



Développement d'un modèle morphodynamique tridimensionnel empirique moyen-terme : application au site d'Omaha beach

Didier Rihouey^(a), Denis Morichon^(a), Philippe Maron^(a), Franck Levoy^(b)

^(a) LaSAGeC - Génie Côtier, Université de Pau et des Pays de L'Adour,
I.S.A. B.T.P., 1 allée du Parc Montaury, 64600 ANGLET,
France, E-mail: didier.rihouey@univ-pau.fr,

^(b) Unité M2C, Morphodynamique Continentale et Côtière,
UMR 6143, Université de Caen, 24, rue des tilleuls, 14000 Caen.

Résumé :

Les modèles statistiques, couramment utilisés par les météorologues et les océanographes, sont encore peu développés en morphodynamique côtière à cause du manque de données in-situ. Récemment, l'exploitation d'une importante base de données topographiques et hydrodynamiques de la plage d'Omaha (Normandie) a permis de développer un modèle morphodynamique empirique 2D cross-shore (Rihouey *et al.*, 2003)¹ basé sur l'utilisation de l'Analyse Canonique de Corrélation (ACC).

Cette étude présente une extension du modèle de Rihouey *et al.* (2003)¹ à trois dimensions. Le modèle d'analyse factorielle 2D d'Hsu *et al.* (1986)² est utilisé pour pouvoir prendre en compte les évolutions tridimensionnelles de la topographie. Les résultats du modèle 3D d'Omaha-beach mettent en évidence de fortes corrélations entre les évolutions cross-shore de la topographie et les conditions d'agitation associées aux vagues. Par ailleurs, les évolutions longshore sont mal décrites par le modèle. Les capacités prédictives, les limitations et les perspectives de ce type d'approche sont analysées et discutées.

Abstract:

Common in geophysical applications, especially in meteorology and oceanography, the use of statistical models to coastal evolution are scarce. Recently, an important topographic and hydrodynamic data set of Omaha beach (Normandy) was used to develop an empirical cross-shore 2D morphodynamic model (Rihouey *et al.*, 2003)¹ based on Canonical Correlation Analysis (CCA).

This study presents an extension to three dimensions of the model of Rihouey *et al.* (2003)¹. The two dimensional empirical orthogonal function model of Hsu *et al.* (1986)² is used to take into account the three dimensional behavior of the study area. The results of the model underline the important correlation between the cross-shore evolution and the wave forcing, whereas longshore evolutions are badly represented. The predictive efficiency, the limitation and the possibility of this type of approach are analyzed and discussed.

* Par souci de fluidité, les terminologies anglo-saxonnes cross-shore et longshore seront respectivement utilisées de le texte à la place de leurs équivalents français : direction perpendiculaire à la côte, et direction parallèle à la côte.

1.Introduction

L'expansion touristique et une prise de conscience collective ont fait de la compréhension de l'évolution du littoral une priorité en terme d'aménagement côtier. Une protection efficace des plages contre l'érosion marine nécessite une compréhension des processus physiques interagissant dans la zone littorale, et des différentes échelles spatio-temporelles correspondantes.

Ces dernières décennies, de nombreux modèles ont été développés pour améliorer notre compréhension et tenter de prédire l'évolution morphodynamique des plages sableuses. On distingue deux grandes catégories de modèles d'évolution morphodynamique: les modèles numériques, basés sur les équations fondamentales de la dynamique, et les modèles empiriques, basés sur l'analyse statistique de données in-situ. Ce dernier type de modèle constitue l'objet de cet article.

Les modèles statistiques sont largement utilisés par les météorologues et les océanographes, qui disposent d'un grand nombre de données in-situ par le biais des stations d'observation et de la télédétection. A l'opposé, le manque de mesures topographiques et bathymétriques, couplées avec des mesures de forçages climatiques et hydrodynamiques, a retardé l'application des modèles empiriques aux problèmes de morphodynamique côtière, et plus particulièrement à l'étude de l'évolution des plages sableuses. Aubrey (1980)³, le premier, a montré les performances d'un modèle linéaire simple couplé à l'analyse factorielle 1D pour décrire les évolutions morphologiques d'un profil de plage sableuse exposée aux vagues. Par la suite, Uda et Hashimoto (1982)⁴ puis Hsu *et al.*, (1986)² et (1994)⁵ ont étendu l'application du modèle linéaire à la prédiction des évolutions 3D d'une plage sableuse. Plus récemment, Larson *et al.* (2000)⁶, Rozyński (2003)⁷, Larson *et al.* (2003)⁸ ont montré l'efficacité de l'Analyse Canonique des Corrélations (ACC) pour étudier les interactions complexes entre le climat de houle et l'évolution d'un profil de plage.

L'Action de Recherche Thématique ART7 « Hydrodynamique sédimentaire des côtes sableuses » du Programme National d'Environnement Côtier (PNEC) a permis l'acquisition d'une importante base de données topographiques et hydrodynamiques sur la plage d'Omaha. Les variations entre 32 levés topographiques d'un profil cross-shore de la plage, réalisés entre février 1999 et décembre 2003, ont été corrélées aux conditions d'agitation par le biais de l'ACC. Les résultats de ce traitement statistique ont permis le développement d'un modèle morphodynamique empirique 2D cross-shore d'Omaha beach (Rihouey *et al.*, 2003)¹, basé sur l'approche proposée par Larson *et al.* (2000)⁶.

Cette étude présente une extension du modèle de Rihouey *et al.* (2003)¹ à trois dimensions. L'ACC et la méthode utilisée pour prendre en compte les évolutions tridimensionnelles de la topographie et sa reconstruction, sont présentées dans la section 2. Les résultats d'un modèle 3D d'Omaha beach, obtenu à partir de l'analyse statistique de données topographiques et hydrodynamiques du site, sont présentés dans la section 3. Les capacités prédictives du modèle sont également explorées dans cette section. Enfin, l'approche adoptée, ses limitations et les perspectives de développement de la méthode sont analysées et discutées dans les sections 4 et 5.

2. Présentation du modèle

2.1. Analyse canonique des corrélations

L'ACC est une méthode statistique de couplage qui permet de mettre en évidence les corrélations entre deux jeux de variables différents Y et Z . Le principe est de construire deux nouveaux jeux de variables U et V qui seront des combinaisons linéaires des variables initiales les plus corrélées. Généralement, la matrice Y correspond aux données considérées comme les forçages du système étudié, et la matrice Z aux données que l'on cherche à prédire. Dans notre cas Y représente la hauteur de houle et Z la topographie d'une plage. Leurs dimensions respectives sont $nt \times ny$ et $nt \times nz$, où ny et nz sont les nombres respectifs de variables de Y et Z , et nt leur nombre de mesures dans le temps. Les coefficients de la matrice de transformation de Y à U sont alors déterminés par les solutions du problème aux valeurs propres :

$$\left[(Y^T Y)^{-1} (Y^T Z) (Z^T Z)^{-1} (Z^T Y) - \mu^2 I \right] = 0 \quad (1)$$

Les valeurs propres μ^2 représentent le carré des corrélations entre les variables canoniques (les vecteurs colonnes de U et V). La matrice R , constituée des vecteurs propres associés, forme la matrice de transformation de Y à U :

$$U = Y R \quad (2)$$

La permutation de Y et Z , et la résolution du problème aux valeurs propres (1), nous donne les mêmes valeurs propres μ^2 . La matrice Q , constituée des vecteurs propres associés, forme la matrice de transformation de Z à V :

$$V = Z Q \quad (3)$$

Les modes spatiaux G et H , associés aux variables canoniques U et V , sont alors donnés par :

$$G = Y^T U \text{ et } H = Z^T V \quad (4) \text{ et } (5)$$

Les deux jeux de variables Y et Z sont préalablement structurés en réalisant une analyse factorielle, ce qui permet également de filtrer le bruit. Ainsi, les données sont décomposées en $Y = \alpha E^T$ et $Z = \xi F^T$, où α et ξ sont les modes temporels, et E et F sont les modes spatiaux de Y et Z . Un nombre limité de modes est alors considéré pour l'ACC entre les variables initiales.

Finalement, une matrice de régression, basée sur les corrélations entre les deux jeux de variables, peut être générée. Connaissant la matrice des forçages Y_p (mesurés ou simulés), on peut alors déterminer le champ de variable \hat{Z} que l'on cherche à reconstruire ou prédire, par l'expression suivante :

$$\hat{Z} = Y_p \Psi \quad (6)$$

où la matrice de régression est donnée par (Graham *et al.*, 1987) Ψ^9 :

$$\Psi = G S F^T \text{ avec } S = U^T \xi \quad (7) \text{ et } (8)$$

2.2.Prise en compte des données morphologiques tridimensionnelles

Les dimensions (3D + temps) du champ de variables Z ne permettent pas de réaliser directement une ACC. Uda et Hashimoto (1982) et Hsu *et al.* (1986) ont montré la validité de l'analyse factorielle 2D pour découpler les évolutions cross-shore et longshore d'une topographie. L'adoption de cette technique dans notre approche nous permet de prendre en compte les données morphologiques tridimensionnelles, et leurs variations dans le temps.

L'utilisation des méthodes d'analyse factorielle 1D pour l'étude de l'évolution morphologique des profils de plages sableuses a vu le jour au milieu des années 70 (Winant *et al.*, 1975). Etendue à deux dimension par Uda et Hashimoto (1982), la méthode consiste à déterminer les modes propres représentant les variations bathymétriques au cours du temps d'une surface (x,y) .

La profondeur $h(x,y,t)$ s'exprime alors:

$$h(x,y,t) = \sum_k e_k(x,t) e_k(y,t) \quad (9)$$

où x est la distance longshore, y la distance cross-shore, t le temps et k le mode considéré. $e_k(x,t)$ et $e_k(y,t)$ sont respectivement les modes propres longshore et cross-shore. Ils sont donnés par :

$$e_k(x,t) = \sum_m F_k^m(x) \xi_{kx}^m(t) \quad (10)$$

$$e_k(y,t) = \sum_n F_k^n(y) \xi_{ky}^n(t) \quad (11)$$

où $F_k^m(x)$ sont les modes propres spatiaux longshore, $\xi_{kx}^m(t)$ les modes propres temporels longshore, $F_k^n(y)$ les modes propres spatiaux cross-shore, $\xi_{ky}^n(t)$ les modes propres temporels cross-shore, et m et n sont respectivement les modes longshore et cross-shore considérés.

2.3.Reconstruction des morphologies

L'utilisation des premiers modes longshore $e_1(x,t)$ et cross-shore issus de l'analyse factorielle 2-D (9), qui représentent des séries temporelles de profils moyennés spatialement respectivement dans les directions cross-shore et longshore (Hsu *et al.*, 1986) $e_1(y,t)$, nous permet de considérer deux champs de variables liés aux évolutions morphologiques $Z_l = e_1(x,t)$ et $Z_c = e_1(y,t)$.

Les variables Z_l et Z_c sont préalablement structurées en réalisant une analyse factorielle sur les données centrées, et sont ensuite corrélées au forçage de houle Y , structurées de la même façon, via l'équation (1). En fait, l'approche proposée consiste à appliquer le modèle 2-D d'analyse canonique des corrélations de Larson *et al.* (2000) $Z_l Z_c$ dans deux directions (longshore et cross-shore). Finalement, on obtient deux matrices de régression et (Equation III.11) correspondant aux

corrélations longshore et cross-shore. Ψ, Ψ_c

Les premiers modes longshore $\hat{e}_1(x,t)$ et cross-shore $\hat{e}_1(y,t)$ sont alors reconstruits ou prédits à partir des équations (6), (7) et (8). Finalement, les topographies tridimensionnelles peuvent être reconstruites en appliquant l'équation (9) :

$$\hat{h}(x,y,t) = \hat{e}_1(x,t) \hat{e}_1(y,t) \quad (12)$$

Les différentes étapes du modèle morphodynamique empirique 3D décrit dans cette section sont résumées dans le schéma suivant :

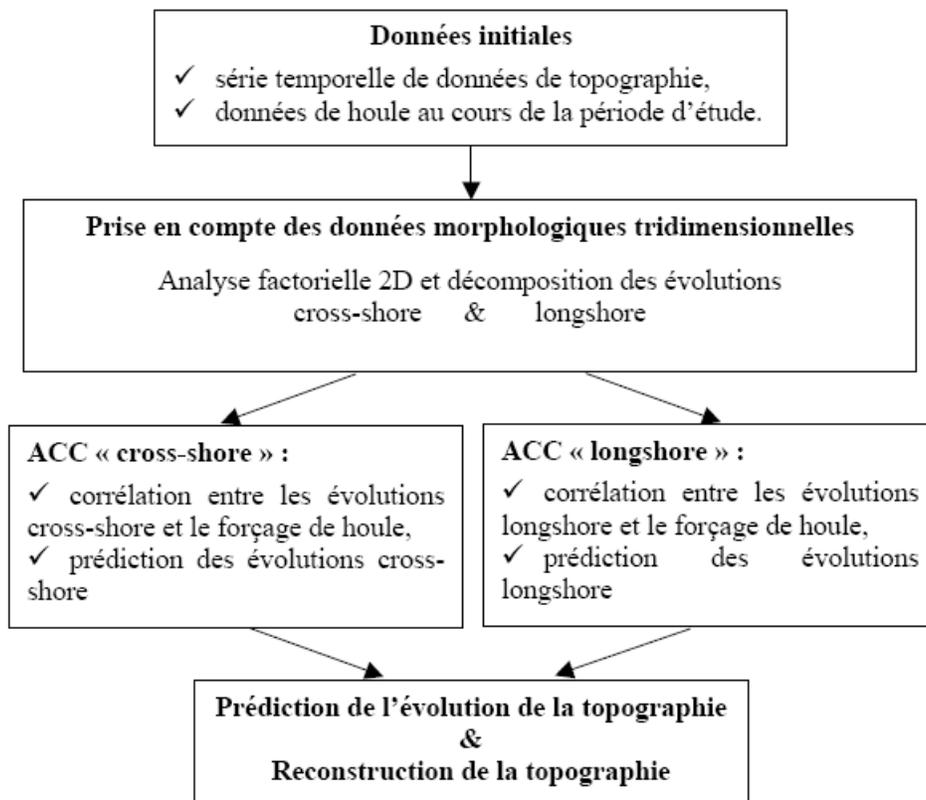


Figure 1. Schéma de principe du modèle morphodynamique empirique 3D proposé.

3. Modèle morphodynamique 3D d'Omaha Beach

3.1. Présentation du site d'étude

La plage d'Omaha beach est située sur le littoral du Calvados en Baie de Seine occidentale (Figure 2.). Elle constitue une anse sableuse de 6 km de linéaire côtier entre deux portions rocheuses (Figure 2.). Située dans un environnement macrotidal (marnage de vive-eau moyen = 6,2 m), l'agitation y est dominée par les états de « mer du vent » en provenance de NW (70%) et NE (30%) dont la hauteur significative moyenne au niveau des basses mers de vives-eaux est de 0,44 m. L'estran de la plage d'Omaha beach est marqué par une alternance de crêtes et de sillons dont le nombre varie de deux à cinq.

L'amplitude de ces barres excède rarement 1 m et leur extension latérale est parfois délimitée par des chenaux de drainage. Ce type de plages, dénommées «barres et bâches» correspond aux *ridges and runnels* définies par King et Williams (1949) ¹¹.

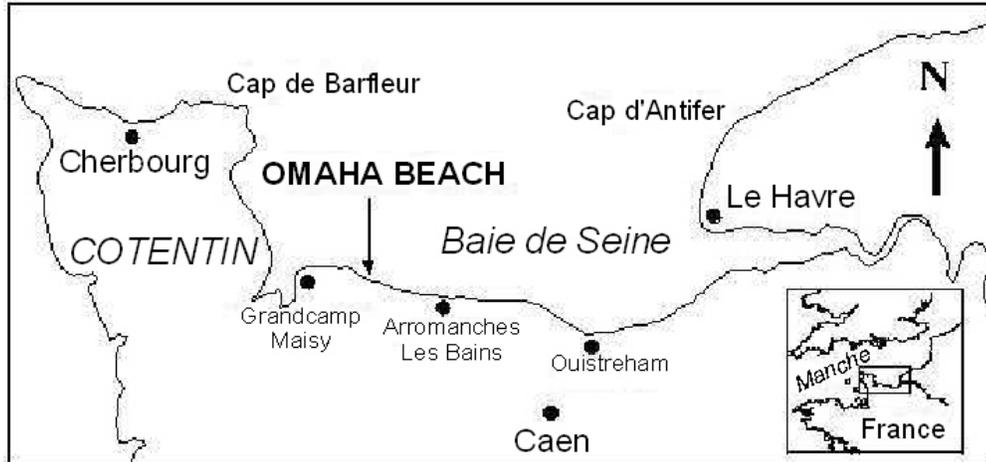


Figure 2. Localisation de la plage d'Omaha sur la côte du calvados.

3.2.Présentation des données utilisées

Les mesures des conditions d'agitation ont été réalisées à l'aide d'un courantomètre houlographe (S4DW interocean), situé au niveau des basses mers de grandes vives-eaux. Ces données sont constituées de mesures qui ont été réalisées selon des séquences de 9 minutes toutes les 4 heures. Les caractéristiques d'agitation obtenues après traitement sont la hauteur significative H_s (m), la période significative T_s (s), la hauteur d'eau d (m) et l'angle d'incidence θ (°) de la houle par rapport au trait de côte. Une densité de probabilité de hauteur de houle significative (Figure 3.), propre à chaque série temporelle mesurée entre deux levés topographiques successifs, a été utilisée dans le modèle pour caractériser les conditions d'agitation sans imposer de distribution particulière.

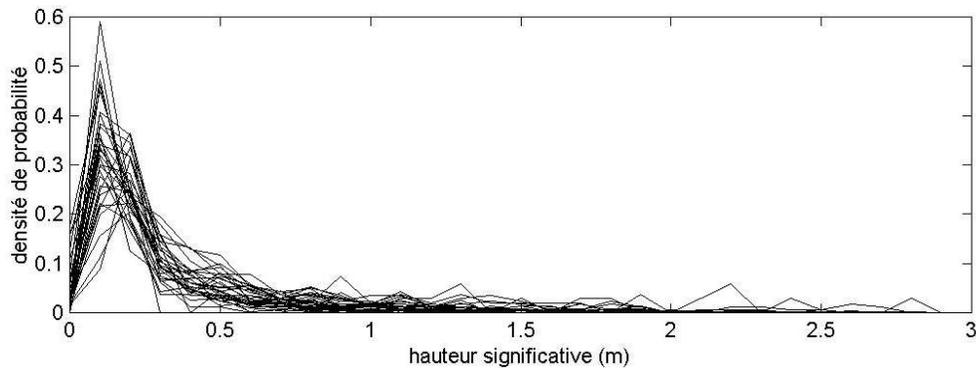


Figure 3. Distribution statistique de hauteur significative utilisée pour forcer le modèle.

32 levées topographiques ont été réalisées sur la plage d'Omaha de février 1999 à décembre 2002 avec un GPS différentiel centimétrique. Ces levés couvrent une zone d'environ 400m de longueur (longshore) sur 325m de largeur (cross-shore) qui s'étend sur l'estran du pied de dune jusqu'au niveau des basses mers de vives-eaux. Des modèles numériques de terrain (MNT) ont ensuite été générés à l'aide du Système d'Information Géographique (S.I.G.) "Surfer 7" (Golden Software inc.)¹² avec un pas de discrétisation spatiale de 5m (longshore) × 5m (cross-shore).

3.3. Résultats du modèle morphodynamique 3D

L'analyse canonique a été réalisée sur les 30 premières topographies mesurées du 17/02/99 au 14/12/01, dans le but de tester les capacités prédictives du modèle sur les 2 topographies suivantes. Ainsi, les premiers modes longshore et cross-shore, qui représentent des séries temporelles de profils moyennés spatialement respectivement dans les directions cross-shore et longshore Hsu *et al.* (1986) $e_1(x,t)$ $e_1(y,t)$ ², ont été corrélés à la série temporelle (Figure 3.) de densité de probabilité de hauteur de houle via l'équation (1).

Le coefficient de corrélation (les valeurs propres μ ² représentent le carré des corrélations entre les variables canoniques) entre les premières variables canoniques « cross-shore » est d'environ 0,59 et décroît rapidement pour les variables canoniques d'ordres supérieurs (0,27 pour les secondes et 0,05 pour les troisièmes). Le coefficient de corrélation entre les premières variables canoniques « longshore-shore » est d'environ 0,58 et décroît plus lentement pour les variables canoniques d'ordres supérieurs (0,44 pour les secondes et 0,09 pour les troisièmes).

Les conditions de houle Y_p non prises en compte dans la régression sont utilisées pour prédire les 2 topographies mesurées correspondantes. Les figures 4. et 5., qui représentent les comparaisons entre les topographies prédites par le modèle morphodynamique 3-D empirique (Figures 4b. et 5b.) et les topographies mesurées les 10/09/02 et 05/12/02 (Figures 4a. et 5a.), illustrent les capacités prédictives du modèle.

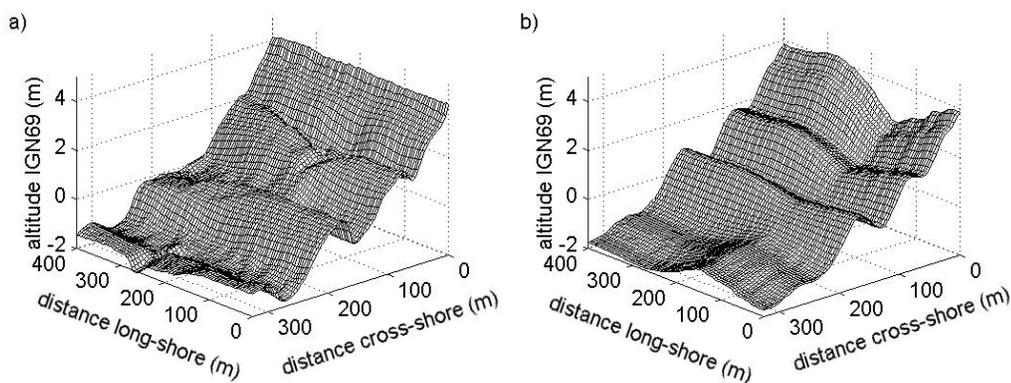


Figure 4. Illustration des capacités prédictives du modèle morphodynamique 3-D. a) surface mesurée le 10/09/02 b) surface prédite

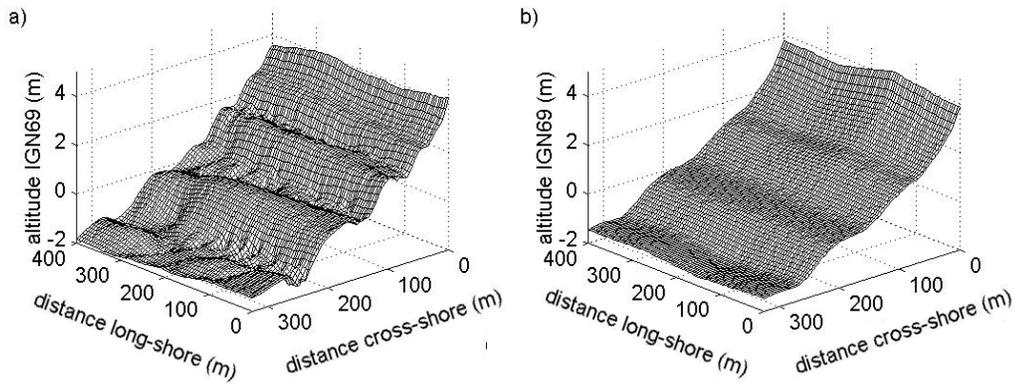


Figure 5. Illustration des capacités prédictives du modèle morphodynamique 3-D. a) surface mesurée le 05/12/02 b) surface prédite

D'un point de vue qualitatif le modèle prédit bien le nombre de systèmes barres/bâches et la présence de chenaux de drainage. En comparant les prédictions du modèle et les topographies mesurées (Figures 4a. et 5a.), il apparaît que le modèle a tendance à lisser les surfaces. Ce résultat était prévisible à cause du caractère moyennant de l'analyse factorielle 2-D utilisée pour prendre en compte les évolutions tridimensionnelles. De plus, l'amplitude des morphologies n'est pas respectée. En effet, l'amplitude des barres et bâches est surestimée le 10/09/02 (Figure 4b.) alors qu'elle est sous-estimée le 05/12/02 (Figure 5b.). De même, la « profondeur » des chenaux de drainage observés le 10/09/2002 (Figure 4a.) est largement surestimée par le modèle (Figure 4b.).

4.Conclusions

Le couplage entre le modèle d'analyse factorielle 2D de Hsu *et al.* (1986)² et l'ACC a permis le développement d'un modèle morphodynamique empirique 3D. L'application de ce modèle sur les données d'Omaha Beach a permis de valider l'approche proposée. En effet, malgré la faible représentativité du forçage considéré par rapport à la complexité des processus responsables des évolutions tridimensionnelles des barres et bâches, et malgré le caractère moyennant de l'analyse factorielle 2-D utilisée pour prendre en compte les évolutions tridimensionnelles, le modèle proposé donne des résultats satisfaisants d'un point de vue qualitatif.

5.Perspectives

Les perspectives de développement de ce type d'approche sont nombreuses. Tout d'abord, il importe d'étudier les processus responsables des évolutions longshore afin de prendre en compte un forçage plus significatif que celui utilisé dans notre approche.

Notre modèle, qui consiste à corréliser les évolutions morphologiques et les conditions d'agitation au large, correspond à un modèle morphodynamique d'ordre 0, c'est à dire un modèle morphodynamique sans forçage intrinsèque à la morphologie considérée (De Vriend, 1991)¹³. Larson *et al.* (2000)⁶ ont proposé l'utilisation d'un modèle de propagation et transformation de houle à la côte pour prendre en compte l'influence locale de la morphologie sur le forçage. Cependant, cette approche n'est possible que si l'échantillonnage des relevés topographiques est de l'ordre de la semaine ou moins.

Cette dernière remarque introduit les possibilités offertes par l'utilisation de systèmes vidéos (Holland *et al.*, 1997)¹⁴ pour mesurer les évolutions topographiques et bathymétriques. En effet, ces techniques permettent d'acquérir des données morphologiques à fréquence temporelle élevée. Le couplage entre acquisition vidéo haute fréquence et le modèle proposé permettrait de prendre en compte un large spectre d'échelles spatio-temporelles d'évolution morphodynamique.

6. Remerciements :

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'Action de Recherche Thématique ART7 « Hydrodynamique sédimentaire des côtes sableuses » du Programme National d'Environnement Côtier (PNEC). Les auteurs remercient particulièrement Alexis Stéphanian et Olivier Monfort respectivement pour l'acquisition et la mise en forme des données utilisées dans cette étude.

7. Références:

- 1 Rihouey, D., et al. (2003). Développement d'outils géostatistiques sur la base des données expérimentales des sites ateliers du PNEC. 9^e Congrès Français de Sédimentologie, Bordeaux, 425-426.
- 2 Hsu, T. W., S. R. Liaw, et al. (1986). Two dimensional empirical eigenfunction model for the analysis and prediction of beach profile changes. *Coastal Engineering*, 1180-1195.
- 3 Aubrey, D. G. (1980). The statistical Prediction of Beach Changes in southern California. *Journal of Geophysical Research*, **85** (C 6), 3264-3276.
- 4 Uda, T. and H. Hashimoto (1982). Description of beach changes using an empirical predictive model of beach profile changes. *18th International Conference of Coastal Engineering*, Cape town.
- 5 Hsu, T. W., S. H. Ou, et al. (1994). On the prediction of beach changes by a new 2-D empirical eigenfunction model. *Coastal Engineering*, **23**, 255-270.
- 6 Larson, M., et al. (2000). Relationship between beach profiles and waves at Duck, North Carolina, determined by canonical correlation analysis. *Marine geology*, **163**, 275-288.
- 7 Rozynski, G. (2003). Data-driven modeling of multiple longshore bars and their interactions. *Coastal Engineering*, **48**, 151-170.
- 8 Larson, M. et al. (2003). Analysis and Modeling of field data on Coastal Morphological Evolution over Yearly and Decadal Time Scale. Part 1 : Background and linear techniques. *Marine geology*, **163**, 275-288.
- 9 Graham, N. E., J. Michaelsen, et al. (1987a). An investigation of the El Niño-southern oscillation cycle with statistical models: 1. Predictor field characteristics. *Journal of Geophysical Research*, **92** (C13), 14251-14270.
- 10 Winant, C. D., D. L. Inman, et al. (1975). Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*, **80** (15), 1979-7986.
- 11 King, C. A. M. and W. W. Williams (1949). The formation and movement of sand bars by wave action. *Geographical journal*, **113**: 70-85.
- 12 Surfer User's guide. 3^e édition, Golden Software Inc., 1999, 619 p.
- 13 De Vriend, H. J. (1991). Mathematical modelling and large-scale coastal behavior: Part 1. Physical Processes. *Journal of Hydraulic Research*, **26** (6), 727-740.
- 14 Holland, K. , T. , Holman, R., A., Lippmann, T., C., Stanley, J., Plant, N., (1997). Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEE Journal of Oceanic Engineering*, VOL. 22, NO. 1, pp. 81-92.

