

# Processus hydrodynamiques et morphosédimentaires de l'environnement des barres d'avant-côte du littoral du golfe du Lion

Observatoire d'érosion littorale,  
Barres d'avant-côte  
Houle côtière  
Onde de bord  
Golfe du Lion

Coastal erosion observatory  
Offshore bars  
Coastal wave  
Edge wave  
Gulf of Lions

Jean-Paul BARUSSEAU <sup>a</sup>, Laurent BRISSAUD <sup>a</sup>, Georges DRAPEAU <sup>b</sup> et Bernard LONG <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de Recherches en Sédimentologie Marine, Université de Perpignan, 66860 Perpignan Cedex, France.

<sup>b</sup> INRS-Océanologie, Rimouski, Québec, Canada.

La généralité des processus d'érosion côtière dans le monde est abondamment documentée. Leur quantification et leur modélisation sont plus délicates. Les modèles qualitatifs présentés (Bruun, Dean...) ne peuvent être utilisés sans précautions. En particulier, l'origine du matériel qui concourt à l'équilibre du profil, la vitesse de variation de l'altitude du niveau de la mer sont des facteurs sensibles entraînant des évolutions différentes. A cet égard, les barres d'avant-côte, rectilignes ou festonnées, du golfe du Lion constituent également des singularités dont l'ampleur est suffisante pour empêcher l'application de modèles simples comme la fonction puissance  $y = a x^b$ .

Dans l'état actuel des choses, il est nécessaire de mesurer avec précision les marges de fluctuations interannuelles du paramètre le plus compréhensif: le profil transversal. Cela implique la réalisation d'un suivi régulier dans des bases permanentes matérialisées sur le terrain. Chaque base forme un observatoire et les mesures rapportées ici : en topobathymétrie, sédimentologie, océanographie physique, proviennent de l'observatoire de Saint-Cyprien (Pyrénées-Orientales). L'évolution morphologique est suivie depuis juin 1988 à intervalle moyen d'un mois. La partie la plus fluctuante du profil est celle des barres d'avant-côte qui réagit avec une extrême rapidité aux changements du climat océanographique. La barre interne se localise en fonction de la position de la ligne des brisants, alors que les changements intervenant au niveau de la barre externe intègrent les modifications du régime de houle mais aussi l'influence des ondes de bord dont les enregistrements houlographiques ont montré l'existence. Les transferts sédimentaires, longitudinaux et dans le profil, ont été caractérisés sur la barre externe où ils se produisent, en conditions moyennes (temps de Sud-Est), par déplacement de rides sur la crête et avalanching sur la pente interne.

*Oceanologica Acta*, 1991. Actes du Colloque International sur l'environnement des mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990, vol. sp. n° 11, 163-176.

## Hydrodynamic and morphosedimentological processes in the offshore-bar environment, Gulf of Lions

Coastal erosion processes are abundantly referred to in the literature throughout the world. Quantitative assessment and modelling are more sparsely documented. The existing conceptual models (Bruun, Dean...) cannot be used without care.

Factors such as the origin of the material involved in the profile equilibrium, or the rate of sea level rise are also important in partially controlling the shoreline evolution. In the Gulf of Lions (Mediterranean Sea), the linear and crescentic offshore bars constitute another factor which prevents the use of simple models such as the power function  $y = ax^b$ .

A relevant parameter to improve our understanding seems to be the shape of the profile recorded normally to the shore and the definition of its interannual fluctuations. This project works out a number of regular surveys, in time and space, from permanently located landmarks. Each landmark constitutes an observatory and the measurements reported here : bathymetry, topography, sedimentology and coastal oceanography, were gathered at the Saint-Cyprien one (Pyrénées-Orientales).

Morphological evolution has been observed since June 1988 on a monthly basis. The most unstable part of the profile is the region of the offshore bars which rapidly registers the variations of the marine climate. The inner bar is located in relation to the position of the breaker zone. Location changes of the outer bar are controlled by the evolution of the wave regime as well as by the edge waves characterized from the wave records. Sedimentary movements were demonstrated, in an alongshore and an offshore-onshore direction, by the registration of sand ripple migration upon the outer bar crest and avalanching in the interbar trough, where they were observed, during a period of moderate wave activity from the southeast sector.

*Oceanologica Acta*, 1991. Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas, Lille, 20-22 March, 1990, vol. sp. n° 11, 163-176.

## INTRODUCTION

La côte sableuse du Languedoc-Roussillon montre des indices d'instabilité morphosédimentaire, à l'instar d'une partie importante des littoraux de ce type dans le monde. Cette précarité de l'équilibre dynamique, se manifeste par des processus d'érosion, particulièrement évidents dans certains secteurs côtiers surveillés, mais on peut suspecter l'incidence d'une évolution négative plus largement étendue.

Une synthèse récente (Catalogue sédimentologique des Côtes françaises, 1984) fait cependant état de tendances progressives, de 1857 à 1957, entre les promontoires pyrénéens, au Sud, et le Cap d'Agde, au Nord, le bilan devenant plus contrasté vers l'Est.

Cette inversion des bilans au cours du temps pourrait stigmatiser l'impact des aménagements qui sont intervenus massivement, tant dans le domaine littoral lui-même, par création d'unités touristiques et portuaires, qu'en amont sur les exutoires fluviaux dont la charge sédimentaire a été globalement réduite par l'installation de barrages (Têt, Aude, Orb, Hérault). Il est cependant nécessaire de mettre ces phénomènes en perspective avec d'autres causes, généralement évoquées pour expliquer les fluctuations récentes et holocènes de la position relative terre-mer. Certaines d'entre elles ont une influence locale ou régionale, comme les compensations hydro-isostatiques, glacio-isostatiques et tectoniques ou comme la subsidence de compaction. Dans la région qui nous occupe, ces facteurs ne semblent toutefois pas devoir être pris en

considération dans le très récent (Aloïsi *et al.*, 1977). D'autres se caractérisent par leur incidence globale ; un réchauffement climatique mondial, par fusion des glaces des latitudes moyennes et effet stérique, provoque un relèvement général du niveau marin et une accentuation des événements rares à caractère paroxystique (tempêtes). A cet égard, Teisson (comm. orale, 1990) s'interroge sur l'opportunité de rechercher une corrélation entre les séries ponctuelles des hauts niveaux marins à Dieppe (c'est-à-dire au-dessus des PM théoriques de coefficient 120, à + 10 m) observés pendant les tempêtes (10,30 m en 1967; 10,45 en 1974; 10,60 en 1983; 10,70 en 1984; 10,60 en 1990) et l'augmentation des moyennes annuelles de température dans le même intervalle de temps (1981, 1983, 1987, 1988 et 1989). Dans le domaine littoral, une conséquence doit être que l'influence de vagues plus hautes et plus énergétiques, portées par un niveau marin plus élevé, expliquerait les érosions enregistrées, par diminution de la friction. Compte-tenu de l'appropriation anthropique des rivages dans les domaines de l'urbanisme et des activités à caractère commercial et industriel, cette incidence doit être clairement définie et, si possible, quantifiée.

Dans le détail, la mise en évidence du phénomène est, en effet, délicate car l'amplitude du signal pertinent (le taux de montée du niveau marin) et sa période sont occultées par des oscillations (houles, marées, niveaux de tempête...) dont la hauteur peut être  $10^3$  à  $10^4$  fois plus grande et la rythmicité jusqu'à  $3.10^8$  fois plus élevée (Munk, 1951).

En outre, les relations des phénomènes hydrodynamiques induits et de leurs effets hydrosédimentaires sont encore un

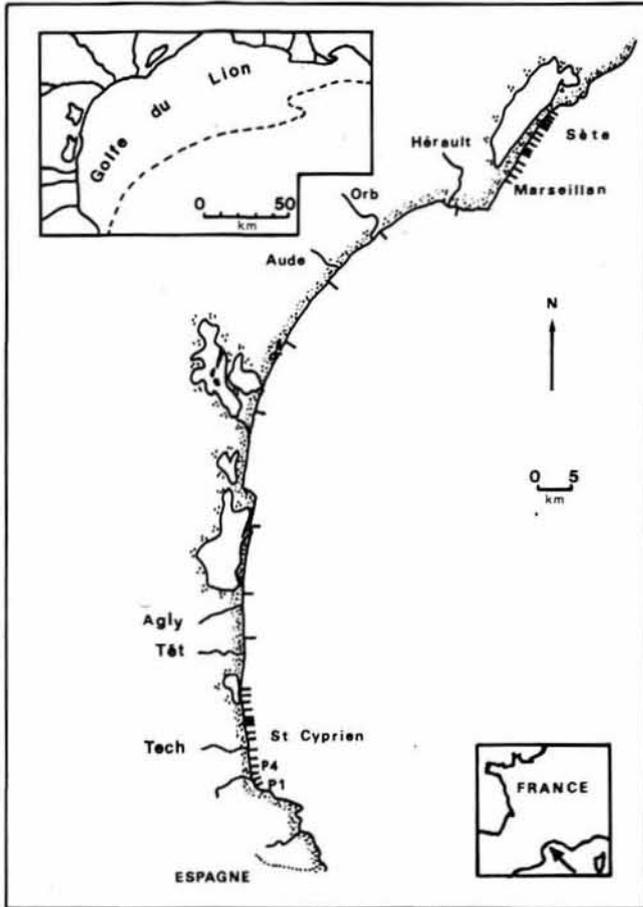


Figure 1

Situation générale des sites étudiés dans le golfe du Lion. Les numéros P1...P4 indiquent la position des profils de la figure 2.

*Location of studied sites in the Gulf of Lions. P1...P4 are referred to the profiles shown in figure 2.*

sujet d'exploration, compliqué par le fait que l'on doit raisonner en fonction d'évolutions pluriannuelles, encore mal discernées, du climat océanographique.

Le modèle de Bruun (1962) associe, dans cet esprit, un retrait de la ligne de rivage à toute élévation du niveau marin. Le raisonnement, appuyé sur une hypothèse d'équilibre jusqu'à la limite de dispersion des sédiments sableux, établit que le recul est proportionnel au taux de montée et inversement proportionnel à la pente moyenne. La résultante observée exprime le bilan entre un engraissement général, provoquant une élévation des fonds sur une épaisseur égale à la montée du niveau marin, et une érosion, localisée au rivage, qui fournit le matériel nécessaire à cette remise en équilibre du profil. La règle de Bruun représente un cas simple d'évolution de la zone littorale. Les critiques, notamment exprimées par Dean (1977), portent sur le fait que le rivage n'est pas le seul pourvoyeur en matériel frais. L'avant-côte, notamment, peut aussi contribuer à cette alimentation (Barusseau, 1973). En outre, la valeur du taux de remontée induit des évolutions réglées par la plus ou moins grande vitesse du mouvement. Des constructions littorales peuvent, en particulier, s'édifier lorsque le taux est suffisamment lent (Barusseau *et al.*, 1987)

Outre ces modèles qualitatifs, des prémodèles quantitatifs empiriques exploitent l'idée de rechercher des formes du profil transversal exprimées par des équations de type  $y = ax^b$ . Les paramètres  $a$  et  $b$  se regroupent différemment selon que le littoral est en érosion, en équilibre ou en engraissement (Quélénnec, 1984). La simplicité de cette modélisation fait son intérêt, tempéré toutefois par l'impossibilité de l'appliquer aux côtes à barre(s) sédimentaire(s). On peut cependant penser que le profil défini par la fonction puissance est sous-jacent et joue le rôle d'une onde porteuse vis-à-vis des singularités que sont les barres d'avant-côte. L'analyse des implications reste à faire.

Il existe donc des modèles mais ils ne couvrent pas la totalité du champ ouvert par la diversité des situations réelles. Le problème est en grande partie imputable à l'absence de longues séries de mesures fiables et précises caractérisant les changements de forme du profil transversal du domaine littoral. C'était déjà une conclusion du séminaire relatif aux variations séculaires du niveau moyen des mers (Cazenave et Minster, comm. orale). Dans le même ordre d'idées, Mehta et Cushman (1989) écrivent: «There is a conspicuous lack of field measurements... to calibrate and verify these models. Required are concurrent time series...» (p. 61).

Le présent article expose les résultats d'une surveillance régulière de secteurs sensibles du golfe du Lion, conçue pour répondre à l'exigence d'une acquisition de données de bonne qualité, maintenue sur un intervalle de temps pluriannuel.

## PRÉSENTATION DES SITES D'ÉTUDE ET DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

### La problématique des côtes à barres

Le littoral du golfe du Lion (fig. 1) présente une à trois barres festonnées ou rectilignes (Barusseau et Saint-Guilly, 1981). Il s'agit d'une côte à caractère dissipatif dominant, ce dont rend compte le paramètre  $\epsilon$ , défini par Guza et Inman (1975), Guza et Bowen (1977) et Battjes (1975):

$$\epsilon = (\pi H_b) / (L_0 \text{tg}^2 \beta)$$

$H_b$  : hauteur des brisants;  $L_0$ : longueur d'onde de la houle au large;  $\text{tg} \beta$  : pente de l'avant-plage.

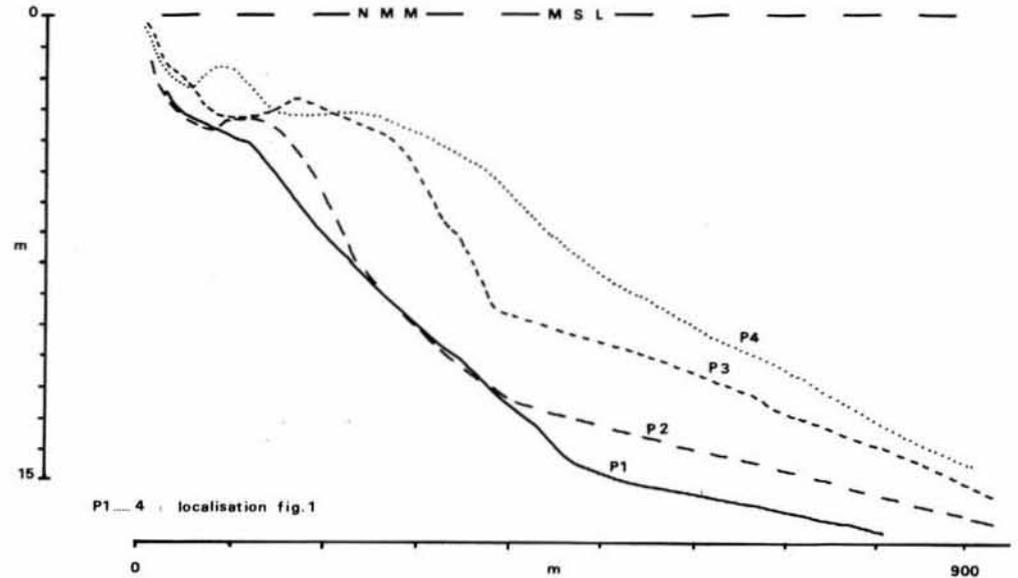
Seules des valeurs inférieures à 20 signalent des plages réfléchissantes; elles sont ici généralement de l'ordre de 122 à 246. L'extrême sud de la côte sableuse, entre Argelès et les promontoires rocheux pyrénéens qui la limitent, fait toutefois exception avec des valeurs aussi basses que 12. L'absence de barre clairement différenciée en est la conséquence (fig. 2).

Dans de telles conditions, on enregistre habituellement de façon régulière, outre la présence de barres linéaires, parallèles au rivage, des brisants plongeants et des oscillations marquées d'infragravité (Short, 1975 ; Wright *et al.*, 1979).

Figure 2

Modifications du profil en fonction de la pente moyenne de l'avant-côte. NMM : niveau moyen de la mer.

*Morphological changes in relation to the mean slope of the nearshore zone. MSL : mean sea level.*



Il n'existe pas de modèle universel de la formation et du déplacement des barres d'avant-côte, en dépit des nombreuses études consacrées à ce sujet (Long et Ross, 1989 ; Evans, 1940 ; Komar, 1976 ; Greenwood et Sherman, 1984 ; Aagaard, 1988).

Plusieurs hypothèses ont été élaborées pour expliquer la formation des barres d'avant-côte débouchant sur plusieurs modèles conceptuels qui mettent l'accent sur un ou plusieurs facteurs prépondérants :

- modèle des brisants plongeants (Evans, 1940 ; Miller, 1976) ;
- modèle de la convergence (King et Williams, 1949 ; Ingle, 1966 ; Sallenger *et al.*, 1983 ; Wright *et al.*, 1982 ; Svendsen, 1984) ;
- modèle de la circulation littorale (Greenwood et Davidson-Arnott, 1975 ; 1979 et Greenwood et Hale, 1980)
- modèle des ondes d'infragravité (Bowen, 1980 ; Holman et Bowen, 1982 ; Bowen et Huntley, 1984 ; Carter *et al.*, 1973 ; Short, 1975 ; Wright *et al.*, 1982 ; Katoh 1984).

Le sens de déplacement des barres semble normalement déterminé par le niveau d'énergie. En période d'accalmie, les barres se déplacent vers le rivage, et inversement lors des coups de mer appuyés (Hayes, 1972 ; Winant *et al.*, 1975 ; Short, 1979 ; Sallenger *et al.*, 1985). Des changements de forme peuvent apparaître (linéaire, en croissant ; Wright *et al.*, 1979 ; Short, 1979 ; Fox et Davis, 1976) et une accréation au rivage en résulter si le délai entre deux coups de mer consécutifs est suffisamment long (Wright *et al.*, 1979). Le golfe du Lion ne paraît se rattacher à ces modèles que par certains de leurs aspects. Ainsi, il ne semble pas qu'il y ait jamais fusion de la barre à la plage. Par contre, l'affrontement des saillants des sinuosités de plage et des cornes de la barre d'avant-côte induit une instabilité morphodynamique qui provoque une migration vers l'aval-transit selon le modèle conceptuel récapitulé dans la figure 3. Par ailleurs, l'existence d'une barre externe profonde, hors de la zone de déferlement (surf zone), ne trouve pas d'homologie dans les descriptions de migration fournies.

### Protocole expérimental

Il découle de ce qui précède plusieurs conditions devant présider à toute recherche d'évolution de la zone littorale. Il faut :

- compte tenu d'une importante variabilité 3D, assurer un positionnement de grande précision ;

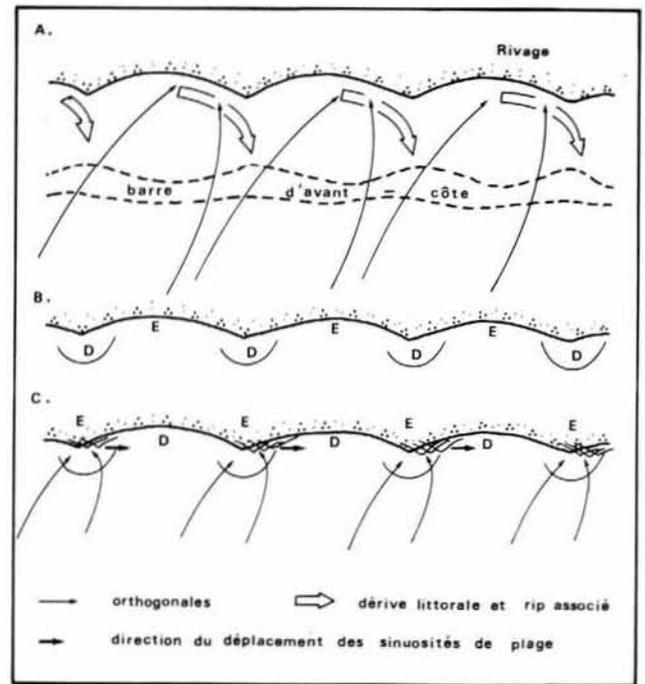


Figure 3

Modèle conceptuel de la migration de la barre d'avant-côte interne. A : composantes de la circulation littorale ; B : zones de dépôt (D) et d'érosion (E) associées au schéma A ; C : évolution résultante et déplacement des zones de dépôt (D) et d'érosion (E). Pointillés : rivage ; tiretés : limites de la barre d'avant-côte interne.

*Conceptual model of the migration of the internal offshore bar. A : components of the circulation pattern ; B : resulting depocentres (D) and erosional zones (E) ; C : subsequent evolution. Stippled area : shore ; dashed lines : limits of the inner offshore bar ; thin arrow : wave orthogonals ; heavy arrow : direction of migration of the shoreline horns ; open arrow : littoral drift and rip-currents.*

- obtenir des mesures de très bonne qualité dans l'ensemble des disciplines mises en cause : océanographie physique côtière, sédimentologie et morphologie ;

- opérer avec régularité pendant des périodes pluriannuelles.

Ces conditions ont conduit à choisir trois sites (fig. 1): Saint-Cyprien, Marseillan et Sète. Le premier correspond à une avant-côte constituée par un matériel sédimentaire peu évolué où s'observent des barres festonnées. Les deux autres, situés sur le lido de l'étang de Thau, présentent un sédiment plus fin et mieux trié et un système de barres en général rectilignes. Une érosion manifeste est observée du côté de Sète tandis que la partie méridionale du lido semble moins menacée.

Dans chaque site, la référence topométrique est constituée par un ensemble de repères (bornes) permanents formant deux bases : la base large, matérialisée par des bornes à pas kilométrique et la base serrée, disposée en position centrale et représentée par une dizaine de bornes (huit à Saint-Cyprien, onze à Sète et Marseillan) séparées de 50 m environ. Les deux bases forment ainsi un observatoire sur lequel il est possible de revenir régulièrement.

#### Le positionnement

La matérialisation des bornes permet la mise en place d'un dispositif assurant une grande précision de positionnement. On a choisi un Geodimeter 140. Cet appareil permet des mesures d'angle en site et en azimut à  $5.10^{-4}$  grade près et des mesures de distance à  $\pm 1$  cm jusqu'à environ 1 400 m. En outre, il résout les relations trigonométriques du triangle et affiche donc aussi la dénivelée à  $\pm 1$  cm.

L'appareil est utilisé aussi bien pour la topographie du cordon dunaire et de la partie émergée de la plage qu'en bathymétrie pour laquelle il fournit la distance au repère. La cote du niveau marin est définie, au cours de la première opération, par repérage de l'altitude du sommet du talus de collision, à la base du jet de rive. Les opérations de bathymétrie sont assurées à l'aide d'un sondeur Fuso monté sur un Zodiac. La précision nominale est  $\pm 5$  cm, la précision réelle dépend des conditions de mer (belle à peu agitée) et peut s'abaisser à  $\pm 15$  cm. La synchronisation des tops se fait par radio VHF.

Les prélèvements sédimentologiques sont positionnés de la même façon, en fonction de la morphologie. On échantillonne systématiquement les creux des fosses de lévigation et les crêtes de barres ainsi que certaines profondeurs synoptiques (0-10 m).

#### La nature des opérations

Les documents topobathymétriques sont dépouillés en laboratoire et restitués en utilisant un logiciel de tracé du profil. Le logiciel DISSPLA permet, au niveau de la base serrée, la réalisation des cartes et des blocs-diagrammes à partir desquels une analyse de différences fait apparaître les changements majeurs ( $> 30$  cm).

Les prélèvements sédimentologiques - ponctuels et par

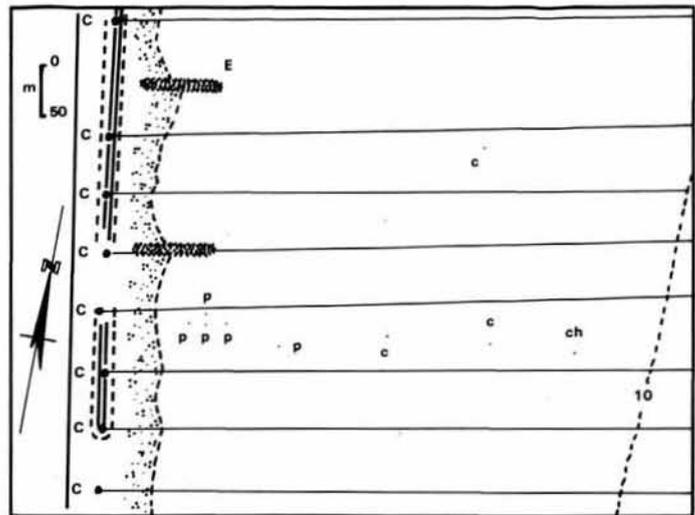


Figure 4

Plan du dispositif de mesures. C : position des profils ; E : épis ; c : courantomètres ; ch : courantomètre-houlographe ; p : perche à houle.

Map of the measuring device location. C: location of the profiles; E: groynes; c: current recorder; ch: current and wave recorder; p: wave gauge.

carottages - ont toujours été réalisés en plongée de façon à permettre une description du fond (intensité de la bioturbation ; figures sédimentaires ; degré d'hétérogénéité sédimentologique).

Les mesures d'océanographie physique ont été réalisées sur le seul observatoire de Saint-Cyprien (fig. 4). Le matériel est celui de l'INRS-Océanologie à Rimouski (Québec), et comprend :

- quatre courantomètres S4 Interoccean, dont un S4 DW houlographe-marégraphe ;
- cinq perches à houle ;
- trois jauges nucléaires à transmission.

#### La fréquence

Les levés topobathymétriques ont été réalisés avec une fréquence mensuelle en fonction des conditions météorologiques. Les mesures sédimentologiques représentent le résultat d'un échantillonnage biannuel. Les observations ont débuté en juin 1988 à Saint Cyprien et en mai 1989 pour les deux observatoires de Sète et Marseillan. Une seule opération d'acquisition intensive de données océanographiques littorales a été exécutée en février et mars 1989, en fin de cycle hivernal, à Saint-Cyprien. Les résultats présentés dans ce qui suit se rapportent, en conséquence, à ce dernier observatoire.

## RÉSULTATS

### Caractères et variations morphologiques de la zone littorale

Un aspect caractéristique de la zone littorale est indiqué dans la figure 5 sous forme d'une carte instantanée (fig.

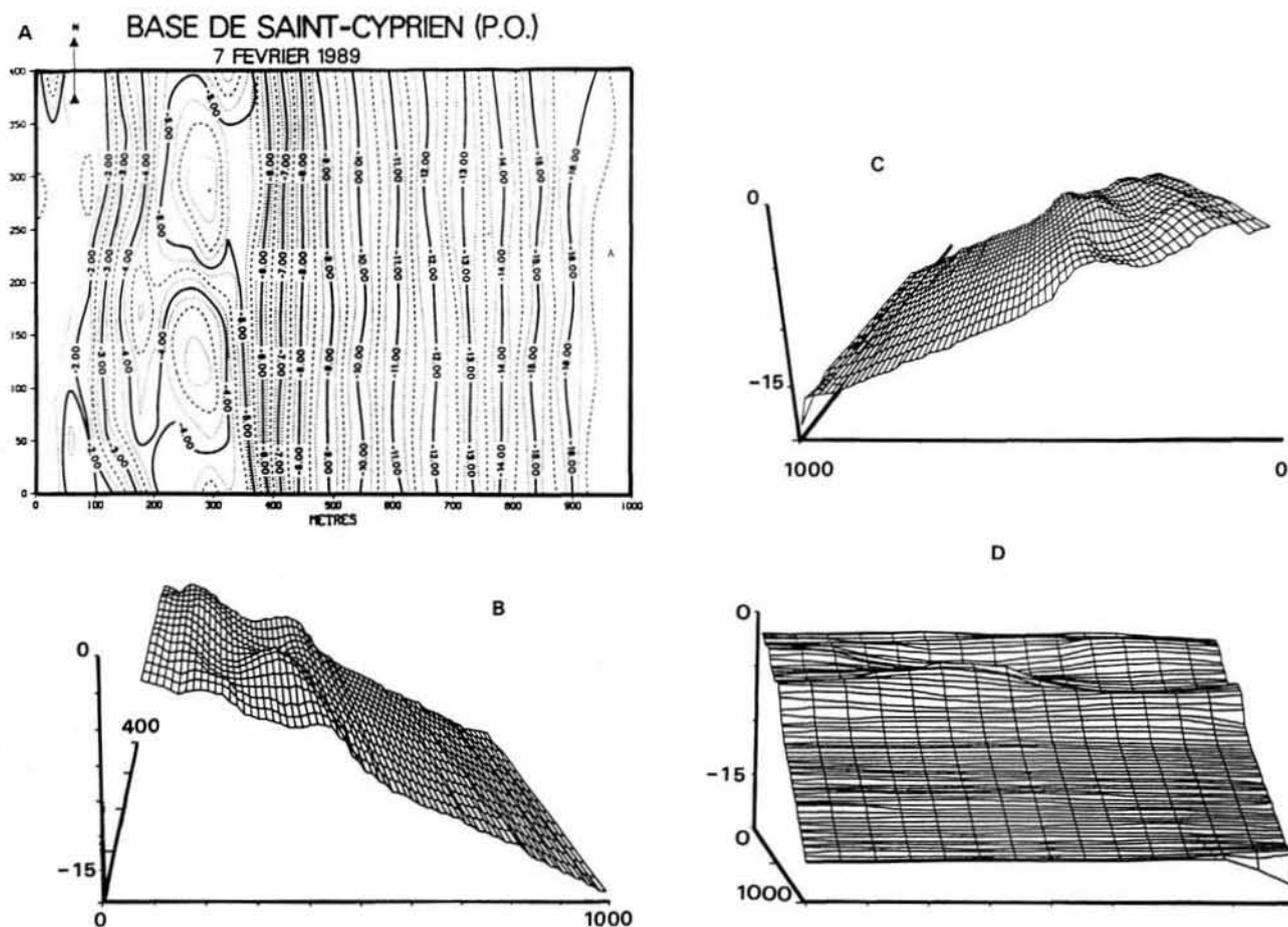


Figure 5

A : carte (intervalle : 0,25 m) ; B : bloc-diagramme vu du Sud ; C : bloc-diagramme vu du Nord ; D : bloc-diagramme vu de l'Est. Toutes les valeurs sont en mètres.

*Morphological map of the Saint-Cyprien nearshore zone in February 1989. A : map (contour interval : 0.25 m) ; B : 3-D sketch from the South ; C : 3-D sketch from the North ; D : 3-D sketch from the East. Distances and depths in metres.*

5A) et de blocs-diagrammes figuratifs de différents points de vue (fig. 5B, C et D). Les deux barres présentes sont festonnées.

Du large vers la côte, le profil montre d'abord une pente régulière - le glacis d'avant-côte - assez peu changeante au cours du temps. A l'approche de la barre externe, le gradient se modifie rapidement. La profondeur de ce point d'articulation entre le glacis et le système des barres varie dans le temps et l'espace. La distribution des pentes moyennes au niveau des barres d'avant-côte (pente basale mesurée entre les creux des fosses de lévigation) montre une plus grande hétérogénéité (fig. 6).

Sur le glacis, la pente croît pendant la période estivale et le début de l'automne, elle diminue entre la fin de l'automne et l'hiver. Il est clair que cette disposition accompagne les transferts de matériel sableux du large vers la côte en régime estival et automnal et, au contraire, la restitution-refuge du sédiment littoral vers le glacis au cours de l'hiver.

La variation au cours du temps des pentes moyennes sous le système des barres d'avant-côte est beaucoup plus confuse. Il semble exister toutefois, pour toute la période étudiée, une corrélation inverse entre la pente basale de la

barre externe et celle de la barre interne (fig. 7). On note aussi l'influence d'un fort facteur «localisation du profil» qui se matérialise par le regroupement des points figuratifs de chaque profil.

La distance de la crête de barre au rivage en fonction de la pente basale montre une opposition entre le système interne et le système externe (fig. 8). La position de la barre interne, écartée du rivage quand la pente diminue, est donc déterminée plus par la profondeur que par la distance. Au contraire, la corrélation est inversée pour la barre externe et la logique explicative n'est donc pas la même.

Parmi les observations que permet la surveillance topobathymétrique mensuelle des observatoires, les cartes-différences font apparaître, aux erreurs de mesure près ( $\pm 15$  cm), les variations positives ou négatives de la topographie sédimentaire. Dans ces conditions, seuls des changements supérieurs à 30 cm peuvent être détectés (fig. 9). La carte figurée montre les changements intervenus entre février et mars 1989. La disposition générale des modifications respecte les orientations parallèles à la côte qui structurent l'épandage sédimentaire. Le schéma est principalement bidimensionnel. Toutefois, en particulier sur la barre externe, une rythmicité longitudinale apparaît

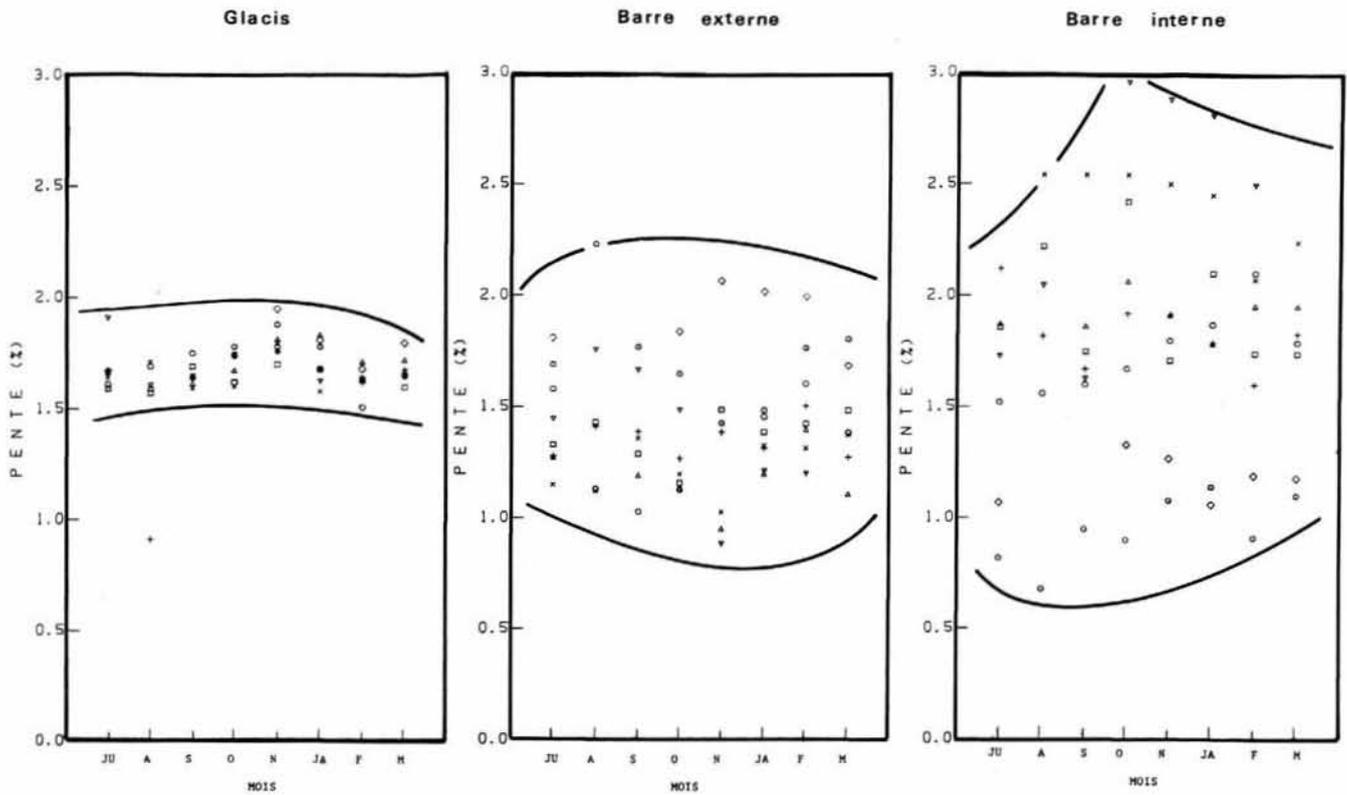


Figure 6

Distribution des pentes du glacis et des barres d'avant-côte.

Temporal changes of the slopes measured in the nearshore rise and in the offshore bar zone. x-axis : time (in months) from July to March; y-axis: slope (%).

dans la localisation des dépo-centres, avec trois points séparés respectivement de 120 et 160 m.

**Caractères sédimentologiques de l'avant-côte**

Le matériel est unimodal dans 63 % des cas, bi- ou trimodal dans les autres échantillons. Cependant, il y a toujours une population dominante sur laquelle ont été mesurés ou calculés tous les indices: médiane ( $\phi_{50}$ ), indice de triage ( $\sigma_1$ ), indice d'asymétrie ( $Sk_1$ ) et indice d'angulosité ( $K_G$ ).

La texture du matériau s'affine vers le large (fig. 10A), mais il existe une grande disparité à chaque niveau (- 10 m, crête de barre externe, fosse de barre externe, crête de barre interne, fosse de barre interne, avant-plage, rivage). Les profils situés au droit de l'embouchure actuelle du Tech (P7) et d'un ancien débouché se distinguent nettement par leurs paramètres granulométriques, montrant l'extrême rigueur des relations dans le profil (normalement à la côte) et la persistance, à l'échelle séculaire, des empreintes paléogéographiques.

Figure 7

Relation entre les pentes basales des deux systèmes de barres d'avant-côte.

Relation between basal slopes of the inner and outer offshore bars. x-axis: slope of the outer bar; y-axis: slope of the inner bar.

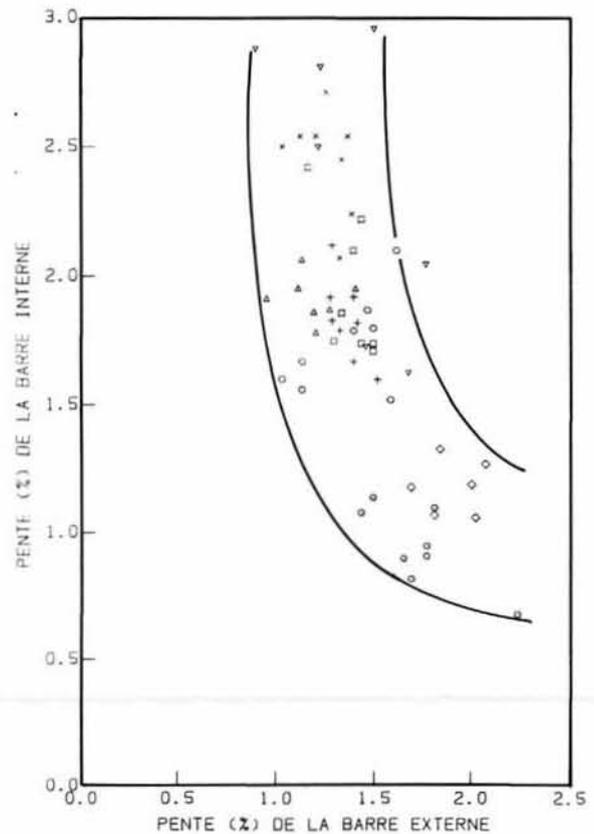


Figure 8

Relation entre la pente basale et l'éloignement du rivage.

Relation between the basal slope and the distance from the shoreline.

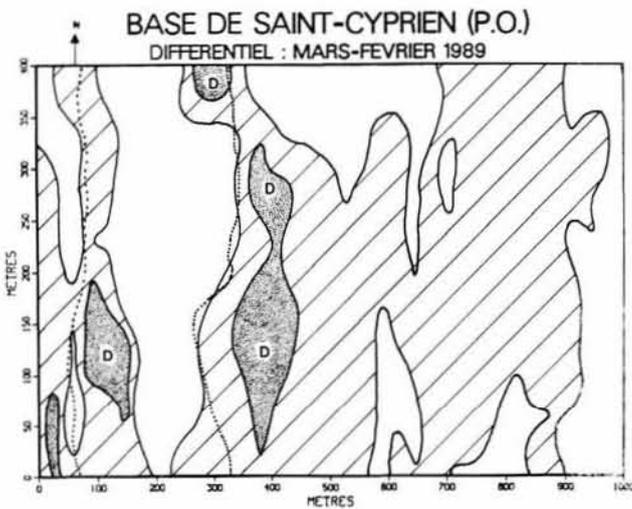
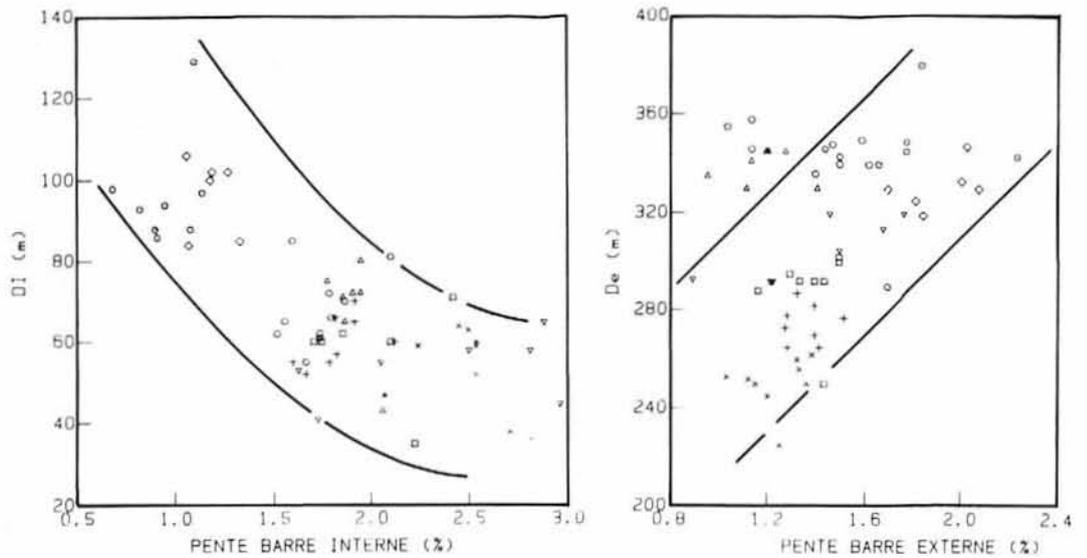


Figure 9

Variations bathymétriques entre février 1989 et mars 1989. Pointillés: engraissement supérieur ou égal à 60 cm; hachures: engraissement entre 30 et 60 cm; D: dépocentres.

Bathymetric changes in the Saint-Cyprien observatory between February and March 1989. Stippled area: positive evolution greater than 60 cm; hatched area: positive evolution between 30 and 60 cm; D: depocentres.

Figure 10

Variations des caractères granulométriques. Le domaine en pointillés des deux graphiques inférieurs indique le champ de variation des paramètres correspondants à Sète et Marseillan.

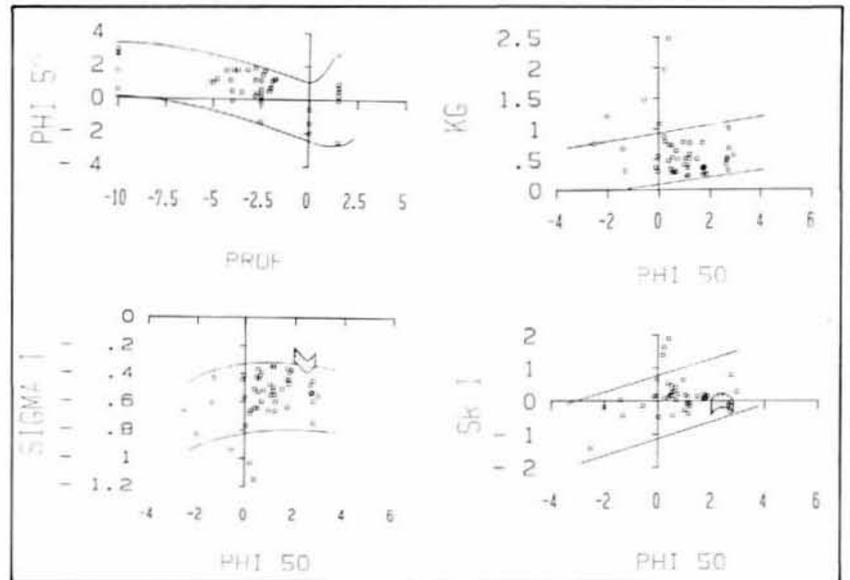
Observed grain-size variations. The stippled areas in the lower sketches show the variation range of the corresponding parameters for the Sète and Marseillan observatories.

La médiane a été utilisée comme paramètre de référence pour contrôler la dispersion des autres indices (fig. 10B, C et D).

En dépit d'un caractère assez fruste, souligné par la médiane, le matériel est en général bien trié, de telle sorte qu'il n'y a pas de corrélation entre  $\sigma_1$  et le paramètre central.

L'asymétrie  $Sk_1$  est généralement positive (60 % des cas), ce qui, dans le système utilisé ici (cumulation sur les grossiers) indique l'existence d'une traîne grossière et/ou d'une troncature du côté des fins. Généralement, ce caractère est considéré comme une caractéristique des zones de dépôt. L'asymétrie varie toujours plus dans le creux des fosses de lévigation que sur les crêtes de barres.

L'angulosité  $K_G$  révèle des courbes le plus souvent platykurtiques. Il y a un déficit de matériel aux extrémités de la distribution. La dispersion des valeurs est moins forte



sur les crêtes que dans les creux des fosses. L'instabilité des fractions extrêmes de la granulométrie s'accroît donc dans les fosses de lévigation qui recueillent un matériel globalement plus évolué.

Tableau 1

Caractères des ondulations mises en évidence par les jauges nucléaires.

*Ripple characteristics exhibited by nuclear gauge measurements.*

PRINCIPALES				SECONDAIRES		
N°	Temps de passage	Hauteur (cm)	Nombre	Temps de passage	Hauteur (cm)	Nombre
1	≥ 11 h 30'	1.2	1	1 h 50'	1.2	40
2	15 h 20'	4	3	2 h 20'	2.4	50
				1 h 50'	4	
				1 h 10'	4.2	
3	12 h 30'	5.6	2	6 h 10'	4.4	40
				6 h 20'	3.6	
4	18 h 10'	2.2	1	8 h 20'	2.2	63
5	11 h 50'	6	6	3 h 00'	4.4	30
				0 h 40'	2	
				2 h 30'	4	
				1 h 10'	4.4	
				0 h 40'	3.8	
				2 h 20'	2.8	
6	15 h 00'	7	5	1 h 50'	1.4	37
				1 h 30'	1.8	
				1 h 50'	4.8	
				1 h 50'	4.6	
				0 h 50'	3.6	
7	11 h 30'	6.6	8	1 h 50'	5.8	24
				0 h 30'	1.8	
				1 h 30'	3.6	
				2 h 00'	3.0	
				1 h 20'	2.4	
				3 h 30'	2.8	
				0 h 40'	1.8	
				0 h 50'	1.8	
8	10 h 20'	4.4	9	1 h 40'	1.6	20
				2 h 30'	3	
				2 h 15'	1.4	
				3 h 00'	2.6	
				1 h 00'	2.4	
9	6 h 10'	4.2	4	0 h 50'	3.2	12
				2 h 10'	3.2	
				0 h 45'	3.0	
				2 h 20'	4.2	
10	6 h 10'	3.4	1	0 h 40'	1.2	20

Les jauges nucléaires employées au cours de l'opération d'acquisition de données océanographiques de février-mars 1989 ont permis de mesurer les déplacements sédimentaires accompagnant les changements du régime météorologique. Ces déplacements se manifestent par le passage d'ondulations dont le profil dépend de la direction et de la vitesse de migration de l'objet sédimentaire. Il existe plusieurs types d'ondulations (principales, secondaires et résiduelles) dont les caractères sont indiqués dans le tableau 1. Il s'agit d'un enregistrement couvrant cinq jours de mesures du 18 au 22 mars 1989. Les jauges ayant été mises en place sur la barre externe (fig. 4), elles ont mesuré les modifications liées à un coup de mer du 20 au 22 mars (vents de SE à ESE, soufflant à 70-120 km.h<sup>-1</sup> à Cap Béart). L'amplitude des oscillations principales correspond aux rides observées en plongée dans cette zone. Ces ondulations sont surtout localisées sur la crête de barre (jauge B). Par contre, sur la pente côté terre (jauge C), on n'observe pas, dans le même temps, de figures sédimentaires mais une évolution très brutale

(«avalanching»), peu après le déclenchement du coup de mer, suivie d'une sédimentation plus lente et plus durable (sédimentation grain à grain résultant du dépôt de particules mises en suspension).

Ces observations rattachent le caractère plus évolué du matériel des fosses de lévigation à l'action des fortes houles sur les fonds moins importants de la crête de barre externe, lieu de déplacement de rides et de remise en suspension, donc de triage.

### Caractères océanographiques

Les résultats obtenus au cours d'une expérience de 38 jours (fig. 4) concernent les variations de cote du niveau d'eau, la houle et les courants moyens et induits.

En raison du régime microtidal (de 4 à 26 cm) à fortes irrégularités de la période semi-diurne (10 h à 14 h 50), la cote du plan d'eau est réglée surtout par les variations barométriques et l'effet de friction du vent. Ce dernier

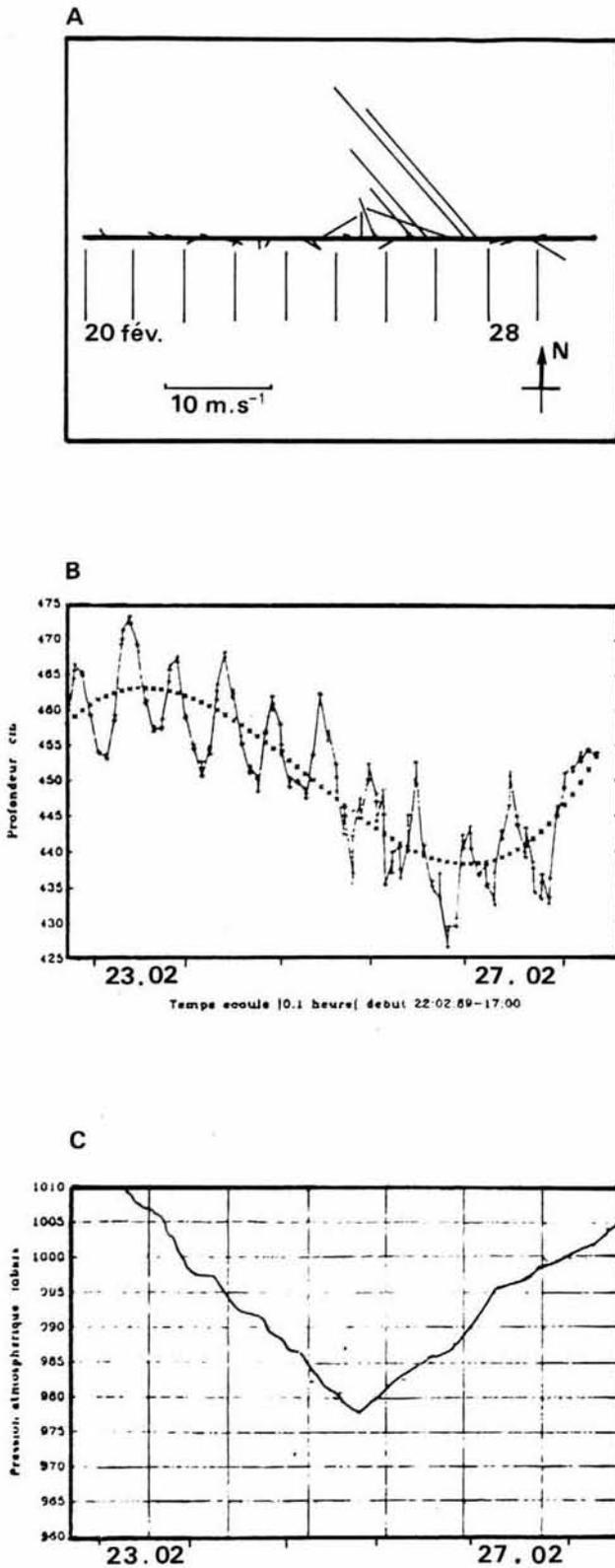


Figure 11

Variations du niveau marin associées aux perturbations de Sud-Est. A : vitesses et directions du vent ; B : Fluctuations du niveau marin (régression de troisième ordre des mesures de niveau) ; C : variation de la pression atmosphérique (régression de troisième ordre des mesures de pression atmosphérique).

*Sea level changes due to a SE gale. A: wind directions and velocities; B: Sea-level fluctuations (third order regression fitted to sea-level measurements); C: barometric variations (third order regression fitted to measurements of the atmospheric pressure).*

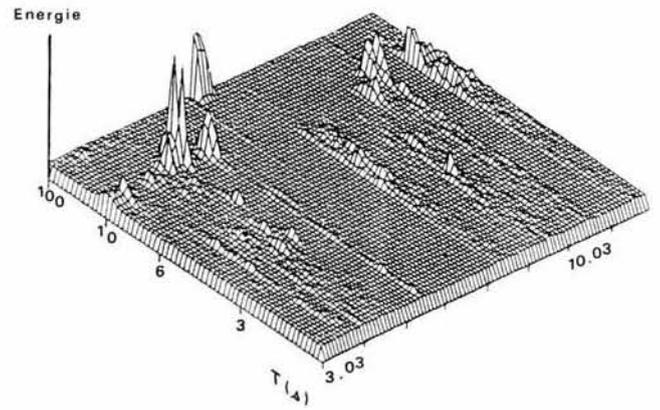


Figure 12

Répartition énergétique des oscillations de courte période (houle et ondes d'infragravité). T : période en secondes.

*Energy spectrum of short-period waves observed from 3 to 11 March 1989 (swell and infragravity wave). T: period (s).*

semble prépondérant; l'élévation du niveau peut alors atteindre + 1 m/NGF par tempête, tandis que les vents de terre (tramontane) engendrent un abaissement de 0,5 m/NGF. Pendant la période de mesures, la perturbation des 26 et 27 février 1989 (fig. 11), illustre le phénomène. On voit que l'élévation du niveau n'est pas du tout en phase avec les variations de pression. Il existe non seulement un décalage mais une inversion car, globalement, aux fortes pressions correspondent les plus hauts niveaux.

Les houles enregistrées pendant le temps de l'expérience se caractérisent par deux régimes, en liaison avec le type de vent dominant. Le régime de vagues engendré par la tramontane présente un large spectre d'énergie lié à l'étalement des périodes mesurées. Au contraire, le spectre d'énergie des vagues issues des vents de Sud-Est est étroit et concentré autour du pic de la hauteur significative. La bande spectrale des conditions intermédiaires se situe en position moyenne (fig.12).

Il existe, à côté des houles, des pics d'énergie de basse fréquence (entre 0,01 et 0,03 Hz) qui appartiennent aux ondes d'infragravité.

La distribution énergétique des oscillations mises en évidence présente des valeurs maximales au bord de la plage et au sommet de la barre interne par temps de SE. La réponse énergétique au niveau de la fosse de lévigation interne et du revers externe de la barre interne est alors 30 à 50 % moins importante. Par vent de terre, la répartition normale à la côte montre que globalement l'énergie est deux à trois fois moindre que par régime de vent marin (fig. 13).

Le dispositif de mesure employé ne comportant pas de houlographes sur la barre externe (sauf un appareil au large de la crête), seuls les courants ont été analysés au niveau du fond sur un profil normal à la côte (fig. 14), le courantographe C4 ayant été en avarie dès le début de l'opération. Les fluctuations enregistrées, exprimées en composante N ou S, W ou E (VN, VS, VO, VE), sont reportées dans le tableau 2. Le maximum atteint ( $0,75 \text{ m.s}^{-1}$ )

Figure 13

Distribution énergétique à la côte des houles de SE et de vent de terre. P1...P4 : perches à houle n°1 à 4 (voir fig. 4). La variance correspond à une échelle d'énergie. Les trois diagrammes du haut se rapportent à des vents de terre, ceux du bas à des houles de SE.

Coastal energy distribution resulting from SE waves and from waves induced by continental winds. P1...P4: wave gauges n° 1 to 4 (see Fig. 4). Variance is a measurement of the wave energy. The three upper sketches are relative to the onshore winds, the three lower ones correspond to the SE waves.

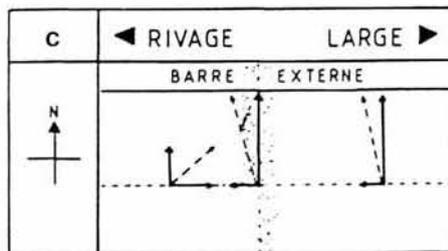
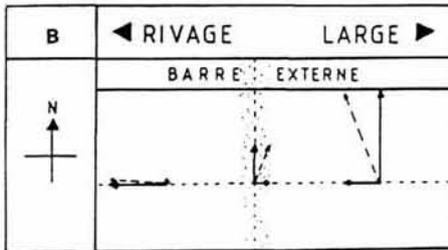
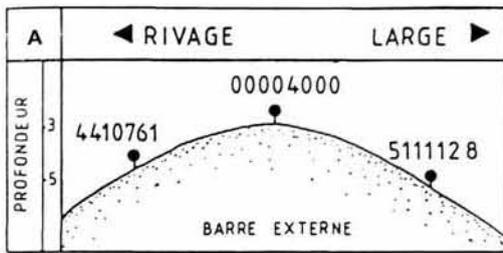
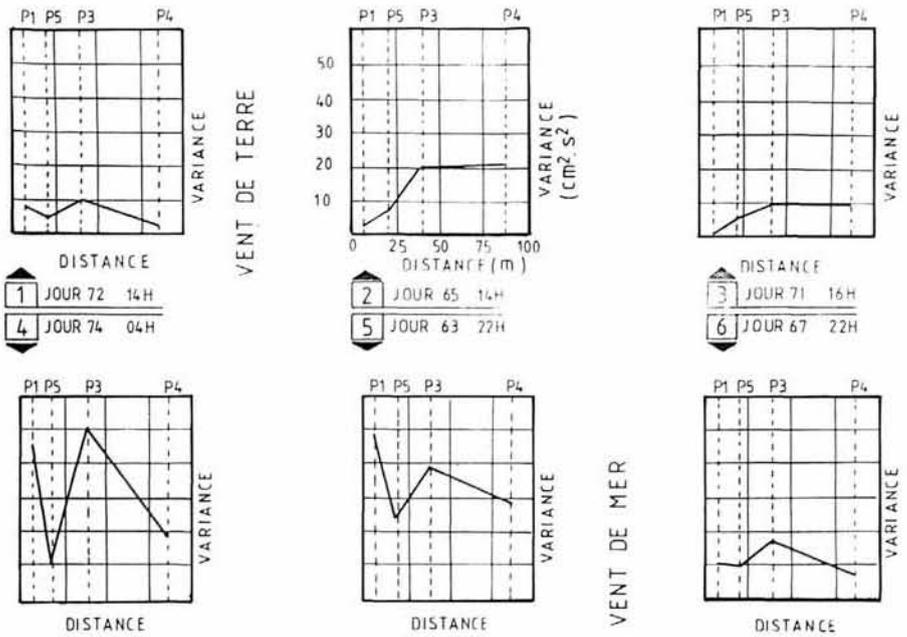


Figure 14

Schéma des orientations de courant sur la barre externe sous l'action des deux principaux régimes météorologiques. A : position des courantographes (les nombres correspondent aux références des appareils) ; B et C : composantes de courants (respectivement par houle de SE et par vent de terre).

Schematic diagram of current directions on the outer bar under the conditions of the two main meteorological regimes. A: current-meter location (numbers are referred to the serial numbers of the devices); B and C: current components (for SE waves and waves induced by onshore winds, respectively; onshore: left; offshore: right).

Tableau 2

Fluctuations des courants près du fond (m.s<sup>-1</sup>).

Fluctuations of the near-bed current velocity (m.s<sup>-1</sup>).

Période	Site		VN	VS	VE	VO
22/2	Pente int.	m	0,06	0,042	0,10	0,042
		M	0,38	0,32	0,38	0,27
au	Crête	m	0,04	0,03	0,085	0,02
		M	0,50	0,42	0,42	0,44
28/2	Pente ext.	m	0	0	0,10	0,08
		M	0,42	0,34	0,51	0,40
2/03	Pente int.	m	0	0,13	0,08	0,10
		M	0,21	0,46	0,40	0,55
au	Crête	m	0	0,085	0,13	0,063
		M	0,19	0,34	0,42	0,46
7/03	Pente ext.	m	0	0,10	0,085	0,13
		M	0,25	0,38	0,38	0,40
7/03	Pente int.	m	0,08	0,13	0,10	0,06
		M	0,55	0,61	0,60	0,57
au	Crête	m	0	0,032	0,063	0,063
		M	0,21	0,46	0,32	0,34
15/3	Pente ext.	m	0	0,02	0,085	0,02
		M	0,23	0,36	0,30	0,30
15/3	Pente int.	m	0,042	0,04	0,03	0,085
		M	0,70	0,63	0,64	0,66
17/3	Crête	m	0,02	0	0,02	0,085
		M	0,25	0,25	0,25	0,30
15/3	Pente ext.	m	0	0,085	0,085	0,10
		M	0,50	0,50	0,75	0,65

M : maximum m : minimum

correspond à l'agitation liée au coup de mer des 27 et 28 mars 1989. Sur la figure 14 sont représentées les observations faites le 25 février de 9 h 00 à 9 h 09, par vent de mer, et le 26 février de 21 h 00 à 21 h 04 mn 30 s, par vent de terre. Le caractère le plus manifeste est la convergence des courants sur le revers de barre par temps de SE et sur le front de barre par temps de tramontane. On doit aussi remarquer la quasi-constance de la composante vers le Nord qui s'oppose au caractère alterné reconnu sur la barre interne.

## DISCUSSION

Les résultats obtenus se rapportent à deux types de questions :

- la nature des transferts sédimentaires sur l'avant-côte,
- la détermination des mécanismes d'évolution des barres.

**Transferts sur l'avant-côte**

L'évolution morphologique du profil résulte de transferts sédimentaires aussi bien longitudinaux que normaux par rapport au rivage. Ces transferts ont été mis en évidence dans cette étude.

Les mesures faites à l'aide des jauges nucléaires montrent que la forme des barres d'avant-côte se modifie par le jeu du déplacement de rides dont on a noté trois échelles de dimension et de temps de passage sur les crêtes de barre. Par contre, sur la pente interne (front de barre), les changements résultent d'un processus plus rapide («avalanching») pendant le maximum du coup de mer, suivi d'une sédimentation grain à grain.

L'orientation de ces déplacements fait apparaître des composantes longitudinales et transversales bien marquées par la répartition des sédiments. Le matériel de l'observatoire de Saint-Cyprien est, en effet, un sédiment relativement frais mais cependant déjà bien trié.

L'angulosité permet toutefois de caractériser l'état de déséquilibre de la structure granulométrique. Il y a déficit de matériel aux deux extrémités de la distribution qui enregistre, par conséquent, l'empreinte de mécanismes normatifs orientés vers un amenuisement général et un rétrécissement de la largeur du spectre dimensionnel. Ces modifications sont principalement matérialisées par la confrontation des résultats de profil à profil. Elles traduisent donc des gradients longitudinaux.

Cependant les indications de transferts normaux au littoral ne sont pas rares. Ils sont démontrés :

- 1) par la persistance des singularités que représentent les embouchures sur tout le profil situé par leur travers ;
- 2) par le fait que la décroissance granulométrique vers le large répercute en profondeur les différences initiales sans les atténuer ;
- 3) par un fort facteur «appartenance à un profil donné», qui regroupe les points de chaque profil (fig. 7) ;
- 4) par l'existence, dans les zones de forts transits latéraux, d'hétérogénéités dans le triage qui répliquent les disparités du matériel sur la plage et l'avant-plage ;
- 5) par la présence, quel que soit le régime de houle, de composantes de courants normales aux isobathes, et aux lignes de reliefs (fig. 14) ;
- 6) par l'approfondissement du point d'articulation (où la base du revers de la barre externe se raccorde à la pente du glacis d'avant-côte) au droit des zones côtières en érosion.

Les modifications morphologiques qui résultent de ces mouvements sédimentaires ne sont toutefois pas suffisamment documentées encore pour qu'on puisse espérer franchir l'étape de la modélisation. On remarquera

seulement que la relation entre la pente de l'avant-côte et le nombre de barres est confirmée (Evans, 1940 ; Komar, 1976). De la même façon, l'opinion de Saylor et Hands (1970), Exon (1975), Greenwood et Sherman (1984) selon laquelle la taille et l'écartement des barres augmentent aussi vers le large, se vérifie ici (fig. 2).

**Mécanismes d'évolution des barres**

Parmi les hypothèses concernant la formation et l'évolution des barres d'avant-côte, deux modèles principaux sont habituellement mis en avant : le modèle de King et Williams dit «du point de brisance» et le modèle de Bowen, faisant appel aux ondes de bord.

Les résultats de Saint-Cyprien sont contrastés. En effet, la barre interne, la plus proche du littoral, semble clairement appartenir au premier type, pourtant contesté par ailleurs (Aagaard, 1988). On a vu (fig. 8) que la distance de la barre à la côte est en relation inverse avec la pente donc corrélée à la profondeur. En outre, la distribution énergétique de la houle montre un maximum sur la crête de la barre interne.

Il n'en est plus de même pour la barre externe pour laquelle la distance dépend directement de la pente. Selon Bowen (1980), la distance s'écrit :

$$x_n = (g \operatorname{tg} \beta z_n^{(r)}) / 4\Omega^2$$

dans laquelle l'indice  $n$  se réfère au mode de l'onde de bord (c'est-à-dire au nombre de lieux de vitesse nulle ou zero-crossings; Carter *et al.*, 1973) ; le code ( $r$ ) prend les valeurs (1) ou (2) selon que l'on a affaire à un ventre ou à un noeud, et les valeurs de  $z_n^{(r)}$  sont données par Bowen (1980);  $\operatorname{tg} \beta$  est la pente et  $\Omega$  la pulsation:  $2\pi/T$ .

Ce second modèle met donc en jeu les ondes de bord ; or on a vu que ce type de facteur pouvait être attendu sur une côte à caractère dissipatif, comme la côte de Saint-Cyprien. Deux arguments militent également en faveur de leur présence ici : d'abord la mise en évidence de pics d'énergie basse fréquence dans les enregistrements (fig. 12), ensuite l'écartement des dépo-centres observés dans les cartes-différences (fig. 9).

Il existe en effet, selon Bowen et Inman (1971), une relation entre la longueur d'onde des festons et la longueur d'onde de l'onde de bord génératrice dont Ursell (1952) a déterminé l'équation:

$$L_c = (g/2\pi) T_c^2 \sin(2n + 1)\beta$$

avec  $T_c$  la période de l'onde de bord,  $n$  son nombre modal et  $\beta$  la pente.

En raison de la circulation littorale engendrée (courants en direction de la plage aux ventres de l'onde de bord et courants d'arrachement aux noeuds), la longueur d'onde de chaque feston serait la moitié de  $L_c$ . On peut donc tirer :

$$T_c = [4\pi\lambda/g \sin(2n + 1)\beta]^{1/2}$$

Dans ces conditions, en utilisant les valeurs de pentes mesurées sur les profils, l'espacement des dépo-centres (120 et 160 m) correspond à des périodes de durée comprise entre 57 et 79 secondes, du même ordre de grandeur que les valeurs observées sur les diagrammes d'énergie.

## CONCLUSION

L'étude préliminaire de l'observatoire de Saint-Cyprien montre le caractère complexe de l'évolution littorale, de telle sorte qu'un seul modèle ne semble pas capable d'expliquer les dispositions observées et leurs variations. Les perturbations du profil que représentent les barres d'avant-côte apparaissent comme des singularités locales et deux modèles, au moins, semblent nécessaires pour les expliquer. Dans la mesure où elles capitalisent une quantité importante des cubatures sédimentaires disponibles sur l'avant-côte, il est souhaitable de vérifier si les tendances évolutives à moyen et long termes les transforment, ce qui implique une surveillance régulière. Indépendamment, la forme générale du profil porteur doit également être modélisée. Dans l'état actuel des

connaissances, le modèle  $y = ax^b$  semble le plus prometteur. Toutefois, il ne pourra être mis en évidence qu'après soustraction de l'effet des barres. Chronologiquement la première question à régler est donc relative à ces grandes unités sédimentaires du golfe du Lion.

## Remerciements

Ce travail a été possible grâce au concours financier de l'IFREMER, de la Région Languedoc-Roussillon et de l'OTAN. Nous remercions en outre, le Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon (Sète, Perpignan et Port-Vendres) pour les prestations matérielles importantes qu'il a consenties.

## RÉFÉRENCES

- Åagaard T.** (1988). A study of nearshore bar dynamics in a low-energy environment; Northern Zealand, Denmark. *J. Coastal Res.*, **4**, 115-128.
- Aloïsi J.-C., G. Auffret, J.P. Auffret, J.-P. Barousseau, P. Hommeril, C. Larssonneur et A. Monaco** (1977). Essai de modélisation de la sédimentation actuelle sur les plateaux continentaux français. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, **2**, 183-195.
- Barousseau J.-P.** (1973). Évolution du plateau continental rochelais (Golfe de Gascogne) au cours du Pléistocène terminal et de l'Holocène. Les processus actuels de la sédimentation. *Thèse Sciences, Bordeaux*, 366 pp.
- Barousseau J.-P. et B. Saint-Guilly** (1981). Disposition, caractères et mode de formation des barres d'avant-côte festonnées du littoral Languedoc-Roussillon (France). *Océanologica Acta*, **4**, 3, 297-304.
- Barousseau J.-P., P. Giresse, H. Faure, A.M. Lézine et J.-P. Masse** (1987). Marine sedimentary environments on some parts of the tropical and equatorial margins of Africa during the late Quaternary. *Continental shelf Res.*, **8**, 1-21.
- Battjes J.A.** (1975). Surf similarity. *Proceedings 14th Coastal Engineering Conference, Copenhagen*, 466-479.
- Bowen A.J.** (1980). Simple models of nearshore sedimentation: beach profiles and longshore bars. In: *The coastline of Canada*, S.B. McCann, editor. Geological Survey of Canada, Paper 80-10, 1-11.
- Bowen A.J. and D.A. Huntley** (1984). Waves, long waves and nearshore morphology. *Mar. Geol.*, **60**, 1-13.
- Bowen A.J. and D.L. Inman** (1971). Edge waves and crescentic bars. *J. geophys. Res.*, **76**, 8662-8671.
- Bruun P.** (1962). Sea level rise as a cause of shore erosion. *J. Waterways Harbors Div.*, **88**, 117-130.
- Carter T.G., P.L.F. Liu and C.C. Met** (1973). Mass transport by waves and offshore sand bedforms. *J. Waterways Harbors Coast. Engineer. Div.*, **99**, 165-184.
- Catalogue sédimentologique des Côtes françaises** (1984). *Côtes de la Méditerranée de la frontière espagnole à la frontière italienne*. Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. Eyrolles Ed., Paris, 290 pp.
- Dean R.G.** (1977). Equilibrium beach profiles, US Atlantic and Gulf coasts. Technical report n°12, University of Delaware, Newark.
- Evans O.F.** (1940). The low and ball of the eastern shore of Lake Michigan. *J. Geol.*, **48**, 476-511.
- Exon N.F.** (1975). An extensive offshore sand bar field in the western Baltic Sea. *Mar. Geol.*, **18**, 197-212.
- Fox W.T. and R.A. Davis** (1976). Weather patterns and coastal processes. In: *Beach and nearshore sedimentation*, Davis R.A. and R.L. Ethington, editors. *Soc. Econ. Paleont. Minard. Spec. Publ.*, **24**, 1-23.
- Greenwood B. and R.G.D. Davidson-Arnott** (1975). Marine bars and nearshore sedimentary processes, Kouchibouguac Bay, New Brunswick. In: *Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation*, J. Hails and A. Carr, editors. Wiley, London, 123-150.
- Greenwood B. and R.G.D. Davidson-Arnott** (1979). Sedimentation and equilibrium in wave-formed bars. A review and case study. *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 312-332.
- Greenwood B. and P.B. Hale** (1980). Depth of activity, sediment flux and morphological change in a barred nearshore environment. In: *The Coastline of Canada*, S.B. McCann, editor. Geological Survey of Canada, Paper 80-10, 89-109.
- Greenwood B. and D.J. Sherman** (1984). Waves, currents, sediment flux and morphological response in a barred nearshore system. *Mar. Geol.*, **60**, 31-61.
- Guza R.T. and A.J. Bowen** (1977). Resonant interactions from waves breaking on a beach. *Proceedings on the 15th International Conference on Coastal Engineering*, 560-579.
- Guza R.T. and D.L. Inman** (1975). Edge waves and beach cusps. *J. geophys. Res.*, **80**, 2997-3012.
- Hayes M.O.** (1972). Forms of sediment accumulation in the beach zone. In: *Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport*, R.E. Meyer, editor. Academic Press, New York, 297-356.
- Holman R.A. and A.J. Bowen** (1982). Bars, bumps and holes: Models for the generation of complex beach topography. *J. geophys. Res.*, **87**, 457-468.
- Ingle J.C.** (1966). *The Movement of Beach Sand*. Elsevier, Amsterdam, 221 pp.
- Katoh K.** (1984). Multiple longshore bars formed by long period standing waves. Report Port Harbour Research Institute, 23, 3-46.

- King C.A.M. and W.W. Williams** (1949). The formation and movement of sand bars by wave action. *Geogr. J.*, **113**, 68-85.
- Komar P.D.** (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 429 pp.
- Long B. et N. Ross** (1989). Revue et classification des barres d'avant-côte. *Bull. Soc. natl Elf Aquitaine (Prod.)*, **13**, 175-187.
- Mehta A.J. and R.M. Cushman, editors** (1989). Workshop on sea level rise and coastal processes. DOE/NBB-0086. Dpt of Energy, Washington, 289 pp.
- Miller R.L.** (1976). Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces. in: *Beach and nearshore sedimentation*. R.A. Davies et R.L. Ethington, éditeurs. SEPM Special publication, 24, 92-114.
- Munk W.H.** (1951). Origin and generation of waves. *Proceedings 1<sup>st</sup> Conference on Coastal Engineering, ASCE*, 1-4.
- Queennec R.E.** (1984). Intérêt de l'analyse des profils de plage pour l'étude de la dynamique sédimentaire littorale. Cas du littoral du delta du Nil. *XVIII<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydraulique, Marseille, L'Hydraulique et la maîtrise du littoral*, 6 pp.
- Sallenger A.H., R.A. Holman and W.A. Birke-Meyer** (1985). Storm-induced response of a nearshore-bar system. *Mar. Geol.*, **64**, 237-257.
- Sallenger A.H., P.C. Howard, C.H. Fletcher and P.A. Howd** (1983). A system for measuring bottom profile, waves and currents in the high-energy nearshore environment. *Mar. Geol.*, **51**, 63-76.
- Saylor J.H. and E.B. Hands** (1970). Properties of longshore bars in the Great Lakes. *Proceedings 12<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering Conference, ASCE*, 839-853.
- Short A.D.** (1975). Multiple offshore bars and standing waves. *J. geophys. Res.*, **80**, 3838-3840.
- Short A.D.** (1979). Three-dimensional beach stage model. *J. Geol.*, **87**, 553-571.
- Svendsen I.A.** (1984). Mass flux and undertow in a surf zone. *Coastal Engineer.*, **8**, 347-365.
- Teisson M.** (1990). Surélévation future du niveau des mers. Conséquences et stratégies dans l'aménagement du littoral. in: *Variation séculaire du niveau moyen des mers. Observations, causes et conséquences, Toulouse, mars 1990*.
- Ursell F.** (1952). Edge waves on a sloping beach. *Proc. R. Soc. London, A* **214**, 79-97.
- Winant C.D., D.L. Inman and C.E. Nordstrom** (1975). Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *J. geophys. Res.*, **80**, 1979-1986.
- Wright L.D., J. Chappel, B.G. Thom, M.P. Bradshaw and P. Cowell** (1979). Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. *Mar. Geol.*, **32**, 105-140.
- Wright L.D., R.T. Guza and A.D. Short** (1982). Dynamics of a high-energy dissipative surf zone. *Mar. Geol.*, **45**, 41-62.