

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

## Programme LITEAU

---

**ETUDE DE FAISABILITE POUR L'UTILISATION DES BARRES SEDIMENTAIRES  
D'AVANT-COTE DANS LA LUTTE CONTRE L'EROSION COTIERE**

APPLICATION DE SYSTEMES  
DE MODELISATION NUMERIQUE  
POUR LA REHABILITATION DE SITES LITTORAUX

---

Rapport final de recherche par :



**Laboratoire National  
d'Hydraulique**



**Université de Perpignan**

-----  
**Laboratoire d'Etude des  
Géo-Environnements Marins**

Juillet 2004



## SOMMAIRE

<b>I – Enoncé de la problématique .....</b>	<b>13</b>
<b>II – Le site d'application .....</b>	<b>17</b>
<b>1- Le contexte régional</b>	
<b>2- Le contexte local</b>	
<b>2.1. Généralités</b>	
<b>2.2. Résultats</b>	
<b>2.2.1. Hydrodynamique</b>	
<b>2.2.2. Morphologie</b>	
<b>2.3. Synthèse</b>	
<b>2.3.1. Le modèle N.O.M</b>	
<b>2.3.2. Le modèle O.P.E</b>	
<b>2.3.2. La chronologie des modèles</b>	
<b>2.3.4. Les particularités du site de Sète</b>	
<b>III – Les données disponibles .....</b>	<b>44</b>
<b>1- Le domaine sous-marin</b>	
<b>1.1. Le forçage hydrodynamique</b>	
<b>1.1.1. Les facteurs de contrôle du niveau marin</b>	
<b>1.1.2. La houle et la courantologie générale</b>	
<b>1.1.3. La déformation de la houle sur les barres</b>	
<b>1.1.4. La structuration hydrodynamique de l'avant-côte lors des tempêtes</b>	
<b>1.2. La morphodynamique des barres</b>	
<b>1.2.1. Volumes déplacés lors des coups de mer</b>	
<b>1.2.2. L'efficacité relative des coups de mer</b>	
<b>1.2.3. Les réajustements induits sur les barres</b>	
<b>2- Le domaine émergé</b>	
<b>3- Le cas idéalisé</b>	
<b>3.1. Bilan des caractéristiques du site d'étude</b>	
<b>3.2. Mise en place du cas d'étude par modélisation</b>	
<b>3.3 organisation des simulations</b>	
<b>IV – Les outils de programmation .....</b>	<b>71</b>
<b>1- Le code numérique MODHYS</b>	
<b>2- La chaîne de calcul TELEMAT</b>	
<b>V – Les résultats .....</b>	<b>74</b>

- 1- Cas d'étude**
  - 1.1 Selon MODHYS**
  - 1.2 Avec la chaîne de calcul TELEMAC**
- 2- Tâche C0 : cas de référence (tempête « classique »)**
  - 2.1. Selon MODHYS**
    - 2.1.1. Hydrodynamique et transport sédimentaires**
    - 2.1.2. Evolution du fond**
  - 2.2. Selon le code TELEMAC**
- 3- Tâche C0 : les deux autres régimes de houle**
  - 3.1. Selon MODHYS**
    - 3.1.1. La tempête exceptionnelle**
    - 3.1.2. Le tombant de tempête**
  - 2.2. Selon le code TELEMAC**
- 4- Tâche C1 : Profil sans barre**
  - 4.1. Selon MODHYS**
  - 4.2. Selon le code TELEMAC**
- 5- Tâche C2 : engraissement des barres littorales**
  - 5.1. Selon MODHYS**
    - 5.1.1. Engraissements de la barre externe seule**
    - 5.1.2. Engraissements de la barre interne et barre externe engraisée de 1 m**
    - 5.1.3. Engraissements de la barre externe et barre interne engraisée de 0,125 m**
  - 5.2. Selon le code TELEMAC**
- 6- Tâche C3 : prélèvement de la barre interne au profit de la barre externe**
  - 6.1. Selon MODHYS**
  - 6.2. Selon le code TELEMAC**
- 7- Tâche C4 : création d'une barre artificielle au large de la barre externe**
- 8- Conclusions**
  - 8.1. Sur les conditions expérimentales**
  - 8.2. Sur les limitations des modèles**
  - 8.3. Sur les recommandations**

**VI – Moyens et estimations des coûts ..... 128**

- 1- Introduction**
- 2- Solutions retenues**
- 3- Zones de prélèvement des sables**
- 4- Moyens à mettre en oeuvre**
  - 4.1. Dragage aspiratrice en marche- Dragage du sédiment sur la zone de prélèvement**
  - 4.2. possibilités de mise en place du sable sur les zones à recharger**
    - 4.2.1. Le clapage**
    - 4.2.2. Le rejet à l'aide d'un canon**
    - 4.2.3 Le rejet à l'aide d'une canalisation**

#### **4.3. Choix de la mise en place du sable en fonction de la zone à recharger**

##### **4.3.1. Nouvelle barre externe**

##### **4.3.2. Renforcement de la barre externe**

##### **4.3.3 Plage et barre interne**

#### **4.4. Estimations des coûts**

### **VII- Les perspectives ..... 137**

#### **1- Le développement d'un code numérique**

#### **2- L'approfondissement de la connaissance du fonctionnement des barres**

#### **3- La question des extrémités du rechargement**

### **Bibliographie**

## LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 : Schéma simplifié d'une avant-côte à barres sédimentaires sableuses.
- Fig. 2 : Tendence évolutive du trait de côte du lido de l'étang de Thau.
- Fig. 3 : Répartition de la hauteur des vagues de 0 à 8 mètres en fonction de deux directions d'origine (N50 à 130° et N140 à 220°), de part et d'autre de la normale à la côte (135° SE) sur la période 1973-1997.
- Fig. 4 : Hauteur significative maximale de la houle relevée pour chaque mois de 1989 à 2000 au large du site (fonds de 30 m).
- Fig. 5 : Répartition de la hauteur des vagues de 3 à 8 mètres pour les secteurs N50 à 130° et N140 à 220° sur la période 1973-1997.
- Fig. 6 : Evolution des profils bathymétriques réalisés par le SMNLR sur le lido de l'étang de Thau de 1980 à 2000
- Fig. 7 : Evolution synthétique d'un profil bathymétrique au sud du lido de l'étang de Thau.
- Fig. 8 : Evolution bathymétrique du profil 10 de 1989 à 2000
- Fig. 9 : Evolution bathymétrique du profil 2 de 1989 à 2000
- Fig. 10 : Modèles numériques de terrain en deux et trois dimensions
- Fig. 11 : Evolution topographique du profil 1 de 1989 à 2000.
- Fig. 12 : Profils topographiques 1 à 11 du 22 juin 2000.
- Fig. 13 : Evolution de la position du trait de côte de septembre 1989 à novembre 2000.
- Fig. 14 : Bathymétrie de la plage sous-marine le 28/07/2000 en coordonnées Lambert 3.
- Fig. 15 : Evolution morphologique des profils 1, 5, 6 et 11 du 22/06/2000.
- Fig. 16 : Evolution d'un profil (P8) depuis une situation hivernale (janvier 1999) jusqu'à une position estivale (été 2000), avec retour aux conditions hivernales au cours de l'automne 2000.
- Fig. 17 : Localisation des changements morphologiques entre le début (le 1<sup>er</sup> novembre 2000) et la fin de la période d'étude (le 4 décembre 2000)
- Fig. 18 : Plan de positionnement des appareils de mesures hydrodynamiques durant les campagnes sur le site de Sète en 1994, 1999 et 2000.
- Fig. 19 : Contexte météo-marin général au cours de la campagne de mesures de 1999.
- Fig. 20 : Direction de la houle de sud-est (à gauche) et des courants moyens (à droite) au niveau des trois points de mesures pour la tempête du 6 novembre 2000 en haut et pour celle du 12 novembre 2000, en bas, sur le site de Sète.
- Fig. 21 : Hauteurs significatives de la houle au cours de la campagne de mesures, du 3 novembre au 3 décembre 2000.
- Fig. 22 : Spectre d'énergie pour les quatre maxima de tempête, au niveau du glacis, de la fosse externe et de la fosse interne.
- Fig. 23 : Spectre d'énergie pour quatre situations types, au niveau du glacis de la fosse externe et de la fosse interne. Pour une meilleure lisibilité, tous les graphiques ne sont pas à la même échelle.
- Fig. 24 : Spectre directionnel de la houle au niveau du glacis pour 1994 et 1999.
- Fig. 25 : Hauteur significative de la houle mesurée sur le glacis entre le 2 et le 7 novembre 1994.
- Fig. 26 : Hauteur significative de la houle mesurée sur le glacis entre le 15 et le 18 janvier 1999.
- Fig. 27 : Vitesse et direction du courant moyen dans la fosse de lévigation externe (3 au 8 novembre 1994).
- Fig. 28 : Vitesse du courant moyen dans la fosse de lévigation interne (16-18 janvier 1999).
- Fig. 29 : Spectre des fluctuations de la composante crossshore du courant mesurées dans la fosse de lévigation interne le 16 janvier 1999 à 18 h TU.
- Fig. 30 : Direction de provenance de la houle dans la fosse de lévigation interne dans le domaine des basses et des hautes fréquences
- Fig. 31 : Fluctuations instantanées de la pression et de la composante cross-shore du courant pour les hautes (a) et les basses fréquences (b) dans la fosse de lévigation interne le 16 janvier 1999 à 20 h TU
- Fig. 32 : Répartition des volumes de sables lors des érosions et des engraissements sur le site de Sète.
- Fig. 33 : Profil transversal instrumenté et son évolution au cours de la campagne 2000.
- Fig. 34 : Localisation des principales zones d'érosion et d'engraissement entre le 13 et le 23 janvier 1999.

- Fig. 35 : Comparaison du profil P2 ( $x=50$  m) entre le 13 et le 23 janvier 1999.
- Fig. 36 : Comparaison du profil P10 ( $x=450$  m) entre le 13 et le 23 janvier 1999.
- Fig. 37 : Comparaison du profil P5 ( $x=250$  m) entre le 13 et le 23 janvier 1999.
- Fig. 38 : Représentation tridimensionnelle de la zone d'étude le 23 janvier 1999
- Fig. 39 : Représentation tridimensionnelle de la zone d'étude le 8 novembre 1994.
- Fig. 40 : Différents profils susceptibles d'être obtenus par adjonctions sélectives de masses sableuses sur le profil expérimental P5 du 4 novembre 2000.
- Fig. 41 : (a) Météo réelle du mois de novembre 2000 (Hs) et (b) modèle météo simplifié Hs et Ts
- Fig. 42 : Profils de (a) hauteur de houle  $H_{rms}(x)$ , (b) taux de dissipation de l'énergie de la houle (—)  $D_w(x)$  et du rouleau de déferlement (- -)  $D_r(x)$ , (c) niveau moyen de la surface libre NMSL  $\bar{\eta}(x)$ , (d) fond initial du 16 novembre 2000 (P5).
- Fig. 43 : Profils de (a) concentration de référence au fond  $\bar{C}_a(x)$ , (b) flux de sédiment (-6-) par charriage  $\bar{q}_b(x)$ , (- -) par suspension  $\bar{q}_s(x)$  et (—) total  $\bar{q}_t(x)$ , (c) gradient horizontal du flux total de sédiment  $\partial_x \bar{q}_t(x)$ , (d) fond initial du 16 novembre 2000 (P5).
- Fig. 44 : Evolution du profil de bathymétrie initiale (—) obtenus à différentes heures : (a) (—)  $t=1h$ , (- -)  $t=2h$ , (-6-)  $t=3h$ , (...)  $t=4h$ , (b) (—)  $t=6h$ , (- -)  $t=8h$ , (-●-)  $t=16h$ , (...)  $t=24h$ .
- Fig. 45 : Résultats de simulations mensuelles du 04/11 au 25/11/2000 (a & b : données de terrain), le 25 11 2000 (c : modèle 2dh & d : modèle multi1dh) et avec ou sans engraissement (e & f) Plage de la Corniche, France.
- Fig. 46 : Profils de (a) hauteur de houle  $H_{rms}(x)$ , (b) taux de dissipation de l'énergie de la houle  $D_w(x)$ , (c) niveau moyen de la surface libre NMSL  $\bar{\eta}(x)$ , obtenus à partir des trois régimes de houle (—) TC, (- -) TE et (-●-) TT, (d) fond initial du 16 novembre 2000 (P5).
- Fig. 47 : Profils de (a) concentration de référence au fond  $\bar{C}_a(x)$ , (b) flux total de sédiment  $\bar{q}_t(x)$ , (c) gradient horizontal du flux total de sédiment  $\partial_x \bar{q}_t(x)$ , obtenus à partir des trois régimes de houle (—) TC, (- -) TE et (-●-) TT, (d) fond initial du 16 novembre 2000 (P5).
- Fig. 48 : Evolution du profil de bathymétrie initiale (—) obtenus à différentes heures : (a) (—)  $t=1h$ , (- -)  $t=2h$ , (-6-)  $t=3h$ , (...)  $t=4h$ , (b) (—)  $t=6h$ , (- -)  $t=8h$ , (-●-)  $t=16h$ , (...)  $t=24h$ .
- Fig. 49 : Evolution du profil de bathymétrie initiale (—) obtenus à différentes heures : (a) (—)  $t=1h$ , (- -)  $t=2h$ , (-6-)  $t=3h$ , (...)  $t=4h$ , (b) (—)  $t=6h$ , (- -)  $t=8h$ , (-●-)  $t=16h$ , (...)  $t=24h$ .
- Fig. 50 : Cas C0, profil P5 ( $x=200m$ ), Tempête exceptionnelle (TE : Hs=4m, Ts=10s)  $\square=0^\circ$ , simulation de 24h, formule de transport de Bijker, modèle multi1DH
- Fig. 51 : Profils de (a) hauteur de houle  $H_{rms}(x)$ , (b) taux de dissipation de l'énergie de la houle (—)  $D_w(x)$  et du rouleau de déferlement (- -)  $D_r(x)$ , (c) niveau moyen de la surface libre NMSL  $\bar{\eta}(x)$ , (d) fond sans barre.
- Fig. 52 : Profils de (a) concentration de référence au fond  $\bar{C}_a(x)$ , (b) flux de sédiment (-6-) par charriage  $\bar{q}_b(x)$ , (- -) par suspension  $\bar{q}_s(x)$  et (—) total  $\bar{q}_t(x)$ , (c) gradient horizontal du flux total de sédiment  $\partial_x \bar{q}_t(x)$ , (d) fond initial du 16 novembre 2000 (P5).
- Fig. 53 : Evolution du profil sans barre (—) obtenus à différentes heures : (a) (—)  $t=1h$ , (- -)  $t=2h$ , (-6-)  $t=3h$ , (...)  $t=4h$ , (b) (—)  $t=6h$ , (- -)  $t=8h$ , (-●-)  $t=16h$ , (...)  $t=24h$ .
- Fig. 54 : Cas C1, profil de Dean simulation de 24h, formule de transport de Bijker, modèle multi1DH
- Fig. 55 : Profils de (a) hauteur de houle  $H_{rms}(x)$  obtenus pour (—) P05-0, (- -) P1-0, (b) taux de dissipation de l'énergie de la houle  $D_w(x)$  pour (—) P05-0, (- -) P1-0 et du rouleau de déferlement  $D_r(x)$  pour (-●-) P05-0, (...) P1-0, (c) niveau moyen de la surface libre NMSL  $\bar{\eta}(x)$  pour (—) P05-0, (- -) P1-0, (d) (—) P05-0, (- -) P1-0.
- Fig. 56 : Profils de (a) concentration de référence au fond  $\bar{C}_a(x)$ , (b) flux total de sédiment  $\bar{q}_t(x)$ , (c) gradient horizontal du flux total de sédiment  $\partial_x \bar{q}_t(x)$  obtenus pour les profils (d) (—) P05-0, (- -) P1-0.

- Fig. 57 : Evolution du profil P05-0 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-.-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-.-) t=16h, (...) t=24h
- Fig. 58 : Evolution du profil P1-0 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-●-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h
- Fig. 59 : Profils de (a) hauteur de houle  $H_{rms}(x)$ , (b) taux de dissipation de l'énergie de la houle  $D_w(x)$ , (c) niveau moyen de la surface libre NMSL  $\bar{\eta}(x)$  obtenus pour les profils (d) (—) P1-0, (- -) P1-0125, (-●-) P1-025, (...) P1-05
- Fig. 60 : Profils de (a) concentration de référence au fond  $\bar{C}_a(x)$ , (b) flux total de sédiment  $\bar{q}_t(x)$ , (c) gradient horizontal du flux total de sédiment  $\partial_x \bar{q}_t(x)$  obtenus pour les profils (d) (—) P1-0, (- -) P1-0125, (-●-) P1-025, (...) P1-05
- Fig. 61 : Evolution du profil P1-0125 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h
- Fig. 62 : Evolution du profil P1-025 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h
- Fig. 63 : Evolution du profil P1-05 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h
- Fig. 64 : Profils de (a) hauteur de houle  $H_{rms}(x)$ , (b) taux de dissipation de l'énergie de la houle  $D_w(x)$ , (c) niveau moyen de la surface libre NMSL obtenus pour les profils (d) (—) P0125-0125, (- -) P025-0125, (-●-) P05-0125, (...) P1-0125.
- Fig. 65 : Profils de (a) concentration de référence au fond  $\bar{C}_a(x)$ , (b) flux total de sédiment  $\bar{q}_t(x)$ , (c) gradient horizontal du flux total de sédiment  $\partial_x \bar{q}_t(x)$  obtenus pour les profils (d) (—) P0125-0125, (- -) P025-0125, (-●-) P05-0125, (...) P1-0125.
- Fig. 66 : Evolution du profil P0125-0125 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h.
- Fig. 67 : Evolution du profil P025-0125 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h
- Fig. 68 : Evolution du profil P05-0125 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h
- Fig. 69 : Cas C2 et C3, Scénarios de rechargement envisageables. Les simulations se feront sur les positions 1 et 3.
- Fig. 70 : Cas C2 : Scénarios de rechargement envisageables (a) rechargement de la barre externe, (b) rechargement de la barre externe et interne, (c) rechargement de la barre interne et (d) rechargement de la barre externe et prélèvement de la barre interne
- Fig. 71 : Cas B.E. + 1 m, profil P5 (x=200m), Tempête exceptionnelle (TE : Hs=4m, Ts=10s)  $\square=0^\circ$ , simulation de 24h, formule de transport de Bijker, modèle multi1DH,
- Fig. 72 : Cas B.I. + 1 m : profil P5 (x=200m), Tempête exceptionnelle (TE : Hs=4m, Ts=10s)  $\square=0^\circ$ , simulation de 24h, formule de transport de Bijker, modèle multi1DH,
- Fig. 73 : Profils de (a) hauteur de houle  $H_{rms}(x)$  obtenus pour (—) P05, (- -) P1, (b) taux de dissipation de l'énergie de la houle  $D_w(x)$  pour (—) P05, (- -) P1 et du rouleau de déferlement  $D_r(x)$  pour (-●-) P05, (...) P1, (c) niveau moyen de la surface libre NMSL  $\bar{\eta}(x)$  pour (—) P05, (- -) P1, (d) (—) P05, (- -) P1
- Fig. 74 : Profils de (a) concentration de référence au fond  $\bar{C}_a(x)$ , (b) flux total de sédiment  $\bar{q}_t(x)$ , (c) gradient horizontal du flux total de sédiment  $\partial_x \bar{q}_t(x)$  obtenus pour les profils (d) (—) P05, (- -) P1.
- Fig. 75 : Evolution du profil P05 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h.
- Fig. 76 : Evolution du profil P1 (—) obtenus à différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-6-) t=3h, (...) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-●-) t=16h, (...) t=24h.
- Fig. 77 : rechargement de la barre externe et prélèvement de la barre interne
- Fig. 78 : Cas C4, Scénarios de rechargement en créant une barre au large de la barre externe.



- Fig. 79 : C4 essai3, profil P5 (x=200m), Tempête exceptionnelle (TE : Hs=4m, Ts=10s)  $\alpha=0^\circ$ , simulation de 24h, formule de transport de Bijker, modèle multi1DH,  
Fig. 80 : Cas B.E. + 1 m : profil P5 (x=200m), Tempête exceptionnelle (TE : Hs=4m, Ts=10s)  $\alpha=0^\circ$ , simulation de 24h, modèle multi1DH, (a) Camenen-Larson, (b) Bailard, (c) Bijker, (d) Dibajnia-Watanabe et (e) Ribberink.  
Fig. 81 : Profil actuel - Rechargements pris en compte  
Fig. 82 : Zone de prélèvement des sables  
Fig. 83 : Drague aspiratrice en marche (DAM)  
Fig. 84 : Clapage par une DAM  
Fig. 85 : Refoulement par un canon  
Fig. 86 : Rejet par l'intermédiaire d'une canalisation

## LISTE DES TABLEAUX

- Tabl. 1 : Répartition en pourcentage des hauteurs significatives de la houle de février 1989 à février 2000.  
Tabl. 2 : Position des profils et description de leur évolution morphologique depuis 1988  
Tabl. 3 : Bilan volumétrique sur l'avant-côte du site de Sète pour la totalité du suivi.  
Tabl. 4 : Evolution morphologique de la barre externe en P10 de 1989 à 2000.  
Tabl. 5 : Typologie de la morphologie de l'avant-côte par phases caractéristiques de mai 1989 à novembre 2000.  
Tabl. 6 : Volumes déplacés entre les différentes périodes et bilan pour l'ensemble de la zone.  
Tabl. 7 : Vitesses en cm/s des composantes moyennes transversales et longitudinales des courants en période de mauvais temps et de beau temps, lors de la campagne de 1999.  
Tabl. 8 : Types de conditions hydrodynamiques rencontrées sur le site de Sète  
Tabl. 9 : Volumes significatifs érodés et engraisés lors des coups de mers étudiés en 1994.  
Tabl. 10 : Récapitulatif des changements intervenus dans le système des barres à la suite de la tempête des 16 et 17 janvier 1999 sur le site de Sète.  
Tabl. 11 : Variations de volume des sédiments sur la fosse interne, barre interne et fosse externe et le complexe externe en 2000.  
Tabl. 12 : Calcul de volume de sédiments en engraissement ou en érosion sur la plage aérienne du site de Sète en novembre 2000.  
Tabl. 13 : Scénarios retenus pour l'utilisation des codes numériques de simulation  
Tabl. 14 : Paramétrisation pour le code MODHYS  
Tabl. 15 : Données météorologiques simplifiées en novembre 2000  
Tabl. 16 : Données météorologiques simplifiées pour les trois cas de tempête.  
Tabl. 17 : Ensemble des simulations effectuées pour la tâche C2 avec différentes formules de transport.



## PRÉAMBULE

Le programme de recherche « *Etude de faisabilité pour l'utilisation des barres sédimentaires d'avant-côte dans la lutte contre l'érosion côtière* » a été proposé par le Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LNHE) d'Electricité de France, l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI-Grenoble), la SOGREAH et Le Laboratoire d'Etude des Géo-Environnements Marins (LEGEM) de l'Université de Perpignan.

**Université de Perpignan**, LEGEM (Coordination du programme)

Interlocuteurs : Jean-Paul BARUSSEAU (Professeur)  
Raphaël CERTAIN (Maître de Conférences)

Adresse : 52, av. de Villeneuve 66860 Perpignan

Tel & Fax : 04.68.66.17.47

Email : brs@univ-perp.fr et certain@univ-perp.fr

**Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement** (LNHE)-EDF

Interlocuteur : Michel BENOIT, Ingénieur-Chercheur

**Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse** (IMFT)

Interlocuteur : Dominique ASTRUC (Maître de Conférences)

**Laboratoire des Ecoulements Géophysiques & Industriels** (LEGI)

Interlocuteur : Philippe LARROUDE (Maître de Conférences)

**SOGREAH Ingénierie**

Interlocuteur : Jacques VIGUIER, Ingénieur-Chercheur

Ce programme a pour ambition de répondre aux grandes orientations préconisées dans le cadre du programme LITEAU et notamment celles relatives à la gestion du trait de côte, en visant :

- à assurer une continuité avec des programmes scientifiques existants ;
- à consolider et valoriser les avancées scientifiques actuelles en en appliquant les développements à des cas concrets ;
- à réunir sur un même projet des organismes de recherche spécialistes en environnement du littoral ;
- à étudier des mécanismes de réhabilitation et de restauration, tout en réalisant une analyse coût-bénéfice ;
- à être un futur outil d'aide à la décision.

Le texte qui suit présente la problématique, le contexte du milieu naturel qui a servi de modèle aux simulations numériques et les données obtenues dans ce milieu pour servir d'entrées à l'application des modèles, les outils logiciels utilisés et leur validation, les résultats obtenus et le chiffrage des coûts entraînés par la mise en œuvre pratique des opérations simulées.



## I. ENONCE DE LA PROBLEMATIQUE

Les barres sableuses d'avant-côte sont des corps sédimentaires très répandus le long des littoraux. Elles sont la conséquence de l'hydrodynamique dans la zone de déferlement et de gradients du transport sédimentaire, qui déterminent des zones de convergence des sédiments (Fig. 1).

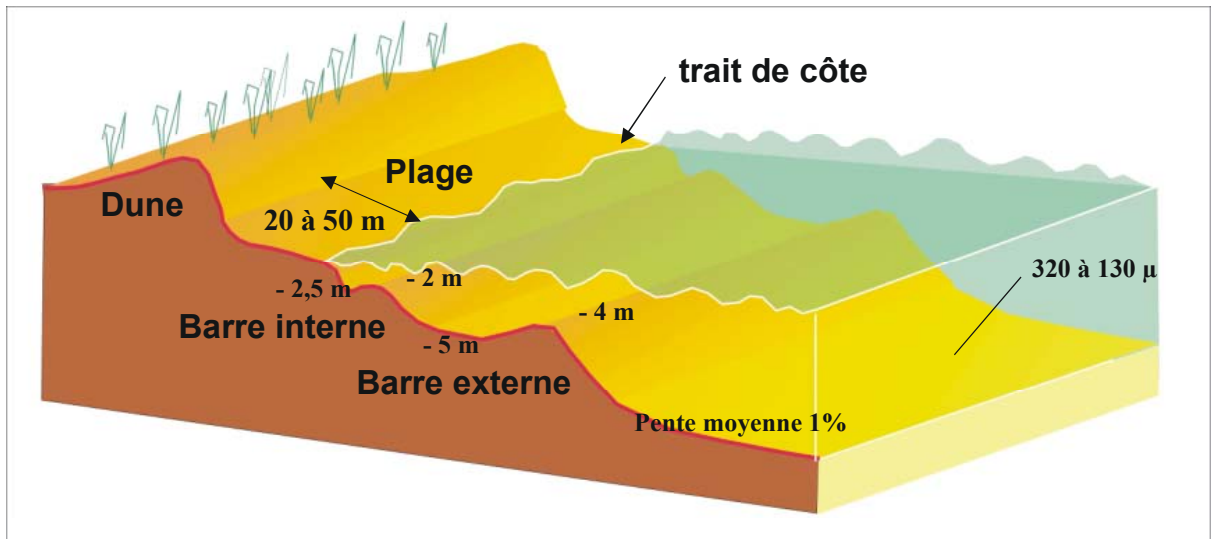


Fig.1 : Schéma simplifié d'une avant-côte à barres sédimentaires sableuses.

La possibilité d'utiliser les barres sédimentaires d'avant-côte pour la lutte contre l'érosion des plages sableuses a été suggérée dans les années 90. Plusieurs arguments plaident en faveur de cette utilisation. Les barres constituent, en effet, des stocks importants de sable disponible, la réduction du transport liée à l'unité de lieu conduit à un coût d'utilisation limité dans des conditions d'emploi favorables, le matériel est adapté granulométriquement et la méthode, sans impact paysager, est respectueuse de l'environnement.

Quelques cas de rechargement en sable réalisés directement sur l'avant-côte ont pu être mis en évidence, mais restent très minoritaires par rapport aux rechargements réalisés directement sur la plage. Un projet européen récent, SAFE (programme MAST), fait d'ailleurs remarquer que les manuels disponibles concernant le rechargement en sable n'abordent pas cette question du rechargement sous-marin qui pourtant est moins coûteuse que le rechargement de plage (Hamm *et al.*, 2002). Le paragraphe suivant donne une brève description des expériences de ce type menées dans différents pays.

L'Australie a testé cette méthodologie en déposant sur des fonds de -5 à -10 m  $1,5 \text{ Mm}^3$  de matériel sableux prélevé à 1,5 km de la côte sur des fonds de -20 à -30 m (Jackson & Tomlinsen, 1990). La berme ainsi créée pouvait atteindre une hauteur de 4 m. Le suivi a montré que cet apport fut efficace en jouant d'une part comme brise-lame immergé et d'autre part en nourrissant la plage. Les sables déposés ont été en effet systématiquement remontés vers la côte.

En Nouvelle-Zélande, une expérience similaire impliquant moins de matériel ( $80000 \text{ m}^3$ ) a aussi vu ce matériel venir s'accoler à la plage en moins de 6 mois (Foster *et al.*, 1994).

Une tentative avec 2 Mm<sup>3</sup> au Brésil a aussi été un succès (Vera-Cruz, 1972).

En Afrique du Sud, un important relargage de sédiment sur des fonds de -15 m formant un tas dont la crête pouvait atteindre -7m a montré sa stabilité et son effet positif sur la plage en jouant comme un brise-lame immergé (Zwamborn *et al.*, 1970). L'importance de la largeur de la crête a été prouvée lors de cette expérience, un élargissement de trente mètres augmentant de 50% la capacité de dissipation de la berme immergée.

De nombreuses expériences ont été menées aux USA dans le but qu'une partie du matériel piégé dans les avant-ports ou les graus puisse bénéficier aux zones appauvries aval-transit (Walton & Purpura, 1977 ; Hall, 1952 ; Brandley & Hands, 1989 ; McLellan, 1990 ; Burke *et al.*, 1991). L'ensemble des rechargements a été réalisé sur des fonds entre -5 et -10 m, la zone rechargée se comportant alors comme une source de matériel pour la plage. Malheureusement le suivi n'a pas été plus approfondi.

En Europe, trois expériences ont été menées entre 1981 et 1991. 440000 m<sup>3</sup> de sédiment ont été placés sur des fonds entre -4 et -6 m en Pologne et comparés à un rechargement sur la plage et sur des fonds de -2 à -4 m en terme d'efficacité et de coût (Basinski & Szymkiewicz, 1991). Le rechargement d'avant-côte a été jugé comme étant le moins rentable. Au Danemark (Lastrup, 1988), 240000 m<sup>3</sup> ont été placés sur la barre externe en trois lieux différents : une zone en érosion en aval-transit d'une batterie d'épis et deux secteurs proches non atteints par l'érosion. Le sable dans la zone en érosion est venu alimenter la barre interne alors qu'il est resté en place pour les autres zones. Par contre la plage n'a pas bénéficié de ce sédiment (Thyme, 1990). En Belgique, une combinaison entre un rechargement de plage et un apport de 600000 m<sup>3</sup> placé sur une longueur de 2,2 km à un mètre en dessous du niveau des plus basses eaux (Warnier *et al.*, 1994) permet de conclure à une méthode satisfaisante techniquement et économiquement. Le programme européen Nourtec (MAST-II) reste à ce jour le plus ambitieux (NOURTEC, 1997). Trois sites expérimentaux de rechargement d'avant-côte ont été utilisés : Terschelling (Wadden island, côte de la Mer du Nord des Pays-Bas), Torsminde (au nord de Sylt, en Mer du Nord - Danemark) et Nordeney (Mer du Nord - Allemagne). Ces rechargements n'ont pas été réalisés sur les barres sédimentaires mais dans les fosses qui les séparent. Les résultats sont encourageants puisque le sédiment a été remonté vers la côte et a pu bénéficier à la plage. Dans le détail, les conclusions principales pour le cas de Terschelling par exemple sont que le volume apporté a nourri la plage de manière efficace. Un transport sélectif des sédiments s'est produit sous l'action de l'asymétrie de la houle, les sables les plus grossiers étant remontés vers la côte par charriage (Hoekstra & Houwman, 1997). Par la suite, le rechargement a seulement un impact très local et très temporaire sur la distribution granulométrique de la zone (Guillen & Hoekstra, 1997). Les barres ont aussi bénéficié de cet apport et leur comportement a été totalement modifié puisqu'elle migrent alors vers la côte en grossissant alors que dans la zone adjacente non influencée par le rechargement, elles ont le comportement inverse (Kroon *et al.*, 1994). La dispersion du sédiment latéralement est faible, ainsi que les pertes vers le large qui sont négligeables (Kroon *et al.*, 1994). De plus, une certaine partie du matériel qui ne fait que transiter longitudinalement habituellement a été piégé sur la plage en raison du caractère dissipatif induit par le volume du matériel apporté et la morphologie créée, qui réduit l'énergie de la houle à la côte (Hoekstra *et al.*, 1996). Cette expérience concluante a amené les autorités hollandaises à commanditer une quinzaine de rechargements

d'avant-côte depuis 1997 (Spanhoff *et al.*, 2003). Toutefois au lieu d'effectuer les rechargements dans les fosses inter-barres comme prévu initialement par le projet NOURTEC, les rechargements ont été réalisés sur le glaciais, au niveau de la face dirigée vers le large de la barre externe pour des raisons de faisabilité. Cette nouvelle technique permet de maintenir le trait de côte tout en apportant un volume deux fois supérieur à celui requis pour un rechargement de plage ( $150 \text{ m}^3/\text{m}$ ). Comme cette mise en œuvre est moins coûteuse, le prix d'un tel rechargement est identique à celui classiquement utilisé. La durée d'efficacité de ce type de rechargement est évaluée autour de 5 ans pour des secteurs rechargés de plusieurs kilomètres avec 1 à 3 millions de  $\text{m}^3$ . La création d'une nouvelle barre en position plus distale et le bénéfice que tirent les barres déjà présentes sur le secteur rechargé par le matériel apporté induisent que les barres jouent un rôle protecteur plus grand pour la plage. Aucune perte importante vers le large ou longitudinalement n'est observée.

En France, aucun travail n'a jusqu'à présent été réalisé, ni pratiquement ni théoriquement, et le thème de l'étude proposée dans le cadre de LITEAU représente donc un premier effort, dans le prolongement de programmes nationaux ou européens où sont impliqués les différents partenaires du projet.

L'Action de Recherche Thématique 7 « Hydrodynamique sédimentaire » du Programme National d'Environnement Côtier (PNEC) a regroupé un ensemble d'universités françaises sur le thème des relations entre morphodynamique, hydrodynamique et dynamique sédimentaire. Les différentes équipes universitaires impliquées dans ce programme ont élaboré des outils numériques de modélisation de la morphodynamique pour des configurations correspondant à trois sites littoraux sableux sélectionnés pour leur représentativité des différentes configurations littorales observables en nature, et non équipés de structures artificielles importantes : le Cap Ferret (près d'Arcachon), le littoral situé à l'Ouest de Sète et une portion littorale de l'Est Cotentin. Des suivis in situ des évolutions morphodynamiques ont servi de base de données de validation pour les modélisateurs. L'utilisation de ces outils, dans le présent programme, a constitué, pour les équipes participantes déjà impliquées dans le PNEC (i.e. IMFT, LEGI et LEGEM-Université de Perpignan), une application concrète susceptible de fournir une retombée directe pour les futurs utilisateurs. Ce projet a également exploité les complémentarités et les synergies nées du travail en équipe effectué dans ce cadre.

De son côté, l'Union Européenne, dans le cadre du programme MAST (MARine Science & Technology), a financé un certain nombre de projets sur des thèmes proches. On peut citer par exemple les projets SASME (Surf And Swash zone MEchanics) et SCARCOST (SCours ARound COastal STRuctures) :

- Le projet SASME, qui regroupait plus de 10 organismes ou universités européennes dont EDF-LNHE, avait pour double objectif (1) d'améliorer les connaissances fondamentales des processus hydro-sédimentaires dans la zone de déferlement de la houle et (2) de mettre au point des outils numériques de modélisation (2D et 3D) des évolutions morphodynamiques côtières.

- Le projet SCARCOST, regroupant 9 organismes ou universités européennes dont le LEGI, avait pour principal objectif d'étudier les risques potentiels d'affouillement à la base d'ouvrages artificiels côtiers. Des études expérimentales et numériques des processus d'écoulement et d'affouillement autour de cylindres verticaux et de brise-lames ainsi que de l'effet de la turbulence sur le transport de

sédiment ont été notamment conduites dont certains aspects peuvent être utilisés dans la suite de nos travaux.

Un des résultats de ces programmes est de souligner l'importance des échanges qui se produisent entre les barres sédimentaires et la plage ainsi que leur rôle éminent dans le dispositif naturel de sa protection. Il est donc possible d'envisager l'utilisation des barres sédimentaires d'avant-côte d'un double point de vue : (1) employer les stocks sableux pour déplacer les équilibres d'une façon favorable au maintien du trait de côte, et (2) agir sur leur morphologie pour augmenter l'efficacité de leur action atténuatrice des houles.

La complexité des processus et la sensibilité extrême du système littoral sableux aux mécanismes qui concourent à l'évolution des lignes de rivage imposaient toutefois qu'une étude complète soit faite pour tester les différentes hypothèses qui découlent de ces intentions.

Enfin, il faut rappeler que la lutte contre l'érosion des plages sableuses correspond à une demande des gestionnaires du milieu littoral. L'intérêt des collectivités territoriales en Languedoc-Roussillon à ce sujet s'est traduit par un soutien financier de l'étude de terrain qui a servi de support aux investigations entreprises dans le cadre du programme : la plage de la Corniche à Sète (Hérault).



## II. LE SITE D'APPLICATION

### 1. Le contexte régional

Le golfe du Lion (Méditerranée occidentale) représente un environnement quasi atidal à régime de houles contrastées qui s'étire sur environ 180 km entre la frontière franco-espagnole et le Cap Couronne (Lentheric, 1989). Ses longues étendues sableuses s'appuient sur des caps rocheux espacés de plusieurs dizaines de kilomètres : le promontoire des Albères, chaînon terminal des Pyrénées, le cap Leucate, le cap d'Agde et le mont Saint Clair, et sur les prodeltas des fleuves pyrénéo-languedociens : Tech, Têt, Agly, Aude, Orb, Hérault, ainsi que sur le vaste delta du Rhône.

Côte de régularisation édifiée à partir de l'achèvement de la transgression post-glaciaire, vers – 6000 ans BP (Ambert, 1987), le système littoral s'est développé sous la forme d'une unité géomorphologique stéréotypée, assujettie à une position du niveau marin qui a peu varié au cours de cet épisode (Pirazzoli, 1986 ; Barusseau *et al.*, 1996). On rencontre, du bord vers le large, d'abord une partie émergée, avec un cordon dunaire souvent fort dégradé par une anthropisation commencée au début du siècle dernier, et une plage le plus souvent étroite (quelques dizaines de mètres) ; ensuite, une partie immergée, caractérisée par l'occurrence permanente d'un système de fosses et de reliefs sédimentaires, parallèles au trait de côte : les barres d'avant-côte. Le plus souvent au nombre de deux, elles sont rectilignes dans la partie est et festonnées dans la moitié sud (Barusseau & Saint-Guily, 1981). Transversalement, l'ensemble du prisme littoral se déploie entre des altitudes de l'ordre de +2 m pour sa limite terrestre et -8/-10 m pour sa limite marine.

Cette disposition naturelle du prisme sableux est principalement le résultat du forçage hydrodynamique dû à la houle, forçage qui peut être décrit en termes de modifications des ondes présentes dans le milieu littoral, de changements de niveaux, indépendamment de toute cause tidale, et de variations résultantes des vitesses et des directions de courants.

Les tempêtes d'est à sud-est sont responsables des houles dans la région (L.C.H.F., 1984). Tous les autres régimes de vent, y compris les très fréquents et très puissants vents de terre (mistral pour la partie est du golfe et tramontane pour sa partie ouest), n'ont qu'une action limitée sur la génération des vagues à la côte. Seule leur action directe sur le sable des dunes et des plages, exporté vers la mer, est significative ; mais elle est encore mal connue car insuffisamment étudiée. Les houles, compte tenu de leur incidence par rapport à la direction variable du rivage, entraînent une dérive littorale, courant parallèle à la côte qui, en termes résultants, présente deux branches convergentes vers la partie centrale du golfe : l'une sud – nord, au sud, et l'autre est – ouest, à l'est. Dans la zone littorale, l'action de la houle se différencie en fonction des facteurs qu'elle génère par transfert d'énergie vers de plus hautes ou de plus basses fréquences. Ces dernières, les ondes d'infragravité, seraient susceptibles de jouer un rôle dans la configuration hydrodynamique littorale (Bowen & Inman, 1971 ; Guza & Inman, 1975 ; Masselink, 1997). Leur analyse, par traitement du signal obtenu sur de nombreux enregistrements, montre leur généralité au cours des tempêtes, mais leurs modalités d'apparition et, surtout, leurs modalités d'action sur la structuration hydrodynamique de l'avant-côte doivent encore être explorées in situ. Le régime houlographique du golfe du Lion présente une variabilité saisonnière qui oppose globalement une saison estivale dominée par les houles

modérées de beau temps et une saison hivernale où des coups de mer de 24 à 92 h peuvent se succéder à intervalles plus ou moins grands (1 à 4 par mois d'hiver). Une très forte variabilité interannuelle de leur intensité et de leur fréquence introduit un élément d'incertitude dans la détermination des conditions moyennes (Akouango, 1997).

En dépit de l'absence de marée, des variations de niveau de l'ordre de  $\pm 1$  m peuvent être observées à la côte. Rapidement atténuées vers le large (pente de 0,1%), leur périodicité, à logique météorologique et non astronomique, n'entraîne pas de conséquences géomorphologiques. Elles sont cependant responsables de surcotes et de décotes conduisant à des écoulements compensateurs transversaux.

Conjointement, les variations des caractères de la houle et des niveaux induisent dans la zone littorale une distribution courantologique tridimensionnelle. Son analyse suppose une distinction assez complexe entre périodes de beau temps et périodes de tempêtes ainsi qu'entre degrés d'agitation au cours de ces dernières, en tenant compte également de leur espacement dans le temps, c'est-à-dire de l'histoire météorologique immédiate. Elle implique aussi que soient séparés les différents espaces du profil transversal de la zone littorale où s'opèrent les mutations du champ d'ondes et les variations de niveau. Sans entrer dans ces détails, le bilan courantologique peut être résumé en mettant l'accent sur quelques points essentiels (Certain, 2002) :

- Dans le sens longitudinal, la dérive littorale apparaît comme un élément de premier plan. Elle affecte une étendue plus ou moins large de la zone littorale en fonction de l'intensité du régime météo-marin. Restreinte à une étroite bordure côtière lorsque dominant les petites houles de beau temps, elle se déploie dans toute la largeur du système des barres en période de tempête. Bien qu'elle soit fondamentalement bidirectionnelle, seul sa résultante doit être considérée pour la compréhension des processus littoraux. Selon les secteurs considérés, elle a alors une direction bien déterminée et une intensité que l'on cherche à traduire en terme de transports sédimentaires résultants. Dans le golfe du Lion, si les débits sont généralement faibles en ordre de grandeur ( $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ ) leur valeur précise est mal connue à l'échelle locale et son évaluation dans chaque cas demeure un objectif de recherche (L.C.H.F., 1984).

- Dans le sens transversal, l'analyse courantologique fait apparaître des composantes bidirectionnelles qui sont, en premier lieu, dépendantes du type de temps. Lors des coups de mer, les courants ont ainsi une orientation marquée vers le large ; ils exportent du matériel dont une partie, atteignant la profondeur de fermeture ultime (limite d'action des houles exceptionnelles), peut être définitivement soustraite à la dynamique du système littoral. Lors des périodes de beau temps, ou plus précisément, sur le tombant des tempêtes annonçant le retour du régime de beau temps, le courant de houle lié à l'asymétrie des trajectoires des particules d'eau devient prépondérant et entraîne un écoulement vers la plage qui ramène le matériel sableux du large.

Inscrit, d'une part, dans des limites régionales plurikilométriques mais comportant des objets sédimentaires d'échelle métrique et, d'autre part, subordonné à une histoire plurimillénaire mais aussi à des processus à l'échelle de la seconde, le système littoral du golfe du Lion, comme toutes les zones littorales d'ailleurs (De Vriend, 1991 ; De Boer, 1992), doit être considéré à différents niveaux scalaires : échelle instantanée du processus, échelle événementielle de la morphodynamique

des barres et du coup de mer, échelles annuelle et interannuelle du comportement littoral (Barousseau *et al.*, 1994), échelle pluri-décennale voire séculaire de la tendance lourde qui entraîne le rivage vers une évolution à laquelle s'appliquent alors les termes d'érosion, accrétion ou stabilité.

L'ensemble des connaissances à ces quatre niveaux constitue une base indispensable mais, quand on considère la place de l'homme dans les zones de rivage et les conséquences de ses entreprises, seuls les deux derniers sont pertinents. Dans le golfe du Lion, la connaissance du sens des évolutions est alors grandement facilitée par l'introduction de deux notions : celle de cellule sédimentaire et celle de disponible sédimentaire.

Le devenir d'une portion donnée du linéaire côtier (par exemple, une plage urbaine) ne dépend pas de ce qui affecte une partie éloignée du golfe. Il est seulement sous la dépendance du bilan sédimentaire à l'intérieur d'une unité géographique délimitée, d'extension kilométrique - la cellule sédimentaire - à laquelle appartient cette portion du littoral (Agence de l'eau, 2001). Le golfe du Lion a ainsi été découpé en 30 cellules dont la longueur varie de 1,5 à 15 km. Pour chacune d'entre elles, mis à part les deux frontières longitudinales - l'une ouverte vers le large et l'autre fermée vers la terre - les limites importantes à considérer sont ses extrémités latérales. Dans le golfe, ces limites sont de nature différente, certaines naturelles (caps, embouchures), d'autres artificielles (ports notamment).

Dans une cellule, la dérive littorale résultante est globalement homogène (unidirectionnelle), sauf en des secteurs très limités au voisinage même des limites latérales. Le sens de transport sédimentaire conséquent y est donc dirigé globalement, en année moyenne (mais souvent chaque année), de l'amont de la cellule (zone-source) vers l'aval (zone-puits).

En général, il existe un étroit parallélisme entre érosion et zone-source, accrétion et zone-puits, tandis qu'entre les deux (souvent une étendue importante de la cellule, en fonction de sa longueur), règne plutôt un état de stabilité (Certain, 2002). En fait, le bilan apparaît un peu plus nuancé parce que les limites latérales sont rarement totalement imperméables. Souvent, la dérive littorale dominante entraîne, en effet, un contournement partiel des obstacles latéraux et par conséquent, d'un côté, une légère importation de matériel et, de l'autre, une certaine exportation. Dans le golfe du Lion, ces flux transfrontaliers doivent encore faire l'objet d'une évaluation.

On voit donc que l'évolution d'une cellule est ici sous la dépendance des masses de sable qui y entrent et en sortent. Le sable du prisme littoral du golfe du Lion est actuellement peu renouvelé par des apports issus des bassins-versants. Le Rhône, tributaire essentiel par la quantité des alluvions compatibles avec le sédiment des plages amenées dans le passé (c'est-à-dire principalement entre 6000 et 4000 ans B.P. (Arnaud-Fassetta, 1998)), ne joue plus ce rôle dans l'ère historique (des preuves archéologiques démontrent un recul du rivage depuis plus de 2000 ans, Tessier *et al.*, 2000). Quant aux autres fleuves, leur débit naturellement moindre et la même carence naturelle déterminent un apport par conséquent très réduit. En outre, les réductions bien connues des apports fluviaux en raison des aménagements sur les vallées contribuent encore à raréfier la délivrance de matériel sableux frais. Cette pénurie s'exprime diversement dans le golfe du Lion en raison de la convergence des dérives est et sud. A l'échelle du golfe, on peut s'attendre à enregistrer des extrémités plus démunies que la partie centrale et, par conséquent, à plus de problèmes d'érosion dans les départements de l'Hérault (à l'est) et des Pyrénées-

Orientales (au sud), que dans la partie centrale (le département de l'Aude), où l'accrétion devrait dominer. C'est globalement ce qu'on observe, à la nuance près que chaque cellule répercute, à son échelle, la logique zone-source/zone-puits et qu'en conséquence, une zone-source de la partie orientale du golfe, par exemple, cumule deux handicaps – le sien propre et celui dû à son appartenance géographique à un compartiment démuné - alors qu'une zone-puits pourra y compenser, au moins partiellement, le déficit dû à sa situation a priori désavantagée. Des exemples similaires seraient offerts par la région sud du golfe alors que dans la partie centrale, point d'aboutissement des deux dérives convergentes, c'est le contraire que l'on observe puisque, même en zone de départ sédimentaire à l'amont d'une cellule, le réservoir est globalement alimenté par le flux régional et ne souffre pas de pénurie.

L'importance volumétrique des réserves sableuses de l'avant-côte constitue alors un second critère de la vulnérabilité plus ou moins grande du littoral à l'érosion. Ce capital de matériel, faiblement réapprovisionné - le disponible sédimentaire - contribue à la stabilité de la plage en participant aux échanges, entretenus par l'hydrodynamique et le vent, entre les parties émergées et immergées du profil. On constate, en effet, qu'en certains secteurs où des phénomènes d'érosion de la plage surviennent de manière récurrente (Palavas dans la région montpelliéraine, Sète sur la partie nord de l'étang de Thau), le prisme sédimentaire sous-marin est extrêmement mince voire totalement absent. Un substratum rocheux, constitué le plus souvent par des grès infralittoraux, affleure alors ou forme un plancher peu enfoui qui limite à la base la couche active de sable disponible.

Il faut retenir de cela que, dans le site atelier retenu pour ce programme, le réservoir sédimentaire est faible, constitué pour l'essentiel par les barres sédimentaires qu'on y rencontre. En conséquence, il représente un secteur idéal pour l'étude proposée puisqu'il n'est pas possible de compter sur le stock disponible pour ré-alimenter la plage et que la fonction protectrice des barres est essentielle à son maintien. C'est cette fonction qui sera donc le sujet principal du rapport.

## 2. Le contexte local

Le choix du site atelier de la plage de la Corniche a été motivé par plusieurs arguments :

- Il s'agit d'un secteur emblématique de la vocation touristique de la Région Languedoc-Roussillon
- Ce littoral, en érosion chronique en de nombreux endroits est fortement aménagé, et nécessiterait des solutions plus soucieuses de l'impact paysager,
- Le site fait l'objet de suivis réguliers depuis 10 ans par l'Université de Perpignan, ce qui permet d'aborder les études dans le cadre du présent programme en ayant déjà une connaissance du site et de nombreuses données pour alimenter les modèles.
- L'ART « Dynamique sédimentaire » du PNEC a effectué des campagnes de terrain sur ce même site.

### 2.1. Généralités

La plage de Sète appartient à une cellule sédimentaire, comprise entre le Mont Saint Clair au NE et le cap d'Agde au SW, qui correspond au lido de l'étang de Thau. La plage est étroite (20 à 50 mètres de largeur), fortement affectée par les coups de mer ; le haut de plage est appuyé sur un talus ou un enrochement. Au large de la ligne de rivage, l'avant côte dessine un système de barres et de fosses de lévigation comprenant :

- deux barres sédimentaires à une distance de 50 à 150 m pour la barre interne et de 170 à 270 m pour la barre externe. La barre externe est toujours rectiligne mais peut être temporairement ondulée ou oblique, la barre interne pouvant, en plus, prendre un caractère légèrement festonné ou disjoint,
- une fosse interne entre le rivage et la barre interne, d'une largeur assez faible, environ 50 à 100 mètres, et une fosse externe, entre les barres externe et interne, d'une largeur de 250 à 300 mètres et d'une profondeur de 3 à 4 mètres,
- un glacis d'avant-côte (au-delà de la barre externe) qui débute à partir de 5 mètres de profondeur avec un pente régulière de 0,85%.

Le sédiment est entièrement sableux ; les tailles de grains s'échelonnent de 0,130 à 0,320 mm.

Les caractéristiques principales de la climatologie du site sont bien connues :

- le vent est orienté suivant deux secteurs principaux : un vent de terre, le plus fréquent, avec des vitesses en moyenne de l'ordre de 4 à 10 m/s et un vent de mer, plus rare, mais pouvant atteindre 40 m/s.
- les variations du niveau marin sont essentiellement dues à des fluctuations (surcotes et décotes) rythmées par les forçages atmosphériques et météorologiques plus que par les marées très faibles sur ce littoral (4 à 20 cm de marnage).
- la houle peut atteindre des hauteurs significatives de l'ordre de 4 mètres lors d'évènements extrêmes mais les valeurs les plus courantes ne dépassent pas 1 mètre avec des périodes de l'ordre de 5 à 9 secondes.

Notons également qu'un houlgraphe non directionnel permanent est localisé au large de la zone étudiée, ce qui permet de disposer des données de houle nécessaires pour imposer les conditions aux limites des codes de simulation.

D'un point de vue général, la quasi totalité du lido entre le cap d'Agde et Sète est classée en zone de forte à très forte vulnérabilité à l'érosion littorale (C.E.P.R.E.L, 1995). Les observations réalisées mettent en évidence une diminution générale de la surface des plages du littoral, entre le Cap d'Agde et le Mont Saint-Clair, de l'ordre de 45 ha en moins d'un demi-siècle sur un linéaire de 16 km, soit en moyenne un recul de 28 m.

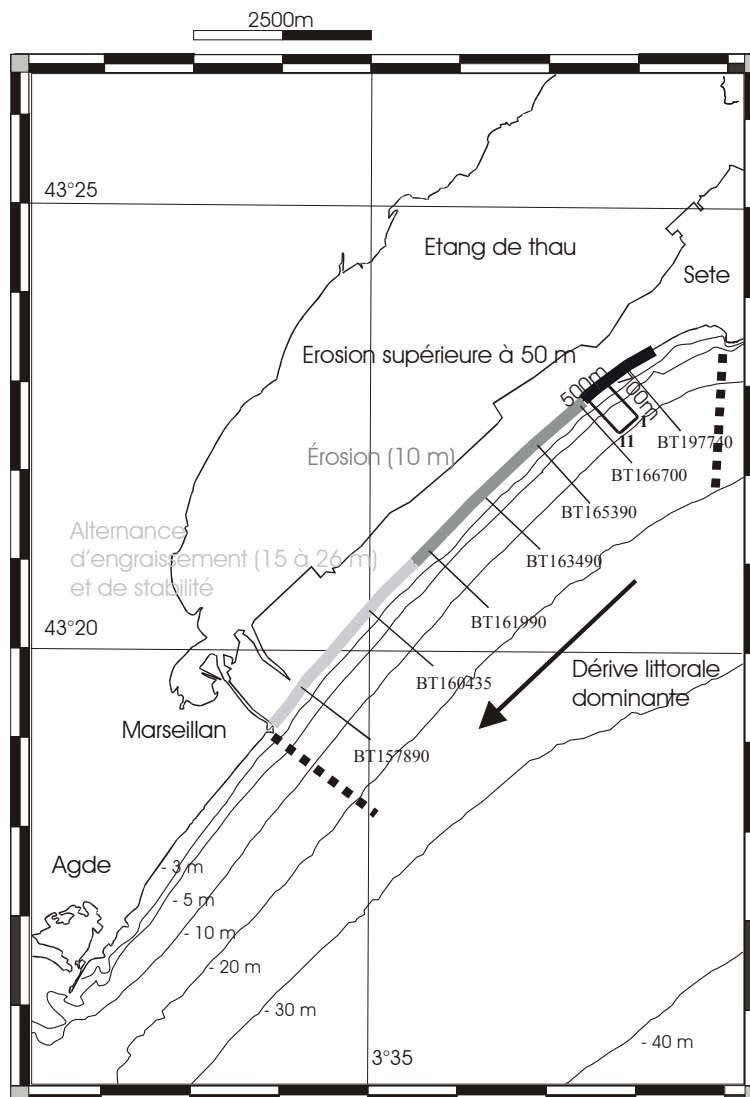


Fig.2 : Tendence évolutive du trait de côte du lido de l'étang de Thau. Localisation de la zone d'étude (délimitée par les pointillés), du site de Sète et des profils topobathymétriques (notés BT) réalisés par le SMNLR.

Cette valeur masque toutefois des érosions plus importantes et, dans certains cas, des engraissements. Ainsi, d'après la figure 2, relative à l'évolution du trait de côte de 1954 à 2000, on observe à l'extrémité nord du lido de Sète, à proximité des

ouvrages, un recul de 50 m, alors que le trait de côte a avancé de 10 m au sud du lido.

Simultanément, se note au nord du lido, un rapprochement général des lignes bathymétriques vers le rivage entre 1895 et 2000 et une diminution de leur écartement traduisant une pente plus forte à ce niveau (BCEOM, 2000). Sur le levé le plus récent apparaissent des creux et des gouttières (surcreusement des fosses externes laissant affleurer le substratum).

Ces observations traduisent une tendance à l'érosion du lido, manifeste depuis au moins un siècle et qui poursuit ici un processus plus ancien. Elle justifie que, dans certains secteurs, des ouvrages de défense aient été mis en place.

## 2.2. Résultats

Nous développons dans ce qui suit l'ensemble des résultats obtenus sur le site. L'idée n'est pas de décrire les conditions naturelles dans toute leur diversité mais d'aboutir à la définition d'un petit nombre de situations susceptibles de les représenter valablement dans l'exercice de simulation qui est l'objectif du programme.

### 2.2.1. Hydrodynamique

Les houles ont des hauteurs moyennes comprises entre 0 et 2 m (Tabl. 1 et Fig. 3), un tiers des valeurs étant inférieures ou égales à 1 m, principalement en juillet et août, période estivale calme. Leur fréquence dominante est le secteur 140-220° associé aux brises thermiques de S et SE ; le secteur 50-130° est, quant à lui, associé aux faibles houles de mistral et aux petites houles d'est (Fig. 3).

Entre 0 et 2 m	87%
Entre 2 et 4 m	11%
Supérieure à 4 m	2%

Tabl. 1 : Répartition en pourcentage des hauteurs significatives de la houle de février 1989 à février 2000, toutes saisons confondues, sur le site de Sète pour trois tranches arbitraires de hauteur.

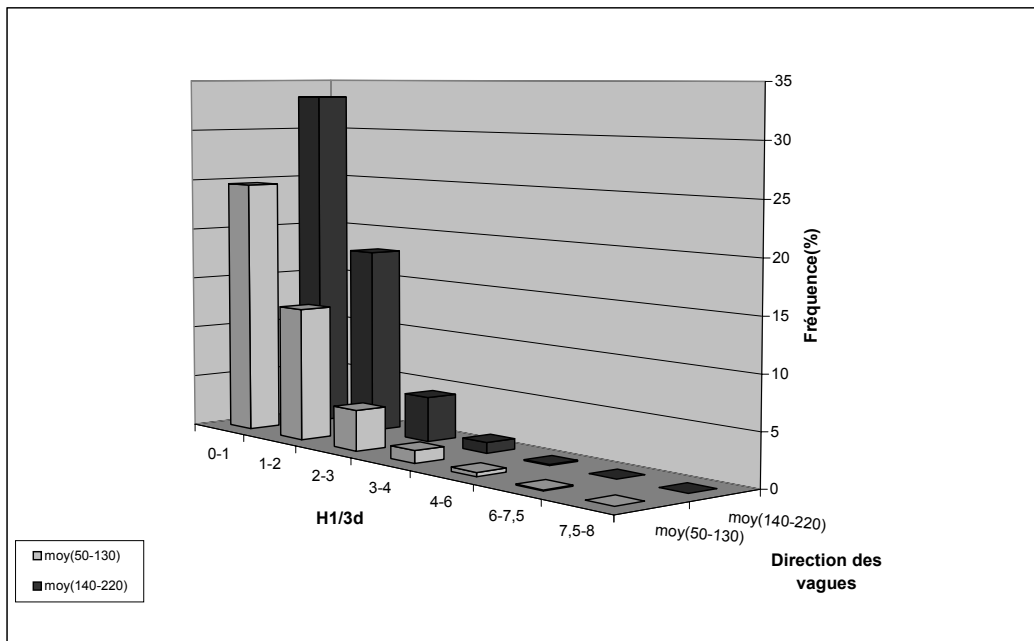


Fig.3 : Répartition de la hauteur des vagues de 0 à 8 mètres en fonction de deux directions d'origine (N50 à 130° et N140 à 220°), de part et d'autre de la normale à la côte (135° SE) sur la période 1973-1997.

Les épisodes où la houle est supérieure à 4 m ont lieu entre septembre et mars ; ils sont rares (Tabl. 1) ; en 12 années, on n'en compte qu'une quinzaine (Fig. 4).

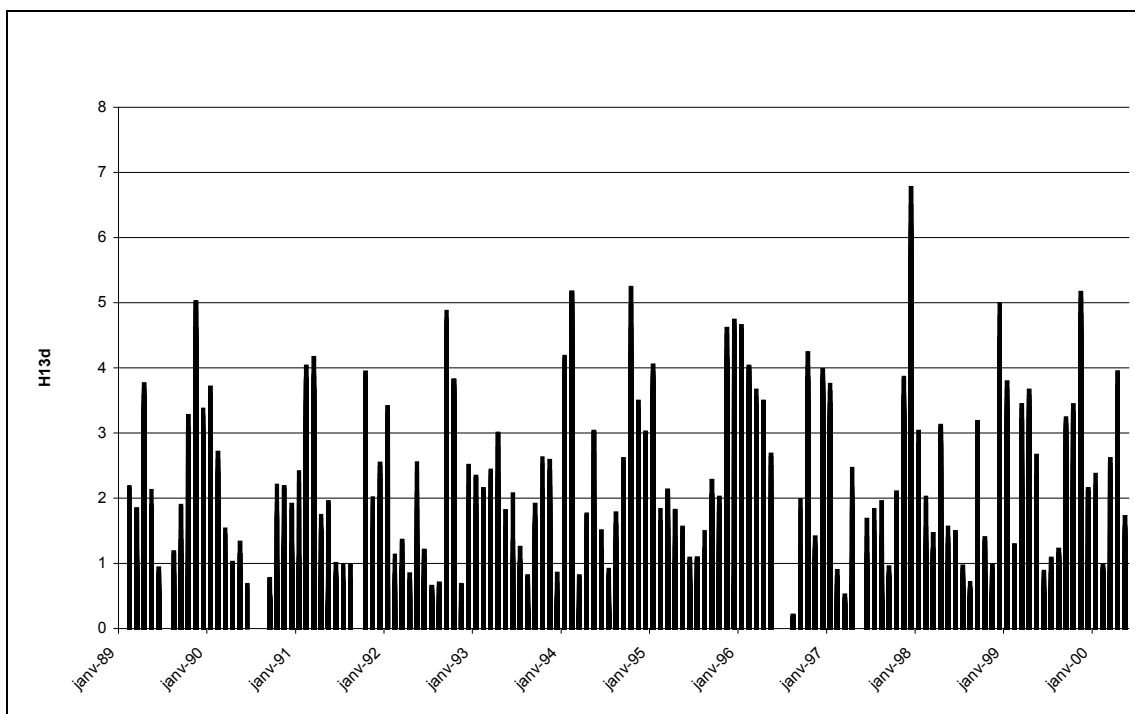


Fig. 4 : Hauteur significative maximale de la houle relevée pour chaque mois de 1989 à 2000 au large du site (fonds de 30 m).



On remarque une période hivernale 95-96 où une série de coups de mer dépasse 4 m et un pic exceptionnel en décembre 1997 où la hauteur significative atteint presque 7 m. Leur secteur de provenance (Fig. 5), est surtout associé au secteur N50-130, ce qui explique le sens de la dérive dominante orientée du NE vers le SW sur la côte de Sète.

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).

Il semble que ces événements exceptionnels de tempêtes et de périodes plus calmes s'insèrent dans un schéma à plus grande échelle (Durand, 1999). Considérée sur une base cinquantennale (observations de Sète et de Cap Béar de 1949 à nos jours), l'intensité des tempêtes semble indiquer un cycle trentenaire ; par contre les variations de pression atmosphérique à Cap Béar suivent une cyclicité de 8 ans de période. Il n'est donc guère possible de déterminer le rythme réel de ces variations et, a fortiori, leurs corrélations car la base de données est trop faible pour tous les cycles de période supérieure à 10 ans. Par contre, ces observations restent précieuses car elles soulignent les disparités climatiques locales entre deux points opposés du golfe, distants d'à peine plus de 100 km.

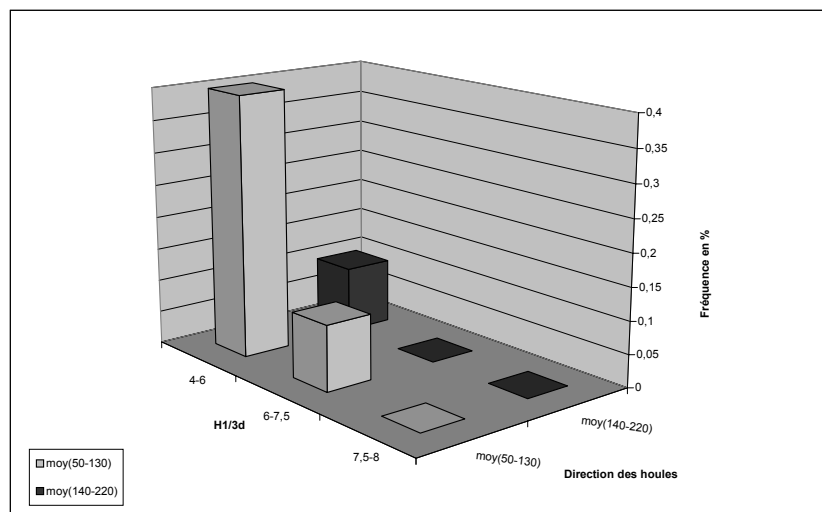


Fig. 5 : Répartition de la hauteur des vagues de 3 à 8 mètres pour les secteurs N50 à 130° et N140 à 220° sur la période 1973-1997.

## Conclusion :

L'analyse hydrodynamique met en évidence la récurrence de houles de forte énergie dont les hauteurs significatives excèdent 4 m. Ces coups de mer semblent provenir en majorité du secteur N50-N130, induisant une dérive vers le SW du lido ; ils proviennent plus rarement du 1<sup>er</sup> quadrant du rivage (N135-N225). D'autres événements sont mis en évidence : un bref épisode très violent avec des hauteurs significatives supérieures à 7 m (décembre 1997) et un long épisode de faible agitation (1993). Ces phénomènes exceptionnels et antagonistes paraissent contrôlés par des cycles météorologiques à plus grande échelle, encore hors de portée de l'investigation.

Dans l'optique du programme, il est nécessaire de chercher à mesurer les variations morphologiques qui accompagnent cette variabilité de façon à définir des scénarios réalistes représentatifs des situations principales rencontrées dans la région.

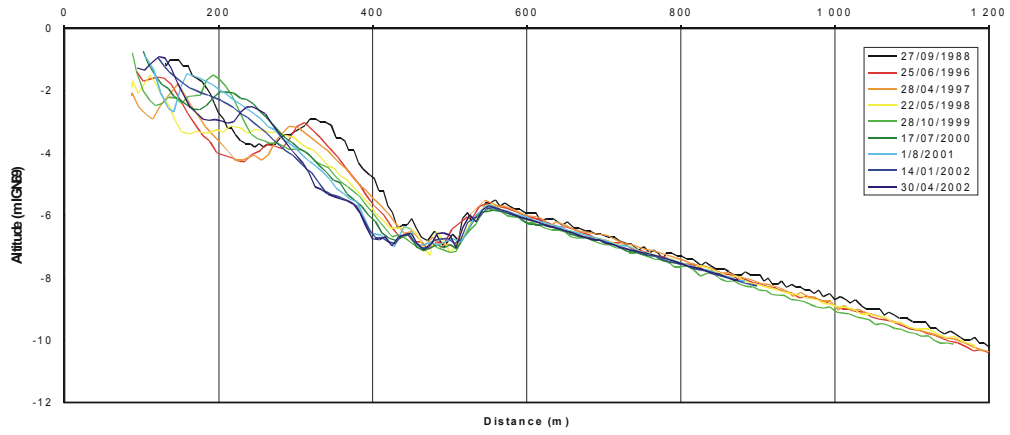
### 2.2.2. Morphologie

Le site de Sète est une portion finalement très limitée du lido de la lagune de Thau et, par conséquent, les observations morphologiques réalisées doivent être insérées dans la représentation plus large de l'évolution du système de barres de ce lido.

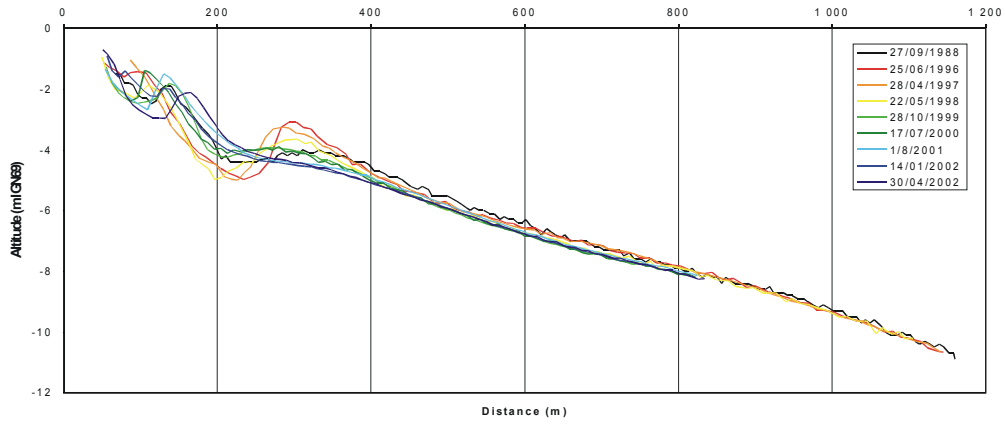
#### 2.2.2.1. Evolution générale du système de barres

L'analyse de l'évolution générale du lido s'appuie sur l'exploitation des profils suivis par le SMNLR (Fig. 2) dont le résultat est présenté dans l'ensemble des figures 6 et du tableau 2.

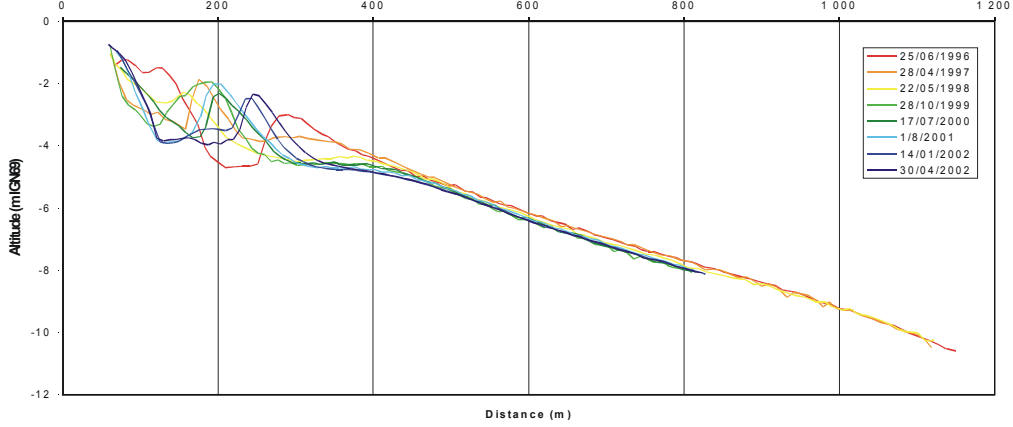
Profil BT 167740



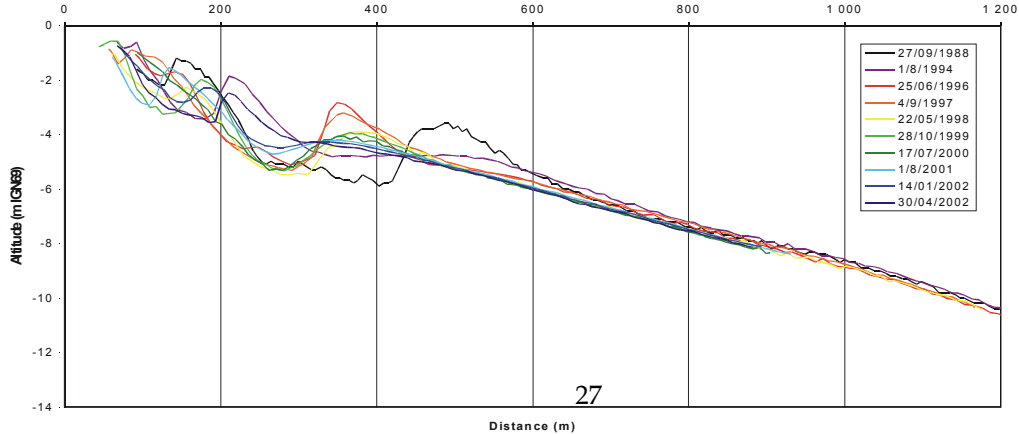
Profil BT 166700



Profil BT 165390



Profil BT 163490



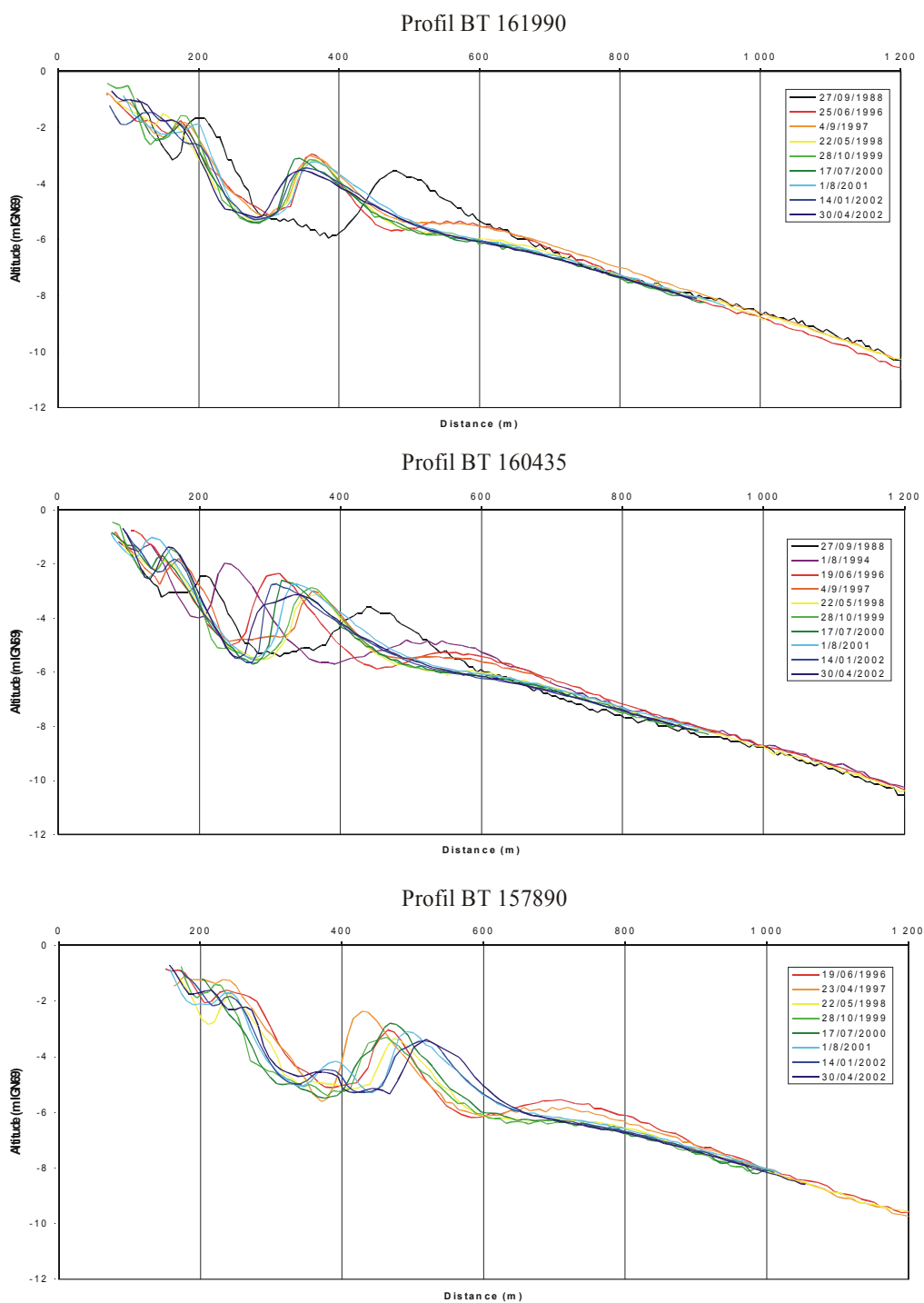


Fig. 6 : Evolution des profils bathymétriques réalisés par le SMNLR sur le lido de l'étang de Thau de 1980 à 2000 (cf. Fig. 2 pour la localisation)

N° de profil	Lieu-dit	Coordonnées début	Coordonnées fin	Observations
BT167740	Plage de la Corniche	X=706350.0 Y=121750.0	X=707474.6 Y=120096.1	La barre externe est stable et la fosse externe très marquée, façonnée par des grès littoraux.
BT 166700	Le Grand Bonnet	X=705570.0 Y=121060.0	X=706768.1 Y=119458.6	La hauteur de la barre externe décroît de hauteur depuis 1996 pour quasiment disparaître en 2002, en comblant la fosse externe. La barre interne a alors sa position la plus reculée de la période représentée.
BT 165390	Villeroy	X=704610.1 Y=120162.7	X=705999.4 Y=118724.0	Décroissance et recul vers le large de la barre externe depuis 1996 avec une disparition presque totale en 2002. Simultanément la barre interne recule d'environ 100 m et prend en 2002 une position très proche de l'ancienne barre externe.
BT 163490	La Garouille	X=703260.0 Y=118830.0	X=704618.6 Y=117362.3	De 1988 à 1996 la barre externe disparaît en s'abaissant et migrant vers le large, alors que la barre interne vient prendre une position intermédiaire dans ce qui était anciennement la fosse externe. Cette nouvelle barre externe tend elle même à disparaître entre 1996 et 2002 alors que la nouvelle barre interne tend à reculer.
BT 161990	Le Jalabert	X=702235.9 Y=117744.1	X=703650.1 Y=116329.9	Même schéma évolutif que le profil précédent alors que la nouvelle barre externe créée en 1996 reste stable jusqu'en 2002.
BT 160435	Le Castellas	X=701220.0 Y=116580.0	X=702670.0 Y=115202.5	Dégénérescence complète de la barre externe entre 1988 et 2002 (affaissement de plus de 2 m et migration vers le large de 200 m), alors que la barre interne migre vers le large de 200 m.
BT 157890	Les Dunes	X=699509.1 Y=114682.1	X=701106.4 Y=113478.5	Dégénérescence de la barre externe entre 1996 et 2002, oscillation d'une barre intermédiaire formée en 1996 se retrouvant dans sa position la plus reculée lorsque la barre externe disparaît complètement.

Tabl. 2 : Position des profils et description de leur évolution morphologique depuis 1988

D'après ces résultats se dessine une évolution homogène sur l'ensemble des profils du système de barres (Fig. 7) : la barre externe semble s'évanouir vers le large en s'affaissant et en reculant alors que simultanément la barre interne vient

prendre une position intermédiaire au niveau de l'ancienne fosse externe sur une période de 10 ans.

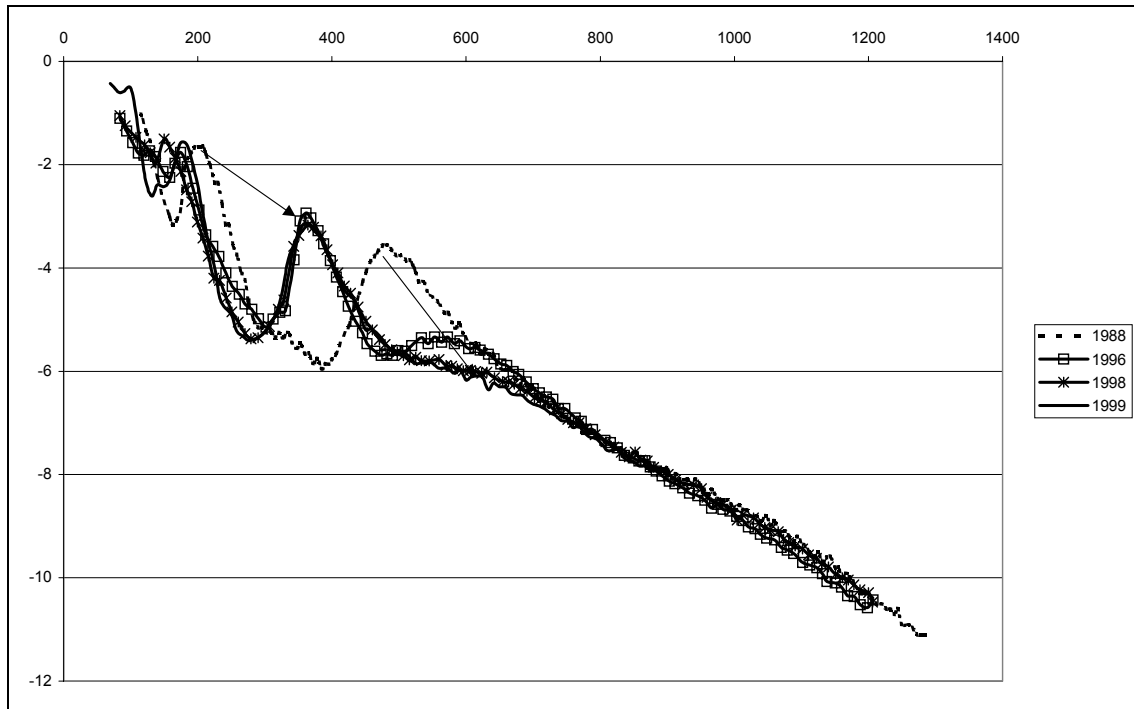


Fig. 7 : Evolution synthétique d'un profil bathymétrique au sud du lido de l'étang de Thau.

#### 2.2.2.2. Evolution du site de Sète

Il est nécessaire de présenter les résultats obtenus aussi bien en ce qui concerne le domaine émergé de la zone littorale que son avant-côte car l'objectif du programme LITEAU sur l'utilisation des barres sédimentaires dans la lutte contre l'érosion côtière implique que les relations entre les deux domaines soient précisées. Le domaine sous-marin puis la plage seront donc examinés successivement grâce au suivi et aux études détaillées (You, 2000 ; Certain, 2002) réalisés sur 11 profils topobathymétriques entre les limites 1 et 11 (Fig. 2).

##### 2.2.2.2.1. Le domaine sous-marin

###### a. La tendance globale

Durant la totalité du suivi de 1989 à 2000 l'avant-côte a perdu du sédiment (Tabl. 3).

	Engraissement (m <sup>3</sup> )	Erosion (m <sup>3</sup> )	Bilan (m <sup>3</sup> )
Bilan du 18/05/1989	31200	48400	-17200

au 25/11/2000			
---------------	--	--	--

Tabl. 3 : Bilan volumétrique sur l'avant-côte du site de Sète pour la totalité du suivi.

b. Différenciation nord-sud du site

Une singularité du site de Sète s'impose d'emblée. Le suivi décennal montre une dualité évolutive entre le nord et le sud du site, avec une zone charnière confuse balayant un espace de 150 m entre les profils P5 et P8. La nécessité du découpage concerne les caractères des barres dont les différences morphodynamiques apparaissent sur deux profils, témoins respectifs des parties nord (P2) et sud (P10), à des dates significatives des observations (Fig. 8 et 9).

Au sud, l'évolution morphologique de la barre externe en termes de hauteur et d'éloignement du bord montre un caractère oscillant (Fig. 8 et Tabl. 4). Toutefois, plusieurs tendances doivent être notées :

- un abaissement et un éloignement de la barre externe aboutissant à sa disparition
- un recul de la barre interne

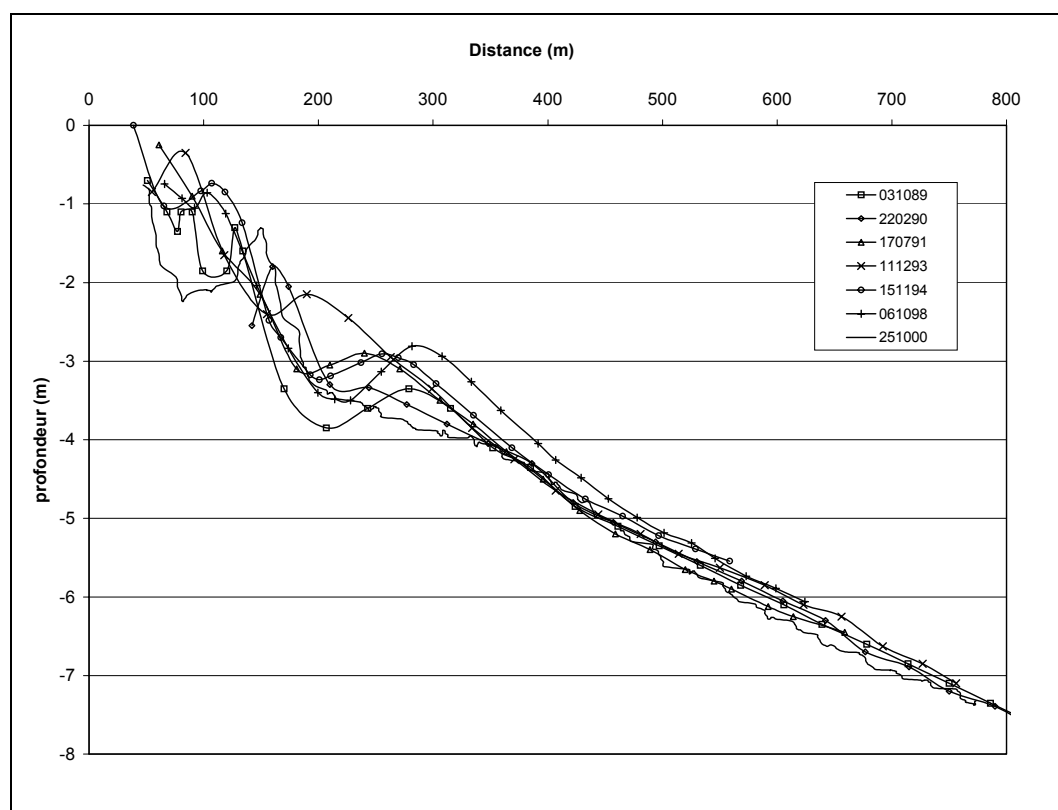


Fig. 8 : Evolution bathymétrique du profil 10 de 1989 à 2000

1989-1990	1990-1991	1993	1994	1998	1998-2000
-----------	-----------	------	------	------	-----------

hauteur	-	+	+	-	+	-
éloignement	-	=	-	+	+	-

Tabl. 4 : Evolution morphologique de la barre externe en P10 de 1989 à 2000. Les gains de hauteur ainsi que l'éloignement vers le large sont symbolisés par le signe +, l'inverse par le signe -, l'identité par le signe =.

Au nord, des variations de hauteur et de distance au rivage des deux barres avec des phases conséquentes de comblement ou de vidange de la fosse externe sont également observées (Fig. 9), mais avec une différence remarquable, notamment de la barre externe, dont l'évolution ne se marque pas par une dégénérescence progressive, comme dans le compartiment SW, mais, au contraire, par une tendance à revenir vers la côte.

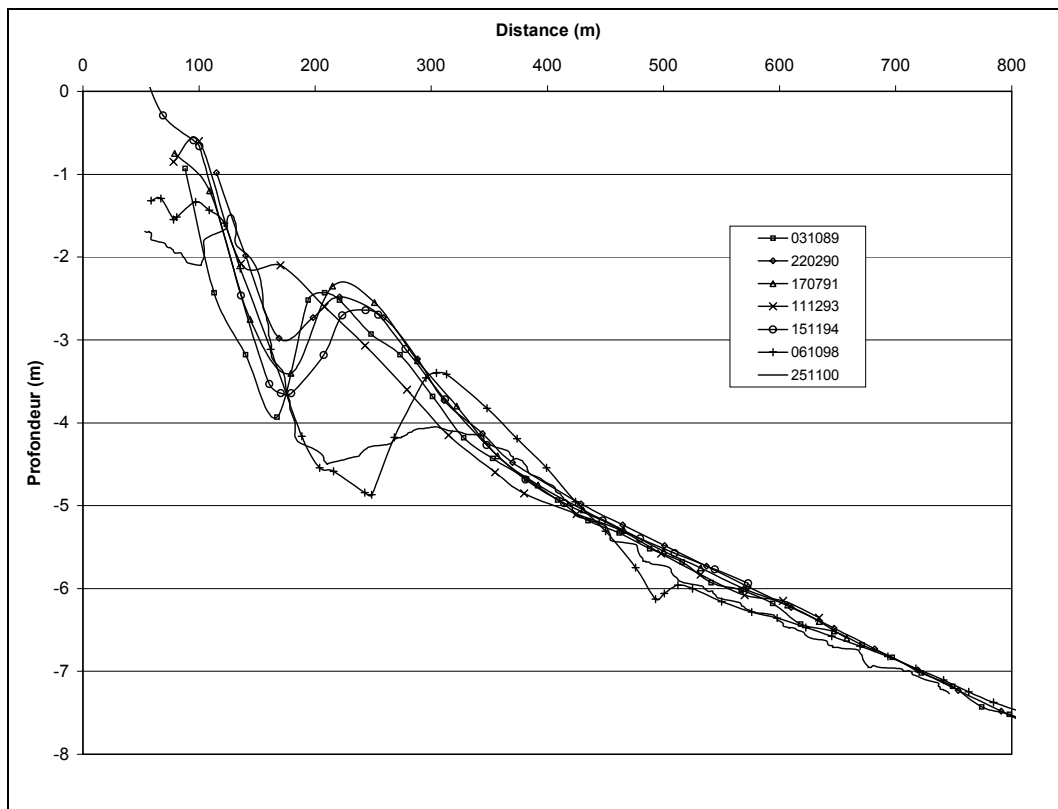


Fig. 9 : Evolution bathymétrique du profil 2 de 1989 à 2000

En résumé, l'évolution de la barre externe suit de grandes phases communes pour les deux parties nord et sud du site de Sète, mais les mouvements sont différents en sens et en amplitude. Au sud, la dégénérescence de la barre externe est observée alors qu'elle tend à revenir vers la côte au nord en commençant à colmater la fosse externe

En fin de compte, le site de Sète paraît avoir, dans sa partie sud, un mode de fonctionnement conforme au modèle prévalent sur l'ensemble du lido, tandis que le compartiment le plus au nord obéit à une autre logique. Cette spécificité a été



analysée à partir des modèles numériques de terrain réalisés au cours des 30 levés exploités.

### c. Morphodynamique pour le site de Sète

Sept phases d'évolution morphologique sont chronologiquement distinguées entre 1989 et 2000 en réponse au régime d'agitation. Elles sont représentées chacune par une date caractéristique sur la figure 10 et décrites dans le tableau 5.

L'évolution morphologique des barres (position et relief, forme et orientation) 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. Cependant l'histoire météorologique joue un rôle important. Non seulement la force des coups de mer mais aussi leur écart ou leur répétition (et, dans ce cas, leurs forces relatives) sont des facteurs de variabilité. Sur ces barres, le plus souvent rectilignes, s'amorce parfois une esquisse de festonnement.

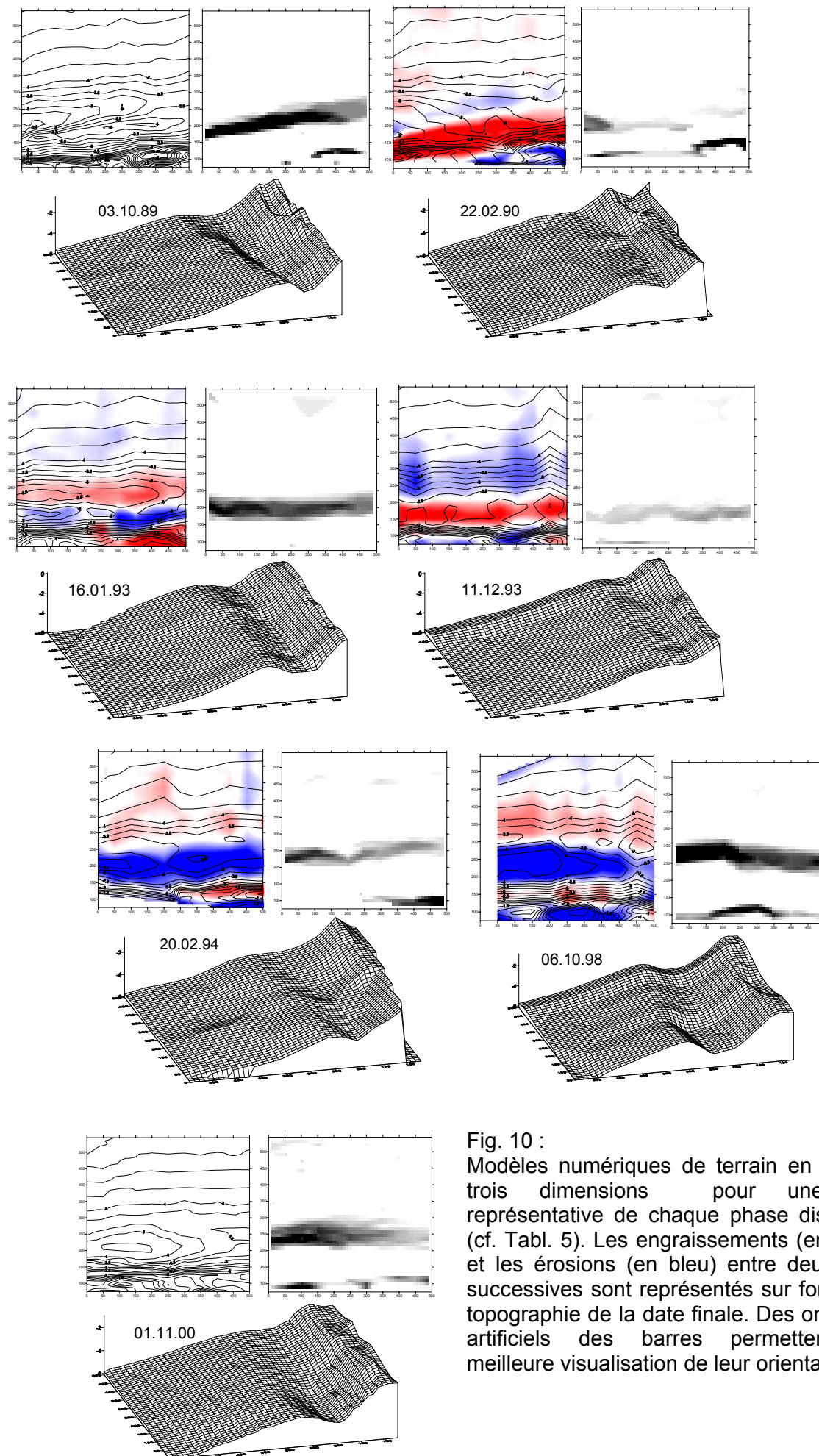


Fig. 10 :  
Modèles numériques de terrain en deux et trois dimensions pour une date représentative de chaque phase distinguée (cf. Tabl. 5). Les engraisements (en rouge) et les érosions (en bleu) entre deux dates successives sont représentés sur fond de la topographie de la date finale. Des ombrages artificiels des barres permettent une meilleure visualisation de leur orientation.

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	Déstructurée 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 ▲▲▲▲▲▲▲▲ ▲▲▲	Déstructurée 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 contre 3,25 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 25/11/2000 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

Tabl. 5 : 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.

La fosse inter-barres s'avère également un bon marqueur d'évolution morphodynamique. Son creusement, voire son sur-creusement, ou son comblement transcrivent, tour à tour, le déplacement des barres ou leur déformation.

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 accentuée, d'un côté, la différenciation NE/SW des deux compartiments et, de l'autre, entraîne un état d'équilibre nouveau qui, en quelque sorte, désensibilise la zone littorale par rapport à des coups de mer postérieurs moins actifs. Ainsi, les coups de mer de décembre 1998 et novembre 1999 n'aggravent pas la situation héritée.

Les changements morphologiques se produisant entre deux phases successives impliquent des déplacements de sédiments de plusieurs dizaines de milliers de m<sup>3</sup> (Tabl. 6 et Fig. 10).

<b>Dates considérées</b>	<b>Engraissement (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Erosion (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Bilan (m<sup>3</sup>)</b>
Du 03/10/1989 au 22/02/1990	39600	5400	34200
Du 22/02/1990 au 17/07/1991	22900	10600	12300
Du 17/07/1991 au 11/12/1993	21600	3300	18300
Du 11/12/1993 au 20/02/1994	4100	47100	-43000
Du 20/02/1994 au 06/10/1998	3700	59800	-56100
Du 06/10/1998 au 25/11/2000	22800	16600	6200

Tabl. 6 : Volumes déplacés entre les différentes périodes et bilan pour l'ensemble de la zone.

#### 2.2.2.2. La plage

Si l'on considère l'évolution de 1989 à 2000, la tendance à l'érosion est confirmée, illustrée sur la figure 11 par le profil 1 au NE, où elle est maximale : le bas de plage s'est abaissé d'environ 1,50 m et le haut de plage de 0,50 m. D'une manière générale, à l'échelle décennale, chaque profil reproduit peu ou prou cette évolution avec un écart du faisceau en bas de plage qui correspond généralement à une variation d'environ un mètre.

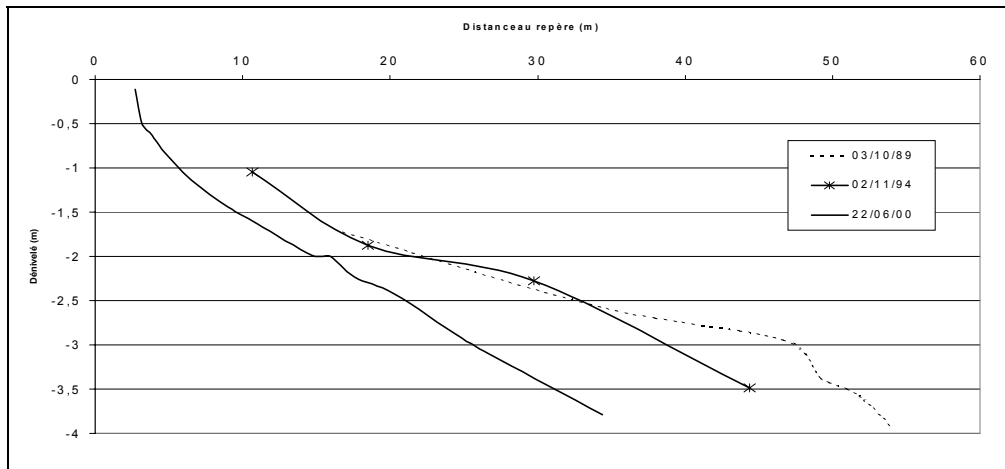


Fig. 11 : Evolution topographique du profil 1 de 1989 à 2000.

Dans l'espace, la variabilité instantanée reproduit la variabilité temporelle observée sur chaque profil (Fig. 12). Si l'ensemble des profils est assimilé à un signal, la variabilité décennale sur un profil donné est similaire au bruit instantané sur l'ensemble de la zone.

Au total, la perte de volume pour l'ensemble du site représente  $3400 \pm 1600 \text{ m}^3$ .

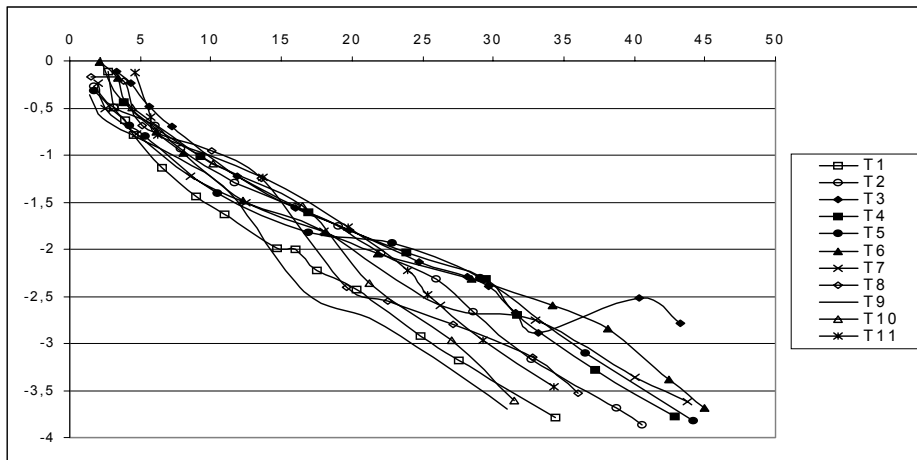


Fig. 12 : Profils topographiques 1 à 11 du 22 juin 2000.

Cette tendance globale à l'érosion est confirmée par l'analyse de la largeur de la plage et de la position du trait de côte (Fig. 13) qui a reculé en moyenne de dix mètres au cours des dix années de suivi. Ce taux de recul correspond à celui calculé (50 m) par le BCEOM à partir de photos aériennes pour les cinquante dernières années.

La distinction claire de deux secteurs bathymétriques nord et sud n'est pas retrouvée dans cette figure. Par contre, c'est dans la zone charnière centrale que s'observe une moindre instabilité de la position du trait de côte (10 m contre 20 à 30 m de part et d'autre).

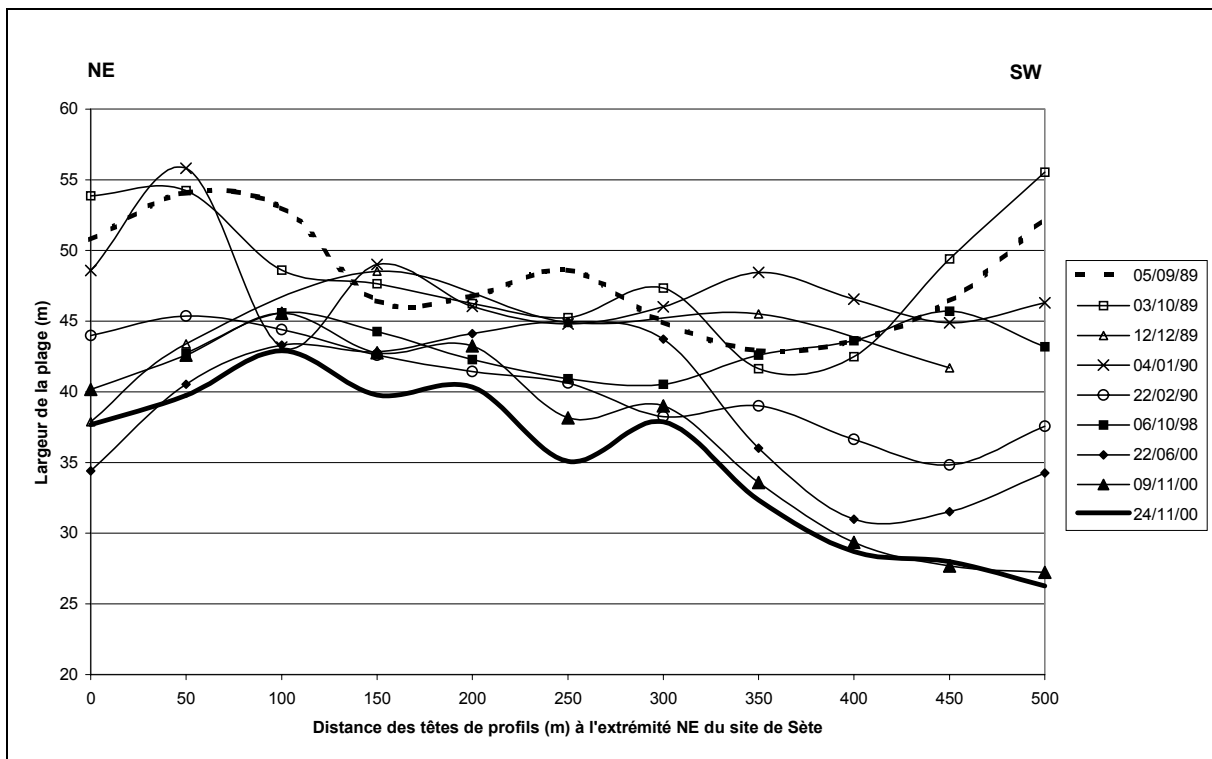


Fig. 13 : Evolution de la position du trait de côte de septembre 1989 à novembre 2000.

#### 2.2.2.2.3. Les relations entre les domaines immergé et émergé

Il existe une relation très constante entre la largeur de la plage et la position de la barre interne (Fig. 14). Sur la plage, la partie centrale de la zone est élargie (cf. aussi T5 et T6 sur la figure 15), contrairement à ses extrémités (T1 et T11). Sur l'avant-côte, cette même partie centrale est occupée par la barre interne accolée à la plage en début de phase (Tabl. 5). L'accolement provoque donc l'élargissement, processus observé régulièrement qui fournit une clé de compréhension d'une modalité entraînant la variation de largeur de la plage. D'ailleurs, à l'inverse, durant l'automne 2000, la barre interne s'est éloignée et la plage est étroite. La barre interne très peu marquée après l'été avec un comblement de la fosse interne, recule vers le large de manière rectiligne et uniforme au fur et à mesure des coups de mer automnaux (Fig. 16). Ces changements se traduisent par des engraissements et des érosions différentielles (Fig. 17) entre le début et la fin du suivi : érosion généralisée de la fosse interne avec le recul de la barre interne et érosion de la crête de la barre externe avec le dépôt de sable sur son revers presque au pied du glacis. Tout le système de barres migre vers le large.

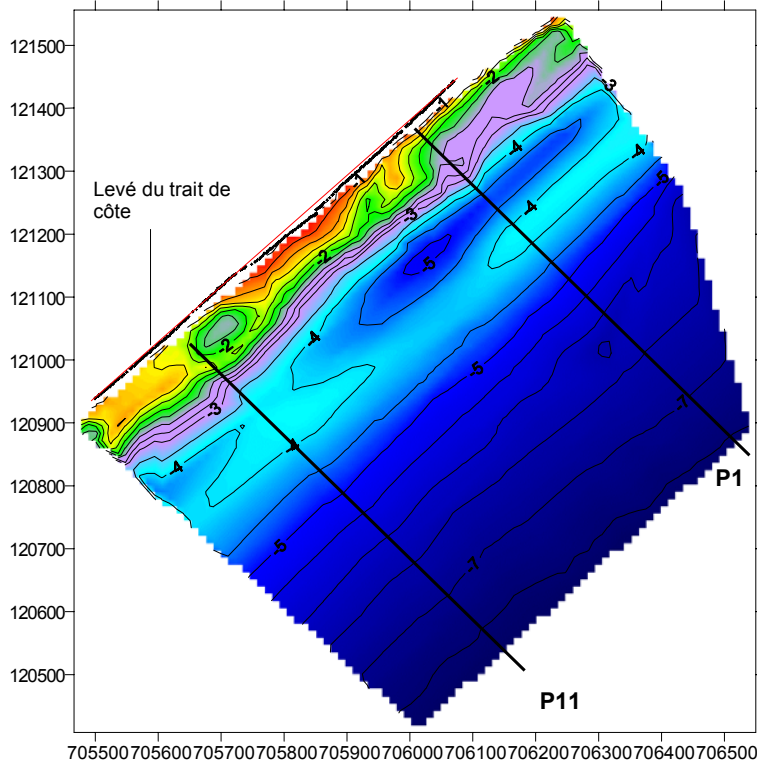


Fig. 14 : Bathymétrie de la plage sous-marine le 28/07/2000 en coordonnées Lambert 3. La position du trait de côte est représentée en noir, montrant une avancée locale par rapport au tracé rectiligne idéal (en rouge) dans la zone d'accolement de la barre interne (petits fonds en rouge)

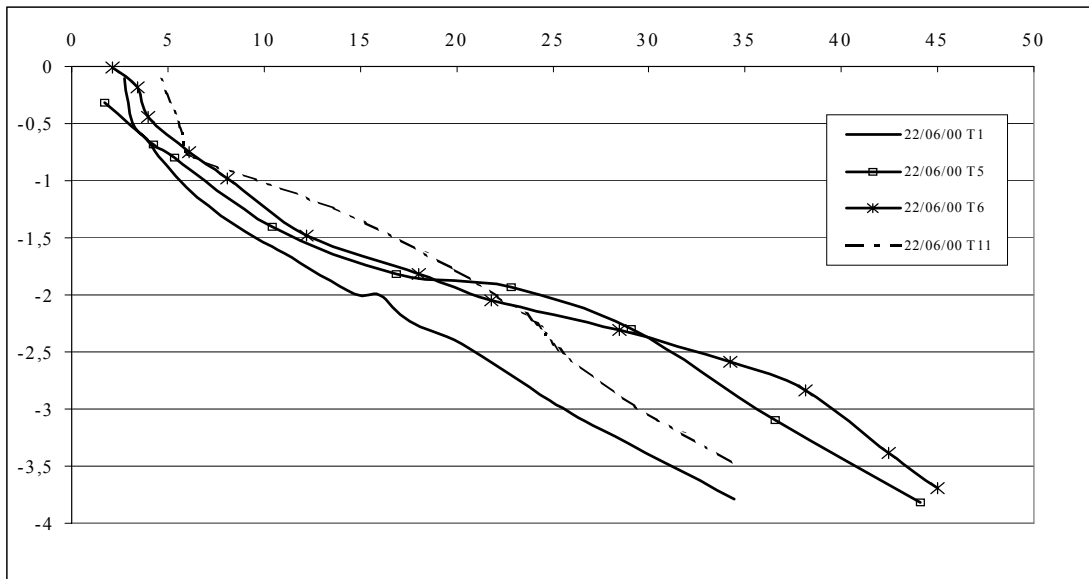


Fig. 15 : Evolution morphologique des profils 1, 5, 6 et 11 du 22/06/2000.

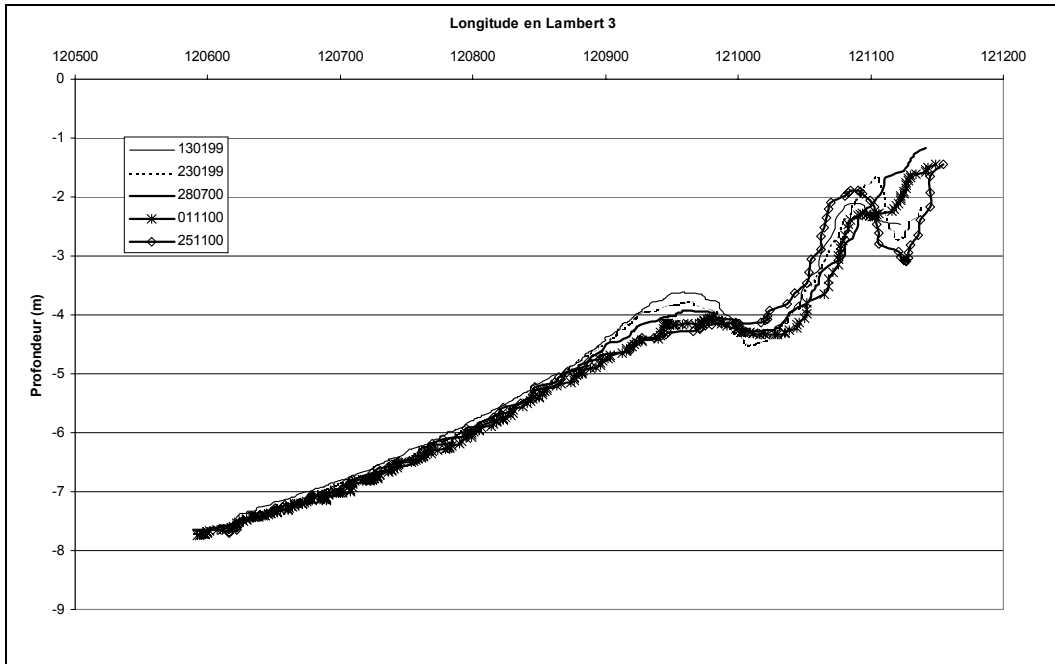


Fig. 16 : Evolution d'un profil (P8) depuis une situation hivernale (janvier 1999) jusqu'à une position estivale (été 2000), avec retour aux conditions hivernales au cours de l'automne 2000.

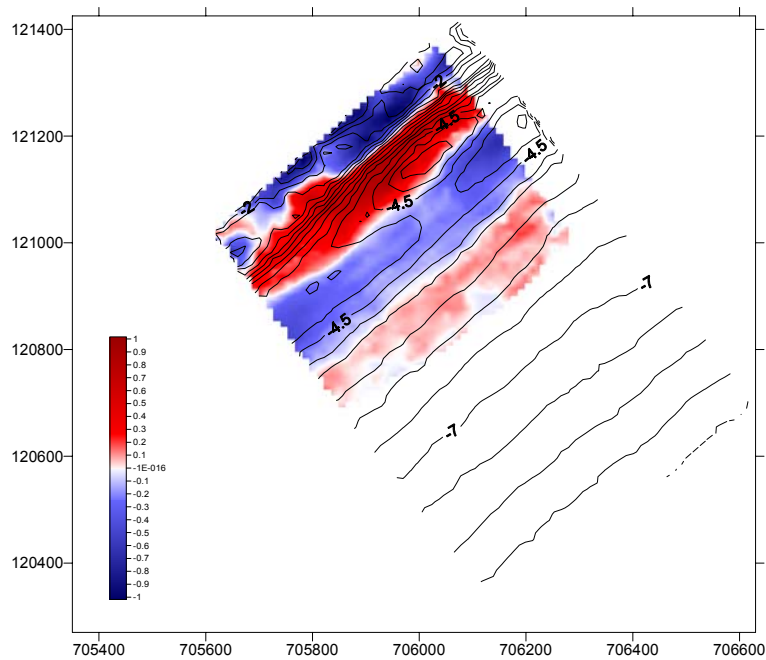


Fig. 17 : Localisation des changements morphologiques entre le début (le 1<sup>er</sup> novembre 2000) et la fin de la période d'étude (le 4 décembre 2000)



## Conclusion :

Le prisme littoral du lido de l'étang de Thau subit une évolution morphologique cyclique répondant au modèle « migration/atténuation de la barre externe vers le large ».

Dans le compartiment le plus au NE du site de Sète, ce schéma évolutif n'est toutefois pas observé. On y voit au contraire s'amorcer un processus de forte érosion marqué par un surcreusement de la fosse externe et un recul important du trait de côte.

A cet égard, la largeur de la plage paraît étroitement corrélée à la position de la barre interne par sa dynamique transversale saisonnière.

## 2.3. Synthèse

Les observations et mesures réalisées au cours du suivi de 11 ans sur le site conduisent à décrire la morphodynamique selon deux modalités qui s'inscrivent chacune dans des échelles de temps différentes.

### 2.3.1. Le modèle N.O.M

Le mode d'évolution le plus caractéristique de l'avant-côte et la plage du lido de l'étang de Thau montre que la barre externe est remplacée, à la suite de sa disparition progressive vers le large, par la barre interne. Cette dernière vient prendre position alors qu'une nouvelle barre interne proche de la côte se crée. Ce schéma N.O.M *net offshore migration* (Winjberg, 1995) survient, à Sète, lors d'une série d'événements singuliers (tempêtes de l'hiver 95-96 et tempête de décembre 1997). Les barres reculent fortement, la barre externe notamment enregistre un important recul compris entre 70 et 90 mètres sur l'ensemble des profils, et un abaissement compris entre 0,3 et 1 m. Soumise alors à l'action des houles plus faibles de tempêtes « ordinaires », elle perd du matériel vers la côte au profit de la barre interne sous l'effet de l'asymétrie des vagues et s'abaisse progressivement. Sa disparition s'observe en quelques années (3 à 5, par exemple, lors du dernier événement constaté, entre 1995 et 2000). Pendant ce temps, la barre interne, nourrie par le matériel récupéré, mais plus exposée aux effets des coups de mer, recule encore et vient progressivement occuper une position de barre externe.

En quelques années après l'événement déclencheur, la disposition standard est restaurée et un second épisode s'ouvre alors pendant lequel les barres moins mobiles oscillent autour de leur position d'équilibre, selon un modèle que l'on appellera O.P.E.

### 2.3.2. La modalité d'oscillations autour d'une position d'équilibre (O.P.E)

Au terme de l'épisode de *net offshore migration*, on entre dans une période différente au cours de laquelle l'évolution se limite à un « bruit » que représentent les nombreuses oscillations autour d'une position « instantanée » d'équilibre en fonction des rythmes énergétiques de la houle (Akouango, 1997).

Globalement, durant les saisons de faible énergie, la plage s'engraisse et les barres s'approchent du rivage. L'inverse se produit lors des saisons de forte énergie. En fait, la

barre externe est peu sujette à ces variations, contrairement à la barre interne. En été, les faibles houles sont actives sur cette dernière, leurs courants de retour faibles ne permettent pas d'exporter du matériel vers le large ; au contraire les courants de houle induisent un écoulement vers le bord qui remonte du matériel vers la plage. 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. 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.

A l'échelle décennale, le système varie aussi autour d'une position d'équilibre « dynamique », les changements d'états résultent de coups de mer de hauteur significative supérieure à 4 mètres. La barre externe oscille faiblement, passant d'une position rectiligne à oblique ou plus sinueuse. D'importants volumes de sédiments de l'ordre de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup> sont mis en jeu.

Ce schéma simple d'oscillations, rythmées par la succession des états de la mer, peut cependant être perturbé par un déplacement de la barre externe lors de situations de faible agitation pendant une longue durée (par exemple, en 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 d'équilibre.

### 2.3.3. La chronologie des modèles

Il est clair que la mise en évidence de deux modes distincts de fonctionnement (N.O.M et O.P.E) s'accompagne nécessairement d'une temporalité. En effet, les deux modes se succèdent. On a vu que le premier correspond à une durée de quelques années, découpée en une période très courte de déséquilibre (une tempête exceptionnelle 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 second, 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 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.

### 2.3.4. Les particularités du site de Sète

On a observé qu'à Sète les parties NE et SW montrent des différences remarquables aussi bien au cours de l'un comme de l'autre des épisodes de fonctionnement.

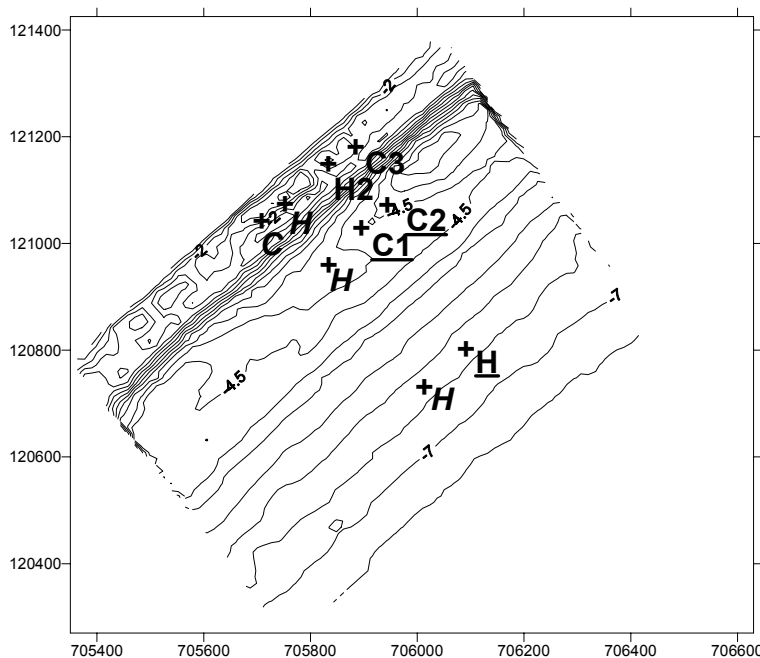
Le compartiment SW réagit en effet selon le standard de l'ensemble de l'avant-côte du lido. Il évolue en mode N.O.M après les évènements de 95-97 et en mode O.P.E le reste du temps. Par contre, le compartiment NE a un tout autre mode de fonctionnement. Bien qu'il réagisse par un très important recul après 95-97, la suite de l'évolution ne montre aucune dégénérescence vers le large mais bien, au contraire, un retour vers la position d'équilibre par migration de forme vers la côte. Sur la figure 9, le démarrage de cette modalité de retour se manifeste, en particulier, par un début de colmatage de la fosse externe.

En période d'O.P.E, la distinction de deux compartiments du site est moins nette, seulement marquée temporairement par des avancées plus prononcées vers la côte de la barre externe qui apparaît toujours plus mobile au SW qu'au NE (Fig.10 ; 3 octobre 1989 et 20 février 1994). Il faut chercher dans la disponibilité en sédiments la raison à cette particularité de la partie NE du site de Sète. Cet aspect ne sera pas abordé dans le présent rapport. Il n'est cependant pas accessoire car la déficience des ressources sédimentaires propres du prisme littoral (c'est-à-dire sa capacité d'autosuffisance à offrir des réserves sableuses héritées des épisodes antérieurs de l'histoire fini-holocène des zones de rivage) est une circonstance aggravante de leur vulnérabilité. Mais, dans le contexte de la recherche contractuelle établie pour LITEAU, cet aspect n'était pas encore clairement perçu au moment de la proposition et il est nécessaire de commencer par l'étude de cas moins complexes.

### III. LES DONNEES DISPONIBLES

Après avoir examiné le mode de fonctionnement du site expérimental, ce qui revient à l'observer dans un cadre de temps pluriannuel, il convient de recenser les données d'entrée des modèles utilisables au service de la thématique de ce programme de LITEAU. Plusieurs expériences complètes, réunissant recueil des données hydrodynamiques, morphologiques et sédimentologiques, ont été dénombrées.

La méthodologie a consisté à placer le plus grand nombre possible d'appareils de mesures hydrodynamiques sur le site (Fig. 18). La réalisation de couvertures topobathymétriques régulières, avant et après chaque coup de mer, permet d'identifier les changements morphologiques induits.



## 1. Le domaine sous-marin

Le forçage hydrodynamique provoque une évolution morphologique des barres, qui peut être considérée d'un point de vue qualitatif (déformations et déplacements des barres) et quantitatif (volumes échangés). La cause et ses conséquences seront successivement envisagées.

### 1.1. Le forçage hydrodynamique

Il s'agit ici de définir les variations affectant les niveaux, les houles et les courants dans le système des barres.

#### 1.1.1. Les facteurs de contrôle du niveau moyen

Une élévation de la hauteur d'eau au-dessus des capteurs au bord et au large est observée lors des coups de mer. La variation est plus forte à la côte avec une pente de 0,1% du bord vers le large, expression cumulée des effets du « set-up » et de la surcote.

Cependant, cette relation ne s'observe pas lors de tous les coups de mer. L'analyse détaillée de la situation pour la seconde moitié du mois de janvier 1999 dans la fosse interne le montre (Fig. 19b). On voit par exemple que les deux coups de mer enregistrés (Fig. 19a) ne sont pas également représentés par le niveau instantané (Fig. 19b). Le premier est immédiatement répercuté mais pas le second car une sorte de rémanence existe qui peut provenir de deux causes locales : les changements de pression atmosphérique et l'action du vent. Toutefois, la corrélation avec ces deux facteurs n'est pas directe non plus ( Fig. 19d, f et h). Par exemple, un minimum de pression atmosphérique peut s'accompagner d'une baisse du niveau marin. De même, le niveau reste élevé le 24 et le 25 janvier alors que le vent de mer ne souffle plus et que la pression reste très forte.

Finalement, on voit donc que le niveau moyen exprime la résultante multifactorielle d'un système causal complexe. Seule, la répétition de campagnes de mesures nombreuses pourrait élucider la relation et le poids respectif de chaque variable. Ce travail reste à faire.

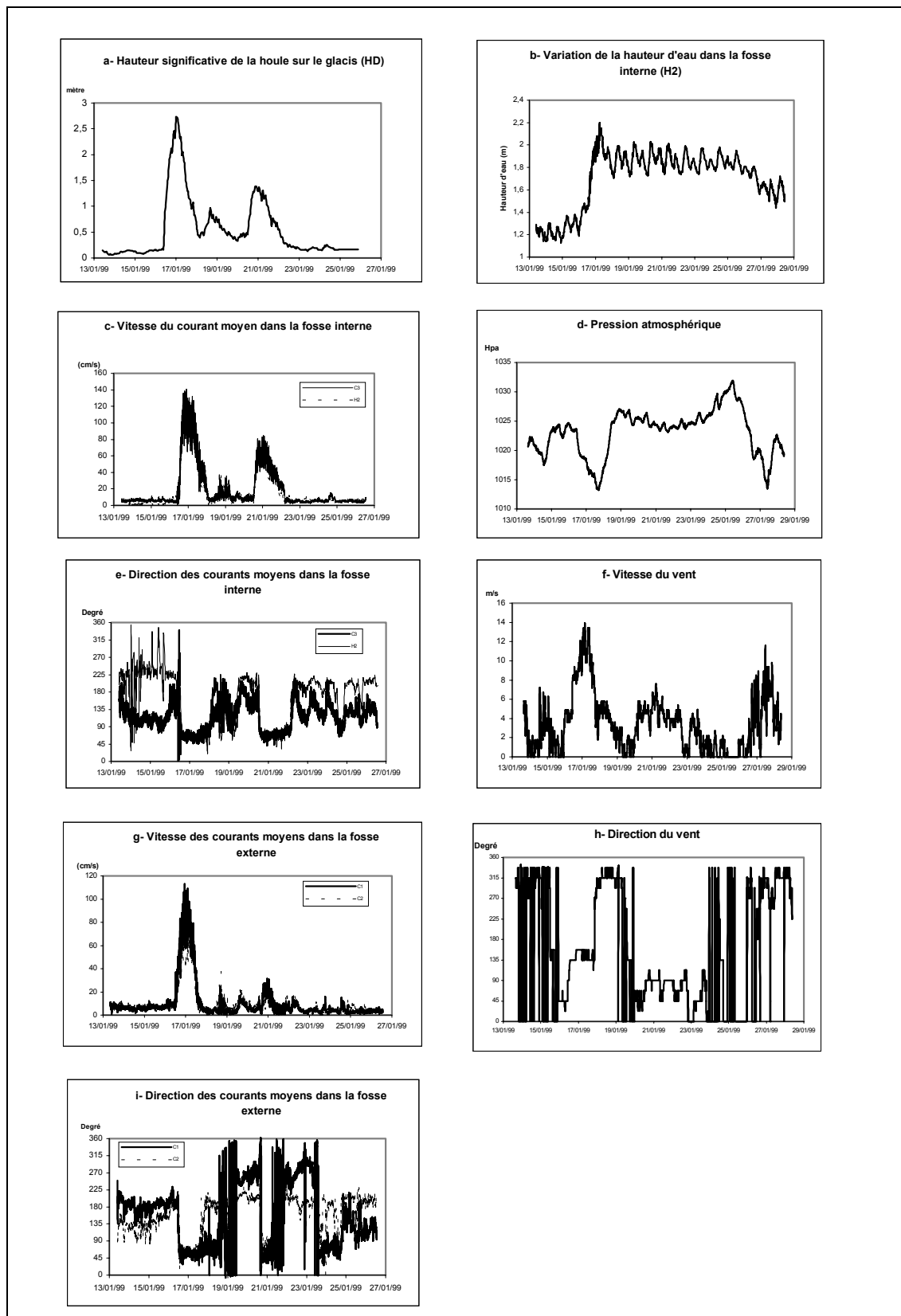


Fig. 19 : Contexte météomarin général au cours de la campagne de mesures de 1999.

### 1.1.2. La houle et la courantologie générale

Le régime de houle est marqué par la succession de deux types de temps radicalement distincts : beau temps et tempête (Fig.19a). En conséquence, les courants induits sont variables comme le montre la série de mesures présentée dans le tableau 7 et relative à la campagne de 1999. On y observe qu'aussi bien les composantes transversale que longitudinale, quel que soit leur sens, sont notablement plus fortes en période de tempête qu'en période de beau temps.

	MAUVAIS TEMPS				BEAU TEMPS			
	Du 16/01 à 17h au 17/01 à 10h		Du 20/01 à 16h au 22/01 à 2h		Du 13/01 à 12h au 16/01 à 1h		Du 24/01 à 0h au 26/01 à 6h	
	Trans.	Long.	Trans.	Long.	Trans.	Long.	Trans.	Long.
H2 (fosse interne)	-23	98	-13	38	-0,1	-2	-3	-4
C3 (fosse interne)	-24	100	-15	43	-5	3	-5	2
C1 (fosse externe)	-8	73	-1	6	-4	-4	-2	2
C2 (fosse externe)	-12	62	-4	1,5	-7	1	-2,5	-3
HD (glacis)	-5	37	1,5	-0,5	-0,3	3	-2	2

Tabl. 7 : Vitesses en cm/s des composantes moyennes transversales (+ vers la côte, en direction du NW, - vers le large, en direction du SE) et longitudinales (+ vers le NE, - vers le SW) des courants en période de mauvais temps et de beau temps, lors de la campagne de 1999.

En période de beau temps, le vent est faible ou, s'il est fort, il provient de la terre, les courants sont alors peu importants et peuvent avoir des directions très variables dans le temps et l'espace.

Lors de la montée en puissance d'un coup de mer, le courant de dérive parallèle à la plage ne se met pas en place de manière uniforme et synchrone sur toute la zone. La réorganisation du champ de courant passe par l'uniformisation préliminaire des directions d'écoulement vers le bord sous l'action du courant de houle, puis par l'établissement d'un courant de retour vers le large qui prend ensuite une orientation parallèle aux fosses qui le canalisent (Fig. 19e et i). Ce courant de dérive est d'abord observé dans la fosse interne lorsque la houle est faible (de l'ordre de 0,5 m de hauteur significative dans la fosse interne et de 1 m au pied du glacis), puis dans la fosse externe lorsque la houle augmente. A ce moment s'établit sur toute la zone un écoulement où dominent majoritairement les directions parallèles aux fosses et minoritairement les composantes vers le large. Le courant moyen qui en résulte est bien représentée sur la Fig. 20 qui illustre des situations de tempêtes en novembre 2000.

Lors du plein de la tempête, la houle induit des courants de dérive qui peuvent être de sens opposés en fonction du quadrant dont elle provient. L'intensité des

courants varie pour la fosse interne entre 40 et 100 cm/s pour le courant longitudinal et entre 15 et 25 cm/s pour le courant transversal. Dans la fosse externe ces valeurs sont minorées. Le courant de dérive est maximum dans les fosses de lévigation. Sur le glacis les ordres de grandeur se situent au maximum vers une quarantaine de cm/s mais sont le plus souvent très faibles (Tabl. 7).

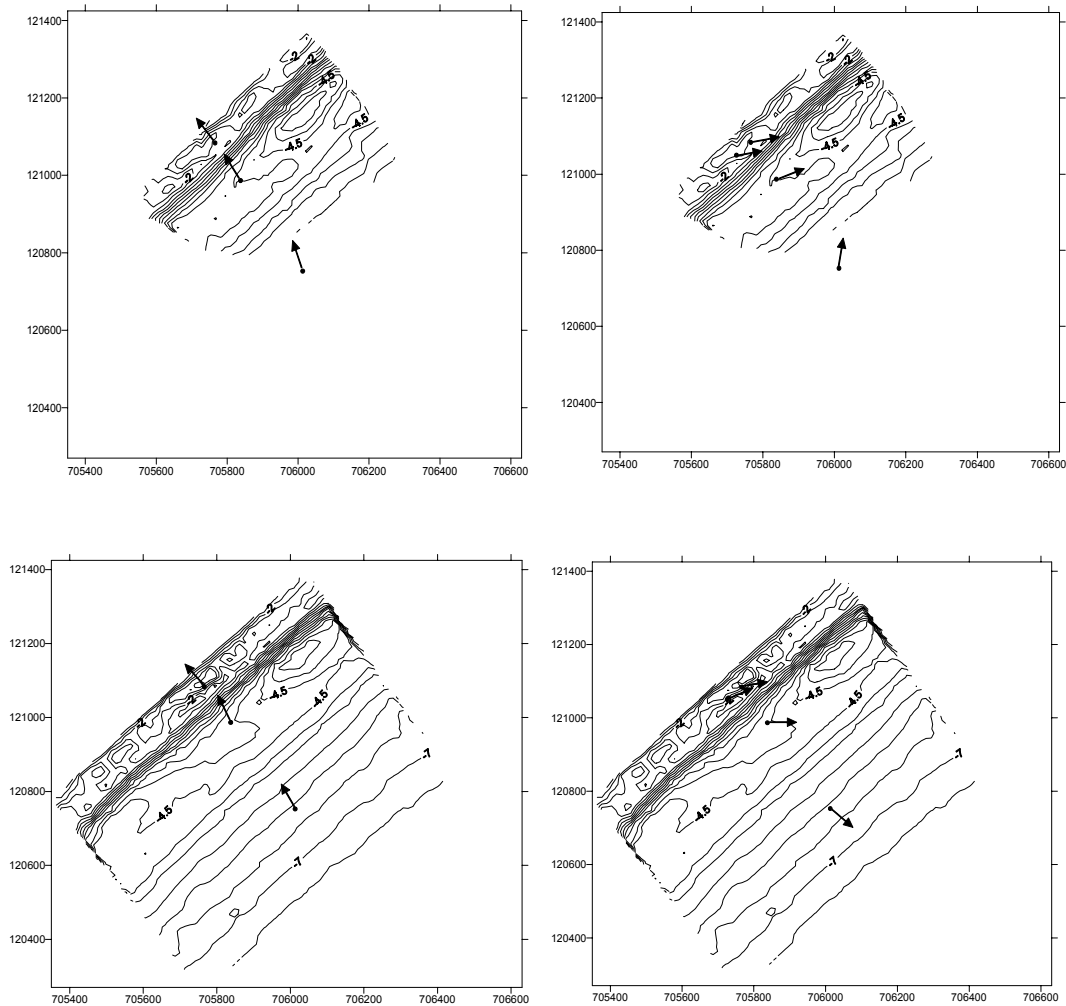


Fig. 20 : Direction de la houle de sud-est (à gauche) et des courants moyens (à droite) au niveau des trois points de mesures pour la tempête du 6 novembre 2000 en haut et pour celle du 12 novembre 2000, en bas, sur le site de Sète. On observe la réfraction de la houle au passage des barres.

En fin de coup de mer, lorsque le vent est tombé et que la houle résiduelle s'affaiblit, le courant de houle s'exprime en direction de la côte, capable alors de remonter du sédiment vers la plage. On observe alors régulièrement des accumulations de sable fraîchement déposé sur la berme, identifiable à son caractère meuble en raison de l'existence d'un champ poral (*fabric*) non compacté, non ré-arrangé.



### 1.1.3. La déformation de la houle sur les barres

Il est fréquent de constater que la houle subit d'importantes modifications au passage des barres. C'est le cas pour la réfraction qui vient d'être décrite (Fig. 20), mais ces modifications peuvent aussi être beaucoup plus complexes avec, par exemple, la génération de vagues secondaires comme a pu l'observer Masselink (1998). Le spectre d'énergie des vagues est alors profondément modifié. Ce sont ces modifications que l'on a étudiées à Sète, à partir des données de la campagne de mesures de novembre 2000.

Plusieurs régimes de houles ont été identifiés. Lors des tempêtes, deux déferlements successifs peuvent se produire au passage des barres. Pour des houles plus petites, les vagues peuvent parvenir à la côte sans déferler ou seulement sur la barre interne. En fonction de ce critère visuel, dix situations peuvent être mises en évidence (Tabl. 8).

Situations rencontrées classées suivant l'agitation croissante du milieu	Type de conditions hydrodynamiques
Situation 1	Mer de vent sans houle associée
Situation 2	Oscillations de grande longueur d'onde et de grande période (10 s) mais de très faible amplitude (0,05 m)
Situation 3	Petite houle (0,2 m) non déferlante
Situation 4	Petite houle (0,2 m) non déferlante et mer de vent
Situation 5	Petite houle à déferlement occasionnel
Situation 6	Petite houle déferlante sur la barre interne
Situation 7	Amortissement de la houle de tempête avec déferlement
Situation 8	Grosse houle plongeante avec vent de terre
Situation 9	Mer de vent NE et clapot haché pré-tempête ; Déferlement généralisé d'une houle courte avec mer de vent
Situation 10	Tempête

Tabl. 8 : Types de conditions hydrodynamiques rencontrées sur le site de Sète

Seule la situation de maximum de tempête (situation 10) et quelques cas précurseurs montrant des transferts d'énergies dus à des interactions non-linéaires onde-onde seront exposés dans ce qui suit.

La figure 21 représente les hauteurs significatives de la houle, enregistrées au cours de la période d'étude de novembre 2000 en chacun des trois points de mesure : le glacis, la fosse externe et la fosse interne. Les trois premières tempêtes ont des

hauteurs significatives très proches (2,5 m), la quatrième est de plus faible intensité (2 m). Dans la fosse externe, après un premier déferlement sur la barre externe, les hauteurs significatives sont semblables pour tous les coups de mer (2 m). Dans la fosse interne, après un second déferlement sur la barre interne, les hauteurs sont également très proches pour l'ensemble des coups de mer, entre 0,7 et 1 m.

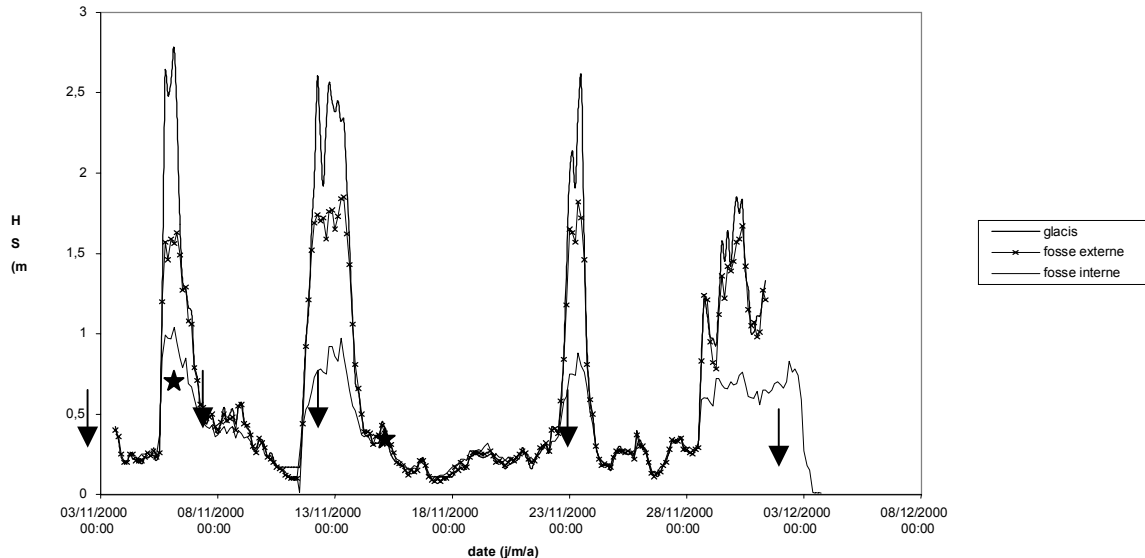


Fig. 21 : Hauteurs significatives de la houle au cours de la campagne de mesures, du 3 novembre au 3 décembre 2000. Les flèches correspondent aux dates de réalisation des bathymétries, les étoiles à celles de topographies des croissants (cf. partie morphologie).

L'observation visuelle des séries temporelles de hauteur est toutefois insuffisante pour mettre en évidence la spécificité des spectres de vagues pour chacune de ces tempêtes. Aussi, l'analyse et la comparaison de ces situations ont-elles été effectuées à l'aide de FFT réalisées sur 512 valeurs avec des fréquences de coupure entre 0,003 Hz et 0,40 Hz (300 s-2,5 s). Selon Munk (1951, dans O.M.M, 1989), la limite entre les vagues gravitaires et infragravitaires se situe autour de 30 s. Les vagues de gravité ont donc une période comprise entre 1 s et 30 s, tandis que la période des ondes infragravitaires se situe entre 30 et 300 s. Les fréquences de coupure adoptées sont proches de ces limites tout en choisissant une coupure haute (2,5 s) inférieure à celle proposée par Munk afin de limiter le bruitage. La figure 22 en présente les résultats pour chacun des maxima. Les différentes fréquences dans le spectre de houle sont exprimées en fonction de la densité spectrale d'énergie (dsp) en  $m^2/Hz$ .

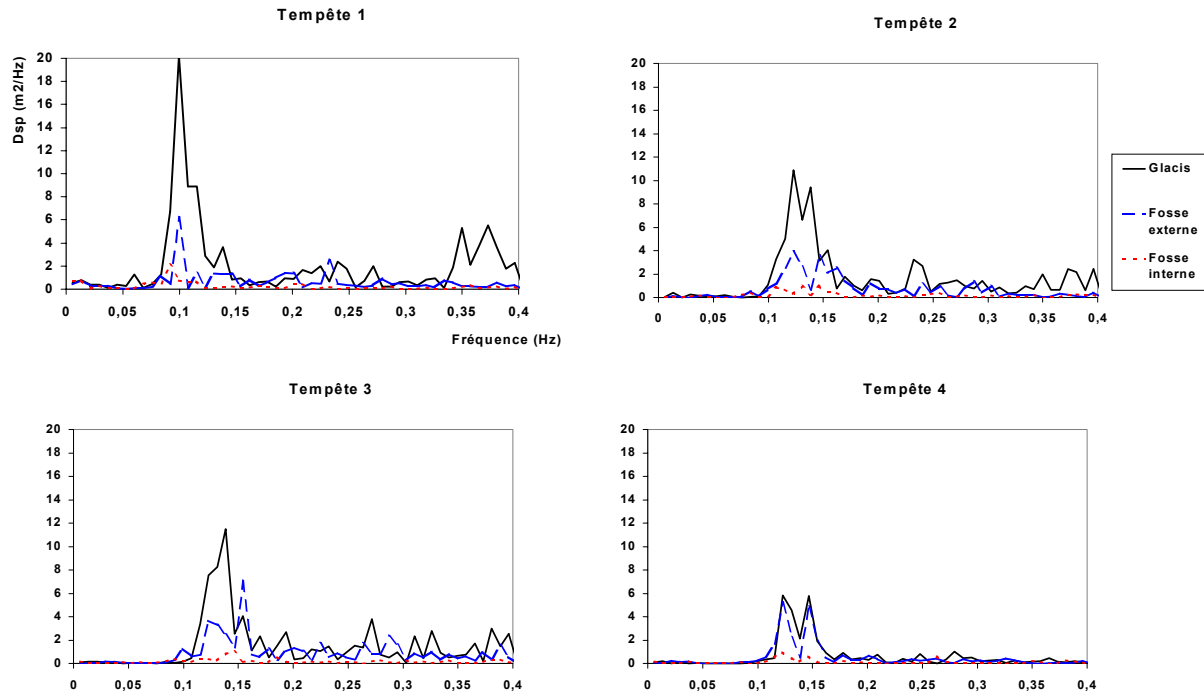


Fig. 22 : Spectre d'énergie pour les quatre maxima de tempête, au niveau du glacis, de la fosse externe et de la fosse interne.

La première tempête est la plus énergétique avec un pic principal à  $20 \text{ m}^2/\text{Hz}$ , par rapport à la deuxième et à la troisième qui ont un pic à  $11 \text{ m}^2/\text{Hz}$  et à la quatrième tempête à  $6 \text{ m}^2/\text{Hz}$  seulement. C'est aussi vrai si on considère l'intégrale des pics au lieu de leur maximum. La densité spectrale devient par contre sensiblement égale pour chacune des tempêtes si on se place après les points de déferlement dans la fosse externe (autour de  $5 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ) et dans la fosse interne (autour de  $1 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ), comme l'ont observé par ailleurs Guza et Thornton (1982).

Dans le domaine infragravitaire, la première tempête produit également le maximum d'énergie avec  $0,8 \text{ m}^2/\text{Hz}$ , contre  $0,2$  à  $0,4 \text{ m}^2/\text{Hz}$  pour les tempêtes suivantes. Pour la tempête 1, la valeur de l'énergie reste constante dans chacun des compartiments alors que le pic principal diminue, transférant de l'énergie vers ses sous-harmoniques. Pour les autres tempêtes les résultats sont si complexes et divers que l'interprétation de l'évolution du domaine infragravitaire est malaisée.

Pour mieux observer ces transferts, il convient donc de se placer dans des situations moins bruitées que la situation 10 (Tabl. 8), offrant des spectres moins larges et présentant plus d'uniformité de valeurs de densité spectrale dans les différents domaines. Ces régimes correspondent aux situations 2, 4, 6 et 8 (Tabl. 8) dans lesquelles on observe des transferts d'énergie du pic principal vers les harmoniques (Fig. 23).

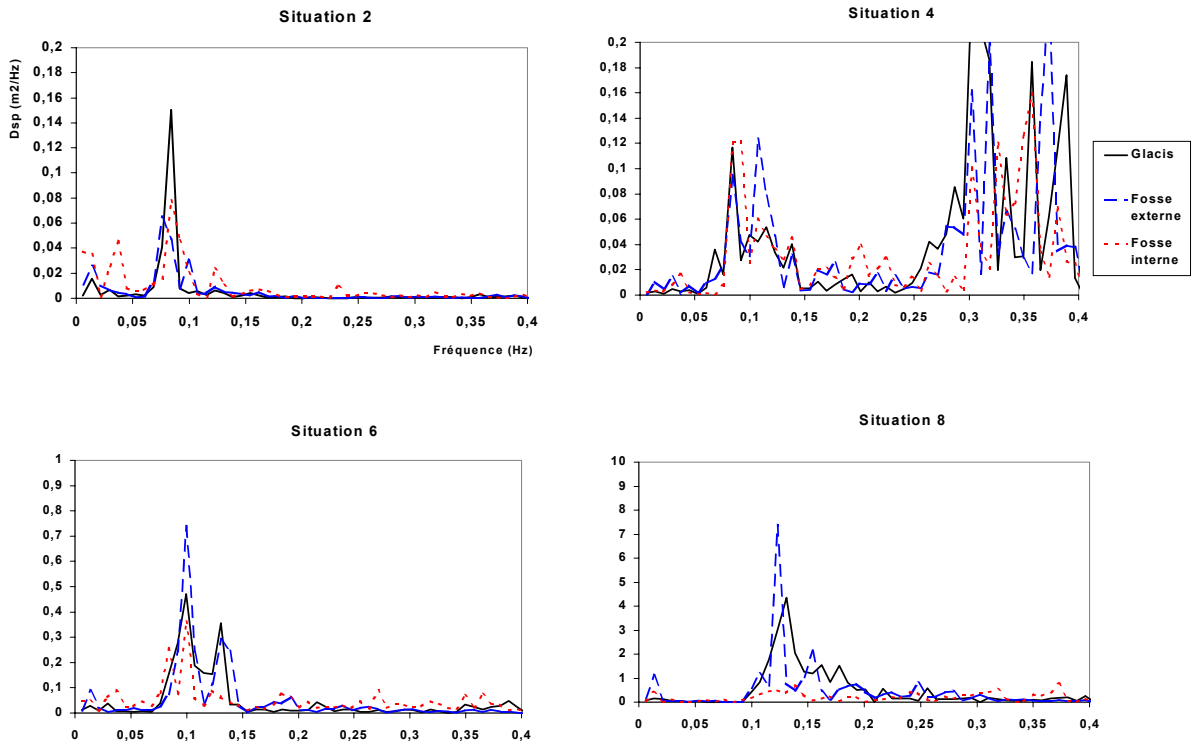


Fig. 23 : Spectre d'énergie pour quatre situations types, au niveau du glacis de la fosse externe et de la fosse interne. Pour une meilleure lisibilité, tous les graphiques ne sont pas à la même échelle.

Dans la situation 2 (petite houle non déferlante), un élargissement du pic principal (0,084 Hz) résulte du franchissement, sans déferlement, de la barre externe. Les deux pics résultants présents dans la fosse externe (0,075 et 0,1 Hz) sont en relation par interaction différence avec la valeur du pic de l'infragravité à 0,04 Hz dans la fosse interne. On peut supposer qu'il y a eu transfert d'énergie du domaine gravitaire vers les basses fréquences. On voit donc que l'infragravité est maximum au bord et minimum au niveau du glacis.

La situation 4 est sensiblement identique à la précédente bien que la densité spectrale dans les domaines infragravitaires soit plus faible. Par contre, on observe une forte énergie concentrée au niveau de la mer de vent entre 0,25 et 0,4 s.

La situation 6, à la fin de la première tempête, est nettement plus énergétique. Sur le glacis, on a deux pics principaux à 0,13 et 0,10 Hz, qui se retrouvent aussi dans la fosse externe. La densité spectrale des pics principaux est inchangée, aucun déferlement ne s'est produit sur la barre externe. Mais, de l'énergie infragravitaire commence à apparaître à une fréquence correspondant à l'interaction différence des deux pics libres principaux (0,03 Hz) dans la fosse externe. Lors du passage de la barre interne, la houle déferle et fait chuter la densité spectrale d'énergie des pics principaux. L'énergie infragravitaire, elle, augmente.

Dans la situation 8, un pic d'infragravité au bord, à 0,01 Hz, résulte de l'interaction différence de deux pics principaux (0,11 et 0,12 Hz) présents dans la fosse externe.

Dans le temps, on remarquera aussi qu'il y a un facteur 10 en terme de dsp, entre une situation où le déferlement commence à se produire et une situation de maximum de tempête et un facteur 100 entre celle-ci et une situation de houle non déferlante.

Sur l'avant-côte, la courantologie suit donc un schéma bien connu mais dont on a identifié ici le caractère évolutif dans le temps, en fonction du niveau énergétique de la houle. En outre, la houle est profondément modifiée au passage des barres qui jouent un rôle dans la régulation de l'énergie arrivant au bord. Les ondes infragravitaires semblent provenir de transferts d'énergie des pics principaux de la houle vers les basses fréquences par interaction différence onde-onde. Ces mécanismes qui paraissent importants ne sont pas encore pris en compte dans la majorité des modélisations, comme MODHYS ou TELEMAC.

#### 1.1.4. La structuration hydrodynamique de l'avant-côte lors des tempêtes.

L'étude détaillée de deux coups de mer (novembre 1994 et janvier 1999) permet d'approfondir l'approche qualitative menée, notamment par l'analyse des directions de propagation de ces ondes en mettant en évidence le caractère progressif des ondes incidentes et celui stationnaire des ondes de basses fréquences.

Les deux coups de mer présentent des similitudes et des différences. Leur direction de provenance est opposée de part et d'autre de la normale à la côte. En 1994, entre le 4 et le 6 novembre, la houle a une provenance de secteur 50 à 105°, alors qu'en 1999, les 16 et 17 janvier, elle a une provenance N160° (Fig. 24).

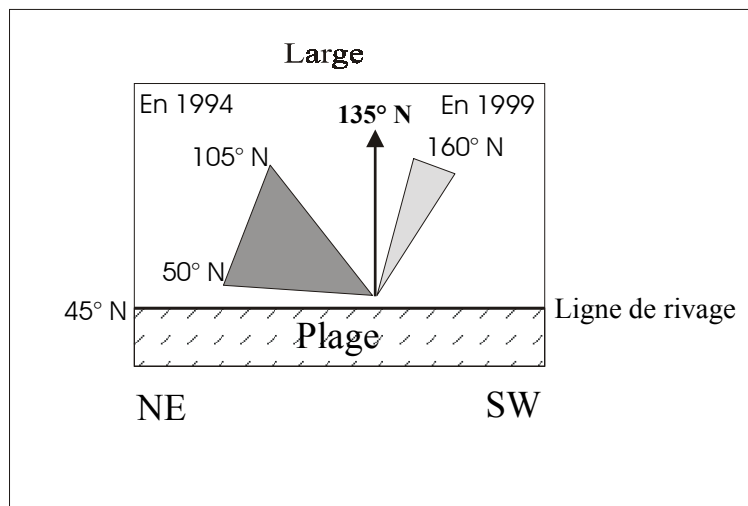


Fig. 24 : Spectre directionnel de la houle au niveau du glacis pour 1994 et 1999.

Les hauteurs significatives oscillent entre 2 et 2,5 mètres en 1994 (Fig. 25) avec un maximum atteint le 4 novembre vers 16 heures, alors qu'elles atteignent 3 à 3,6 m en 1999 (Fig. 26), avec une période de pic comprise entre 7,5 et 8,5 s.

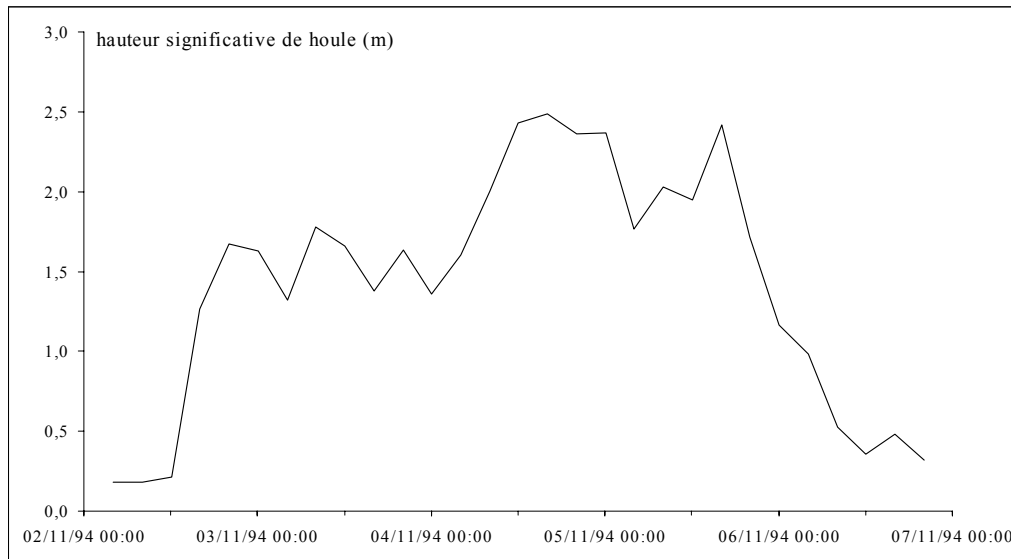


Fig. 25 : Hauteur significative de la houle mesurée sur le glacis entre le 2 et le 7 novembre 1994 (fréquences de coupure pour la houle 0.004 Hz-0.330 Hz).

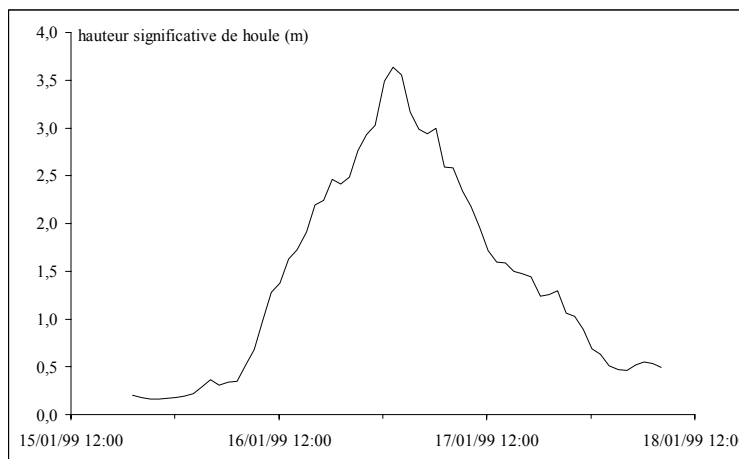


Fig. 26 : Hauteur significative de la houle mesurée sur le glacis entre le 15 et le 18 janvier 1999 (fréquences de coupure pour la houle 0.004 Hz-0.330 Hz).

Les courants moyens sont voisins de 1 m/s dans la fosse interne et de 0,6 m/s dans la fosse externe, avec une différence entre les deux dates ; 1999 montrant des vitesses légèrement supérieures (entre 0,6 et 0,8 m/s). Les variations en vitesse et direction sont illustrées dans les deux fosses par les figures 27 et 28. Les valeurs de vitesses mesurées pour les composantes des courants moyens longitudinaux, rendent compte du sens du transport sédimentaire parallèlement au trait de côte, dirigé vers le SW en 1994 et à l'opposé en 1999. Leur orientation est conforme à la direction de la houle incidente. Les courants « cross-shore » sont logiquement orientés dans les deux cas vers le large et sont compris entre 0,2 et 0,4 m/s.

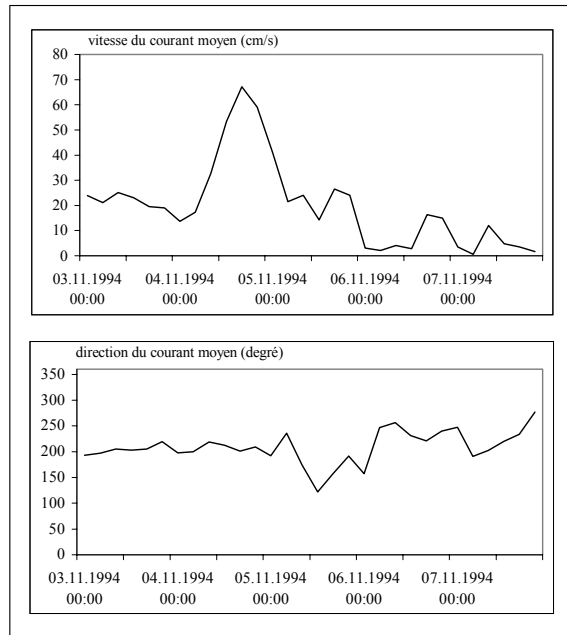


Fig. 27 : Vitesse et direction du courant moyen dans la fosse de lévigation externe (3 au 8 novembre 1994).

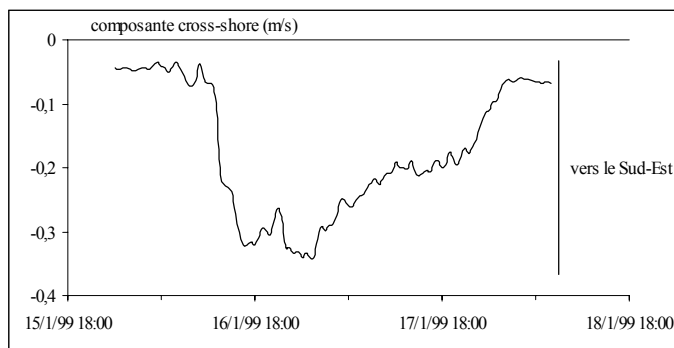
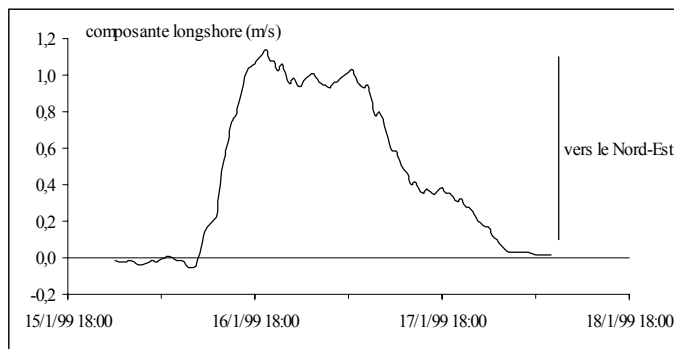


Fig. 28 : Vitesse du courant moyen dans la fosse de lévigation interne (16-18 janvier 1999).

Compte tenu d'un protocole d'acquisition des données inadéquat en 1994 (durée d'enregistrement trop courte pour mettre en évidence les longues périodes), l'étude des spectres d'ondes n'a été faite qu'à partir des données de la campagne de 1999.

L'analyse, qui a porté sur la tempête des 16-17 janvier, montre que les conditions d'agitation mesurées au large et à la côte sont très contrastées. Au large, le spectre d'énergie, relativement étroit, est concentré dans le domaine des hautes fréquences ( $>0,04$  Hz). A la côte, dans la fosse interne, par -3 à -3,5 m de profondeur, les hauteurs significatives maximales, de périodes comprises entre 4 et 11 s, sont inférieures à 1 m et le spectre d'énergie est beaucoup plus étalé avec fréquemment une bi-modalité témoignant de la présence d'ondes de longues périodes (entre 60 et 170 s). Les vagues de tempête subissent donc une profonde transformation d'abord sur le glacis au cours du « shoaling » puis au franchissement des barres qui modifient leurs caractéristiques fréquentielles, ce que nous avons déjà vu dans le paragraphe précédent. Au passage de la crête de la barre interne, les vagues incidentes de courte période déferlent. Entre ces brisants et la côte, il y a une dissipation importante des vagues incidentes au sein de la zone de surf avec saturation comme en témoigne le spectre d'énergie présenté en figure 29, transférant une part de l'énergie pour la génération des ondes infragravitaires.

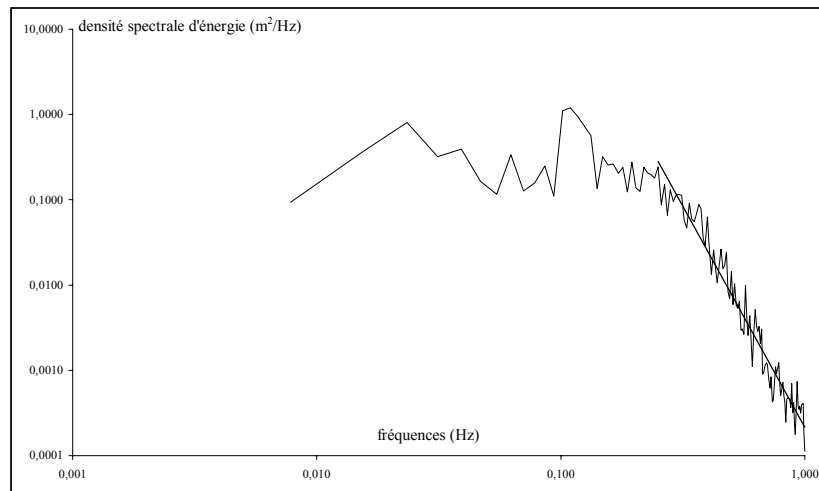


Fig. 29 : Spectre des fluctuations de la composante crossshore du courant mesurées dans la fosse de lévigation interne le 16 janvier 1999 à 18 h TU.

Ces ondes, du fait de leur très faible cambrure, ne déferlent quant à elles pas et se propagent jusqu'au rivage. Arrivant obliquement au trait de côte comme les ondes incidentes, elles sont réfléchies et repartent en direction du large. L'analyse des directions de propagation des différentes ondes (Fig. 30) le démontre. On voit, en effet, que les ondes incidentes de courte période proviennent du secteur sud à sud-est, conformément à la direction de provenance de la houle tandis que les ondes de longue



période arrivent, soit aussi du secteur S à SE, soit, plus fréquemment, à l'opposé du NW, c'est-à-dire de la côte.

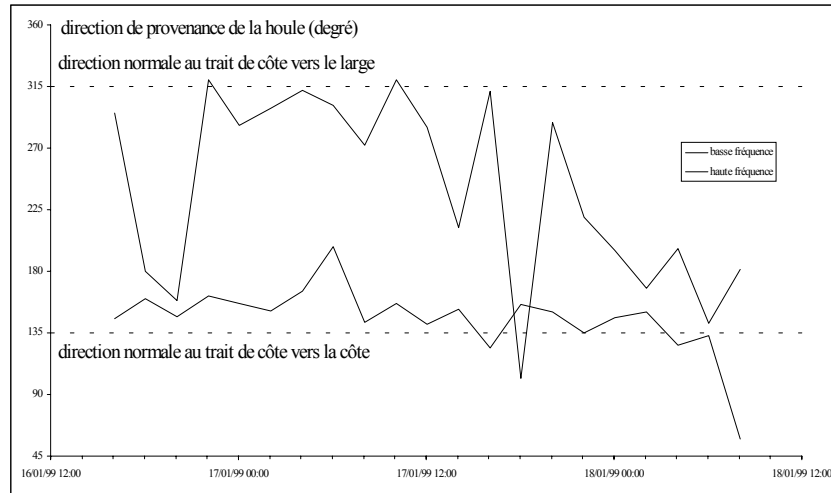


Fig. 30 : Direction de provenance de la houle dans la fosse de lévigation interne dans le domaine des basses (0,004 Hz-0,040 Hz) et des hautes (0,040 Hz-0,330 Hz) fréquences

L'étude du déphasage entre les fluctuations des vitesses orbitales et celles des variations du plan d'eau statique permet de définir le type d'ondes en présence (Huntley & Bowen, 1978). Dans le domaine des hautes fréquences (0,04 à 0,33 Hz), les vitesses orbitales *cross-shore* (entre 5,5 à 8 s) sont bien corrélées avec les fluctuations du plan d'eau statique (Fig. 31a). Elles sont en phase. Ce type de vagues est typiquement progressif. Par contre, pour le domaine des basses fréquences (0,004 à 0,04 Hz), les fluctuations du plan d'eau statique sont mal corrélées aux vitesses *cross-shore* (de 35 à 55 s) (Fig. 31b) et même *longshore* (entre 35 s et 80 s). Dans le domaine infragravitaire, il est fréquent de voir, comme ici à Sète, des fluctuations de hauteur d'eau en quadrature avec les vitesses orbitales. Les vitesses peuvent être maximales pour un plan d'eau proche du niveau moyen et l'élévation du plan d'eau peut être maximale ou minimale pour des vitesses orbitales nulles. Ce phénomène de quadrature, caractéristique des ondes stationnaires, témoigne de la présence d'ondes de longues périodes de type *edge waves*.

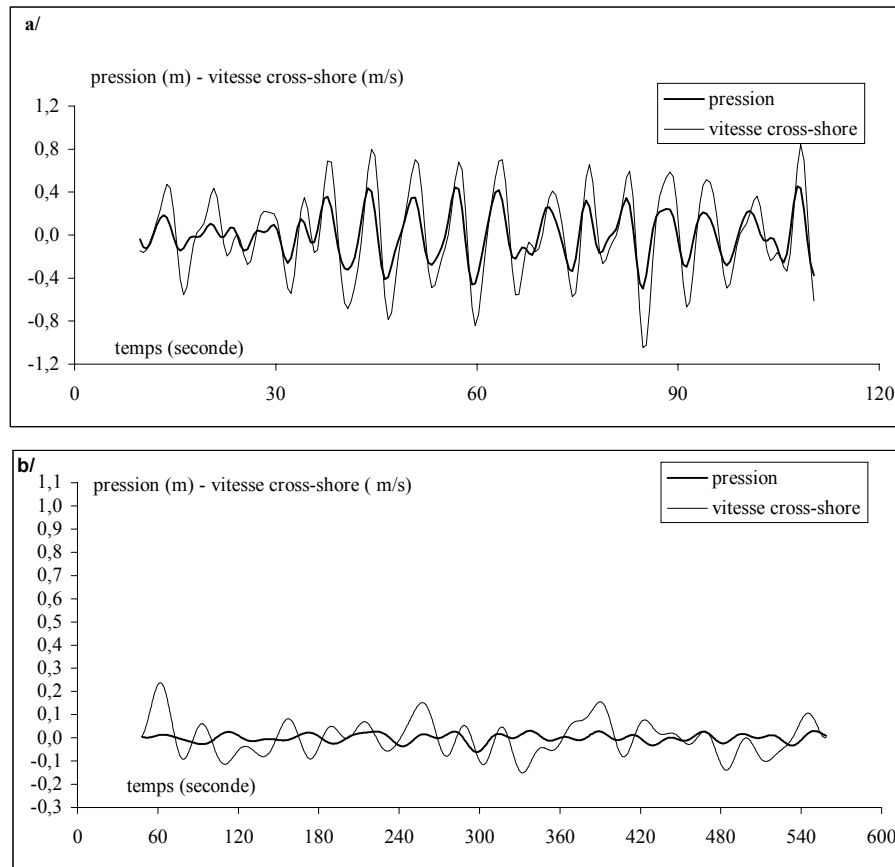


Fig. 31 : Fluctuations instantanées de la pression et de la composante cross-shore du courant pour les hautes (a) et les basses fréquences (b) dans la fosse de lévigation interne le 16 janvier 1999 à 20 h TU

On voit donc que les tempêtes sont des phénomènes majeurs dans le comportement de la zone littorale. Les courants atteignent des valeurs maximales. Mais le plus important est que la différenciation des ondes issues de la houle, au passage des barres, engendre des opportunités pour la création d'ondes stationnaires. Les vues de Guza et Thornton (1982), Wright *et al* (1982), Bowen et Inman (1971) se trouvent donc confirmées par la mesure in situ. Une véritable structuration hydrodynamique de la zone littorale en résulte, du type de celle décrite dans la littérature (Wright *et al*, 1982) entraînant des conséquences sur la morphologie et la dynamique des barres.

## 1.2. Morphodynamique des barres

### 1.2.1. Volumes sédimentaires déplacés lors des coups de mer et modalités de ces déplacements

Les volumes déplacés correspondant aux changements morphologiques provoqués par les tempêtes étudiées au cours des campagnes de 1994, 1999 et 2000 ont été

calculés. L'ensemble des observations réalisées conduit, pour chacun des coups de mer étudiés pendant ces trois périodes, à un ordre de grandeur de plusieurs milliers de m<sup>3</sup> de sédiments déplacés (Tabl. 9, 10 et 11).

DATES	EROSION (er)	TOTAL EROSION	ENGRAISSEMENT (eg)	TOTAL ENGRAISSEMENT
du 13/10/94 au 02/11/94	er 1: -4000 ± 1100 er 2: -3700 ± 1500	-7700 ± 1900	eg 1 : 5200 ± 1400 eg 2 : 3000 ± 1800	8200 ± 2300
du 02/11/94 au 08/11/94	er 1: -13 000 ± 3500 er 2 : -2400 ± 1700	-15 400 ± 3900	eg 1 : 5800 ± 1200 eg 2 : 1200 ± 600	7000 ± 1300

Tableau 9 : Volumes significatifs érodés et engraisés lors des coups de mers étudiés en 1994. (er1...eg2 : localisation des zones sur la figure 31)

Volumes déplacés (- : érosion ; + : engraisse <sup>ment</sup> )	Localisation sur le profil	Localisation dans le site	Migration éventuelle consécutive
- 2000 ±500 m <sup>3</sup>	Front et sommet de la barre externe (Fig. 34)	P1 à P4	—
+ 4000±300 m <sup>3</sup>	Front de la barre interne (Fig. 35)	P8 à P11	Progression vers la plage
- 4900 ±450 m <sup>3</sup>	Sommet de la barre interne (Fig.36)	P4 à P8	Recul vers
+3300m <sup>3</sup> ±650 m <sup>3</sup>	Revers de la barre interne (Fig. 36)	P2 à P8	le large

Tableau 10 : Récapitulatif des changements intervenus dans le système des barres à la suite de la tempête des 16 et 17 janvier 1999 sur le site de Sète.

Complexe interne	Complexe externe	Ensemble
------------------	------------------	----------

	<b>Volume érodé</b>	<b>Volume engraisé</b>	<b>Volume total</b>	<b>Volume érodé</b>	<b>Volume engraisé</b>	<b>Volume total</b>	<b>Volume total</b>
<b>01 au 05/11/00</b>	- 4180±400	2660±400	- 1520±565	Pas calculable	Pas calculable	Pas calculable	-1520±565
<b>05 au 10/11/00</b>	- 9640±650	19150±230	9510±689	-2650±300	2030±350	-620±460	8890±828
<b>10 au 16/11/00</b>	- 8760±700	9600±1250	Non significatif	Pas calculable	Pas calculable	Pas calculable	Non significatif
<b>16 au 25/11/00</b>	- 3580±300	12400±1350	8820±138 2	Pas calculable	Pas calculable	Pas calculable	8820±1382
<b>25/11 au 04/12/00</b>	- 14330±14 50	10700±1150	- 3630±185 0	-4230±890	Pas calculable	-4230±890	-7860±2052
<b>01/11 au 4/12/00</b>	- 12280±65 0	22600±2000	10320±21 02	- 15880±2900	3100±2800	- 12780±4031	Non significatif

Tableau 11 : Variations de volume des sédiments sur la plage sous-marine pour le complexe interne (fosse interne, barre interne et fosse externe) et le complexe externe (barre externe et glacis) en 2000. Lorsque le volume est inférieur à l'incertitude, le résultat est considéré comme non significatif. Une estimation valable pour toute la zone est indiquée dans les colonnes les plus à droite (volume total).

Deux faits ressortent des mesures :

(i) ces remaniements confirment la variabilité plus importante du complexe interne vis à vis du complexe externe,

(ii) ils se produisent, d'un coup de mer à l'autre, sur des zones localisées de dépôt et d'érosion de quelques dizaines à centaines de m de périmètre (Fig. 32) pouvant alterner de chaque côté de la ligne de crête de la barre interne (niveau Y= 100 m, par exemple). On remarque ainsi une opposition entre un engraissement d'un côté (indistinctement sur le front ou sur le revers de la barre) et une érosion simultanée de l'autre (par exemple au niveau de la radiale X= 100 m).

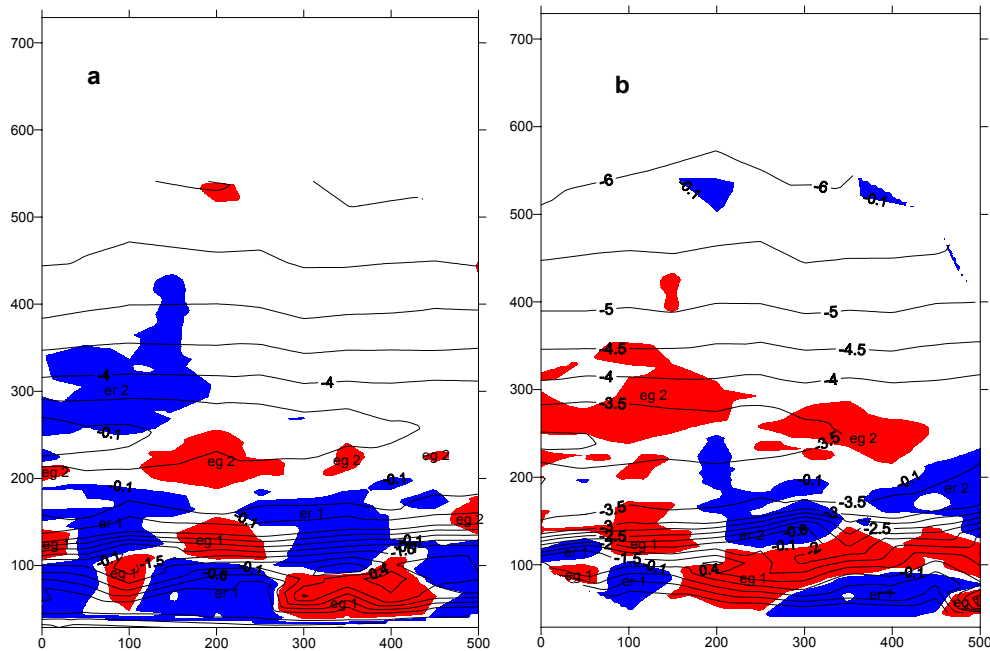


Fig. 32 : Répartition des volumes de sables lors des érosions et des engraissements sur le site de Sète (a) entre le 13 octobre et le 2 novembre 1994 lors d'un coup de mer les 20 et 21 octobre ( $H_s = 3,5$  m), et (b) entre le 2 et le 8 novembre 1994, après le coup de mer des 3 au 5 novembre ( $H_s = 2,5$  m).

Il semble aussi que les localisations où se manifeste l'une ou l'autre tendance puissent s'invertir lors du coup de mer suivant. Tout se passe comme si les trous étaient comblés et les bosses arasées, à volume constant à chaque coup de mer, en surcompensant la tendance à l'équilibre : un trou devenant ainsi une bosse et inversement. Ces changements aboutissent à des réajustements fréquents et localisés de la morphologie de la barre interne. Ils impliquent une répartition alvéolaire des courants.

### 1.2.2. L'efficacité relative des coups de mer

Les quatre coups de mer de la campagne de novembre 2000 surviennent dans un contexte particulier, celui qui résulte du basculement du mode d'évolution O.P.E en mode NOM.

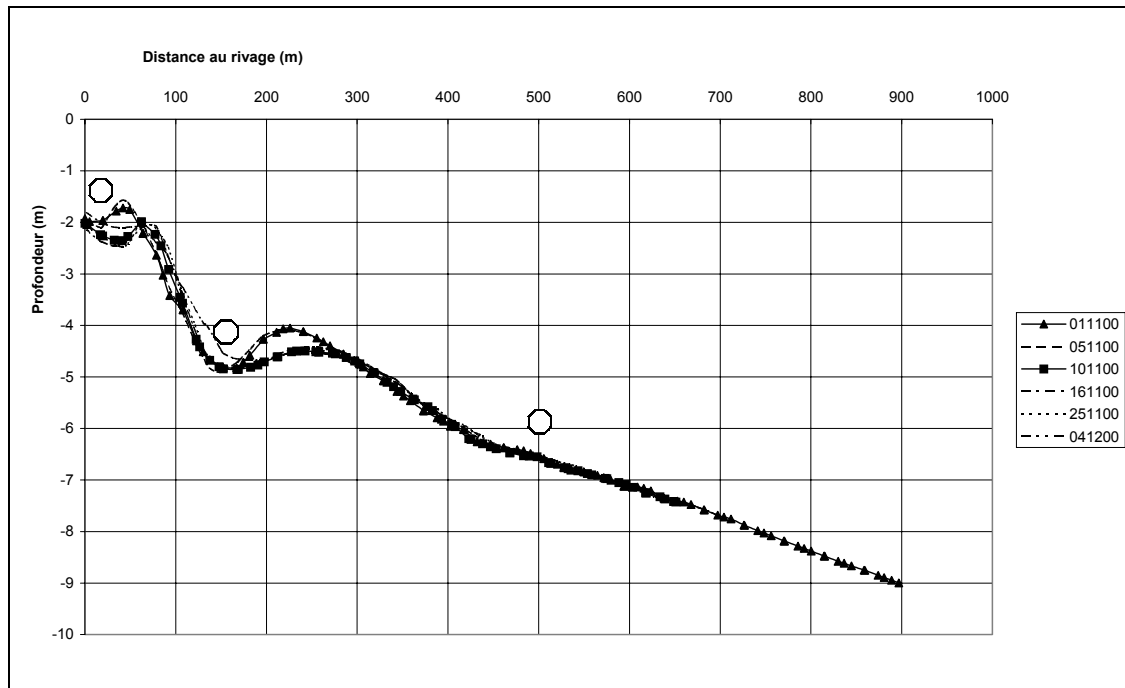


Fig. 33 : Profil transversal instrumenté (les cercles correspondent aux courantomètres/houlographes S4) et son évolution au cours de la campagne 2000.

Grâce à ce suivi, il est possible de déterminer ceux qui ont entraîné les changements morphologiques les plus importants sur les barres. Les profils se regroupent en deux séries : l'une qui rassemble les profils du 1<sup>er</sup> et du 5 novembre, avant la tempête du 6 novembre, l'autre, tous les autres profils, dont on fournit un exemple sur la figure 33.

La première tempête, celle du 6 novembre 2000, montre les changements les plus importants car elle présente l'angle d'incidence le plus élevé, le maximum d'énergie dans les hautes et les basses fréquences, et engendre les courants transversaux et longitudinaux les plus forts.

Cependant, pour des conditions hydrodynamiques identiques, ces changements diffèrent selon la zone en fonction du disponible sédimentaire, les zones les moins pourvues ont une réaction plus marquée (Lopin, 2001).

Une fois le nouvel équilibre hydrodynamique installé, les tempêtes suivantes, de hauteurs significatives pourtant comparables, n'induisent aucun changement morphologique significatif.

### 1.2.3. Les réajustements induits sur les barres

En 1999, les volumes sédimentaires échangés entre le 13 et le 23 janvier sont représentés sur la figure 34, après le coup de mer des 16 et 17 janvier. On voit que cette tempête a provoqué des érosions et des engraissements diversement localisés, à volume constant sur l'ensemble de la zone, ce que l'on constate, le 19 janvier, sur un levé partiel exécuté dès l'amortissement de la tempête. Le tableau 10 en donne les

caractéristiques et les figures 35 à 37 illustrent par quelques profils choisis les localisations et les ampleurs des changements.

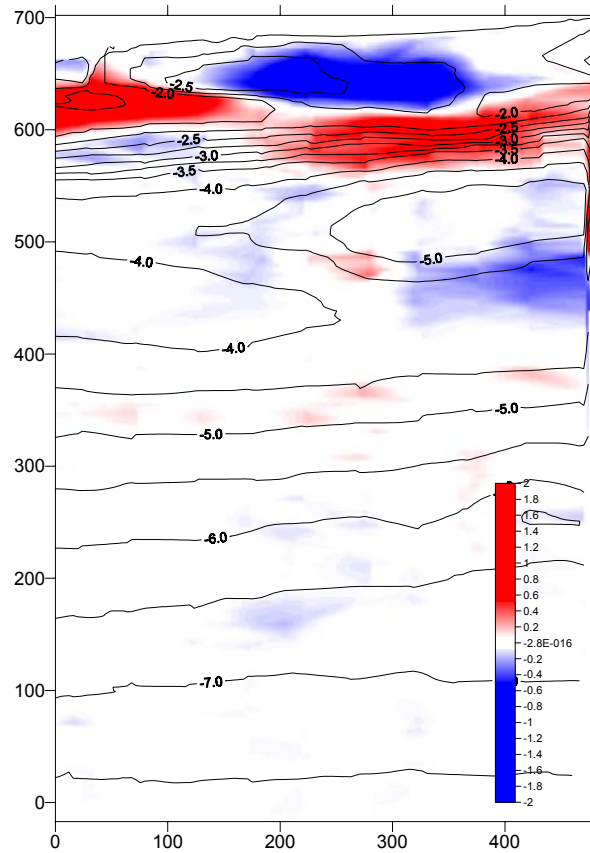


Fig. 34 : Localisation des principales zones d'érosion et d'engrèvement entre le 13 et le 23 janvier 1999 (ne sont représentées que les variations volumétriques significatives, c'est-à-dire supérieures à la marge d'erreur, définie précédemment comme  $\pm 10$  cm).

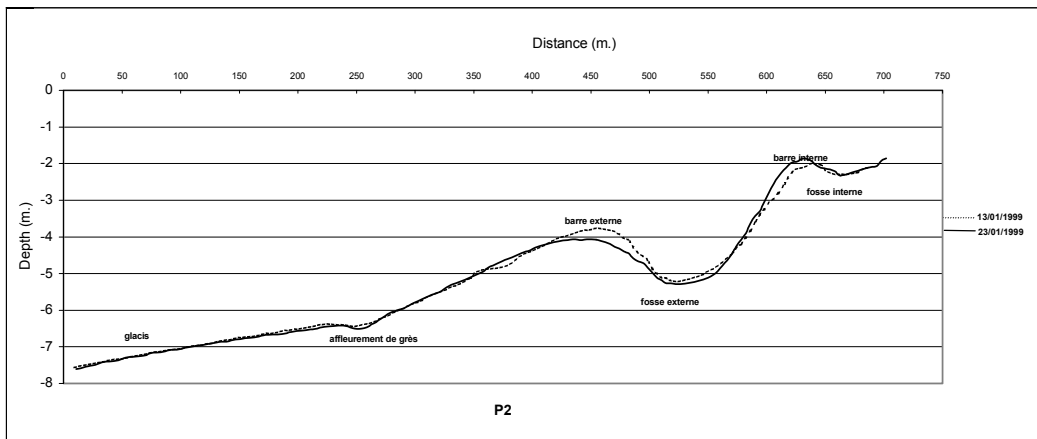


Fig. 35 : Comparaison du profil P2 (x= 50 m) entre le 13 et le 23 janvier 1999.

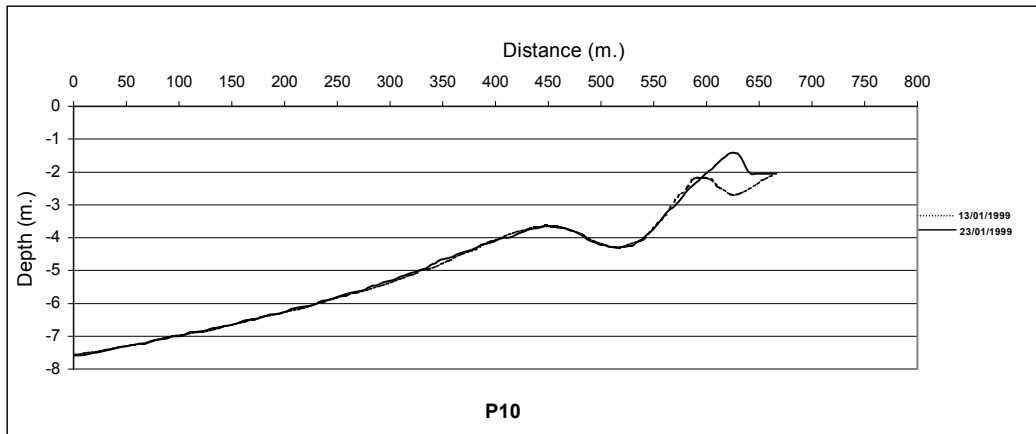


Fig. 36 : Comparaison du profil P10 (x= 450 m) entre le 13 et le 23 janvier 1999.

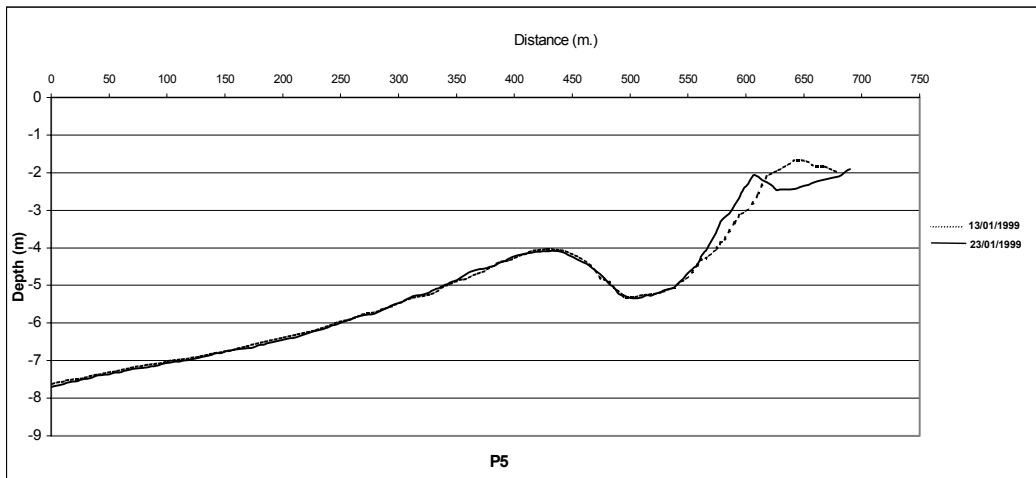


Fig. 37 : Comparaison du profil P5 (x= 250 m) entre le 13 et le 23 janvier 1999.

On reconnaît dans ces changements les mêmes caractères que ceux enregistrés dans le suivi de 2000 et déjà notés aussi lors de l'approche fonctionnelle globale à l'échelle pluriannuelle :

- la juxtaposition « en damier » des zones d'érosion et d'engrèvement.
- la sensibilité plus importante de la barre interne par rapport à la barre externe ; ce que Spielmann *et al.* (2000), modélisant l'évolution du profil bathymétrique n°5 (Fig. 37) par le code MODHYS, imputent à un transport en suspension vers le large par le biais du courant de retour.

Mais le résultat le plus notable du coup de mer est la réorientation de la barre interne que montre bien sur la figure 37 le segment oblique ENE/WSW.

Ce phénomène semble avoir un caractère général puisque la campagne de 1994 avait montré aussi un changement directionnel de la barre interne, mais dans un sens toutefois opposé, sous la forme de deux segments NNE/SSW, après le coup de mer d'orientation différente (secteur ENE, Fig. 23) des 4-6 novembre (Fig. 39).



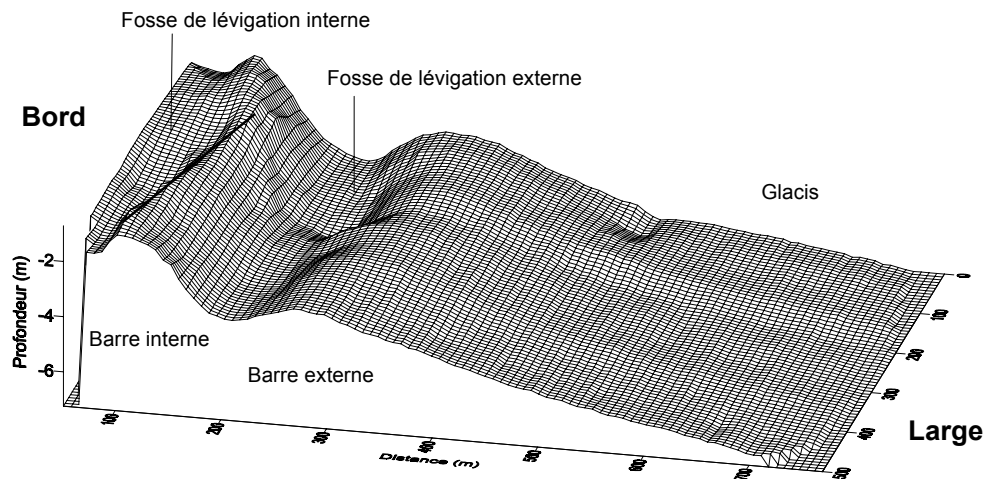


Fig. 38 : Représentation tridimensionnelle de la zone d'étude le 23 janvier 1999

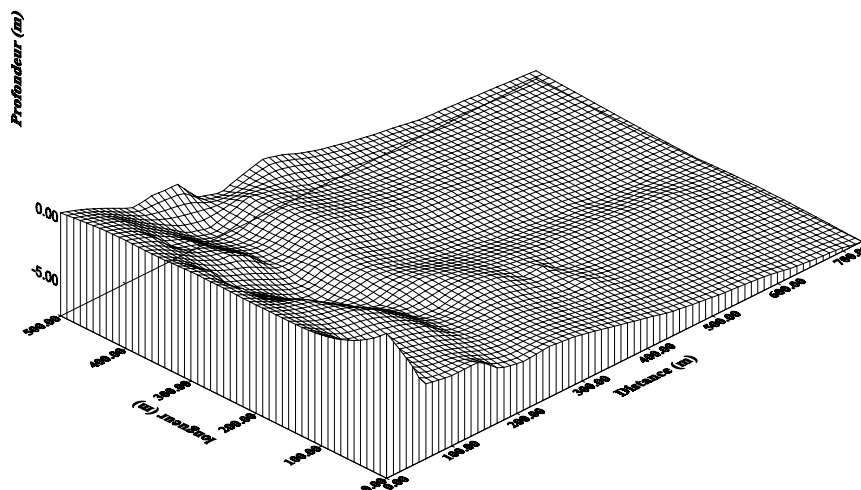


Fig. 39 : Représentation tridimensionnelle de la zone d'étude le 8 novembre 1994.

## 2. Description morphologique de la plage émergée

La réaction des plages aux coups de mer se traduit, comme sur l'avant-côte, par le déplacement de masses sédimentaires.

En novembre 2000, par exemple, la plage émergée du site de Sète, perd globalement du matériel (environ 1500 m<sup>3</sup>) au terme d'une succession de quatre coups de mer (Fig. 21) qui, chacun, ont entraîné des phases d'érosion et d'engraissement (Tabl. 12) sur des parties diversement distribuées le long de la plage.

	Volume érodé (m <sup>3</sup> )	Volume engraisé (m <sup>3</sup> )	Volume total
Du 31/10 au 04/11/00	-1020±30	820±30	-200±30
Du 04 au 09/11/00	-1140±20	910±20	-230±30
Du 09 au 15/11/00	-1160±30	960±30	-200±30
Du 15 au 24/11/00	-1740±50	60±50	-1680±50
Du 25/11 au 04/12/00	-590±20	1230±40	640±50
Période totale	-2580±50	1100±30	-1480±50

Tableau 12 : Calcul de volume de sédiments en engraissement ou en érosion sur la plage aérienne du site de Sète en novembre 2000.

On voit que les volumes concernés sont seulement de l'ordre de la centaine ou du millier de m<sup>3</sup>, dix fois moins qu'à ceux mis en jeu sur la plage sous-marine.

### 3. Le cas idéalisé

#### 3.1. Bilan des caractéristiques du site d'étude

La présentation détaillée de la problématique ainsi que de l'analyse et du suivi du site pilote de Sète, prévue par les tâches A et B du programme, révèle la grande complexité de ce cas, pourtant apparemment simple (mer sans marée, forçage dominant de houle, homogénéité morphosédimentaire). Les caractères principaux sont les suivants :

1- Le système littoral à deux barres sédimentaires de Sète répond à deux modes de fonctionnement :

- Un mode d'évolution N.O.M., le plus caractéristique de l'avant-côte et de la plage, survient pour des tempêtes à caractère exceptionnel (Hs très supérieure à 4 mètres au large, soit env. 4 m à l'entrée de la zone d'avant-côte). La barre externe est remplacée, à la suite de sa disparition progressive vers le large, par la barre interne. La barre interne, nourrie par le matériel récupéré, mais plus exposée aux effets des coups de mer, recule alors et vient progressivement occuper une position de barre externe. Une barre interne se reconstitue alors.

- Un mode d'oscillations autour d'une position d'équilibre (O.P.E.) s'observe en période « normale » (c'est-à-dire caractérisée par l'alternance de phases de beau temps (Hs ≤ 1 m) et d'occurrences de tempêtes de Hs voisine ou peu supérieure à 4 m au large, soit env. 2,5 m à l'entrée de la zone d'avant-côte). Durant les épisodes de faible

énergie, la plage s'engraisse et les barres s'approchent du rivage. L'inverse se produit lors des coups de mer de forte énergie. La barre externe est beaucoup moins affectée par ces variations que la barre interne.

2- Dans le mode de fonctionnement « normal », il existe une relation très constante entre la largeur de la plage et la position de la barre interne. L'accolement provoque l'élargissement de la plage, processus observé régulièrement qui fournit une clé de compréhension d'une modalité entraînant la variation de largeur de la plage.

3- Les changements morphologiques se produisant entre les phases successives d'évolution impliquent des déplacements de sédiments de plusieurs dizaines de milliers de m<sup>3</sup>. Ces remaniements se produisent, d'un coup de mer à l'autre, sur des zones localisées de dépôt et d'érosion de quelques dizaines à centaines de m de périmètre pouvant se succéder le long de la ligne de crête de la barre interne ou alterner de part et d'autre de celle-ci.

4- Plusieurs régimes de houles ont été identifiés. Lors des tempêtes, deux déferlements successifs peuvent se produire au passage des barres. Pour des houles plus petites, les vagues peuvent parvenir à la côte sans déferler ou seulement sur la barre interne. En fonction de ce critère, diverses situations ont été mises en évidence, mais seules trois d'entre elles semblent avoir une importance dans le cas du programme de LITEAU en raison de leur fréquence et de leur représentativité: celle correspondant au recul des barres sous l'effet d'une forte tempête de probabilité annuelle ( $H_s \geq 4$  m), appelée tempête exceptionnelle dans la suite du document, celle correspondant à la majorité des tempêtes enregistrées sur une année ( $H_s = 2,5$  m), appelée tempête classique dans la suite du document et celle correspondant à un régime de reconstruction du système (oscillation vers la côte ;  $H_s = 1$  m), appelé tombant de tempête par la suite. Le cas d'une tempête exceptionnellement violente durant laquelle les hauteurs significatives sont très supérieures à 4 m à l'entrée de la zone d'avant-côte pouvant entraîner la basculement en mode N.O.M. a été volontairement écarté des simulations en raison de la très faible occurrence d'un tel phénomène (tempête centennale). Les quatre coups de mer qui surviennent lors de la campagne de novembre 2000, sont bien représentatifs de la diversité des modes de fonctionnement de l'avant-côte de Sète et méritent donc d'être sélectionnés pour les essais réalisés dans le cadre de ce programme LITEAU.

### 3.2. Mise en place du cas d'étude par modélisation

La modélisation de l'emploi des stocks sableux des barres pour déplacer les équilibres d'une façon favorable au maintien du trait de côte et agir sur leur morphologie de façon à augmenter l'efficacité de leur action atténuatrice des houles doit, dans le cas de Sète, ne retenir que les éléments simples qui structurent le cas. Ils sont au nombre de 3 :

- il y a deux barres,
- l'efficacité de l'atténuation des houles que leur présence occasionne est liée à la dimension des obstacles,

- les conditions hydrodynamiques à considérer définissent globalement deux dynamiques: l'une de recul du système de barres ( $H_s = 4$  m et  $H_s = 2,5$  m), l'autre de reconstruction ( $H_s = 1$  m).

Dans ces conditions, on a retenu les données suivantes d'entrée dans les modèles (tabl. 13)

Caractère considéré	Application
Hs tempête exceptionnelle	4 m
T tempête exceptionnelle	10 s
Incidence tempête exceptionnelle	0°
Hs tempête classique	2,5 m
T tempête classique	7 s
Incidence tempête classique	0°
Hs tombant de tempête	1 m
T tombant de tempête	6,5 s
Incidence tombant de tempête	0°
Profil	P5 du 4/11/2000
Modifications morphologiques	sur barre interne et/ou barre externe par surhaussement de la crête de 0,125-0,25-0,5 ou 1 mètre et répartition gaussienne

Tabl. 13 : Scénarios retenus pour l'utilisation des codes numériques de simulation

Sur le profil considéré, on modifiera la topographie par adjonctions sélectives de masses sableuses dont la figure 40 fournit une représentation.

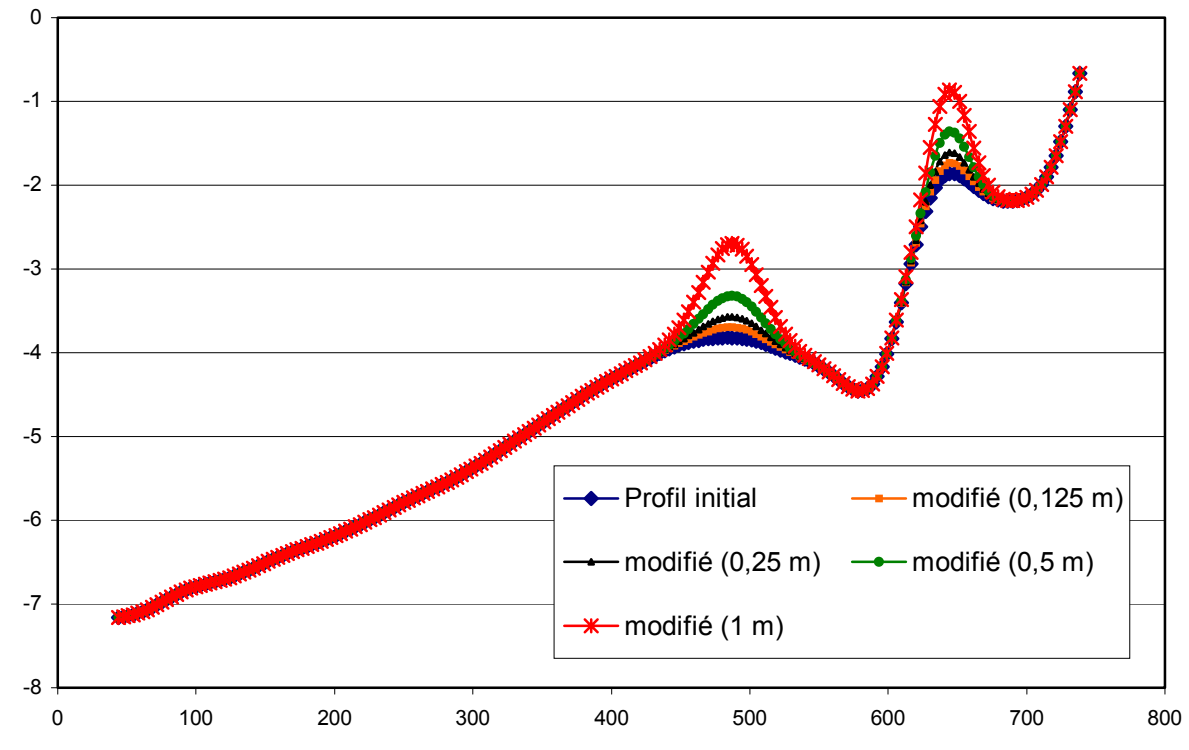


Fig. 40 : Différents profils susceptibles d'être obtenus par adjonctions sélectives de masses sableuses sur le profil expérimental P5 du 4 novembre 2000.

### 3.3. Organisation des essais

La tâche C prévoit la modélisation hydrosédimentaire à moyen terme dans plusieurs configurations de simulation :

C0 : littoral non aménagé (état naturel)

C1 : prélèvement sur les barres afin de recharger la plage

C2 : rechargement des barres afin d'améliorer la protection de la plage

C3 : prélèvement sur les barres les moins sensibles pour recharger les plus sensibles.

L'état de référence, correspondant à la tâche C0, utilise les données bathymétriques obtenues pendant la campagne de l'automne 2000, et plus particulièrement le profil 5 du 16 novembre 2000 (profil avec deux barres bien marquées situé au milieu de la zone d'étude) ; 23 profils sont ensuite construits afin de pouvoir répondre aux trois principaux objectifs de la tâche C. Le profil utilisé pour la tâche C1 est de type Dean, c'est-à-dire sans barre et selon une progression logarithmique (Fig. 51d). Pour la tâche C2 dont le but est de tester l'impact de l'engraissement des barres sur l'évolution du fond, plusieurs cas ont été envisagés : la hauteur de chaque barre est augmentée de 0,125 m, 0,25 m, 0,5 m et 1 m, suivant un profil gaussien (Fig. 40). On aboutit ainsi à 16 profils de bathymétrie. Nous avons également considéré pour cette tâche C2 quatre autres profils avec engraissement unique de la barre externe (Fig. 55d). Finalement, pour la tâche C3 où la barre interne est érodée au profit de la barre externe,

deux profils ont été construits avec deux hauteurs différentes de la barre externe, respectivement 0,5 m et 1 m (Fig. 73d).

Pour tenir compte de l'évolution de l'état de la question (Spanhoff *et al.*, 2003 ; voir p. 15) depuis le dépôt du projet et son acceptation, on a ajouté une option C4, non prévue dans le contrat, en simulant la création d'une barre supplémentaire en position plus externe que la BE.

Trois scénarios de houle ont été utilisés qui correspondent à des forçages typiques de la zone d'étude. Nous avons ainsi considéré un forçage permettant de simuler une tempête exceptionnelle, qui a lieu une fois par an, notée TE ( $H_s=4$  m et  $T=10$  s), un pour une tempête « classique », qui a lieu plusieurs fois par an, notée TC, ( $H_s=2,5$  m et  $T=7$  s) et enfin un régime de « tombant de tempête », noté TT ( $H_s=1$  m et  $T=6,5$  s). Pour chaque forçage, seule l'incidence normale à la plage ( $\theta = 0^\circ$ ) est considérée.

Après avoir présenté les codes de calcul utilisés, les résultats de ces différents essais seront exposés.