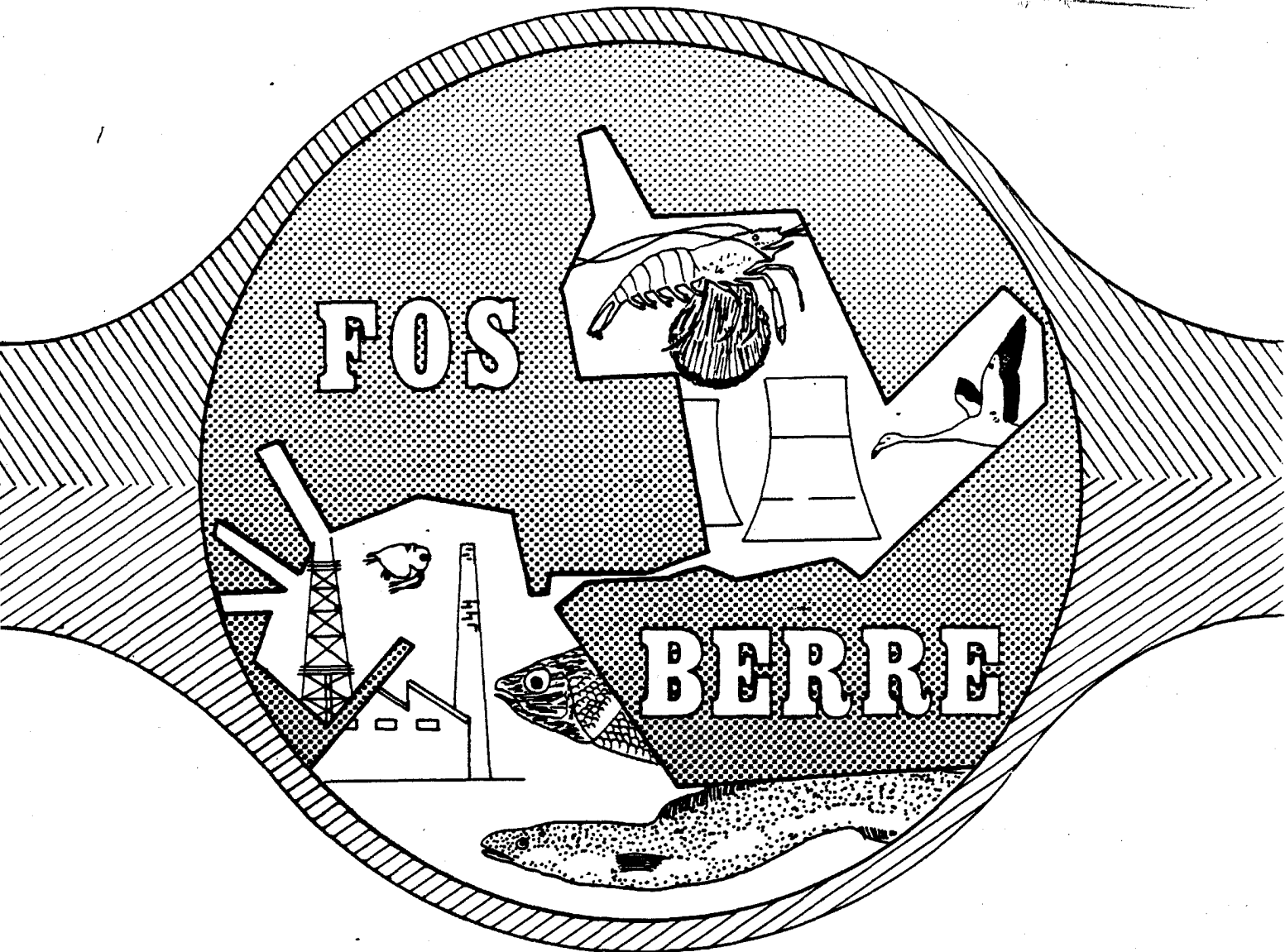


ETUDE REGIONALE INTEGREE

# Golfe de Fos

## Bilan des Connaissances écologiques

DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT  
LITTORAL ET GESTION DU MILIEU  
MEDITERRANEE  
MARTIN



LABORATOIRE DE GEOLOGIE MARINE ET SEDIMENTOLOGIE APPLIQUEE  
FACULTE DES SCIENCES DE LUMINY

CENTRE D'OCEANOLOGIE DE MARSEILLE-LUMINY



JUILLET 1985

Direction de l'Environnement et des Recherches Océaniques  
Département Environnement Littoral - Centre de Toulon

## SOMMAIRE

pages

### INTRODUCTION

. Présentation géographique.....	1
. Cadre géologique.....	1
. Evolution du delta du Rhône.....	3
. Individualisation du Golfe de Fos.....	5

### I. PREMIERE PARTIE : LES DEPLACEMENTS HYDRODYNAMIQUES

I.1. Conditions météorologiques.....	8
I.2. Les houles.....	8
I.3. Les courants de marées.....	10
I.4. Les courants de tempêtes.....	10
I.5. Les courants fluviatiles de sortie du Rhône.....	12
I.6. Les courants de sortie de l'Etang de Berre.....	13
I.7. Les apports liquides annexes.....	13
I.8. Les nappes de dilution issues du Golfe de Fos.....	14
I.9. Conclusion.....	14

### II. DEUXIEME PARTIE : LES APPORTS SOLIDES RHODANIENS ET LEURS

#### MODALITES DE SEDIMENTATION

II.1. Les débits liquides.....	17
II.2. Les apports solides.....	17
II.2.1. Les apports en suspension.....	18
II.2.2. Les apports par charriages.....	19
II.3. Répartition et sédimentation.....	20
II.3.1. La sédimentation dans les prodeltas.....	20
II.3.2. La sédimentation différée.....	21

### III. TROISIEME PARTIE : EVOLUTION RECENTE DES COTES

#### OCCIDENTALES DU GOLFE DE FOS

III.1. Evolution des parties immergées des theys.....	22
III.2. Evolution des parties émergées des theys.....	23
III.3. Conclusion.....	25

IV. QUATRIEME PARTIE : EVOLUTION RECENTE DES FONDSDU GOLFE DE FOS

IV.1. Nature et répartition des sédiments.....	28
IV.1.1. Au cours de la 1ère moitié du XIXe siècle.....	28
IV.1.2. Avant les travaux portuaires.....	29
IV.1.3. Pendant les travaux portuaires.....	31
IV.1.4. Conclusion.....	33
IV.2. Sédimentologie des dépôts.....	35
IV.2.1. Les Arénites.....	36
IV.2.2. Les Lutites.....	38
IV.3. Conclusion. Bilan des perturbations anthropiques.....	41

V. CINQUIEME PARTIE : HYDROBIOLOGIE, QUALITE DES EAUX etBIOLOGIE PELAGIQUE

V.1 Introduction - Généralités .....	46
V.1.1 Evolution .....	48
V.1.2 Objectif du travail .....	49
V.2 Types d'études et stratégies .....	50
V.3 Bilan des connaissances, bilan des ignorances .....	54
V.3.1 Anse de Carteau .....	54
V.3.2 Secteur des darses .....	56
V.3.3 Arrière golfe .....	60
V.3.4 Aire d'influence carontienne .....	61
V.3.5 La zone marine .....	67
V.3.6 Le site de Ponteau .....	68
V.4 Conclusion et perspectives .....	69

VI. SIXIEME PARTIE : LE BENTHOS

VI.1 Introduction .....	75
VI.2 Peuplements des substrats durs .....	75
VI.3 Les herbiers .....	77
VI.4 Peuplements des substrats meubles .....	78
VI.5 Les indicateurs biologiques .....	79
VI.6 Accumulation des polluants dans les organismes .....	80
VI.7 Conclusions et possibilités de développement .....	80

## AVANT-PROPOS

- La zone de Fos-Berre a subi de profondes transformations au cours des 20 dernières années : implantation d'un vaste complexe portuaire et industriel, augmentation de la population, modifications consécutives à l'aménagement du Bas-Rhône et de la Durance.

Dès 1971, la création du S.P.P.P.I. a permis pour la première fois en France, de mettre en place une action coordonnée entre les administrations, les scientifiques, les élus et les usagers, destinée à préserver le milieu naturel des différents types de pollution engendrée par ce développement. —

De ce fait, un grand nombre de travaux scientifiques ont été réalisés depuis, la plupart du temps en vue d'estimer et, si possible, quantifier l'impact des activités humaines sur le milieu.

Ce rapport fait le point de l'ensemble des connaissances scientifiques acquises à ce jour sur le golfe de Fos, et pour les différents domaines qui concernent l'écosystème : la physique, la sédimentologie, l'hydrobiologie, le plancton, le benthos et la pêche.

Il a été élaboré en collaboration avec les organismes scientifiques suivants :

- Laboratoire de Géologie Marine et Sédimentologie Appliquée, Faculté des Sciences de Luminy (L.G.M.S.A.)
- Centre Océanologique de Marseille, Divisions Delagos (D.P.) et Benthos (D.B.)
- Station IFREMER de Sète (IFREMER)

Ont participé aux rédactions des différents chapitres :

- . R.M. ROUX, maître de conférences (L.G.M.S.A.)
  - . R. ARFI, chercheur (D.P.)
  - . C. LOEILLET, chercheur (D.P.)
  - . G. STORA, maître de recherches (D.B.)
  - . G. BELLAN, directeur de recherches (D.B.)
- sous la coordination scientifique de L.A. ROMANA (IFREMER).

INTRODUCTION

LE GOLFE DE FOS

## LE GOLFE DE FOS

Compris entre l'extrémité occidentale de la chaîne de la Nerthe et le delta du Rhône, le Golfe de Fos est situé au Sud de la plaine de la Crau et s'ouvre largement sur la rade de Marseille dont il constitue une annexe avancée.

Il est connu des géographes de l'antiquité grâce aux "Fosses Mariennes", véritable canal que fit creuser le général romain Marius pour relier Arles à la Méditerranée en débouchant non loin de l'actuel village de Fos sur Mer.

Le golfe est divisé en deux parties sur la flèche sableuse de la Gracieuse qui, partant de l'embouchure du Grand Rhône, s'allonge vers le NE jusqu'à 5.5km de Port-de-Bouc. La plus grande dimension du plan d'eau, entre la pointe de Roustan et celle de Carro, n'excède pas 15 km, alors que 11km séparent l'éperon St Gervais du Cap Couronne (fig.1).

Dans la moitié septentrionale, au Nord de la flèche de la Gracieuse, les profondeurs sont faibles (-5 à -15m) en raison de l'envasement. Cette zone reçoit les eaux issues soit de l'Etang de Berre par le canal de Caronte, soit du Rhône par le canal St Louis. Les fonds de 20m pénètrent largement dans la moitié sud, tandis que l'isobathe 50 limite le golfe vers le large.

Les côtes sont rocheuses à l'Est du méridien de la pointe St Gervais où les reliefs qui bordent le plan d'eau se développent progressivement vers l'orient pour culminer à près de 100m dans la chaîne de la Nerthe et les collines du Nord de Bouc.

A l'Ouest, au contraire, des côtes basses limitent des corps sédimentaires en cours d'évolution aux embouchures du Grand Rhône. Il s'agit de hauts fonds sableux dont l'apparition et le développement sont liés aux apports rhodaniens. Les atterrissements portent depuis les marins grecs le nom de "Theys". Leurs formes et leurs positions sont sans cesse en évolution. Ils émergent peu à peu, parfois signalés par une épave jadis échouée (Tartane, Balancelle), au nom évocateur (Gracieuse, Annibal).

Dans le fond du golfe, les cordons littoraux de Fos et de Brûle-Tabac isolaient, entre l'anse St Gervais et l'abri des vasières de Carteau, les étangs de Gloria et de la Roque ou les marais du Galégeon. Ces flaques d'eau saumâtre communiquaient avec la mer par des passes nommées "Graus". Les travaux d'aménagement de la zone industrielle de Fos et le creusement des darses ont bouleversé cette morphologie côtière (fig.2).

## CADRE GEOLOGIQUE

La région du golfe de Fos et son arrière pays correspond au débouché sur la vallée du Rhône de la dépression de Crau et du bassin synclinal d'Aix-en-Provence, que sépare le chaînon de la Fare-St Chamas. Dans ce secteur, le bâti structural paléogène provençal, orienté Est-Ouest, dispa-

raît sous le complexe deltaïque plio-quadernaire subsident du Rhône, de direction méridienne. Sur la bordure orientale de la Camargue, un alignement bien visible par satellite semble responsable de l'orientation générale NW-SE du contact des deux unités géologiques. Il serait ainsi homologue des failles de Nîmes et des Costières dans une symétrie d'axe rhodanien. Le long de cette discontinuité, l'ennoyage progressif vers le Sud-Ouest de toute la terminaison occidentale de la Basse-Provence se transforme en une véritable flexuration qui pourrait bien être encore active.

La dépression empruntée par le fleuve actuel s'ébaucha au Miocène sous la forme d'un vaste sillon ceinturant les reliefs alpins en cours de surrection ultime. La mer miocène recouvrit ainsi toute la moitié ouest de la chaîne de la Nerthe et s'avança jusqu'au coeur du synclinal d'Aix. De nos jours ces dépôts affleurent à l'état de grès coquilliers (Molasse) sur les rives orientales du golfe, entre Carro et la pointe St Gervais. On les retrouve en sondage sous le they de la Gracieuse vers -80m.

Au Pliocène, la dépression péri-alpine s'approfondit et s'enfonça. Les dépôts antérieurs, déformés, prirent une allure en gouttière d'axe Nord-Sud. Celle-ci fut rapidement colmatée par des marnes noires sableuses tandis que des failles ou de très fortes flexures apparaissaient sur les bordures de ce vaste chenal.

Au Quaternaire le delta du Rhône s'individualise progressivement. De nombreux sondages recoupent les sédiments holocènes déposés lors de la transgression versilienne et atteignent le substratum pléistocène.

Ce soubassement est constitué par des cailloutis mis successivement en place par le Rhône et la Durance au cours de phases de régressions glacio-eustatiques du Villafranchien ou du Quaternaire moyen et supérieur. La nature grossière des alluvions et la forme bien conservée de certains cônes traduisent une pente forte et un régime quasi-torrentiel voisins de ceux du Var actuel. Les nappes d'épandages affleurent largement sur les bordures du delta, en Crau et en Costières. Elles disparaissent ensuite sous les niveaux holocènes et viennent s'intriquer ou se recouvrir partiellement sous la Camargue.

Connu sous le nom de Crau würmienne de Miramas, c'est le dernier de ces cailloutis, riche en galets de quartzites et roches vertes (Variolites) alpines qui forme l'essentiel du bed-rock du golfe de Fos, sur lequel se sont accumulés les sédiments modernes sablo-vaseux du Rhône.

Partant du niveau de la mer à Fos, le toit de ce substratum caillouteux s'incline en direction du Sud-Ouest suivant une pente régulière. Il passe ainsi à -40m sous le they de la Gracieuse. En mer, les sondages sismiques recoupent ces dépôts qui reposent sur des réflecteurs probablement pliocènes dans l'axe du golfe, miocènes plus à l'Est. La nappe s'enfonce normalement vers le Sud, puis se biseaute et disparaît vers -120m sur le bord du plateau continental. Lors des régressions marines, la Durance

rejoignait à ce niveau la tête nord d'un cañon homologue de celui du Rhône.

A l'Holocène, le caractère torrentiel du fleuve s'atténue nettement. Les terrains, sables et limons argilo-silteux épais de 58m aux Saintes-Maries, se répartissent en deux grands ensembles.

Dans la série inférieure, la plus épaisse, les processus d'ingression (onlap), liés à la transgression versilienne, dominant. Les bandes de faciès synchrones (marins, saumâtres, fluviatiles) migrent en fonction du temps vers la tête du delta au fur et à mesure que le niveau marin remonte et que le littoral recule.

Dans la série supérieure, mise en place depuis 6 500 B.P., les processus de progradation (offlap) dominant. Les bandes de faciès synchrones migrent vers le large, le littoral progresse au Sud tandis que le niveau marin varie très peu. Cette phase de construction du delta est responsable de la morphologie actuellement visible.

#### EVOLUTION DU DELTA DU RHONE

En schématisant à l'extrême, un faisceau de phénomènes multiples et complexes, il apparaît que, depuis plus de 6 000 ans, les constructions successives des appareils deltaïques d'ordre secondaire résultent de rapports de forces variables entre les processus dynamiques en présence: apports solides fluviatiles, migrations des cours, érosion littorale et, en l'absence de marée, légères variations du niveau marin.

La concentration des alluvions à une embouchure nouvellement apparue se traduit rapidement par l'édification d'un lobe de forme variable (pointu, allongé, sub-circulaire) selon l'intensité de la progradation.

Simultanément, les appareils littoraux des anciens cours abandonnés n'étant plus alimentés, sont démantelés par les vagues. Leurs matériaux sableux, transportés par les courants de dérive, participent à l'élaboration de flèches qui présentent en général une allure sigmoïde.

Par le jeu de ces fluctuations épisodiques, liées à la multiplicité des changements de lit, le delta du Rhône présente successivement des formes uni ou pluri-lobées.

Les travaux de nombreux chercheurs permettent d'établir la séquence morphogénétique schématisée, d'après Bertrand et L'homer, dans la figure n°3.

A. Le point de départ de cette évolution (fig.3A) correspond au maximum de la transgression flandrienne, en fin d'ingression. Située à un niveau légèrement supérieur à l'actuel, la mer pénètre très largement dans le golfe rhodanien. Elle élabore les cordons littoraux les plus internes du Nord d'Aigues Mortes, datés de 6 730 à 6 500 B.P.. Le Rhône dit de Saint Ferréol montre un cours unique ou majeur en position axiale et commence à construire le delta historique. C'est le début de la phase de progradation.



Favorisé par un intermède régressif (fig.3B) à -2 ou -3m, le Rhône de Saint-Ferréol prograde très rapidement vers le Sud et dépose un énorme appareil deltaïque de forme triangulaire pointue. Les prismes littoraux sableux successivement emboîtés, datés de 5 500 à 4 000 B.P., s'avancent bien au delà de la côte actuelle. Des témoins de ces formations sont toujours nettement visibles (Bois des Rièges, Iles des Mornes) et supportent le village des Saintes Maries, fondé au début de notre ère loin du littoral.

B. Au terme de l'évolution correspondant aux étapes qui conduisent au début de la période historique (fig.3C,D,E), deux phénomènes majeurs ont profondément modifié la physionomie du delta.

a. Le Rhône de Saint-Ferréol, vieillissant, forme des méandres et s'est divisé en Rhône de Peccaïs (P) et Rhône d'Ulmét (U) qui s'engagent respectivement dans les dépressions-couloirs bordant à l'Ouest et à l'Est l'édifice deltaïque médian de St Ferréol.

Le Rhône d'Ulmét, oriental, longe la Crau et devient rapidement le principal exutoire. Jalonné d'édifices romains, il débouche au NW de l'actuel golfe de Fos. Cette direction d'écoulement, qui correspond à celle du futur Grand Rhône, sera toujours prépondérante sans doute en raison de la légère subsidence affectant cet axe.

Le Rhône de Péccaïs, occidental, longe les Costières et débouche entre Aigues-Mortes et le Grau-du-Roi. Il correspond au Petit Rhône et restera toujours secondaire en dépit d'un allongement important de son cours.

b. Simultanément, toute l'embouchure méridionale du Rhône de Saint-Ferréol, privée d'apports, est attaquée par la mer. Ces matériaux, mobilisés par les transferts littoraux, participent à l'élaboration des flèches internes de la future pointe de l'Espiguette, et comblent progressivement le golfe d'Aigues-Mortes en se mélangeant aux alluvions du Rhône de Peccaïs.

c. On notera que le golfe de Fos s'ébauche au cours de la seconde moitié de cette période (fig.3E,F). Le Rhône d'Ulmét édifie alors les atterrissements compris entre les marais du Galégon et le lit actuel, en emprisonnant les étangs de la Roque et de Caban (fig.4 et 5).

C. A la fin du Moyen-Age, en 1587 (fig.3F) le Rhône d'Ulmét devenu sénile abandonne son cours inférieur. Ce nouveau tracé, le Bras de Fer, débouche sur le méridien de Faraman : l'ensemble constitue le Vieux Rhône (VR) qui, en 150 ans, édifie rapidement un complexe deltaïque dirigé plein Sud (fig.3G). Le Golfe de Fos évolue très peu au cours de cet épisode en raison de l'éloignement des sources d'apports. Plus à l'Ouest, les habitants des Saintes-Maries dérivent vers leur village le cours inférieur du Rhône de Peccaïs (1552). L'arrivée de nouvelles alluvions par ce bras artificiel, dit du Rhône d'Orgon (O), contribue à ralentir dans ce secteur l'érosion littorale du vieux delta de St Ferréol.

D. En 1711, lors d'une crue, le Rhône emprunte le tracé du canal des Launes approfondi quelques années auparavant, et abandonne le Bras de Fer bientôt envasé (fig.3G,H et 5,6,7). Ce nouveau lit correspond au cours encore actuel du Grand Rhône qui s'infléchit au SE et édifie rapidement un nouvel appareil de type pointu. Simultanément, les embouchures du delta du Vieux Rhône, privées d'apports, sont détruites. Depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle la côte de Faraman a reculé de 2km, abandonnant en mer un tapis de sables-fins ou très fins. Les matériaux du delta, entraînés par les courants marins, se retrouvent dans les cordons littoraux emboîtés qui jalonnent, sur 3km, la progression vers l'Ouest de la pointe de Beauduc.

#### INDIVIDUALISATION DU GOLFE DE FOS

Au cours de cette période, l'individualisation, puis l'évolution du golfe de Fos n'ont cessé de s'accélérer, comme le mettent en évidence les diverses cartes d'époques des figures 8A et B.

En 1737, la tour St Louis est construite près de l'embouchure; cent ans plus tard, elle en sera située à environ 8km. Dès 1842, l'estuaire est divisé en nombreux graus, entre les theys de Béricles, Roustan, Eugène et Peygoulier. Ce dernier ne se trouve alors qu'à une dizaine de kilomètres de Port-de-Bouc. Entre temps, les theys de Brûle-Tabac et de Galégeon sont apparus, isolant l'étang de Gloria et achevant de donner une allure moderne au golfe de Fos qui se comble rapidement.

Au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, pour tenter de supprimer par chasse hydraulique les barres sableuses qui s'accumulent à l'entrée des passes de l'estuaire, tous les graus sont barrés, à l'exception de celui de Peygoulier. La totalité du matériel alluvionnaire s'écoule alors en direction du Sud-Est. Les résultats ne se font pas attendre. En 1890, le they d'Eugène a progressé vers l'Est de près de 2km et les theys de l'Annibal, de la Balancelle et de la Gracieuse sont apparus : l'embouchure n'est plus qu'à 8km de Port-de-Bouc.

C'est la raison pour laquelle, en 1892, pour éviter le colmatage du golfe, le grau de Roustan est rétabli. Il devint rapidement l'embouchure principale qui progressa depuis lors vers le Sud pour donner au golfe sa physionomie actuelle.

En conclusion, ce rapide historique met en relief la diversité, la rapidité et l'ampleur de la réponse des phénomènes sédimentaires aux diverses variations naturelles de la position de l'embouchure ou à toute action anthropique mal adaptée et intempestive.

On notera en outre que l'individualisation du golfe de Fos est liée à deux phénomènes complémentaires.

1. La progression spectaculaire des embouchures successives et les variations bathymétriques des fonds sont tributaires du volume des apports annuels rhodaniens ainsi que des modalités de sédimentation et de

répartition de ces alluvions entre les divers graus.

2. Au contraire, l'évolution du complexe naturel Roustan-Balancelle-Gracieuse et les variations morphologiques des corps sableux annexes dépendent directement de la mobilisation et du remaniement ultérieur de ces matériaux à plus ou moins grande distance par les agents hydrodynamiques qui commandent en définitive l'économie sédimentaire du golfe tout entier.

Ainsi résumés, les grands traits de l'évolution du golfe de Fos guideront notre étude.

Dans la première partie, nous tenterons de définir, malgré l'absence de données, les principaux paramètres qualitatifs des agents hydrodynamiques responsables de la sédimentogénèse locale.

Le second chapitre fera le point des connaissances sur les alluvions apportées par le Rhône et les autres affluents, ainsi que sur les modalités de sédimentation et de répartition de ces matériaux dans l'ensemble du golfe.

Le troisième chapitre décrira l'évolution récente des côtes sableuses occidentales dont la stabilité est indispensable à la protection des ouvrages portuaires.

Dans une quatrième partie nous mettrons en évidence les perturbations apportées par les récents travaux d'aménagement à la nature et à la répartition des sédiments, telles qu'elles apparaissent à la lumière de recherche effectuées en 1964, à la veille du début du creusement des darses, puis en 1971 et 1975.

La conclusion soulignera les lacunes de nos connaissances et suggèrera un certain nombre d'études qu'il serait souhaitable d'entreprendre afin d'améliorer notre perception de l'évolution actuelle des fonds du golfe de Fos.

## PREMIERE PARTIE

### LES DEPLACEMENTS HYDRODYNAMIQUES RESPONSABLES DE LA SEDIMENTOGENESE

L'hydrodynamique intervient en premier chef dans l'économie sédimentaire des petits fonds du golfe de Fos. La dispersion des apports rhodaniens dans leurs aires respectives de sédimentation, la redistribution des matériaux des prismes littoraux sont sous la dépendance de courants induits par les vents, les houles et, à un degré moindre, les marées.

## I.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Le régime météorologique de la Méditerranée occidentale, dont dépend le golfe de Fos, se caractérise par une instabilité extrême. La rose des vents de la figure 9, établie d'après les données enregistrées au Cap Couronne, montre l'existence de deux ensembles de vents dominants, de directions sensiblement opposées et dont les fréquences naturelles se compensent pratiquement.

### I.1.1. LES VENTS DE TERRE

Ce sont des vents de secteur N à NW qui soufflent près du tiers de l'année et représentent 31% du total. Leur apparition est liée à une dépression atmosphérique centrée sur le golfe de Gènes. Le Mistral de direction NW, apparaît comme le principal vecteur ; il dépasse fréquemment 90k/h. La Tramontane, originaire de NNW et plus froide, peut dépasser 100k/h.

Ces vents induisent des vagues courtes en raison du peu d'importance du fetch. Ils provoquent une dérive vers le large des masses d'eau superficielles. Par la pression qu'ils exercent, ils sont responsables d'un abaissement généralisé du plan d'eau littoral pouvant atteindre 0.5m (marée barométrique). L'équilibre isostatique des eaux est maintenu par des remontées d'eaux profondes et froides en direction de la côte.

### I.1.2. LES VENTS DE MER

Ce sont des vents marins liés aux aires cycloniques des îles Baléares. Ils sont issus en général du secteur E à SE (Levant, Eïssero) ou exceptionnellement du secteur W à SW. Les vents d'Est soufflent en moyenne d'une direction opposée aux vents de terre et, avec 27% du total annuel, représentent un pourcentage à peu près analogue. Les vents d'Ouest donnent naissance à de très rares tempêtes d'une extrême violence.

Ces vents induisent des vagues fortes en raison de l'importance du fetch. Ils provoquent un afflux des masses d'eau superficielles vers la côte. Ils sont ainsi responsables d'un relèvement du plan d'eau littoral pouvant atteindre 0.8m. L'équilibre isostatique des eaux est maintenu par des courants de retour au large qui longent le fond (fig.27b).

## I.2. LES HOULES

Les enregistrements de houles effectués par la SOGREAH et les Ponts et Chaussées Maritimes (fig.9 et 10) montrent 3 directions prépondérantes de houles majeures qui, par ordre d'importance décroissante, sont : houles de SW (30% du régime total), houles de SSE (16%), houles

de SE (11%).

#### I.2.1.LES HOULES DE SUD-OUEST (fig.11)

Elles correspondent à des houles engendrées dans la partie occidentale du Golfe du Lion sous l'impulsion des vents de terre, Mistral et Tramontane.

Ces houles se propagent vers l'Est au large du Languedoc et subissent deux réfractions majeures au niveau des pointes de l'Espiguette et de Beauduc. Elles arrivent ainsi dans le golfe de Fos avec une incidence Sud-Ouest. Ce sont des houles courtes dont les périodes moyennes varient de 5 à 6 secondes alors que les longueurs d'ondes restent voisines de 50 mètres.

Ce type de gros temps provoque une convergence des orthogonales au niveau des theys de Roustan et, à un degré moindre, de la Gracieuse, alors que le fond du golfe se caractérise par une divergence très nette (fig.11). Les vagues attaquent les côtes de la Gracieuse sous une incidence très oblique. Parvenues à l'extrémité de la flèche qui joue un rôle de musoir, elles s'incurvent vers le Nord en se réfractant. Elles s'amortissent et disparaissent ensuite dans le fond du golfe : la zone portuaire et l'Anse du Repos sont à l'abri dans un secteur de grande divergence.

#### I.2.2.LES HOULES DE SE et DE SSE (fig.12 et 13)

Elles correspondent à des houles en provenance du Golfe de Gènes et sont engendrées par les vents de mer de secteur Est. Ces houles se propagent ainsi d'Est en Ouest. A proximité des côtes, elles subissent plusieurs réfractions successives (presqu'île de Giens, Cap Sicié, Cap Couronne) et pénètrent dans le golfe de Fos selon une incidence SE ou SSE\*. La période moyenne de ces houles est de 6 secondes ; par fortes tempêtes on observe des longueurs d'ondes de plus de cent mètres liées à des périodes de 8 à 10 secondes.

#### I.2.3.LES HOULES DE MISTRAL (fig.14)

A la mer du vent de Mistral se superpose le mouvement ondulatoire venu du Sud-Ouest. Les deux systèmes interfèrent et on observe :

- . Un ensemble de vagues "forcées" qui sortent du golfe sous la poussée du vent selon une direction NW-SE,

- . Un ensemble de houles du large qui pénètrent dans le golfe selon une direction SW-NE.

En outre, le long de la flèche de la Gracieuse, la dérive littorale est toujours dirigée vers le fond du golfe, selon une direction opposée à celle de la dérive des masses d'eau superficielles du reste du plan d'eau.

#### I.2.4.INTERPRETATION

La concentration de l'énergie, par tous les types de gros temps, au niveau des theys de Roustan et de la Gracieuse s'explique par la présence de hauts fonds sableux qui de 0 à -10m, s'étendent respectivement jusqu'à 1.5km et 2.5km du rivage. Ces bancs immergés concentrent les

\* Le chenal d'accès aux installations portuaires provoque une inflexion puis une concentration des orthogonales au niveau d'un petit secteur littoral, au Nord du canal St Louis, qui a du être récemment protégé par les P. & C. maritimes.

orthogonales des houles comme une loupe focalise un rayon lumineux.

Le premier, en progression vers le Sud jusqu'à ces dernières années, est dû aux apports actuels du Rhône.

Le second, sub-fossile, résulte de matériaux accumulés au cours de la seconde moitié du XIXe siècle, lorsque le Rhône s'écoulait par le grau de Peygoulier.

Nous montrerons que ces deux secteurs sont le siège des modifications les plus spectaculaires du trait de la côte.

### I.3. LES COURANTS DE MAREE

Bien que faibles, les marées s'observent dans le golfe de Fos où les marnages (1/2 amplitude) de 15 à 30cm sont enregistrés dans sa partie septentrionale.

Les courants qu'elles engendrent ont fait l'objet d'une étude sur modèle réduit, effectuée par le LNH Chatou en 1964.

Antérieurement aux travaux d'aménagement portuaires (fig.15 et 16), les marées montantes (flot) ou descendantes (jusant) se traduisent par un déplacement général d'Est en Ouest des masses d'eau de la zone orientale du golfe. Arrivé sur le méridien de la pointe de la Gracieuse, le courant s'infléchit vers le Sud et vient longer le talus externe du they en atteignant une vitesse de 7cm/sec. Lors du flot, un tourbillon de sens négatif s'observe dans le mouillage de Carteau. Il disparaît au jusant avec la vidange du golfe.

Après la construction de la jetée ouest, la circulation des masses d'eau s'amorce toujours d'Est en Ouest (fig.17 et 18). Au niveau de la digue, les courants de flot et de jusant sont rejetés vers le Sud à des vitesses variant de 3.4 à 10cm/sec ; l'autre branche provoque un tourbillon de sens négatif, et qui disparaît au jusant, dans le mouillage de Carteau. En outre, un second tourbillon de sens positif s'observe entre les digues de Port-St-Louis et de Fos. Il persiste pendant le jusant où il atteint sa vitesse maximale de 7.9cm/sec.

En résumé, dans tous les cas étudiés, un courant sortant longe le talus externe de la Gracieuse et se dirige vers le Sud à des vitesses pouvant atteindre 10cm/sec. On notera que ces courants de marées s'observent "in situ" uniquement par temps calme. Bien que trop faibles pour gêner la navigation, ils sont capables de déplacer des sédiments fins préalablement mis en suspension par les vagues ou par les travaux de dragages.

### I.4. LES COURANTS DE TEMPETES

Aucune étude courantologique d'ensemble du golfe n'a été réalisée à ce jour. Cependant, à partir de résultats fragmentaires (Ortolan G., 1976), de renseignements oraux (pêcheurs, chercheurs de la S.M.E.) et de photographies aériennes, des schémas qualitatifs de la circulation des masses d'eau par tempêtes de SE ou de Mistral peuvent être proposés. Leur mérite principal est d'exister et de susciter les critiques ou d'orienter les recherches futures.

#### I.4.1. LES CIRCULATIONS PAR TEMPETES DE SE

Il est bien évident que les indications sont fournies avec les plus extrêmes réserves.

Avant les travaux portuaires (fig.19), on observait dans la moitié orientale du golfe une circulation générale des eaux superficielles dirigée vers l'Ouest. Un premier courant de décharge superficiel, situé sur le méridien de la pointe St Gervais, portait au Sud puis semblait disparaître. Un fort courant entrant, superficiel lui aussi, longeait le talus externe de la Gracieuse vers le NNE en direction du fond du golfe. La moitié occidentale était le siège d'une circulation annulaire des eaux de surface, alors qu'un courant de décharge sortait, selon Duboul-Razavet (1955), en longeant le fond de la zone abritée.

Pendant les travaux portuaires, en 1971 (fig.20), la circulation superficielle s'effectue toujours d'Est en Ouest dans la moitié orientale du golfe. Par contre, on observe, semble-t-il, deux courants de retour d'importances inégales :

- . le premier, situé sur le méridien de la pointe St Gervais, porte au SSW et s'atténue très rapidement,

- . le second, plus important, s'écoule au niveau de la digue ouest et paraît être le courant de décharge principal qui compense l'afflux des eaux dans le fond du golfe. Ce courant porte au SSE et passé beaucoup plus près de la pointe de la Gracieuse que précédemment.

La moitié occidentale du golfe est toujours le siège d'un déplacement annulaire des eaux, mais en sens inverse de la giration notée en 1964. En effet, le courant entrant qui longe le talus externe de la Gracieuse porte au NE. Parvenu à l'extrémité de la pointe, il s'infléchit vers l'Ouest pour pénétrer dans la zone abritée de Carteau.

On notera que ce schéma de circulation par vent de mer présente de grandes analogies avec les courants de flot de la figure 17. Ceci est normal car dans les deux cas une élévation du niveau moyen des eaux peut se traduire par des phénomènes comparables.

Depuis la fin des travaux portuaires, il est probable que les circulations hydrodynamiques se soient à nouveau modifiées en raison de la présence d'un terre-plein et de la construction partielle de la jetée orientale. On peut ainsi penser qu'en 1983, le courant de décharge principal, défecté par les ouvrages récents, passé plus à l'Est de la pointe de la Gracieuse qu'en 1971. Cette inflexion permettrait au flux entrant qui longe la Gracieuse de se diriger au NNE vers le fond du golfe, retrouvant ainsi un tracé voisin de celui de 1964. Un tel phénomène induirait une nouvelle inversion du sens de giration des eaux dans la cellule de Carteau.

L'étude Ortolan (1976) ne fournit pas de précision notable sur les circulations par vent de mer des masses d'eau, en raison de la dispersion des résultats liée probablement à un nombre insuffisant de mesures. Il semblerait que les flux entrants et sortants soient superposés en veines de sens opposés et situées plutôt dans la partie centrale supérieure du profil Lavera-Pointe de la Gracieuse.



#### I.4.2. LES CIRCULATIONS PAR TEMPETES DE MISTRAL

Par vent de terre, l'orientation des digues de Fos n'apporte pas de perturbations nettes aux circulations hydrodynamiques de 1983 (fig.21).

Les photographies aériennes montrent que, dans la moitié septentrionale, l'extrémité du they de la Gracieuse capte une partie des eaux chassées au SE par les dérives superficielles. Cela provoque une circulation annulaire dans l'anse de Carteau. Une dérive littorale le long du talus externe de la Gracieuse, toujours manifeste, porte au NE.

L'étude Ortolan (1976) donne quelques précisions quant aux déplacements des flux observables sur le parallèle de Lavera. L'évacuation vers le large des masses d'eau intéresse une tranche de surface dont l'épaisseur généralement voisine de 4m, augmente rapidement à l'approche du littoral de la Nerthe pour y atteindre une quinzaine de mètres. Le déséquilibre hydrostatique est compensé en profondeur par un contre-courant qui affecte toute la moitié occidentale du golfe, de -4 à -20m, en accord avec les observations de Duboul-Razavet (1955).

#### I.5. LES COURANTS FLUVIATILES DE SORTIE DU RHONE

La dispersion des apports rhodaniens à l'embouchure est fonction de l'allure et de la vitesse du courant de sortie des eaux fluviales, ainsi que des conditions hydrodynamiques marines locales.

##### I.5.1. LE COURANT FLUVIATILE DE SURFACE (fig.22)

Pauc (1970) a montré que les eaux fluviales, plus légères, pénètrent en mer selon un faisceau superficiel de 500m de large sur une épaisseur de 4 à 5 mètres. Dans les conditions moyennes, ce courant se divise rapidement en deux lignes de forces principales :

- . l'une, branche orientale mineure, remonte au NE vers le centre du golfe en longeant le talus externe des theys de Roustan, Balancelle et Gracieuse.

- . l'autre, branche occidentale majeure, se dirige vers le Sud puis s'infléchit au SW, à 3 ou 4 milles de la côte, sous l'influence de la force de Coriolis, et vient se fondre dans le grand courant qui longe d'Est en Ouest le littoral provençal.

De 80cm/sec en eau moyenne à l'embouchure, la vitesse du courant de sortie s'abaisse à 40cm/sec dans chacune des branches, pour tomber rapidement à 10cm/sec dans le vecteur oriental.

##### I.5.2. LES COURANTS MARINS PROFONDS

Divers travaux ont montré qu'un "coin" d'eau salée pénètre dans l'embouchure et le cours inférieur du Rhône, sous les eaux douces. En basses eaux et selon les marées lunaires, cette lentille pourrait remonter jusqu'à 34km de l'embouchure. En eau moyenne, ce phénomène n'est plus perceptible en amont de Port-de-Bouc. Lors des crues on n'observe pas d'eau salée dans le lit du Rhône.

Face au grau de Roustan, Pauc a mis en évidence un déplacement

des eaux marines profondes en sens inverse du courant de sortie superficiel. Ce courant de fond, dont la vitesse n'est que de quelques cm/sec, est dévié à l'ENE par la barre deltaïque et vient ensuite longer les theys de Roustan et Balancelle. Il double ainsi en profondeur la branche orientale du courant superficiel.

Ces deux courants assurent ainsi en permanence la dispersion des alluvions les plus fines dans le golfe de Fos. Cette circulation pérenne vient s'opposer aux courants de marées et de vagues à l'extrémité de la point de la Gracieuse. Plaquée contre la côte par l'afflux des masses d'eau de SE et de SSE, ce déplacement s'en éloigne par Mistral.

#### I.6. LES COURANTS DE SORTIE DE L'ETANG DE BERRE

Afin d'apprécier les éventuelles perturbations apportées par les rejets liquides de la centrale de St Chamas au fonctionnement hydraulique naturel du canal de Caronte, E.D.F. a confié au LNH Chatou l'étude des phénomènes d'échanges des masses d'eau entre le golfe de Fos et l'étang de Berre.

A la suite de campagnes de mesures et d'analyses en modèles mathématiques, cet organisme a établi les formes et les limites d'extension possibles du front des rejets selon les divers paramètres des volumes liquides en présence : débits du canal de Caronte et l'usine de St Chamas, salinités et niveau de l'interface eau douce/eau salée, direction et vitesse du vent dominant. Ces schémas, reproduits dans les figures 24, 25 et 26 fournissent des indications précieuses.

Par gros temps de SE, les eaux superficielles issues de l'étang peuvent éventuellement recouvrir toute la moitié septentrionale du golfe de Fos.

Par temps calme, et par fort débit de l'ordre de 250m<sup>3</sup>/s correspondant à 20 millions de m<sup>3</sup> par jour, le jet flottant s'avance jusqu'au niveau du they de la Gracieuse, à plus de 6km de son origine.

Par vent de terre, les eaux turbides s'étirent dans le lit du vent et viennent longer les rives de la chaîne de la Nerthe, pour finalement sortir du golfe de Fos et s'étaler sur le plateau continental.

On notera que ces extrapolations mathématiques sont en bon accord avec les données de diverses études hydrologiques ou biochimiques. De plus, les photographies et thermographies aériennes reproduites dans la figure 23 confirment l'allure générale des déformations majeures des nappes de dilution telles qu'elles ressortent des modèles LNH.

On peut toutefois déplorer que la distribution des courants profonds de jusant liés à la vidange du coin salé de l'étang de Berre ne soit pas précisée. En outre, aucune étude des échanges de matériel particulaire entre le golfe et l'étang n'a été réalisée à ce jour (fig.44 et 45).

#### I.7. LES APPORTS LIQUIDES ANNEXES (fig.28)

Diverses sources d'apports liquides susceptibles de véhiculer

des matériaux en suspension sont citées ici pour mémoire, car leurs débits peuvent être considérés comme négligeables individuellement.

Le canal d'Arles à Port-de-Bouc, est le mieux connu. A son propre débit, estimé à une dizaine de  $m^3/s$ , s'ajoutent les eaux du canal centre Crau ( $4m^3/s$ ) et du canal du Viguiérat (2 à  $3m^3/s$ ). En moyenne près de  $18m^3/s$  arrivent ainsi dans la corne nord-ouest de la darse 1 par l'intermédiaire de ce réseau. Ces valeurs pourraient être multipliées par 4 lors des crues centennales (fig. 27).

Les débits et les charges solides du canal du Rhône à Fos et du canal St Louis sont actuellement en cours d'étude.

Le radier de la darse 1 et du chenal d'accès portuaire entaille localement, à la côte -23, le toit de la nappe phréatique des cailloutis de Crau. Les débits des résurgences ne sont pas connus. Il en est de même pour la source sous-marine signalée dans le SSW de la pointe St Gervais.

#### I.8. LES NAPPES DE DILUTION ISSUES DU GOLFE DE FOS

Les photographies prises par satellites permettent de visualiser les dérives vers le large des eaux turbides et polluées issues du Rhône, de l'étang de Berre et du golfe de Fos. Les schémas de la figure 29 décrivent les aspects qualitatifs de quelques types de situations caractéristiques particulièrement fréquentes.

Les rejets du canal de Caronte, des installations portuaires et du canal St Louis fusionnent en une large tache qui recouvre la totalité du golfe de Fos. Entraînés vers le SE par dérive superficielle, ces apports se fondent dans les eaux turbides rhodaniennes qui dessinent un vaste éventail au dessus du plateau continental provençal. La limite orientale s'infléchit alors vers l'ESE, traverse le golfe de Marseille, rejoignant ainsi les nappes de pollution issues de cette ville. L'ensemble reste ensuite perceptible jusqu'à plus de cent kilomètres du littoral.

Lorsque des vents d'Ouest se conjuguent avec une crue du Rhône, la nappe fluviatile pénètre largement dans la rade de Marseille. Les apports rhodaniens longent alors la côte sud de la chaîne de la Nerthe et, dans certains cas, peuvent ainsi atteindre le Port de l'Estaque et les digues de protection. La turbidité résiduelle est responsable des "eaux blanches", appellation commune d'un phénomène bien connu des pêcheurs locaux et qui traduit bien l'aspect trouble des eaux marines.

Malgré le grand nombre d'études hydrologiques, biologiques et molysmologiques, on ne possède pratiquement pas de renseignement sur la charge particulaire minérale de ces masses d'eau superficielle : les données disponibles concernent les sédiments.

#### I.9. CONCLUSION

En dépit de quelques études LNH ou SOGREAH destinées à préciser certains aspects limités de la distribution des masses d'eau, il est manifeste que les phénomènes hydrodynamiques apparaissant par tempêtes

dans le golfe de Fos ne sont pas connus. Or, il est évident que les déplacements globaux observés (?) alors ne correspondent pas à la simple addition des caractères de chaque facteur pris isolément.

On notera que les courants de marées, les flux de sortie rhodanien, du canal St Louis, des canaux de navigation et de l'étang de Berre, compensent leur relative faiblesse par leur permanence et leur régularité, ce qui les met à même de jouer un rôle important dans la répartition des éléments les plus fins dans le golfe.

Au contraire, le déferlement des vagues nées de la réfraction des houles, les courants liés à l'action des vents, les flux de décharge hydrostatique, sont des phénomènes de fortes tempêtes. Ces facteurs compensent leur irrégularité et leur fréquence relative plus faible par leur intensité capable de remanier vigoureusement les éléments sableux littoraux et d'en disperser la fraction pélagique dans le reste du golfe.

## DEUXIEME PARTIE

### LES APPORTS SOLIDES RHODANIENS

### MODALITES DE SEDIMENTATION ET DE REPARTITION DANS LE GOLFE DE FOS

Par l'étendue de son bassin versant, près de 95 500km<sup>2</sup>, son débit annuel et sa charge solide, le Rhône est un des fleuves les plus importants de Méditerranée. La branche principale du cours, le "Grand Rhône", débouche au SW du golfe de Fos par le grau de Roustan. L'exutoire secondaire, "le Petit Rhône", se jette dans le golfe des Saintes-Maries par le grau d'Orgon.

### II.1. LES DEBITS LIQUIDES DU RHONE

Le débit moyen du Rhône atteint environ 55 milliards de m<sup>3</sup> par an, ce qui le place en tête des grands fleuves méditerranéens, devant le Nil et le Pô.

En 1956-1957, les débits les plus fréquents à Beaucaire restaient compris entre 1 000 et 2 000m<sup>3</sup>/s et représentaient 60% des valeurs mesurées. Au cours de cette période le débit moyen annuel (module) atteignit 1 790m<sup>3</sup>/s, les valeurs extrêmes fluctuaient de 8 900 (crues) à 700 à 800m<sup>3</sup>/s (étiage).

Ces valeurs correspondent avec les estimations faites par Surell vers le milieu du siècle dernier (1847). Le module du Rhône en Arles était alors de 1 718m<sup>3</sup>/s, pour un débit maximum de crue de 8 400m<sup>3</sup>/s, alors que les étiages s'abaissaient à 504m<sup>3</sup>/s.

De 1967 à 1970, la Compagnie Nationale du Rhône reprenait les relevés de débits à la station de jaugeage de Beaucaire. Les apports moyens étaient alors de 1 000 à 1 500m<sup>3</sup>/s. Les débits extrêmes observés au cours de ces trois années variaient de 5 745 (maximum janvier 1970) à 529m<sup>3</sup>/s (minimum novembre 1969).

La comparaison des régimes notés à 10 ans d'intervalle montre la pérennité des débits minima et moyens. Par contre, les débits de crue sont en nette régression en raison de la régularisation des apports liquides par les aménagements hydroélectriques des affluents majeurs du bassin versant.

### II.2. LES APPORTS SOLIDES DU RHONE

Divers travaux ont montré que deux modalités d'apports doivent être distingués selon la granulométrie moyenne des alluvions :

- . les particules les plus fines (limons, argiles), de diamètre moyen inférieur à une centaine de microns, sont transportées en suspension au sein des eaux turbides, et leurs aires de sédimentation en mer sont vastes,

- . les éléments plus grossiers (sablon et sables), sont mobilisés par charriage (saltation, traction, roulement) contre le fond, et leur transfert s'interrompt au niveau des barres sableuses des embouchures.

Le volume des matériaux transportés annuellement par le Rhône reste assez mal connu. Les diverses estimations obtenues à l'aide de plusieurs méthodes (mesures directes, cubature des alluvions déposées, utilisation de marqueurs radioactifs), ne concordent pas toujours.

### II.2.1. LES APPORTS EN SUSPENSION

Les matières solides en suspension (MES) sont essentiellement représentées par des éléments dont la taille varie de quelques microns (argiles) à plus d'une centaine de microns (sablons). Exceptionnellement, des particules de micas à grande surface portante ou des agrégats de cristallites soudés par de la matière organique végétale peuvent atteindre 200 à 300 microns. Les analyses granulométriques effectuées par les Ponts et Chaussées Maritimes montrent la nette dominance de la phase particulaire 5-35 microns.

Au siècle dernier, Surell (1847) évalua à 21 millions de m<sup>3</sup> le volume des apports annuels globaux en suspension, dont 17 millions pour le seul Grand Rhône. En adoptant une densité de 1.5 cela représente un tonnage de 31.5 millions de tonnes, dont 26.5 pour le Grand Rhône. Si l'on adopte une masse spécifique sèche allant de 2.0 à 2.6, le poids des apports annuels de l'exutoire majeur reste compris entre 34 et 44 millions de tonnes.

En 1956-1957, des mesures de débit solide ont été effectuées par la SOGREAH à Beaucaire. Ces études donnent 14.5 millions de tonnes par an pour un débit liquide de 56 milliards de m<sup>3</sup>. Comme la répartition des eaux entre Grand et Petit Rhône, en aval d'Arles, ne semble pas avoir beaucoup changé depuis le début du siècle (15 à 16% pour le Petit Rhône), on peut admettre que seulement 11.8 millions de tonnes transitaient alors en suspension par l'embouchure de Roustan. Avec une densité de 2.0 à 2.6, cela correspond à un volume de 4.5 à 5.9 millions de m<sup>3</sup>, soit le 1/4 ou le 1/3 des valeurs obtenues par Surell un siècle plus tôt.

La différence entre les deux estimations ne résulte pas d'erreurs systématiques. Elle met en relief l'influence des aménagements hydroélectriques du cours du Rhône et de la plupart de ses affluents majeurs. Ces barrages, par les palliers introduits dans les profils d'équilibre, provoquent une importante sédimentation d'alluvions, dont une faible partie seulement est restituée en rivière par les chasses hydrauliques. En outre, la régularisation des torrents alpins, les reboisements, la lutte contre les phénomènes d'érosion, sont responsables d'une diminution naturelle de la turbidité moyenne des cours d'eau. Ainsi, la Durance a vu ses concentrations en MES passer de 0.9g/l à la fin du siècle dernier, à 0.3g/l dans les années 1950-1960.

Cette régression progressive a été bien mise en évidence par Pauc et Got (1970), à l'occasion d'une étude de l'enfouissement de corps radioactifs (137 Cesium), libérés par les centrales nucléaires de Marcoules et Cadarache, dans les alluvions de l'embouchure du Grand Rhône. Entre la barre deltaïque et la bouée de Roustan, ces auteurs mirent en relief un remblaiement de 12m de 1935 à 1950, de 1.8m de 1950 à 1958 et de 1.2m de 1958 à 1969. Corrélativement, les teneurs moyennes en suspension n'étaient plus en 1969 que le dixième de celles observées avant 1950 par Duboul-Razavet.

Ainsi : "avant la construction des barrages majeurs (1950) les dépôts s'accumulaient à une cadence de 0.8m/an ; au cours de leur mise en eau successive (1950-1958), on assiste à un ralentissement progressif de la vitesse de sédimentation qui s'abaisse à 23cm/an. Enfin, depuis la mise en service de la totalité des aménagements (1958), la vitesse

de sédimentation est tombée à 10cm/an".

La minéralogie de la phase argileuse des apports limoneux rhodaniens est assez bien connue. Chamley a montré que le cortège fondamental, d'origine essentiellement alpine à illite dominante, chlorite et traces de smectite et kaolinite, est sujet à de nombreuses et importantes fluctuations de ses proportions. Selon le type et l'origine des crues (Alpes ou Massif Central), la période d'étude (début, maximum, fin de crue), les interstratifiés irréguliers pédogénétiques et les smectites apparaissent en plus ou moins grande abondance. Néanmoins, en raison des teneurs généralement faibles en complexes gonflants, on n'observe pas à l'embouchure une floculation préférentielle des smectites. Au contraire, ces cristallites statistiquement les plus petits vont s'accumuler dans les secteurs les plus éloignés, au large du grau de Roustan, ou les plus abrités, dans les zones profondes du golfe de Fos et le mouillage de Carreau.

En résumé, depuis 1950, on observe une diminution très importante des apports nécessaires à la stabilité des rivages occidentaux du golfe de Fos. De nouvelles études seraient seules capables de préciser les parts imputables à l'action des barrages et à la régression naturelle des charges solides. Selon certains auteurs, le flux particulaire ne serait plus actuellement que le dixième des décharges annuelles initiales. On peut, sans commettre d'erreur grave avancer comme volume minimum de matériaux limoneux apportés en 1980, les chiffres de 2 millions de m<sup>3</sup>, soit 4 à 5 millions de tonnes, dont une partie seulement sédimente à proximité de l'embouchure. Les smectites apparaissent comme les traceurs des lignes de forces de la dispersion des matériaux et les marqueurs des zones d'amortissement hydrodynamique propices à la sédimentation péritique.

## II.2.2. LES APPORTS PAR CHARRIAGES

Entre la confluence de la Durance et la mer, le lit du Rhône montre deux domaines. Une zone de galets duranciens s'étend jusqu'en aval d'Arles; un tronçon constitué de sables bien calibrés ( $\phi = 0.3\text{mm}$ ) prend le relais jusqu'à l'embouchure. Après Port-St-Louis, apparaît un léger contrepente due à la barre.

L'ensemble des auteurs du siècle dernier s'accorde pour souligner la faiblesse des apports grossiers en étiage et en eau moyenne, sans citer de valeur. En crue, un phénomène de chasse hydraulique débarasse le cours très inférieur du fleuve de ses bancs sableux et expulse le bouchon constitué par la barre, qui se reforme lentement par la suite.

Pour compléter ces connaissances fragmentaires, le LNH Chatou procéda en 1964 à l'immersion de poudre de verre marqué à l'Iridium 192 radioactif et de granulométrie comparable à celle des sables des lieux d'étude.

On observa alors un déplacement très lent des matériaux, parallèlement aux rides longitudinales du fond. Les vitesses de transport restèrent en moyenne de 20 à 30cm par semaine, même en période de crue (4 500m<sup>3</sup>/s le 28.02.1964). On ne put déterminer le mode de transport car les auréoles radioactives s'allongèrent également à contre courant. Ce phénomène semble être la résultante de plusieurs facteurs : déplacement des eaux au sein

\* On notera que récemment, Badie C., Burolet P.F. & all., dans un "Essai de bilan de la sédimentation devant l'embouchure du Grand-Rhône" (Rapp. CIESM, 1983, 28, 4, P. 207-208) estiment à 10 millions de tonnes la masse des sédiments qui se déposent chaque année sur le plateau continental dans un rayon de 30 Km autour de l'embouchure du Grand-Rhône. Selon ces auteurs la charge solide déversée par le Grand-Rhône serait en moyenne d'environ 13 à 15 millions de tonnes. Mais ces valeurs surprenantes sont établies à partir d'estimations des vitesses de sédimentation en quelques points du plateau continental.



du coin salé, apparition d'anti-dunes hydrauliques lors de la crue, etc. Ces expériences ne précisèrent ni l'épaisseur de la couche sableuse concernée par les remaniements, ni les volumes déplacés. Le LNH conclut simplement "le Rhône n'expulse pas de grosses quantités de matériaux par charriage, même en temps de crue".

On notera que ce résultat était prévisible, car cette fraction granulométrique reste pratiquement toute entière bloquée dans les pièges à sédiments que sont les barrages. Ce phénomène est d'autant plus inquiétant que ce type d'apport est, comme nous le montrerons, tout particulièrement indispensable à la stabilité des corps sédimentaires de l'ancienne embouchure : theys de la Balancelle et de la Gracieuse.

### II.3. REPARTITION ET SEDIMENTATION DES MATERIAUX RHODANIENS DANS LE GOLFE DE FOS

En schématisant à l'extrême, on peut dire que la destinée des matériaux amenés à la mer par le Rhône est double.

#### a. Dispersion par sédimentation différée

Les éléments de granulométrie très fine (quelques microns) ou les agrégats à surface portante dominante (50 à 300 microns) ainsi que les micas restent en suspension et se répartissent entre les deux courants de dispersion des eaux fluviales, puis vont sédimenter loin des embouchures.

#### b. Accumulation par sédimentation immédiate

Le reste des apports, au contraire, sédimente à proximité des graus, dans un rayon de 3km, et est responsable de l'édification du pro-delta sous-marin, puis de son emmersion. Depuis les bancs sableux côtiers, la taille des sédiments décroît le long du talus immergé qui vient se raccorder aux fonds de vases fines.

Les variations bathymétriques montrées par le golfe depuis près de 130 ans permettent de bien situer les aires de sédimentations immédiates ou différées des apports.

#### II.3.1. LA SEDIMENTATION IMMEDIATE ET LES PRODELTA

Nous avons vu qu'entre 1841 et 1895, le Grand Rhône s'écoulait vers l'ESE par le grau du Peygoulier, tous les autres graus étant alors barrés. Au cours de ce demi-siècle, le fleuve progradait rapidement un delta du type allongé et pointu, situé de nos jours au large du they de la Balancelle.

La figure 30 montre qu'en 55 ans, les fonds initialement à -40 de l'axe du delta se sont exhausés de près de 30m (point A) ce qui correspond à une vitesse de sédimentation moyenne de 60cm/an. Au Nord et au Sud, lorsque l'on s'éloigne de la ligne de force principale des écoulements fluviaux, ces taux décroissent et s'abaissent rapidement à 20cm/an (points B et C).

A partir de 1895, le grau de Peygoulier barré, le Rhône s'écoule au Sud par le grau de Roustan. Depuis cette date, un deuxième delta sous-marin, de forme analogue au premier, s'est édifié, tandis que les

rives est et ouest de l'embouchure progressaient respectivement de 1.5 et 2km vers la mer.

La figure 31 montre qu'au large, dans l'axe du courant de sortie, les fonds à -50 en 1895 se trouvent en 1968 à -15 mètres, ce qui correspond à une vitesse de sédimentation moyenne de 60cm/an, si l'on élimine les vingt dernières années déficitaires.

En résumé, on voit ainsi que les deltas sous-marins procèdent d'une hypersédimentation qui s'effectue dans une aire de 3km de rayon étroitement inféodée aux positions successives des embouchures. Par le jeu des progressions et des déplacements de l'estuaire, ce phénomène affecte finalement la quasi-totalité de la moitié occidentale du golfe, à l'Ouest du méridien de la pointe St Gervais.

### II.3.2. LA SEDIMENTATION DIFFEREE

Il n'en est pas de même pour la moitié orientale du golfe, où l'on assiste au cours de cette période 1841-1968, de près de 130 ans, à un comblement très lent, régulier et constant, comme le montre la faible progression de isobathes des figures 30 et 31. Dans ce secteur, les vitesses de sédimentation, parfois presque nulles (points D et E), sont constamment restées inférieures à 5cm/an jusqu'en 1935 et sont de l'ordre du cm/an de nos jours.

Ces taux très bas résultent de la dispersion de la charge alluvionnaire en suspension dans une vaste zone d'épandage qui n'est pratiquement pas modifiée par les fluctuations de la position géographique de l'embouchure.

Ce type de sédimentation ne se limite bien évidemment pas aux seules aires centrales et orientales du golfe de Fos, mais déborde largement vers le Sud et le Sud-Est sur le plateau continental pour donner naissance aux "Vases Terrigènes Côtières" qui s'étendent vers l'Est jusqu'au fond de la rade de Marseille.

Les apports rhodaniens demeurent ainsi perceptibles jusqu'à plus de 150km du littoral actuel, bien au delà du talus continental. La partie sous-marine du delta s'y étale en un vaste éventail dans des fonds de 2 000m caractérisés alors par les "Vases Bathyales". La finesse des dépôts superficiels, généralement pélitiques, peut être localement perturbée par des témoins d'apports fluvio-glaciaires récents (Würm IV). L'épaisseur de sédiments non consolidés semble atteindre dans certains secteurs plus d'un millier de mètres.

## TROISIEME PARTIE

### EVOLUTION RECENTE DES COTES OCCIDENTALES DU GOLFE DE FOS

Depuis 1895, le démantèlement de l'ancien delta de Peygoulier et l'édification progressive de l'actuelle embouchure de Roustan ont profondément modifié la morphologie de ce littoral.

Ces deux phénomènes sédimentaires opposés conditionnent la naissance puis l'évolution de la flèche issue de la réunion des theys d'Eugène, de la Balancelle et de la Gracieuse initialement distincts. Il est bien évident que la stabilité de ce complexe et son rôle de jetée naturelle sont fondamentaux pour la protection des installations portuaires du golfe de Fos.

La figure 31 met en évidence la résultante des bouleversements spectaculaires apparus en 70 ans. En fait, l'analyse détaillée des variations successives permet de distinguer plusieurs étapes morphogénétiques majeures liées à des vitesses d'évolution différentes. En outre, l'érosion littorale s'attaque aux corps sédimentaires avec des intensités modulées par la position géographique ou le niveau d'immersion des diverses parties des theys.

### III.1. EVOLUTION DES PARTIES IMMERGEES DES THEYS

Les portions immergées du promotoire de Peygoulier sont le siège d'une évolution discrète : les effets de l'érosion et de la sédimentation se conjuguent pour modifier les profils du talus sous-marin.

De 1895 à 1934, les profils basculent autour d'une profondeur charnière comprise entre -10 et -12 mètres, comme le montrent les coupes 5, 6, 7 de la figure 32. Ainsi, tandis que l'érosion arase la partie supérieure de l'ancien delta, la sédimentation en exhausse les aires plus profondes. Le basculement des profils entraîne une progression rapide vers la côte des isobathes 5 et 10, et un déplacement vers le large des isobathes supérieures à -15 mètres.

Depuis 1934, les profils continuent à évoluer selon le même schéma mais il semble que le mouvement de bascule soit plus lent et se produise de nos jours autour d'une profondeur charnière de -25 à -20 mètres.

Cette profondeur correspond précisément à la demie longueur d'onde des houles de tempêtes moyennes les plus fréquentes. Au-dessus de ce seuil de réfraction, les houles "accrochent" le fond et les sédiments sont mobilisés ; au-dessous de cette cote, les dépôts échappent au remaniement.

Les plans de vagues des figures 34 et 35 mettent en évidence la nette concentration des orthogonales par tempêtes de SW et surtout de SE, telles qu'elle se présentait en 1895. Ces dispositions expliquent la rapidité initiale de la destruction de l'appareil deltaïque et de l'apparition du platier ainsi décapé.

En 1965, afin de préciser les vitesses et les sens de cheminement des matériaux remaniés, le LNH Chatou. immergea divers traceurs radioactifs par des fonds s'échelonnant de -1 à -6m, jusqu'à 600m du littoral. On observe alors deux grands types de mouvements :

- sur le platier arasé du deltat, de -6 à -3m, les sables et sablons sont entraînés dans des directions allant du NNW au N, selon le sens

de propagation des houles réfractées,

. par les petits fonds de -1 à -3m, compris entre diverses rides sous-marines, le cheminement s'infléchit progressivement au NE sous l'action de la dérive littorale des eaux, pour s'orienter parallèlement au trait de côte.

Le transfert des sables semble assez lent, même par fortes tempêtes, au cours desquelles le déplacement des centres de gravités des auréoles radioactives n'excède pas 150m en 60 jours. Des épaisseurs de 50 cm de sédiments peuvent ainsi être périodiquement remaniées.

En résumé, la dynamique sédimentaire locale est bien connue. Le stock sablo-vaseux initial est lessivé à chaque tempête. La fraction grossière a ainsi tendance à être rejetée à la côte par progression contre le fond. Les particules plus fines, remises en suspension, vont se déposer définitivement dans les aires plus profondes inférieures à une vingtaine de mètres.

Par contre, le résultat à plus ou moins long terme de cette dynamique est plus difficile à prévoir. On peut penser que l'érosion des niveaux supérieurs immergés se poursuivra tant qu'un nouveau profil d'équilibre du prisme littoral n'aura pas été réalisé par la destruction jusqu'à -25m d'une grande partie du promontoire sous-marin. Cette morphologie peut mettre plusieurs siècles avant de se concrétiser. En effet, l'évolution passée s'est surtout traduite par une extension vers le NW du platier arasé à -10. Les modalités de réfraction des houles se modifient ainsi lentement, et les énergies apportées se dissipent par déferlement et frottement contre le fond sur des distances croissantes. Les vagues "s'essoufflent" avant d'arriver sur les très petits fonds. Il en résulte finalement une diminution de leur capacité d'érosion. A la limite, le recul de la côte peut se poursuivre grâce à un phénomène de soutirage aux rivages par les dérives littorales permanentes, bien que le décapage du platier submergé s'atténue. De nos jours, 250 ans après le début de son démantèlement, le prodelta du "Vieux Rhône" se marque dans la topographie sous-marine par l'étendue de son platier arasé à -10 et la vaste inflexion de l'isobathe 20 sur ce méridien.

### III.2. EVOLUTION DES PARTIES EMERGÉES DES THEYS

Les portions émergées et les îlots sableux du promontoire de Peygoulier sont le siège d'un démantèlement permanent, et présentent depuis 1895 un recul général vers le Nord-Ouest. On peut distinguer trois phases successives liées à des vitesses et des modalités d'évolution différentes.

A. Au cours de la première phase, de 1895 à 1934, on observe une ablation totale, rapide et particulièrement spectaculaire des corps sédimentaires les plus extrêmes de l'ancienne embouchure. Les plans de vagues théoriques des figures 34 et 35 montrent que le lieu de concentration maximum de l'énergie est situé dans l'axe du grau de Peygoulier. Il est donc normal que ces lieux, situés au niveau de la ligne de puissance maximum du delta, soient les plus atteints. Les cartes d'époque mettent en évidence un recul de près d'un km en 28 ans, ce qui correspond à

à une vitesse de destruction moyenne de 35m par an. L'ancienne passe et ses divers bancs ont complètement disparu, alors qu'un cordon littoral unique relie le grau de Roustan au They de la Gracieuse en cours d'individualisation.

Mais ces phénomènes de destruction des formations initiales et de recul du trait de côte vers le NW ne sont pas seuls en cause. Il apparaît un phénomène de transfert latéral des sables et sablons vers le Nord-Est sous l'effet des dérives littorales engendrées par les houles de SE et surtout de SW. Les matériaux issus du démantèlement des theys s'ajoutent aux produits de l'arasion du delta - peut être aussi à quelques apports rhodaniens "frais" - et cheminent alors parallèlement à la côte. Ils migrent ainsi vers le Nord-Est et concourent à l'élaboration de la flèche de la Gracieuse dont la pointe extrême a progressé d'environ 1 km de 1904 à 1934 (fig.36).

Plus au Sud-Ouest, au contraire, le they de Roustan n'a cessé au cours de cette période, d'avancer vers le large au même rythme que le delta sous-marin. Plus de 750 mètres ont été ainsi conquis sur la mer grâce à l'accumulation des alluvions à proximité immédiate de l'embouchure.

La figure 31 montre que l'on peut assimiler cette évolution à une rotation de la sigmoïde dessinée par le trait de côte autour d'une petite zone pivot Pn située à l'intersection des tracés littoraux de 1895 et 1962. Au Nord de ce point, l'érosion fait reculer la côte ; au Sud, les rivages s'engraissent. La stabilité générale du littoral au niveau de ce "point neutre" (Fulcrum point) est tout aussi manifeste dans les portions immergées des theys, comme le met en évidence la coupe 5 de la figure 32 : les modifications du profil sous-marin sont pratiquement négligeables.

B. Au cours de la seconde phase, de 1934 à 1962, le phénomène de pivotement s'amortit très lentement. L'érosion demeure importante à la hauteur du they de la Balancelle, où le retrait, de 450m entre 1934 et 1954, est encore de 150m de 1954 à 1962 (fig.37).

De même, l'allongement du they de la Gracieuse continue à des vitesses toutefois variables. Ces fluctuations résultent de la soudure rapide à la côte de bancs sableux demeurés longtemps immergés, avec un ralentissement de la progression apparente ultérieure. La SOGREAH estime que la mise en dépôt annuelle portait alors sur environ 150000 à 200000m<sup>3</sup> pour des vitesses de progression de 20 à 25m par an. Les photographies aériennes confirment ces données et mettent en évidence une croissance de 600m entre 1934 et 1962, soit 20m/an. Près de 8 millions de m<sup>3</sup> de sables auraient été ainsi mis en dépôt à la pointe de 1895 à 1954 selon la SOGREAH.

Pendant ce temps, au Sud du point neutre, le they de Roustan a progressé de près d'un km vers le SE. La constance des atterrissements est indiscutablement liée à la prédominance locale des phénomènes d'accumulations des alluvions rhodaniennes sur la capacité de déblaiement des facteurs hydrodynamiques.

C. Au cours de la troisième phase, de 1962 à 1971, apparaît un

nouveau phénomène qui entraîne la régularisation du trait de côte. L'allure sigmoïde du littoral fait progressivement place à un tracé rectiligne qui tend à s'orienter, selon les lois de Lewis et de Schou, parallèlement aux houles de SW et perpendiculairement à la résultante des houles de SE et SSE. On observe en outre un léger déplacement vers le NE du point d'inflexion.

Au Sud du point neutre, la figure 37 montre que, de 1962 à 1972, tout le secteur oriental du they de Roustan n'a cessé de reculer de près de 400m, ce qui entraîne petit à petit, une inflexion vers l'Est de l'embouchure. Il est manifeste que cette érosion ne peut qu'être liée au très fort déficit en apports solides constaté depuis la mise en service des grands barrages E.D.F.. Par contre, entre les theys de Roustan et d'Eugène (Cul-de-Bizet), on observe un engraissement de plus de 150m de 1960 à 1971 qui prolonge les atterrissements effectués depuis 1934 (500m). On peut penser que ces dépôts sont liés à la nette diminution de l'énergie des houles dans ce secteur de divergence des orthogonales. De 1934 à 1960, il s'agissait d'éléments rhodaniens "frais" ; depuis lors, l'érosion du they de Roustan assurerait le relais.

Au Nord du point de stabilité, les modifications du they de la Gracieuse sont toujours manifestes. La figure 37 montre un recul au NW des côtes d'environ 200m, alors que l'allongement se traduit surtout par une transformation des contours de l'extrémité plutôt que par une forte progression au NE.

Ces phénomènes résultent de l'action d'épis et de barges volontairement échouées à la côte par les Ponts et Chaussées, afin de stopper une dangereuse érosion de l'extrême pointe qui s'était récemment manifestée.

On peut, semble-t-il, relier cette dernière évolution aux perturbations apportées par la grande digue portuaire ouest aux tracés des courants de tempêtes. Nous avons montré dans le chapitre I qu'en 1962, le courant entrant superficiel longeait, par gros temps de SE, la flèche de la Gracieuse, puis s'infléchissait au Nord en assurant la progression de l'extrême pointe. Or, en 1971, ce courant contourne cette pointe, puis s'oriente à l'Ouest pour pénétrer dans l'anse du Repos et a tendance, au contraire, à éroder l'extrémité de la flèche.

Depuis 1972, l'évolution locale a certainement continué. Les récents ouvrages ne permettent pas de préjuger de cette dynamique. Des études complémentaires sont nécessaires pour en établir les modalités.

### III.3. CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, deux constatations majeures se dégagent d'un ensemble de phénomènes multiples.

a. On notera d'abord que la morphogénèse des côtes occidentales du golfe de Fos est sous la dépendance de deux sources distinctes de matériaux.

Les alluvions rhodaniennes nourrissent essentiellement la partie méridionale du delta et en assuraient, jusqu'en 1950, la stabilité. Les fluctuations locales du trait de côte notées depuis sont liées aux diminutions progressives des apports solides.

Les matériaux sableux issus de l'érosion du platier sous-marin

de l'ancien delta de Peygoulier alimentent à peu près exclusivement, par leur transfert au NNW, la moitié septentrionale du complexe Balancelle-Gracieuse. Le recul constant des theys montre que ces apports ne sont jamais parvenus à compenser les volumes soutirés au rivage par les agents hydrodynamiques. La progression au NE de la flèche de la Gracieuse montre que l'ensemble de ce matériel est mobilisé par transfert littoral et finalement abandonné à l'extrême pointe.

b. On observera enfin que la transformation continue des contours et le déplacement des positions aboutissent à une lente "dérive" des theys les plus externes, Eugène et Gracieuse, qui viennent fusionner finalement avec les theys initialement internes de Balancelle et Peygoulier, ou, à un degré moindre, de l'Annibal.

Les corps sédimentaires actuellement alignés, bien que portant toujours le même nom, ne présentent de nos jours ni la forme ni la place qu'ils montraient ou occupaient au début du siècle.

La pérennité des noms ne doit pas abuser car elle ne correspond qu'à une permanence apparente de la réalité.

En fait, il s'agit de formations induites par une stabilité dynamique résultant à tout moment d'un état d'équilibre précaire entre les matériaux apportés à la côte et les sédiments en cours de transfert par dérive littorale.

On mesure mieux ainsi la fragilité intrinsèque, et la sensibilité potentielle à tout aménagement inadéquat, de la côte occidentale du golfe de Fos, dont dépend en grande partie la protection des installations portuaires. Ce sont les raisons pour lesquelles de nombreux rapports ont déjà attiré la vigilance des autorités responsables sur la nécessité de surveiller en permanence ce secteur particulièrement instable. En 1983, la flèche menace de se tronçonner en trois parties à très court terme. Les coupures en cours d'établissement ou déjà fonctionnelles par tempêtes se situent soit entre les theys de l'Annibal et d'Eugène, soit au Nord de la Balancelle, à 1 km de l'extrémité de la pointe (fig.37).



## QUATRIEME PARTIE

### EVOLUTION RECENTE DES FONDS DU GOLFE DE FOS

#### IV.1. NATURE ET REPARTITION DES SEDIMENTS

Dans un bref aperçu historique, nous définirons la tendance évolutive naturelle des fonds du golfe de Fos à l'aide de diverses études sédimentologiques ou bionomiques effectuées avant le milieu du siècle.

Nous mettrons ensuite en évidence les variations de la nature et de la répartition géographique des sédiments grâce aux résultats de recherches conduites en 1964, avant le début des travaux portuaires, puis en 1971 et 1975, lors de la réalisation des ouvrages industriels.

Les états successivement décrits permettront de préciser tout l'impact des perturbations anthropiques et de cerner les lignes de force de la dynamique sédimentaire, telles qu'elles apparaissaient au cours de cette période.

Depuis lors, la poursuite de l'aménagement a très probablement induit de nouvelles modifications, dont les échos sont décelables dans les récents travaux de divers chercheurs de la S.M.E..

##### IV.1.1. LES FONDS DU GOLFE DE FOS AU COURS DE LA PREMIERE MOITIE DU SIECLE

Les cartes éditées par le Service Hydrographique de la Marine précisent la nature dominante des sédiments en raison de leurs aptitudes différentes à d'éventuels ancrages. On connaît le soin et l'exactitude apportées à ces déterminations : bien que reposant sur de simples impressions qualitatives, elles n'en traduisent pas moins avec une bonne approximation les caractères majeurs de la sédimentation.

En 1916, Chevallier, sur la foi de telles indications complétées par des travaux personnels, publie la première carte sédimentologique des fonds orientaux du golfe de Fos (fig.39). Il montre ainsi l'importance des substrats rocheux ou organogènes qui ceinturent à l'Est le plan d'eau, ainsi que la vaste pénétration des vases à plus de 90% de fraction fine ( $\emptyset < 0.113\text{mm}$ ) jusqu'à l'isobathe 15. Ces faciès occupent ainsi toute l'aire médiane profonde, alors que les sables vaseux (50 à 90% de vase) ne sont bien représentés que dans les petits fonds de l'extrémité septentrionale du golfe.

Plus récemment, Russel (1942), Duboul-Razavet (1955), Kruit (1955) et Van Straaten (1959), dans des recherches qui s'attachent surtout à préciser les modalités d'édification du vaste complexe deltaïque rhodanien, étudient accessoirement le golfe de Fos. On retrouve disséminées dans ces travaux quelques indications montrant que la carte de Chevallier correspond "en gros" à la réalité.

Cette permanence, confirmée en 1957 par l'étude bionomique des peuplements benthiques du golfe de Y. Gautier, apparaît à l'évidence sur la carte sédimentologique ( inédite ) schématique, levée en 1959, que J. Bourcart nous a communiqué avant sa mort (fig.41).

Ainsi, les documents de sources diverses mettent en relief la tendance évolutive constante et naturelle de la partie axiale du golfe: le fond du thalweg sous-marin curviligne joignant le débouché du canal St Louis au plateau continental montre, depuis le début du siècle, des sédiments de type vaseux. En outre, les modifications des faunes benthiques observées au cours de cette période sont initialement imputables à des

variations de salinité consécutives à la migration de l'embouchure du fleuve puis, dans les années 1950, à une nette augmentation de la pollution rhodanienne (Picard J.). La transformation des associations ne s'accompagne pas de changement notable de la nature et de la répartition des dépôts pélagiques des parties profondes du golfe.

#### IV.1.2. AVANT LES TRAVAUX PORTUAIRES

En 1964, R-M. Roux et C. Chevallier-Febvre (cf. rapport Benthos) effectuent une campagne de prélèvements destinée à caractériser les états sédimentologiques et faunistiques des fonds du golfe avant le début des travaux d'aménagement portuaires alors imminents. La prise de 150 échantillons a été réalisée à l'aide d'une petite drague de type "spatange" qui récolte les 10 cm superficiels des sédiments.

La partie géologique de l'étude repose sur l'analyse des proportions de trois fractions sédimentaires dont les limites répondent aux normes préconisées par le B.R.G.M.. La plus grande dimension des éléments grossiers détritiques ou bioclastiques est supérieure à 2mm ( $2\sqrt{2} = 2.8\text{mm}$ ) alors que les particules de la fraction fine (lutites) des vases ont un diamètre moyen inférieur à 0.063mm ( $4\sqrt{2} = 63$ ). Les sables représentent donc la fraction intermédiaire entre ces dimensions alors que les sablons correspondent plus particulièrement au stock 0.125-0.063mm des distributions particulières.

Les figures 40A, B, C, indiquent la nature des fonds selon la richesse en fraction fine (lutites) de la portion des sédiments inférieurs à 2mm (2.8mm). La limite supérieure élimine ainsi la phase d'origine malacologique développée in situ : la Tanathocoenose à Turritelles perturbait de façon non significative les paramètres de dépôts essentiellement terrigènes.

Dans un souci de simplification, seulement quatre types majeurs de sédiments sont distingués : leurs limites ne coïncident que très approximativement avec les aspects bionomiques des substrats.

En schématisant à l'extrême, la figure 40A montre que, en 1964, le golfe de Fos se caractérisait par la juxtaposition simple de trois grandes unités sédimentaires :

- . les vases terrigènes côtières occupaient toute la partie médiane, la plus vaste et la plus profonde,
- . les dépôts sableux restaient cantonnés dans les prodeltas de la bordure ouest,
- . des faciès biogènes apparaissaient dans les fonds rocheux de la bordure est.

#### A. LES VASES TERRIGENES

Les "Vases pures" renferment plus de 90% de lutites, et les "Vases bioclastiques", dont la proportion en fraction pélagique reste supérieure à 75%, recouvrent la quasi-totalité des fonds du golfe de Fos. Ces faciès s'avancent ainsi sur le méridien de la Pointe St Gervais jusqu'au Nord

de Port-de-Bouc. On les observe en outre dans la vaste cellule de décantation de l'anse du Repos et du mouillage de Carteau, zones d'amortissement hydrodynamique nées de l'abri de la flèche de la Gracieuse. A l'évidence la sédimentation de ce secteur est contrôlée par les apports solides du canal St Louis.

Ces dépôts riches en lutites sont ainsi divisés en deux aires nettement distinctes par une bande de "Vases sableuses et bioclastiques" (75 à 50% de fraction fine) dont "l'épine dorsale" est constituée par des "Sables vaseux" (50 à 25% de lutites) d'un type bien particulier. La fraction grossière de ce matériel original est constituée exclusivement par des éléments sablonneux (0.125-0.063mm) à stock particulaire dominant situé aux environs de 100 microns.

Les affleurements de ces faciès mixtes partent des petits fonds de sables très fins qui ceinturent la pointe de la flèche de la Gracieuse et s'étendent vers le Nord. Ils viennent finalement rejoindre en s'élargissant les éléments sableux du prisme littoral de la plage de Fos ainsi que les mattes de Posidonies, alors florissantes, de l'éperon St Gervais.

#### B. LES DEPOTS SABLEUX

A l'ouest, les petits fonds des côtes occidentales correspondent aux "Sables Fins" littoraux, ou aux "Sables Très Fins" du platier arasé de l'ancien promontoire de Paygoulier et du prodelta actuel de Roustan. Nous avons montré (cf. chapitre II et III) que ces matériaux, initialement mis en dépôt à peu de distance des embouchures, sont ultérieurement mobilisés par l'hydrodynamisme marin qui en assure la dispersion ou la redistribution par élutriation et transfert littoral. Ces phénomènes sont responsables de la ségrégation de chaque classe granulométrique dans une section bien déterminée des prismes littoraux. Ils conditionnent la nette zonation mise en évidence ainsi que le passage rapide, le long des talus deltaïques, des sables purs aux faciès plus vaseux car plus profonds.

#### C. LES FACIES BIOGENES

A l'est, la côte de la chaîne de la Nerthe est soumise à de violents courants et dérives des masses d'eau lors des tempêtes de Mistral ou de Sud-Ouest. Elle montre une succession de biotopes infra et circa-littoraux.

Les fonds rocheux sous-marins (ragues) prolongent les affleurements visibles à la côte : dalles de molasse miocène ou conglomérats maestrichtiens du Nord de Bouc.

Les herbiers à Posidonia oceanica forment, en 1964, une ceinture continue dans laquelle se piège un matériel bioclastique.

Les concrétionnements coralligènes constituent localement des fonds vifs, typiquement biogènes. Il s'agit de calcaires caverneux en cours d'élaboration, à base d'Algues encroûtantes, de Bryozoaires, Madréporaires et Alcyonnaires. Leur érosion par les agents biologiques (lithophages) et hydrodynamiques (courants de décharge, déferlement des vagues) fournit un matériel graveleux qui tapisse les thalwegs sous-marins. Mêlés aux apports des chenaux d'herbiers, ces dépôts passent sans transition nette aux faciès du Détritique Côtier.

Le "Détritique Côtier" correspond dans ce secteur, à des sables et graviers hétérométriques, d'origine à la fois biogène, autochtone ou allochtone, et terrigène minérale. Vers le large, ce biotope s'enrichit en lutites et se charge en fibres de Posidonies pour donner un détritique côtier envasé qui passe progressivement aux faciès bioclastiques des vases terrigènes côtières.

En résumé, exception faite pour les bandes de dépôts biogènes du littoral de la Nerthe, on voit que la nature des sédiments du golfe de Fos était, en 1964, sous l'étroite dépendance des apports rhodaniens et de facteurs hydrodynamiques naturels.

. La fraction limoneuse des apports en suspension, par sa large dispersion, est à l'origine de la sédimentation différée de type vaseux qui se développe soit dans la partie médiane du plan d'eau en raison de sa profondeur, soit dans une cellule ménagée par la flèche de la Gracieuse. Seul le calme relatif de ces aires de décantation autorise ce mode de sédimentogenèse.

. La fraction sableuse et sablonneuse des apports par charriage, se dépose à proximité immédiate des embouchures et donne naissance aux faciès plus grossiers des deltas sous-marins successifs de Peygoulier et de Roustan. Ce type de matériel, ultérieurement remanié et classé, montre une zonation particulièrement nette modulé par la profondeur d'immersion des divers niveaux des prismes littoraux et talus de progradation. A l'évidence, le degré d'énergie de la turbulence des eaux marines conditionne ici la sédimentogenèse.

#### IV.1.3. PENDANT LES TRAVAUX PORTUAIRES

En 1970 (Eté, Automne), puis en janvier 1971, l'étude est reprise par R.M. Roux et E. Vernier, ce dernier étant chargé de définir les dépôts littoraux. Au cours de l'été 1975, Roux continue les recherches afin de préciser les tendances évolutives décelées par l'étude antérieure. Les méthodes de prélèvement et les protocoles d'analyses sont analogues à ceux de 1964.

##### A. ETAT DES FONDS EN 1971

La grande darse n°1, sa jetée de protection et le chenal d'accès dragué à -23m sont alors réalisés, tandis que les travaux se poursuivent dans la darse n°2.

La figure 40B indique la nature des fonds selon la richesse en lutites des matériaux inférieurs à 2mm (2.8mm).

Par rapport à leurs répartitions de 1964, les divers types de sédiments montrent des distributions nouvelles.

1) Au Sud d'une ligne Pointe de la Gracieuse-Bouc, les vases pures (>90% de lutites) restent cantonnées au débouché du golfe et ne dépassent pas vers le Nord l'isobathe 50, sauf au large du they de Roustan où les positions demeurent inchangées.

Dans l'axe du golfe, à la place occupée en 1964 par ces vases,

s'étend une pellicule de vases sableuses passant localement à des sables vaseux. Sur la bordure orientale, les dépôts passent à des fonds de vases bioclastiques.

Partant de l'entrée du chenal d'accès, le nouveau domaine s'allonge en direction du Sud-Est, puis s'estompe progressivement sur le parallèle de la Couronne pour disparaître vers l'isobathe 60. Vers l'Ouest, les faciès mixtes rejoignent la pointe du they de la Gracieuse.

A la fraction sableuse très hétérométrique des dépôts s'ajoutent des proportions notables de graviers et granules ainsi que de très nombreux galets caractéristiques du cailloutis würmien de la Crau de Miramas.

Il est manifeste qu'un tel sédiment, mélange hétérogène d'éléments autochtones et allochtones, correspond à un dépôt artificiel : l'aire centrale de vases terrigènes côtières du golfe de Fos est ainsi utilisée comme zone d'épandage industriel des matériaux issus du creusement des darses et du dragage du chenal d'accès portuaire.

2) Au Nord de la ligne Pointe de la Gracieuse-Bouc les modifications enregistrées sont aussi importantes. Ainsi, les vases pures et leurs auréoles de vases bioclastiques, qui étaient cantonnées en 1964 au débouché du canal St Louis dans la cellule de décantation, débordent de leur ancien domaine et se prolongent vers l'Est-Sud-Est de part et d'autre du chenal maritime. Ces dépôts recouvrent ainsi la bande de sédiments riches en sablons antérieurement observés dans ce secteur. Des témoins de ces faciès mixtes subsistent sur le méridien de l'éperon St Gervais, où les mattes de Posidonies notées en 1964 ont pratiquement disparu.

On peut penser que le nouveau domaine d'extension des lutites correspond à l'aire de sédimentation de la fraction pélitique des formations sédimentaires locales mises en suspension lors de leur remaniement mécanique par les travaux de dragage du chenal d'accès et de creusement des darses.

En outre, les photographies IGN montrent qu'un cordon littoral se détache de la partie interne du they de la Gracieuse selon un faisceau complexe de rides obliques sous-marines. De telles formations sont absentes sur les clichés des missions du début des années 1960. Les modalités d'apparition et d'individualisation résultent à l'évidence d'un déplacement généralisé des masses d'eau dirigé vers le fond de l'anse de Carteau, selon le sens de circulation matérialisé par la flèche de la figure 40B.

#### B) ETAT DES FONDS EN 1975

Le creusement de la darse 2 et son vaste radier d'accès est terminé. Les travaux dans la darse 3 s'amorcent alors que l'édification du terre-plein de la digue orientale est bien avancée. La figure 40C indique la nature des fonds selon une légende analogue à celle des schémas précédents.

Les tendances mises en évidence en 1971 s'accroissent nettement

et montrent la même bipolarité marquée : envasement généralisé des fonds septentrionaux, extension de la zone méridionale de dépôts de dragages.

1) Dans le Sud du golfe, l'aire de vases sableuses liées aux rejets anthropiques s'étend vers l'Est et le Sud. Elle rejoint ainsi les faciès du détritique côtier envasé du littoral de la Nerthe, devenant alors difficilement différenciable en l'absence d'éléments du cailloutis de Crau.

Il est bien évident que l'ensemble des fonds de cette zone ne sont pas recouverts par une couche uniforme et continue de matériaux allochtones. En fait, il s'agit d'une mosaïque d'affleurements dont les paramètres sédimentologiques sont perturbés à des degrés divers.

2) Dans le Nord du golfe, les modifications reconnues prolongent de façon plus marquée le sens général de l'évolution amorcée en 1968.

Les vases pures et les vases bioclastiques continuent leur extension et leur progression vers le Sud et le Sud-Est : elles recouvrent ainsi la quasi-totalité des fonds. Cet envasement généralisé, attribuable aux mêmes causes qu'en 1970, est tout particulièrement perceptible le long du littoral de la Nerthe, où son apparition se produit au détriment de fonds antérieurement occupés par le détritique côtier. On notera que ce secteur correspond à la zone d'inflexion, par tempête de Mistral, des flux de vidange de l'étang de Berre et du golfe de Fos lui-même (cf. §I.4. et I.6). En outre, les herbiers de Posidonies de cette portion de côte sont localement dégradés dans la passe de Bouc, et les anses de canal Viel et des Laurons. Partout ailleurs le recul des mattes, dont le rôle de réserve biologique est fondamental, semble plus modéré bien que perceptible ; il ne s'estompe que plus au Sud.

Enfin, les petits fonds des rivages occidentaux du golfe sont le siège de modifications tout aussi spectaculaires. Les auréoles de sables vaseux et de vases sableuses qui ceinturent la pointe de la Gracieuse s'infléchissent en direction de l'W-NW et pénètrent largement dans l'anse de Carteau selon un tracé affine du trait de côte. On note, sur les photographies aériennes, l'apparition d'un second cordon littoral (CL 2) qui double l'appareil sableux (CL 1) individualisé en 1970. Mais la dernière née de ces formations montre un faisceau de rides immergées qui se détachent de l'extrême pointe de la flèche et non plus de sa partie interne médiane. Une telle morphologie ne peut que résulter de l'action de dérives littorales orientées selon le trait sagittal de la figure 40C.

#### IV.1.4. CONCLUSION

Au terme de ces descriptions, on peut tenter de hiérarchiser les phénomènes mis en évidence, de les interpréter en les plaçant dans le contexte plus général de l'évolution sédimentaire globale du golfe de Fos.

Antérieurement aux travaux d'aménagement, dans les années 1950-1960, la morphogenèse des côtes occidentales montrait de lentes fluctuations

dont les causes s'intégraient parfaitement dans la tendance évolutive naturelle qui depuis plus de cent ans modèle cette portion de littoral. De même, la partie centrale du golfe se caractérisait par la stabilité remarquable de ses dépôts vaseux.

Avec le début des travaux d'aménagement, sont apparues des variations inhabituelles et rapides, allant localement à l'encontre des anciennes tendances évolutives bien connues. Ces modifications récentes sont nécessairement attribuables à des phénomènes nouveaux liés à des "ingérences" anthropiques directes ou indirectes dans le déroulement des mécanismes sédimentaires naturels.

#### A. ACTIONS HUMAINES INDIRECTES

En 1964, comme en 1959, la portion immergée de la flèche de la Gracieuse se prolongeait vers le Nord par des faciès sablonno-vaseux peu profonds, véritable soubassement qui rejoignait le fond du golfe et sur lequel progressait lentement le matériel sableux du they sous l'action des dérives littorales. Ce phénomène n'apparaît que tardivement, vers le milieu du siècle, car il est subordonné à l'individualisation puis à l'allongement septentrional du corps sédimentaire. C'est la raison pour laquelle on peut penser avec Van Straaten que, poursuivie au rythme des années 1930-1950, l'extension de la flèche de la Gracieuse aurait isolé l'anse de Carteau avec la fin du siècle (fig.38) ! Certes, la diminution des apports solides rhodaniens, constatée depuis, aurait repoussé l'échéance. Il n'en demeure pas moins qu'un tel phénomène se situe dans le "droit fil" inéluctable de l'évolution antérieure.

En 1975, comme en 1971, l'extrême pointe du they doit être artificiellement protégée contre une dangereuse érosion qui la menace. Cette situation paradoxale, allant à contre-sens de la morphogenèse prévue, ne résulte pas d'une diminution des apports sableux en transit littoral; elle est la conséquence d'un bouleversement de l'hydrodynamisme du golfe tout entier.

En effet, les circulations sont profondément modifiées par la première jetée de protection occidentale qui rejette les masses d'eau vers le S-SE. Les dérives côtières cheminant le long de la Gracieuse viennent buter contre ce flux de décharge. Elles ne peuvent plus ainsi progresser vers le N-NE et assurer l'allongement de la flèche. Déviées vers l'Ouest, ces eaux pivotent autour du musoir naturel, en érodent l'extrémité, puis vont déposer sur les hauts-fonds de Carteau des sables fins et y élaborent des cordons littoraux emboîtés.

Menacé d'isolement jusqu'à cette dernière décennie, l'ensemble de ce secteur était, en 1975, en cours de colmatage par des matériaux initialement empruntés au talus externe du they de la Gracieuse. La tendance évolutive de 1964 est ainsi inversée.

On notera que depuis lors, la construction partielle de la seconde jetée de protection orientale et l'édification de son vaste terre-plein sont très probablement responsables de nouvelles et diverses inflexions des phénomènes de sédimentation. Des études complémentaires sont nécessai-



res pour en établir les modalités.

#### B. ACTIONS HUMAINES DIRECTES

Le fait essentiel est la disparition progressive, de 1968 à 1976, des aires de vases terrigènes côtières sous l'action des rejets de matériaux de dragages, véritable pollution sédimentaire qui bouleverse la nature des fonds de toute la partie médiane du golfe de Fos.

Il est difficile de déterminer l'ordre de grandeur du volume de matériaux allochtones ainsi dispersés. Selon le Port Autonome, seule une faible part des alluvions déblayées a été répandue à de nombreuses reprises sur des superficies croissantes.★ La plus grande majorité des sédiments sableux issus du creusement des darses a été employée lors du comblement de lagunes voisines ou de l'édification de divers terre-pleins industriels. Le choix du secteur central du golfe comme lieu de dépôt fut dicté par des impératifs financiers en raison de sa proximité des chantiers, de son étendue et de sa profondeur utilisable.

On notera que ce choix peut paraître contestable au sédimentologiste dans la mesure où les rejets se produisent sur une zone de sédimentation différée à faible taux d'accumulation, actuellement de l'ordre du centimètre par an. En outre, les écologistes déplorent une telle agression car ces vases, véritables "sols marins", constituent un biotope original, dont l'évolution biochimique et biologique est plus ou moins inféodée à la granulométrie moyenne par facteurs interposés.

On peut ainsi penser qu'il eut été plus judicieux de répandre les matériaux sablo-graveleux sur le platier arasé du delta de Peygoulier, dans les fonds de -10 à -12m. Les difficultés de positionnement et de navigation levées par un balisage des aires de dépôt et des voies d'accès, ce secteur était aussi proche que la zone choisie. Par contre, la granulométrie moyenne des apports en autorisait le lent remaniement et la dispersion ultérieure, car sensiblement voisine de celle du substratum. Ainsi, les dépôts auraient constitué un "volant" de matériaux capables de nourrir à court et à moyen terme la sédimentogenèse locale actuellement déficitaire.

Mais les réactions des milieux naturels aux perturbations anthropiques sont parfois plus rapides que les degrés d'altération constatés ne le laissent prévoir. Selon les biologistes, les biocoenoses benthiques des vases terrigènes côtières réapparaissent lentement.

#### IV.2. SEDIMENTOLOGIE

En raison du peu d'intérêt qu'offre le sujet pour le non spécialiste, seuls sont évoqués ici les caractères dominants des dépôts. En outre, les informations qu'apportent ces études ne font que confirmer les conclusions précédemment émises.

Ainsi, en schématisant à l'extrême un aride ensemble de données, on peut ranger les sédiments du golfe de Fos en deux grands types selon

---

★ Rappelons que seuls les matériaux de dragage du chenal d'accès aux darses ont été rejetés en mer au cours de deux principales phases:  
 - de 1966 à 1969, dans l'axe du golfe et principalement sur des fonds de -10 à -40;  
 - de 1970 à 1972, au Sud et à l'Est des secteurs précédents, dans des fonds de -50 à -60 mètres.

Enfin, de 1976 à 1977, postérieurement à notre étude, un matériel essentiellement pélagique a été déversé sur un secteur intermédiaire, de -40 à -50 m.

la taille moyenne des particules majoritaires et leur mode de sédimentation ou de transfert.

#### IV.2.1. LES ELEMENTS TRIBUTAIRES DES TRANSFERTS PAR DERIVE LITTORALE

Il s'agit essentiellement de la fraction sableuse grossière dont les minéraux sont, par ordre d'importance décroissante : calcite, quartz, feldspath, minéraux lourds. Cette fraction constitue bien souvent à elle seule la totalité des sédiments de la côte occidentale du golfe. Les proportions respectives des éléments particuliers détritiques ou bioclastiques sont mal connues ; il en est de même pour les teneurs des divers minéraux siliceux présents.

##### A. LES SABLES

Quatre classes granulométriques secondaires ont été distinguées selon les normes préconisées par le BRGM. En 1971, la distribution géographique de ces diverses classes était conditionnée par la nature même des sédiments : les fractions sableuses sont d'autant plus fines et isométriques que les proportions en lutites sont plus élevées.

##### a. Les Sablons (0.125-0.063mm)

Le peu de fraction "grossière" que renferment les vases terrigènes est constitué exclusivement par les sablons ; cette classe est ainsi présente dans toute l'aire centrale du golfe au dessous de l'isobathe 20.

Les fonds proches de l'actuelle embouchure, les zones à hydrodynamisme affaibli, les secteurs abrités, sont soulignés par une avancée des sablons vers le littoral. Ainsi, en 1971 dans le "Cul-de-Bizet", les sablons "remontent" jusqu'à -5m sur des fonds de sables vaseux ou de sables purs, pour dessiner une insertion en doigt de gant sur le platier de Peygoulier. Ils sont de même présents au voisinage de la courbe -5 dans l'abri de de Carteau et les fonds les plus septentrionaux du golfe. En 1964, cet éventail particulière précédait en l'annonçant la mise en place prochaine des sables plus grossiers de la Gracieuse.

On voit ainsi que la répartition des sablons ne s'identifie pas totalement à celle des faciès vaseux car leur mise en place procède de deux modalités bien distinctes : remaniements et apports directs.

Exclus des prismes littoraux à haute énergie, ce matériel remanié ne peut sédimenter qu'au dessous de profondeurs variant de -5 à -25m selon la turbulence locale.

Les apports directs résultent de la destruction d'agrégats à grandes surfaces portantes qui libèrent en mer, à plus ou moins grande distance des côtes, leurs constituants minéraux.

##### b. Les sables très fins (0.25-0.125mm)

Ils représentent presque exclusivement les dépôts actuels de la barre du Rhône et des prolongements sous-marins du they de Roustan.

On les retrouve, alliés parfois à moins de 5% de lutites, sur tout le platier arasé de l'ancien delta de Peygoulier. La finesse de ce matériel explique la morphologie et le mode de déplacement des particules observées par Van Straaten au niveau du Grau de Roustan. Cet auteur a montré que le prodelta est incisé par de nombreux chenaux dont le principal, axial, a une profondeur relative de 3.5m. Il semble que le creusement de ces chenaux soit dû, non pas à des courants de turbidité, mais à un phénomène de "liquéfaction" du sable par augmentation de la pression interne de l'eau qui le parcourt. Vers le large, les carottes de sédiments montrent des bandes successives de sables et de vases. Outre le transport de matériaux en suspension, il y aurait donc en mer un transfert de sables liquides sur le fond.

Ce mode de déplacement expliquerait bien la présence de tels sables dans les petits fonds de la pointe de la Gracieuse et leurs prolongements sablonneux septentrionaux, jusque dans la partie distale du golfe.

#### c. Les sables fins (0.50-0.25mm)

Ils caractérisent les portions émergées ou sub-aériennes des corps sédimentaires occidentaux ainsi que les hauts fonds de l'anse de Carteau. La granulométrie de ce matériel est très voisine de celle des sables du lit actuel du Rhône, en amont de la barre.

#### d. Les sables grossiers et moyens (2.0-0.50mm)

Alliés à de nombreux débris organogènes, à des graviers et des cailloutis, ils sont confinés dans deux aires réduites. La première se limitait, en 1964, aux chenaux qui érodaient les matras de Posidonies de la pointe St Gervais ; la seconde s'étend, en 1971 et 1975, de taches en taches sur les fonds littoraux de la Côte orientale rocheuse du golfe. (cf. §IV.1.2.C). Plus au large, les faciès du détritique côtier recèlent ces matériaux à des degrés divers.

Dépourvu de bioclastes, ce type de matériel représente la fraction grossière à l'origine de la disparition des vases terrigènes. On notera que les distributions particulières montrent la présence de toutes les classes distinguées ci-dessus, mais selon des fréquences respectives très variables.

En résumé, la similitude des sables fins ou très fins avec les matériaux de la barre ou du lit du Rhône est normale et traduit la communauté d'origine rhodanienne. Les seuls sédiments qui ne présentent aucune affinité avec ces dépôts naturels sont organogènes ou d'origine artificielle.

### B. CALCIMÉTRIE

Les proportions en carbonates totaux ont été déterminées au calcimètre Bernard dont la précision est médiocre. Les fluctuations observées dépassent les erreurs de mesures. Les teneurs en calcite restent comprises dans la gamme 20-30% pour les sables fins et très fins, alors que les sablons montrent des variations surprenantes qui franchissent souvent ces limites. Ces taux remontent à 45-60% dans les faciès du détritique

côtier à envasement variable et atteignent 80 à 90% pour les dépôts grossiers sablo-organogènes du littoral de la Nerthe.

D'autres fluctuations systématiques, plus discrètes, apparaissent à l'intérieur d'un même éventail granulométrique de divers types de sédiments, et sont liées à des causes mal définies. Ainsi, les sables fins littoraux montrent un enrichissement progressif en carbonates depuis le they de Roustan (25 à 28%) jusqu'à l'extrémité de la flèche de la Gracieuse (31 à 32%); interrompu par une chute brutale au niveau de l'ancien estuaire de Peygoulier (14 à 24%). L'intervention de bioclastes, plus sensibles aux vecteurs hydrodynamiques en raison de leur maître-couple plus élevé, expliquerait bien cette augmentation régulière, en l'absence de la diminution de l'embouchure. Enfin, des différences nettes s'observent le long des profils de certains prismes littoraux. Dans l'anse du Repos, les proportions en carbonates n'excèdent pas 25% de 0 à -5m, puis atteignent 28-32% au-dessous. La présence de très nombreuses paillettes de muscovite, alliées à de rares éclats de nacres malacologiques, semble responsable du phénomène.

### C. LES MINERAUX LOURDS

Particulièrement riches en Fer et en Magnésium, ces minéraux possèdent des densités supérieures à celles de la calcite et du quartz, ce qui leur confèrent des comportements hydrodynamiques différents. Ils se rencontrent à l'état dispersé dans les sables fins et très fins littoraux où leur proportion n'excède pas quelques centièmes. Toutefois, de petites concentrations locales peuvent apparaître après tempêtes. De tels placers miniatures se signalent par leur richesse en associations secondaires, chacune liée à une région bien déterminée du bassin versant rhodanien.

Ainsi, les minéraux originaires des Alpes (épidote verte, glaucophane) abondent et constituent parfois l'essentiel des stocks. D'autres, plus rares et caractéristiques des roches métamorphiques du Massif Central, sont parvenus au Rhône par l'intermédiaire des affluents rive droite (Gard, Ardèche). Enfin, un dernier lot d'éléments ubiquistes (micas, grenat, zircon) ne peut être rattaché à une source bien précise.

La grande flottabilité des micas entraîne leur concentration dans les hauts-fonds abrités de Carteau et du Repos, puis leur rejet à la côte. Ils sont alors repris par le vent et vont enrichir les portions sommitales des dunes littorales.

### IV.2.2. LES MATERIAUX DE LA SEDIMENTATION DIFFEREE ET DES TRANSFERTS EN SUSPENSION

La fraction pélitique des sédiments de type vaseux du golfe de Fos n'a pas donné lieu à des recherches granulométriques aussi poussées que celles conduites dans l'étang de Berre (cf. rapport Berre). Ce travail pourrait être éventuellement réalisé à partir d'échantillons 1971 et 1975 conservés par notre laboratoire.

Seule la minéralogie de cette fraction est assez bien connue.

### A. LES MINÉRAUX EN SUSPENSION

Dans une étude pluridisciplinaire des eaux superficielles au large de l'embouchure du Rhône, Chamley a montré qu'à des quantités notables de particules de calcite, de quartz et de feldspath inférieures à 50 microns, s'ajoutent une forte proportion de minéraux argileux typiques du bassin versant. Parmi ces derniers, l'illite et la chlorite, d'origine alpine, dominant largement ; très peu de smectite, divers interstratifiés irréguliers pédogénétiques et des traces de kaolinite complètent l'éventail.

L'abondance des espèces minérales varie selon la taille moyenne : la calcite, le quartz, les feldspath et, à un degré moindre, la chlorite sont relativement plus abondants dans le stock 30-50 microns, tandis que l'illite caractérise plutôt la fraction inférieure à 8 microns. Les smectites n'apparaissent que bien au delà.

En raison de la position géographique de stations en nombre limité, il n'a pas été possible de déceler des directions privilégiées dans le champ des dispersions. Seules les smectites, par leur comportement hydrodynamique particulier lié à leur taille statistiquement plus petite, permettent de cerner les lignes de force des écoulements superficiels. Par sédimentation différentielle, ces minéraux voient leurs proportions relatives augmenter dans les zones de moindre agitation des eaux.

### B. LA PHASE PRECOLLOIDALE DES SEDIMENTS LITTORAUX

Dans les petits fonds du golfe de Fos, les minéraux argileux de la fraction inférieure à 2 microns des sédiments décalcifiés montrent une évolution discrète.

A des profondeurs correspondant à des niveaux d'énergie comparables, les secteurs favorables à la décantation des fines se caractèrisent par un enrichissement en smectite, et à un degré moindre, en illite altérée de type "ouverte" dont les particules sont petites. Ces phénomènes apparaissent bien sur le diagramme A de la figure 42. La cristallinité des illites dégradées des anses de Carreau et du Repos est particulièrement mauvaise pour ce type de minéral : la largeur du pic, mesurée à mi-hauteur au-dessus du fond continu du diffractogramme, atteint là son maximum. En outre, le diagramme B montre que dans ce secteur abrité les concentrations en smectite augmentent nettement : le rapport des hauteurs des raies smectite/illite est alors le plus grand sans que les teneurs en illite diminuent.

Le long des profils des prismes littoraux, ces minéraux sont progressivement éliminés au fur et à mesure que la profondeur d'immersion diminue. Ce tri mécanique, modulé par le niveau moyen d'énergie, apparaît à l'évidence sur la figure 42B et A, le long de radiales qui recoupent du SW au NE le talus de la flèche de la Gracieuse.

Ainsi, une ségrégation semblable à celle qui affecte les arénites des zones côtières en chasse également les cristallites argileux les plus ténus.

### C. LA PHASE PRECOLLOIDALE DES LUTITES DU GOLFE

La carte de la figure 43 met en évidence la répartition géographique des valeurs du rapport smectite/illite de la fraction sédimentaire inférieure à 2 microns. Ces distributions présentent une certaine analogie avec celles des principaux faciès de la figure 40B.

#### 1. Les faits

En schématisant à l'extrême, on peut distinguer trois domaines majeurs.

Le premier ensemble groupe les valeurs les plus faibles (0.1-0.4) selon des auréoles qui épousent les contours côtiers du golfe. Cette zonation résulte de phénomènes déjà exposés dans le paragraphe précédent et n'appelle aucun commentaire.

Le second domaine, oriental et très éloigné de l'embouchure du Rhône, se caractérise par des valeurs supérieures à celles notées en 1971 sur le reste du plateau continental. Ces paramètres moyens (0.4-0.5) augmentent nettement en trois aires bien localisées. L'une, à teneur maximum (0.6-0.8) se situe dans l'axe du canal de Caronte et montre des enveloppes qui s'infléchissent vers le NE. Les deux autres s'étendent respectivement sur le parallèle de la pointe de la Gracieuse et au large de l'anse des Laurons.

Le dernier domaine, enfin, retrouve à nouveau des valeurs faibles (0.2-0.4) ; sa localisation, à l'entrée du chenal dragué, semble paradoxale au sein du domaine précédent riche en smectite.

#### 2. Interprétation

Diverses hypothèses génétiques permettent d'expliquer les répartitions observées.

a. Le domaine à fortes teneurs en smectite résulterait des influences rémanentes du flux solide traditionnel issu de l'étang de Berre depuis le creusement du canal de Caronte.

Antérieurement à la mise en service de la centrale de St Chamas, la smectite, livrée en abondance par le bassin versant de l'étang, constituait probablement le minéral cardinal de la charge particulaire transitant par Caronte.

Depuis sa mise en fonctionnement (mars 1966) le canal usinier E.D.F. amène une association à illite et chlorite qui masque les apports naturels. En 1971, cette influence sur les sédiments du golfe ne pouvait qu'être très faible. Seules les fortes perturbations sont perceptibles, tandis que les modifications naissantes de la phase précolloïdale demeurent indécélables.

L'abondance relative anormalement élevée des complexes gonflants dans les zones centrales et orientales du golfe de Fos doit nécessairement être attribuée à des suspensions riches en smectite issues de l'étang de Berre. Celles ci venaient ainsi se surimposer aux apports rhodaniens pour participer à la genèse des lutites locales. Cette conclusion est confortée par la position et les extensions latérales des aires à fortes teneurs qui coïncident remarquablement avec les déformations des nappes

de dilution des eaux turbides au débouché du canal de Caronte lors des principaux régimes hydrodynamiques (fig.23 à 26).

b. Le domaine central à faible teneur de l'entrée du chenal dragué correspond à l'évidence au secteur bouleversé récemment par les rejets de matériaux plus grossiers. Ces derniers, constitués d'éléments duranciens à illite et chlorite ou d'alluvions sableuses rhodaniennes, sont dans tous les cas caractérisés par un rapport Sm/I faible ou très faible. Dans cette zone, les perturbations anthropiques sont suffisamment prononcées pour modifier de façon appréciable la phase précolloïdale des dépôts locaux.

### 3. Conclusion

Les distributions des minéraux argileux observées en 1971 dans le golfe de Fos sont le reflet à la fois des modalités passées de la sédimentogenèse et des mécanismes actuels de mise en place des dépôts.

On peut supposer que, antérieurement aux travaux d'aménagement de la Durance et du golfe, des courbes d'isoteneurs ceinturaient l'aire riche en smectite de la passe de Bouc, et décrivaient une figure trilobée liée aux trois directions prédominantes d'extension de la nappe de dilution issue de Caronte.

On notera que ce mode de sédimentation est toujours actuel : l'illite se substituant de nos jours à la smectite de jadis. En raison du volume considérable de limons E.D.F. rejetés dans l'étang de Berre (500 000m<sup>3</sup>/an) cette substitution, 17 ans après son début, doit commencer à être perceptible dans la frange tout à fait supérieure des sédiments du golfe situés au débouché même du canal de Caronte.

### IV. 3. BILAN DES ACTIONS ANTHROPIQUES

Au terme de ce chapitre, et en faisant appel aux résultats exposés dans l'ensemble de ce rapport, on peut tenter d'établir un bilan de l'intervention humaine dans le déroulement des mécanismes naturels responsables de la sédimentogenèse du golfe de Fos.

Les observations échelonnées sur près de deux siècles et demi concordent et montrent bien la succession des phénomènes morphosédimentaires à l'origine de l'individualisation puis de l'évolution du golfe. Les séquences établies sont le reflet, toutes proportions gardées, de celles mises en évidence par les phases successives de progradation de l'ensemble du delta du Rhône au cours des six derniers millénaires.

Depuis l'abandon en 1711 du "Bras de Fer", consécutif à un premier aménagement "malheureux", l'homme n'a cessé d'intervenir dans le déroulement naturel de la tendance évolutive rhodanienne, en modifiant la position géographique des sources d'apports, puis en réduisant le volume de ces apports, enfin en bouleversant la nature et la minéralogie des sédiments du golfe.

a. Ainsi, à deux reprises, en 1850 et 1895, l'intervention humaine s'est opposée à la répartition des alluvions entre les divers graus, et à l'élaboration d'un lobe deltaïque de type digité progressant lentement

sur l'ensemble de son périmètre.

Nous avons décrit la rapidité et l'ampleur de la réponse des phénomènes morphogénétiques face à ce type de situation. La concentration du flux solide à un débouché unique se traduit chaque fois par l'apparition d'un lobe deltaïque de forme pointue. Ce mode d'évolution caractérise les états initiaux du Rhône de St Ferréol, d'Ulmét et de Peccaïs, ou plus récemment, du Vieux Rhône.

Au siècle dernier, les aménagements artificiels tendant à établir une seule passe furent chacun responsable de l'extension très rapide des embouchures successives selon un axe privilégié, d'abord NW-SE (lobe de Peygoulier) puis N-S (lobe de Roustan). Une telle progradation accélérée entraîne un état d'instabilité permanente des rivages et des fonds locaux par hypersédimentation.

Simultanément, la mise en dépôt de l'essentiel de la charge alluvionnaire sur une aire de sédimentation restreinte introduit par contrecoup un déséquilibre dans l'alimentation en matériaux "frais" des embouchures abandonnées ou devenues secondaires.

Coupés des sources d'apports, ces secteurs régressent rapidement, car l'absence de sédimentation permet aux phénomènes de l'érosion marine de devenir prépondérants. Ce mode de démantèlement caractérise les exutoires rendus non fonctionnels par les changements de cours liés à la sénilité du Rhône de St Ferréol, d'Ulmét, de Peccaïs, ou à l'accident de 1711 du Vieux Rhône. Nous avons montré comment les matériaux des anciens appareils deltaïques sont transportés par les dérives littorales et participent ultérieurement à l'élaboration de corps sédimentaires latéraux d'allure sigmoïde. Les flèches internes de la Pointe de l'Espiguette et les cordons emboîtés de la pointe de Beauduc résultent respectivement du remaniement et de la mobilisation des alluvions des lobes deltaïques de St Ferréol et du Vieux Rhône.

Depuis le début du siècle, la destruction constante du promontoire de Peygoulier apparaît ainsi comme le phénomène majeur, alors que la progression vers le NE de la flèche de la Gracieuse n'est qu'un épiphénomène. Ce mode d'évolution n'est qu'une réplique localisée, naturelle et inéluctable, des processus de morphogénèses millénaires du delta du Rhône. Comme ses homologues historiques plus occidentaux, la flèche de la Gracieuse n'est pas liée à des apports rhodaniens directs, mais résulte principalement du remaniement et de la mobilisation de matériaux abandonnés au siècle dernier. Ces dépôts subfossiles sont livrés de nos jours à la dérive littorale par l'érosion progressive des corps sédimentaires initiaux. Le lecteur appréciera tous les dangers qui résultent de cette situation déclanchée par l'intervention de l'homme.

b. Depuis le milieu du siècle, cette intervention humaine s'attaque aux apports alluvionnaires eux-mêmes. La mise en service progressive des grands aménagements hydroélectriques du cours du Rhône et de ses affluents, les travaux de reboisements et de défense des sols entrepris dans leurs bassins versants supérieurs, sont responsables d'une chute brutale de la charge solide transportée en suspension. Ce flux particulière n'était plus, en 1970, que le dixième de celui noté à la fin du siècle dernier, alors que le volume des éléments sableux déplacés par charriage pouvait être considéré comme négligeable.



Un tel déficit, trop important, entraîne un renouveau apparent de l'érosion marine que ne compensent plus les apports fluviaux. Un nouveau cycle négatif s'amorce ainsi selon un processus bien connu. La pointe orientale du they de Roustan régresse déjà ; ce déséquilibre s'étendra très probablement, au cours des prochaines décennies, à toute la partie méridionale du lobe deltaïque récemment édifié par le Grand Rhône. On notera qu'un phénomène comparable affecte, pour des raisons analogues, l'embouchure du Petit Rhône, où de récents ouvrages de protection "contiennent" difficilement une dangereuse érosion qui menaçait le village même des Saintes-Maries.

c. Enfin, depuis 1965, les fonds du golfe de Fos sont à leur tour atteints par l'action directe de l'homme. Le rejet des matériaux de dragage, véritable pollution sédimentaire, entraîne la disparition progressive des aires centrales de vases terrigènes côtières et de détritique côtier. Les ouvrages portuaires, en modifiant les circulations hydrodynamiques du golfe, sont responsables des variations de la nature des sédiments plus littoraux. En outre, des minéraux argileux allochtones, caractéristiques du bassin de la Durance, viennent s'ajouter au cortège traditionnel riche en smectite que l'étang de Berre rejetait dans le golfe de Fos.

De la lecture des chapitres précédents se dégage une constatation évidente : seuls les grands traits de la sédimentogenèse récente et les aspects dominants des perturbations anthropiques liées à l'aménagement portuaire apparaissent bien connus. Les résultats globaux de l'évolution morphologique des côtes sableuses occidentales sont mis en évidence grâce à des "photographies" qui en visualisent les étapes successives. Mais la dynamique des mécanismes intimes de mobilisation des particules placées dans le champ de force des vecteurs hydrodynamiques, les relations de causes à effets, restent à préciser. En outre, les contributions respectives des éléments rhodaniens ou issus de l'étang de Berre à la genèse de sédiments du golfe ne sont pas définies.

De telles lacunes s'expliquent par l'absence d'étude de la dynamique des masses d'eau par tempêtes ainsi que la charge solide susceptible d'être alors dispersée à partir des diverses sources possibles.

L'aspect statique de certains travaux résulte bien évidemment de leur ancienneté. Plus récentes, les recherches se limitent à "saisir" l'état des fonds, à préciser rapidement l'impact des aménagements, à définir le niveau de pollution du sédiment. Certaines abondent les problèmes à résoudre de façon ponctuelle, dans l'optique des organismes commanditaires : seuls les courants de marée sont définis sur modèle réduit à partir duquel l'obtention d'informations sur les courants de tempêtes aurait été possible. On notera que de telles informations ont peut être été établies par le LNH mais jamais publiées car mettant trop bien en évidence le bouleversement des circulations engendré par le projet d'aménagement portuaire !

Enfin, les techniques de prélèvement et d'analyse couramment employées il y a encore une dizaine d'années manquent à l'évidence de pouvoir de discrimination et ne répondent plus aux exigences actuelles de l'appré-

ciation des modalités "fines" de sédimentation. L'utilisation de méthodes pratiquement surannées dans l'étude des sédiments du golfe entraîne une distorsion des résultats. Les échantillons intègrent dans leurs 10 cm superficiels des matériaux d'origines différentes déposés au cours de périodes de temps non comparables. Les paramètres sédimentologiques ainsi déterminés, outre les erreurs systématiques inhérentes aux techniques mêmes, ne traduisent que les caractères globaux des dépôts. Les conclusions émises, très partielles, ne mettent en évidence que les tendances évolutives moyennes des fonds.

En résumé, les études passées sont parvenues à quantifier approximativement la résultante des nombreux phénomènes d'une sédimentation complexe. Les recherches futures devraient permettre d'en déterminer sans ambiguïté chacune des composantes.

CINQUIEME PARTIE

HYDROBIOLOGIE, QUALITE DES EAUX ET BIOLOGIE PELAGIQUE

## V.1 - Introduction - Généralités

Le Golfe de Fos, aire néritique de 40100ha largement ouverte sur le bassin méditerranéen nord-occidental, est bordé à l'Ouest et au Nord de côtes basses et sablonneuses, à l'Est, des côtes rocheuses et plus élevées (chaîne de la Nerthe). L'occupation du rivage n'est pas homogène et 4 zones peuvent être distinguées :

1. à l'ouest, le They de la Gracieuse est une flèche sableuse s'enfonçant profondément dans le golfe avec un système sédimentaire soumis aux aléas de l'hydrodynamisme.

2. au nord-ouest s'étend une zone portuaire récemment aménagée, en bassins (darses) et de grandes dimensions. Son développement se poursuit avec le creusement d'une 3ième darse.

3. au nord-est, se situent une série d'agglomérations urbaines fortement industrialisées (Fos, Port de Bouc...).

4. à l'est, les côtes de la Nerthe abritent d'importants complexes industriels, plus localisés (BP., Naphtachimie, E.D.F.).

Une ligne imaginaire reliant la pointe orientale du They et le débouché du canal de Caronte (Port de Bouc) permettrait de séparer un arrière golfe aux faibles profondeurs (0 à 5m) d'une partie largement ouverte sur la mer, et dont la profondeur croît régulièrement de 15 à 75 mètres.

Les proximités décrites ci-dessus amènent naturellement à un découpage du golfe en portions centrées sur les influences majeures qui s'y exercent (figure 46).

. ZONE MARINE (1) : l'influence néritique, principalement représentée par une composante littorale de la dérive liguro-provençale lorsque cette dernière est présente (temps calme ou régime d'est) s'oppose en permanence à l'influence rhodanienne (embouchure du Grand Rhône, située au sud-ouest du golfe). La prédominance de l'un ou l'autre de ces caractères est directement liée à la météorologie locale (régime des vents) et aux débits des eaux continentales (cycle saisonnier).

ANSE DE CARTEAU (2) : aire semi-fermée, intéressée par les eaux du canal de Port Saint Louis du Rhône et les résurgences du They de la Gracieuse (nappe phréatique du Rhône).

SECTEUR DES DARSEES (3) : aire portuaire aux bassins de grandes dimensions. La darse 1 est directement soumise à une influence continentale puisque le canal d'Arles à Fos débouche à son extrémité nord. Signalons que les chenaux d'accès et de manoeuvre font l'objet de dragages permanents.

ARRIERE-GOLFE (4) : aire peu profonde où s'effectue le rejet des matériaux de dragage.

SECTEUR DE CARONTE (5) : zone côtière concernée en permanence par les eaux de sortie de l'Etang de Berre, via le canal de Caronte.

En plus de ces influences naturelles, s'ajoute la pression des établissements industriels des zones d'activité de Port Saint Louis du Rhône, de Fos sur Mer, de Port de Bouc et de Lavera.

#### V.1.1 - Evolution

Cet ensemble éco-géographique n'a pas toujours présenté la disposition qu'on lui connaît aujourd'hui. Les années 60 ont vu le golfe subir de vastes modifications structurelles, tant directes (transformation d'un grand ensemble marécageux en un site industrialo-portuaire très important) qu'indirectes (mises en eau du canal de dérivation de la Durance à St Chamas, induisant un changement radical de la nature de l'influence qu'exerçait l'étang de Berre sur le Golfe de Fos). Ces modifications ont probablement entraîné d'importants changements dans l'écosystème pélagique du golfe. Toutefois, l'absence totale d'étude du milieu néritique antérieure à ces travaux réduit, pour le domaine pélagique, l'estimation de l'état initial du site à de pures supputations. Le domaine benthique a, lui, fait l'objet d'études antérieures, pouvant servir de référence, tandis que le "point zéro" écologique retenu par les autorités pour le pélagos (études réalisées en 1969) correspond à un milieu soumis depuis peu à perturbation (étude d'impact) et non à un milieu promis à perturbation (étude de préimpact).

Depuis lors, cette zone considérée comme un golfe dessalé, pollué, eutrophe, et même dystrophe a fait l'objet d'études cherchant à montrer l'intensité de ces phénomènes. C'est ainsi que l'approche de l'écologie du golfe s'est traduite par une série de travaux mettant l'accent sur la répartition et la cartographie des descripteurs majeurs de ce déséquilibre. Cette réalité fut à la fois induite et renforcée par le caractère finalisé de la plupart de ces travaux. Cependant, si cet aspect du problème fut privilégié, il n'a pas été le seul abordé, et quelques études ont tenté

d'appréhender la variabilité des descripteurs de l'écosystème. D'une manière générale, le golfe de Fos a retenu l'attention des aménageurs comme des scientifiques en raison du déséquilibre que faisait subir la pression industrielle (intense pollution), comme de la dystrophie induite par ce déséquilibre. (eutrophie des eaux).

En effet, la multiplicité et la diversité des influences (rejets) qui s'affrontent sur ce secteur néritique, comme l'intensité et la variabilité des phénomènes climatologiques qui s'y exercent, induisent dans cette zone une très forte variabilité, tant spatiale que temporelle.

Ainsi le golfe de Fos peut être présenté comme un système doté d'importantes entrées, considérées comme autant de sources de variation dont les caractéristiques et les effets dépendent très fortement de facteurs externes au système que l'on qualifiera de variables de contrôle et de régulation. C'est à travers cette vision, résolument conceptuelle que seront envisagées les différentes études réalisées dans le golfe de Fos.

#### Objectifs du présent travail

Dans une première partie, on tentera de recenser les types d'études et les stratégies développées en réponse à cette situation (quelle variabilité pour quelle eutrophie ou dystrophie ?). Ceci amènera, pour chacune des zones décrites ci-dessus, à préciser les résultats fournis par ces travaux un bilan des connaissances, comme des ignorances pourra alors être établi toujours éclairé par les aspects inséparables du déséquilibre et de la variabilité.

## V.2 - TYPES D'ETUDES ET STRATEGIES

A partir d'une compilation d'un ensemble de travaux (que l'on pense exhaustif et dont on trouvera la liste en annexe, un tableau a pu être dressé sous forme d'un questionnaire dont les modalités se rapportent aux types d'études et aux stratégies. On s'est d'abord intéressé à l'accessibilité (large, restreinte) des documents. La situation des prélèvements dans l'espace est ensuite décrite au moyen de 9 modalités : les 5 premières concernent les portions géographiques définies dans la présentation du golfe de Fos, et les 4 suivantes se rapportent aux niveaux de la colonne d'eau prospectés. Les descripteurs étudiés ont été regroupés en 10 ensembles de paramètres : hydrobiologie et qualité des eaux : température-salinité oxygène et pH , nature et quantité de matière particulaire en suspension , éléments nutritifs , pollution bactérienne ; biologie des organismes : biomasse et spectre spécifique de l'échelon primaire et de l'échelon secondaire , ichtyoplancton . Les stratégies adoptées par les différents auteurs ont été réparties en 5 classes : réseau (études visant une compréhension des phénomènes spatiaux), point fixe (suivi de paramètres à courte échelle temporelle), dérive (suivi temporel), approche globale (toute tentative visant à prendre en compte le système dans sa globalité : télédétection, cartographie automatique, etc...). et prélèvements effectués depuis un point terrestre. Ensuite, la répétition des missions a été classée en 5 modalités : réexploration d'un ensemble de stations à une échelle de temps supposée inférieure au rythme de variation du phénomène, répétition journalière, mensuelle, trimestrielle et épisodique (sans rythmicité). Enfin, la saison de travail a été notée (printemps, été, automne et hiver) Tableau 1.

Dans un souci de synthèse, ce tableau (21 études, analysées par 35 modalités) a été soumis à une analyse des correspondances. Il en ressort les faits suivants :



- 1\* Accessibilité
- 2\* Zones géographiques
- 3\* Couches
- 4\* Paramètres hydrologiques
- 5\* Echelon primaire
- 6\* Echelon secondaire
- 7\* Stratégies de prélèvements
- 8\* Répétition
- 9\* Saison

		Etudes		1*	2*				3*	4*	5*	6*		7*				8*				9*																										
		Large	Restreinte	Mer	Carteau	Darses	Arrière-Golfe	CARONTE	Ultra-Superficielle	Surface	Intermédiaire	Fond	T/S	Chimie	Seston	Charge nutritive	Bromane	Spectre spécifique	Bromane	Spectre spécifique	Ichtyo	Bacterio	Réseaux	Point fixe	Dérive	Globale	Terrestre	Réexportation	Journalière	Mensuelle	Trimestrielle	Episodique	Printemps	Eté	Automne	Hiver												
AUBERT	1968	1	x		x	x	x	x		x											x		x		y		x						x	x														
CEA	1972	4		x	x	x	x	x	x		x																								x													
EDF	1975	5		x	x	x	x	x	x		x	x	x																							x												
ISTPM	1972	6		x	x	x	x	x	x		x	x																								x												
BLANC-LEVEAU	1973	7	x		x			x		x			x	x	x	x	x	x																		x	x	x										
RNO-CNEXO	1974	8		x	x			x		x	x	x	x	x	x		x																			x	x	x	x									
BENON et al	1977	9	x		x	x		x	x	x		x	x	x	x		x	x																			x	x	x	x								
RNO-CERBOM	1975-77	10		x		x	x	x		x			x	x	x		x																					x	x	x	x							
EDF	1976	11	x					x		x	x	x		x	x		x	x																				x	x	x	x							
ORTOLAN	1976	12		x	x			x		x	x	x		x																									x		x	x						
SEERA	1976	13		x	x			x		x	x	x		x																										x	x	x	x					
BLANC-LEVEAU	1977	14		x	x			x	x		x	x	x	x			x	x																							x	x	x	x				
RNO	1978	15		x	x			x	x		x	x	x	x			x	x																							x	x	x	x				
ISTPM	1978	16		x		x	x	x		x	x		x	x																												x	x					
RNO	1979	17		x	x			x	x		x	x	x	x			x	x																								x	x	x	x			
RNO-PHYTO	1978	18		x	x			x		x							x																										x	x	x	x		
RNO-PHYTO	1982	27		x	x			x		x							x																											x	x	x	x	
ARNOUX	1979	19		x	x	x		x	x		x	x	x																															x	x	x	x	
RIOM	1980	20		x				x					x	x																														x		x	x	
EDF	1981 ProdI	21		x				x		x	x		x	x			x	x																										x	x	x	x	
EDF	1981 Phyto	22		x				x		x	x		x	x			x	x																										x	x	x	x	
EDF	1981 Zoo	23		x				x		x	x		x	x			x	x																										x	x	x	x	
KIM	1981	25		x				x		x	x	x		x	x		x																											x	x	x	x	
GDF	1982	26		x				x	x	x		x	x	x			x																												x	x	x	x

TABLEAU 1 : Recensement des types d'études et des stratégies développées sur le Golfe de Fos (1968-1982).

. une seule étude de type "global" a été réalisée (C.E.A., 1972). En raison de la technique employée (télédétection) elle concerne la couche ultra-superficielle ; aucun autre travail ne s'intéresse spécifiquement au problème de l'interface océan-atmosphère.

. d'une manière générale, les stratégies employées comme les différents types d'études sont peu homogènes. Ceci reflète l'absence de ligne scientifique cohérente dans l'étude du golfe, remplacée par une (nécessaire ?) politique de travail plus épisodique et localisée, en liaison avec le caractère finalisé des interrogations.

. la stratégie de type journalier n'a jamais été appliquée. Au contraire, l'accent a été mis sur des études prenant en compte les phénomènes à grande échelle, tant spatiale (BLANC-LEVEAU, 1973), (BENON et al, 1977). (ISTPM, 1972, 1978), (ARNOUX, 1979) que temporelle (RNO, 1977-1979). L'étude de la variabilité fine tant spatiale que temporelle a été peu ou pas abordée (CORTOLAN, 1976) (Etudes sur le site de Ponteau).

. les travaux ont, dans leur grande majorité, intéressé la seule couche de surface, plus rarement les couches situées à proximité du fond, et pratiquement jamais la colonne d'eau dans son ensemble (absence de profils verticaux).

. les paramètres les plus étudiés sont, sans contexte, la température et la salinité et les paramètres de qualité des eaux au sens large. Plus lourdes à mettre en oeuvre, les études portant sur la biologie des organismes pélagiques sont plus épisodiques. Ainsi, l'ichtyoplancton n'a-t-il fait l'objet que d'une seule étude, limitée au secteur des darses (G.D.F., 1982).

. toujours en liaison avec le caractère ponctuel et localisé de la plupart des études, le choix des paramètres abordés a rarement été fait dans un esprit systématique ou intégré, ce qui, sans préjuger des résultats acquis pour chaque groupe de descripteurs permet de supposer que le bilan sur les interrelations sera difficile à dresser.

. de même la comparaison des différents résultats est rendue délicate par la relative diversité des méthodes de mesure (la mesure de la salinité est ainsi abordée tantôt par conductimétrie, par chlorimétrie, ou au moyen d'une sonde), par l'évolution de la précision de ces mesures (RNO, 1974-1979) et par la diversité des conditions météorologiques (rarement précisées) prévalant lors de l'échantillonnage. La prise en compte de ce dernier facteur semble essentielle, et fait, depuis peu, l'objet d'une systématisation

En ce qui concerne maintenant la répartition dans l'espace et dans le temps des prélèvements réalisés entre 1968 et 1982 dans le golfe, on remarquera (figures 47 et 48).

. l'intensité (fréquence et densité) des travaux effectués entre 1972 et 1975.

. l'importance prise progressivement par les études de type RNO.

. la focalisation épisodique de l'intérêt sur certaines zones sensibles (Caronte, Ponteau, darses).

. le caractère inférentiel de certaines études qui négligent la variabili-

té fine (absence d'étude de l'hétérogénéité spatiale et microrépartition).

. la sur-représentation relative des travaux portant sur certains secteurs (Caronte, zone marine), au gré des besoins des aménageurs.

### V.3 -BILAN DES CONNAISSANCES, BILAN DES IGNORANCES

Chacune des 5 zones géographiques étant considérée individuellement, les entrées (localisation, nature et caractéristiques du rejet) et les communications inter-zone sont décrites afin de replacer les résultats des différentes études dans le cadre des systèmes concernés par ces flux. La compilation des travaux recensés dans la partie précédente amène à un bilan des connaissances acquises et des ignorances.

#### V.3.1. Anse de Carteau

Zone semi-fermée et abritée, l'anse de Carteau reçoit directement des eaux issues du Rhône par quelques roubines débouchant au pied du They de la Gracieuse ; indirectement des résurgences sous marines de la nappe phréatique intéressent le sud de la zone. Les différents débits ne sont pas connus, étant donné le caractère épisodique et limité de ces effluences. A la limite de cette zone, le canal de Port Saint Louis (fermé par une écluse) n'est pas considéré comme une influence directe. On peut, de plus signaler que par forte tempête de secteur sud à sud-est, la mer déferle par dessus le cordon dunaire du They. Les effets des marées, notables en raison de la bathymétrie et de la topographie locale ne sont également pas à négliger. Les fonds sont constitués d'un sédiment sablo-vaseux, on

ignore cependant dans quelle mesure l'anse de Carteau peut être considéré comme une zone de décantation.

Ce secteur n'a pas connu de transformation physique importante au cours des dernières années ; par contre, la réinstallation de structures conchylicole s'avère être un paramètre important pour l'équilibre écologique de la zone. Zone réceptrice, l'anse de Carteau, en communication avec l'arrière golfe est particulièrement concernée par les eaux issues des darses, par régime de vent de secteur nord-nord-ouest. Calme, peu profond, bien abrité (fetch réduit pour tous les secteurs) et dessalé en permanence ( $\approx 30\text{‰}$ ) sur toute la colonne d'eau, ce site conchylicole est particulièrement riche et productif. Des sursaturations en oxygène dissous et des pH parfois élevés ont été observés (G.D.F., 1982) au cours de la journée en relation avec cette richesse algale, permise par l'importante charge nutritive présente. Les études concernant le phytoplancton (BENON et al, 1971), G.D.F., 1982) rapportent l'abondance de l'échelon primaire et en particulier des espèces d'eau saumâtre. Les plus forts effectifs (de l'ordre de  $10 \cdot 10^6$  cell/l) sont toutefois observés pendant la période printanière (mars à juin) et secondairement en automne. Les périodes de développement du zooplancton sont moins bien individualisées surtout en profondeur. Les effectifs sont cependant élevés, bien qu'une certaine concurrence trophique avec les bivalves filtreurs ne soit pas à exclure.

Des travaux portant sur la qualité bactériologique des eaux, il ressort que le secteur de Carteau est relativement moins pollué que le canal de Port Saint Louis, principale source de ce type de pollution dans l'ouest du golfe. Ces conclusions sont cependant tirées d'observations ponctuelles et limitées (I.S.T.P.M., 1972, 1978). Il est difficile de comparer les résultats obtenus à 6 années d'intervalle, du fait d'une part, des différences

de conditions hydrologiques au cours desquelles se sont déroulées les missions (saisons différentes) et de l'absence d'échantillonnage de la principale source (canal) lors de la mission de 1978 d'autre part. Ceci illustre la limite d'étude de ce type avec une couverture du site trop espacée dans le temps, alors que ce milieu calme est propice à un suivi annuel en raison du caractère intense et saisonnier des phénomènes biologiques que l'on y observe.

L'absence d'information porte essentiellement sur les facteurs perturbateurs eux-même plus que sur leurs effets. C'est ainsi que l'on ignore le rôle réel des résurgences (dont on ne suppose l'existence qu'à travers leurs conséquences écologiques au niveau du benthos), la qualité et la fréquence des apports de Port Saint Louis ou la réalité et l'intensité des apports d'eau du Rhône par le grau. En outre, il reste à définir si l'influence perturbatrice majeure est le canal lui-même ou plutôt la résultante d'influences plus complexes (eau du canal se mélangeant d'abord à une eau issue des darses ou de l'arrière golfe).

La récente réinstallation des structures conchylicoles n'a pas permis de prendre en compte leur impact sur la qualité du milieu avec en particulier la production de matériel organique, la consommation d'oxygène et la concurrence trophique avec le zooplancton.

### V.3.2. Secteur des darses

La particularité la plus manifeste de cette zone portuaire est la proximité de 2 systèmes différents, pourtant soumis à des influences nériti-

ques comparables. On distingue ainsi la darse 2 semi-fermée, calme, peu renouvelée, sans rejet notable de la darse 1 qui reçoit à son extrémité nord des eaux d'origine fluviale (Rhône) par l'intermédiaire du canal d'Arles. Ce dernier constitue le principal flux intéressant le secteur, auquel s'ajoutent les rejets de la zone industrielle de Fos (Solmer, Ugine-Acier et I.C.I., principalement) et quelques roubines drainant des eaux de ruissellement. Du fait de la localisation de son débouché, le canal Saint Louis intéressera cette zone comme celle de Carreau. La principale effluence (canal d'Arles) n'a pas une activité régulière : une écluse anti-sel régule en effet son débit (0 à 40m<sup>3</sup>/s) selon les hauteurs relatives des eaux continentales et des eaux de la darse. Ce sont donc des eaux issues directement du Rhône (donc avec une forte charge particulière et nutritive) qui vont influencer en semi-permanence le secteur des darses. Les activités industrielles (état des rejets estimés en 1981 - SPPPI, 1982) = débit  $\approx$  30 000m<sup>3</sup>/s ; matériel en suspension total  $\approx$  230kg/j ; DCO  $\approx$  1500kg/j) comme les activités portuaires (trafic portuaire, dragages, chargement en vrac des minéraux difficilement quantifiables perturbent également le milieu et constituent de notables apports d'énergie dans le système. L'effet des marées est également sensible (30 à 90cm) dans tout le secteur.

En raison de l'orientation générale des darses, le fetch du Mistral entraîne une agitation importante, avec parfois des creux importants ( $\approx$ 1m) dans les darses.

Ce site a connu et connaît encore d'intenses transformations, création de bassins portuaires de grand volume, aménagement des quais, creusement et entretien de profonds chenaux d'accès et de manoeuvre (9 à 24m), implantation des établissements industriels, augmentation et diversification des activités portuaires, transformation des rejets (mise au gabarit européen du canal d'Arles entraînant donc un trafic plus élevé, mise en fonction-

nement de l'usine de regazéification du gaz liquide de G.D.F. amenant l'effluence d'eau froide -  $\approx 2\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta T \approx 6^\circ\text{C}$  - au nord de la darse 1. Les fonds, de nature sablo-vaseuse, sont fréquemment remaniés et perturbés (activités de dragage, manoeuvres de bateaux de fort tonnage).

Les échanges hydrologiques avec l'anse de Carteau et l'arrière golfe, sont dépendants du régime de vent, les darses étant dans l'axe des vents dominants. Ainsi, dans la darse 1, la circulation de surface induite par le canal d'Arles peut-elle être accentuée par le Mistral, tandis qu'un vent de secteur sud peut l'annuler, voire la renverser. La darse 2, est, elle, l'objet de phénomène de "vidange" ou de "remplissage" selon le régime de vent prévalant. Le chenal d'accès aux darses, dragué à -24m constitue un élément majeur de la circulation des eaux purement marines.

Ce secteur si particulier n'est pas homogène et présente de violents contrastes : la darse 2, zone réceptrice, s'oppose à la darse 1, bassin d'émission et de transit en situation d'ouverture de l'écluse anti-sel, tandis que les 2 entités retrouvent un caractère portuaire commun lorsque le flux continental est nul. Dans ce cas de figure, les extrémités nord des darses sont moins stables, présentent une circulation réduite et des caractères hydrologiques particuliers (possibilités d'écarts thermiques avec le milieu extérieur, les eaux se réchauffant ou se refroidissant plus vite). Ce milieu, particulièrement riche, bien oxygéné en surface, présentant une forte charge particulière (d'origine à la fois continentale, marine et atmosphérique) et une forte turbidité peut être considérée comme une zone d'accumulation (C.E.A., 1972). La charge nutritive est importante même si les aspects sont intermittents (en particulier dans la darse 2) et permet le développement modéré d'un phytoplancton ( $1 \text{ à } 2 \cdot 10^6$  cell/l), dominé par des espèces d'eau saumâtre (BENON et al, 1977) ; (G.D.F., 1982). Le zooplancton, par contre, présente en permanence des effectifs importants, parfois très importants ( $20\ 000$  ind/ $\text{m}^3$ ), représentés par un nombre limité d'espèces néritiques tolérantes. Ces populations se développent beaucoup



plus nettement dans les couches profondes, plus marines, et moins concernées par les fluctuations des facteurs de perturbation. L'ichtyoplancton a seulement été étudié dans ce secteur (G.D.F., 1982). Un gradient croissant nord-sud/darse-mer a été mis en évidence. La seule étude concernant la qualité bactérienne des eaux (I.S.T.P.M., 1972) montre que ce critère est directement lié au niveau de pollution du Rhône ; les valeurs sont faibles dans l'ensemble.

Dans ces conditions d'estuaire, la darse se transforme en zone émettrice et de transit, l'arrivée d'eau du Rhône induisant l'établissement ou le renforcement d'une stratification verticale. Les échanges entre une couche superficielle très nettement enrichie par le flux et une couche marine sous jacente peuvent alors être très limités. La couche de surface présente également de très forts effectifs d'un phytoplancton allochtone, tandis que le zooplancton prédominant toujours dans les couches plus profondes semble profiter directement de cet apport trophique. Au sein de ce zooplancton la fraction méroplanctonique occupe une place importante.

Une seule étude d'envergure a concerné ce site (G.D.F., 1982) permettant de préciser les cycles biologiques saisonniers, et amenant une connaissance globale des différents états hydrologiques en liaison avec les caractéristiques locales. Cependant, dans un milieu aussi variable et évolutif que la darse 1, le problème est de définir et de comprendre les relations fines interdescripteurs en fonction de l'affrontement des diverses sources de variation. Ainsi, la stratification verticale est connue, mais on cerne mal l'évolution spatio-temporelle de l'épaisseur de la couche diluée et l'importance des phénomènes turbulents à son interface avec les eaux marines sous jacentes. Dans cet ordre d'idée on sait mal quels échanges sont permis par cette stratification. Les différents états présentés par le système sont assez bien décrits, mais l'effet des variations hydrodynamiques (strati-

fication , gradient de densité, ondes internes) sur le fonctionnement des différentes parties du système sont peu connus. L'exemple de l'échelon secondaire illustre une certaine robustesse structurelle face aux fluctuations irrégulières des facteurs de régulation. Du point de vue de la stratégie d'échantillonnage, le secteur des darses pose le problème de la significativité de mesures ponctuelles ou même de réseaux réalisés dans un milieu très variable et de la comparaison de points échantillonnés sur un flux irrégulier.

### 3. Arrière golfe

Largement ouvert sur le golfe de Fos au sens large, ce secteur sépare deux grands ensembles d'activité. Il existe peu de rejets directs, les effluents urbains (en particulier ceux de Fos-sur-Mer) étant rejetés dans le canal de Fos à Port de Bouc après traitement. Seule la ville de Port de Bouc rejetait ses eaux usées dans un milieu sans épuration (I.S.T.P.M., 1978) ; depuis 1978, les effluents sont traités. A ceci, s'ajoutent les rejets de quelques usines (SPPPI, 1977) telles Lafarge, Voisin et Pascal ou PCVK (débits  $\approx 10\ 000\text{m}^3/\text{j}$  ; matériel en suspension  $\approx 500\ \text{kg}/\text{j}$  ; DCO  $\approx 1500\text{kg}/\text{j}$ ). Les modalités de ces rejets ne sont pas connues avec précision on peut noter qu'un effort important a été réalisé visant l'épuration de ces effluents ( $\approx 90\%$  de réduction entre 1972 et 1979 (SPPPI, 1982).

Cette zone a connu peu de transformation majeure mais sert depuis le début des travaux d'aménagement de l'ensemble portuaro-industriels de site de dépôt du matériel dragué (sédiment non consolidé).

Sensible aux différents régimes de vent, l'arrière golfe se comporte à l'instar de l'ensemble de ce secteur néritique. C'est ainsi que par vent de sud et d'est, la mer et le panache issu du canal de Caronte y pénètrent largement tandis que le Mistral chasse les eaux superficielles vers le sud.

Zone réceptrice beaucoup plus ouverte que l'anse de Carteau, l'arrière

golfe est parfois considéré comme particulièrement déséquilibré (BENON et al, 1977). La dessalure observée sur ce site étant principalement d'origine carontienne et dépendante des conditions de vent, cette caractéristique est considérée par certains auteurs comme fondamentale (en se basant sur des mesures isolées dans le temps) alors qu'elle n'est sans doute qu'épisodique. La qualité chimique des eaux, fortement altérée par les rejets non épurés dans les années 70 s'est semble-t-il améliorée (ARNOUX, 1979), sans doute en liaison avec l'effort d'épuration, comme semble le montrer l'évolution d'un paramètre comme la DCO. La richesse des populations planctoniques est totalement fonction de celle des eaux du golfe (et donc des communautés présentes dans les eaux issues de Caronte) Ce secteur ne paraît pas présenter d'originalité particulière. Les études portant sur la qualité bactériologique des eaux (I.S.T.P.M., 1972, 1978), (ARNOUX, 1979) montrent enfin que l'arrière golfe était parmi les zones les plus polluées, et qu'une sensible amélioration a été notée en 1978. Cependant, aucun travail à caractère systématique n'a été entrepris depuis lors.

D'une manière générale, les connaissances acquises sur ce secteur posent le problème des mesures ponctuelles, effectuées dans un milieu très instable. Le seul suivi (point 1 du RNO) a été interrompu au bout d'un an et demi et correspondait de plus à une période où la fiabilité des mesures n'était sans doute pas pleinement satisfaisante. De plus, la connaissance de l'état du système (telle qu'elle a été appréhendée par les différents travaux) ayant été assurée sans réelle prise en compte de l'importance des facteurs extérieurs de contrôle, on en peut inférer la situation écologique à partir des seuls acquis actuels, correspondant à des "flash" spatio-temporels .

#### 4. Aire d'influence carontienne

Ce secteur est moins une zone géographiquement définie que l'aire d'influence du rejet le plus important pour l'écologie du golfe de Fos Les eaux de l'étang de Berre et très secondairement les eaux du canal de Port de Bouc pénètrent dans le golfe de Fos par l'intermédiaire du canal de Caronte. Les établissements industriels du littoral de la Nerthe contribuent par leurs rejets (ou les transformations qu'ils font subir à des eaux de

pompage au déséquilibre du système. Le complexe de Lavera (raffinerie et pétrochimie) rejete des eaux usées (débit  $\simeq$  25 000m<sup>3</sup>/j ; matériel en suspension  $\simeq$  4 à 5000kg/j ; DCO  $\simeq$  7 à 8000kg/j) et des eaux de réfrigération (9m<sup>3</sup>/s, avec un  $\Delta T$  de     ), tandis que l'usine E.D.F. de Ponteau émet principalement des eaux de refroidissement (4 phases de 9m<sup>3</sup>/s chacune, avec un  $\Delta T$  maximum de 7.5°C). D'autres émissaires drainent les eaux usées d'établissements plus limités, et des agglomérations environnantes. On peut cependant noter que la charge polluante globale, a, comme dans le reste du golfe, diminué de près de 90% entre 1973 et 1979 (SPPPI, 1982).

Cette région a été concernée en 1966 par une transformation majeure la mise en service de l'usine E.D.F. de St Chamas et la dérivation d'une partie des eaux de la Durance dans l'étang de Berre. Les échanges par le canal de Caronte sont alors passés à  $1.64.10^9$  m<sup>3</sup>/an (mer  $\rightarrow$  étang) et  $4.33.10^9$  m<sup>3</sup>/an (étang  $\rightarrow$  mer) : le volume d'eau entrant dans l'étang a ainsi presque doublé, tandis que celui sortant a, lui, quadruplé. Le flux dessalé pénètre dans le golfe de Fos en surface, tandis que le flux marin inverse occupe les couches profondes. Les épaisseurs respectives sont bien sur fonction des débits turbinés à St Chamas (et secondairement des débits des petites rivières débouchant dans l'étang), mais également des marées et des régimes de vent, entraînant des différences de niveau entre les 2 bassins. Il faut cependant remarquer que la plus faible profondeur de l'étang de Berre le rend plus sensible à l'effet du vent sur cette différence de niveau. Ainsi, le Mistral amplifie le phénomène de sortie des eaux de Berre, le vent d'Est semble plutôt contrarier la circulation de base et les vents de sud et d'ouest ont pour effet de limiter cette circulation (E.D.F., 1975), (PIREN, 1981).

Les débits (irréguliers) turbinés à St Chamas, les marées et les conditions météorologiques (vents, marées barométriques) sont autant de facteurs de contrôle dont les variations respectives comme les interactions se conjuguent pour déterminer l'extension et la position de l'aire d'influence des eaux carontiennes par rapport à la zone marine ou à l'arrière golfe. De par la rapidité de variation des facteurs de contrôle, quelques heures suffisent pour modifier radicalement l'extension et la position de cette aire d'influence (METEO, 1976).

Elément principal de déséquilibre dans le golfe, le flux carontien induit une notable dessalure en surface qui paraît cependant limitée à 2 à 3 mètres à la sortie immédiate du canal de Caronte (KIM, 1981). Différents résultats ont été proposés par les différentes études (BLANC-LEVEAU, 1973) , (BENON et al, 1977), dans la mesure où la nappe carontienne exprimée par le maximum de dessalure, a été observée aussi bien dans l'arrière golfe, en direction du They de la Gracieuse, ou parallèle à la côte de la Nerthe. Ces travaux concernent cependant presque exclusivement la couche de surface ou celle proche du fond : les auteurs ont semble-t-il, été peu intéressés par la description des phénomènes de mélange.

On peut également noter que le flux carontien induit un certain effet thermique sur la couche superficielle, en raison des différences de température entre un étang de Berre au faible volant thermique et le golfe de Fos.

La chimie des eaux ne semble pas présenter de notables particularités (BENON et al, 1977), (ARNOUX, 1979), sauf parfois une suroxygénation attribuable aux effets des importantes populations phytoplanctoniques issues de Berre (KIM, 1981). En outre, aucun problème lié à la DCO n'a été relevé, malgré l'importance de la matière organique contenue dans le rejet du complexe de Naphtachimie, fort demandeur. Il est vrai qu'aucune étude n'a concerné le rejet lui-même, ni sa zone d'influence, qui semble cependant être assez limitée (C.E.A., 1972).

La création du bassin de délimonage à Cadarache (SPPPI, 1979) a divisé par 3 l'importance de la charge particulaire apportée par les eaux du canal de dérivation de la Durance dans l'étang de Berre. Celui-ci ayant un rôle de décanteur (principalement dans sa partie nord), les apports particuliers du golfe de Fos ont sans doute subi une nette diminution. D'une manière générale, le canal de Caronte apporte une série de composés qui se retrouvent en surface, dans l'aire d'influence des eaux carontiennes ; la distribution des paramètres à partir du point de rejet sera donc fonction de ses qualités (température pour la mixibilité des eaux), des facteurs qui influencent ces caractères (débit de la Durance, cycle saisonnier), des variables de contrôle et des particularités

propres à chacun des paramètres (caractères peu ou pas conservatifs).

Conformément à ce que les fortes concentrations en éléments nutritifs dans l'étang de Berre pourraient laisser supposer, ces composés présentent d'assez fortes teneurs dans les eaux du golfe ( $P-PO = 1 \mu\text{atg/l}$ ,  $N-NO_3 \approx 5 \mu\text{atg/l}$ ) ce qui autoriseraient un développement marqué de phytoplancton. La dessalure semble cependant contrarier ces potentialités en offrant un milieu à la fois trop salé pour les populations de Berre et trop dessalé pour celles de Fos. Néanmoins, les eaux du golfe ont été considérées comme particulièrement productives, au vu de quelques comptages isolés en surface (BLANC-LEVEAU, 1973), (BENON et al, 1977), (RNO-Phyto, 1979), (RNO-Phyto, 1982), parfois même comparable à ce qui n'a pas été observé dans des aires adjacentes réputées oligotrophes (rade de Marseille). On est de toute manière, loin de la situation d'eutrophie de l'étang de Berre, même si une telle richesse peut être épisodiquement relevé au débouché immédiat du canal de Caronte (BLANC-LEVEAU, 1973), (BENON et al, 1977), KIM, 1981). Ces développements importants correspondraient donc à des intrusions de populations de l'étang de Berre, entraînées par le flux carontien, et se maintenant dans la mesure où les conditions de leur milieu originel se trouvent plus ou moins bien reproduites. Il est difficile de préciser dans quelle mesure le phytoplancton marin profite des potentialités nutritives offertes par les eaux carontiennes le niveau des populations marines qui y évoluent est à peine plus fort que celui des populations néritiques voisines. D'une manière générale, les seules espèces qui se développent dans le secteur sont des espèces euryhalines et plutôt tolérantes.

L'échelon secondaire marin est sans doute plus apte à profiter des potentialités trophiques présentes dans ce milieu, en raison de ses capacités de déplacement et donc sa faculté de limiter dans le temps sa présence dans la couche dessalée de surface. La répartition du zooplancton est éminemment variable. Les auteurs ayant travaillé sur ce problème (BLANC-LEVEAU, 1973), (BENON et al, 1977) distinguent de grandes communautés en surface, alors que les effectifs les plus importants, représentés par les espèces marines, s'observent sous la couche superficielle. Les regroupements spécifiques ainsi proposés ne proviendraient-ils pas du fait que telle espèce, préférentiellement à telle autre serait susceptible

d'effectuer des incursions, voire de séjourner temporairement en surface ou dans une zone voisine, plus ou moins dessalée. Sachant qu'un nombre limité d'espèces forme l'ossature du zooplancton marin, allié à un cortège également restreint des taxons secondaires, il reste donc à préciser en fonction de quel preferendum (thermique, halin, trophique) cette ossature générale des communautés marines se disperse. Quelques espèces cependant, se développent plus particulièrement dans la couche dessalée et sont susceptibles de présenter des effectifs importants. De plus, le zooplancton effectue des migrations nyctémérales, qui se surimpose à la variabilité spatiale décrite ci-dessus. Ainsi, un prélèvement réalisé à une heure donnée et à un niveau donné ne reflète pas la totalité et la diversité du plancton présent dans ce milieu, d'autant plus que la pêche ne concerne le plus souvent que la couche superficielle. Le phénomène étudié étant essentiellement dynamique, une perception basée sur une description limitée tant dans le temps que dans l'espace propose une vision biaisée de la réalité. On peut également regretter l'absence de suivi saisonnier des spectres spécifiques : on a donc une vision statique et partielle de l'échelon secondaire, et de ses relations avec l'échelon primaire (absence de connaissance sur la macro-variabilité). De même, aucun travail n'a porté sur les fluctuations à court terme du zooplancton, ni sur sa répartition verticale proprement dite.

Les connaissances portant sur le phytoplancton sont plus développées, principalement en raison des travaux du RNO (RNO-Phyto, 1978), (RNO-Phyto, 1982). Mais là également, seuls les niveaux les plus superficiels et les plus profonds ont été étudiés.

La zone proche du rejet de Caronte est intéressante à étudier du point de vue de l'hydrochimie des eaux. La présence conjointe de très forts effectifs phytoplanctoniques (grands producteurs mais aussi grands consommateurs d'oxygène dissous) et d'un important matériel organique tant particulaire que dissous (rejets industriels à forte DCO) pose le problème de l'évolution de l'oxygène dissous et du pH dans un milieu si variable. Il faut préciser que le bilan des effluents industriels (lieu et mode d'émission, variations qualitatives et quantitatives, intensité de l'équation subie) n'est pas connu avec précision. L'évolution

temporelle (en particulier le cycle journalier) des concentrations résultantes en oxygène dissous (action biologique + effets de rejets) n'a jamais été abordée. L'élément fondamental régulant l'écologie du secteur est sans conteste le rejet carontien. Quels types de résultats les auteurs ayant travaillé sur la zone ont-ils cherché à obtenir ?

L'exploration unique d'un réseau, aussi dense soit-il, ne donne qu'une "photo" du phénomène abordé ; en outre, la situation étant rapidement évolutive, l'image fournie peut être distordue par la dynamique de la nappe pendant la durée de l'échantillonnage. La disposition des points eux-même est de grande importance : une stratégie sans postulat de départ, sans prise en compte des sources de variation ne peut amener que leur redécouverte. Ces indications, localisées dans l'espace et limitées dans le temps, ont, le plus souvent, été réunies à fin de cartographie, faisant ainsi fi de la variabilité liée au caractère propre de l'élément dominant (flux) et si manifestement perturbateur. Quelques tentatives de prise en compte du rejet comme élément primaire du système ont été tentées (suivi de masses d'eau, photographies aériennes), mais ces tentatives prometteuses sont restées sans lendemain.

L'exploration répétée de quelques points répartie sur l'ensemble du golfe (type RNO) pose le double problème de la fréquence de l'échantillonnage et de l'adéquation de leur localisation par rapport aux phénomènes que l'on cherche à décrire. Ainsi, un point proche de Caronte est utile pour connaître les apports carontiens, mais ne renseigne aucunement sur leur devenir. Inversement, une station plus éloignée ne parviendra que difficilement à fournir des indications sur l'histoire de la masse d'eau issue du rejet, elle-même étant perturbée par d'autres influences. De plus, le caractère dynamique de l'extension et de la localisation des eaux carontiennes fait qu'un même point pourra alternativement présenter des caractéristiques (tant hydrologiques que biologiques) différentes voire opposées.

Dans un milieu aussi variable, on ne peut s'attendre à mettre en évidence des phénomènes (tant hydrologiques que biologiques) dont la période est largement supérieure à celle de l'échantillonnage. Ainsi, les points 2 et 3 du RNO, localisés au centre du golfe et échantillonnés



tous les 15 jours, perçoivent principalement l'activité carontienne comme un bruit de fond aléatoire, et ne permettent pas d'en assurer l'étude.

Les études se rapportant à l'exploration unique de points espacés les uns des autres combinent ces inconvénients et ces limites. Enfin, un échantillonnage couvrant progressivement une telle zone géographique et réalisé au cours de plusieurs journées différentes amène des informations difficilement reliables entre elles.

Ces stratégies ont bien sur, fourni d'intéressantes indications sur les relations interdescripteurs, mais elles ne donnent qu'une idée biaisée de la dynamique du système, en raison, répétons-le, de l'absence de prise en compte des facteurs de contrôle.

Ces critiques, peut être sévères, se placent dans le cadre d'une étude "idéale", portant sur un rejet. IL faut en effet, remarquer que les différents auteurs aient pu avoir d'autres intentions. Ainsi, (KIM, 1981) ne peut fournir d'information concernant l'évolution du panache, puisqu'il s'intéresse essentiellement aux influences du golfe sur l'étang de Berre. Un programme intégré, prenant en compte le système étudié comme les facteurs de contrôle s'impose donc.

##### 5. La zone marine

Dans la partie sud du golfe de Fos, toute zone temporairement non concernée par la nappe issue de Caronte peut être considérée comme néritique. Son importance et sa localisation seront donc fonction de l'influence carontienne, elle-même liée aux débits de St Chamas et aux conditions météorologiques. Non concerné par des entrées directes, mais secteur d'interface et d'intégration des diverses influences (Rhône, arrière-golfe, darses, Caronte et courant liguro-provençal), cette zone fait office de transition avec le large.

De par son importance et les stratégies d'échantillonnage retenues, c'est l'ensemble le plus étudié du golfe, où l'on connaît bien les relations interdescripteurs (au moins en surface), sans toutefois que leur évolution temporelle (et donc leur variabilité) ait été réellement abordée.

Différentes situations peuvent maintenant être reconnues, mais les différentes influences et leurs activités respectives sont perçues avec difficulté.

On est ici en présence d'un système côtier, concerné par différentes arrivées d'eaux douces ou saumâtres ; ainsi, la couche superficielle est le plus souvent dessalée, et ce, d'autant moins que l'on s'éloigne des sources perturbatrices, tandis que les couches sous-jacentes ont un net caractère néritique. Le caractère éminemment variable de cette zone et des facteurs qui l'influencent limite l'intérêt (voire la réalisation) de bilan dépassant la simple trivialité, ou trop ponctuel.

Ce secteur est enrichi en permanence, et ces potentialités trophiques se traduisent par un plancton néritique relativement développé au moins en surface. Mais, en dehors de cas extrêmes (conjonction de forts débits fluviaux et de conditions météorologiques particulières), on ne peut parler de situation d'eutrophie (mesotrophie ?).

La complexité de l'intrication des différentes composantes rend l'étude de ce système délicate, dans la mesure où les facteurs perturbateurs eux-même sont, encore une fois, mal décrits.

#### 6. Site de Ponteau

Située dans la partie sud du littoral de la Nerthe, l'usine E.D.F. de Martigues-Ponteau utilise l'eau de mer comme fluide de refroidissement (4 tranches de 250MWe, avec un débit de 9m<sup>3</sup>/s chacune, pour un  $\Delta T$  maximal de 7.5°C). Le fonctionnement par tranche de l'usine fait que les demandes en eau sont irrégulières, l'eau est pompée à 5.5m de profondeur, et rejetée en subsurface, après réchauffement, et éventuellement, traitement au chlore. Episodiquement, l'eau de rejet est chargée de matières diverses (sulfate, phosphate trisodique, ammoniacque et produits anti-fouling), servant d'anti-corrosifs et d'agents nettoyants. Les études écologiques concernant la masse d'eau (E.D.F., 1976), (E.D.F., 1981) ont porté principalement sur l'extension spatiale de la tache thermique et sur les conséquences des chocs mécaniques, chimiques et thermiques sur le plancton.

La tache thermique s'étend dans l'anse des Lamons, et présente une extension horizontale et verticale assez limitée ( $\Delta T$  résiduel de  $1^{\circ}\text{C}$  jamais observé au delà de 1400m du rejet ; gradient thermique accusé dans le premier mètre à proximité du rejet, épaisseur de la nappe échauffée diminuant rapidement ensuite) ; sa superficie moyenne par temps calme ou léger Mistral est de l'ordre du  $\text{km}^2$ . Son extension est directement liée au fonctionnement de la centrale et, bien sur, aux conditions météorologiques.

En raison de la localisation du site, les auteurs supposent que toute perturbation liée à la dessalure provient directement de Caronte. Cependant, le but (impact du rejet) poursuivi à travers la stratégie (points localisés à proximité immédiate de la centrale) fait que la perception est limitée à l'observation de situations, sans possibilité de connaître leur historique. Ceci s'explique par les motivations de l'étude, visant à décrire l'impact du rejet sur le plancton. Toute influence extérieure est perçue comme un bruit parasite. Ce type d'étude relève donc plus de l'écotoxicologie que de l'océanographie.

#### V.4 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une fois ces bilans dressés, dans quelle mesure les travaux pris en compte permettent d'ouvrir des perspectives et de concevoir une ligne d'étude intégrée du golfe de Fos ? Une somme importante de résultats diversifiés a été collectée. Ils amènent une connaissance de base des multiples situations que l'on peut observer dans ce secteur. Cependant, en raison de la parcellisation des études, tant en ce qui concerne les buts poursuivis que les moyens mis en oeuvre, on peut difficilement dépasser le stade de l'appréciation des effets ; des programmes d'étude englobant les causes comme les conséquences doivent être maintenant proposés, définissant problématique(s), lieu(x) et stratégie(s).

Quel(s) problème(s) océanographique(s) le golfe de Fos soulève-t-il ? Si les perturbations qui l'intéressent sont les facteurs de contrôle déterminants, sont elles aussi considérables que leur étude puisse fournir des résultats nouveaux et intéressants ? Ces études doivent-elles déboucher sur une compréhension approfondie de la dynamique structurelle et fonction-

nelle du système en aire perturbée, ou se limiter à une surveillance de cette (ces) perturbation(s) ?

Le golfe de Fos a été divisé en 5 secteurs géographiques. Quelle est la réalité de ce découpage, en raison de la grande variabilité du milieu ? Si oui, l'étude de ces différents lieux doit-elle se faire individuellement, (et quelle zone alors privilégier ?), ou en interrelation avec le reste du golfe (et alors, comment couvrir un phénomène dynamique ?). Quelle(s) stratégie(s) mettre en oeuvre (choix des stations, de la fréquence de leur échantillonnage) mais aussi choix des descripteurs en fonction de leur capacité à décrire une situation complexe, de leur coût, de leur accessibilité directe afin de réorienter, le cas échéant, la stratégie en temps "réel" (cartographie dynamique) ?

L'ensemble des réponses apportées à ces questions amènent à dresser un éventail complet de projets diversifiés : le programme idéal. Confronté aux réalités le décideur se doit d'orienter la politique scientifique vers des objectifs considérés comme prioritaires (existence d'une situation et de problèmes) mais demeurant toutefois cohérents (évitant ainsi de parcelliser à nouveau les études).

Le sujet des thèmes traités comme nos préoccupations conduisent à concrétiser certaines de ces priorités.

Le golfe de Fos est perturbé, et sa situation écologique évolue. Les apports d'eau douce (et leur charge polluante au sens large) sont, avec les rejets industriels, le principal facteur de déséquilibre. Le détournement d'une partie des eaux de la Durance comme, à un moindre degré, l'arrivée des eaux du Rhône dans le secteur des darses sont des éléments fondamentaux pour lesquels il convient sans doute de focaliser l'intérêt. La surveillance de la qualité des eaux est utile en raison de l'énorme quantité de résultats acquis, mais la possibilité de réaction face à un changement d'état est dépendante du décalage existant entre le prélèvement et l'interprétation. En outre, le manque de souplesse de cette formule (nécessaire aux comparaisons temporelles) d'une part ne tient que peu compte de la variabilité du système, et d'autre part, ne permet pas de résoudre - voire de comprendre - certains problèmes

particuliers. A une structure de suivi de la qualité des eaux, nécessaire précisément par la fourniture de termes de comparaison malgré ses biais, doit donc s'ajouter un programme s'attachant aux questions spécifiques posées par les intrusions d'eau continentale en milieu marin, comme à celles liées au caractère fortement industrialisé du secteur.

La division en 5 secteurs géographiques du golfe correspond, à notre sens, à une réalité, dans la mesure où elle peut s'exprimer également en termes de zones d'influence. Ainsi, la zone carontienne ne peut être considérée comme définie par ses limites topographiques, mais est avant tout le lieu géographique où peut être décelée l'influence des eaux issues de l'étang de Berre. Les secteurs d'études prioritaires seraient donc d'une part les zones concernées par des rejets (Caronte-Lavéra et darses-zone industrielle), et d'autre part, des lieux d'intégration d'influences composites, où peuvent être observés des phénomènes écologiques particulièrement intéressants (anse de Carteau). Ces études devront toujours pouvoir être reliées à la situation générale du golfe, soit que l'échantillonnage tienne compte à la fois du problème spécifique et des communications inter-zone soit par la réalisation d'une couverture globale du golfe (télé-détection). L'intérêt essentiel de telles études est de connaître le comportement des rejets et leur impact sur l'écosystème pélagique côtier. Il s'agit donc d'apprécier l'importance quantitative de ces effluences comme d'en estimer la composition qualitative (T/S,  $\sigma_t$ , charge nutritive, charge particulaire, plancton, polluants-DCO, échelon paraprimaire) et d'en suivre les évolutions dans le milieu marin. Il importe donc d'étudier les diverses variations du rejet lui-même, à une échelle temporelle suffisamment fine et sur une durée suffisamment longue pour détecter l'ensemble des effets qu'il induit sur le milieu marin. On est donc conduit à dresser un bilan (aussi exhaustif que possible) des entrées qui prenne en compte leur continuité. Une telle approche est indissociable de la connaissance de l'extension horizontale et verticale des nappes et donc des facteurs qui contrôlent cette extension (débits, caractéristiques des lieux et mode d'émission, vents, marées, différences de densité entre les milieux émetteurs et récepteurs). Tout ceci amène naturellement à une approche prédictive du système et donc à sa modélisation.

Outre l'échantillonnage simultané dans le rejet et dans le milieu marin, la réalisation d'un tel objectif nécessite la réalisation d'une étude courantologique, hydrologique et météorologique intégrant la notion de durée et s'appuyant donc sur une approche "historique" du problème. Ces conditions, pour triviales qu'elles puissent apparaître, doivent cependant être prises en compte simultanément pour aboutir à la modélisation. Outre la précision, l'étude de la variabilité des phénomènes en elle-même apparaît comme indispensable dans un secteur comme le golfe de Fos. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des stratégies adaptées à cette approche :

- . affinement des échelles de mesure (temps/espace)
- . choix de descripteurs simples et rapidement accessibles (mesures automatiques en continu, cartographie dynamique en temps réel ?)
- . intensification de l'échantillonnage ou des points sensibles, en liaison avec des mesures complémentaires plus globales.

L'étude de la variabilité est nécessaire parce qu'elle permet la mise au point de stratégies d'échantillonnages spécifiques et adéquates en milieu perturbé ; les résultats acquis renseignent ainsi sur le comportement des descripteurs étudiés, mais également amènent à comprendre l'évolution générale du système en transformant une partie du bruit de fond en caractère explicatif.

A partir de là, le travail écologique proprement dit (amenant à la meilleure connaissance possible des conséquences de la perturbation) pourra se développer de manière cohérente, efficace et économique : réalité de l'enrichissement du golfe, ou au contraire développement minimisé par rapport aux potentialités trophiques ; eutrophie ou dystrophie du golfe ; réalité et rendement des transferts énergétiques entre les différentes parties du système ; éventuel impact sur les pêches et conséquences sur l'hydrochimie des structures conchyliques de l'anse de Carteau.

Le domaine de l'océanographie est vaste et diversifié. Nous appartient-il d'aller plus avant dans la définition des problèmes à résoudre ?

Telle ou telle orientation devra sans doute correspondre aux motivations, aux disponibilités, aux conditions économiques comme aux problèmes jugés les plus préoccupants ; quelles que soient les priorités accordées, les programmes mis en oeuvre devant de toute manière passer par la compréhension/prédiction du couple rejet/hydrologie, tout en prenant en compte la notion d'intégration nécessaire à l'étude d'un système présentant une si forte variabilité.

SIXIEME PARTIE

LE BENTHOS



## VI.1 - INTRODUCTION

Pour la compréhension des écosystèmes benthiques du Golfe de Fos, il est nécessaire de rappeler certaines données importantes sur le site :

- 1 - Il est limité à l'Est par une côte rocheuse très découpée, s'enfonçant dans la mer sous forme de plateformes interrompues au niveau des anses par de profonds thalwegs recouverts de sédiments grossiers organogènes. Ces plateformes s'annoient vers l'Ouest sous les vases de la zone centrale à partir d'environ 20 m.
- 2 - A l'Ouest une côte sableuse est liée au débouché le plus oriental de delta du Rhône. Une grande flèche sableuse They de la Gracieuse, s'avance vers le Nord-Est sur plus de 4.5 km divisant le Golfe en deux parties.
- 3 - Au Nord s'étendent des faciès littoraux sableux qui font place, face à l'éperon de St Gervais à des fonds de galets, graviers grossiers et débris coquilliers sur lesquels sont installés par endroits les herbiers de Posidonies.
- 4 - Dans la partie Nord Ouest du Golfe le complexe industriel comprend les darsés et les jetées construites pour la plupart avant 1972.

## VI.2 - Peuplements des substrats durs

Les études les concernant sont limitées à la partie Est sauf une cartographie très préliminaire des digues du complexe portuaire de Fos (

1. Dans la zone infralittorale deux ensembles d'études ont été réalisés dans la partie supérieure.

- Etude cyclique réalisée entre Mai 1974 et Juillet 1975 (7 ; 13), dans 6 stations échelonnées depuis Couronne jusqu'à Baumasse, au niveau de la Biocénose des Algues Photophiles (premier mètre)<sup>elle</sup>, a permis d'isoler 3 groupes de faciès correspondant à 3 niveaux de pollution globale. Une analyse factorielle en composantes principales a confirmé les perturbations au niveau des cycles annuels dans ces divers peuplements (14). Les perturbations sont étroitement liées à la présence de pollutions industrielles et thermiques.

Cette étude n'a porté que sur l'aspect qualitatif et quantitatif numéral ; l'aspect pondéral et production n'a pas été abordé.

- La zone de Ponteau comme exemple de pollution thermique ponctuelle a fait l'objet d'un important travail, comportant des cartographies successives (8 ; 9 ...) et un suivi comme les autres stations infralittorales de substrat dur du Golfe de Fos du Zoobenthos, accompagné de prélèvements supplémentaires lors des périodes d'échauffement naturel maximum provoquant des morts massives.

Le seul travail important concernant le macrophytobenthos a été réalisé dans ce contexte (39 ; 40 ; 41 ; 42 ; 43) : 11 stations échelonnées dans l'anse des Seynemeset hors de celle-ci, à 0 et 0.5 m de profondeur, ont été suivies de Septembre 1974 à Septembre 1976. Un bilan floristique a été dressé avec la mise en évidence d'un gradient d'appauvrissement floristique accompagné de diverses modifications dans la structure du peuplement : sélection d'espèces, variation saisonnière, de grande amplitude.

2. Dans la zone circalittorale les concrétionnements de type coralligène ont fait l'objet d'une étude comparative suivant un gradient de pollution globale et avec une station comparable hors du Golfe (10 ; 24)

52 prélèvements en 4 stations dont 3 situées dans le Golfe de Fos ont permis de montrer l'appauvrissement qualitatif et quantitatif du peuplement, la sélection des groupes zoologiques et l'impact sur les groupes fonctionnels constructeurs.

Cette étude a porté sur l'aspect qualitatif et quantitatif pondéral. Avec un bilan de l'appauvrissement au niveau des différents stades de dégradation de la formation.

### VI.3 - Les Herbiers

Les herbiers de Posidonies ont été signalés dans les diverses cartes des communautés benthiques (19 ; 16). Ils sont signalés en 1957 (19) sur la Côte Est entre 1 et 15 m. Dans le fond du Golfe ils se situent entre 4 et 9 m, mais sous une forme très dégradée, en 1965 (16) on signale leur régression.

Un certain nombre de documents très approximatifs ont été fournis sur l'étendue de l'herbier de Posidonies dans le Golfe de Fos. Il est impossible au vu de la littérature et avec les données impubliées mais disponibles à la Station Marine d'Endoume de dresser un bilan précis de la distribution, de l'étendue et de l'état actuel de l'herbier de Posidonies.

En 1979, une étude précise sur l'épifaune de l'herbier de Ponteau a permis de montrer un fort appauvrissement par rapport à l'herbier type choisi à Port-Cros.

Depuis 1982, une étude sur l'endofaune de la matte est en cours dans deux stations de la côte Est au niveau de l'herbier vivant et de la matte d'herbier mort.

Un herbier de Zostera a été signalé au Nord et au Sud de l'entrée du Canal de Port St Louis du Rhône entre 1 et 4 m de profondeur (19).

Un herbier de Cymodocea était implanté dans la zone Nord-Est sur les sables littoraux.

Comme pour l'herbier de Posidonies, le bilan de ces formations est à peu près impossible à dresser au vu de la littérature.

#### VI.4 - Peuplements des substrats meubles

Les peuplements de substrats meubles ont été plus que tout autre fortement perturbés par l'ensemble des travaux effectués lors de la création du complexe industriel. L'évolution des fonds a été suivie du point de vue qualitatif et quantitatif numéral de 1957 à 1978, avec les différentes étapes de transition.

Les deux facteurs dominants dans l'évolution observée concernent les modifications de la nature sédimentologique des fonds sous forme d'importants rejets de dragages et d'un envasement généralisé du Golfe ; les vases ayant pu fixer des polluants et augmenter les taux au niveau du Benthos.

Deux grands ensembles sont à prendre en considération :

- La bande littorale entre 0 et 10 m depuis Port de Bouc jusqu'à l'extrémité du They de la Gracieuse (16 ; 18 ; 19 ; 25 ; 28 ; 34 ; 35 ; 36 ; 38).

- Les fonds envasés au-delà de l'isobathe 10 m (18 ; 19 ; 27 ; 28 ; 29 ; 30 ; 31 ; 32 ; 33).

Les études sont fines, le quadrillage est serré à la fois dans le temps et dans l'espace, il a permis de mettre en évidence des modèles d'évolution de portée générale. Il est possible à partir des données existantes d'établir des schémas d'évolution future et d'en suivre avec le maximum d'efficacité la réalisation.

Du point de vue rendement des fonds, deux tentatives ont été réalisées. Une, porte sur l'anse de Saint Gervais (25) où un fond de sable envahi par une pelouse à *Cymodocësa* fait l'objet d'une tentative de calcul de biomasse et de production d'une espèce (*Venus gallina* 20 g / m<sup>2</sup> / an).

La seconde (12) concerne les fonds entre 0 et 5 m au They de la Gracieuse où l'évolution porte sur les biomasses phytoplanctoniques et microphytobenthiques entre un fond SVMC et un fond SFHN.

En ce qui concerne la méiofaune un seul travail est publié, il concerne l'impact de la pollution thermique sur une communauté de Copépodes harpacticoides (15). Au cours d'un cycle de 14 mois, l'impact du rejet thermique a été appréhendé au travers de la hiérarchie spécifique, de la structure du peuplement, du cycle biologique, des fluctuations quantitatives et du standing-crop.

#### VI.5 -Les indicateurs biologiques

Plusieurs groupes animaux et végétaux ont été désignés comme susceptibles d'être choisis comme indicateurs biologiques de pollution (22 ; 32 ; 35), mais 4 groupes zoologiques ont donné lieu à des études approfondies en ce qui concerne leur sensibilité, voire leur utilisation très généralisée dans le calcul d'un indice de pollution ou d'une surveillance pondérale de l'altération du milieu.

##### 1- Les Bryozoaires (23)

Le bilan a porté sur 77 espèces, il a abouti à mettre en évidence des groupes échelonnés suivant la tolérance à la pollution globale.

##### 2- Les Polychètes (6)

L'évolution spatiale et la dynamique des populations d'espèces ou de groupes d'espèces "détecteurs biologiques" de pollution a permis de mettre en évidence des modifications du groupement annélidien et de proposer un coefficient de pollution.

##### 3- Les Echinodermes (20 ; 21)

A la suite de l'analyse de la répartition de diverses espèces de macroéchinodermes : 14 espèces, 51 stations, 7846 m<sup>2</sup>, il a été mis en évidence 4 niveaux d'altération du stock par pollution industrielle et comparé avec les mêmes niveaux par pollution domestique. Les réactivités des macroéchinodermes sont différentielles aux deux grands types de pollution, industrielle et domestique.

##### 4- Les Crustacés Amphipodes (4 ; 5)

Le groupe répond au gradient pollution classiquement par un appauvrissement de la richesse spécifique, mais aussi par un

remplacement spécifique correspondant à des compartiments trophiques bien individualisés.

Ce dernier phénomène a d'ailleurs aussi été mis en évidence pour les Polychètes des fonds soumis à un envasement (32).

#### VI.6-Accumulation de polluants dans les organismes (1, 2, 3)

Un seul corps a été analysé, le mercure, dans des Posidonies, et deux espèces de Zostéra. Les valeurs obtenues montrent pour Fos des facteurs multiplicateurs de l'ordre de 3 à 90 par rapport à Port-Cros.

La Mytilus galloprovincialis (25b) considérée comme indicateur de pollution a été testée et étudiée sur tout le littoral méditerranéen. Une station d'étude se trouvait dans le Golfe de Fos. Les variations de teneur des polluants en fonction de la biologie de l'espèce ont été étudiées pour les composés organochlorés et les métaux lourds.

#### VI.7 - Conclusions et possibilités de développement

Dans le cadre d'un modèle global de Fos on peut dire :

##### 1- Etat général des lieux

Sont connus :

- les fonds sédimentaires qui ont été étudiés qualitativement et quantitativement (numériquement parlant) en l'état 1978-79.
- les fonds de substrats durs : le zoobenthos en est connu pour l'Infralittoral supérieur et les formations coralligènes, le phytobenthos en un point précis.
- les herbiers : l'épifaune a été étudiée en un point précis, l'endofaune des mattes est en cours d'étude.

Devraient être faits :

- l'ensemble du phytobenthos de tous les substrats durs et plus particulièrement l'évolution des peuplements algaux de l'Infralittoral supérieur et le devenir des algues calcaires dont le développement dans certains secteurs au niveau des formations coralligènes pose un problème.

- l'ensemble du bilan herbier : cartographie, état de vitalité, problèmes de sa destruction.
- Etude de la méiofaune et de la microflore.

## 2- Dynamique de l'écosystème benthique de Fos :

- Dynamique dans le temps :  
Peut-être continuée pour tous les domaines déjà traités puisque le facteur temps a déjà été pris en compte.
- Dynamique énergétique du système :  
Deux seules tentatives de production ont été tentées, il est impossible sans d'autres études d'aborder ce problème.  
Aucune espèce dans l'état actuel ne peut vraiment être pris comme point de départ d'une enquête pouvant aboutir à son exploitation même artisanale. Une tentative de préenquête pourrait être envisagée pour Venerupis aurèa et Cardium glaucum.

## 3- Indicateurs de pollution :

Quatre groupes ont été étudiés, ces travaux sont vraiment à la pointe de ce qui se fait dans le domaine, on devrait encore pouvoir affiner.

## 4- Concentration des polluants dans les organismes :

Tout est à faire.

## 5- Etude de divers types de pollution :

L'étude de l'impact de la pollution thermique n'a pas fourni des résultats suffisants pour être intégrés dans un modèle FOS. L'impact de certains rejets devraient par contre être pris en compte (Naphtachimie, flot de Caronte...).

BIBLIOGRAPHIE



CHAPITRES I à IV

GOLFE de FOS

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

THEMATIQUE et CHRONOLOGIQUE

N.B.: La plupart des notes et ouvrages cités renferment de nombreuses références complémentaires.

1) DELTA DU RHONE: EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE

- SURELL M., 1847.- Mémoire sur l'amélioration des embouchures du Rhône. 1 vol. in-8°, Imp. Générale, Nîmes.
- GASPARIN (de), 1851.- Note sur les terrains du delta du Rhône. C.R.Ac.Sc.Paris, D, 32, p.696-704.
- DESJARDIN E., 1866.- Aperçu historique sur les embouchures du Rhône: travaux anciens et modernes. 1 vol. in-8°, Imp. Lahure Ch., Paris, 133 p.
- LENTHERIC C., 1876.- Les villes mortes du Golfe du Lion. 1 vol. in-8°, Plon Ed., Paris, 524 p.
- GAUTIER-DESCOTTES A., 1879.- Formation de la Camargue. 1 vol. in-8°, Séguin Ed., Avignon.
- COLLOT L., 1880.- Sur le delta pliocène du Rhône. C.R.Ac.Sc. Paris, D, 90, p.568-569.
- GIRARD J., 1893.- Le delta du Rhône. Bull. Soc. Géogr. Marseille, 17, p.137-142.
- ARNAUD P., 1897.- Essai historique sur la constitution géologique de la Crau et de la Camargue. Bull. Soc. Lit. Sci. Basses-Alpes, Dignes, 8, 64, p.38-48 & 1898, 8,65, p.100 et sq.
- PICARD Th., 1901.- La Camargue. Etude stratigraphique de la région du Bas-Rhône et du littoral méditerranéen. 1 vol. in-8°, Imp. Générale, Nîmes, 87 p.
- COLLOT L., 1904.- Pliocène et Quaternaire de la région du Bas-Rhône. B.S.G.F., 4,4, p.401-415.
- THOULET A. & GERMAIN L., 1914.- La lithologie sous-marine du Golfe du Lion. Ann. Géogr., Paris, 23, 130, p.351-355.
- OLDHAM R.D., 1925.- The Portolan maps of the Rhône delta. Geogr. Journal, 65, p.403-428.
- OLDHAM R.D., 1929.- Historic changes of level in the delta of Rhône. Quarterly Journ. Geol. Sty., London, 86, p.64-93.
- OLDHAM R.D., 1930.- Earth moments in the delta of the Rhône. Nature, p.601-604.
- LEWIS W.V., 1931.- Effects of waves incidence on the configuration of a single beach. Geogr. Journal, 78, p.131-148.
- OLDHAM R.D., 1934.- The age and the origin of the lower Rhône. Quarterly Journ. Geol. Sty., London, 90, p.445-461.
- D'ARRIGO E., 1936.- Ricerche sul regime dei litorali del mediterraneo. Consiglio Nazionale delle ricerche, Roma.
- FRANCOIS L., 1937.- Etude sur l'évolution actuelle des côtes de la Camargue. Etudes Rhodaniennes, 13, p.71-126.
- LEWIS W.V., 1938.- The evolution of shoreline curves. Proc. Geol. Assoc., 49, p.107-127.
- DENIZOT G., 1941.- La formation géologique de delta du Rhône. Revue d'Arles, 3, p.75-78.
- RUSSEL R.J., 1942.- Geomorphology of the Rhône delta. Ann. Assoc. Americ. Geogr., 32, 2, p.149-257.
- SCHOU A., 1945.- Det marine forland. Thèse Sciences, Copenhagen, Folia Geogr. Danica, 4, 236 p.

- VAN ANDEL T.H., 1950.- Provenance, transport and deposition of the Rhône sediment. Thèse Sciences, Wageningen, 220 p.
- SCHACHTER D., 1950.- Contribution à l'étude écologique de la Camargue. Thèse Sciences, Paris, Ann. Inst. Océanogr. Monaco, 25, 108 p.
- KRUIT C., 1951.- Aperçu de l'histoire récente du delta du Rhône. Proc. 3<sup>o</sup> Int. Congr. of Sedimentology, Groningen-Wageningen, p.181-191.
- SCHOU A., 1952.- Direction determining of the wind on shoreline simplification and coastal dunes direction. Proc. Int. Congr. Geogr., Washington, p.81-112.
- GEORGE P., 1953.- La région du Bas-Rhône. Thèse Lettres, 1 vol. in-8°, Imp. Baillière & Fils, Paris, 691 p., 103 fig., 28 pl.
- BEAUFORT L et ALL., 1954.- Ampleur de l'érosion pontienne et du comblement pliocène en Camargue. B.S.G.F., 6,4, p.174-184.
- RAZAVET-DUBOUL C., 1955.- Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône. Thèse Sciences, Paris, Rec.Trav.Sta.Marine Endoume, 10, 17, 361 p. & Mem. Soc. Géol. France, 1956, N.S., 70, 35, 3-4, 234 p.
- KRUIT C., 1955.- Sediments of the Rhône delta, Part I: Grain size and microfauna. Mouton Co. Publications, Grawenhage, Verhand Koninck Neder. Geol. mijbouw Gen., deel 15, N°3, p.357-514.
- VAN ANDEL T.H., 1955.- Sediments of the Rhône delta, Part II: Sources and deposition of heavy minerals. Ibid., deel 15, N°3, p.515-556.
- DUBOUL-RAZAVET C. & KRUIT C., 1957.- Sédimentologie du delta du Rhône. Rev. Inst. Français du Pétrole, 12, 4, p.299-410.
- GOVERNET C., 1959.- Evolution géologique des relations Bas Rhône-Basse Durance pendant les temps pliocènes et quaternaires. Ann. Fac. Sci. Marseille, 29, p.273-279.
- VAN STRAATEN L.M.J.U., 1959.- Littoral and submarine morphology of the Rhône delta. Proc. Second Coastal Geogr. Conf., Russel Ed., Baton-Rouge, Louisiana State Univ., p. 233-264.
- BOURDIER F., 1961.- Le Bassin du Rhône au Quaternaire. Thèse Sciences, Paris, CNRS Ed., 2 vol. in-8°, 364 p. & 295 p.
- BONNET A., 1962.- Note sur la liaison entre les tectoniques superficielles et profondes de la Camargue. Bull. Serv. Car. Géol. France, 59, 269, p. 329-337.
- ANONYME, 1967.- Carte des fonds marins du delta du Rhône ( De Port de Bouc aux Saintes Maries). CFR & ERAP Ed.
- OOMKENS E., 1967.- Depositional sequences and sand distribution in a deltaic complex (Rhône, France). Minjnbouw, 46° jaargang, E.020/1861, p.265-278.
- MOREL G., 1968.- La Camargue: un élément du développement économique régional. Rev. Chambre de Commerce Marseille, N.S., 189 p.
- ASTIER A., POMMERET H., DECROIX M. & Collaborateurs, 1970.- Camargue: étude hydrologique, pédologique et de salinité. D.D.A. & C.N. Aménagement Bas-Rhône Languedoc, 4 vol., I,II,III : Cartes & Tbx; IV: Rapport général, 262 p.

- OOMKENS E., 1970.- Depositional sequences and sand distribution in the post-glacial Rhône complex. IN "Deltaic sedimentation, ancient and modern". Soc. of Ecol. Paleo. and Min., S.P. N° 15, p.198-212.
- BERTRAND J.P. & L'HOMER A., 1975.- Les deltas de la Méditerranée du Nord: le delta du Rhône. Livret-Guide Excur. N° 16, IX° Congr. Inter. Sediment., Nice, 1975, 65 p.
- L'HOMER A., BAZILE F. & THOMMERET J. et Y., 1981.- Principales étapes de l'édification du delta du Rhône, de 7000 B.P. à nos jours; variations du niveau marin. Océanis, 7, 4, p. 389-408.
- ALOISI J.C. & ALL. , 1981.- L'éventail sous marin profond du Rhône et les dépôts de pente de l'Ebre. IN "Sedimentary basins of mediterranean margins", F.C. Wezel Ed., CNR Italian technoprint, p.227-238.
- DROZ L., 1983.- L'éventail sous marin profond du Rhône (Golfe du Lion). Grands traits morphologiques. Thèse 3° Cycle, Univ. Paris VI & Lab. Géol. Dyn. sous marine Villefranche, 195 p.

## II) LE RHONE : HYDROLOGIE.

- LENTHERIC C. , 1905.- Le Rhône, histoire d'un fleuve. 1 vol. in-8°, Plon Ed., Paris, 447 p.
- PARDE M. , 1925.- Le régime du Rhône. Etude hydrologique. Thèse Lettres, Grenoble, 2 vol. in-8°, Pub. Inst. Etudes Rhodaniennes, Lyon, I:XIV+887 p., II:440 p.
- ARNAUD J., 1960.- Contribution à l'étude hydrologique et hydrographique de l'estuaire du Grand Rhône. D.E.S. Marseille, 190 p. & Ann.
- BONNEFILLE R. & BRACONNOT P., 1966.- Note préliminaire à l'étude du coin salé dans le Rhône. LNH Chatou, DHM, Rapport T 846, 8 p.
- BRUN G., 1967.- Etude écologique de l'estuaire du Grand Rhône. Bull. Inst. Oceanogr. Monaco, 66, 46 p.
- BLANC F., CHAMLEY H. & LEVEAU M., 1969.- Les minéraux en suspension témoins du mélange des eaux superficielles fluviatiles en milieu marin; exemple du Rhône. C.R.Ac.Sc.Paris, D, 269, p.2509-2512.
- PAUC H., 1970.- Contribution à l'étude dynamique et sédimentologique des suspension solides au large de l'embouchure du Rhône (Grau de Roustan). Thèse 3° Cycle, Montpellier, 134 p.
- PAUC H. ,1971.- Les courants de sortie des eaux du Rhône. Conséquences sédimentologiques. Vie et Milieu, 22, 2 B, p. 239-246.
- CHAMLEY H., 1971.- Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. Thèse Sciences, Marseille, 401 p., 15 ph., 82 fig.
- SAVEY P., POMMIER M. & MARVAUD P., 1972.- Observations et mesures effectuées sur les "coins salés" du Grand et Petit Rhône. La Houille Blanche, 2-3, p.151-162.

- GADIEL F. & PAUC H., 1973.- Sédimentation récente à l'embouchure du Grand Rhône: données sédimentologiques et géochimiques. Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitain, 14, p.127-141.
- SPAN D., 1984.- Répartition des métaux traces dans les sédiments superficiels au large du Grand Rhône: rôle de l'hydrodynamisme. Journ. Rech. Océanogr. (U.O.Fr.), 9, 1, p.41-44

### III) GOLFE DE FOS.

- GILLES J., 1869.- Les Fosses Mariennes et le canal St Louis. 1 vol in-8°, Marseille, Camoin Ed., 48 p., 1 pl.
- MARTIN D., 1904.- Fos, importance de sa région au point de vue archéologique. Ann. Soc. Et. Provençales, p.265-277.
- RIVIERE A. & RAZAVET L., 1949.- Sur l'évolution sédimentaire du golfe de Fos et les facteurs de l'équilibre littoral. C.R.Ac.Sc.Paris, D, 229, p.895-896.
- BARAILLET L. & BONNET M., 1964.- Golfe de Fos: évolution des fonds le long de la flèche de la Gracieuse. SOGREAH, Grenoble, Rapport N°8724, 26 p.
- BONNEFILLE R. & GERMAIN P., 1964.- Courants de marée dans le golfe de Fos. LNH Chatou, DHM, Rapport T 410, 8p., 20 fig.
- ANONYME 1964.- Etude sur modèle réduit de l'agitation dans le golfe de Fos. LNH Chatou, DHM, Rapport T 360, 18 p.
- BONNEFILLE R., GERMAIN P. & HEUZEL M., 1965.- Résultats des expériences de traceurs radioactifs réalisées dans le Bas - Rhône et le long du littoral du They de la Gracieuse. LNH Chatou, DHM & DEE, Rapport T 452, 21 p.
- BARAILLET L. & ROFFAT C., 1965.- Golfe de Fos: les apports par charriage à l'embouchure du Rhône. SOGREAH, Grenoble, Rapport N°8904, 13 p.
- ANONYME, 1966 - Golfe de Fos: conditions de houles au Cap Couronne. SOGREAH, Grenoble, Rapport N°9218, 16 p.
- FEBVRE-CHEVALLIER C., 1969.- Etude bionomique des substrats meubles dragables du Golfe de Fos. Tethys, 1, 2, p.421-476.
- IZAUTE J., 1970.- Courants fluviaux et maritimes dans la régions de Fos. Port Autonome Marseille, Rapport 12p.+ pl.
- ANONYME, 1970.- Observations météorologiques au Cap Couronne (1964-1969). Port Autonome Marseille, Rapport 5 p. + pl.
- ROUX R.M. & VERNIER E., 1972.- Etat des fonds du Golfe de Fos en 1971: étude géologique et sédimentologique. IN "Situation au point zéro du Golfe de Fos", Station Marine Endoume et SPPPI Marseille, Rapport 29 p.
- VERNIER E., 1972.- Recherchessur la dynamique sédimentaire du Golfe de Fos. Thèse 3° Cycle, Marseille, 69 p.
- CAZENAVE M., 1974.- Hydraulique du Golfe de Fos:analyse des échanges d'eau entre le golfe de Fos, l'étang de Berre et la mer. LNH Chatou, Rapport N° 1/C 42/7408, 9 p., 4 fig. 20 pl.
- LEPETIT J.P. & MOREAU S., 1974.- Hydraulique du Canal de Caronte. LNH Chatou, Rapport HC/042/74.41, 18 p., 13 fig.

- LEPETIT J.P. & MOREAU S., 1975.- Hydraulique du système l'tang de Berre-Canal de Caronte-Golfe de Fos. LNH Chatou, Rapport HC/042/75.45, 18 p., 1 fig., 3 pl.
- BLANC F. & ALL., 1975.- Interet de la thermographie aérienne infrarouge pour l'interprétation des phénomènes hydrobiologiques et sédimentologiques dans le Golfe de Fos. C.R. Ac.Sc.Paris, D, 277, p. 561-564.
- ROUX R.M. & VERNIER E., 1975.- Evolution récente des fonds meubles de la partie occidentale du Golfe de Fos. C.R.Ac.Sc. Paris, D, 280, p. 2097-2100.
- VERNIER E., 1976.- Edification et évolution de la flèche de la Gracieuse, Golfe de Fos. Bull. BRGM, 2, 4, p.103-115.
- ORTOLAN G., 1977.- Schémas-types de circulation des masses d'eau dans le Golfe de Fos en fonction des divers paramètres agissants. Rev. Inter. Océanogr. Médic., 47, p.55-60.
- ROUX R.M. & VERNIER E., 1977.- Répartition des minéraux argileux dans les sédiments du golfe de Fos. Géologie Méditerranéenne, 4, 4, p. 365-370.
- MONGUILLAN L., 1977.- Dans le Golfe de Fos, une nécropole sous la mer. Archéologia, 110, p.59-65.
- MONGUILLAN L., 1977.- Un port romain dans le Golfe de Fos. Caesarodunum, 12/2, p. 359-370.
- SALEN-PICARD C., 1981.- Evolution d'un peuplement de Vase Terri-gène Cotière soumise à des rejets de dragages dans le Golfe de Fos. Tethys, 10, 1, p. 83-88.
- ROUX R.M., 1983.- Golfe de Fos: sédiments et dynamique sédimentaire. CNEXO Brest, Rapport N° 82/6990, 2 vol., 44p., 45 fig.
- HAMM L. & NOHET M., 1984.- Impact sédimentologique du creusement des chenaux d'accès aux darses du Port de Fos. C.R. XVIII Journées de l'Hydraulique, 11-13 Septembre, Marseille, Q III, R 2, 4p.

CARTE GEOLOGIQUE: Feuille et Notice "ISTRES", Carte Géologique de la France à 1/50 000°, N°XXX-44-45, BRGM Ed.

## BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE V

1. AUBERT M., AUBERT J. et GAMBAROTTA J.P., 1968. Côtes de France. Inventaire national de la pollution bactérienne des eaux littorales. Méditerranée. Rev. Int. Océanogr. Med. (supplément).
2. COYNE et BELLIER, 1970. Fos-sur-Mer. Recherche sur les possibilités de déversement en mer, 1ère phase. Etude bibliographique. Agence financière de bassin. Rhône-Méditerranée-Corse.
4. J. BONNEFOY-CLAUDET, 1972. Détection des pollutions dans l'étang de Berre et le Golfe de Fos par la photographie aérienne. C.E.A. direction des productions, centre de Pierrelatte. Rapport 259.
5. LEPETIT J.P. et MOREAU S., 1975. Hydraulique du système Etang de Berre-Canal de Caronte-Golfe de Fos. Rapport EDF HC-042-75-45.
6. ANONYME, 1973. Observations sur le degré de pollution dans le Golfe de Fos. I.S.T.P.M..
7. BLANC F., LEVEAU M., 1973. Plancton et eutrophie : aire d'épandage rhodanienne et Golfe de Fos (traitement mathématique des données). Thèse Doct ès Sc., Univ. Aix-Marseille II : 681pp.
8. ANONYME-RNO, 1974. Point d'appui n 5. Golfe de Fos. Description détaillée des résultats acquis de juin 1974 à janvier 1975. Données RNO.
9. BENON P. BOURGADE B. et KANTIN R., 1977. Impact de la pollution sur les écosystèmes méditerranéens côtiers : Aspects planctoniques. Thèse 3e cycle, Univ. Aix-Marseille II : 400pp + 235fig.
10. AUBERT et al., 1975. Enquête nationale sur l'état sanitaire des zones côtières. Mer Méditerranée RNO-CERBOM tome 3, pp138.  
  
AUBERT et al., 1976. Enquête nationale sur l'état sanitaire des zones côtières. Mer Méditerranée RNO-CERBOM tome 3, pp138.  
  
AUBERT et al., 1976. Enquête nationale sur l'état sanitaire des zones côtières. Mer Méditerranée RNO-CERBOM tome 3, pp138.
11. TETHYS, 1976 (1977). Impact des rejets thermiques en mer. Rapport sur les études effectuées dans le cadre d'un contrat avec région d'Equipement-Marseille. Téthys 8(1).
12. ORTOLAN, 1976. Golfe de Fos : courantométrie et circulation des masses d'eau. Ministère de l'Equipement, Service PACA.

13. ANONYME, 1976. Etude de synthèse de l'ensemble des reconnaissances océanographiques effectuées sur le site de Martigues-Pontheau. SEERA.
14. BLANC F. et LEVEAU M., 1977. Rapport sur la situation écologique de l'aire néritique du Golfe de Fos en 1976. (Données RNO, point d'appui n°5). Document technique C.N.E.X.O. : 117pp.
15. ARFI R., 1978. Rapport sur la situation écologique de l'aire néritique du Golfe de Fos en 1977. Données RNO. Convention C.N.E.X.O. 70pp.
16. ANONYME, 1978. Qualité du milieu dans le Golfe de Fos. Rapport préliminaire. I.S.T.P.M..
17. ARFI R., 1979. Rapport sur la situation écologique de l'aire néritique du Golfe de Fos en 1978. Données RNO. Convention C.N.E.X.O. 110pp.
18. BLANC F., LEVEAU M. et MAURER D., 1978. Rapport Phytoplancton. RNO, Point d'appui n°5. Golfe de Fos. Document technique C.N.E.X.O. 14pp.
19. ANONYME, 1979. Etude de l'état des eaux de l'Etang de Berre et du Golfe de Fos. Laboratoire d'Hydrologie et de Molysmologie aquatique. S.P.P.I..
20. AUBERT et al, 1979/1980. RIOM. Métaux lourds en Méditerranée.
21. RAMADE A., 1981. Impact du transit sur la production phytoplanctonique et certains paramètres de la biomasse dans les circuits de refroidissement de la centrale de Martigues-Pontheau. 2e journées thermo-écologie pp.589-607.
22. BOURGADE-LE B., 1981. Effet des chocs mécaniques, thermiques et chimiques sur le phytoplancton à la centrale de Martigues-Pontheau. 2e journées de thermo-écologie pp.557-571.
23. GAUDY R. et MOATTI B., 1978. Etude de l'impact du transit sur le zooplancton. E.D.F. n°E-1958.
24. ARFI et al, 1981. Gestion Ecologique des ressources en eau. Cartographie dynamique de milieux marins littoraux soumis à des pollutions telluriques et à des aménagements par l'homme. ASP-PIREN n°3.
25. KIM, 1981. Le phytoplancton de l'étang de Berre : composition spécifique, biomasse et production ; relations avec les facteurs hydrologiques, les cours d'eau afférents et le milieu marin voisin (Méditerranée nord-occidentale). Thèse Doct. ès. Sc., Univ. Aix-Marseille II : 243pp.
26. ANONYME-G.D.F., 1982. Terminaux méthaniers de Fos-sur-Mer. Etude du milieu marin. G.D.F. 6 volumes.
27. BEKER B., ARFI R. et BLANC F., 1982. Evolution des populations



phytoplanctoniques dans le Golfe de Fos et l'étang de Berre en 1981.  
Données RNO : pp38.

28. S.P.P.P.I. 1972 à 1982. Rapports et procès-verbaux des réunions  
du S.P.P.P.I. SPPPI - information zone Fos-Etang de Berre.

29. RNO - 1974 à 1982. Bulletins du RNO.

30. METEOROLOGIE NATIONALE, 1976. Campagne météorologique à FOS-BERRE  
juin 1975. Rapport technique, Direction Régionale du Sud-Est. Conven-  
tion DMN/75/592. pp.66.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE VI

1. AUGIER H, GILLES G, RAMONDA G, 1976. Recherche sur la pollution par le mercure dans le golfe de Fos : comportement des phanérogames marines de deux stations-tests par rapport à celles du parc national de Port-Cros. Journ. Etud. Pollut. Split, CIESM, 3 : 93-94.
2. AUGIER M, GILLES G, RAMONDA G, 1978. Recherche sur la pollution mercurielle dans le golfe de Fos (Méditerranée, France). Degré de contamination par le mercure des phanérogames marines Posidonia oceanica Delile, Zostera nolti Horneman et Zostera marina (L.). Rev. int. Océanogr. méd. 51-52 : 55-69.
3. BELLAN-SANTINI D, 1980. Relationship between populations of Amphipods and pollution. Mar. Poll. Bull. vol. 11 : 224-227.
4. BELLAN-SANTINI D, 1981. Influence des pollutions sur le peuplement des Amphipodes dans la biocénose des Algues photophiles. Téthys 10 (2) : 185-194.
5. BELLAN G, 1980. Annélides Polychètes des substrats solides de trois milieux pollués sur les côtes de Provence (France) : Cortiou, Golfe de Fos, Vieux-Port de Marseille. Téthys 9 (3) : 267-278.
6. BELLAN-SANTINI D, DESROSIERS G, 1976. Distribution du benthos de substrat dur dans un golfe soumis à de multiples pollutions (golfe de Fos). III° Journées Etud. Pollutions, Split, CIESM : 153-157.
7. BELLAN-SANTINI D, DESROSIERS G, 1976. Action d'un rejet thermique sur le zoobenthos installé sur substrat dur (site de Ponteau). in Journées de la thermoécologie centre océanologique de Bretagne. 15-16 nov. 1976. EDF Direction Equip. : 235-250.
8. BELLAN-SANTINI D, DESROSIERS G, 1977. Action du rejet thermique de l'usine de Martigues-Ponteau sur les peuplements de substrats durs à dominance de zoobenthos dans la partie supérieure de l'étage infralittoral. Téthys, 8 (1) : 83-92.
9. BELLAN-SANTINI D, HARMELIN J.G, HONG J.S., 1980. Influence d'un gradient de pollution à dominance industrielle sur la faune des fonds de concrétionnement de type coralligène. V° Journées Etud. Pollutions : 771-778. Cagliari. CIESM.
10. BIANCHI A, 1973. Variations de la concentration bactérienne dans les eaux et les sédiments littoraux. Mar. Biol., 22 (1): 23-29.

11. BODOY A, PLANTE-CUNY M.R, 1980. Evaluation simultanée des biomasses et productions primaires phytoplanctoniques et microphyto-benthiques en milieu côtier (côte SW du golfe de Fos). C.R. Acad. Sci. Paris, 290 (série D) : 667-670.
12. DESROSIERS G, 1977. Contribution à l'étude de l'influence de la pollution sur les peuplements des substrats durs dans le golfe de Fos. Thèse 3ème Cycle, Univ. Aix-Marseille II. 93 pp. Océanographie biologique.
13. DESROSIERS G, BELLAN-SANTINI D, BRETHERS J.C, 1982. Evolution spatio-temporelle des peuplements de substrats rocheux superficiels dans un golfe soumis à de multiples pollutions (golfe de Fos, France). Tethys, 10 (3) : 245-253.
14. DINET A, NODOT C, VITIELLO P, VIVIER M.H, 1982. Impact d'un effluent thermique sur une communauté de copépodes harpacticoïdes benthiques Tethys, 10 (4) : 355-363.
15. EMIG C, 1965. Contribution à l'étude des Phoronidiens et à la cartographie benthique du golfe de Fos. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume 52 (Bull. 3) 181-183.
16. EUGENE C, 1979. Epifaune des herbiers de Posidonies du littoral provençal dans des secteurs pollués et non pollués. Rapp. Comm. int. Mer Médit., 25/26 (4) : 213-214.
17. FEBVRE-CHEVALIER C, 1969. Etude bionomique des substrats meubles dragables du golfe de Fos. Téthys 1 (2) : 421-476.
18. DE GAILLANDE D, 1972. Le secteur de Port-St-Louis-du-Rhône : Etude préliminaire des peuplements benthiques de la zone littorale. Rapport SPPPI , 19 pages.
19. GAUTIER Y, 1957. Recherches sur les biocénoses benthiques des côtes de Camargue et du golfe de Fos. Rec. Trav. Stat. mar. Endoume, 22 (Bull. 13) 55-64, 1 carte.
20. HARMELIN J.G, 1981. Action différentielle des pollutions industrielles et domestiques sur les populations d'échinodermes des substrats durs de Provence. V° Journées Etud. Pollutions CIESM, Cagliari oct. 1980 : 671-678.
21. HARMELIN J.G, BOUCHON C, HONG J.S, 1981. Impact de la pollution sur la distribution des Echinodermes des substrats durs en Provence (Méditerranée Nord Occidentale). Tethys, 10 (1) : 13-36, fig. 1-9.

22. HARMELIN J.G, HONG J.S, 1979. Données préliminaires sur le peuplement d'un fond de concrétionnement soumis à un gradient de pollution. I. Généralités. Rapp. Comm. int. Mer Médit., 25/26 (4) : 173-174.
23. HARMELIN J.G, HONG J.S, 1979. Données préliminaires sur le peuplement d'un fond de concrétionnement soumis à un gradient de pollution. 2. Faune bryozoologique. Rapp. Comm. int. Mer Médit., 25/26 (4) : 175-177.
24. HONG Jae Sang, 1980. Etude faunistique d'un fond de concrétionnement de type coralligène soumis à un gradient de pollution en Méditerranée nord-occidentale (golfe de Fos) . Univ. Aix Marseille II, thèse 3ème cycle Océanologie : 1-137 + 1-108 phot 1-8.
25. MASSE H. 1972. Contribution à l'étude de la macrofaune de peuplements des sables fins infralittoraux des côtes de Provence, III l'Anse de Verdon, IV l'Anse de Saint Gervais (golfe de Fos). Téthys 3 (2), 1971 283-319.
- 25 b. NIENCHESKI L.F, 1982. Utilisation de Mytilus galloprovincialis comme indicateur de pollution du littoral méditerranéen français par les composés organochlorés et les métaux lourds. Thèse de 3ème Cycle Océanologie Aix-Marseille II.
26. PAULUS M, MARS P, 1941-42. Guide malacologique des environs de Marseille. Bull. Mus. Hist. nat. Marseille, 1 (1) : 47-66, (4) : 227-247 (1941) ; 2 (2) : 71-120 (1942).
27. PICARD C, 1972. Les peuplements de vase au large du golfe de Fos. Téthys 3 (3), (1971) : 569-618.
28. ROMANO J.C, 1972. Les peuplements benthiques dans la zone centrale du golfe de Fos. Rapport SPPPI : 18 p.
29. SALEN-PICARD C, 1972. Les peuplements benthiques de l'est et du sud du golfe de Fos. Rapport SPPPI : 25 p.
30. SALEN-PICARD C, 1975. Les peuplements circalittoraux des substrats meubles du golfe de Fos. Evolution entre 1972 et 1975. Rapport SPPPI : 20 p.
31. SALEN-PICARD C, 1981. Evolution d'un peuplement de vase terrigène côtière soumise à des rejets de dragages dans le golfe de Fos. Téthys 10 (1) : 83-88.
32. SALEN-PICARD C, 1982. Contribution à l'étude dynamique des peuplements marins des substrats meubles : les Peuplements macrobenthiques circalittoraux soumis à l'envasement dans la région marseillaise. Thèse Univ. Aix Marseille II : 265 pp.

33. SALEN-PICARD C, 1983. Schémas d'évolution d'une biocénose macrobenthique de substrat meuble. C.R. Acad. Sci. Paris, (Sér. 3) 296 : 587-590.
34. STORA G, 1975. Etude des peuplements benthiques littoraux du golfe de Fos. Rapport SPPPI, 22 p.
35. STORA G, 1982. Recherches de bionomie descriptive et expérimentale (in vivo et in vitro) dans quelques biotopes littoraux soumis à des variations naturelles ou artificielles des conditions du milieu (notamment dans l'étang de Berre et le golfe de Fos). Thèse Docteur d'Etat Sciences Marseille II.
36. STORA G, ROMANO J.C, 1980. Influence de la construction et l'exploitation d'un complexe portuaire et industriel sur la distribution et l'évolution des peuplements benthiques littoraux d'un golfe méditerranéen (golfe de Fos). Prog. wat. Tech. 2 (1) : 137-144.
37. TARDIEU P, 1974. Fos : 10 ans de travaux. 100 millions de mètres cubes dragués.
38. TRUE-SCHLENZ R, 1965. Données sur les peuplements de sédiments à petites phanérogames marines (Zostera nana Roth et Cymodocea nodosa Ascher-son) comparés à ceux des habitats voisins dépourvus de végétation. Rec. Trav. Stat. mar. Endoume, 39 (55) : 95-125.
39. VERLAQUE M. 1976. Etude de l'impact du rejet thermique de Martigues-Ponteau sur le macrophytobenthos. Contrat EDF. MGB 1805. UER Sciences de la Mer et de l'Environnement de Luminy. Impr. Offset de Luminy. Univ. Aix-Marseille II : 159 pp.
40. VERLAQUE M, 1977. Impact du rejet thermique de Martigues-Ponteau sur le macrophytobenthos. Téthys 8 (1) : 19-46.
41. VERLAQUE M, 1977. Etude de peuplement phytobenthique au voisinage de la centrale thermique de Martigues-Ponteau (golfe de Fos, France, Méditerranée). Univ. Aix-Marseille II. Thèse 3ème Cycle : 172 pp.
42. VERLAQUE M, BOUDOURESQUE C.F, 1977. Le peuplement algal au voisinage de la centrale thermique de Martigues-Ponteau (golfe de Fos, France) : le nombre d'espèces par relevé. Rapp. CIESM, 24 (4) : 185-188.
43. VERLAQUE M, GIRAUD G., BOUDOURESQUE C.F, 1981. Phytobenthos de la zone de décollement de la tache thermique d'une centrale électrique méditerranéenne. Botanica Marina, 24 : 69-87.