



**HAL**  
open science

## Données récentes sur l'évolution des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse)

Serge S. Suanez, Carole Bruzzi, Sandrine Arnoux-Chiavassa

### ► To cite this version:

Serge S. Suanez, Carole Bruzzi, Sandrine Arnoux-Chiavassa. Données récentes sur l'évolution des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1998, 4 (4), pp.291-311. 10.3406/morfo.1998.966 . hal-00494332

**HAL Id: hal-00494332**

**<https://hal.science/hal-00494332>**

Submitted on 8 Aug 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Données récentes sur l'évolution des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse) /Recent data about the evolution of the offshore beach on the eastern part of the Rhone delta (Napoléon beach and La Gracieuse spit)

In: Géomorphologie : relief, processus, environnement. décembre 1998, vol. 4, n°4. pp. 291-311.

### Résumé

Resume L'évolution récente des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse) est analysée à partir de levés bathymétriques effectués entre 1962 et 1995. Les secteurs de l'embouchure et de l'extrémité de la flèche de la Gracieuse, considérés comme zones de stockage, enregistrent un apport sédimentaire important ; les secteurs intermédiaires correspondent à des zones de transit. La limite de mobilité du profil vertical se situe à 6 m de profondeur ; ces changements sont principalement liés aux transports sédimentaires longitudinaux. Un premier bilan sédimentaire est proposé pour l'ensemble de la période 1962-1995 ; il montre le rôle essentiel des crues exceptionnelles dans l'alimentation du littoral.

### Abstract

Abstract The recent evolution of the offshore beach on the eastern part of the Rhone delta (Napoléon beach and La Gracieuse spit) is analysed using bathymétrie measurements realized between 1962 and 1995. The mouth area and the tip of La Gracieuse spit, considered as storage zones, are characterised by an important sediment supply; the intermediate sectors correspond to the zones of transit. The closure depth corresponding to the limit of the offshore beach changes is reached at -6 m, these changes are essentially related to the longshore sediment transport. A first sediment budget is proposed for the whole period 1962-95; it shows the important role played by the exceptional flood events for the coastal sediment supply.

---

### Citer ce document / Cite this document :

Suanez Serge, Bruzzi Carole, Arnoux-Chiavassa Sandrine. Données récentes sur l'évolution des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse) /Recent data about the evolution of the offshore beach on the eastern part of the Rhone delta (Napoléon beach and La Gracieuse spit). In: Géomorphologie : relief, processus, environnement. décembre 1998, vol. 4, n°4. pp. 291-311.

doi : 10.3406/morfo.1998.966

[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/morfo\\_1266-5304\\_1998\\_num\\_4\\_4\\_966](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/morfo_1266-5304_1998_num_4_4_966)

## Données récentes sur l'évolution des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse)

### *Recent data about the evolution of the offshore beach on the eastern part of the Rhone delta (Napoléon beach and La Gracieuse spit)*

Serge SUANEZ\*, Carole BRUZZI\*\*, Sandrine ARNOUX-CHIAVASSA\*\*\*

#### Résumé

L'évolution récente des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse) est analysée à partir de levés bathymétriques effectués entre 1962 et 1995. Les secteurs de l'embouchure et de l'extrémité de la flèche de la Gracieuse, considérés comme zones de stockage, enregistrent un apport sédimentaire important ; les secteurs intermédiaires correspondent à des zones de transit. La limite de mobilité du profil vertical se situe à 6 m de profondeur ; ces changements sont principalement liés aux transports sédimentaires longitudinaux. Un premier bilan sédimentaire est proposé pour l'ensemble de la période 1962-1995 ; il montre le rôle essentiel des crues exceptionnelles dans l'alimentation du littoral.

**Mots clés :** delta du Rhône, fonds marins, bathymétrie, transit sédimentaire longitudinal, limite de mobilité du profil vertical, bilan sédimentaire.

#### Abstract

*The recent evolution of the offshore beach on the eastern part of the Rhone delta (Napoléon beach and La Gracieuse spit) is analysed using bathymetric measurements realized between 1962 and 1995. The mouth area and the tip of La Gracieuse spit, considered as storage zones, are characterised by an important sediment supply; the intermediate sectors correspond to the zones of transit. The closure depth corresponding to the limit of the offshore beach changes is reached at -6 m, these changes are essentially related to the longshore sediment transport. A first sediment budget is proposed for the whole period 1962-95; it shows the important role played by the exceptional flood events for the coastal sediment supply.*

**Key words:** Rhone delta, off-shore beach, bathymetry, longshore sediment transport, closure depth, sediment budget.

#### *Abridged English version*

*The aim of this study is to analyse the recent morphological changes of the offshore beach on the eastern part of the Rhone river: Napoléon beach and La Gracieuse spit (fig. 1). It is based on bathymetric measurements carried out between 1962 and 1995 by the Port Autonome de Marseille (tab. 1). We focused on three points: the first one is dealing with geomorphological changes using diachronic analysis of beach profiles, a classification of nearshore bar systems is proposed; the second one concerns the calculation of the closure depth; the third one is based on the estimation of the sediment budget over the whole period (1962-1995).*

\*. GEOLITTOMER - Brest - UMR 6554 - CNRS - Institut Universitaire Européen de la Mer, Technopôle Brest-Iroise, Université de Bretagne Occidentale, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané.

\*\* . CAGIÉP - URA 903 - CNRS - Institut de Géographie, Université de Provence - Aix-Marseille I, 29 Av. Robert Schuman, F-13621 Aix-en-Provence cedex.

\*\*\*. Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre (LSEET), Université de Toulon et du Var, BP 132, 83957 La Garde cedex.

The morphological changes analysis is based on six off-shore beach profiles distributed along the coast according to the geomorphological characteristics (fig. 1). The most prograded zones are located on the mouth area, and the tip of La Gracieuse spit (fig. 3). The zone corresponding to the fossil subdelta of Pégoulie is retreated due to the shifting of the central part of the spit towards the NW (fig. 2). Nevertheless, the progradation speeds and the accretion rates of the present prodelta have been reduced since 1934 (tab. 2 and 3). This evolution might be explained by the reduction of the sediment input of the Rhone river due to the decrease of the flood frequency for the end of the Little Ice Age, and the river management (dams) since the 60's.

The classification of the nearshore bars shows a nearshore bar system (group V) front of Napoléon beach and the subdelta of Pégoulie. A two bars system is recognized for the profiles 2 and 5, while the central part of the subdelta of Pégoulie (profiles 3 and 4) is characterized by a one bar system. This is due to the energy wave concentration in this area. On the tip of the spit, a transverse bar system is observed. It corresponds to the group IV.

The closure depth corresponds to the limit where the beach profile does not change anymore. In this case, these medium term changes are directly related to the longshore sediment transport. The calculation of the closure depth has been carried out using two different methods: the use of Hallermeier equation based on wave climate parameters (tab. 4), the statistical analysis of the bathymetric data (fig. 6). Both methods show the same results with a closure depth reached at -6 m, excepted for the mouth area and La Gracieuse spit. This limit corresponds to the one obtained for the Ebro delta coast and confirms observations made by former authors.

The estimation of the sediment budget has been realised over two different periods: 1962-1988 and 1988-1995 (tab. 5). The first period is characterized by a slight deficit of sediment which might be explained by the error induced by the calculation. The second one is concerned with a large sediment supply due to the exceptional floods (October 93, January 94 and November 94). This evolution confirms the important role played by the river sediment input in this area. The supply of the eastern part of the Rhone is related to the eastern drift currents.

These results are in agreement with former studies and confirm the role played by the "substantial" river sediment input in the eastern coastal system of the Rhone delta. Despite the reduction of the solid river discharge, the continual renewing of the coastal sediment supply is still active in this area. This situation is different from the coast located on the western part of the Rhone river where the supply is mainly realised by the erosion of fossil stocks.

## INTRODUCTION

Comparativement à l'évolution du trait de côte, les changements enregistrés par les fonds marins représentent un élément essentiel dans l'étude des zones côtières (Bowyer, 1992 ; List *et al.*, 1997 ; Irish et Lillycrop, 1997). Bien plus, ces deux visions de l'espace littoral sont très complémentaires et permettent d'appréhender les modifications morphosédimentaires de la frange littorale sous tous ses aspects.

Dans le secteur oriental du delta du Rhône de nombreuses recherches ont été réalisées depuis les années 50 (Kruit, 1955 ; Duboul-Razavet, 1956 ; Juniet, 1962). Les auteurs étudièrent de façon remarquable les questions de la mise en place des stocks sédimentaires holocènes et des dynamiques littorales actuelles. Cependant leurs travaux ne s'intéressèrent que très partiellement à l'évolution des fonds marins. Ce n'est qu'à partir des années 70, avec la construction du complexe industriel de Fos-sur-Mer (fig. 1), que la question fut abordée. Le travail de Vernier (1972) reste à ce titre considérable. L'auteur étudie l'évolution de la bathymétrie des fonds compris entre le prodelta actuel de Roustan et la flèche de la Gracieuse de 1895 à 1962 (fig. 1). Il souligne l'importante progradation de la plage sous-marine aux abords immédiats de

l'embouchure. Dans la partie médiane de la flèche de la Gracieuse, au niveau du sous-delta fossile de Pégoulie, les effets de l'érosion et de la sédimentation se conjuguent entraînant une translation du profil vertical sous-marin autour d'une profondeur de 10 à 12 m ; l'ablation se concentre dans la partie sommitale tandis que la sédimentation exhausse les aires les plus profondes. L'auteur conclut que les apports importants du Rhône compensent les effets de l'érosion marine dans ce secteur.

Plus tard, avec les différents programmes d'aménagement de la flèche de la Gracieuse, de nombreuses recherches effectuées par des bureaux d'études reprendront la question (SOGREAH, 1984, 1988a, 1988b). Ces travaux insistent sur l'action des tempêtes d'E-SE dans la mobilisation transversale des corps sableux de la plage sous-marine

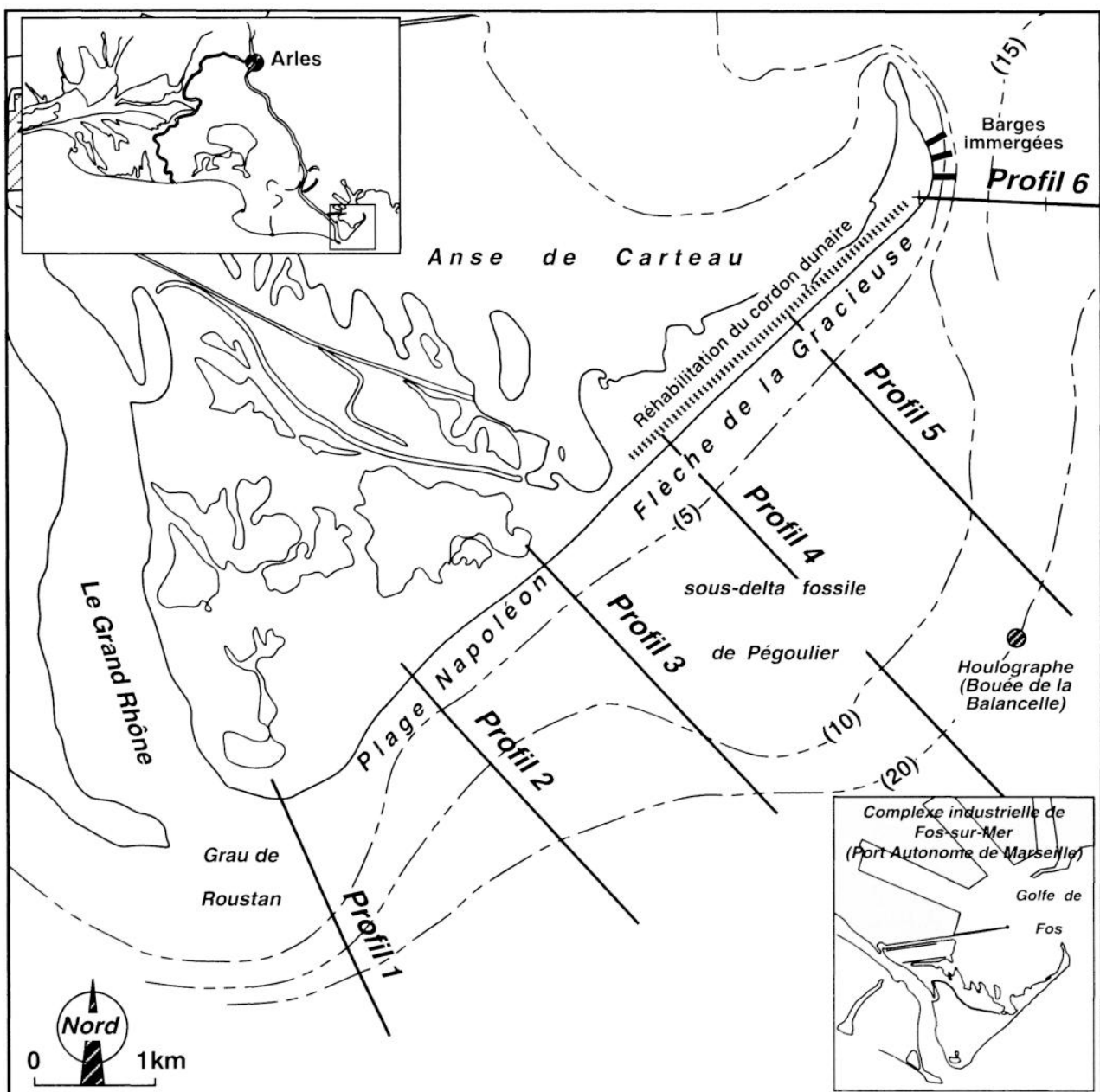


Fig. 1 Carte de localisation. Fig. 1 - Location map.

vers la côte. Ces processus se traduisent par la destruction du sous-delta fossile de Pégoulie jusqu'à 25 m de profondeur et expliquent le déplacement de la partie centrale de la flèche vers le NW.

Dans la continuité de ces travaux, cette étude propose un état de la question pour la période récente, de 1960 à 1995. Les résultats seront présentés en trois points : dans un premier temps, nous aborderons l'étude morphologique de la plage sous-marine à partir des changements enregistrés par le profil sous-marin. L'analyse des corps sédimentaires immergés permettra de replacer l'ensemble de ces structures dans la classification des barres d'avant-côte ; dans un deuxième temps, nous définirons la profondeur limite de mobilité du profil vertical et les temps de réponse qui lui sont associés, enfin, nous proposerons une estimation du bilan sédimentaire sur l'ensemble de la période 1962-1995.

#### LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude correspond à la partie orientale du delta du Rhône formée par la plage Napoléon et la flèche de la Gracieuse (fig. 1). Ce littoral constitue un linéaire côtier sableux d'environ 7 km orienté SW-NE et reste, de ce fait, soumis à deux dynamiques principales : les courants de dérive littorale orientés d'ouest en est, parallèlement à la côte, et les houles de tempête d'est à sud-est, de direction sub-perpendiculaire. Ces deux agents morphodynamiques ont largement commandé la construction de ce secteur qui ne prend sa physionomie actuelle qu'à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, date à laquelle l'exutoire rhodanien est définitivement et "artificiellement" orienté vers le S-SE, *via* le Grau de Roustan. De cette histoire subsiste aujourd'hui une topographie sous-marine matérialisée par la présence du sous-delta fossile de Pégoulie. Depuis 1944, on estime à plus de 400 m le recul de la partie centrale de la flèche de la Gracieuse alors que l'allongement du poulier atteint 1200 m. Ce recul du littoral est illustré par l'érosion du sous-delta de Pégoulie (fig. 2). La plage Napoléon, quant à elle, enregistre une progradation d'environ 120 m (Suanez et Simon, 1998).

Quant à la plage sous-marine, elle est marquée par l'existence de barres d'avant-côte dont le nombre et la structure diffèrent suivant les secteurs. Ces corps sédimentaires, dont la construction est liée aux transferts d'énergie entre la houle et le fond marin, ont été mentionnés par plusieurs auteurs (Duboul-Razavet, 1956 ; Blanc, 1977). Cependant, ils n'ont, jusqu'à ce jour, fait l'objet d'aucune étude exhaustive quant à leur typologie et leur mise en place.

Les aménagements littoraux sont liés à l'implantation du complexe industriel de Fos-sur-Mer à partir des années 60. Ils se concentrent sur la flèche de la Gracieuse (fig. 1). On observe, d'une part, l'immersion de barges en bout de flèche afin de bloquer le transit sédimentaire longitudinal et d'orienter son allongement vers le NW. Cet aménagement empêche le colmatage du chenal d'accès au port maritime. La deuxième intervention humaine concerne la réhabilitation, à partir de 1988, du cordon dunaire sur la partie émergée de la flèche afin de solidifier et prévenir l'édifice contre l'érosion marine (Suanez et Bruzzi, 1998). Ces aménagements ont très largement influencé l'évolution morphosédimentaire de la plage aérienne dans ce secteur (Suanez, 1995).

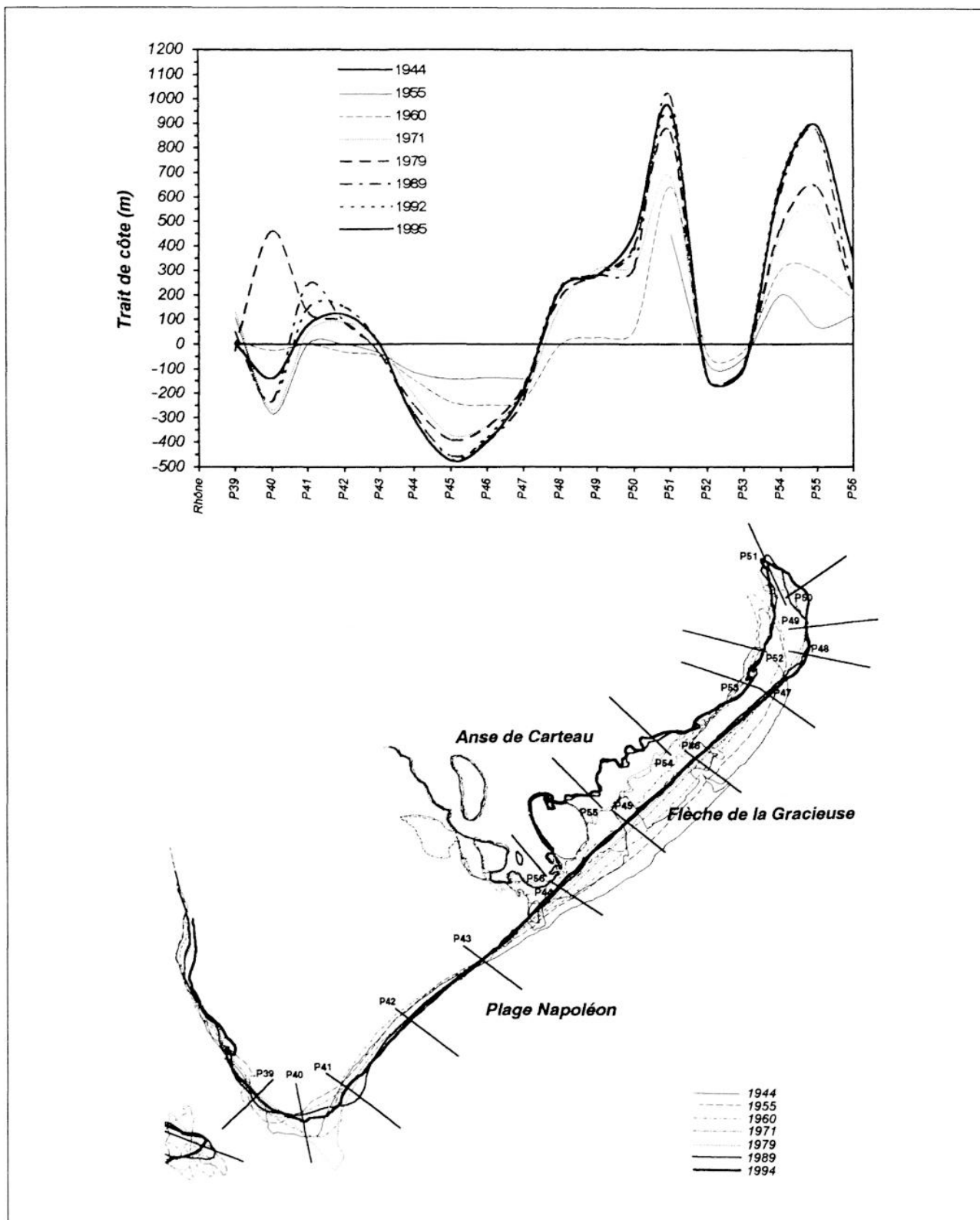


Fig. 2 – Evolution mi-séculaire du trait de côte à l'est de l'embouchure du Rhône.

Fig. 2 – Shoreline changes for the last fifty years in the eastern part of the mouth of the Rhône.

## ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

L'étude repose sur l'acquisition de minutes bathymétriques encore jamais exploitées et couvrant la période 1962-1995 avec une périodicité allant de 1 à 8 ans (tab. 1). Le secteur et la période diffèrent pour chaque campagne de mesure ; cependant les sondes sont effectuées suivant un maillage de points dense (une radiale tous les 100 m) et une équidistance des isobathes très fine (10 cm). Elles ont été réalisées, en grande partie, par le Port Autonome de Marseille soucieux de connaître l'évolution de ce secteur, et plus particulièrement, celle de la flèche de la Gracieuse dont le maintien est essentiel pour la protection des installations portuaires du golfe de Fos.

Date	Organisme	Période de mesure	Secteur	Echelle
1962	P.A.M.	Juillet-Août-Septembre	1+2+3+4	1/10.000
1963	P.A.M.	inconnue	1+2+3+4	1/10.000
1964	P.A.M.	Septembre-Octobre-Novembre	1	1/10.000
1965	P.A.M.	12-13-14 Mai	4	1/1.000
1967	P.A.M.	4-7-11-17 Août	4	1/1.000
1974	S.H.O.M.	inconnue	2+3+4	1/10.000
1980	P.A.M.	inconnue	2+3+4	1/10.000
1988	P.A.M.	28 Avril-13 au 27 Juin	1+2+3+4	1/10.000
1994	P.A.M.	29-30 Juin	4	1/2.000
1995	P.A.M.	Mai-Juin-Juillet-Août	1+2+3+4	1/10.000

Tableau 1 – **Inventaire des cartes bathymétriques.** 1 : secteur de l'embouchure ; 2 : plage Napoléon ; 3 : flèche de la Gracieuse ; 4 : poulcier de la flèche ; P.A.M. : Port Autonome de Marseille ; S.H.O.M. : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

*Table 1 – Inventory of the bathymetric maps.* 1: mouth area; 2: Napoléon beach; 3: La Gracieuse spit; 4: the tip of the spit; P.A.M.: Port Autonome de Marseille; S.H.O.M.: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Un des points essentiels dans le traitement des mesures bathymétriques se rapporte aux corrections à apporter aux données brutes. Elles sont de deux ordres (Bowyer, 1992). D'une part, les erreurs horizontales liées au recalage, par l'opérateur, des différentes minutes sur un système géoréférencé commun de façon à pouvoir les superposer. D'autre part, les erreurs verticales induites par les variations du plan d'eau (marée et changement du niveau marin), et les différentes instrumentations utilisées dans la mesure. Les erreurs horizontales induites sont minimisées par le fait que l'ensemble des minutes était déjà calé sur un système de coordonnées géoréférencé (Lambert III). Aucune correction n'a été effectuée par l'opérateur sur ce plan. A propos des erreurs verticales, précisons que les relevés ont été effectués par beau temps (situation anticyclonique), sur une courte période, durant le printemps et l'été, de manière à éliminer les fluctuations du plan d'eau d'ordre barométrique. En outre, les sondes sont réduites au zéro des plus basses mers de façon à corriger les effets marégraphiques. A l'inverse, les corrections à apporter concernent l'eustatisme et la marge d'erreur induite par la mesure. La montée relative du niveau marin dans ce secteur est évaluée à 2 mm/an (Suanez *et al.*, 1997), ce qui représente une correction de 6,6 cm entre le premier et le dernier



levé (1962-1995, soit 33 ans). L'instrumentation utilisée, quant à elle, est de deux sortes. Pour les minutes les plus anciennes (1962 à 1967), les sondages ont été réalisés à l'aide d'une sonde à main ou d'une cordelle. A partir des années 70, les mesures sont effectuées par sondages à ultra-sons. Pour ces deux types de mesure, le SHOM avance un seuil d'erreur compris entre 10 cm et 30 cm pour des profondeurs supérieures à 30 m (hauts fonds). Pour les données qui nous concernent, 1 % d'erreur est raisonnablement admis, soit un maximum de 20 cm pour les plus hauts fonds. En toute prudence, une marge d'erreur totale de  $\pm 26,6$  cm peut être avancée, soit une correction maximum d'environ 50 cm entre la première et dernière minute. Il est toutefois peu probable que ce seuil soit atteint mais nous en tiendrons compte dans l'interprétation des résultats.

L'analyse repose sur l'utilisation de six profils se prolongeant jusqu'à 20 m de profondeur et répartis le long du littoral en fonction des critères géomorphologiques déterminants (fig. 1) : le profil 1 sur le prodelta actuel de Roustan, le profil 2 au droit de la plage Napoléon, les profils 3, 4 et 5 sur le sous-delta fossile de Pégoulie (flèche de la Gracieuse), le profil 6 sur la partie terminale de la flèche (poulier), en amont des aménagements littoraux (barges immergées en épis).

#### LES VARIATIONS MORPHOLOGIQUES DE LA PLAGE SOUS-MARINE

La méthode de traitement repose sur la superposition et l'analyse diachronique des profils bathymétriques (fig. 3). Cette approche, purement descriptive, permet d'apprécier le comportement des fonds marins à une échelle pluridécennale. Une classification des barres littorales est proposée à partir de l'analyse morphologique des corps sédimentaires immergés. Elle repose essentiellement sur les travaux de Greenwood et Davidson-Arnott (1979 *in* Long et Ross, 1989). D'autres classifications, basées sur l'utilisation de paramètres quantitatifs, tels que les indices de réflectivité ( $e$ ,  $x$  ou encore  $B_s$ ), peuvent être également utilisées (Short, 1979 ; Wright *et al.*, 1979 ; Wright et Short, 1984). Cependant, à ce stade de l'étude, nous nous limiterons à une approche purement qualitative, tant l'utilisation des paramètres quantitatifs en milieu microtidal, et qui plus est de type deltaïque, pose encore des problèmes de transposition et d'interprétation.

#### Une évolution contrastée suivant les secteurs

Le profil 1, centré sur le grau de Roustan, montre une plage sous-marine peu profonde, très étendue et plate (en moyenne 2 m de profondeur jusqu'à plus de 1000 m du rivage pour une pente nulle). Elle correspond au lobe prodeltaïque actuel. Ce dernier se termine par une large barre (300 m d'amplitude), d'une hauteur comprise entre 1 et 2 mètres. A la barre d'embouchure succède le talus dont la pente augmente considérablement (de 4 à 6 % jusqu'à plus de 25 m de profondeur). L'analyse diachronique montre que le prodelta prograde sur toute la période (fig. 3a). Entre 1963 et 1995, le sommet du talus prodeltaïque enregistre une avancée d'environ 270 m, soit 8,5 m/an. Cette progradation se concentre toutefois sur la période la plus récente (1988-1995). Nous avons très certainement là, l'enregistrement des crues exceptionnelles de 1993 et 1994 dont les apports sédimentaires ont été considérables (Pont et Bardin, 1996 ; Pont, 1997). Cette valeur reste cependant inférieure aux données mesurées par la SOGREAH (1984) qui a montré qu'entre 1934 et 1962 la vitesse de progradation était de 25 m/an avant de chuter à 12 m/an entre 1962 et 1984.

Le secteur de la plage Napoléon représenté par le profil 2 montre une pente générale constante d'environ 1 %, quelle que soit la période considérée. On observe une succession de deux barres comprises entre 0 et 4 m de profondeur et dont la hauteur n'excède pas 2 mètres. L'amplitude de ces corps sédimentaires atteint 100 à 200 mètres. Sur l'ensemble de la période, le profil sous-marin prograde d'environ 100 mètres (fig. 3b). Ce mouvement ne modifie cependant pas la morphologie de la plage immergée, les deux barres littorales existantes en 1963 migrent avec l'ensemble du profil en conservant la même distance par rapport au rivage. Les changements enregistrés par le profil vertical semblent s'atténuer vers 7 m de profondeur.

Au droit du sous-delta fossile de Pégoulie, la plage sous-marine présente la même allure pour l'ensemble des profils 3, 4 et 5 (fig. 3c, 3d et 3e). La zone infralittorale proche (< 5 m de profondeur) est marquée par une pente comprise entre 0,5 et 0,9 % suivant le secteur. Ces valeurs tendent à diminuer plus on s'éloigne de la côte (0,3 % à 7 m de profondeur et 1,5 à 2 % à 20 m de profondeur). Une différence subsiste toutefois, elle concerne le nombre et la morphologie des barres littorales. Pour les profils 3 et 4 on observe une barre très étendue (entre 300 et 400 m d'amplitude) pour une hauteur inférieure à 2 m. Elle se situe généralement à une profondeur comprise entre 3 et 5 m. Au niveau du profil 5, on compte deux barres moins étendues (environ 200 m d'amplitude) pour une hauteur toujours inférieure à 2 m. Elles se localisent respectivement à 1,5 et 4 m de profondeur. L'ensemble de ce secteur enregistre un recul supérieur à 100 m. Cette évolution s'inscrit dans un mouvement quasi séculaire qui s'explique par le déplacement de la flèche de la Gracieuse vers le NW clairement illustré par les changements du trait de côte (Juniet, 1962 ; Vernier, 1972 ; Suanez et Simon, 1998). Ce recul s'accompagne d'une migration des systèmes de barres vers la côte tandis que leur distance au rivage est conservée. Là encore, les changements enregistrés par le profil vertical s'atténuent vers 7 m de profondeur. (*Le surcreusement observé à 10 m de profondeur au niveau du profil 5 pour les périodes les plus récentes, correspond à des prélèvements sédimentaires effectués en 1975 par le Port Autonome de Marseille. L'analyse et les calculs réalisés dans cette étude tiennent compte de ce paramètre.*)

Le poulie de la flèche (profil 6), se distingue des secteurs précédents par les fortes pentes affectant la plage sous-marine jusqu'à plus de 15 mètres de profondeur (8,5 % jusqu'à -5 m et plus de 11 % jusqu'à -17 m). La zone infralittorale lointaine est caractérisée, quant à elle, par une pente plus douce (0,4 %). On compte une seule barre de faible amplitude (< 100 m) et d'une hauteur également réduite (environ 1 m). Sa position a varié dans le temps ; située vers 3 m de profondeur au début des années 60, on la retrouve entre -6 et -7 m pour la période la plus récente. Ce déplacement accompagne la migration de l'ensemble du profil sous-marin qui prograde d'environ 150 m entre 1962 et 1995 (fig. 3f). Cette évolution s'explique par une importante alimentation sédimentaire entraînant l'allongement de la flèche de la Gracieuse, mais surtout, par le rôle des aménagements littoraux dans ce secteur (barges immergées) qui bloquent le transit sédimentaire longitudinal (Suanez, 1995 ; Suanez et Simon, 1998). Les changements du profil vertical sont encore importants au-dessous de 10 m de profondeur.

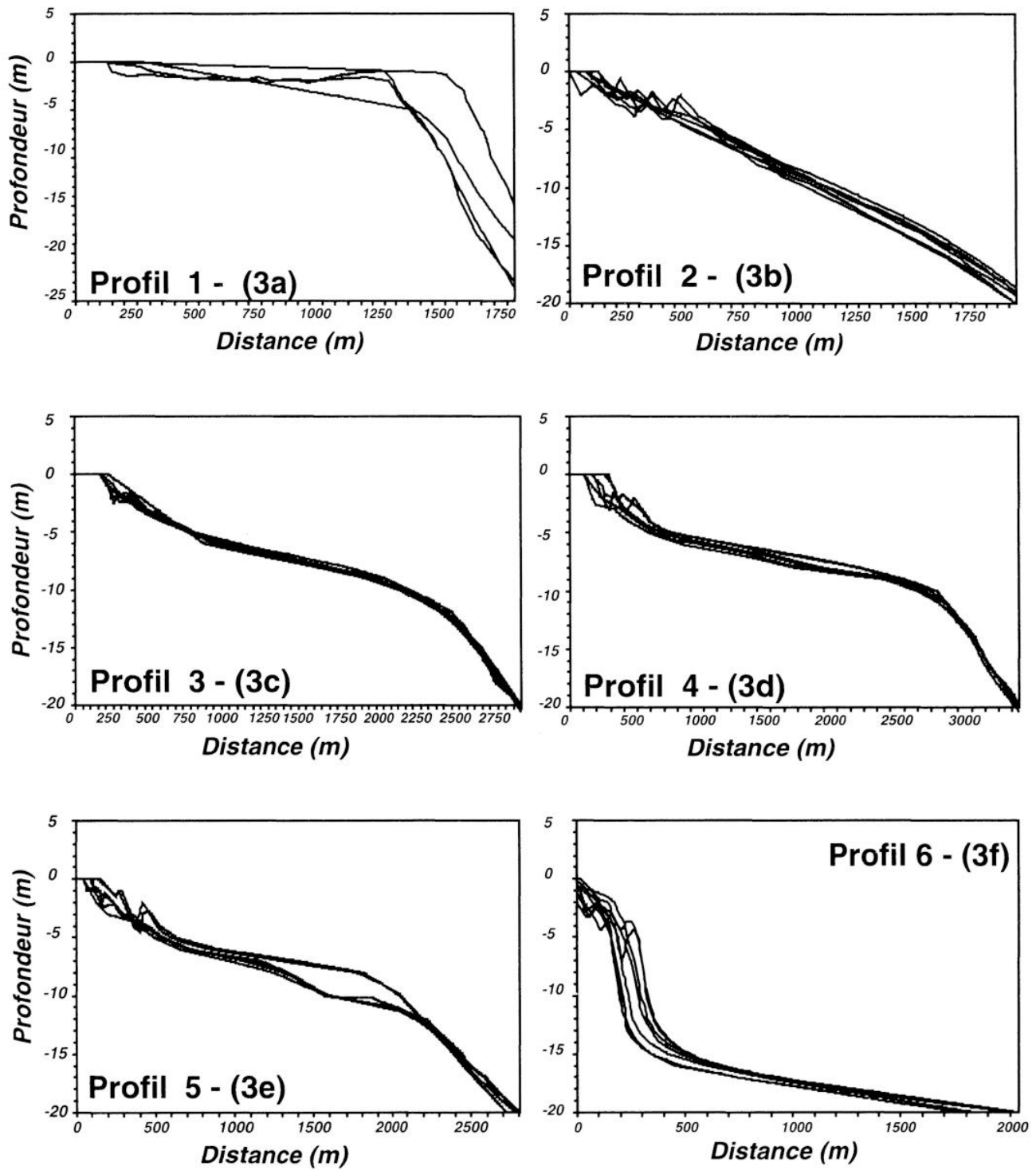


Fig. 3 – Enveloppes des profils bathymétriques pour la période 1962-1965.

Fig. 3 – Beach profiles from 1962 to 1995.

## Discussion

Le ralentissement des vitesses de sédimentation du prodelta actuel s'explique par plusieurs causes dont il est difficile de faire la part (tab. 2 et 3). Il pourrait s'inscrire, d'une part, dans une évolution pluri-séculaire marquée par une réduction des apports sédimentaires rhodaniens. Cette dernière serait liée à la diminution de la fréquence des crues du Rhône et de ses affluents depuis la fin du Petit Age Glaciaire (Pichard, 1995), mais également, à la revégétalisation du bassin versant du fait de la rétraction des terres agricoles à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Cette évolution du détritisme, d'origine climato-anthropique, revêt un caractère quasi-général en Provence et dans les Alpes du Sud (Jorda et Provansal, 1996). Il faut, d'autre part, faire intervenir l'aménagement hydro-électrique intensifié du cours du fleuve et de son bassin versant depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. La tendance au ralentissement enregistrée par le déplacement horizontal du talus prodeltaïque est par ailleurs confirmée par les taux de sédimentation verticale mesurés sur ce dernier. Plusieurs auteurs (Juniet, 1962 ; Pauc, 1970 ; P.N.O.C., 1994) insistent sur une diminution de l'accrétion du prodelta à partir de la fin des années 50 (tab. 3), dont la cause serait liée aux barrages hydro-électriques, notamment la mise en eau du barrage de Serre-Ponçon.

Périodes	Vitesses de progradation en m/an	Auteurs
1934-1962	25	SOGREAH, 1984
1962-1984	12	SOGREAH, 1984
1988-1995	9	Suanez, 1997

Tableau 2 – Vitesses de progradation du talus prodeltaïque actuel (Roustan) entre 1934 et 1995.

Table 2 – Progradation speeds of the present prodeltaic talus (Roustan) between 1934 and 1995.

Périodes	Vitesses d'accrétion en m/an	Auteurs
Avant 1950	0,80	Pauc, 1970
1895-1962	0,50	Juniet, 1962
1950-1958	0,23	Pauc, 1970
1994	0,30*	P.N.O.C., 1994

Tableau 3 – Vitesses d'accrétion du talus prodeltaïque actuel (Roustan) depuis 1 siècle.

\* vitesse calculée sur une année montrant la forte variabilité interannuelle.

Table 3 – Accretion speeds of the present prodeltaic talus (Roustan) for the last century.

\* speed obtained for one year and showing the important interannual variability.

L'étude morphologique des barres littorales permet de les classer suivant la typologie proposée par Greenwood et Davidson-Arnott (1979 in Long et Ross, 1989). Le système de barres au large de la plage Napoléon et du sous-delta fossile de Pégoulie correspondrait au groupe V, à savoir des *barres d'avant-côte I*. La disposition linéaire, de ces barres parallèles au rivage (fig. 4), ainsi que leur profil asymétrique vers la côte vont dans ce sens. Généralement très mobiles, leur construction serait liée à une énergie modérée à élevée de la vague à déferlement plongeant. Le passage de deux barres (profils 2 et 5) à une seule barre, au niveau des profils 3 et 4, fait intervenir les différences d'énergie libérée par la houle d'un secteur à l'autre. Au droit du sous-delta de

Pégoulie, la convergence des orthogonales se traduit par une forte énergie. Les phénomènes d'érosion, et donc, de diminution du stock sédimentaire disponible, s'illustrent par une diminution du nombre de barres. A partir du profil 5, on voit apparaître un système de barres obliques par rapport au rivage que l'on peut classer dans le groupe IV appelé *barres transverses*. Cette organisation, particulièrement bien visible au niveau du poulie de la flèche (fig. 4), correspond à un régime de houle de faible énergie dans une zone où les sédiments sont abondants. Ces paramètres concordent avec les conditions hydrosédimentaires dans ce secteur.

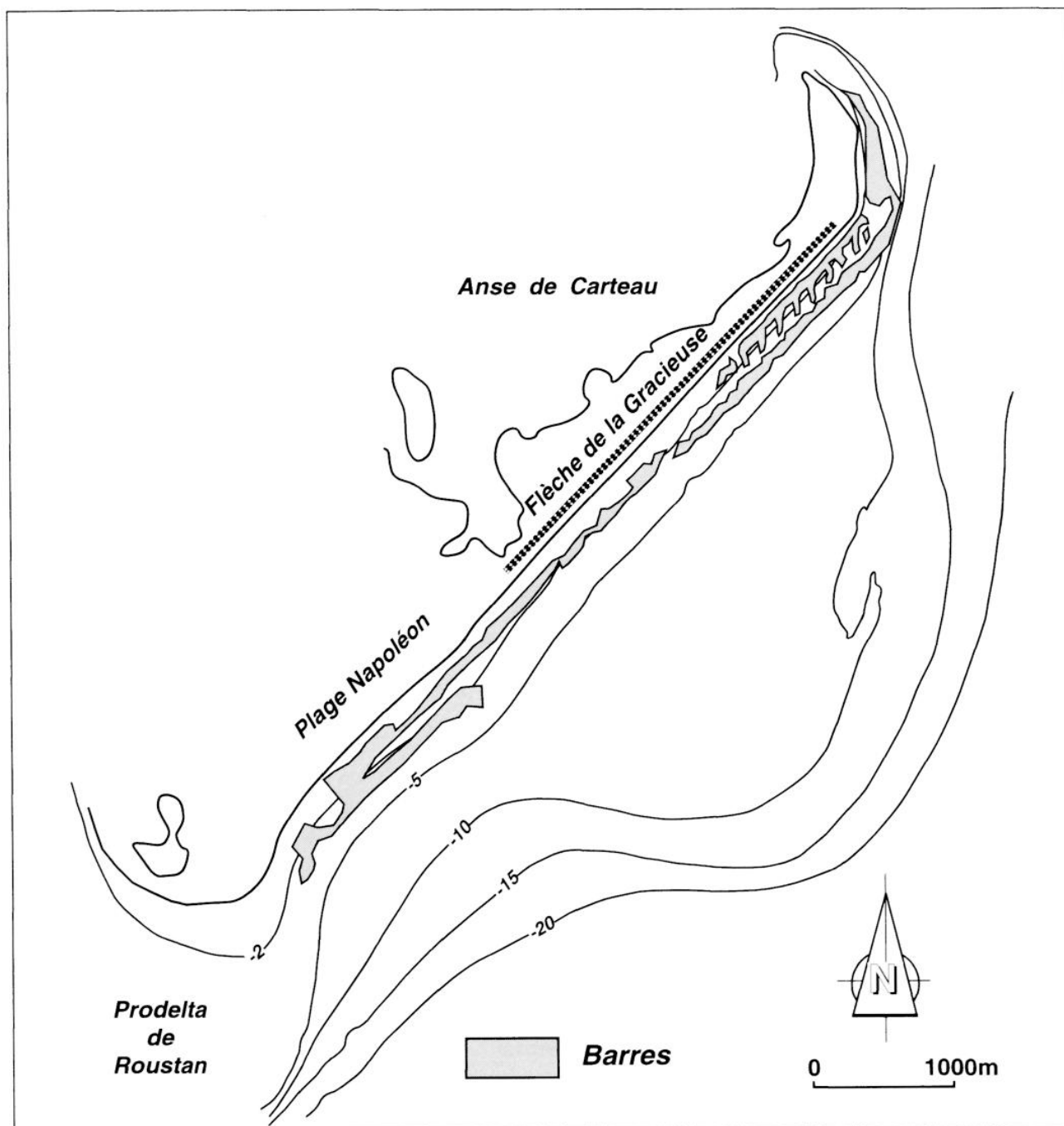


Fig. 4 – Cartographie des systèmes de barres littorales. Fig. 4 – Bar systems mapping.

Cette première approche reste très descriptive. Toutefois, à l'image des résultats obtenus sur le littoral languedocien (Barusseau *et al.*, 1994), elle montre l'intérêt d'une étude plus poussée des corps sédimentaires en milieu immergé. Ces travaux, en cours de réalisation, feront l'objet de prochaines publications.

À l'exception du secteur de l'embouchure et de l'extrémité de la flèche de la Gracieuse, les modifications de la plage sous-marine enregistrées par le profil vertical sous-marin se réduisent considérablement aux alentours de 7 m de profondeur.

#### DÉFINITION DE LA PROFONDEUR LIMITE DE MOBILITÉ DU PROFIL VERTICAL

La limite de mobilité du profil vertical correspond à la profondeur à partir de laquelle la plage sous-marine n'enregistre plus de changements significatifs. Elle est extrêmement variable en fonction des dynamiques et des processus morphosédimentaires, dont les impacts diffèrent suivant l'échelle de temps considérée (De Vriend, 1991). Plusieurs auteurs (De Vriend *et al.*, 1993 ; Sanchez-Arcilla *et al.*, 1993 ; Stive et De Vriend, 1995) proposent une subdivision spatio-temporelle du profil vertical en fonction des processus qui lui sont associés (fig. 5). Ce découpage répond essentiellement à des applications en modélisation. D'un point de vue naturaliste, son approche systématique peut présenter un caractère assez simpliste. Toutefois, il a le mérite d'apporter un schéma synthétique du fonctionnement de la zone infralittorale.

1) Les événements épisodiques interviennent sur des périodes très courtes (de quelques heures à quelques jours) et sont liés aux fonctionnements paroxysmiques des

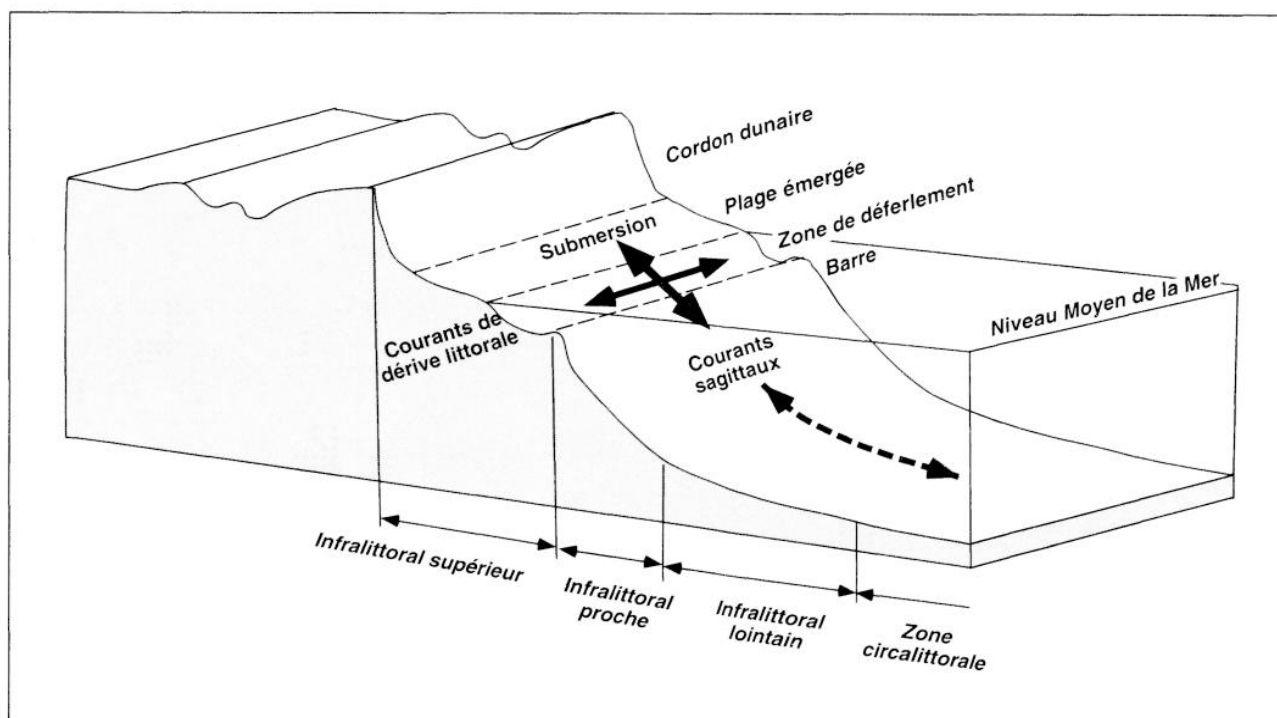


Fig. 5 – Subdivision de l'espace infralittoral en fonction des processus morphodynamiques (d'après Stive et de Vriend, 1995).

Fig. 5 – Subdivision of the offshore zone according to the morphodynamics processes (from Stive and de Vriend, 1995).

agents morphodynamiques (crues, tempêtes, vents violents, etc.). Ils conditionnent des changements rapides et importants, dans la zone active et infralittorale proche et moyenne, comprise entre 7 et 10 m de profondeur (Wright et Short, 1984 ; Wright *et al.*, 1985 ; Guillen et Palanques, 1994). Le rôle des mouvements transversaux, par le jeu des courants sagittaux, est alors important. Son effet peut atteindre des profondeurs plus grandes. Blanc (1996) a montré qu'en régime de tempête, par une houle d'une hauteur significative de 3,5 m et d'une période associée supérieure à 6 secondes, la profondeur de mobilité des corps sédimentaires au large du littoral occidental du delta du Rhône (Faraman) pouvait atteindre -12 m.

2) Les changements à moyen terme (de 3 à 5 ans) sont moins importants et liés au transport sédimentaire longitudinal (Jimenez et Sanchez-Arcilla, 1993). Dans ce cas de figure, le régime des houles et des courants associés joue un rôle prépondérant dans la dynamique littorale. Les modifications sont enregistrées dans l'infralittoral proche (< 7 m de profondeur).

3) Les modifications à long terme (pluridécennales à pluriséculaires) sont liées à des processus globaux tels que la remontée du niveau marin. Ceux-ci conditionnent les changements sur l'ensemble du profil vertical, du rivage jusqu'à la zone infralittorale lointaine (12 à 15 m de profondeur). Les travaux de Brunn (1962, 1988) ont montré que ces changements répondaient à des lois naturelles reposant sur la notion de profil d'équilibre.

4) La zone située la plus au large correspond à l'espace circalittoral. Là, les agents morphodynamiques n'interviennent que très peu. Les changements, difficilement perceptibles, se mesurent à l'échelle pluriséculaire à plurimillénaire.

Dans le cadre de cette étude, la profondeur limite de mobilité du profil vertical a été calculée à partir de deux méthodes (Hanson et Krauss, 1989) : le traitement statistique des données bathymétriques et l'utilisation de la formule d'Hallermeier fondée sur les données de houle (Hallermeier, 1978 ; 1981 ; Birkemeier, 1985).

### Traitement statistique des données bathymétriques

Cette méthode repose sur le traitement diachronique de profils bathymétriques. Elle a été utilisée, entre autres, dans le delta de l'Ebre dont le contexte deltaïque méditerranéen reste très proche de notre secteur d'étude (Garcia *et al.*, 1995). Un point important mérite toutefois d'être soulevé, il concerne les données utilisées par les différents auteurs. Généralement, l'estimation de la profondeur limite repose sur le traitement de profils bathymétriques effectués sur un pas de temps inférieur à 5 ans avec une périodicité de 3 à 6 mois. Ce n'est pas le cas des données utilisées dans cette étude. Ce paramètre devra être pris en compte dans l'interprétation de nos résultats.

La méthode comporte trois démarches : pour chaque profil, la profondeur est relevée (ou calculée par extrapolation) pour une distance commune à chaque campagne (tous les 5 m), repérée en X et Y à partir d'un point coté (Lambert III) situé sur la plage émergée ; la profondeur moyenne ( $Z_X$ ) et l'écart type (s) sont ensuite calculés pour chaque point du profil  $X_i Y_i$  ; la profondeur limite de mobilité est obtenue en croisant les deux données  $Z_X$  et s elle est atteinte lorsque la valeur de l'écart type lue sur le nuage de points est proche de zéro.

Les résultats montrent des situations contrastées suivant les secteurs (fig. 6). Pour les profils 2, 3, 4 et 5, la profondeur limite se situe entre -5 m et -6 m malgré un écart type encore "fluctuant" jusqu'à -20 m. Sur ce point, nous pouvons d'une part, invoquer la part d'imprécision des données discutée plus haut, d'autre part, insister sur l'intervalle de temps trop élevé (pluridécennal) entre chaque campagne de mesure. Des modifications du profil vertical sous-marin intervenant à des échelles de temps différentes pourraient alors se superposer. Ce paramètre expliquerait la forte valeur obtenue pour le profil 6 (-16 m), mais également le fait que la limite ne soit pas atteinte au niveau de l'embouchure (profil 1).

### Application de la formule d'Hallermeier

La seconde méthode repose sur l'application de la formule d'Hallermeier. Cette équation prend en compte les caractéristiques de houle susceptibles d'influencer les changements du profil vertical :

$$d_l = 2,28H_e - 68,5 (H_e^2 / gT_e^2)$$

où  $d_l$  correspond à la limite de mobilité liée aux situations extrêmes,  $H_e$  à la hauteur significative maximum (houle tempête), excédant seulement 12 h/an,  $T_e$  à la période significative associé,  $g$  à la force de gravité ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Les données houlographiques de la bouée de la Balancelle située au droit de la flèche de la Gracieuse (fig. 1) ont été utilisées pour les années 1993, 94, 95 et 1997 ; pour l'année 1996, le nombre réduit de mesures, suite à une panne du houlographe (110 jours d'enregistrement sur l'année), n'a pas permis d'effectuer de calcul. Les résultats montrent une limite de mobilité variant entre 5 et 6 m de profondeur (tab. 4).

### Discussion

Les résultats obtenus par les deux méthodes de calcul montrent une première limite de mobilité du profil vertical se situant aux alentours de 6 m de profondeur. Cette valeur concorde avec les estimations faites dans le delta de l'Ebre (Jimenez et Sanchez-Arcilla,

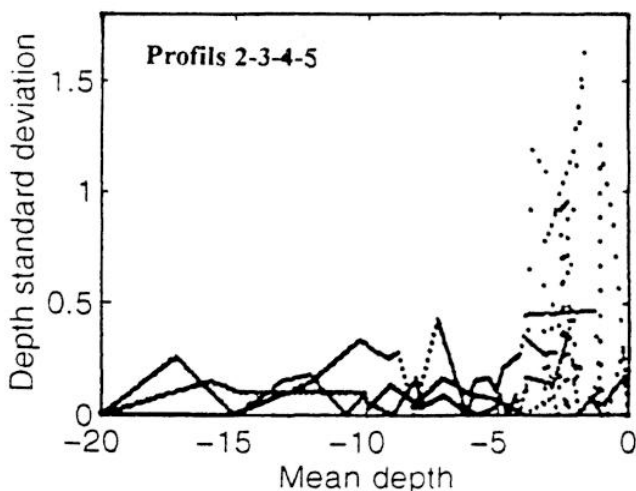


Fig. 6 – Calcul de la limite de mobilité du profil vertical à l'est de l'embouchure du Rhône.

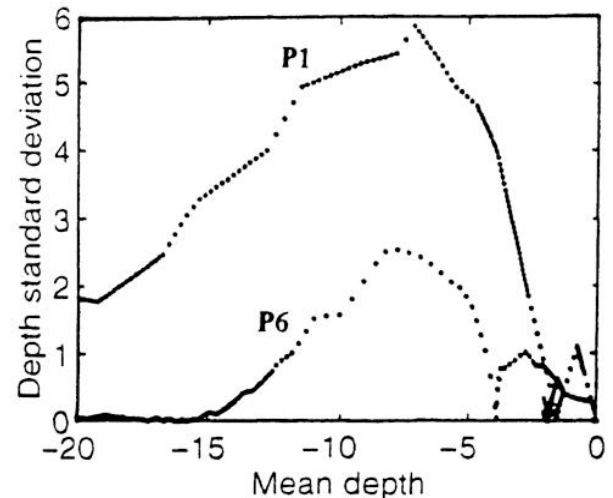


Fig. 6 – Calculation of the closure depth in the eastern part of the mouth of the Rhone.



Tableau 4 - Calcul de la limite de mobilité du profil vertical à partir de la formule d'Hallermeier.

Table 4 - Estimation of the closure depth using the Hallermeier equation.

Années	Hsig (m)	Tsig (s)	Limite de mobilité (m)
1993	3,18	7,36	-5,95
1994	2,85	6,94	-5,32
1995	3,10	7,29	-5,81
1996	/	/	/
1997	3,14	6,96	-5,75

1993 ; Garcia *et al.*, 1995). Les auteurs montrent l'existence d'une profondeur limite se situant à -7 m et correspondant aux changements à moyen terme (3 à 5 ans) enregistrés par la plage sous-marine. Ces données corroborent également les mesures effectuées par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.). Elles montrent que les modifications des fonds marins induites par le transit longitudinal des sédiments s'effectuent principalement dans la zone des barres, à des profondeurs comprises entre -6 et -7 m (Mignot, 1977). C'est aussi à cette profondeur que l'on observe également une diminution du stock des sables nécessaires à l'alimentation des plages. Dans le delta du Rhône, plusieurs auteurs insistent sur le fait que ce stock ne s'étend jamais au-dessous de 8 m (Kruit, 1955 ; Juniet, 1962 ; SOGREAH, 1988b, 1994). Cette valeur de -6 m correspondrait donc à la profondeur limite de mobilité du profil vertical à moyen terme (pluriannuel). Ces modifications seraient principalement dues aux mouvements des sédiments parallèlement à la côte (transit sédimentaire longitudinal).

Toutefois, dans les secteurs extrêmement progradants tels que les profils 1 et 6, des changements à plus long terme (pluridécennaux) induisent un bruit de fond particulièrement important. Les modifications du profil vertical relèvent, dans ce cas, de processus bien particuliers. Au niveau de l'embouchure, ceux-ci illustrent l'avancée importante du prodelta de Roustan situé directement sous le déversoir rhodanien. A l'extrémité de la flèche de la Gracieuse, c'est le blocage des sédiments par les épis artificiels (barges immergées) qui joue un rôle essentiel.

#### ESTIMATION DES BILANS SÉDIMENTAIRES

L'estimation des volumes sédimentaires porte sur les périodes 1962-1988 et 1988-1995. Les autres dates, présentant une mesure partielle du secteur ou un manque de fiabilité des données ont été éliminées dans le cadre de notre analyse.

#### Méthodes de calcul

La quantification repose sur deux méthodes :

- la première est basée sur le calcul de la surface des variations topographiques (en 2D) mesurées pour chaque profil entre deux dates. Les cubatures sont obtenues en intégrant la demi-distance à la côte, de part et d'autre du profil. Cette méthode "empirique" permet une estimation fiable mais génère une marge d'erreur plus ou moins importante.
- la seconde porte sur l'acquisition de données numériques pour la période la plus récente 1988-1995 ; elle permet un calcul des cubatures par traitement informatique. Pour chaque campagne de mesures, les points levés en coordonnées X, Y (coordonnées

Lambert III) et Z sont restitués en format numérique ASCII. Le traitement informatique est effectué sous un module de traitement 3D Autosurf intégré au logiciel Autocad (version 13). La construction et la superposition des Modèles Numériques de Terrain permet le calcul des cubatures correspondant aux surfaces en érosion et en accrétion (fig. 7).

Le traitement numérique minimise la marge d'erreur induite par la première méthode basée sur un calcul "empirique". Pour la période la plus récente 1988-1995, la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes permet d'estimer cette marge d'erreur.

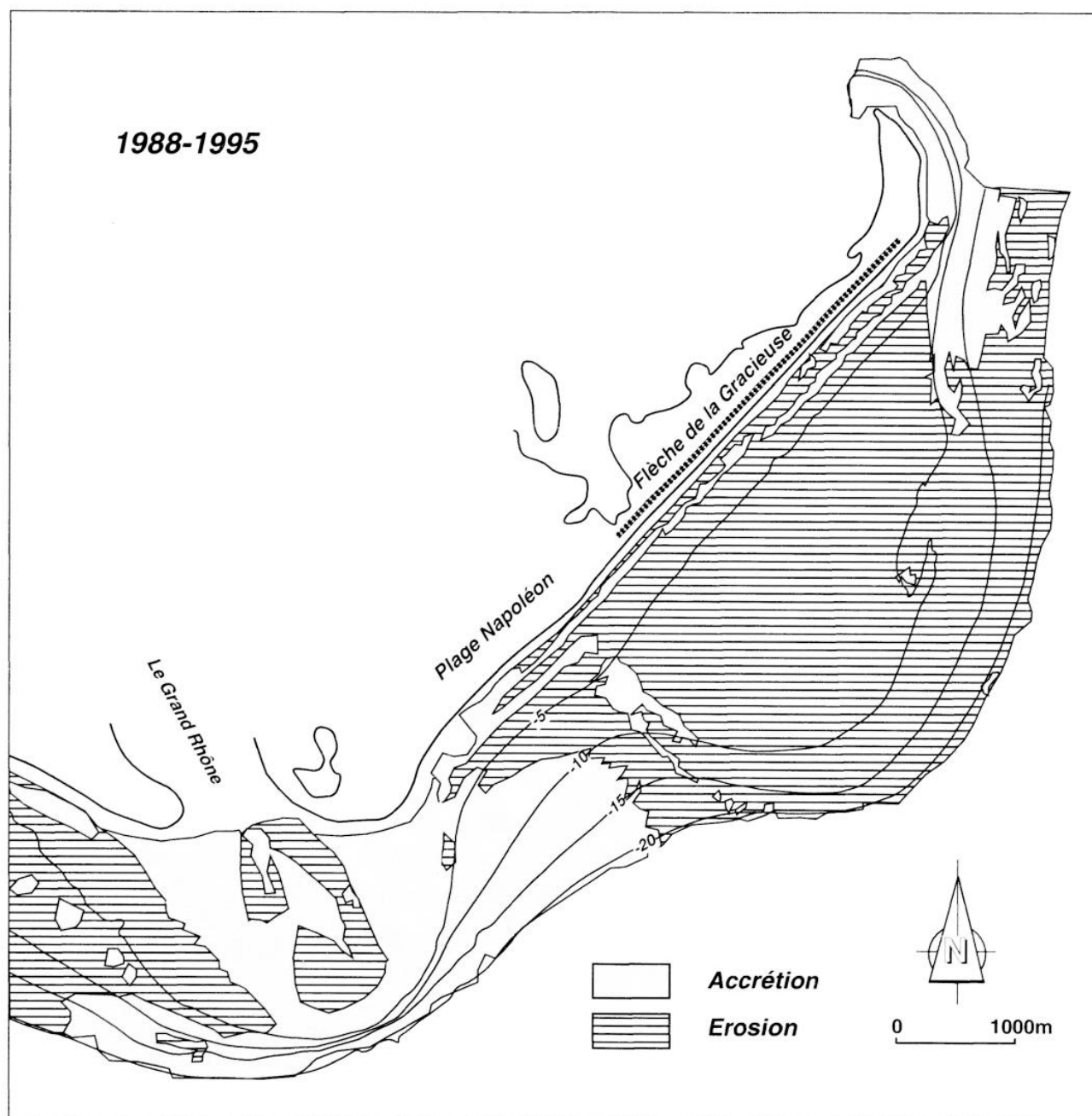


Fig. 7 – Cartographies des zones en accrétion et érosion après superposition des données bathymétriques pour 1988 et 1995.

Fig. 7 - Mapping of the erosional and accretional zones obtained with superposition of bathymetric maps for 1988 and 1995.

L'analyse a porté uniquement sur le matériel sableux, stock essentiel à l'alimentation des plages. C'est pourquoi, au regard des données sédimentologiques attestant d'un changement de granulométrie (passage des sables aux vases vers le large) au-delà d'une profondeur de 6 à 8 m (Kruit, 1955 ; Juniet, 1962 ; SOGREAH, 1988b, 1994), et de la limite de mobilité du profil vertical définie précédemment, le calcul des surfaces a été réalisé sur la partie sommitale du profil sous-marin, entre 0 et 6 m de profondeur.

## Résultats et discussion

Les résultats obtenus sur les bilans sédimentaires montrent des évolutions contrastées d'une période à l'autre (tab. 5). Entre 1962 et 1988, on observe un déficit sédimentaire de 500.000 m<sup>3</sup>, valeur très faible qui peut être considérée comme étant non significative si l'on tient compte du seuil d'erreur admis par la méthode. Entre 1988 et 1995, le volume sédimentaire, à l'inverse, augmente d'environ 1.500.000 m<sup>3</sup> à 1.250.000 m<sup>3</sup> suivant la méthode employée. Une marge d'erreur de 15% est admise par l'utilisation du calcul "empirique".

L'évolution de ces bilans sédimentaires doit tenir compte d'un paramètre important : l'aménagement de la flèche de la Gracieuse à partir de 1988, et, par là même, l'élimination des transferts sédimentaires transversaux, du talus externe de l'édifice vers l'anse de Carreau. Jusqu'en 1988 ces transferts ont été alimentés, en grande partie, par l'érosion du sous-delta fossile de Pégoulie, induisant le déplacement du corps central de la flèche vers le NW. Le maintien du volume sédimentaire pour la période 1962-1988 indique que les pertes en matériel sur le sous-delta de Pégoulie ont été compensées par l'engraissement d'autres secteurs, comme la plage Napoléon ou le poulie. Pour ces derniers, l'engraissement est lié aux apports sédimentaires rhodaniens et confirme le rôle de "cicatrisation" que joue encore le Rhône dans ce secteur. L'approfondissement des petits fonds observé par Blanc et Poidenot (1993), sur le littoral déficitaire à l'ouest de l'embouchure (Faraman), sont ici inexistantes. Ces résultats corroborent les données obtenues sur l'évolution du trait de côte et confirment le rôle essentiel de l'alimentation sédimentaire rhodanienne à l'est de l'embouchure du Rhône (Suanez et Simon, 1998).

La seconde période (1988-1995) enregistre, quant à elle, un apport considérable en sédiment lié aux crues exceptionnelles qu'a connu le Rhône entre 1993 et 1994 (Pont et Bardin, 1996 ; Pont, 1997 ; Arnaud-Fassetta, 1996, 1997). La localisation des zones d'engraissement montre que dans un premier temps les apports sont principalement concentrés au niveau de l'exutoire (profil 1). Cette zone joue le rôle essentiel de "réserve sédimentaire" pour la partie est de l'embouchure. Les courants de dérive littorale

Budget sédimentaire (m <sup>3</sup> )		
Méthodes	1962-1988	1988-1995
Calcul "empirique"	-500.000	+1.500.000
Calcul informatique	/	+1.250.000

Tableau 5 – Estimation des volumes sédimentaires (en m<sup>3</sup>) sableux.

Table 5 – Estimation of the sandy sedimentary volumes (m<sup>3</sup>).

orientés d'ouest en est dans ce secteur redistribuent par la suite la majeure partie du matériel en direction de la flèche de la Gracieuse.

Des mesures de profil de plage effectuées *in situ* entre novembre 1994 et août 1996 ont montré que ces transits s'effectuaient en système de relais le long de la côte (Suanez, 1997). Les vitesses de transport, non linéaires, intègrent des phénomènes d'arrêt, voire de circulations inverses durant les événements tempétueux (Bruzzi et Provansal, 1997). Ces premières observations montrent que la totalité du stock sédimentaire accumulé en période de crue, au niveau du prodelta de Roustan, mettrait à peu près 5 mois pour passer de l'embouchure à la partie orientale de la plage Napoléon (1 km), soit une vitesse de 200 m/mois, et à peu près 12 mois pour atteindre l'extrémité de la flèche de la Gracieuse (7 km), soit une vitesse de 600 m/mois. Ces résultats demanderont toutefois vérification à partir d'autres méthodes, comme l'utilisation de traceurs fluorescents.

La valeur de 1.250.000 à 1.500.000 m<sup>3</sup> (soit 3 à 4 Mt) de matériel sableux accumulé très certainement sur un temps très court, entre octobre 1993 et novembre 1994 (période marquée par les trois crues exceptionnelles), ne paraît pas aberrante si l'on considère les estimations faites sur la charge en suspension (MES), à savoir 6 Mt/an en moyenne, avec des variations comprises entre 2 et 15 Mt/an pour les crues cinquantennales à centennales (Pont, 1997).

## CONCLUSION

En définitive, nous insisterons sur la relation entre le détritisme fluvial et l'alimentation du littoral. Les scénarios catastrophiques sur la "réduction drastique" de la charge solide rhodanienne ont longtemps prévalu, accordant souvent un rôle trop important aux aménagements hydro-électriques. Certes, la diminution des apports rhodaniens est indéniable depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, mais il faut faire la part de la variation climato-anthropique et des aménagements dans le bassin versant. La première, caractérisée par la diminution du nombre des crues importantes avec la fin du Petit Age Glaciaire et la revégétalisation du bassin versant suite à la déprise agricole, réduirait "considérablement" la charge solide transportée par le Rhône dès la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. La seconde, marquée par les aménagements hydro-électriques récents, joue un rôle plus complexe dont il est encore difficile de mesurer les impacts réels.

La sédimentation sur le prodelta actuel (progradation et taux d'accrétion), illustre cette évolution. Elle indique une réduction importante des apports (40 % à 70 %) à partir du début des années 60. Cependant, les crues exceptionnelles de 1993 et 1994 ont montré que durant ces événements paroxysmiques, les apports solides (MES et charge de fond) pouvaient atteindre des proportions très importantes, proches des valeurs mentionnées pour le début du XIX<sup>e</sup> siècle. Le Rhône est aujourd'hui caractérisé par un fonctionnement attestant d'une grande variabilité hydrosédimentaire. Celle-ci est conditionnée par les variations météorologiques sur le bassin versant qui induisent une alimentation spasmodique du littoral.

Toutefois, les apports fluviaux dans le secteur oriental du delta du Rhône compensent l'érosion du sous-delta fossile de Pégoulie. Ces effets "cicatrisants" expliqueraient le bilan sédimentaire positif obtenu sur l'ensemble de la période. Le littoral situé à l'est de l'embouchure évolue donc, en grande partie, à partir d'un stock sédimentaire renouvelable, considéré comme source vive. Cette situation diffère avec le littoral rhodanien occidental (littoral de Faraman et Petite Camargue) où les apports ne se font

plus que par l'érosion des stocks fossiles holocènes immergés. A long terme, cette situation pose la question de la stabilité inégale de ces secteurs et de la longévité des aménagements qui y sont implantés.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble du personnel du Centre de Vie de la Fossette (Services Techniques du Port Autonome de Marseille), plus particulièrement M. Jean-Paul Longé et M. André Bisotto, pour leur accueil et la mise à disposition des données bathymétriques utilisées dans cette étude.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme européen de recherche MEDDELT (Etude comparative entre les deltas de L'Ebre, du Po et du Rhône). Le programme a été financé par la Communauté Européenne (Environment Research Programm, Directorate General for Science, Research and Development under Contracts N° EV5V-CT94-0465). A ce titre, les auteurs remercient également le Pr. Augustin Sanchez-Arcilla, les Dr. Jimenez José et Garcia Vicente, tous trois membres du "Laboratori d'Enginyeria Marítima" – LIM-UPCC (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne), pour les suggestions et remarques apportées à ce travail.

### Références

- Arnaud-Fassetta G. (1996)** - Les inondites rhodaniennes d'Octobre 1993 et Janvier 1994 en milieu fluvio-deltaïque. L'exemple du Petit Rhône. *Quaternaire*, 7, 2/3, 139-153.
- Arnaud-Fassetta G. (1997)** - Evolution du plancher alluvial du Petit Rhône à l'échelle pluriannuelle (delta du Rhône - France du Sud). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, 237-256.
- Barusseau J. P., Radulescu M., Descamps C., Akouango E., Gerbe A. (1994)** - Morphosedimentary multiyear changes on barred coast (Golfe du Lion, Mediterranean sea, France). *Marine Geology*, 122, 47-62.
- Blanc J. J. (1977)** - Recherches de sédimentologie appliquée au littoral du delta du Rhône, de Fos au Grau du Roi. *CNEXO*, 75/1193, 69p.
- Blanc J. J., Poidenot F. (1993)** - Le rivage de Faraman en Camargue (SE France) : un géosystème en déséquilibre ; méthode d'étude, conséquences pratiques. *Géologie Méditerranéenne*, XX, 2, 75-87.
- Blanc J. J. (1996)** - Plages en recul et dynamiques des profils littoraux à Faraman (Camargue, delta du Rhône). Méthodes d'études. Essai d'analyse prévisionnelle. *Quaternaire*, 7/1, 53-62.
- Birkemeier W. (1985)** - Field data on seaward limit of profil change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111 (3), 598-602.
- Bowyer J. K. (1992)** - Basin changes in Jervis bay, New South Wales : 1894-1988. *Marine Geology*, 105, 211-224.
- Brunn P. (1962)** - Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division*, 88, 117-130.
- Brunn P. (1988)** - The Brunn rule of erosion by sea-level rise : a discussion on large-scale two-and-three dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, 4, 627-648.
- Bruzzi C., Provansal M. (1997)** - Impacts des tempêtes sur le cordon dunaire aménagé de la flèche de la Gracieuse (delta du Rhône, France Méridionale), Actes du Colloque International "Continuités et Ruptures sur les Littoraux Européens", Nantes 13-18 Nov. 95. *Cahiers Nantais*, 47/48, 251-260.
- De Vriend H. J. (1991)** - Mathematical modelling and large scale coastal behaviour. *Journal of hydraulic research*, 29/6, Part 1 and 2, 727-753.
- De Vriend H. J., Capiobanco M., Chesher T., De Swart H. E., Latteux B., Stive M. J. F. (1993)** - Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review. *Journal of Coastal Engineering*, 21, 225-269.
- Duboul-Razavet C. (1956)** - Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône. *Mém. Soc. Géol. de France*, 76, 234 p.
- Garcia V., Jimenez J. A., Sanchez-Arcilla A. (1995)** - Nearshore profiles along the Ebro delta coast. Implications for coastal processes. *Proceeding of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 95*, October 24-27 1995, Tarragona, Spain. E. Özhan Edit., 1131-1143.
- Guillen J., Palanques A. (1994)** - Short-time evolution of a micro-tidal barrier-lagoon system affected by storm overwashing : the Trabucador Bar (Ebro delta, NW Mediterranean). *Z. Geomorph. N.F.*, 38/3, 267-281.

- Hallermeir R. J. (1978)** - Uses for a calculated limit depth to the active beach profile. *Proceedings of 16th conference on coastal engineering*, ASCE, 1493-1512.
- Hallermeir R. J. (1981)** - A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253-277.
- Hanson H., Kraus N. C. (1989)** - *Genesis: generalized model for simulating shoreline change*. Technical Report CERC-89-19. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Mississippi, Report 1, 185 p.
- Irish J. L., Lillycrop W. J. (1997)** - Monitoring new pass, Florida, with high density lidar bathymetry. *Journal of Coastal Research*, 13/4, 1130-1140.
- Jimenez J. A., Sanchez-Arcilla A. (1993)** - Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Marine Geology*, 114, 105-118.
- Jorda M., Provansal M. (1996)** - Impact de l'anthropisation et du climat sur le détritisme en France du sud-est (Alpes du sud et Provence). *Bull. Soc. Géol. France*, 167/1, 159-168.
- Juniet F. (1962)** - *Littoral de Camargue de la pointe de Beauduc au golfe de Fos. Evolution des profondeurs de 1959 à 1962 et orientation des études à venir*. Ponts et Chaussées, Service Maritime des Bouches du Rhône, 92 p.
- Kruit C. (1955)** - Sediments of the Rhone delta. Grain size and Microfauna. *Verhand. Konink. Neder. Geol. Minjnbouw.*, Dell XV BLZ., 359-501.
- List J. H., Jaffe B. E., Sallenger A. H., Hansen M. E. (1997)** - Bathymetric comparisons adjacent to the Louisiana barrier islands: processus of large-scale change. *Journal of Coastal Research*, 13/3, 670-678.
- Long B., Ross N. (1989)** - Revue et classification des barres d'avant-côte. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 13/1, 175-187.
- Mignot C. (1981)** - Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments. *La Houille Blanche*, 1, 9-47.
- Pauc H. (1970)** - *Contribution à l'étude dynamique et sédimentologique des suspensions solides au large de l'embouchure du Rhône (Grau de Roustan)*. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle. Université de Montpellier, 134 p.
- Pichard G. (1995)** - Les crues sur le bas Rhône de 1500 à nos jours. Pour une histoire hydro-climatique. *Méditerranée*, 3/4, 105-116.
- P.N.O.C. (1994)** - *Programme National d'Océanographie Côtière*. Rapport d'activité 1994, Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie Marines, Université de Perpignan, 16 p.
- Pont D., Bardin O. (1996)** - Liquid and solid inputs from the Rhone into the Ile de Camargue and its hydrological functioning. Final Workshop MEDDELTA, Venizia (Italy), Oct. 2-6 1996, Vol. I - The past and the Present, 4.29-4.46.
- Pont D. (1997)** - Les débits solides du Rhône à proximité de son embouchure : données récentes (1994-1995). *Revue de Géographie de Lyon*, 72/1, 23-33.
- Sanchez-Arcilla A., Stive M. J. F., Jimenez J. A., Garcia M. A. (1993)** - Impact of sea-level rise in a Mediterranean delta: the Ebro delta case. *Seachange 93, International Workshop*, 19-23 April 1993, Netherland, UNESCO, IV 53-62.
- Short A. D. (1979)** - Three dimensional beach-stage model. *J. Geol.*, 83, 204-221
- SOGREAH (1984)** - *They de la Gracieuse. Etude préliminaire des ouvrages de contrôle de l'évolution du littoral*. Port Autonome de Marseille (La Fossette), 45 0015 R1, 10 p.
- SOGREAH (1988a)** - *Suivi des évolutions sédimentologiques dans le golfe de Fos. Protection de la partie terrestre de la flèche de la Gracieuse. Recherche de solutions et recommandations pour un tronçon expérimental de restauration*. Port Autonome de Marseille (La Fossette), 5 1085 R3, 9 p.
- SOGREAH (1988b)** - *Suivi des évolutions sédimentologiques dans le golfe de Fos. Nature des sédiments entre l'embouchure du Rhône et les darses du port de Fos*. Port Autonome de Marseille (La Fossette), 5 1085 R4, 45 p.
- SOGREAH (1994)** - *Etude de l'évolution du littoral sableux de la Camargue*. Projet de rapport, 2 tomes, 206 p.
- Stive M. J. F., De Vriend H. J. (1995)** - Modelling shoreface profile evolution. *Marine Geology*, 126, 235-248.
- Suanez S. (1995)** - Quelques données nouvelles sur l'évolution mi-séculaire du littoral camarguais à l'embouchure du Rhône (France, Sud-Est). *BAGF*, 5, 440-454.
- Suanez S. (1997)** - *Dynamiques sédimentaires actuelles de la frange littorale orientale du delta du Rhône*. Thèse de doctorat soutenue le 8 Janvier 1997, Université de Provence, 283 p.

**Suarez S., Prosper-Lager V., Provansal M. (1997)** - Variation relative du niveau marin dans le delta du Rhône. Implications tectoniques et/ou climatiques. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 234, Série IIa, 639-646.

**Suarez S., Simon B. (1998)** - Utilisation de l'analyse diachronique dans l'étude de l'évolution du littoral oriental du delta du Rhône (France, Sud-Est). *Photo-Interprétation*, (sous presse).

**Suarez S., Bruzzi C. (1998)** - A brief review of shoreline management and its implications for the coastal processes on the eastern part of the Rhone delta. *Journal of Coastal Conservation*, (sous presse).

**Vernier E. (1972)** - *Recherche sur la dynamique sédimentaire du Golfe de Fos*, Thèse de 3<sup>e</sup> cycle d'Océanologie, Université d'Aix-Marseille I, 68 p.

**Wright L. D., Chappel J., Thom B. G., Bradshaw M. P., Cowell P. (1979)** - Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. *Marine Geology*, 32, 105-140.

**Wright L. D., Short A. D. (1984)** - Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, 56, 93-118.

**Wright L. D., Short A. D., Green M. O. (1985)** - Short-term changes in the morphodynamics states of beaches and surf zones: an empirical model. *Marine Geology*, 62, 339-364.

Manuscrit reçu le 3 Février 1998, accepté le 20 Octobre 1998