

# Modélisation conceptuel de l'évolution morphodynamique des barres sédimentaires d'une plage microtidale (Sete, France)

# Raphaël Certain et Jean-Paul Barusseau

Université de Perpignan, Laboratoire d'Etude des Géo-Environnements Marins, 52 av P. Alduy, 66 860 Perpignan (certain@univ-perp.fr)

# <u>Résumé.</u>

L'étude de la morphodynamique du site microtidal de Sète montrent que l'évolution morphologique des barres sédimentaires peut être synthétiser selon 2 modèles conceptuels en réaction à la variabilité météo-marine. Le modèle d' «oscillation autour d'une position d'équilibre » (O.P.E) traduit le régime ordinaire du comportement des barres, avec des reculs et des avancées successifs. Ponctuellement cet équilibre dynamique peut être fortement déstabilisé par un ou plusieurs coups de mer d'une vigueur exceptionnelle. On entre alors dans un épisode "*net offshore migration*" (N.O.M) de rapide migration vers le large, puis de dégénérescence et de remplacement de la barre externe. En quelques années après l'événement déclencheur, la disposition standard est restaurée.

## Abstract.

The morphological evolution of the sedimentary bars of Sète can be synthesize according to two conceptual models, in reaction to hydrodynamic variability. (1) the model of "oscillation around an equilibrium position" (O.P.E) defines the usual mode of the behavior of the bars, with an alternation of shoreward and seaward movements. (2) The model of " Net Offshore Migration" (N.O.M) points to the tendency to a retreat of the bars under the effect of paroxystic events being a prelude to their degeneration. In a few years after the event release, the standard pattern is restored.

<u>Mots-clés</u>: Morphodynamique, Plages sableuses, Barres sédimentaires, Site de Sète, Golfe du Lion, Modélisation conceptuelle.

Keywords: Morphodynamics, Sandy beaches, Sedimentary bars, Sète site, Gulf of Lions, Conceptual modelisation.

# **1.Introduction**

Des avancées récentes améliorent la compréhension de la morphodynamique des barres sédimentaires et conduisent à l'élaboration de modèles conceptuels d'évolution grâce à l'analyse de longues séries temporelles [Lippman *et al.*, 1993] pouvant remonter jusqu'en 1963 en Hollande [Ruessink et Kroon, 1994; Wijnberg, 1995]. D'une manière générale, les barres d'avant-côte sont soumises aux conditions d'agitation du milieu et tendent à se déplacer vers la côte lors des conditions de faible agitation et vers le large lors des épisodes plus violents [Ostrowski *et al.*, 1990]. Dans les systèmes à plusieurs barres, ce type canonique d'évolution admet toutefois des distorsions [Sunamura, 1988], la barre externe pouvant par exemple être immobile pendant de longues périodes de faible agitation de plusieurs mois à plusieurs années

alors que la barre interne, elle, se déplace [Lippmann *et al.*, 1993 ; Southgate et Moller, 1998 ; Pruszack *et al.*, 1997]. Faisant suite à ces périodes de stabilité, la barre externe peut se déplacer rapidement vers le large à la suite d'un événement de tempête catastrophique. Elle peut alors dégénérer et disparaître [Lippman *et al.*, 1993]. Dès lors, après cette disparition, la barre interne, nourrie par le matériel fourni par la barre externe [Wijnberg, 1995], se retrouve exposée et se déplace rapidement vers le large en venant remplacer l'ancienne barre externe. Le cycle se répète. Ce comportement est également décrit dans les environnements mésotidaux et répond à un modèle de « *Net Offshore Migration* » (NOM) [Wijnberg, 1995 ; Ruessink et Kroon, 1994]. En résumé, le système de barres dans un environnement microtidal dominé par la houle est principalement influencé par les événements catastrophiques de tempêtes.

La question se pose de savoir si ces modèles sont applicables à des sites où les séries temporelles disponibles sont moins longues ? Pour y répondre, l'étude du site de Sète (France) sur le lido de la lagune de Thau, initiée en 1988, est proposée dans cet article où nous décrirons les principales observations réalisées pour ce site microtidal, en environnement dominé par la houle.

## 2.Site d'étude et méthodologie

## 2.1.Présentation générale

Le lido de la lagune de Thau, à Sète, dans le golfe du Lion (Fig. 1) est caractérisé par la présence de barres rectilignes. Le site de Sète au nord du lido, sur la partie la plus érodée, comporte une plage étroite d'une trentaine à une cinquantaine de mètres de largeur, où le cordon dunaire a disparu sous l'effet de la construction de la route nationale située en arrière. Si l'on considère l'évolution des profils de plage entre 1989 et 2000 [Certain, 2002], la tendance à l'érosion est confirmée, le bas de plage s'étant abaissé de 1,5 m et le haut de plage de 0,5 m. La

perte de volume, calculée sur l'ensemble du site entre ces deux dates, représente 3400± 1600 m

pour la partie émergée et environ 20000 m pour le domaine sous-marin. L'avant-côte possède une pente relativement douce de 1% comportant deux barres sédimentaires à une distance de 50 à 150 m de la côte pour la barre interne et de 170 à 270 m pour la barre externe. Ces barres sont de type « longshore bar-trough » et la plage est de type intermédiaire dans la classification mise au point par Short [1979, 1999] et Wright et Short [1984]. Le sédiment est entièrement sableux entre 130 et 320 microns avec un gradient d'affinement vers le large dont la régularité est cependant contrariée par l'occurrence des fosses et des barres.

### 2.2.Méthodologie de l'acquisition morphologique et hydrodynamique

Le site de Sète a bénéficié depuis 1989 de levés d'une série de onze profils espacés de 50 m permettant de réaliser 30 modèles numériques de terrain (MNT). Le site représente 500 m de linéaire côtier avec une extension de 700 m vers le large (Fig. 1).



*figure 1*: Carte de localisation de la zone étudiée : le lido de la lagune de Thau dans son ensemble et le site de Sète au NE du lido.

Le matériel de bathymétrie embarqué comportait un sondeur petits fonds *Tritech* ST500 et un DGPS reliés à un ordinateur portable qui commande l'acquisition et stocke les données. La précision verticale est décimétrique. La précision dans le plan horizontal est de l'ordre du mètre (DGPS).

Les données de houle au large ont été recueillies par la bouée Datawell du SMNLR. La bouée est mouillée au large de Marseillan (SE du lido), à 5 km au sud-est du port, par 32 m de fond. Ces enregistrements sont effectués en continu depuis plus de 10 ans (janvier 1989) au rythme de 8 mesures par jour, acquises à 2 Hz sur une durée de 20 minutes et espacées de 3 heures. Cette bouée Datawell ne donne malheureusement pas la direction des houles qui est cependant accessible grâce aux relevés provenant des enregistrements sémaphoriques (données MétéoFrance).

#### 2.3. Conditions hydrodynamiques générales rencontrées sur le secteur depuis 1989

Les houles ont en majorité des hauteurs moyennes inférieures à 2 m, un tiers des valeurs étant inférieures ou égales à 1 m, principalement en juillet et août, période estivale calme. Les épisodes où la houle est supérieure à 4 m sont rares. Ils ont lieu entre septembre et mars et, en 12 années, on n'en compte qu'une quinzaine (Fig. 2). On remarque une période hivernale 95-96 où une série de coups de mer rapprochés dépasse 4 m et un pic exceptionnel en décembre 1997 où la hauteur significative atteint presque 7 m. On note aussi une extrême variabilité interannuelle avec, par exemple, des années plus calmes (1990, 1993) et des années où les tempêtes ont été plus fréquentes (1994, 1996, 1999).

Session 2: Dynamique sédimentaire et transports de particules



figure. 2 : Hauteur significative maximale de la houle relevée pour chaque mois de 1989 à 2000.

#### 3. Evolution morphologique du site de Sète

Sept phases d'évolution morphologique sont chronologiquement distinguées à partir des M.N.T. entre 1989 et 2000 suivant les caractères de l'avant-côte en réponse au régime d'agitation. Elles sont représentées chacune par une date caractéristique sur la figure 3 et décrites dans le Tableau 1.



figure 3 : Evolution bathymétrique du profil 10 de 1989 à 2000.

L'évolution morphologique des barres peut être reliée au régime météomarin de la phase considérée. On constate que les changements entre les différentes phases se produisent lors des coups de mer excédant 4 m (Tableau 1). La position et le relief des barres changent de façon sensible, leur forme et leur orientation par rapport à la ligne de rivage caractérisent également certains aspects des réajustements. Sur ces barres, le plus souvent rectilignes, s'amorce parfois une esquisse de festonnement. La barre externe en termes de hauteur et d'éloignement du bord montre un caractère oscillant autour d'une position d'équilibre située à environ 250 m du rivage (Fig. 3). A cet égard, deux évènements singuliers, déjà mentionnés, semblent marquer l'ensemble du scénario évolutif : la longue période de calme de 1993 et le coup de mer exceptionnel de décembre 1997. En 1993, un fort comblement accompagne le rapprochement de la barre externe vers le rivage et cet engraissement en période de beau temps souligne l'effet d'un mode de fonctionnement habituel de l'avant-côte. En décembre 1997, au contraire, une rupture entraîne un état d'équilibre nouveau qui, en quelque sorte, désensibilise la zone littorale par rapport aux coups de mer postérieurs, forts mais moins actifs.

Ainsi, les coups de mer de décembre 1998 et novembre 1999 n'aggravent pas brutalement la situation héritée, bien que la barre externe se mette peu à peu à disparaître.

*tableau 1* : Typologie de la morphologie de l'avant-côte par phases caractéristiques de mai 1989 à novembre 2000. Les triangles noirs signalent l'occurrence des tempêtes à Hs> 4 m.

Dates regroupées par périodes caractéristiques	Typologie de l'avant-côte durant la période		
	Barre interne	Fosse externe	Barre externe
18/05/1989 21/06/1989 18/07/1989 05/09/1989 03/10/1989	Festonnée (maximum d'extension des ventres des festons à 125 m au large)	La fosse est bien marquée, avec des profondeurs excédant 4 m	Rectiligne et oblique (crête à 190 m au NE de la zone contre 255 m au SW)
22/02/1990 19/05/1990	Festonnée (max des festons à 160 m)	Comblement partiel, la profondeur n'atteint plus que 3 m	Destructurée, mais toujours oblique (210 contre 240 m), barre peu marquée
17/07/1991 23/04/1992 22/06/1992 19/09/1992 02/10/1992 16/01/1993	Rectiligne et proche de la côte	Creusement avec des valeurs supérieures à 3,25 m	Rectiligne et parallèle à la plage (de 220 à 210 m du NE au SW)
11/12/1993 ▶▶	Légèrement festonnée et proche de la côte	Fort comblement à 2,25 m	Rectiligne et proche de la côte (170 m)
20/02/1994 13/10/1994 02/11/1994 08/11/1994 15/11/1994	Destructurée et très proche de la côte en début de période, festonnée et plus éloignée de la côte ensuite	Creusement, avec surcreusement de la partie SW (supérieure à 3,75 m contre 3,25 m au NE)	Rectiligne et oblique (230 contre 255 m) en début de période, rectiligne et parallèle à la côte (220 m) ensuite
06/10/1998 13/01/1999 23/01/1999 06/07/1999	Sinueuse, alternance de positions, pouvant être reculée (140 m max.)	Surcreusement très marqué dans la partie NE (supérieur à 4,25 m contre 3,5 au SW)	Sinueuse et très reculée. La zone est divisée en deux moitiés (280 au NE contre 250 m au SW)
28/07/2000 01/11/2000 05/11/2000 10/11/2000 16/11/2000 04/12/2000	Sinueuse et proche de la côte en début de période, elle devient rectiligne et éloignée de la côte (120 m) ensuite	Fosse très peu marquée au SW, identique à la période précédente au NE	Plus rectiligne et très peu marquée dans la partie SW

### 4. Evolution morphodynamique

Les observations sur le site de Sète aboutissent à la définition de deux modèles évolutifs successifs permettant de décrire la morphodynamique des barres pour l'ensemble de la période de mesure.

#### 4.1.Le modèle OPE (Oscillation autour d'une Position d'Equilibre)

Cette première modalité traduit un mode d'oscillation, bien documenté pour le site de Sète, montrant un recul des barres lors des coups de mer et une avancée vers la côte lors des conditions de faible agitation. Cette modalité s'exprime à plusieurs rythmes. D'une part, la réponse alternante aux grandes phases du forçage hydrodynamique à l'échelle décennale et, d'autre part, la succession d'avancées et de reculs des barres à l'échelle saisonnière, particulièrement bien illustrée pour la barre interne.

A l'échelle décennale, le système varie autour d'une position d'équilibre lors des grandes phases évolutives le système présente une position d'équilibre autour de laquelle les barres occupent des configurations diverses (Tableau 1) caractérisées par une géométrie stable pendant une durée notable (Fig. 3). Les changements d'états résultent de coups de mer de hauteur significative supérieure à 4 mètres. Ainsi, la barre externe oscille faiblement autour d'une position moyenne d'équilibre à environ 250 m du rivage, passant d'une configuration rectiligne à oblique ou plus sinueuse. D'importants volumes de sédiments de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de m sont mis en jeu au cours des changements de configuration [Certain, 2002]. On notera que durant des conditions de faible agitation pendant une longue durée (par exemple, durant toute l'année 1993) la barre externe remonte lentement vers la plage en comblant la fosse externe. Cette particularité n'entraîne cependant pas de changement dans le fonctionnement global de l'avant-côte : la barre externe, remontée vers des étages plus exposés, revient dès la fin de l'épisode de calme exceptionnel, à sa position moyenne d'équilibre lorsque survient le premier

On observe aussi une oscillation saisonnière, bien exprimée pour la barre interne (Fig. 5), la barre externe étant peu sujette à variations à cette échelle de temps.

coup de mer dont la hauteur significative est supérieure à quatre mètres.



*figure. 5* : Evolution de la barre interne depuis une situation estivale, où la barre est venue s'accoler au rivage, à une situation hivernale par creusement de la fosse interne et gonflement de la barre interne sous l'influence des tempêtes automnales.

Globalement, durant les saisons de faible énergie, en été, la plage s'engraisse et la barre interne s'approche du rivage car les faibles houles engendrent des courants de houle qui induisent un écoulement vers le bord et remontent du matériel vers la plage alors que leurs courants de retour faibles ne permettent pas d'exporter du matériel vers le large. La fosse interne se comble alors, le trait de côte avance vers la mer et la plage s'engraisse. Lorsque les conditions commencent à redevenir plus dynamiques à l'automne, les courants de retour redeviennent opérationnels et la fosse interne se creuse au fur et à mesure des coups de mer (Fig. 5).

L'exportation de matériel vers le large participe à l'édification d'une barre interne bien développée se décalant vers le large sur toute sa longueur. Ainsi s'établit l'équilibre hivernal. Le retour aux conditions estivales crée le schéma inverse, initié par accolements ponctuels de la barre interne.

### 4.2.Le modèle NOM (Net Offshore Migration)

Le modèle O.P.E décrit précédemment peut être fortement perturbé lors d'évènements météomarins exceptionnellement violents ; comme à Sète, lors d'une série d'événements singuliers constitués par la période hivernale 1995-96 particulièrement agitée mais surtout la tempête de décembre 1997 dont la hauteur significative excède 7 m (Fig. 2). Le mode d'évolution répond alors au modèle connu de « migration /atténuation des barres externes vers le large » applicable à l'ensemble du lido (net offshore migration, N.O.M). A partir de la position d'équilibre et suite à ces tempêtes exceptionnelles, la barre externe recule fortement (recul compris entre 70 et 90 mètres sur l'ensemble des profils à Sète) et s'abaisse ici de 0,3 et 1 m. Au lieu de revenir ensuite vers la côte (modèle O.P.E), la barre externe, soumise alors à l'action plus faible des houles, perd du matériel au profit de la barre interne sous l'effet de l'asymétrie des vagues et dégénère en s'abaissant progressivement [Wijnberg, 1995]. Sa disparition s'observe (Fig. 3) en quelques années (3 à 5, par exemple, lors du dernier événement constaté, entre 1995 et 2000). Elle est remplacée, à la suite de sa disparition progressive vers le large, par la barre interne qui, nourrie par le matériel récupéré [Wijnberg, 1995], migre vers le large après s'être retrouvée plus exposée aux effets des coups de mer. Cette dernière, en reculant, vient progressivement prendre position à la place de l'ancienne barre externe alors qu'une nouvelle barre interne proche de la côte est créée. Ce remplacement complet n'était cependant pas encore observé à Sète en 2000.

En quelques années après l'événement déclencheur, la disposition la plus habituelle doit être restaurée et un second épisode s'ouvre alors pendant lequel les barres moins mobiles oscillent autour de leur position d'équilibre, selon le modèle O.P.E. décrit.

### 5.Discussion

L'association de deux modes d'évolution successifs, mise en évidence à Sète, semble justifier la distinction de deux modèles de fonctionnement originaux puisqu'ils ne sont pas observés partout ou qu'ils n'ont pas été identifiés aussi clairement. En effet, dans un environnement plus soumis à une marée mésotidale, l'étude des sites hollandais [Wijnberg, 1995 ; Ruessink et Kroon, 1994] et de Wanganui en Nouvelle-Zélande [Shand et Bailey, 1999; Shand et al., 1999, 2001] semble montrer l'absence du modèle O.P.E et un enchaînement régulier des cycles de N.O.M à l'échelle décennale, sur une durée plus longue que celle enregistrée à Sète pour ce modèle. La migration d'une barre prend une dizaine d'années puis sa dégénérescence quelques années, sans qu'aucun épisode hydrodynamique déclencheur puisse être mis en évidence et sans qu'une interruption de ce glissement progressif ne surgisse pour esquisser un mode d'oscillation autour d'une position d'équilibre. Par contre, sur les côtes américaines de l'Atlantique Nord, à Duck, les deux modèles s'expriment mais il ne paraît pas que les auteurs aient pu les distinguer de façon nette. En effet, le déclenchement d'un fonctionnement selon le modèle N.O.M correspond bien à un épisode énergétique majeur [Larson et Kraus, 1992, 1994 ; Birkemeier, 1984 ; Mason et al., 1984], mais la modalité d'oscillation saisonnière de la barre interne s'exprime avec une mobilité beaucoup plus importante [Lippman et al., 1993; Southgate et Moller, 1998].

Une seconde différence réside dans la durée relative des phases respectives qui se succèdent

dans le temps. On a vu que le modèle N.O.M. est actif à Sète pendant une durée de quelques années, découpée en une période très courte de déséquilibre (une tempête ou une série rapprochée de tempêtes) et une période plus longue de retour à l'équilibre après effacement de la barre expulsée vers le large. Le fonctionnement de type O.P.E., quant à lui, semble correspondre à une durée plus importante ; de telle sorte que l'ensemble formerait à Sète, un cycle de 20 à 25 ans sur la base de l'observation de la vitesse de retour de la barre interne depuis la position interne post-N.O.M jusqu'à la position d'équilibre externe et, en tenant compte, du fait que, au bout de 14 ans de suivi, le terme du processus n'est pas encore acquis. Si on compare les vitesses respectives de chacun des modèles et leur enchaînement, avec ce qui paraît être leurs équivalents sur le site microtidal américain de Duck, on s'aperçoit que la période de stabilité de la barre externe est beaucoup plus réduite, 2 à 3 ans, et sa disparition et son remplacement par la barre interne (N.O.M) est très bref, environ 1 an [Larson et Kraus, 1992, 1994 ; Birkemeier, 1984 ; Mason *et al.*, 1984]. Cette mobilité plus importante et l'enchaînement plus rapide des deux modèles sont certainement à imputer aux conditions d'agitation plus dynamiques en Atlantique qu'en Méditerranée.

Il est clair qu'à l'avenir une analyse plus approfondie du forçage hydrodynamique devra être entreprise pour déterminer la part exacte entre les tempêtes majeures et l'asymétrie de la houle dans les processus de migration et de dégénérescence de la barre externe [Wijnberg, 1995 ; Ruessink et Kroon, 1994], ainsi que le rôle éventuel de l'incidence de la houle et celui de la morphologie héritée. L'absence d'événement déclencheur du modèle N.O.M. sur les sites hollandais s'explique peut-être par le fait que, comme l'ont souligné Ruessink et Kroon [1994], les données utilisées étaient peu adaptées à l'étude du forçage hydrodynamique.

### **6.Remerciements:**

Nous remercions le programme PNEC, ainsi que la communauté de chercheurs de l'ART 7 pour leur soutien indéfectible. Nous tenons aussi à remercier les plongeurs, et en particulier Michel Salvat, de l'ARESMAR pour l'aide humaine et logistique apportée, sans laquelle la mise en œuvre des opérations de terrain n'aurait pas été possible. Le SMNLR et Météo-France pour avoir mis ses données à disposition.

# 7.Références

**1.**Birkemeier, W.A., 1984. Time scales of nearshore profiles changes, p. 1507-1521. 19 ICCE, Houston, USA.

th

**2.**Certain, R., 2002. *Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le golfe du Lion (Languedoc – Roussillon)*. Unpublished thesis, Univ. Perpignan, 209 p., ann.

**3.**Larson, M., and Kraus, N.C., 1992. Dynamics of longshore bars, p. 2219-2232. 23rd ICCE, Venice, Italy.

**4.**Larson, M., and Kraus, N.C., 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina, USA. Marine Geology, 117, p. 75-94.

**5.**Lippman, T.C., Holman, R.A., and Hataway, K.K., 1993. Episodic, nonstationnary behaviour of double bar system at Duck, N.C., U.S.A., 1986-1991. *Journal of Coastal Research*, 15(SI), 49-75.

**6.**Mason, C. *et al*, 1984. Duck82- a coastal storm processes experiment, p. 1913-1927, 19 ICCE, Houston, USA.

**7.**Ostrowski, R., Pruszak, Z., and Zeidler, R.B., 1990. Multi-scale nearshore and beach changes, 22nd ICCE, Delft, Netherlands, 2101-2116.

**8.**Pruszak, Z., Rozynski, G. and Zeidler, R.B., 1997. Statistical properties of multiplebars, Coastal Engineering, 31, 263-280.

**9.**Ruessink, B.G., and Kroon, A.,1994. The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Therschelling, The Netherlands 1965-1993. Marine Geology, vol. 121, p. 187-197.

**10.**Shand, R.D. and Bailey, D.G., 1999. A review of Net Offshore Migration with Photographic illustrations from Wanganui, New Zealand. *Journal of Coastal Research*, 15 (2), 365-378.

**11.**Shand, R.D., Bailey, D.G. and Sheperd, M.J., 1999. An inter-site comparison of net offshore bar migration characteristics and environmental conditions. *Journal of coastal Research*, 15 (2), 365-378.

**12.**Shand, R.D., Bailey, D.G. and Sheperd, M.J., 2001. Longshore realignement of shore parallel sand-bars at Wanganui, New Zealand. *Marine Geology*, 179, 147-161.

**13.**Short, A.D., 1979. Three dimensional beach stage model. J. Geophys. Res., 80, 3838-3840. **14.**Short, A.D., 1999. Handbook of beach and shoreface morphodynamics. Wiley, 379 p.

**15.**Southgate, H.N., and Moller, I., 2000. Fractal properties of coastal profile evolution at Duck, NC, Journal of Geophysical Research, 115, 11489.

**16.**Sunamura, T., 1988. Beach morphologies and their change. In Horikawa, K. (ed.) Nearshore Dynamics and Coastal Processes, University of Tokyo Press, Tokyo, 136-166.

**17.**Winjberg, K.M, 1995. Morphologic behaviour of a barred coast over a period of decades, *thèse de doctorat, Univ. d'Ultrecht*, 215 p.

**17.**Wright, L.D, Short, A.D, 1984. Morphodynamic variability of surf zone and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.