

## **Modélisation de la morphodynamique des barres d'avant-plage par analyse de stabilité : application à la plage du Lido de Sète**

**Jérôme Thiébot<sup>1</sup>, Déborah Idier<sup>1</sup>, Albert Falqués<sup>2</sup>, Daniel Calvete<sup>2</sup>,  
Raphaël Certain<sup>3</sup> et Roland Garnier<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> BRGM, Service Aménagement et Risques Naturels (ARN/ESL), 3 av. C. Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2

<sup>2</sup> Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelone, Espagne

<sup>3</sup> Laboratoire d'Etudes des Géo-Environnements Marins (LEGEM), Perpignan

<sup>4</sup> School of Civil Engineering, University of Nottingham, UK

[j.thiebot@brgm.fr](mailto:j.thiebot@brgm.fr), [d.idier@brgm.fr](mailto:d.idier@brgm.fr), [falques@fa.upc.edu](mailto:falques@fa.upc.edu), [calvete@fa.upc.edu](mailto:calvete@fa.upc.edu),  
[certain@univ-perp.fr](mailto:certain@univ-perp.fr), [roland.garnier@nottingham.ac.uk](mailto:roland.garnier@nottingham.ac.uk)

### **Résumé :**

Le Nord-Est de la plage du Lido de Sète est caractérisé par la présence de deux barres sédimentaires d'avant-côte. L'étude de la morphodynamique de la plage, par observations *in situ*, a mis en évidence une relative stabilité de la barre externe et une variabilité plus importante de la barre interne. Dans la configuration la plus fréquente, les deux barres sont rectilignes et parallèles à la côte. Lors de tempêtes, la barre interne peut se segmenter et se réorienter pour faire face aux vagues incidentes. L'objectif de la présente étude est d'identifier les mécanismes à l'origine de l'évolution de la barre interne. Une analyse de stabilité linéaire a été effectuée avec un modèle numérique de stabilité nommé MORFO60. Les simulations montrent que des instabilités morphodynamiques peuvent se développer le long de la barre interne à la suite de tempêtes qui génèrent des houles de Sud ou d'Est. Ces évolutions morphodynamiques calculées par le modèle sont conformes aux évolutions observées sur le site.

### **Abstract:**

The beach of Sète contains two nearshore bars. Field measurements have shown that the outer bar is relatively stable. The behaviour of the inner bar is more complex. In the classic configuration, both bars are straight and parallel to the shoreline. After stormy conditions, the inner bar can be segmented and reoriented so that each segment becomes parallel to the crests of the incident waves. The aim of this paper is to investigate the mechanisms responsible for the evolution of the

inner bar. A linear stability analysis has been performed with a model called MORFO60. Simulations have shown that morphodynamical instabilities can develop along the inner bar when stormy waves come from the South or the East. Calculated morphodynamical evolutions are in good agreement with *in situ* observations.

**Mots-clés :**

Lido de Sète – Morphodynamique – Analyse de stabilité – Barres d’avant-plage  
Vagues – Modélisation – Sédiment non-cohésif.

**1 Introduction**

Les études du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) mettent en évidence la forte vulnérabilité des plages sableuses face aux changements climatiques (NICHOLLS *et al.*, 2007) et attirent l'attention sur les changements que pourraient connaître les plages à barres sableuses à l'avenir (ces barres sableuses d'avant-côte conditionnent fortement la dissipation de l'énergie des vagues qui arrivent à la côte). Aussi, le présent article vise à mieux appréhender l'évolution de ce type de système, ainsi que la relation entre forçages hydrodynamiques (vagues) et comportement de la plage. Ce travail s'inscrit dans un projet (VULSACO), dont l'objectif est d'identifier des indicateurs de vulnérabilité physique de plages sableuses à court terme et à moyen terme (2030).

De nombreux auteurs se sont intéressés au comportement des barres sableuses (WRIGHT & SHORT, 1984, SHORT, 1999, WIJNBERG & KROON, 2002 ou CASTELLE *et al.* 2007 par exemple). Deux types de barres peuvent être observés le long des plages : les barres rectilignes d'une part et les barres tridimensionnelles d'autre part. Les barres tridimensionnelles se caractérisent par la présence le long de celles-ci de figures sédimentaires plus ou moins périodiques. Deux catégories de barres tridimensionnelles peuvent être distinguées : les systèmes avec chenaux de vidange qui se développent plutôt en haut de plage et les systèmes avec barres en croissants qui sont présents dans la zone subtidale et qui sont caractérisés par une forte rythmicité (SHORT, 1999).

Les premières hypothèses émises pour expliquer la présence de figures sédimentaires périodiques le long des barres considéraient que l'apparition de celles-ci était liée à la présence d'ondes de coin stationnaires (BOWEN & INMAN, 1971). La théorie d'auto-organisation est aujourd'hui souvent évoquée pour expliquer la présence de figures sédimentaires tridimensionnelles le long des barres. Selon cette théorie, il existe des rétroactions entre l'hydrodynamique et la morphodynamique (*i.e.* une évolution du fond entraîne une modification de l'hydrodynamique qui induit à son tour une modification du fond et ainsi de suite)

de telle sorte que des irrégularités du fond peuvent croître et générer les figures sédimentaires qui sont observées le long des barres.

Les analyses de stabilité constituent un moyen efficace d'étudier les évolutions morphodynamiques induites par les mécanismes liés à l'auto-organisation des plages. Elles consistent à étudier le comportement de perturbations introduites dans le « système plage » pour en déduire les figures sédimentaires (les instabilités morphodynamiques) qui sont susceptibles de se développer le long des barres (voir Figure 1).

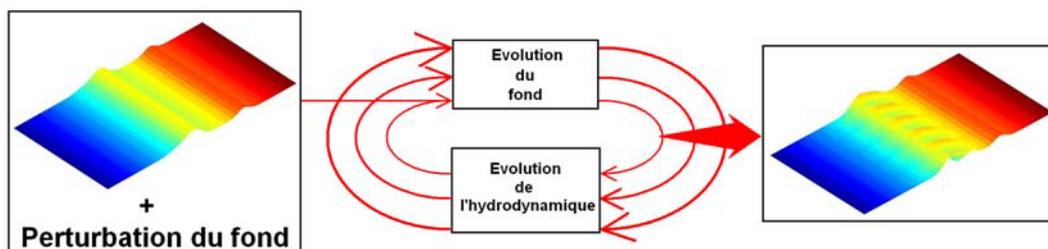


Figure 1 – Mécanisme de développement des instabilités morphodynamiques

La plage du Lido de Sète a été retenue pour mener cette étude. Les campagnes de mesures bathymétriques réalisées sur le site mettent en évidence deux configurations possibles pour la plage. Soit la plage comporte deux barres rectilignes, soit elle comporte une barre externe rectiligne et une barre interne marquée par la présence de figures sédimentaires périodiques (CERTAIN, 2002).

La problématique abordée dans cette étude peut se résumer par les deux questions suivantes :

- La morphodynamique des barres de la plage de Sète est-elle gouvernée par le développement d'instabilités morphodynamiques ?
- Si oui, quelles sont les conditions qui favorisent ce phénomène ?

Pour répondre à ces questions, une analyse de stabilité linéaire est effectuée à l'aide du code de calcul MORFO60 (CALVETE *et al.*, 2005).

La première partie du présent article porte sur la description du site d'étude. La seconde partie concerne la présentation de MORFO60. Dans la troisième partie, les résultats du modèle sont comparés avec les observations réalisées *in situ*.

## 2 Description du site d'étude

Le site d'étude se trouve à proximité de Sète (voir figure 2). Il a bénéficié de plusieurs campagnes de mesures bathymétriques et hydrodynamiques (CERTAIN, 2002, CERTAIN *et al.*, 2005) qui se sont déroulées en 1994, en 1999 et en 2000. Pendant ces campagnes, des relevés bathymétriques ont été effectués régulièrement sur une zone mesurant 500 m en longshore et environ 700 m en

cross-shore. Parallèlement, des mesures de courant et de vagues ont été effectuées à l'aide de courantmètres électromagnétiques S4 équipés de capteurs de pression.

La configuration classique de la plage est représentée sur la figure 3a. Les deux barres d'avant-plage sont quasiment rectilignes et parallèles à la côte. Un profil de plage associé à ce type de configuration est représenté sur la figure 3b. Sur ce profil, on peut voir que le système interne (barre et fosse) mesure entre 50 et 150 m de large et que la crête de la barre interne est située à environ 2 m de profondeur. Le système externe mesure 250 à 300 m de large. Classiquement, la crête de la barre externe se situe à 4 m de profondeur.

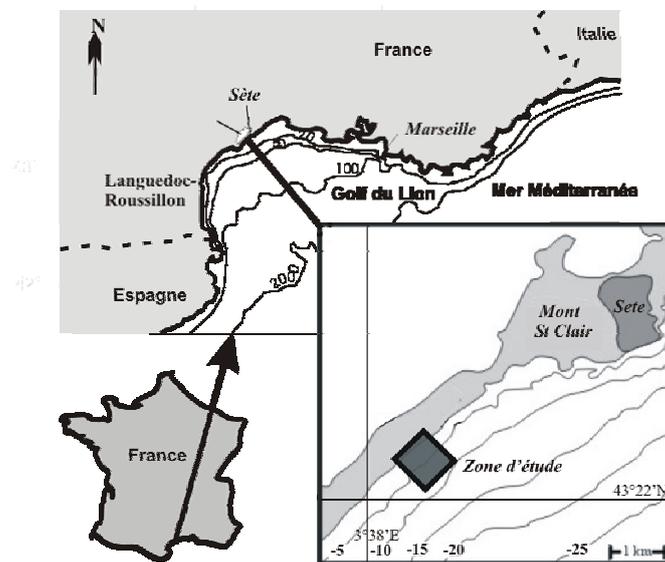


Figure 2 – Localisation du site d'étude (d'après CERTAIN et al., 2005).

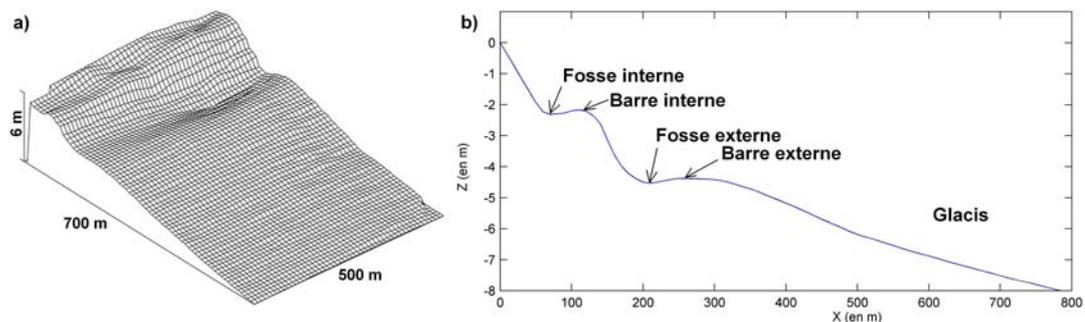


Figure 3 – a) Bathymétrie du Lido de Sète le 1<sup>er</sup> novembre 2000 ; b) Profil de plage du Lido de Sète (d'après CERTAIN, 2002).

L'interprétation des relevés bathymétriques a montré que la barre externe est plus stable que la barre interne. A la suite de tempêtes, la barre interne peut se segmenter. Chaque segment s'oriente alors pour faire face aux vagues incidentes.

Ce mécanisme a été observé à la suite de houles de Sud comme ce fut le cas en 1999 et à la suite de houle d'Est comme ce fut le cas en 1994 (voir figure 4).

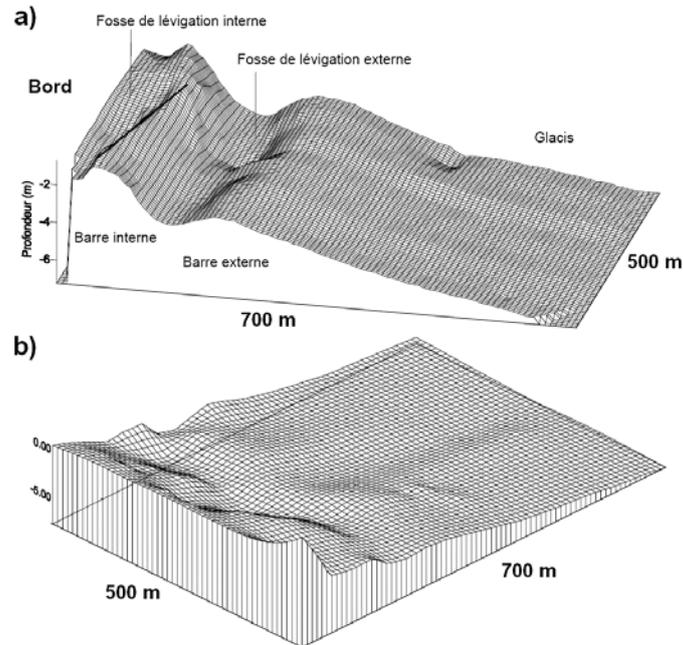


Figure 4 – Bathymétrie de la plage du Lido de Sète. a) le 23 janvier 1999 b) le 8 novembre 1994 (d'après CERTAIN, 2002).

Un mouvement cross-shore des barres a également été mis en évidence par CERTAIN (2002). Lors de certaines tempêtes, la barre externe migre vers le large et disparaît progressivement, la barre interne prend alors la place de la barre externe et une nouvelle barre se crée en se détachant du bord, elle prend alors la place de la barre interne. Ce mécanisme, déjà observé par RUESSINK & KROON (1994), n'est pas abordé dans le cadre de cette étude. En effet, nous nous concentrons ici sur l'évolution longshore des barres.

### 3 Présentation de MORFO60

Le modèle utilisé pour étudier l'apparition d'instabilités morphodynamiques le long des barres se nomme MORFO60. Une description détaillée de ce modèle a été réalisée par CALVETE *et al.* (2005). Les principales équations et hypothèses sont rappelées ci-dessous.

L'apparition des instabilités se produit sur des échelles de temps longues (quelques heures ou quelques jours) comparativement aux phénomènes tels que la turbulence ou la vitesse orbitale des vagues. Pour simplifier le problème, ces phénomènes sont « filtrés » en utilisant des moyennes temporelles par vague. Les

vagues sont supposées monochromatiques et sinusoïdales.

L'hydrodynamique du système est décrite à l'aide des équations de Saint-Venant en eaux peu profondes. La conservation de la masse d'eau et de la quantité de mouvement s'écrit avec les équations (1) et (2).

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (Dv_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho D} \frac{\partial}{\partial x_j} (S'_{ij} - S''_{ij}) - \frac{\tau_{bi}}{\rho D} \quad (2)$$

où  $v_i$  ( $i=1,2$ ) désignent les composantes du courant,  $D = z_s - z_b$  est la hauteur d'eau,  $z_s$  et  $z_b$  sont respectivement les niveaux de la surface libre et du fond,  $t$  est le temps,  $g$  désigne l'accélération de la gravité,  $\rho$  est la masse volumique de l'eau, la contrainte de radiation  $S'_{ij}$  est obtenue à partir de la relation de LONGUET-HIGGINS & STEWART (1964),  $S''_{ij}$  est le tenseur de Reynolds et  $\tau_{bi}$  désignent les deux composantes de la contrainte de frottement au fond.

La propagation des vagues est calculée à partir d'une équation de conservation de l'énergie (3) et d'une équation de phase (4).

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((v_j + c_{gj})E) + S'_{ij} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = -\varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \sigma + v_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$E$ , la densité d'énergie des vagues est donnée par :  $E = (1/8)\rho g H_{rms}^2$ ,  $c_g$  désigne la célérité de groupe,  $\varepsilon$ , le taux de dissipation est composé de deux termes ( $\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_f$ ) qui représentent respectivement la dissipation induite par le déferlement des vagues ( $\varepsilon_b$ ) et par le frottement sur le fond ( $\varepsilon_f$ ).  $\varepsilon_b$  est calculé avec la relation (5) qui a été proposée par THORNTON & GUZA (1983).

$$\varepsilon_b = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} B^3 f_p \rho g \frac{H_{rms}^5}{\gamma_b^2 D^3} \left( 1 - \frac{1}{\left(1 + (H_{rms}/\gamma_b D)^2\right)^{5/2}} \right) \quad (5)$$

où  $f_p = \sigma/2\pi$  est le pic de fréquence intrinsèque du champ de vagues,  $\sigma$  est la fréquence intrinsèque des vagues qui est donnée par la relation de dispersion de MEI (1989),  $B$  est un coefficient qui permet de caractériser le type de déferlement (plongeant ou glissant),  $\gamma_b$  est un paramètre qui intervient dans le critère de déferlement (THORNTON & GUZA, 1983)

L'évolution du fond est calculée en utilisant l'équation de conservation du sédiment (6) avec une formule de transport locale (7). La formulation de SOULSBY (1997) est utilisée pour expliciter le coefficient  $\alpha$  (voir l'équation 8).

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{q} = \alpha(u - \gamma u_b \vec{\nabla} h) \quad (7)$$

où  $u_b$  est la norme de la vitesse orbitale au fond,  $\gamma$  est un paramètre qui permet de prendre en compte l'effet de pente et  $h$  est l'amplitude de la perturbation du fond.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = A_s \left[ \left( |\vec{v}|^2 + \frac{0,018}{c_D} u_b^2 \right)^{1/2} - u_{crit} \right]^{2,4} \quad \text{si} \left( |\vec{v}|^2 + \frac{0,018}{c_D} u_b^2 \right)^{1/2} > u_{crit} \\ \alpha = 0 \quad \text{si} \left( |\vec{v}|^2 + \frac{0,018}{c_D} u_b^2 \right)^{1/2} \leq u_{crit} \\ A_s = \frac{0,005h(d_{50}/D)^{1,2}}{((\rho_s/1000 - 1)gd_{50})^{1,2}} \end{array} \right. \quad (8)$$

où  $c_D$  est le coefficient de frottement morphodynamique,  $u_{crit}$ , la vitesse critique d'érosion,  $d_{50}$ , la taille moyenne des grains et  $\rho_s$  est la masse volumique du sable.

L'approche utilisée par MORFO60 est classique pour une analyse de stabilité linéaire. L'état du système s'écrit à partir de son état de base (*i.e.* un état non perturbé) et d'une perturbation infinitésimale. Six variables dépendantes sont utilisées :  $z_s$ ,  $z_b$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $E$  et  $\Phi$ . La linéarisation des équations (1-3) et (5-6) effectuée, une méthode spectrale est mise en œuvre pour résoudre le système (IRANZO & FALQUES, 1992). Lors d'un calcul avec MORFO60, différentes perturbations sont introduites dans le système. Certaines perturbations ont tendance à se dissiper, d'autres ont tendance à se développer. Les instabilités qui ont le plus fort taux de croissance (*i.e.* un temps caractéristique court) sont considérées comme étant les plus susceptibles de se développer.

Bien que le code MORFO60 soit adapté pour identifier les conditions propices à la génération d'instabilités morphodynamiques, ce code de calcul ne permet pas d'estimer l'amplitude finale des figures sédimentaires. En effet lorsque l'amplitude de celles-ci devient trop importante, la réponse du système ne peut plus être considérée comme linéaire (GARNIER *et al.*, 2006, 2008).

#### 4 Résultats et discussion

Pour évaluer la qualité des résultats hydrodynamiques, nous avons utilisé les données de CERTAIN *et al.* (2005). La tempête du 12 novembre 2000 (entre 9h et minuit) a été choisie comme période de validation. Les valeurs moyennes et les barres d'erreurs associées aux vitesses longshore  $V$ , aux hauteurs de vagues ( $H_{rms}$ ) et à l'incidence des vagues  $\theta$  (*i.e.* l'angle formé par la normale à la plage et la normale aux crêtes des vagues) sont représentées sur les figures 5b, 5c et 5d.

Les simulations hydrodynamiques ont été réalisées à partir du profil représenté

sur la figure 3b. Dans une première approche, des valeurs par défaut ont été utilisées pour caractériser le frottement au fond et la dissipation de l'énergie des vagues par déferlement. Le coefficient de frottement sur le fond a été fixé à 0,01. Dans la formule de THORNTON & GUZA (1983),  $B$  et  $\gamma_b$  ont été fixés respectivement à 1 et à 0,4. Les conditions de vague au bord du domaine de calcul (à  $x = 1500$  m) ont été choisies pour s'approcher au mieux des valeurs de courant et des hauteurs de vagues mesurées dans les deux fosses (en  $x = 93, 95$  et  $215$  m).

La dissipation et la réfraction des vagues sont sous-estimées par le modèle comme le montre la figure 5. En effet, pour obtenir des valeurs de courant et des hauteurs de vagues satisfaisantes au niveau des fosses et des barres (à l'endroit où l'on s'attend à observer des instabilités), nous avons dû choisir, au bord du domaine de calcul (en  $x = 1500$  m), des vagues plus petites et d'incidence plus faible que celles qui ont été mesurées. Cela explique les écarts observés au niveau du glacier (à  $x = 506$  m).

Concernant les courants longshore, des écarts importants sont obtenus entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Ils peuvent s'expliquer en partie par le fait que nous avons effectué les simulations à partir d'un profil alors que la bathymétrie réelle comporte des irrégularités (le long de l'axe longshore) qui peuvent engendrer des circulations locales.

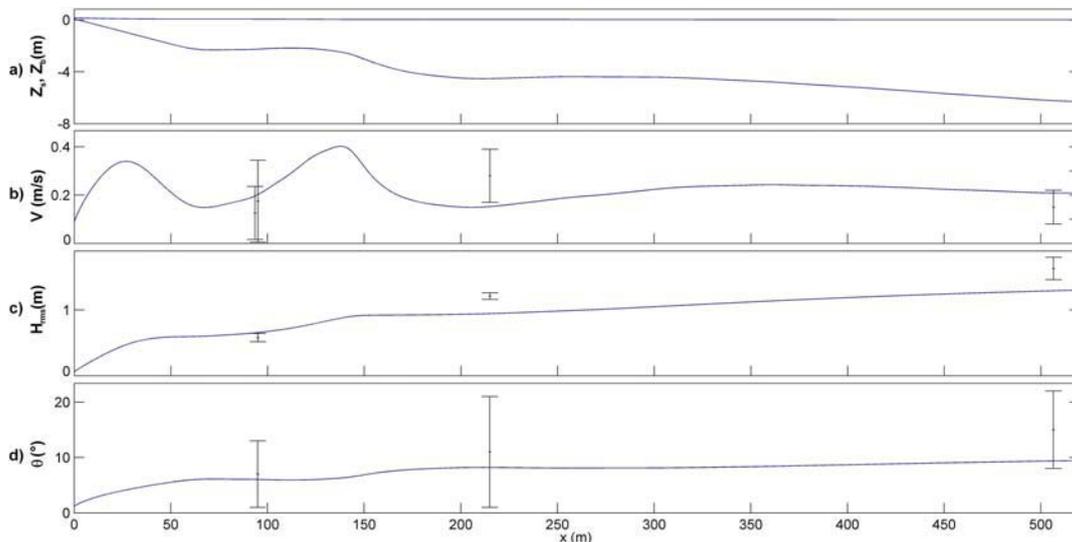


Figure 5 – Comparaison des résultats hydrodynamiques et des valeurs mesurées in situ pendant la tempête du 12 novembre 2000. a) Côte du fond et niveau moyen de la surface libre ; b) Norme de la vitesse longshore ; c)  $H_{rms}$  ; d) Incidence des vagues

Concernant le calcul morphodynamique, une analyse de stabilité a été réalisée en considérant des conditions de vagues comparables à celles qui ont précédé la

segmentation de la barre interne lors des campagnes de mesures de 1994 et de 1999 (CERTAIN, 2002). Ces conditions de vagues sont les suivantes : en  $x = 1500$  m,  $H_{rms} = 1,8$  m,  $T = 7$  s et  $\theta = 35^\circ$ . La figure 6 représente les instabilités calculées par MORFO60. Ces instabilités sont associées à un temps caractéristique de 19 h, ce qui signifie qu'elles peuvent se développer à l'échelle d'une tempête. Leur longueur d'onde de 246 m, leur position et leur géométrie sont comparables aux observations faites sur le site (voir la figure 4).

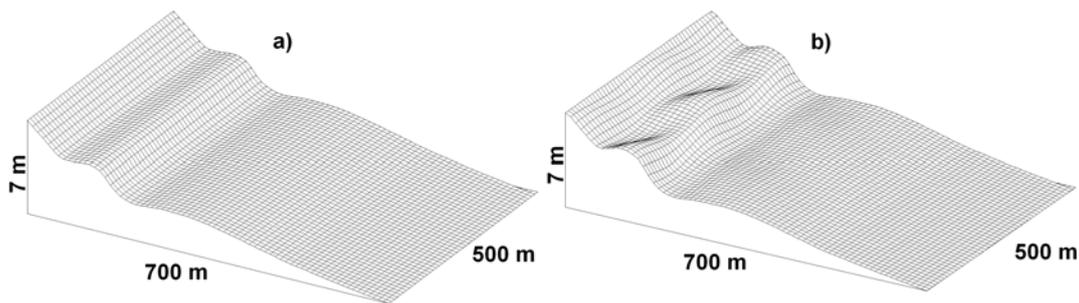


Figure 6 – Développement d'instabilités morphodynamiques sur la plage du Lido de Sète lors d'une tempête. En  $x = 1500$  m :  $H_{rms} = 1,8$  m ;  $T = 7$  s et  $\theta = 35^\circ$ . a) bathymétrie initiale ; b) bathymétrie avec perturbation.

## 5 Conclusions et perspectives

L'analyse de stabilité effectuée avec MORFO60 a permis de montrer que des vagues associées à des tempêtes de Sud ou d'Est peuvent engendrer le long de la barre interne, des instabilités morphodynamiques. Ces instabilités sont à l'origine d'une évolution de la barre interne comparable à celle qui a été observée sur le site. Il semble donc que les mécanismes liés à l'auto-organisation de la plage soient à l'origine de la segmentation de la barre interne.

## 6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Franck Levoy pour sa participation aux campagnes de mesures.

## 7 Références bibliographiques

- 1 BOWEN A.J. and INMAN D.L. (1971) Edge waves and crescentic bars. J. of Geophysic. Res., 76, 8662-8671.
- 2 CASTELLE B., BONNETON P., DUPUIS H. and SENECHAL N. (2007) Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian Coast: A review. Marine Geology, 245, 141-159.
- 3 CALVETE D., DODD N., FALQUES A and Van LEEUWEN S.M. (2005) Morphological Development of Rip Channel Systems: Normal and Near

- Normal Wave Incidence. *J. Geophys. Res.*, 110, C10006, doi:10.1029/2004JC002803.
- 4 CERTAIN R. (2002) Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le golfe du Lion (Languedoc - Roussillon). PhD Thesis, Université de Perpignan, 209 p.
  - 5 CERTAIN R., MEULE S., REY V. and PINAZO C. (2005) Wave transformation on a microtidal barred beach (Sète, France). *Journal of Marine Systems*, 38, 19-34.
  - 6 GARNIER R., CALVETE D., FALQUES A. and CABALLERIA M. (2006) Generation and nonlinear evolution of shore oblique/transverse sand bars. *J. Fluid Mech.*, 567, 327-360.
  - 7 GARNIER R., CALVETE D., FALQUES A and DODD N. (2008) Modelling the formation and the long-term behaviour of rip channel systems from the deformation of a longshore bar. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2007JC004632.
  - 8 IRANZO V. and FALQUES A (1992) Some spectral methods for differential equations in unbounded domains. *Comput. Methods appl. Mech. Eng.*, 98, 105-126.
  - 9 LONGUET-HIGGINS M.S. and STEWART R.W. (1964) Radiation stresses in water waves; a physical discussion with application. *Deep Sea Research*, 11, 529-540.
  - 10 MEI C. (1989) *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 1, Singapore : World scientific.
  - 11 NICHOLLS R.J., WONG P.P., BURKETT V.R., CODIGNOTTO J.O., HAY J.E., McLEAN J.F., RAGOONADEN J and WOODROFFE D. (2007) Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.
  - 12 RUESSINK B.G. and KROON A. (1994) The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling: 1965-1993. *Marine Geology*, 121, 187-197.
  - 13 SHORT A.D. (Editor) (1999) *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley and Sons, Chichester.
  - 14 SOULSBY R.L. (1997) *Dynamics of Marine Sands*. Thomas Telford, London, UK
  - 15 THORNTON E.B. and GUZA R.T. (1983) Transformation of wave height distribution. *J. Geophys. Res.*, 88, 10, 5925-5938.
  - 16 WIJNBERG K.M. and KROON A. (2002) Barred beach. *Geomorphology* 48: 103-120.
  - 17 WRIGHT L.D. and SHORT A. D. (1984) Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A Synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.