage $\tan \beta_p$ et la cambrure de la houle au large $\lambda_{w\infty} = H_{rms\infty}/L_{w\infty}$ (où $L_{w\infty}$ est la longueur d'onde de la houle au large). Une relation a donc tout d'abord été recherchée entre le rapport de la position de la barre et la position de la ligne de déferlement moyenne x_b/x_d et le paramètre de déferlement (ou paramètre d'Iribaren) ξ_∞ défini par Battjes (1974 [Bat 74]) comme suit :

$$\xi_\infty = \frac{\tan \beta_p}{\sqrt{\lambda_{w\infty}}} \quad [6]$$

A partir des résultats des formules de Bailard, Dibajnia & Watanabe et de Ribberink, nous pouvons alors obtenir une relation polynomiale dérivée de la méthode des moindres carrés (cf. figure 3) :

$$\frac{x_b}{x_d} \approx 1,67 + 0,45 \xi_\infty - 9,4 \xi_\infty^2 + 17,2 \xi_\infty^3 \quad [7]$$

Les résultats restent cependant très dispersés par rapport à la relation obtenue. Ils permettent cependant de distinguer deux tendances par rapport au paramètre d'Iribaren ξ_∞ : la position de la barre par rapport au point de déferlement décroît avec ξ_∞ tant que celui-ci reste inférieur à $0,3$; ensuite, une légère croissance peut être observée ; ceci correspond à peu près à la distinction entre les déferlements glissant et plongeant proposée par Galvin (1968 [Gal 69]). Le paramètre d'Iribaren ne semble cependant pas être suffisant pour estimer la position de la barre de déferlement.

Nous avons donc cherché à obtenir une relation entre la position de la barre et un autre paramètre adimensionnel permettant de meilleurs résultats. Pour cela, il a été réalisé une étude de sensibilité par rapport aux principaux paramètres de l'hydrodynamique côtière et du transport sédimentaire, *i.e.* : la hauteur de la houle au large $H_{rms\infty}$, la période de la houle T_w , la pente moyenne de la plage $\tan \beta_p$ et le diamètre moyen des sédiments d . Il s'avère donc que la position de la barre de déferlement est proportionnelle à la hauteur de houle au large (soit à l'énergie de la houle) et inversement proportionnelle à la période de la houle, soit donc proportionnelle à la cambrure

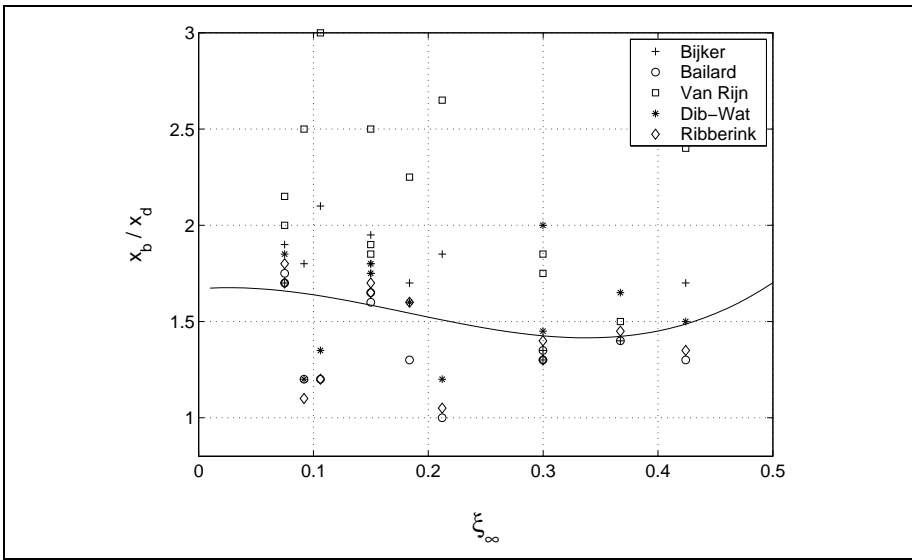


Figure 3. Estimation de la position de la barre en fonction du paramètre ξ_∞ (— : équation [7])

de la houle au large. De ce fait, ceci peut expliquer la dispersion des résultats par rapport au paramètre d'Irribaren. Le diamètre des sédiments semble de plus légèrement influencer la position de la barre de déferlement. Le paramètre de transport T_{st} défini par l'équation suivante est ainsi proposé :

$$T_{st} = \frac{H_{rms\infty}^3 \tan^2 \beta_p}{g^2 d T_w^4} = \frac{H_{rms\infty}}{4\pi^2 d} (\lambda_{w\infty} \tan \beta_p)^2 \quad [8]$$

Par l'utilisation de ce paramètre (cf. figure 4), les deux types de formation de la barre semblent bien être mis en valeur. Le premier type (courant de retour ou *undertow* prédominant) indique une position de la barre d'avant-côte inversement proportionnelle au paramètre T_{st} 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.

$$x_{b1} = 1 + A_{b1} T_{st}^{B_{b1}} \quad [9]$$

$$x_{b2} = 1 + A_{b2} T_{st}^{B_{b2}} \quad [10]$$

avec $(A_{b1}; B_{b1}) \approx (0,06; -0,2)$ et $(A_{b2}; B_{b2}) \approx (10; 0,3)$. Dans le cas des formules de Bijker et Van Rijn, seule la première courbe est mise en évidence du fait de l'absence de la prise en compte de l'asymétrie de la houle. La formule de Van Rijn implique de plus des coefficients différents : $(A_{b1}; B_{b1}) \approx (0,10; -0,2)$.

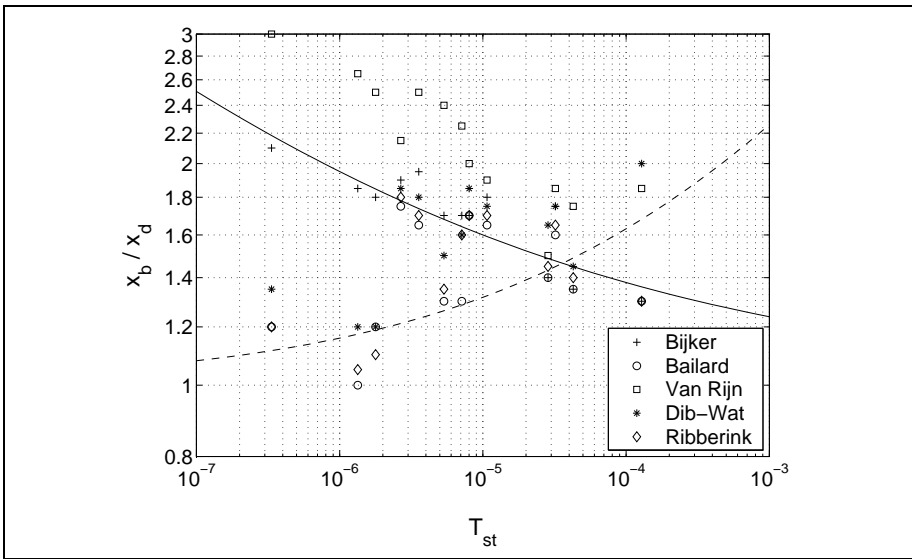


Figure 4. Estimation de la position de la barre en fonction du paramètre T_{st} (— : équation [9], - - - : équation [10])

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 (selon un profil de débit solide *cross-shore*) :

$$f_*(q_s) = \tan \left| \frac{\max(q_s(\text{large}))}{\max(q_s(\text{plage}))} \right| \quad [11]$$

avec $q_s(\text{plage})$ débit solide dirigé vers la plage, et $q_s(\text{large})$ débit solide dirigé vers le large.

En effet, si ce rapport tend vers l'infini (soit $f_*(q_s)$ tend vers 1), nous sommes dans le régime 1 (*undertow* prédominant) ; si le rapport tend vers 0 (soit $f_*(q_s)$ 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 permettant ainsi la détermination de la direction principale du transport solide. La pente moyenne de la plage $\tan \beta_p$ est un facteur extrêmement important pour le courant de retour : une pente très forte implique en effet une zone des déferlantes peu étendue et ainsi une concentration de la dissipation de l'énergie de la houle sur un faible espace, soit un courant de retour très fort. De même, il apparaît que le maximum d'asymétrie de la houle se situe au point de déferlement et est une fonction décroissante de la cambrure de la houle au large (Dibajnia *et al.*, 2001 [Dib 01], cf. équation [5]). Par contre, la hauteur de la houle H_{rms} ne semble pas di-

rectement influencer le régime de transport, les transports dus au courant de retour et à l'asymétrie de la houle étant tous deux proportionnels à H_{rms} . Suite à une étude de sensibilité du régime de transport par rapport aux paramètres $\tan \beta_p$ et $\lambda_{w\infty}$, nous proposons donc l'utilisation du paramètre D_{st} défini comme suit :

$$D_{st} = \tan \beta_p \lambda_{w\infty}^3 \quad [12]$$

La figure 5 permet ainsi d'estimer une valeur critique (approximative) de D_{st} : $D_{st(cr)} = 4 \cdot 10^{-8}$. La courbe ajoutée sur le graphique 5 correspond ainsi à la relation $\tanh(|D_{st(cr)}/D_{st}|^3)$.

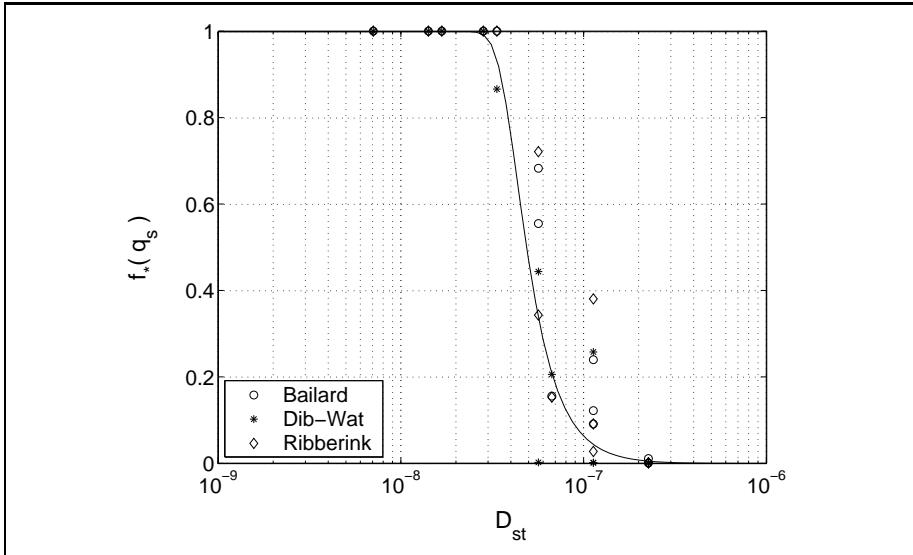


Figure 5. Estimation du rapport entre le maximum de débit solide vers le large et le maximum de débit solide vers la plage en fonction du paramètre D_{st}

Une conséquence très intéressante de cette étude de la formation de la barre est qu'elle permet de connaître la provenance des sédiments qui ont formé la barre pré-littorale. Ainsi, Sunamura (1986 [Sun 86]) a distingué trois types de barre soit selon la provenance des sédiments, soit selon le régime de transport du sédiment. Le schéma de la figure 6 présente clairement les deux régimes de transport que nous avons observés (type I et III) ainsi que le régime intermédiaire (type II), où le sédiment provient à la fois du large et de la plage (cas le plus courant).

Le paramètre D_{st} semble donc avoir un grand intérêt dans la compréhension du désensablement de certaines plages, ainsi que sur les conséquence d'un apport (ou retrait) de sédiments sur la barre pré-littorale.

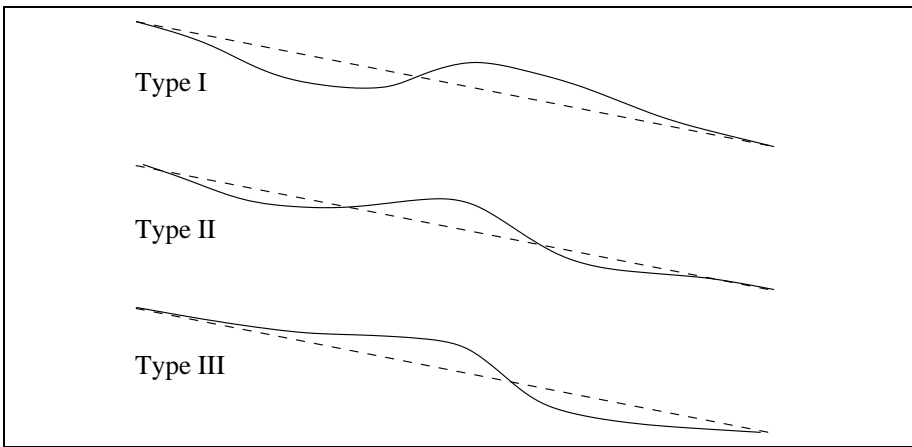


Figure 6. Schématisation des différents types de formation d'une barre à partir d'une plage plane (d'après Sunamura, 1986 [Sun 86])

3.2. 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), l'amplitude maximale du transport solide se situe assez logiquement pour $1 < x/x_d < 2$ (où la vitesse U_w est maximale). En revanche, pour une forte dérive littorale, on observe rapidement une amplitude maximale du transport solide à l'intérieur de la zone de surf, soit principalement dirigé par le courant le long de la côte. Ce courant le long de la côte influence non seulement le débit solide sur cette même direction mais aussi sur la direction perpendiculaire. Ceci est explicité par les figures 7 et 8.

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 7) 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 moyenne totale (i.e. $\vec{U}_c = \vec{U}_l + \vec{U}_r$) selon la direction de la houle et sa normale seront utilisés (soit U_h et U_n sur la figure 7). Comme l'amplitude du courant le long de la côte est souvent plus importante que celle du courant de retour et impose une composante du courant selon la direction de la houle dans la direction opposée à celle de l'*undertow*, l'effet apparaît de manière plus visible pour ce dernier. Le débit solide *cross-shore* q_{sx} est ainsi très influencé par l'incidence de la houle (débit solide vers la plage accru). La figure 8 indique l'influence du courant le long de la côte sur le profil de vitesse selon la direction de la houle. Le débit solide par charriage instantané étant grossièrement proportionnel à la

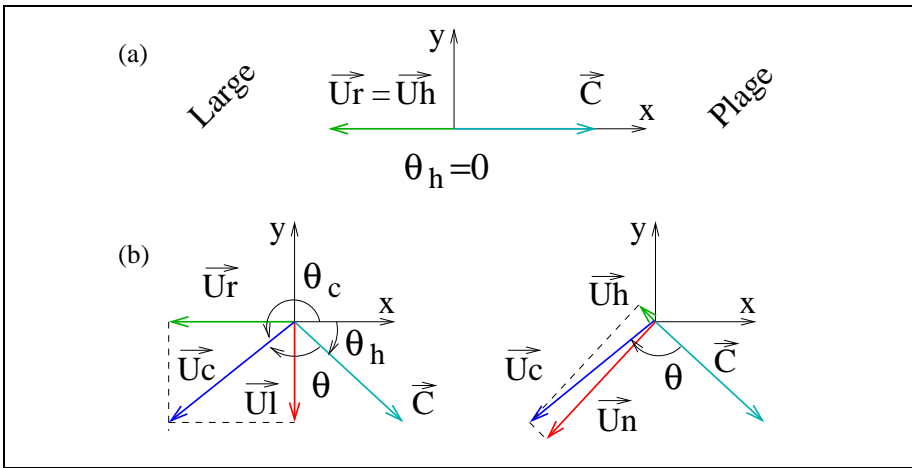


Figure 7. Schématisation et terminologie des courants et directions utilisés pour les calculs de transport solide (θ_h : angle d'incidence de la houle, θ_c : angle entre la direction du courant moyen et l'axe x, et θ : angle entre les directions courant moyen et de la houle ; voir aussi figure 1)

vitesse instantanée au cube, la quantité de sédiments emportée dans la direction de la plage est fortement accrue dans le cas (b) par rapport au cas (a).

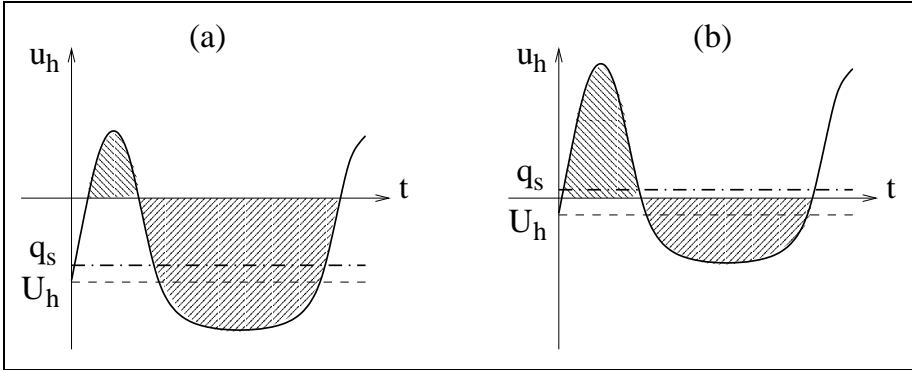


Figure 8. Profil temporel de vitesse selon la direction de la houle utile aux formules de Bailard, Dibajnia & Watanabe et Ribberink pour les cas (a) et (b) de la figure 7 et débit solide net (adimensionnel)

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, la valeur minimum de l'équation [10] doit alors être inférieure à

l'unité. La position x_b/x_d de la barre est une fonction décroissante de l'incidence de la houle θ_w . Enfin, en multipliant le coefficient D_{st} par $\cos^2 \theta_w$, la relation critique séparant les deux modes de formation de la barre est conservée.

4. 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. Les influences de la taille des sédiments et de la houle semblent être moins importantes, et se manifestent uniquement à travers le poids de ces paramètres sur le débit solide net. La vitesse de croissance de la barre sableuse reste néanmoins directement gouvernée 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_{st} , il apparaît assez nettement une certaine proportionnalité entre la vitesse de croissance de la barre et ce paramètre (cf. figure 9). Avec une erreur inférieure à un ordre de grandeur, on obtient la relation suivante :

$$V_{zb} = A_{zb} T_{st}^{1,25} \quad [13]$$

avec $A_{zb} \approx 3$.

En supposant la vitesse de croissance de la barre à peu près constante (ce qui suppose bien sûr des conditions de houle au large identiques), il peut être alors possible d'estimer le temps nécessaire pour que la hauteur de la barre (crête à creux) atteigne une certaine taille :

$$T_{formation} = \frac{A_{final}}{V_{zb}} = \frac{A_{final}}{A_{zb}} T_{st}^{-1,25} \quad [14]$$

où A_{final} correspond à la hauteur de la barre crête à creux.

La figure 9b présente les résultats obtenus en admettant une taille finale de la barre de 1 mètre. On observe ainsi des valeurs de temps de formation qui peuvent varier de quelques heures à quelques mois. Enfin, la vitesse de croissance initiale (et donc le temps de formation de la barre) 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. Ce calcul reste cependant approximatif puisque la barre se formant, elle influe sur

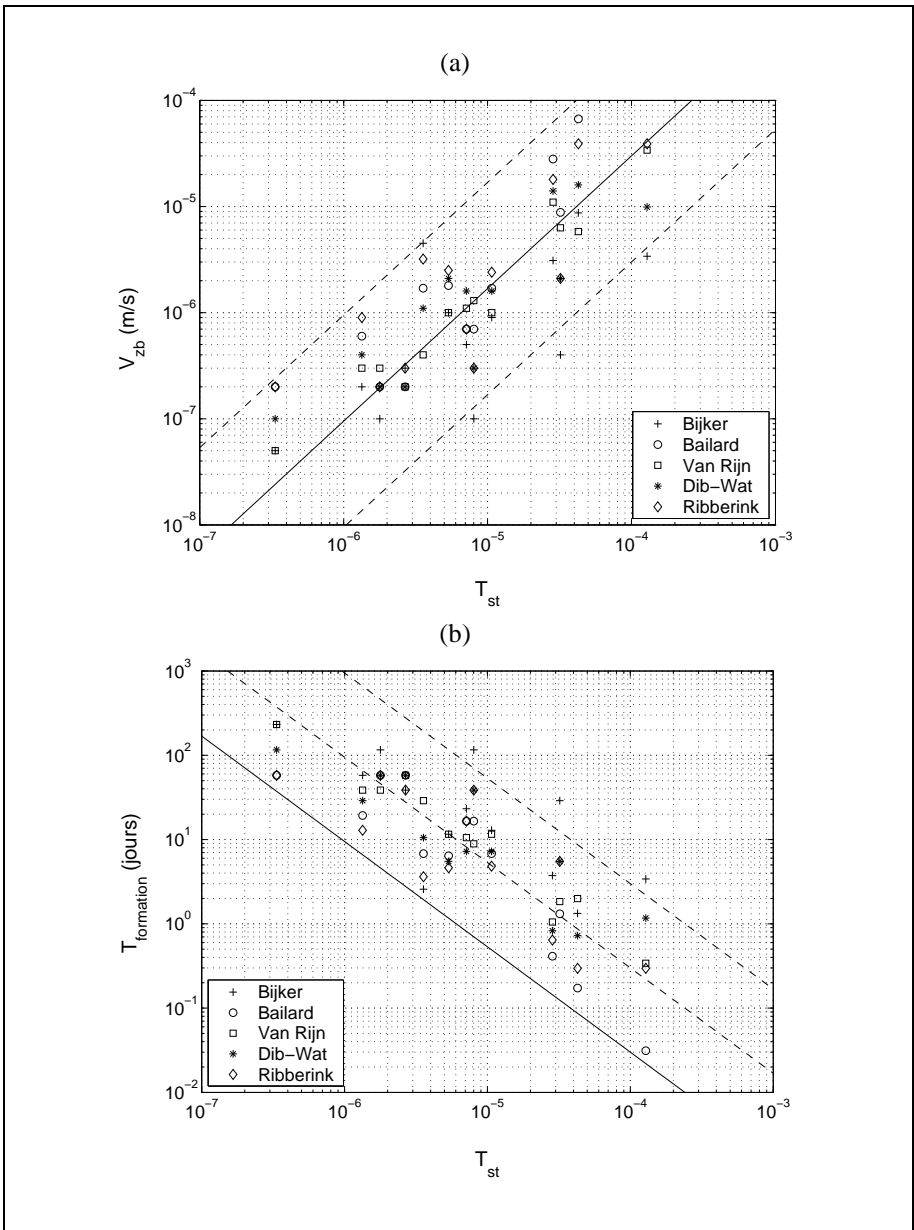


Figure 9. Estimation de la vitesse de croissance initiale (a) et du temps de formation (amplitude de 1 mètre) (b) de la barre pour une plage initialement plane en fonction du paramètre T_{st} (— : équation [13] (a) ou tirée de l'équation [13] (b); - - - : incertitudes à un facteur 10)

l'hydrodynamique et donc sur sa vitesse de croissance. De plus, une stabilisation de la barre devrait être observée dès que celle-ci se rapproche de son équilibre.

Il faut cependant prendre en compte les limites de notre modèle hydrodynamique. En effet, les observations de terrain montrent que, pour les pentes de plage supérieure à 3 %, aucune barre de sable n'a été observée, les plages étant trop réfléchives. 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, en particulier sur le profil d'équilibre. 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 de plus 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).

5. 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 [Mic 00], Sénéchal *et al.*, 2002 [Sen 02]). 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/PhotoAerpdf>).

Pour pouvoir recréer une forme rythmique de la barre, nous utilisons comme fond initial les résultats du code d'instabilité linéaire de Falqués *et al.* (1996 [Fal 96]). Ce code permet l'analyse des perturbations par rapport au courant le long de la côte et donc l'obtention des formes les plus instables. La théorie de l'instabilité considère une plage initialement plane de pente β_p où la ligne de côte est donnée par l'axe y . L'hydrodynamique est représentée uniquement par le courant le long de la côte, les évolutions morphologiques par l'équation de conservation de la masse. Le débit solide est donné par l'équation simplifiée :

$$q_s = \alpha_w(x) |\vec{U}_c|^n \left(\frac{\vec{U}_c}{|\vec{U}_c|} - \beta \vec{grad}(h) \right) \quad [15]$$

avec α_w : fonction de mélange, directement fonction de la vitesse orbitale de la houle si celle-ci influe sur le transport solide, n : entier correspondant à l'effet du courant moyen sur le transport solide et β : coefficient d'effet de pente ($\beta \approx 1, 5$).

En supposant un transport solide proportionnel au moment de vitesse à la puissance 3 (*cf.* Al Salem, 1993 [Al 93]), nous obtenons pour une houle sinusoïdale : $q_s \propto U_c^3 + 3/2 U_c U_w^2$. Dans le cas d'un courant (*longshore*) important vis-à-vis de la houle (forte incidence de la houle, pente de la plage $\tan \beta_p \geq 2\%$), $U_c^3 \gg U_c U_w^2$,

nous choisissons ainsi $n = 3$ et $\alpha_w(x) = Cte$. Dans le cas d'un courant faible vis-à-vis de la houle (faible incidence, pente de la plage $\tan \beta_p < 2\%$), $U_c^3 \ll U_c U_w^2$, nous choisissons donc $n = 1$ et $\alpha_w(x) \propto x^2$ (la vitesse orbitale de la houle peut être au 1^{er} ordre considérée comme proportionnelle à la hauteur d'eau dans la zone de surf). Ribas *et al.* (2000 [Rib 00]) ont ainsi montré qu'ils pouvaient obtenir des barres asymétriques *down-current* (approximativement perpendiculaires à la houle incidente) ou *up-current* (de direction à peu près similaire à celle de la houle incidente), plus ou moins inclinées ; ceci en fonction des conditions hydrodynamiques et paramètres de la plage.

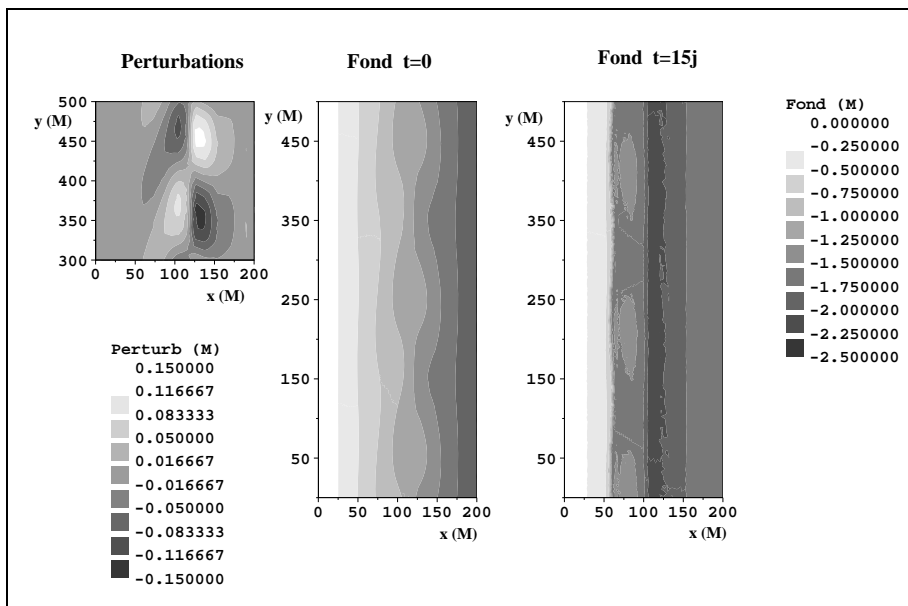


Figure 10. Perturbations apportées par le code de Falqués (a) ; Plage initiale (b) ; Fond après 15 journées de calcul (c)

Grâce au couplage code de stabilité / code hydrosédimentaire (appliqué au code de calcul TELEMAC), nous simulons la croissance des barres intertidales pendant 15 jours. Sur la figure 10, nous observons bien la création du système barres/baines d'une périodicité d'environ 200 mètres (soit de l'ordre de grandeur des plus courts systèmes observés sur la plage du Truc-Vert). Toutefois, l'asymétrie (barres *down-current*) observée sur la plage du Truc-Vert et prédite par le code d'instabilité ne semble pas conservée. Ceci peut être expliqué par deux facteurs importants pour la formation de ce système que nous n'avons pas encore intégrés dans le modèle : les effets de la marée et de la réfraction de la houle (renforçant les courants vers le large au niveau des baines).

6. Conclusions et perspectives

Le modèle hydrosédimentaire présenté 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*. Des calculs tests réalisés sur une plage plane ont enfin permis d'observer 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 de retour prédominant alors que le second correspond à une houle asymétrique prédominante. Nous proposons le paramètre D_{st} pour identifier ces différents régimes ainsi que le paramètre T_{st} 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. Il apparaît que le courant le long de la côte joue un rôle important pour la célérité du système le long de la côte mais aussi pour la stabilisation de la barre. Pour une incidence de la houle très faible, des instabilités numériques apparaissent assez rapidement. L'effet du déferlement sur la barre doit donc être étudié et intégré dans les formules de transport pour obtenir une stabilisation de la barre dans tous les cas d'étude. De plus, l'intégration de effets 2D sur la courantologie (formation des *rip currents* vers le large) ainsi que des effets de la marée permettraient une description plus complète de la formation du système barres/bâines. Enfin, cette étude doit être également complétée par la simulation de croissance de ces instabilités par un code 2DH non linéaire type TELEMAC.

Remerciements

La majeure partie du travail présentée 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.

7. Bibliographie

- [Al 93] AL SALEM A., « Sediment transport in oscillatory boundary layers under sheet flow conditions », PhD thesis, Delft Hydraulics, The Netherlands, 1993.
- [Bat 74] BATTJES J., « Surf Similarity », *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng.*, American Society of Civil Engineers, 1974, p. 1050-1061.
- [Cam 99] CAMENEN B., LARROUDÉ P., « Nearshore transport modelling : application to Trucvert beach », *IARH Conference*, Genova, Italy, 1999.
- [Cam 00a] CAMENEN B., LARROUDÉ P., « Numerical comparison of sediment transport formulae », *Sandwave Dynamics Workshop*, Lille, France, 2000, p. 37-42.
- [Cam 00b] CAMENEN B., PEDREROS R., DUPUIS H., HOWA H., LARROUDÉ P., « Modélisation numérique du transport solide sur une plage sableuse », *VIèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier*, Caen, France, 2000, p. 219-228.
- [Cam 02] CAMENEN B., « Modélisation numérique du transport sédimentaire sur une plage sableuse », PhD thesis, Université Joseph Fourier, France, 2002.
- [Cam 03] CAMENEN B., LARROUDÉ P., « Comparison of sediment transport formulae for a coastal environment », *Coastal Engineering*, vol. 48, 2003, p. 111-132.
- [Chr 94] CHRISTENSEN E., DEIGAARD R., FREDSOE J., « Sea bed stability on a long straight coast », *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, American Society of Civil Engineers, 1994, p. 1865-1879.
- [Dal 94] DALLY W., OSIECKI D., « The role of rollers in surf zone currents », *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, American Society of Civil Engineers, 1994, p. 1895-1905.
- [Dib 01] DIBAJNIA M., MORIYA T., WATANABE A., « A representative wave model for estimation of nearshore local transport rate », *Coastal Engineering*, vol. 43, n° 1, 2001, p. 1-38.
- [Dun 81] DUNCAN J., « An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil », *Proc. Roy. Soc. London*, n° 377 A, 1981, p. 331-348.
- [Fal 96] FALQUÉS A., MONTOTO A., IRANZO V., « Bed-flow instability of the longshore current », *Continental Shelf Research*, vol. 16, 1996, p. 1927-1964.
- [Fal 99] FALQUÉS A., RIBAS F., LARROUDÉ P., MONTOTO A., « Nearshore oblique bar modelling : Trucvert beach », *IARH Conference*, Genova, Italy, 1999.
- [Gal 69] GALVIN C., « Breaker type classification on three laboratory beaches », *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering (- Division)*, vol. 95, n° WW2, 1969, p. 175-200, former Waterways and Harbors Division.
- [Han 90] HANSEN J., « Periodic waves in the surf zone : analysis of experimental data », *Coastal Engineering*, vol. 14, 1990, p. 19-41.
- [Kat 00] KATO S., YAMASHITA T., « A three-dimensional model for wind and wave-induced coastal currents and its verification by ADCP observations in the nearshore zone », *Proc. 27th Int. Conf. Coastal Eng.*, Sydney, Australia, 2000, American Society of Civil Engineers, p. 3777-3790.
- [Ken 98] KENNEDY D., COX D., KOBAYASHI N., « Application of an undertow model to irregular waves on barred beach », *Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng.*, Copenhagen, Denmark, 1998, American Society of Civil Engineers, p. 311-324.

- [Kur 00] KURIYAMA Y., NAKATSUKASA T., « A one-dimensional model for undertow and longshore current on a barred beach », *Coastal Engineering*, vol. 40, 2000, p. 39-58.
- [Lon 70] LONGUET HIGGINS M., « Longshore currents generated by obliquely incident sea waves », *J. Geophysical Research*, vol. 75, n° 33, 1970, p. 60778-60801.
- [Mic 00] MICHEL D., HOWA H., THOMAS C., CHAPALAIN G., THAIS L., MALENGROS D., « Sediment dynamics and hydrodynamics on the inner part of the Aquitan shelf : preliminary results », *Sandwave Dynamics Workshop*, Lille, France, 2000, p. 123-125.
- [Rib 00] RIBAS F., FALQUÉS A., MONTOTO A., « Normal mode analysis of the surf zone morphodynamics », *Proc. 27th Int. Conf. Coastal Eng.*, Sydney, Australia, 2000, American Society of Civil Engineers, p. 3229-3242.
- [Roe 89] ROELVINK J., STIVE M., « Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach », *J. Geophysical Research*, vol. 94, n° C4, 1989, p. 4785-4800.
- [Sen 02] SENECHAL N., ABADIE S., BONNETON N., BONNETON P., BRIÈRE C., BUTEL R., CAPOBIANCO R., CASTELLE B., CHAPALAIN G., DULOU F. D. C., DUPUIS H., HOWA H., LARROUDE P., MARON P., MALENGROS D., MICHEL D., MORY M., OGGIAN G., PEDREROS R., REY V., RIHOUEY D., « Présentation de la campagne de mesures intensives du PNEC : Truc-Vert 2001 », *VIIèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier*, Anglet, France, 2002, p. 381-392.
- [Sti 84] STIVE M., BATTJES J., « Velocity and pressure field in spilling breakers », *Proc. 19th Int. Conf. Coastal Eng.*, Houston, Texas, 1984, American Society of Civil Engineers, p. 1420-1436.
- [Sul 95] SULTAN N., « Irregular wave kinematics in the surf zone », PhD thesis, Texas A & M University, Texas, 1995.
- [Sun 86] SUNAMURA T., « A parameter for cross-shore sediment transport direction and its application to beach erosion / accretion problem », *Ann. Report*, vol. 12, p. 52-54, Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, 1986.
- [Sve 84] SVENDSEN I., « Mass flux and undertow in the surf zone », *Coastal Engineering*, vol. 8, 1984, p. 347-365.
- [Van 98] VAN RIJN L., *Principles of coastal morphology*, Aqua Publications, The Netherlands, 1998.