3420 f202 - BLA-R

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS

LABORATOIRE DE GEOLOGIE MARINE ET DE SEDIMENTOLOGIE APPLIQUEE

CENTRE D'OCEANOLOGIE D'ENDOUME

ET CENTRE UNIVERSITAIRE DE LUMINY

13288 MARSEILLE CEDEX 2

Reçu le 17 NOV 1975

RIVACES OR

RECHERCHES DE SÉDIMENTOLOGIE APPLIQUÉE AU LITTORAL DU DELTA DU RHÔNE, DE FOS AU GRAU DU ROI



J. BLANC

Professeur de Géologie marine et Sédimentologie appliquée

GROUPE AMÉNAGEMENT DU LITTORAL



Contrat C.N.E.X.O. 75/1193
Equilibres sédimentaires littoraux Sud Camargue

# CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS LABORATOIRE DE GEOLOGIE MARINE ET DE SEDIMENTOLOGIE APPLIQUEE CENTRE D'OCEANOLOGIE D'ENDOUME ET CENTRE UNIVERSITAIRE DE LUMINY 13288 MARSEILLE CEDEX 2

RECHERCHES DE SÉDIMENTOLOGIE APPLIQUÉE AU LITTORAL DU DELTA DU RHÔNE, DE FOS AU GRAU DU ROI

#### J. BLANC

Professeur de Géologie marine et Sédimentologie appliquée

Contrat C.N.E.X.O. 75/1193
Equilibres sédimentaires littoraux Sud Camargue

### - SOMMAIRE

1	Introduction aux recherches en Basse Camargue : le delta du Rhône et son évolution, travaux antérieurs, objet du programme littoral	1
II	Le domaine marin : milieu physique, types de fonds, dynamique	7
III	La zone du Grau du Roi, le passage aux plages languedo- ciennes	20
IV	La "marina" de Port Camargue et ses annexes	21
V	Zone au Nord de la Pointe de l'Espiguette	23
<b>VI</b>	De la Pointe de l'Espiguette au Rhône Vif	25
VII	Le débouché du Rhône Vif et ses abords	26
VIII	Le littoral menacé de la Petite Camargue	28
	Le problème des défenses entre le Rhône Vif et le Grau d'Orgon	30
IX	Le débouché du Petit Rône	31
X	Erosion littorale aux Saintes Maries de la Mer	32
XI	Une aire de colmatage rapide : la zone de Beauduc	36
XII	Une érosion paradoxale dans le delta : le rivage de Faraman	39
XIII	La plage de Grande Palun	44
XIV	Le débouché du Grand Rhône au Grau de Roustan	45
χV	Le they de la Gracieuse	48
XVI	Le Sud du golfe de Fos, zone de colmatage rapide	52
XVII	Les bilans sédimentaires	54
XVIII	Conclusions	59
	A - L'évolution du littoral de la Camargue	59
	B - Tableau récapitulatif	64
RTRITOG	RAPHTE	65

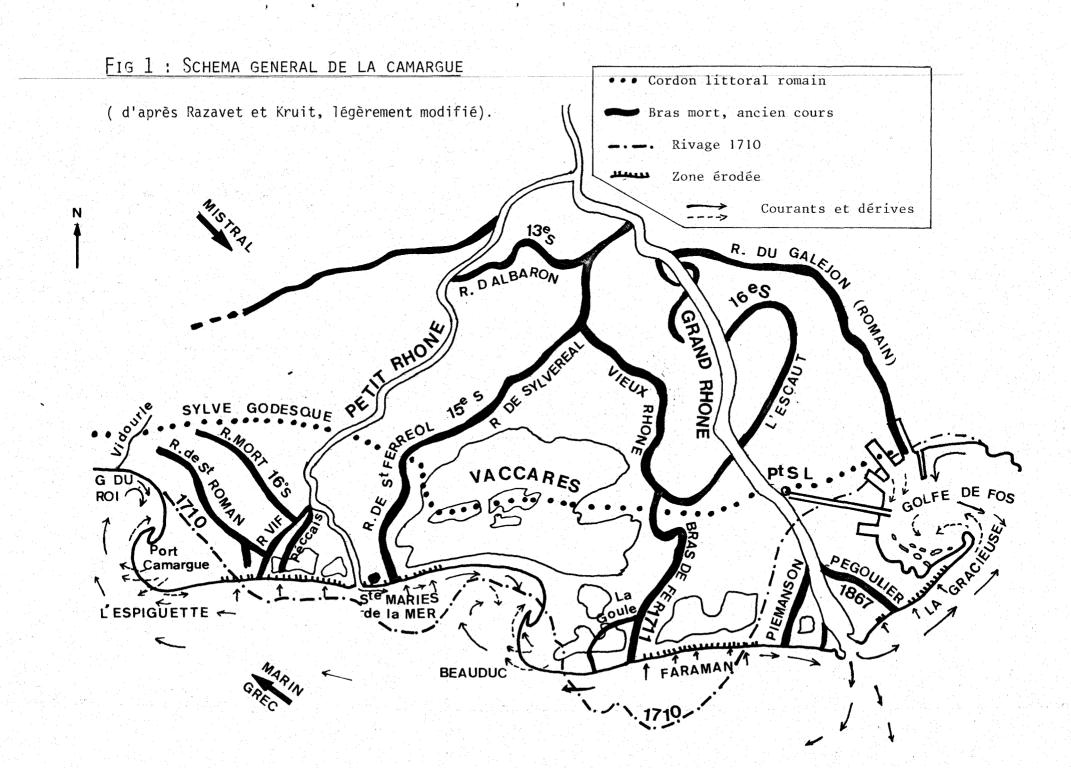
#### I - INTRODUCTION AUX RECHERCHES EN BASSE CAMARGUE.

#### A - Le delta du Rhône et son évolution.

Le delta du Rhône est caractérisé par une évolution complexe accompagnée de la migration incessante de bras majeurs et secondaires. Ainsi ce delta, assez conforme en ses grandes lignes, au modèle théorique défini par Gilbert, s'est étendu dans le golfe de Fos (Bras du Galéjon, fig.1); cf. "Fosses Mariennes" à l'époque romaine, vers l'étang de Mauguio, au contraire, durant le haut Moyen-Age, aux XVe et XVIe s., nous noterons un ensemble deltaïque évolué limité aux émissaires occidentaux (Rhône de St Roman, R. "mort", R. de Sylvéréal et de St Ferréol, bras d'Albaron, dès le XIIIes., plus à l'Est, bras de l'Escaut, au XVIe, se prolongeant par le Bras-de-Fer (ou Vieux Rhône), actif au XVIIIe s.

Dès le 19eme s., le delta acquiert une physionomie proche de l'actuelle. Le Grand et le Petit Rhône sont nettement individualisés; le Rhône Vif, limitant à l'Ouest le delta de Gilbert "du deuxième ordre" constitué par la Petite Camargue, est abandonné ainsi que le Rhône dit de St Ferréol. Au 18eme s., l'abandon du Rhône Vieux, ou Bras-de-Fer, fait déplacer le flux principal vers le golfe de Fos. Alors le débouché du Grand Rhône montre des lobes en progression très rapide axés aux émissaires de Piémanson, grau de Roustan et Pégoulier (1867). Enfin, sous l'influence d'interventions humaines, les bras de Piémanson et de Pégoulier sont abandonnés et le grau de Roustan constitue actuellement l'émissaire majeur.

L'évolution des rivages est conforme à la complexité géométrique des émissaires. Au cours des temps, depuis les anciens cordons littoraux sableux et coquilliers, réalisant le rivage romain, dit de la "Sylve Godesque" (fig.1), les rivages de la Basse Camargue ont montré une progression parmi les plus rapides observées dans le monde (Grand Rhône, promontoires deltaïques du Vieux Rhône, à Faraman, et du Rhône de St Férréol, aux Ste Maries de la Mer). Cette progression très active est paradoxalement accompagnée de vives et rapides érosions du rivage. Cet antagonisme dynamique se poursuit à l'époque actuelle et pose de multiples problèmes concernant l'aménagement du rivage, les installations portuaires et la protection d'agglomérations et du littoral camarguais. L'objet de ce travail, à la demande du C.N.E.X.O. (Département 3), a été d'en préciser les mécanismes par l'analyse des situations passées et actuelles et de proposer des mesures de protection à court et moyen terme.



Ces recherches, réalisées en 1974 et 1975, doivent beaucoup à C. Duboul-Razavet et C. Kruit. A partir de 1953, ces auteurs, par une étude très détaillée des sites camarguais, établissement des mécanismes fondamentaux dont l'importance sera mainte fois soulignée dans ce mémoire : rôle essentiel des contre-courants de baies, absence de courants permanents au rivage mais, au contraire, instabilité marquée par un régime de transferts alternants en fonction du vent dominant, présence de courants compensateurs au niveau du fond dont la vitesse s'accroît en fonction de la pente sous-marine, existence de "rip-currents" à Faraman, importance de la charge des eaux en transit et reprise immédiate de l'érosion marine, malgré des pentes souvent très faibles, dès que cette dernière s'abaisse au-dessous d'un seuil critique (cas du Petit Rhône, et, actuellement, du Grand Rhône).

Les recherches de C. Duboul-Razavet (1955) ont également porté sur des sites tels que les Pointes de l'Espiguette et de la Gracieuse, antérieurement aux aménagements récents de Port Camargue et de Fos. Parmi de nombreux résultats, il est possible d'en dégager les idées suivantes :

- la divergence des orthogonales accompagnée du pivotement des houles réfractées correspondent à un amortissement de l'énergie et à la formation de flèches et de "crochons" sableux.
- alternance des zones érodées et des rivages engraissés tout au long du littoral. Ainsi, la Pointe de l'Espiguette apparaît comme la "réplique frappante de la pointe de Beauduc". La progression mesurée antérieurement à 1935, avait été évaluée à 10 m/A.
- rôle des déferlements obliques et des rides sous-marines ramifiées se dirigeant vers le grau du Roi et le grau d'Orgon, pointe de Beauduc, etc...

#### B - Travaux antérieurs.

En 1870, C. Lentheric décrit le littoral d'Aigues Mortes puis, en 1905, apporte d'intéressantes observations hydrologiques sur le Rhône. En 1940, F. Benoît relie les données archéologiques avec la situation du rivage à l'époque grecque, notamment pour la zone occidentale du delta.

Les premières observations géomorphologiques sur le delta remontent à R.J. Russel (1942) suivies par un ouvrage de J.H. van Andel (1950) sur les minéraux transportés par le Rhône. Ces <u>recherches préli</u>minaires sont complétées par des travaux de A. Rivière, A. de Rouville,

A. Jullien et C. Duboul-Razavet (1951) sur la défense des côtes, à Faraman. En 1952, A. Bonnet et C. Duboul-Razavet étudient le Quaternaire de la Camarque.

Dès 1955 commence l'ère des <u>recherches détaillées</u> sur l'ensemble du delta. Citons :

- en 1955, la thèse de C. Kruit portant essentiellement sur la granulométrie, la sédimentologie s.s. et la microfaune. Les premiers travaux sous-marins sont entrepris.
- 1956 : l'ouvrage fondamental est réalisé par la thèse de C. Duboul-Razavet sur l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône.
- 1957 : Y. V. Gautier entreprend l'étude bionomique des fonds meubles tandis que les dépôts sableux sous-marins sont examinés en 1957 et 1959 par L.M. van Straaten.
- Après une brève étude de G. Denizot (1961), R. Lagaaij et Y.V. Gautier (1965) établissent un rapport entre la fréquence et la nature des Bryozoaires et les taux de sédimentation. Les premières cartes des faciès sous-marins sont établies.
- en 1969, F. Blanc, H. Chamley et M. Leveau étudient la répartition des minéraux argileux, les caractères physiques des flux turbides ainsi que le mélange des eaux rhodaniennes aux eaux marines. Durant la même année, Febvre-Chevalier cartographie les associations biologiques benthiques des fonds meubles du golfe de Fos.

L'année 1970 verra des travaux variés dans les domaines de la courantologie du golfe de Fos (J. Izaute), l'étude des anciens chenaux rhodaniens et des corps sédimentaires (E. Oomkens), les flux turbides et taux de sédimentation au débouché du Grand Rhône : grau de Roustan (H. Pauc et H. Got).

Après 1970, nous entrons, jusqu'à l'époque actuelle, dans une dernière phase, celle des <u>études détaillées spécifiques</u>, liées à des thèmes très précis :

- 1971 : recherches de S.O.G.R.E.A.H. sur le golfe de Fos et la protection de la Petite Camargue.
- 1972 : Monaco A., Thommeret J. et Y., datent au radiocarbone les formations quaternaires récentes du golfe du Lion tandis que E. Vernier exécute la première cartographie sédimentologique sousmarine du golfe de Fos et détaille l'évolution récente du they de la Gracieuse en relation avec les aménagements du golfe de Fos.

Durant cette même année, C. Picard complète la cartographie, sous-marine des communautés biologiques benthiques; Arnoux M. et Chamley H. examinent les relations entre la nature des minéraux argileux et les problèmes de pollution, notamment pour les détergents.

- 1973 : M. Guy apporte des études précises de photo-interprétation sur le delta du Rhône et le golfe du Lion. En 1973 également, J.C. Aloisi présente une synthèse sur la sédimentation récente du précontinent languedocien suivie, en 1975, par des recherches sur la sédimentation et la géochimie du golfe du Lion et de la zone du grau du Roi.

En 1974, les données des satellites permettent l'établissement d'une cartographie automatique d'une portion du delta (Fontanel A., Guy M. et Lallemand C.).

En 1975, les recherches se poursuivent à une cadence accrue pour la zone considérée :

- M. Roux et E. Vernier établissent une nouvelle cartographie afin de préciser l'évolution récente du golfe de Fos. En relation avec le C.N.E.X.O., des recherches sont poursuivies avec P. Clairefond, A. Jeudy de Grissac et J. Blanc.
- L. Aubert, J.P. Brettmayer et N'Guyen Tan : télédétection par avion et satellite dans l'étude des pollutions marines.
- J.C. Aloisi, A. Monaco, J. Thommeret et Y. Thommeret, recherches sur l'évolution paléogéographique et quaternaire récente du golfe du Lion.
- J.C. Aloisi et J.M. Charlet, recherches sur la thermoluminescence des quartz détritiques transitant dans le golfe du Lion.
- J.C. Aloisi et A. Monaco : sédimentation infralittorale et pro-deltas nords méditerranéens.
- G. Bellaiche : origine et âge des levées sédimentaires profondes : cas du delta sous-marin du Rhône.

J'ai également utilisé, dans la présente étude, les travaux de l'école mississippienne qui, à la suite de Russel R.J., m'ont aidé à l'interprétation dynamique du delta du Rhône. Je citerai : Coleman J.M. et Wright L.D. (1974), Exon N.F. (1975), Mc Arthur D.S. (1969), Dolan R., Ferm J.C. et Mc. Arthur D.S. (1969), Dolan R. (1966), Waddall E. (1973), Wright L.D., Roberts H.H., Coleman J.M., Kupfer R.L. et Bowden L.W. (1973), Coleman J.M. et Gagliano S.M. (1965), Morgan J.P. (1963), etc... De ce fait les contacts et l'analyse des travaux des géologues "mississippiens" ont été déterminants pour l'étude du programme littoral envisagé.

#### C - Objet du programme littoral.

La présente étude (Contrat C.N.E.X.O. 75/1193 ; département 3) <u>a pour objet</u> :

- 1 : relevé cartographique des fonds marins ultérieurement à la phase majeure des aménagements récents. Définition des tendances évolutives de ces derniers et mesures de protection.
- 2 : délimitation et étude des zones menacées par l'érosion marine. Propositions pour des mesures de protection rapides ou différées.
- 3 : bilans sédimentaires, transferts et équilibres littoraux. Etude des zones de colmatage et sédimentation rapide.
- 4 : définition d'un périmètre de protection immédiate, rapprochée ou éloignée. Essai d'interprétation d'une évolution à long terme.

Au point de vue méthodologique, nous nous référerons aux prescriptions rapportées dans un ouvrage récent (1). L'analyse de missions photographiques aériennes rapprochées en noir et couleur (Ektachrome), I.R. ("fausses couleurs") et thermographie I.R. a permis de mieux diriger les recherches sur le terrain. Les travaux à la mer ont été effectués grace aux moyens du Centre d'Océanologie d'Endoume ou avec des embarcations légères. Il va de soi que des années de recherches seraient encore nécessaires afin de préciser mieux et résoudre la multitude des questions soulevées.

Ce mémoire ne résumera qu'en partie des recherches originales (et non achevées) dues à :

- M. Roux, Maître-Assistant Caboratoire de Géologie marine et Sédimentologie appliquée, Centre Universitaire de Marseille-Luminy), pour l'ensemble du golfe de Fos.
- E. Vernier, Assistant de Géologie au Centre d'Etudes Supérieure de Tuléar (Madagascar), pour le golfe de Fos et le they de la Gracieuse.
- P. Clairefond (doctorat de 3ème cycle) pour le golfe des Saintes Maries de la Mer.

La part revenant à ces auteurs sera soulignée dans cet exposé et il m'est agréable aujourd'hui de les remercier pour leur aimable et fructueuse participation que je souhaite voir se poursuivre.

<sup>(1)</sup> Blanc J., 1975. Recherches de sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection. Centre Nat. Exploit. Océans., chap.1: 164 p.

Ces recherches doivent beaucoup à l'appui du profresseur J.M. Pérès, Membre de l'Institut et Directeur du centre d'Océanologie d'Endoume, à J. Picard, Directeur de recherches au C.N.R.S., à R.L. Kupfer, de l'Université d'Etat de Bâton Rouge (Louisiane, U.S.A.), à la direction générale du C.N.E.X.O. et par ailleurs à MM. Toussaint, Chomel de Varagnes et Lardeau, à M. L. Gleize, Directeur de l'exploitation des Salins du Midi, aux responsables locaux de l'I.G.N. (Aix-en-Provence) et I.G.N. - St Mandé, à R. Dumas, Ingénieur géologue à la Compagnie des Salins du Midi (Salins de Giraud), pour son accueil et les renseignements inédits de qualité mis sans hésitation à notre disposition, à Mmes Franza-Acquaviva, Froget et Weydert pour leur contribution à la réalisation de ce travail.

Nous exprimerons enfin notre gratitude envers les équipages des chalutiers "Alciope" et "Antédon" du Centre d'Océanologie d'Endoume (Marseille).

#### II - LE DOMAINE MARIN.

#### A - Le milieu physique.

#### 1°) Régime des vents :

Le littoral camarguais considéré dans son sens large, du cap Couronne, à l'Est, - au chenal du Vidourle (Grau du Roi\' - à l'Ouest, constitue une zone <u>très exposée</u> pour la majorité des régimes météorologiques. Contrairement à la côte rocheuse orientale de la Provence, il n'y a point d'abris naturels et le secteur demeure l'un des plus dangereux du littoral méditerranéen. Par gros temps, on ne peut tabler sur aucun mouillage correct entre les ports de Fos et du grau du Roi (dont le chenal, profond de 4 m, est accessible aux chalutiers). (1).

On distinguera trois centres d'observation situés de l'Ouest à l'Est : les durées des régimes seront exprimées en journées par an (% j/A).

- a Carnon Grau du Roi.
- . NW : 43 % j/A
- . NE : 16 % j/A
- . N ou Tramontane : 5 % j/A

Ces trois régimes représentent les vents du secteur N. s.l. et correspondent à une majorité cumulée de 64 % j/A, comprenant plus de 12 % j/A où le vent montre une vitesse dépassant 15 noeuds occasionnant alors une dérive superficielle moyenne de 0,11 m/sec (ou 6,6 m/mn). De rares "pointes" à 55 n (plus de 100 km/h) donnent des dérives de 0,42 m/sec (ou 25,2 m/mn).

Le deuxième groupe comporte :

- . SE (vent "marin" ou encore nommé : "vent grec") : 12 % j/A.
- . S ou Sirocco : 6 % j/A à 4 % j/A.
- . SW : 6% J/A à 10 % J/A
- . autres vents issus des secteurs W ou E : quelques / j/A
- . régimes calmes : 7 % j/A
- b <u>La Tour du Vallat</u> (Camargue) : les relevée effectués par
   P. Clairefond montrent :
- . NW : 17 % j/A
- . N et NNW (Tramontane) : 15 % j/A

<sup>(1)</sup> Y compris le port de plaisance récent de Port Camargue.

- . W : et dérivés : 19 % j/A
- . E et S.SE (vents "marins") : 19 % j/A

Ces vents déterminent deux systèmes de vagues observés aux phares de Beauduc et de la Gacholle :

- 1) système des "houles" W.SW à S.SW : 50,50 % du total des durées d'observations (moyenne annuelle).
- 2) système des "houles" SE à S.SE : 26,60 %. Le reste étant représenté par des vagues "croisées" et des ondes d'azimuth variable.

#### c - Marignane - Fos:

. NW : 35 % j/A : régime dominant avec 5 % j/A à des vitesses de Mistral supérieures à 30 noeuds et 9 % j/A à des vitesses comprises entre 15 et 30 n.

Lors des périodes estivales, l'action du Mistral s.l. et des températures diurnes élevées, amènent un <u>taux d'évaporation</u> très important atteignant 280 mm/m2 pour le seul mois de juillet, d'où l'implantation rentable des salines (compagnie des Salins du Midi, Salins de Giraud).

#### 2°) Vagues et houles :

Tous les sites sont très exposés pour la totalité des régimes Le seul abri est réalisé par le fond du golfe de Fos par régime W.SW.

Hauteur des vagues : le littoral de Camargue est le siège de spectaculaires déferlements liés à la présence d'une ou plusieurs rides sableuses épousant le tracé des rivages. Pour le cas général on observe deux rides littorales (RL) ; à Beauduc, des déferlements successifs correspondent à la présence remarquable de 6 RL échelonnées.

Par gros temps le "jet de rive" (uprush) envahit les hauts de plage jusqu'aux lignes de dunes qu'il affouille (niveaux de tempêtes). La pénétration peut atteindre jusqu'à 80 et même 100 m en certains cas ; de même, nous soulignerons l'immersion temporaire du they de la Gracieuse. La surélévation du plan d'eau atteint + 0,45 m et peut se combiner à une "marée barométrique" amenant des maxima fugaces et très érosifs à +0,70m. Ainsi, du sable marin, des débris, troncs d'arbres et bouées, se trouvent charriés dans les marécages d'arrière plage, les "sansouires" et les "couloirs" entre les dunes et par où s'engouffre le vent. Les étangs sont alors en communication temporaire et directe (1) avec la mer.

<sup>(1)</sup> on notera une communication permanente plus profonde d'origine phréatique.

A Faraman, Beauduc, en Petite Camargue, la présence de pseudozones "supratidales", exceptionnellement immergées (quelques jours par
an) et larges de plusieurs centaines de mètres montrent des étendues
planes à "laminites", "algal-mat", "mud-cracks" et croûtes de sel.

Les régimes de fortes tempêtes peuvent correspondre à des hauteurs (H) de 8 m et davantage, pour des périodes (T) de 11 à 12 sec (observations au houlographe du cap Couronne). En abordant le rivage, ces hauteurs diminuent mais des régimes où H = 4 ou 5 m, ne sont point rares. Le brassage du sédiment s'avère général sur tout le précontinent et le rivage peut reculer de plusieurs mètres en quelques heures. A ces régimes s'observent les <u>ruptures</u> temporaires de cordons sableux à la Gracieuse et en Camargue occidentale.

Les tempêtes maximales observées doivent être comprises pour des T entre 8 et 10 sec. et des H au large, de 4,5 à 6 m (L = 80 à 150 m au large, 40 à 60 m près du rivage, où la profondeur (z) est égale à 5 m). Les vents correspondants soufflent alors entre 30 et 45 noeuds et même davantage. Tous les sédiments avoisinants sont remaniés jusqu'à des profondeurs pouvant dépasser 40 m. Les fréquences annuelles moyennes de ces régimes sont de 3 à 7 j/A cumulées.

Les rivages exposés reculent et le sédiment dispersé est repris par le système double des courants sagittaux ("rip-currents") et des "long-shore currents". Les ablations ne sont pas toujours compensées en temps utile lors du retour aux périodes calmes.

Le <u>transit littoral du matériel sableux se manifeste essen-</u>
tiellement par mer "forte" (T = 7 sec), "grosse" (T = 5 sec) et "moyenne"
(T = 4 sec). Les hauteurs de vagues décroissent alors rapidement, de
4 m à 1 m.

Au moment où le régime atteint T=4 ou 4,5 sec, les ablations et colmatages se compensent mutuellement et le rivage "moyen" tend à se stabiliser malgré des déferlements en volute spectaculaires.

De lents transferts se poursuivent ainsi que les actions de lévigation à la zone du <u>swash</u> accompagnées de concentrations locales de minéraux denses. Pour ces régimes, propices aux observations partielles, les vitesses du vent sont généralement inférieures à 10 noeuds et l'évolution ralentie des plages ne pose aucun problème.

Les courants de dérive liés aux vents sont rapides. On pourra calculer les valeurs suivantes où :  $V = \frac{W. \ 0.013}{\sqrt{\sin \Phi}}$ 

V - vitesse du courant de dérive en m/sec

W = vitesse du vent, en noeuds ou en m/sec.

• : latitude du lieu : valeur moyenne retenue = 43°25'N.

W = 45 n. (85 km/h) V = 0.34 m/sec = 20.40 m/mn

V = 40 n. (75 km/h) V = 0.31 m/sec = 18,60 m/mn

. W = 30 n. (57 km/h) V = 0.23 m/sec = 13.80 m/mn

. W = 20 n. (36 km/h) V = 0.15 m/sec = 9.00 m/mn

. W = 10 n. (19,5 km/h) V = 0.08 m/sec = 4.80 m/mn

V = 5 n. (9.5 km/h) V = 0.02 m/sec = 1.20 m/mn

Les contrôles effectués sur des flotteurs repérés de la terre, par vents faibles (5 à 10 n) et moyens (jusqu'à 30 n) montrent fréquemment des écarts, en plus ou en moins, atteignant 7 à 20 % pour des fonds de 3 à 15 m. Au-delà, les valeurs mesurées au radar, par rapport aux balises fixes du grau de Roustan, montrent des données plus conformes à la théorie, dès que la profondeur s'accroît et que diminue l'influence du fond.

Par petits fonds, les modalités des pentes, les frottements, rafales, voire les sorties d'eaux douces directes (grau de Roustan) visibles au sondeur US, ou discrétes (émergences sous-marines phréatiques liées au Vieux Rhône (Bras-de-Fer), altèrent les valeurs théoriques de la dérive calculée. Il en est de même pour la formule H = 0,025 W², non conforme à la réalité par petits fonds.

Les jets de cartes lestées ou de fluoresceine n'offrant aucune prise et leur dérive par rapport à un point fixe littoral, suivie durant une dizaine de minutes, donne une appréciation du transfert des masses d'eaux assez voisine de la valeur théorique, en l'absence de gros défer-lements.

L'amortissement complet des fortes vagues moyennes paraît réalisé vers -42 m, c'est-à-dire en deçà de la limite de l'extension sous-marine des sables infra-littoraux.

<u>La vitesse des transferts littoraux</u>, liés aux vagues obliques est calculée d'après la formule de Larras où :

$$V = K$$
.  $\sqrt[3]{\frac{g \cdot H^2}{T}}$ . i sin 2  $\alpha$ 

V = vitesse du transfert en cm/sec

H = hauteur des vagues obliques déferlantes

T = période

- i = pente moyenne de la plage (ici : 1/35, de la ligne du <u>swash</u> à la première ligne des rouleaux
- $\alpha$  = obliquité des vagues incidentes par rapport à la ligne de rivage, avant réfraction.
- K = 2,6 pour les fonds sableux fins.

Pour un régime de forte tempête, V=16,68 cm/sec, ou voisine de 10 m/mn (où T=8 sec, H=4,30 m au rivage,  $\alpha=25^{\circ}$ ). Considérons ainsi l'exemple d'un segment rectiligne de rivage, orienté EW, modèle fictif assez voisin de l'exemple de la Petite Camargue, au Sud de l'Etang des Salins.

La formule simplifiée du L.C.H.F. exprime la cubature C, en  $m^3$ , des matériaux en transit connaissant H de la houle en m. T en sec., a l'obliquité de l'onde par rapport à la ligne du littoral, t le temps de transit évalué en secondes (1 h = 3.600 sec et 1 journée = 43.200 sec.) Pour une "tempête annuelle moyenne", on posera : a = 25°, H = 3,5 m et T = 7 sec.

$$C = 10^{-3} \cdot H^2 \cdot T \cdot \sin \frac{7a}{4} \cdot t$$
  
 $C = 6.652.8 \text{ m}^3/\text{jour}$ 

Pour une année avec un régime "continu" fictif, bloquant 12 journées complètes avec des vents de vitesse supérieure à 30 n. (estimation modérée), on pourraît tabler une cubature moyenne de transfert de 79.833 m³, pour un tronçon rectiligne de rivage formé de sable fin.

A Port Camargue, j'ai estimé à 64.800 m³, la cubature de sable <u>annuellement</u> retenue par l'implantation de la jetée Sud, en ne retenant que la zone supérieure à l'isobathe 6 m. La cubature du sable réellement retenu apparaît supérieure.

Ajoutons les régimes moyens de H=3,5 m à H=1 m pour des vitesses de vent (W) inférieures à 30 n. Un régime "continu" fictif comprendrait alors 110 journées complètes ; la cubature concernée complémentaire serait égale à 27 % du stock mû par gros temps, soit environ 21.550 m³.

Le transfert moyen total au rivage serait alors proche de 101.380 m³/an. Le <u>transfert réel</u>, pour le rivage et la zone "<u>off shore</u>" doit être supérieure à cette estimation.

A titre de comparaison, indiquons les valeurs calculées de cubatures moyennes annuelles liées aux transferts :

- transit annuel à Lion-sur-Mer (Côtes de la Manche) : 50.000 m³
- Agadir: 400.000 à 450.000 m³ (L.C.H.F.)
- Pointe Noire (Congo): 400.000 m³ (L.C.H.F.)
- N. de l'Adour : 300.000 m<sup>3</sup> (L.C.H.F.)
- Giens Est, baie d'Hyères : 5.125 m³ (Blanc)

La relative modestie du transfert çamarguais (100.000 m³) peut être liée à l'absence de courants de marées et à la faiblesse relative actuelle de la charge sableuse rhodanienne, seule prise en compte.

#### 3°) Courants:

- 1 Courant géostrophique permanent : orienté de l'Est vers l'Ouest, il se manifeste en fait à 2 ou 3 milles n. du rivage proprement dit. Sa vitesse s'accélère au Sud de Beauduc mais se maintient, par beau temps (régime de référence), aux abords de 0,6 à 1 noeud. En juin 1975, en me basant par visées-radar sur les balises de Balancelle et de Roustan, j'ai mesuré au large (2 m.n.) une dérive de 8 m/mn soit 0,13 m/sec. Ce courant paraît s'éloigner du rivage au sud de la zone la plus occidentale (pointe de l'Espiguette).
- 2 <u>Contre-courants</u> résultant de circuits amorcés dans la baies et concavités du tracé littoral. Ces derniers se manifestent à proximité du rivage et interviennent dans la répartition des sédiments. On notera, de l'Ouest vers l'Est:
- le contre-courant du golfe d'Aigues-Mortes, dirigé de l'W vers l'E, c'est-à-dire de Carnon au Grau du Roi. Il contribue à l'épandage des pollutions vers le secteur de Port Camargue.
- le contre-courant du golfe des Saintes Maries de la Mer, se "renfermant" en direction de Beauduc et des Sablons.
- le contre-courant dit "de la Nerthe", défini par Minas et Castelbon, se dirigeant du Sud du golfe de Fos au Nord de la baie de Marseille.

Les vitesses de ces contre-courants sont assez faibles ; ils se trouvent, tout comme le courant général géostrophique, renforcés par les actions de la dérive liée aux vents des secteurs W, W.NW et NW.

- 3 <u>Les courants de dérive</u> proprement dits présentent un double régime :
- a) <u>régimes W, W.SW, W.NW et NW</u>: les dérives sont rapides : 30, parfois 40 m/mn, dirigées de l'Ouest vers l'Est. Elles s'accompagnent de l'amaigrissement inquiétant des plages de l'Espiguette, des Saintes Maries de la Mer et du they de la Gracieuse.
- b) <u>au contraire par régimes d'E, E.SE, SE</u>, les dérives se dirigent vers l'Ouest et compensent (partiellement) les ablations précédentes. Elles renforcent les circuits permanents précités. Par beau temps ou léger régime d'Est, j'ai mesuré au large (1,5 m.n) une assez forte dérive entrant dans le golfe de Fos, du cap Couronne vers Ponteau (0,41 m m/sec).
  - 4 Les influences rhodaniennes sont spectaculaires :

Le débit du Rhône évalué à l'étiage oscille entre 1.500 et 2.500 m³/sec, - pour 13.000 m³/sec lors des crues automnales. En 1957, van Straaten évaluait la charge rhodanienne moyenne à 5,45 millions de tonnes par an pour une vitesse de surface de 1 m/sec au chenal principal. Cette dernière estimation doit être actuellement diminuée.

Le "panache" des eaux douces, plus froides, issues du Grand Rhône, s'étale au Sud du grau de Roustan. Le contact très tranché est visible sur toutes les missions photographiques aériennes et les enregistrements thermographiques (IGN, satellite ERTS). A une distance du rivage de 2 à 3 m.n, le flux, primitivement dirigé au S.SE, subit l'influence du courant général et se trouve progressivement dévié vers l'Ouest. L'action des courants de dérive assure une homogénéisation assez rapide par brassage.

L'extension du "panache" demeure sous la dépendance des débits rhodaniens et des courants de dérive liés aux vents dominants. En hiver, par fortes pluies et crues, le flux rhodanien se comporte comme un "cold wall".

Les analyses par clichés infra-rouges ainsi que les mesures directes de températures et salinités montrent, en outre, une importante arrivée d'eau froide, discrète, en relation avec le drainage phréatique du Vieux Rhône ("Bras de Fer"), au Sud de Faraman et du grau de la Dent. Cette circulation "vestigiale", reprise momentanée d'un ancien drainage, amène des exurgences sous-marines diffuses au niveau des fonds sableux, de quelques mètres à -15 m. Cet étalement d'eaux froides denses est surmonté par les "volutes" du "panache" rhodanien, puis, par les eaux marines plus chaudes, "bloquées" par le tourbillon, en face des plages de Paulet et d'Arles (Blanc F., Chamley H., et Leveau M., 1969).

Pour le Petit Rhône se jetant à l'Ouest du golfe des Saintes Maries de la Mer, les renseignements sont moins précis. L'analyse des clichés en émulsions panchromatiques et infra-rouges, montre un "panache" se dirigeant nettement vers le SE, par régime W.NW, se diluant aux abords de Beauduc, à 1,5 mille nautique du littoral. Vers l'Ouest, le courant général dévie, à 3 m.n. du rivage, les eaux du Petit Rhône vers l'W.SW. Le côté occidental montre un "front" plus net, moins homogénéisé que vers le golfe de Beauduc. A 5 m.n. au Sud des Saintes Maries de la Mer, nous pouvons considérer que la dispersion des eaux de cet émissaire s'avère quasi totale.

#### 5 - Les données du satellite E.R.T.S. 1 :

Dans un récent travail, Fontanel, Guy et Lallemand (1974), de l'Institut Français du Pétrole, ont utilisé les représentations de cartographie automatique d'après les données du satellite E.R.T.S. 1 de

la N.A.S.A. (mission de juillet 1972). Le traitement numérique des images, obtenues à partir des enregistrements magnétiques effectués à bord du satellite, permet une interprétation quantitative et non plus qualitative, comme pour le cas de la photo-interprétation ordinaire (sans aborder ici la méthode des équidensités).

La "signature spectrale" des objets au sol, notamment pour la bande 5, (8-14  $\mu$ ; thermographie I.R.), permet de distinguer, après analyse texturale (analyse de l'image portant sur les points pris isolément) et homogénéisation, onze catégories comportant à la fois la nature des eaux et des terrains plus ou moins imbibés.

Les contrôles sur le terrain effectués par l'I.F.P. et par moi-même, en 1974 et 1975, permettent d'individualiser les objets suivants, où la cartographie automatique par satellite concorde bien avec les observations directes :

- 1 eaux littorales surmontant les rides et les sédiments du "prisme littoral".
- 2 sorties sous-marines d'eaux phréatiques de Camargue au large de Faraman, à l'Ouest de la pte de Beauduc et au niveau des horizons argileux sous-marins au Sud du grau d'Orgon et de l'Etang d'Icard.
- 3 dispersion des eaux du Petit Rhône vers l'Est et le SE, par beau temps, confirmant ainsi la direction du contre-courant de la baie des Saintes Maries de la Mer.
- 4 limite des eaux marines du large concernées par le courant général et individualisation d'une "zone intermédiaire", à limites irrégulières, au dessus des fonds vaseux et contournant le flux superficiel du Petit Rhône.

A une autre échelle, Aubert M., Breittmayer J.P. et N'Guyen Tan (1975), ont traité le flux rhodanien d'après les clichés de ERTS.1. L'examen a porté sur des séries obtenues avec des filtres MSS4 et MSS5 laissant passer les radiations entre 500 et 600 namomètres (n.m). Deux domaines d'investigation peuvent être disponibles :

- avec 500-600 n.m. : turbidité du flux fluviatile,
- -/avec 600-700 n.m. : pollution superficielle liée aux hydrocarbures.

La diffusion du flux rhodanien, par régime de Mistral (N.NW) a été suivie sur 150 km ("panache" ondulé et ramifié en deux branches). Le gradient superficiel de dessalure mis en évidence par la méthode des équidensités colorées, montre une largeur dépassant 80 km et dirigé vers le S.SE. Quant à la zone de forte turbidité liée à l'apport détritique minéral, elle suit l'influx dessalé et d'étend sur une aire dépassant légèrement l'épandage précité.

Les courants de décharge s'éloignant du littoral ne se manifestent que par gros temps, accélérant l'érosion des plages et la dispersion partielle des matériaux sableux. On les observe au Grau du Roi, côté occidental de la pointe de l'Espiguette, ancien débouché du Rhône Vif, littoral de la Petite Camargue, Faraman. Leur vitesse n'a pu être mesurée.

Plus au large, Arnoux et Chamley (1974), utilisant les résultats de la campagne "Fossète" (CNRS, 1972), navire océanographique "Noroît" du C.N.E.X.O., ont mis en évidence, au niveau du fond, des zones lessivées pauvres en phyllites fines et notamment en montmorillonite. Ces dernières s'orientent suivant des directions particulières :

- <u>perpendiculaires à la côte</u> et zone de -100 m où le précontinent présente une rupture de pente, là où Pérès et Picard ont dé ouvert des biotopes à Crinoïdes filtreurs de suspension, <u>aboutissement probable</u> du flux résultant de la dispersion au large.
- <u>parallèles à la côte</u>, suivant la direction du courant général vers -70 à -90 m, renforcé par le courant rhodanien (Furnestin et Allain, 1962), plus froid et plus dense.

#### B - Les types de fonds.

Les recherches effectuées par J.C. Aloisi, de 1973 et 1975, pour la zone occidentale sont complétées, à l'Est, par les travaux de Roux M. et Vernier E. (1972 à 1975). Parmi les facteurs essentiels régissant les types de fonds meubles actuels et sub-actuels, entrent en compte :

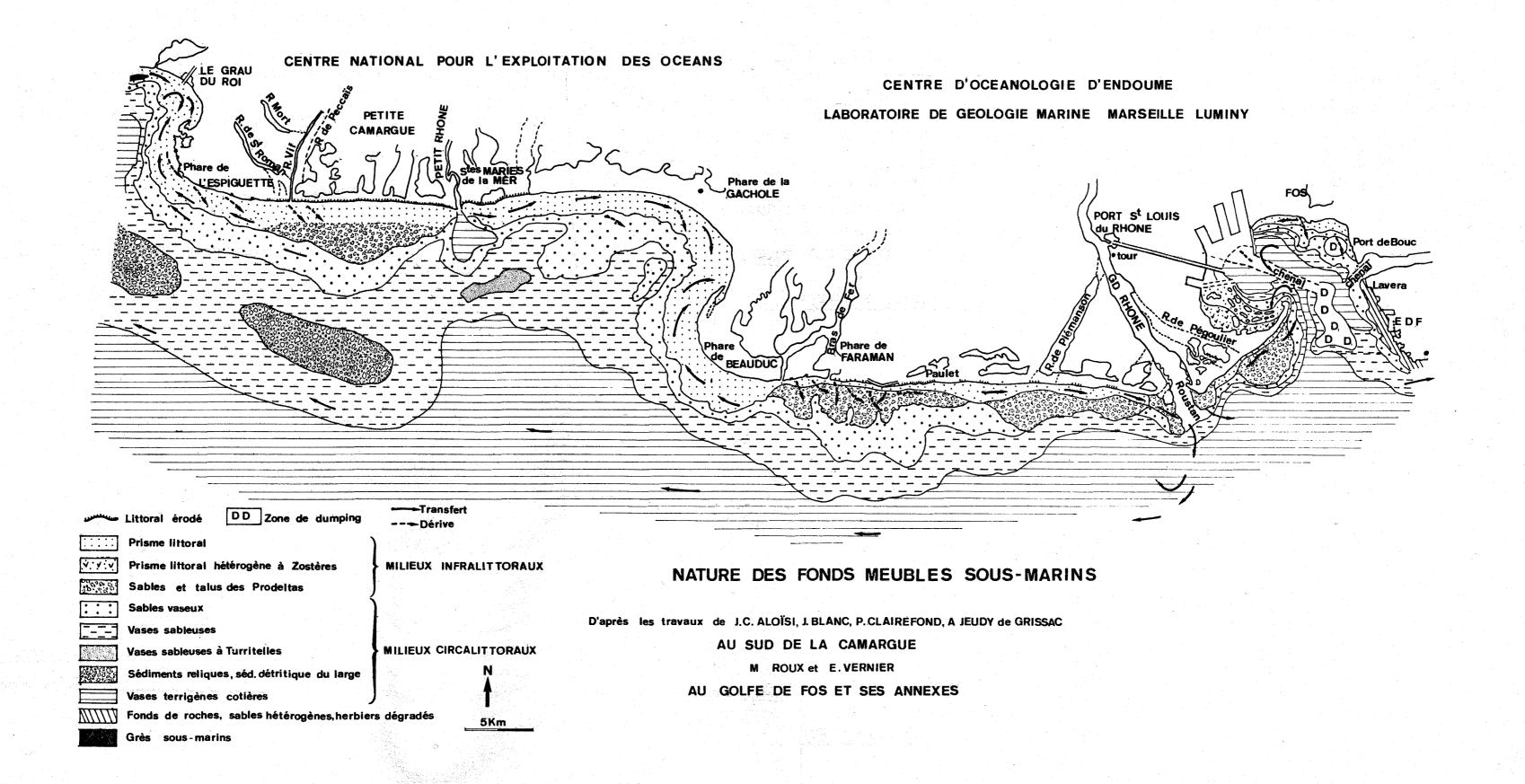
- la géomorphologie et l'évolution des émissaires rhodaniens,
- l'héritage géologique,
- les conditions hydrodynamiques,
- la nature des peuplements benthiques.

L'épaisseur du remplissage holocène, post glaciaire, est variable et demeure importante · 40 à 50 m à la Pointe de l'Espiguette (Aloisi), de 20 à 70 m au golfe de Fos et au they de la Gracieuse (travaux et sondages du Port autonome de Marseille). Des chenaux et thalwegs antérieurs sont colmatés, notamment en Languedoc et sous la flèche de la Gracieuse. On peut aussi noter des affleurements immergés :

- grès lithifiés à l'W du Grau du Roi et au S des Saintes Maries de la Mer
- bancs de vases palustres à roseaux, témoins d'anciens marécages recouverts par la mer, à l'W du Grau d'Orgon.

Quant aux faciès meubles, on observe les types suivants, en partant du large (fig.2):

1) Sables détritiques du large (SDL), "sables reliques" du Würm final, de -80 à -100 m, c'est-à-dire situés à l'extérieur et beaucoup plus au Sud que la zone considérée.



- 2) sables et graviers du "détritique côtier" (DC et SGDC):
  de -45 m à plus, mais s'étalant irrégulièrement jusqu'à -25 m à l'Est
  du golfe de Fos et au SW du Grau du Roi, au Sud de la Grande Motte,
  etc... Ces sédiments, fort hétérogènes et complexes, parfois recouverts
  de vase peuvent être mêlés à des 'heliques" infralittorales würmiennes,
  comme cela est parfois le cas en d'autres secteurs du littoral. Les
  faciès envasés du DC s'étendent dans le golfe de Fos et passent latéralement, à l'abri de la flèche de la Gracieuse, aux "sables vaseux de
  mode calme".
- 3) Le faciès des "vases terrigènes côtières" (V.T.C.), d'origine essentiellement rhodanienne, largement étalé par les flux d'origine fluviatile et les courants variés, demeure prépondérant et, depuis le post-glaciaire (7 à 8000 A.B.P.), continue à s'étendre largement sur le précontinent, envahissant les zones de moins en moins profondes. Un front net, véritable "mud-line", progresse dans les golfes de Fos et du Grau du Roi. La "mud-line" peut être située à des profondeurs variables ; elle peut s'étendre de -35, -40 m à seulement quelques mètres de fond (fig.2).
- 4) Des faciès mixtes : sables vaseux ou vases sableuses (1) débordent le détritique côtier et garnissent latéralement les extensions des pro-deltas actuels ou "fossiles" du Petit Rhône, de Faraman, du Grau de Roustan et de Balancelle (Rhône de Pégoulier). Ces faciès complexes sont en cours d'étude.
- 5) Les sables et "mattes" des herbiers à Posidonies sont absents dans le secteur considéré du fait de la turbidité des eaux, des pollutions et aménagements. On observe une mince et fragile frange d'herbiers à l'Est du golfe de Fos, bordant les rivages rocheux de Ponteau, les Laurons et les Ragues d'Arnette. Cet herbier a considérablement regressé depuis cinq années et il paraît voué à une rapide disparition (érosion mécanique, pollutions, hydrocarbures, aménagements et dragages, "dumping" et envasement général des V.T.C.).

Quant aux anciennes "mattes" relevées dans le golfe de Fos, elles ont disparu, enfouies sous les vases.

6) Sables côtiers actuels. Ils comprennent en fait plusieurs formations parfois difficiles à distinguer (études en cours) :

<sup>(1)</sup> La terminologie et les limites dimensionnelles utilisées sont celles adoptées pour la légende habituelle des cartes sous-marines du B.R.G.M.

- sables mobiles et lessivés du "prisme littoral" : de la zone du "swash" à -7m, formant les talus, "crochons" de réfraction et flèches littorales, rides sous-marines, etc... Matériel en transit, dispersé au large, lessivé, excellent classement, biotopes à Tellines.
- sables lessivés, isométriques formant les talus sousmarins et les lobes des pro-deltas (fig.2), de quelques mètres jusqu'à l'extension du talus :
  - . -10 m au lobe de Balancelle,
  - . -14 m au lobe actuel du Grand Rhône
  - . 33 m au pro-delta de Faraman Bras de Fer,
  - . -22 m au pro-delta de St Romans-Peccats.

De tels sédiments, déposés par excés de charge peuvent être remaniés par gros temps et des études détaillées montrent que ces lobes peuvent montrer une légère asymétrie liée à la résultante des courants de fond portant vers l'Est ou l'Ouest selon les cas (Faraman, Petite Camargue).

- sables fins, situés au large des rides littorales les plus externes, issus de la décantation et dispersion du matériel littoral auquel s'adjoint un stock très individualisé transporté par le vent (Espiguette et Beauduc). Ils passent graduellement à la ceinture des faciès mixtes (4), notamment aux sables vaseux bordant le circalittoral.

Quelques remarques doivent être effectuées en ce qui concerne ces sables littoraux :

- . les profils bathymétriques montrent plusieurs ruptures de pentes liées à des changements dans la nature des matériaux et les conditions hydrodynamiques :
- à -7 m, à l'extérieur de la zone des gros rouleaux et en bordure "du large" de la ride littorale la plus externe. Telle est la limite des sables du "prisme littoral" (PL) liés aux déferlements et aux mouvements du "swash". :
- de -10 à -33 m : limite du talus sableux des pro-deltas. En deçà, le sable se charge en particules fines. Probablement, sans que cela soit prouvé, cela correspondrait aussi à la limite d'action, en profondeur, des courants sagittaux ("rip-currents"). Or, sur le littoral de la Provence rocheuse, j'ai montré que cette extension des corps sédimentaires sableux se manifestait jusqu'à une profondeur égale à la demi longueur d'onde de la houle incidente "moyenne" dominante (Blanc J., 1975).

- de -40 à -50 m, zone de passage des sédiments déposés par excés de charge à ceux possédant un faciès granulométrique plus évolué (décantation). Je serai assez d'accord avec cette dernière idée émise par Aloisi, mais des recherches granulométriques très soignées seraient nécessaire pour le confirmer.
- . malgré quelques tassements spectaculaires, la subsidence paraît assez faible, conformément aux idées de nos prédécesseurs.
- . malgré un intérêt économique certain, l'exploitation sousmarine de ces matériaux sableux sera à <u>prohiber</u>, à l'exception de quelques cas particuliers, sous peine d'accélérer les mécanismes déjà actifs de l'érosion littorale.

L'épaisseur de ces "sables littoraux" oscille de quelques mètres (Fos) à 20 m (l'Espiquette).

#### UNE DYNAMIQUE COMPLEXE :

Les dispositions précédentes montrent des variations complexes et rapides au cours du temps :

La mission C.N.E.X.O., Août 1972, à bord du N.O. "Norois" (Opération "Fossette"), dirigée par J. Picard, comprenait : Aloisi J.C., Cauwet G., Gadel F., Got H., Monaco A., Pagnon M et Ville F. II y fut établi que la sédimentation circalittorale dépendait de deux influences :

- 1) les apports rhodaniens, dirigés de l'Ouest vers l'Est,
- 2) les apports languedociens, dirigés de l'Ouest vers l'Est (ou réciproquement).
- . la dispersion du  $_{137}\mathrm{Cs}$  d'origine rhodanienne (effluents du C.E.N de Marcoule) jusqu'au large de l'Espiguette.
- . l'envasement des vases terrigènes côtières accentué en deux "cellules" où tourbillonnent les courants, aux baies d'Aigues Mortes et des Saintes Maries de la Mer.

L'origine des V.T.C. est à rattacher aux épandages rhodaniens, principalement, mais encore à ceux du Vidourle et même du Lez (pollution des égouts montpellierains parfaitement visible en thermographie I.R.).

Arnoux A. et Chamley H. ont montré, en 1974, l'importance de la nature des phyllites dans la fixation des détergents et métaux lourds. Il s'agit essentiellement de montmorillonites et édifices interstratifiés se décantant à la faveur des circuits des golfes des Saintes Maries de la Mer et d'Aigues Mortes, au large de Sète et Palavas, Carnon, voire l'Espiguette, de -40 à -60 m. La pollution est accentuée aux aires de dépôt maximum de la montmorillonite, par adsorbtion, sur les minéraux précités, de détergents, hydrocarbures et métaux lourds (Pb, Hg).

Tout projet d'équipement industriel du littoral devra, au préalable, localiser ces aires de décantation.

De 1964 à 1975, les modifications des fonds du golfe de Fos, liées à l'activité humaine (pollution, "dumping", endiguements, creusement des chenaux d'accés aux ports, etc..., sont suivies par Roux M. et Vernier E. Le rejet des matériaux de dragage entraîne la disparition des V.T.C. et du D.C. des aires centrales et orientales. Les endiguements, modifiant la courantologie du golfe ont altété, voire supprimé la présence de "cellules" de décantation tandis que les modifications granulométriques s'étendent jusqu'aux sables du "prisme littoral". La menace s'étend très rapidement vers l'Est, au littoral rocheux bordant la terminaison de la chaîne de la Nerthe où les formations du "détritique côtier" (DC), de l'herbier à Posidonies et des "sables coralligènes" ne forment plus qu'une zone à développement restreint. Dans la mesure où l'évolution actuelle se poursuit, de telles formations auront disparu dans quelques années, tout comme les herbiers à Posidonies du fond du golfe de Fos.

#### III - LA ZONE DU GRAU DU ROI - LE PASSAGE AUX PLAGES LANGUEDOCIENNES.

Depuis le 17es. s'exerce une érosion active aux plages de Carnon. Le transfert général, en fonction des données actuelles, paraît s'effectuer de l'Ouest vers l'Est, en fonction du "courant languedocien", pour aboutir au golfe d'Aigues Mortes où il renforce l'action du contre courant. L'influence intermédiaire de la nouvelle ville de la Grande Motte et de ses aménagements portuaires n'a point été étudiée dans le présent contrat. A la limite des départements de l'Hérault (à l'W) et du Gard (à l'E) se trouve un "grau" ou chenal nommé le chenal du Ponant ou encore, la passe de l'Abisme. Il s'agit en fait de l'ancien débouché du Vidourle et actuellement, par temps de crues, le trop-plein transitant par l'étang du Ponant, augmenté par le débit du Vistre, utilise à nouveau, temporairement, ce chenal relativement large.

L'ancien débouché des Abismes, d'où s'emberqua Saint Louis, sur "une grosse unité" (après un transport par petite embarcation depuis Aigues-Mortes), est une zone d'engraissement modéré. On y observe une double ride littorale (RL) et quelques crochons sous-marins.

Les missions aériennes montrent le "panache" pollué du Vidourle (lit actuel et Ponant), à direction du N.NE au S.SW, accentué par la dérive de Mistral et le contre courant d'Aigues Mortes (fig.3). Les pollutions sont alors dirigées vers la baie sud du Grau du Roi et aux jetées et passes de Port Camargue.

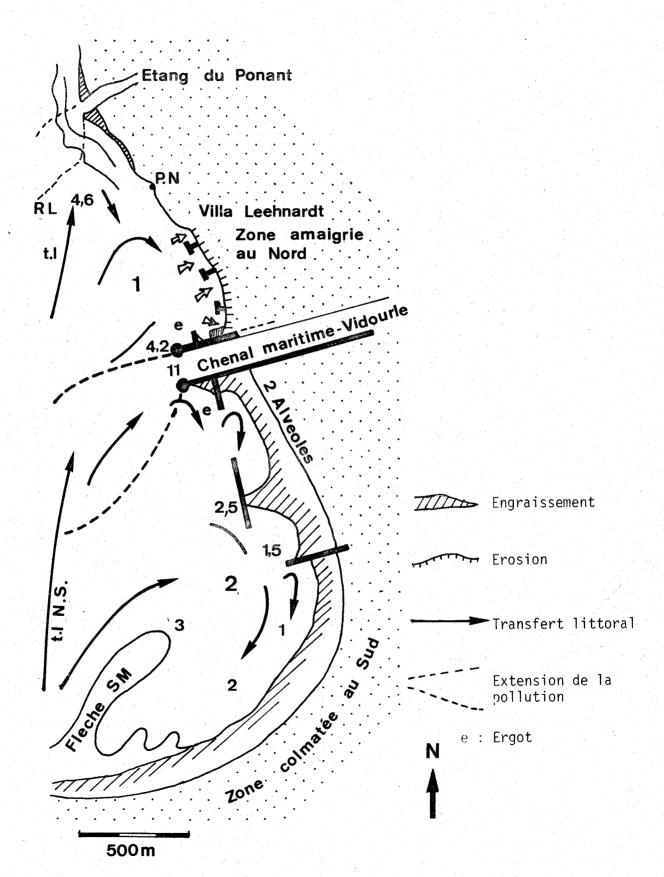
La zone du Grau du Roi est divisée en deux secteurs par les jetées du chenal maritime du Vidourle et du Vistre (fig.3).

A - <u>Secteur Nord</u>: se rattachant aux régimes des plages languedociennes.

A partir de la passe des Abismes (chenal du Ponant), on note successivement un point d'équilibre (point neutre), puis un secteur activement érodé de la villa Leehnardt à la jetée Nord du grau du Roi.

Les concentrations de minéraux denses, les tourbillons et l'action de vagues séches, très cambrées, traduisent une menace accentuée depuis plusieurs décennies (pente : 11°). Le mur de protection des maisons est insuffisant et un perré de qualité eut été nécessaire. De petits épis en T s'avèrent peu efficaces, en enrochements fragiles et trop rapprochés du rivage (30 m). Dès 1955, C. Duboul-Razavet avait émis des réserves quant au résultat de ces ouvrages destinés à protéger l'agglomération menacée. Malgré une certaine rétention du sable, la menace persiste et il est nécessaire d'envisager d'autres types d'ouvrages plus lourds et bien étudiés, comme cela a été réalisé à Carnon.

FIG.3 LE GRAU DU ROI



Cette zone exige une surveillance particulière. Un "ergot", complété par un terre-plein, à la jetée N du chenal maritime modifie les phénomènes de diffraction et détermine un léger engraissement opportun.

#### B - Secteur Sud (fig.3):

Il a été l'objet d'aménagements importants comprenant un ergot à la jetée Sud, un brise-lames frontal et un épi lourd, bien construit (fruit : 3/2, h = +2,5 m, enrochements 1 à 1,5 T bien coincés par des blocs de 0,3 à 0,45 T). En outre, des plantations fixant le sable ont été installées à l'arrière plage. Ainsi, deux aivéoles sont en voie de colmatage rapide et la longueur de la plage "utile" a été pratiquement triplée par l'édification de ce "piège à sable" enrichi par le transfert de l'Espiguette dirigé du S vers le N.

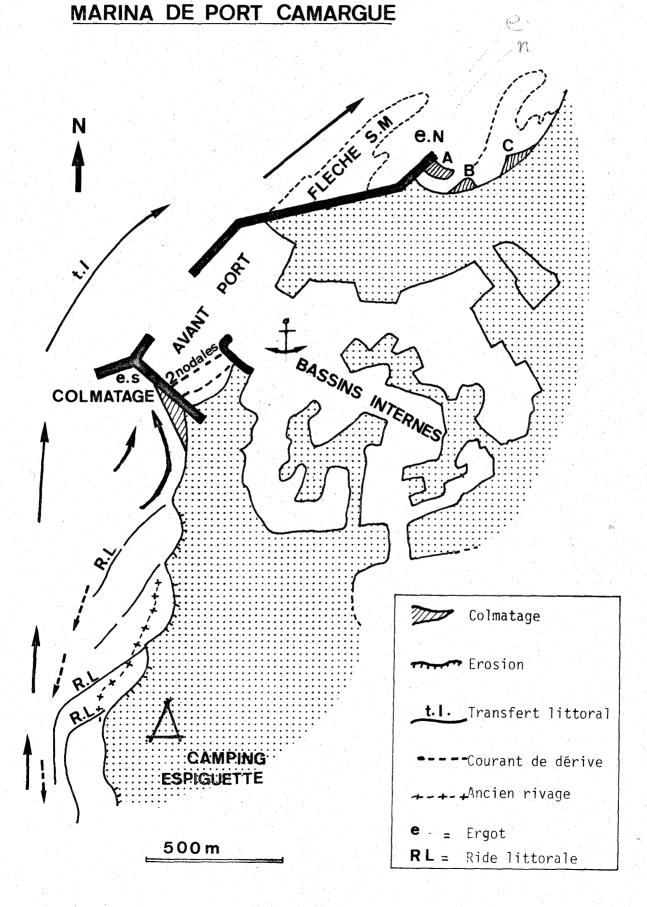
Il faudra cependant surveiller la progression de la cellule envasée (cf. paragraphe 2), très polluée et assez proche des fonds sableux littoraux.

#### IV - LA "MARINA" DE PORT CAMARGUE ET SES ANNEXES :

- A <u>Le Port</u>: construction robuste et soignée avec une passe délimitée par une jetée Sud, munie d'un "ergot déflecteur" et une jetée Nord se prolongeant également par un ergot (fig.4). Les jetées sont très exposées au Mistral, Labé (SW), Eissero (ou "Marin"): SE et Orsuro l'hiver), le Grégau (l'été), venant du NE. En force et fréquences, on notera une protection double afin de se protéger simultanément:
  - . du Mistral : 43 % j/A : vagues fortes et cambrées,
  - . de l'Orsuro et Grégau : 4 % j/A : vagues très rapides
  - . de l'Eissero et Marin : 3 % j/A : vagues de plus de 4 m. Le port comprend des bassins externes et internes.
- <u>bassins externes</u>: emprise sur la mer. Jetées robustes en enrochements: jetées externes: +2 m., fruit 3/2, blocs 1 T.
  - jetées internes : +1,5 m, fruit 1/1, blocs 0,3 à 0,2 T.
  - ergots . au N : fruit 3/2, à +1 m
    - . au S : fruit 1/1.

En une année, l'ergot N a permis l'édification des flèches A,B et C (fig.4), longues de 20 m. L'action recherchée de colmatage est réussie mais les jetées externes sont peut être un peu faibles.

FIG.4



Le rôle déflecteur des ergots N et S a été un succés du fait de l'alimentation abondante par le transfert rhodanien. Leur tenue par fortes tempêtes appelle quelques réserves.

Deux nodales de seiches ont été observées dans le bassin externe méridional. Le dépôt de sédiment au fond de ce bassin se traduit par deux cordons sableux sous-marins qui seront le point de départ d'un colmatage rapide. L'amplitude de la seiche est de 0,30 m.

. <u>bassins internes</u>: creusés dans les dunes et les marais au Nord de Salonique. L'utilisation des déblais a été consacrée à l'édification des remblais et terro-pleins de Port Camargue. Une communication a été aménagée avec les étangs et les zones inondables. Malgré l'épuration des effluents, il demeure le problème des rejets dans les ports et les bassins internes à partir des centaines d'embarcations, en période estivale.

L'onde de seiche est transmise dans le bassin interne mais les clapôts et résonances sont atténués :

- . par de petits blocs et enrochements bien calculés, à certaines portions de bassins, s'opposant à la formation gênante d'une onde réfléchie,
- . par des pannes internes et jetées d'accostages flottantes et ancrées sur pieux isolés.

#### B - Le problème du renouvellement des eaux :

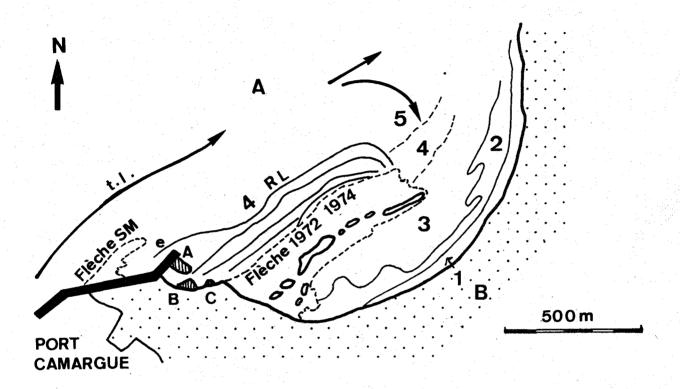
- 1) relativement satisfaisant pour les bassins externes :
- passe d'entrée ouverte aux régimes de secteurs W.NW.
- turbulences et courant entrant dans l'avant-port,
- courant de sortie épurant le mouillage externe, par vents de S et SE.

<u>Mais</u>: concentrations de déchets aux nodales de la seiche, pour le bassin externe.

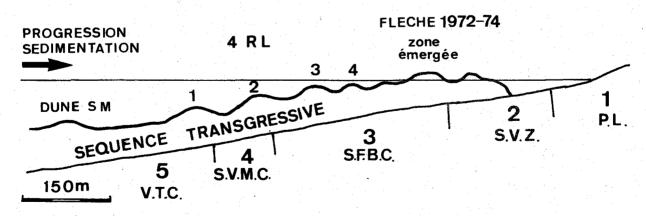
2) brassage nul ou médiocre pour les bassins internes. Une étude détaillée serait nécessaire. Sorties d'eaux par la passe devant la capitainerie, vers les bassins externes, par forts vents d'Est, E.SE, etc...

Les effluents issus des embarcations et les pollutions du Vidourle (cf. paragraphe 3) sont concentrés à Port Camargue et notamment aux jetées Nord, à l'ergot et aux plages artificielles en voie d'engraissement. Cette migration est accentuée par une rapide dérive de surface par vents de N.NW, NW et W.NW (dominants), à 30 ou 40 m/mn.

DE PORT CAMARGUE AU GRAU DU ROI



#### COUPE A-B



#### SEQUENCE INITIALE

- 1 : Prisme littoral
- 2 : Sables vaseux à Zostères
- 3 : Sables fins bien calibrés
- 4 : Sables vaseux de mode calme
- 5 : Vases térrigènes côtières .

Le "piégeage" dans les alvéoles et contre les ergots est compensé par un upwelling énergique. Il n'en est pas de même pour les bassins.

La situation demande a être surveillée et étudiée.

## C - Le colmatage accéléré de la zone Sud de la baie du Grau du Roi est un phénomène naturel qui a été amplifié par la construction des jetées (fig.5):

De 1972 à 1975 se sont édifiés des crochons et flèches sableuses de forme complexe, très rapidement engraissés par le transfert de l'Espiguette. Cette édification a recouvert, en quelques années, une séquence sédimentaire initiale montrant la variation latérale:

- sables fins du "prisme littoral",
- herbiers à Zostéracées et sables vaseux,
- sables fins des fonds de baies,
- sables vaseux de mode calme,
- puis vases terrigènes côtières (fig.5).

Cette conséquence d'une intervention humaine se traduit par une spectaculaire "transgression" d'une séquence sédimentaire sur la série camarquaise initiale habituelle, en équilibre.

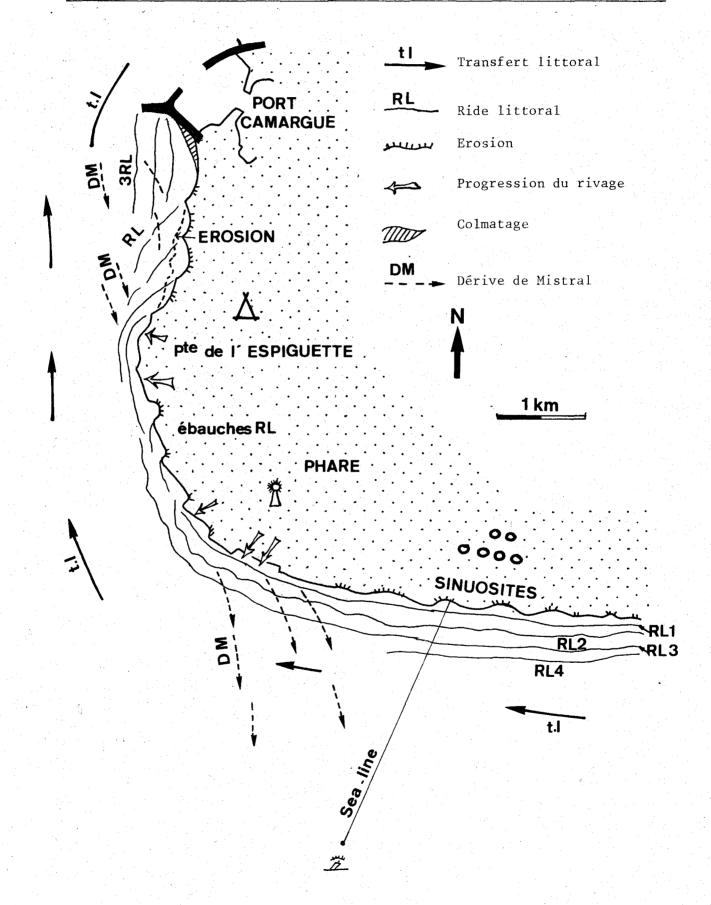
Dans la mesure où se poursuivrait une telle évolution on pourraît tabler sur un colmatage de la partie méridionale de cette baie en une vingtaine d'années.

#### V - LA ZONE AU NORD DE LA POINTE DE L'ESPIGUETTE.

L'établissement de la jetée Sud de Port Camargue et l'emprise sur la mer de l'avant-port ont modifié le régime des houles jusqu'à la pointe de l'Espiguette.

- 1) colmatage accéléré lié au barrage de la jetée Sud (fig.6) où aboutit le transfert S + N de l'Espiguette. De 1969 à 1974, cette accumulation contre la jetée a permis d'évaluer une partie du transit interrompu. Ce dernier est estimé à 64.800 m³/an. La poursuite de cet engraissement amènera le contournement, déjà amorcé, du musoir sud et la sédimentation active se poursuivra en direction du Grau du Rol. Quant aux sédiments situés à plus de 6 m de profondeur et non arrêtés par la jetée, ils continuent leur cheminement normal.
- 2) en contre partie, on observe une zone de déficit sédimentaire au Sud de Port Camargue (fig.6), à la portion la plus exposée aux régimes dominants (W, W.NW et N). En 24 h, par gros temps, j'ai mesuré un recui de 3 m, lié à l'action de vagues obliques à forte

DE PORT CAMARGUE A LA POINTE DE L'ESPIGUETTE



cambrure, amenant, avec une incidence de 45°, un transfert orienté du N vers le S, en sens contraire du régime normal.

Les études détaillées montrent 4 sinuosités de la ligne de rivage dont les "pointes" (fig.6) sont prolongées en mer par des rides littorales (RL) sableuses et obliques. Ces dernières, asymétriques, sont déviées par le sens du transfert et la dérive du Mistral s.l.

Un système de double RL s'éloigne de la ligne de rivage, protégeant naturellement ce dernier des forts déferlements. En effet, 3 déferlements se manifestent :

- 1 le plus au large correspond à la RL externe, à 3/4 L de l'onde incidente moyenne annuelle (20 à 30 m, voire 40 m, vers Port Camargue).
  - 2 déferlement à la RL interne, à 1/4 L, soit 7 à 10 m,
- 3 déferiement atténué au rivage malgré des reculs rapides mais temporaires de la ligne de swash.

Bien que ne présentant aucun danger pour les aménagements, cette portion littorale est à surveiller. Les dunes, en voie de fixation par des plantations récentes, compensent partiellement des érosions locales et créent une faible frange abritée. Des accumulations de 2 m de sable ont été mesurées après une quinzaine de journées. Les dunes non fixées se déplacent rapidement aux dépens des automobilistes imprudents.

Le secteur Sud, à la pointe de l'Espiguette, est considéré comme une zone d'avancée exceptionnelle au taux de 15 m/an. <u>Cette progression est-elle aussi rapide</u> ? Il semble que cette dernière ait cessé et, en comparant des missions aériennes successives, nous arrivons à estimer une progression de 80 m en 15 années. Depuis la création des jetées de Port Camargue, cette avancée est de 4 à 5 m/an.

Par petits fonds, des phénomènes de résonance occasionnent des accumulations sableuses à structure périodique, formant des dents de scie et parfois désolidarisées du tracé littoral.

Deux régimes dominants en ce secteur :

- 1) "houles" dirigées du S et S.SE vers le N et le N.NW et action du courant littoral. Il en résulte une dérive dominante orientée de l'Est vers l'W.NW, puis le N.NW et le Nord. Le déplacement résultant du sédiment suit une direction allant du Rhône Vif à l'Espiguette, puis à Port Camargue.
- 2) vagues et houles orientées du NW ou de l'W.NW, vers le S et le S.SE (Mistral s.l.). Le courant de dérive est orienté en sens inverse du précédent. Une partie du matériel sableux revient au Sud et vers l'Espiguette.

A partir du phare de l'Espiguette, au Sud du méridien 04°08'30E la dérive de Mistral et W.NW, entraîne le sédiment au large. D'où une érosion locale à surveiller accompagnée de l'alimentation d'une 4ème RL vers le large et protégeant globalement le rivage à moyen terme.

#### VI - DE LA POINTE DE L'ESPIGUETTE AU RHONE VIF.

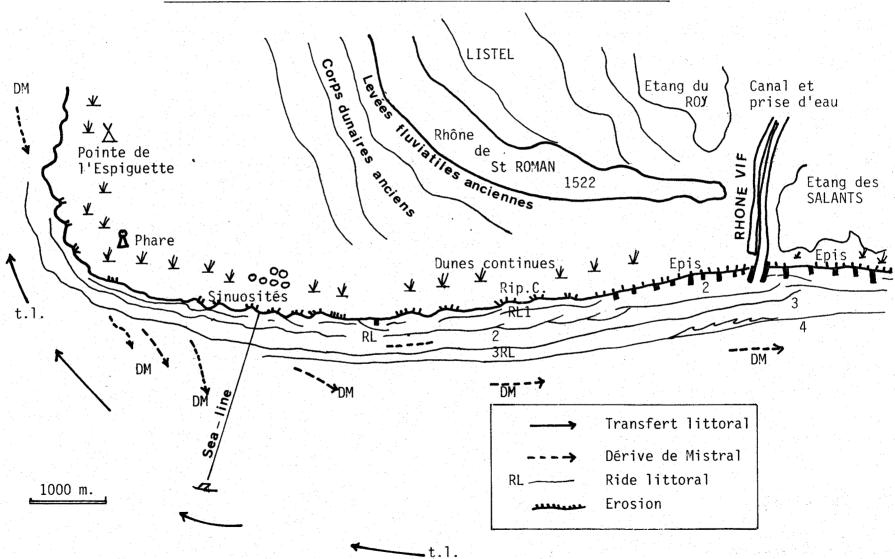
Dès le méridien du phare de l'Espiguette, le littoral s'infléchit, adoptant un tracé est-ouest. On y observe un régime complexe avec lunules d'érosion locales, transferts, RL sous-marines et flèches sableuses obliques coalescentes au rivage (fig.7). Vers l'Est, à partir du sea-line de carburant, jusqu'au débouché du Rhône Vif, limite des départements du Gard et des Bouches du Rhône, les pentes diminuent et les fonds sableux s'étendent. Pourtant, la zone orientale du Rhône Vif demeure de plus en plus menacée.

Dès l'arrière plage on observe une ligne de hautes dunes, assez continues (+ 9m). En arrière de la ligne des dunes actuelles se trouvent, passant sous les appareils récents, des corps dunaires, limons et bras-morts, anciennes levées rhodaniennes, orientés N.NW-S.SE (fig.7), jusqu'au domaine de Listel.

L'évolution sédimentaire récente de ce littoral a recoupé un drainage initial orienté N-S ou N.NW-S.SE. Ce dernier est jalonné par d'anciennes levées deltaîques et une ligne d'étangs et de bras-morts. Tels sont le Rhône de Saint Roman (1522), annexe du Rhône de Sylvéréal, le Rhône Vif, le Rhône de Cabri. A proximité du Rhône de St Roman ont été trouvés des vestiges grecs et romains (F. Benoît, 1942), près de l'ancien débouché. Pour Russell, il s'agirait de "l'Ostium Hispaniense" de Pline.

L'arrêt du fonctionnement du Rhône de St Roman, du Rhône de Peccais (ex. Rhône Vif) et du Rhône de Cabri, inaugurent un cycle d'érosion se poursuivant jusqu'à l'époque actuelle et recoupant alors les levés et structures "mississippiennes" primitives. La charge devenue nulle au Rhône Vif et l'obturation des autres émissaires sont à l'origine de ce déséquilibre probablement amorcé depuis le Moyen Ange. D'où la fragilité de ce littoral où se développe la zone classée du Parc N.R. de Camargue. Le cordon sableux littoral est étroit (50 m); lors des tempêtes, des pénétrations marines se sont manifestées aux discontinuités dunaires, pénétrant dans les maræis. Une rupture brusque a été observée en janvier 1970.

FIGURE 7 : DE LA POINTE DE L'ESPIGUETTE AU RHONE VIF.



Actuellement, les aménagements des Salins du Midi, à la prise de Sylvéréal, détournent partiellement les arrivées d'eaux douces. Il en résulte une salure en progression tout au long du Rhône de St Roman amenant la dégradation de la végétation, d'où l'extension d'aires de sables stériles et une certaine menace sur les dunes. Nous insistons sur la nécessité de recharger en eaux douces le Rhône de St Roman.

La déflation du Mistral sur les hautes dunes apporte une précieuse compensation de sable fin sur ce littoral déficitaire dont l'évolution est orientée vers un tracé rectiligne EW, se substituant à l'arasion des promontoires deltatques des Rhône de St Roman et de Peccaïs qui s'avançaient assez loin vers le large (et dont on retrouve les prodelta érodés jusqu'à -22 m). La diminution actuelle de la charge rhodanienne accélére le déficit en sable et la nouvelle tendance évolutive.

Du phare de l'Espiguette, au dépôt de carburant et vers le Rhône Vif, on observe un littoral relativement stable marqué par des sinuosités du premier ordre (L = 400 à 500 m) et du deuxième ordre (L = 70 à 150 m). Cette périodicité s'avère en relation avec des vagues incidentes obliques et des courants sagittaux (au niveau des creux), sans interruption du système continu comportant jusqu'à 4 RL.

Le "point neutre" ("pivot" des mécanismes d'érosion et de sédimentation littorale) se situe sur un rivage sableux désert (1), au SW du domaine de Terre Neuve. La surveillance de ce secteur ne doit pas être négligée dans les années à venir car il est certain que la zone d'érosion s'étendra vers l'Ouest au fur et à mesure de l'implantation des ouvrages au débouché du Rhône Vif.

#### VII - LE DEBOUCHE DU RHONE VIF ET SES ABORDS. UNE ZONE D'EROSION ACTIVE.

Le débouché du RhôneVif, encore nommé "Grau Neuf" est une zone menacée par une forte érosion marine, là où se trouve installée la prise d'eau des salines. En 1959, Van Straaten y avait signalé des chenaux de ravinements sous-marins, larges de 200 m et profonds de 1 à 1,5m. Les sédiments sableux sont entraînés au large par un système de courants sagittaux, assez généralisé en Petite Camargue. Les flux turbides correspondants ont été repérés par des missions aériennes.

Le chenal du Rhône Vif, creusé en 1532 sous l'ordre de François ler, devrait correspondre à une zone stable alors qu'il se trouve

<sup>(1)</sup> deux heures de marche à partir de l'Espiquette.

précédé, sur le front de mer, par un remarquable système de 3 à 4 RL (figure 8).

### A - Situation des rides littorales :

- . à partir du rivage, la 1ère RL suit le tracé littoral et en épouse les sinuosités avec quelques décalages (1/2 L = 100 à 120 m).
- . la 2ème RL, de 160 à 180 m du rivage, présente un tracé ondulé indépendant de celui-ci, puis se dédouble vers l'Est (Petite Camargue), en se rapprochant de la plage.
- . la 3ème et/ou 4ème RL, de -4 à -6 m de profondeur, à 250, 280 m du rivage s'en rapproche également vers l'Est.

Lorsqu'une RL, vers l'Est, devient coalescente au littoral, une nouvelle RL "prend le relai" vers le large. On observe également ce phénomène en Grande Camargue.

Ce système de 2 à 4 RL détermine de grands déferlements obliques se traduisant par une dérive littorale. Par Mistral dominant (43 % j/An), on observe un mouvement général, à la surface des eaux, orienté de l'Ouest vers l'Est, en sens inverse du courant général du large.

# B - Profil littoral (fig.9):

Considérons le système à 3 RL du Rhône Vif,

Soient L la longueur de l'onde arrivant au rivage et l la distance d'une RL déterminée à la côte.

En principe, si la profondeur demeurait constante, on aurait, d'après Larras et Clos-Arceduc :

- . pour la 1ère RL à partir du rivage : I = L/4
- . pour la 2 ème RL : 1 = L/4 + L/2
- . pour la 3ème RL : I = L/4 + L

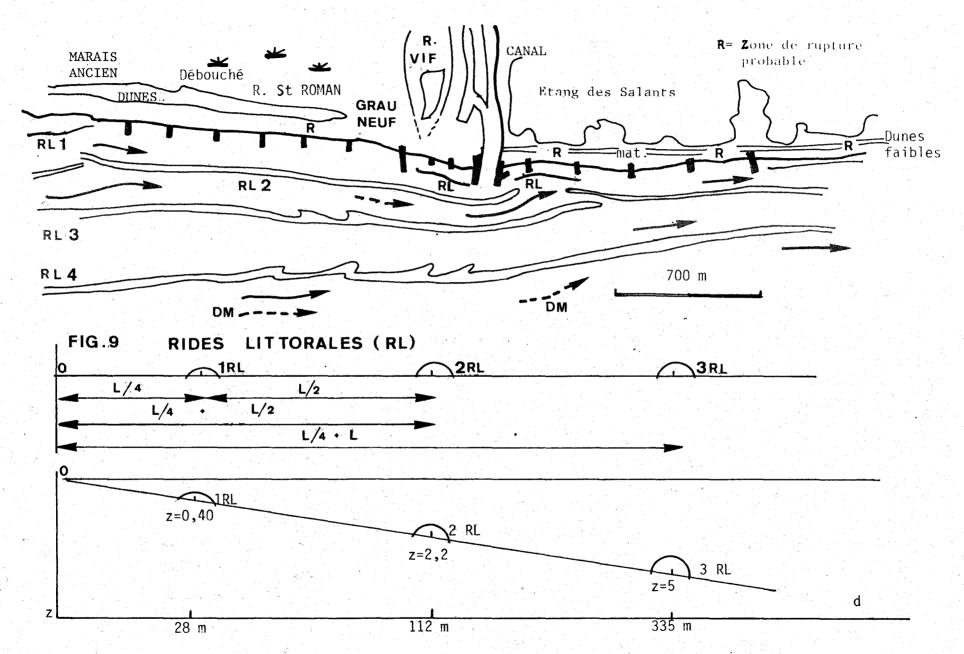
Or, le profil littoral montre une pente. Les espacements entre les RL successives sont proportionnels à la racine carrée de la profondeur z. Au Rhône Vif, on a une pente moyenne de 1/67, soit 14 % (fig.9):

- pour la 1ère RL : z = 0.4 m; l = 28 m
- pour la 2ème RL : z = 2,2 m; l = 112 m
- . pour la 3ème RL : z = 5 m ; l = 335 m

Si nous considérons I comme étant la distance au rivage de la RL la plus au large et n le nombre de RL, on a :

$$I = \sqrt{z} \cdot [L/4 + (n-1) L/2]$$

FIG.8 ZONE D'EROSION MAXIMALE DU RHONE VIF



Pour une houle longue où L, au large, atteint 112 m et T=8.5 sec (forte tempête moyenne), on aura :

L/4 = 28 m

L/2 = 56 m

Au niveau de la 3ème RL, la plus externe, z sera égale à -5 m.  $\sqrt{z}$  = 2,4 et l = 2,4 × (28+112) = 336 m.

Or, I mesurée sur photographie aérienne agrandie est 335 m  $\pm$  5m. Pour la 2ème RL, nous aurons z = 2,2 m et  $\sqrt{z}$  = 1,8

I théorique sera égale à 151 m tandis que la valeur mesurée oscille entre 120 et 135 m ± 5 m. On note cependant une irrégularité dans la pente, que nous avions supposé constante, mais qui diminue au voisinage du rivage.

Ainsi, l'examen détaillé des RL par des missions aériennes précises permet :

- de calculer la longueur d'onde moyenne des ondes incidentes significatives (T > 4,5 sec) sur un littoral,
- de déduire la pente, la profondeur des rides et les isobathes, voire la présence d'obstacles immergés.

## VIII - LE LITTORAL MENACE DE LA PETITE CAMARGUE.

Du Rhône Vif (grau Neuf) au Petit Rhône (grau d'Orgon) se situe un littoral presque rectiligne, orienté Est-Ouest, désertique et très menacé par l'érosion marine. La beauté sévère de ces sites mal connus (et non desservis), inclus dans la réserve du Parc de Camargue, serait en accord avec l'absence totale d'aménagements. Pourtant, la menace d'une proche disparition par érosion rapide nécessitera des mesures à moyen et long terme.

Cette érosion se traduit par les caractères suivants :

- . formation de concentrations de minéraux denses avec une curieuse zonation : minéraux opaques, olivine et augite, grenats.
- Ces petits placers sont situés dans les lunules et les petits "cirques d'érosion" du littoral (zones de lévigation).
- . faiblesse de la zone littorale (parfois 50 m, entre la ligne du <u>swash</u> et les premières dunes (Etang des Salans, grau de Fer, Grande Gorgue, la Grille, Brasinvert, étang des Deux Pins). Là, par fortes tempêtes, la plage est entièrement immergée et la mer affouille les dunes.
- . le sens de la <u>dérive dominante</u> n'a pas été déterminé malgré mes recherches, encore fort incomplètes. En tous les cas, comme à l'Espiguette, règne un régime <u>alternant</u> déportant tantôt à l'Est

(régimes de Mistral et W), tantôt à l'Ouest (vents d'Est, "Marin", etc..).

- . assez forte dispersion au large, courants sagittaux repérés par l'observation aérienne.
  - . les RL, très longues, ont été sulvies par missions aériennes.
  - la lère RL au rivage, est interrompue et mal connue
- la 2ème RL s'observe de 60 à 100 m et devient coalescente au rivage à la Baïsse de la Grande Rhée (1), près de l'épave d'un chalutier.
- la 3ème RL, de 350 à 400 m du rivage s'en rapproche à 100 m au niveau de l'étang d'Icard.

Une 4ème RL "relaie" la coalescence au rivage de la 2ème RL.

<u>Vitesse de l'érosion</u>: on observe des reculs du rivage de 300 à 350 m depuis 1943. Un ensemble de "bunkers" allemands est actuellement effondré, démantelé et immergé. Les sinuosités d'érosion, longues de 300 à 400 m, correspondent à la zone de départ de courants sagittaux et globalement, le sable entrainé au large arrive ensuite au transfert vers l'Espiguette.

A la plage de la Grande Rhée, la zone d'érosion se développe vers l'Est par un système de plusieurs courants sagittaux (pentes de 12° à 14°). Ici, d'après les observations et les renseignements des propriétaires riverains, la mer avance en moyenne de 5 à 7 m par an (cadastre à retracer).

Entre ces zones d'amaigrissement, on observe certains secteurs en équilibre relatif, avec des pentes de  $8^{\circ}$  à  $9^{\circ}$ .

Les régimes les plus érosifs sont imputables au vent d'Est qui accentue le transfert des matériaux vers l'Ouest, c'est-à-dire vers l'Espiguette.

Les plages de l'Etang d'Icard sont mieux connues. Deux déferlements s'accentuent en se rapprochant du promontoire du Petit Rhône. Les courants sagittaux ont été observés par avion et sur le terrain. Ici, la dérive littorale dominante est orientée de l'Est vers l'Ouest.

L'érosion demeure menaçante. Les sables du prisme littoral sont enlevés et l'ablation s'effectue alors aux dépens des limons argileux palustres à racines de roseaux et de genêts. D'anciennes roselières démantelées se retrouvent en mer et trois banquettes argileuses vestigiales sont visibles. Près du Grau d'Orgon, une ancienne roubine (roubine de l'Ane), située à 300 m du rivage au 19es. (anciennes cartes), est

<sup>(1)</sup> on nomme "Baīsse" de longs espaces allongés inondables (par terre et par mer), vestiges d'anciens bras-morts, orientés NS.

maintenant décelable en mer, à 100 m de la plage qui continue à "mordre" sur les marais. Cela correspond à un recul de 400 m en 130 ans.

Cela pose, d'une manière urgente, le problème des défenses sous peine de voir disparaître assez rapidement la Petite Camargue méridionale, les sites protégés, plusieurs domaines et les grandes Salines de de l'Ouest.

#### LE PROBLEME DES DEFENSES ENTRE LE RHONE VIF ET LE GRAU D'ORGON.

En 1971, S.O.G.R.E.A.H. étudie un système partiel de défenses réalisé et encore en cours d'édification, près du Rhône Vif.

- . les vagues dominantes (SE et SW) engendrent des mouvements de sable, principalement, les régimes de SE. La charge proprement rhodanienne est estimée nulle à très faible. L'ablation moyenne est évaluée à 4 ou 5 m/an, très voisine de mes propres observations. La diminution de la superficie des propriétés et les menaces sur les Salins de I'W font décider de l'implantation de 18 <u>épis courts</u>. Ces derniers n'amèneront cependant qu'un ralentissement du phénomène.
- . dans une deuxième étape seront implantés des <u>épis longs</u> de 250 m. Des reculs de rivage très rapides sont à prévoir à l'issu de ces travaux, malgré un enracinement profond prévu.
- . <u>une défense frontale contre la dune</u>, à + 1,5 m N.G.F. sera installée, si possible jusqu'à 200 m de la ligne du swash.
- . la première ligne d'étangs de la Compagnie des Salins du Midi risque d'être envahie et perdue à brève échéance. D'où la prévision d'une deuxième ligne de défense frontale à réaliser à 150 m en arrière.

Or, en 1966, la Compagnie des Salins du Midi a réalisé une digue frontale, longue de 400 m, à la hauteur de l'épave de la Gracieuse entre les "radeaux" de la Gracieuse et des Deux Pins. Il s'agit d'un noyau de sable recouvert d'une couche d'enrobé sable + bitume. La crète est arrondie à la cote +1,20 m N.G.F., à 150 ou 200 m en arrière de la ligne du swash.

Cet <u>ouvrage témoin</u> montre une assez bonne tenue malgré quelques franchissements non dangereux. Cependant, sa structure légère ne résisterait pas à une très forte tempête de longue durée.

Il conviendrait d'étendre une défense frontale à 100 m en arrière de la ligne de rivage, à +1,5 m, de reconstituer le cordon dunaire et sa végétation. Néanmoins la situation restera dangereuse car les "reliefs" dunaires, nommés "radeaux" sont naturellement interrompus et contournés lors des fortes tempêtes.

La tempête de janvier 1970 doit être Interprétée comme un avertissement. La mer arriva a envahir l'intérieur sur une profondeur de 500 m, franchissant les brèches de la ligne de dunes, entre le Rhône Vif et les cabanes camarguaises, jusqu'aux marais et au Rhône de St Roman.

La protection <u>réelle</u> paraît, en fait, devoir être réalisée <u>dans le milieu marin lui-même</u> et, probablement, par de lourds et très onéreux ouvrages frontaux combinés à des épis en T, à structure interrompue.

#### IX - LE DEBOUCHE DU PETIT RHONE.

Le débit du Petit Rhône est évalué à 16 % de celui du Grand Rhône. Cette estimation de Surell est ancienne et antérieure aux aménagements sur le fleuve. Un pourcentage de 10 % apparaît plus conforme à la réalité. Le débit moyen annuel est de 286 m³/sec.

Nous rappellerons que le "panache turbide", sulvi par les clichés aériens en émulsion I.R. est déviée vers l'Est par le contre courant du golfe des Saintes Maries de la Mer et vers l'Ouest, par le courant géostrophique permanent, au large.

A l'étiage, une onde de salinité remonte le lit jusqu'au Bac du Sauvage, voire jusqu'au pont de Sylveréal où des loups et des muges euryhalins ont été pêchés.

Les tempêtes de Mistral, W.NW, W, renforcent les dérives vers l'Est. Les gros temps de vent d'Est, E.SE et SE, au contraire, confirment le transfert vers l'Espiguette.

Au débouché, il ne semble pas y avoir de véritable pro-delta sous-marin, contrairement à certains émissaires sub-actuels, mais plutôt un modeste talus d'accrétion de 150 à 200 m d'extension vers le large et se chargeant très rapidement en éléments fins d'après les tra-vaux cartographiques de P. Clairefond.

L'apport du Petit Rhône est faible, notamment en éléments sableux et cette carence initiale complique les problèmes de sécurité littorale aux Saintes Maries de la Mer (fig.10).

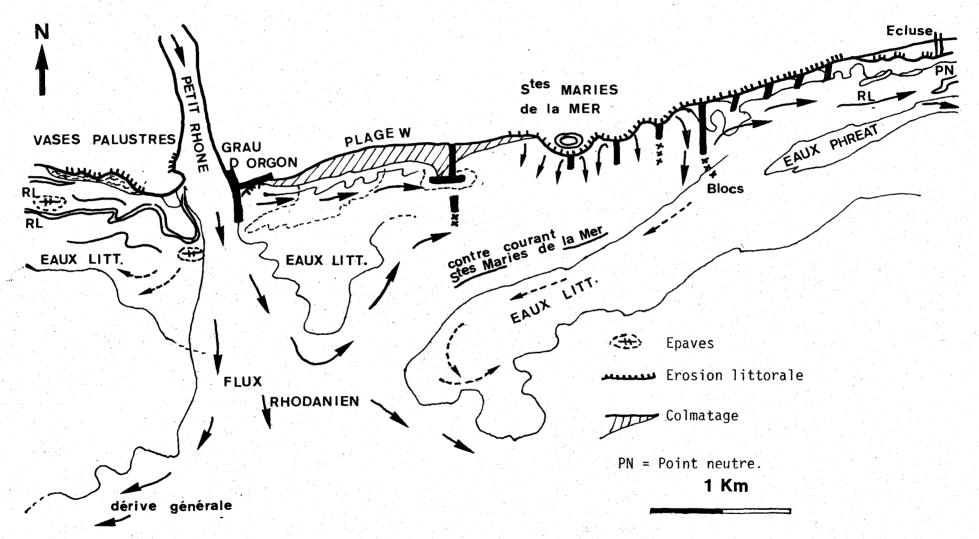


FIG. 10 : DÉBOUCHÉ DU PETIT RHONE, SAINTES MARIES DE LA MER.

#### X - EROSION LITTORALE AUX SAINTES MARIES DE LA MER.

#### A - Historique:

Il s'agit d'une zone de recul parmi les plus spectaculaires. En 1710, le littoral se trouvait à 4 km au Sud des Saintes Maries de la Mer. Le recul se poursuit depuis le 18e s. avec quelques phases de ralentissement. En moins de deux siècles, plus de 700 m ont été perdus et l'on note encore un recul de 50 m depuis les quinze dernières années.

Au début du siècle la situation devient critique et la ville est directement menacée. Cela amena la création d'une digue frontale, constamment renforcée depuis par l'installation de lignes de plots bétonnés et déjà altérés. Des épis, défenses frontales légères, murs divers sont établis au fur et à mesure que le temps s'écoule et que la menace se confirme : 1925, 1930, 1940, 1946, 1953 et dix épis en 1963.

Au Sud immédiat de l'aglomération, 250 m de recul ont été observés en 75 ans. C. Duboul-Razavet signale que des petits ânes en procession, transportaient le poisson à partir des barques échouées sur la plage. Des vieillards ont affirmé à P. Clairefond et à moi-même, qu'en 1880, les enfants des écoles n'avaient point le temps d'aller au bain, sauf en courant beaucoup! - entre 12 h et 14 h.

Aujourd'hui, la mer est en bordure des maisons, - alors que le défunt Marquis de Baroncelli faisait courir les chevaux à l'entrainement au-devant des Arènes. Les Arènes sont maintenant battues par les vagues et entourées de fonds de -2 à -1,50 m.

Il y a vingt années, A. Rivière et C. Duboul-Razavet avaient remarqué que les épis "pleins", perpendiculaires au rivage, n'arrêtaient point l'érosion. Les mêmes remarques étaient valables à St Tropez et Ste Maxime. Le cloisonnement des épis pouvait même renforcer les actions de la dispersion. Il est regrettable que les observations de ces deux chercheurs n'aient point été prises, ultérieurement, en considération.

Par tempêtes, le site est exposé à tous les régimes. La surélévation du niveau peut atteindre 0,80 m. Il n'y a pas de port.

La menace sur le littoral urbanisé a fait édifier un certain nombre d'ouvrages (fig.10) :

- . épis transversaux : généralement inefficaces et agravant parfois la situation par l'accentuation et la "canalisation" du flux de retour ("flot de fond").
- . ergots : récemment implantés à des épis existants. Résultats encourageants.

- . murs et enrochements au rivage, blocs cimentés, plots bétonnés : très attaqués et altérés, souvent déchaussés comme les enrochements des épis. Stabilisation précaire et de courte durée.
- . engraissements artificiels : peu efficaces du fait de la très forte dispersion au large.
  - . absence d'ouvrages frontaux en mer (brise-lames).

Sans l'étude et l'édification d'ouvrages lourds appropriés, l'érosion par les vagues frontales obliques et la dispersion au large des matériaux, améneront fatalement la destruction de l'ancien promontoire deltaïque d'un ancien bras du Rhône édifié aux 13 ème et 14 ème siècles.

#### B - Causes évoquées :

Elles peuvent être rangées en plusieurs catégories. La connaissance exacte des causes du phénomène aiderait évidemment à juguler les processus d'érosion.

- 1) Subsidence particulière au secteur des Saintes Maries amenant l'ingression marine récente. Malgré quelques tassements mis évidence par l'archéologie, il ne semble point y avoir de subsidence notable en ces lieux et le niveau marin peut être considéré comme constant depuis l'époque historique.
- 2) Arrêt du fonctionnemnnt du Rhône de St Ferréol et du bras de Sylvéréal, postérieurement au XVes. Cette/hypothèse, basée sur un fait réel, doit retenir notre attention.
- 3) détournement du Bras de Fer amenant la réduction du débit du Petit Rhône et la déviation de la majeure partie de la charge vers l'Est.
- 4) le sédiment arraché au rivage ne peut revenir car il est Incorporé à un transit orienté de l'Est vers l'Ouest, en direction de l'Espiguette où il s'accumule.

L'hypothèse 4 n'explique pas la nature même du phénomène. L'hypothèse 2 s'accorderait assez bien à la réalité. Des causes épéirogéniques (séismes) ne peuvent être ici évoquées.

Le rapport Barillon (11 mars et 26 avril 1965) fait état de l'hypothèse 4 et calcule une cubature de sable en transit à l'Espiguette et à Beauduc qui serait estimée à 750.000 m³/an. Mes recherches arrivent aux résultats suivants :

- 100.000 m<sup>3</sup>/an en Petite Camargue.
- pour l'Espiguette + Beauduc : 300 à 400,000 m³, du rivage à la 2ème ride littorale. Ainsi, cette dernière estimation me paraît inférieure à la réalité (cas du sédiment en transit au-delà de la 2ème RL).

Aux Saintes Maries de la Mer, le recul moyen estimé par les services des Ponts et Chaussées est de 2,5 m/an. Le recul des isobathes -15 et -10 m (sables très fins) peut être fixé à 1300 m en 15 ans (-15m). Mais il pourraît encore se manifester un recul jusqu'à -20 m. De telles recherches demandent à être poursuivies.

### C - Etat du rivage en 1975 et les ouvrages actuels :

#### 1°) Description:

- . deux longs épis en enrochements trop légers à l'Ouest et à l'Est de la zone d'érosion maximale.
- . épis courts (fig.10), en enrochements peu stables, à la zone d'érosion maximum et vers l'Est. En ce secteur, quelques épis ont été implantés suivant une direction légèrement oblique vers l'Ouest afin de mieux fixer le sédiment en transit.
- . les grands épis sont prolongés jusqu'à des profondeurs de 3 à 4 m, voire même 5 m (projet Barillon, 1965 ; réalisé).
  - . les épis courts ne concernent que les fonds de -0,50 à 1 m.

L'erreur de l'implantation onéreuse des épis longs vient de ce que les réalisateurs pensaient que les apports venant de l'Est étaient plus importants que ceux venant de l'Ouest. Or, c'était le contraire et j'ajouterai qu'il ne venait plus grand chose de l'Ouest... étant donnée la charge actuelle du Petit Rhône.

Un projet du rapport Barillon, faisant état de digues frontales importantes, implantées à -6 et -7 m, a été estimé trop onéreux et rejeté. D'où la continuation active de l'érosion.

#### 2°) Trois secteurs sont à délimiter (fig.10):

- 1 <u>du débouché du Petit Rhône au grand épi W</u>: colmatage naturel, accéléré par l'édification du grand épi W qui bloque la <u>quasitotalité</u> du sédiment <u>littoral</u> en transfert, de l'W vers l'Est. De ce fait, et là réside une partie du danger de la situation actuelle, cette zone s'est engraissée de 80 m en 5 ans. Elle constitue la plage Ouest des Saintes Maries de la Mer.
- 2 <u>du grand épi W au grand épi Est</u>: au S immédiat de l'agglomération des Saintes Maries de la Mer, maximum de menace de la part de l'érosion marine. Mur frontal, plots de béton et épis courts. Forte exposition. Epis inefficaces et souvent malmenés. Pas d'engraissement. Zone à équiper et à protéger en première urgenca.
- . pas de sédiment en transit en quantité suffisante, l'épi W arrêtant le matériel sableux.
  - . exposition très forte, absence de RL et importance

exceptionnelle de la dispersion au large.

3 - <u>du grand épi oriental à la plage Est des Saintes Maries</u>
<u>de la Mer</u>: en bordure également de la partie orientale de la ville
des Saintes Maries de la Mer. Erosion toujours importante non compensée
par plusieurs épis courts et parfois obliques retenant assez peu de
sédiment. On note un fort courant de décharge déportant le sédiment
sableux vers le large, courant très fortement <u>déflecté</u> vers le SW par
la présence de l'obstable réalisé par le grand épi oriental (observations
aériennes).

A 400 m vers l'Est commence la plage orientale des Saintes Maries de la Mer. On observe des sinuosité de la ligne de rivage de courte amplitude (courants sagittaux), mais l'érosion demeure modérée jusqu'au point neutre qui se situe à faible distance (100 à 200 m) à l'Est du canal de la station de pompage. De petits ouvrages <u>frontaux</u> suffiraient à protéger ce secteur, à la suite cependant de l'étude préalable d'un essai effectué en vraie grandeur.

Dès le point neutre, vers Beauduc, le littoral se stabilise, puis s'engraisse et ne présente aucun problème particulier. Alors s'observe une double RL bien alimentée, déjà esquissée dès le front de mer bordant les quartiers orientaux de la ville des Saintes Maries de la Mer. La transition entre la zone d'érosion, le point neutre et le rivage en cours d'engraissement, est marquée par quelques ondulations festonnées de la RL au large, traduisant ainsi des interférences entre plusieurs trains d'ondes, phénomène habituel protégeant le littoral (J. Blanc, 1975).

Le transfert normal du sédiment est ici dirigé principalement de l'W vers l'Est, en conformité avec le contre-courant du golfe et la dérive superficielle majeure.

#### D - Influence des ouvrages actuels :

1°) <u>Le grand épi W</u>, malgré un engraissement spectaculaire de la plage occidentale des Saintes Maries de la Mer, a par sa présence, agravé l'érosion au Sud de la ville en entravant le stock sédimentaire, déjà naturellement insuffisant, en transit de l'W vers l'E. Récemment, cet épi a été volontairement <u>détruit</u> et ouvert en son tiers méridional, afin de permettre la circulation d'une partie (trop faible) du transfert. Il en résulte l'obtention, dès 1974, d'un "crochon" sableux s.m. se dirigeant vers l'Est et d'un engraissement localisé, insuffisant mais appréciable, à "l'aval" du grand épi occidental.

Un "ergot" frontal fort efficace "immédiatement" engraissé, a été établi à l'extrémité de la partie méridionale du segment de l'épi interrompu artificiellement.

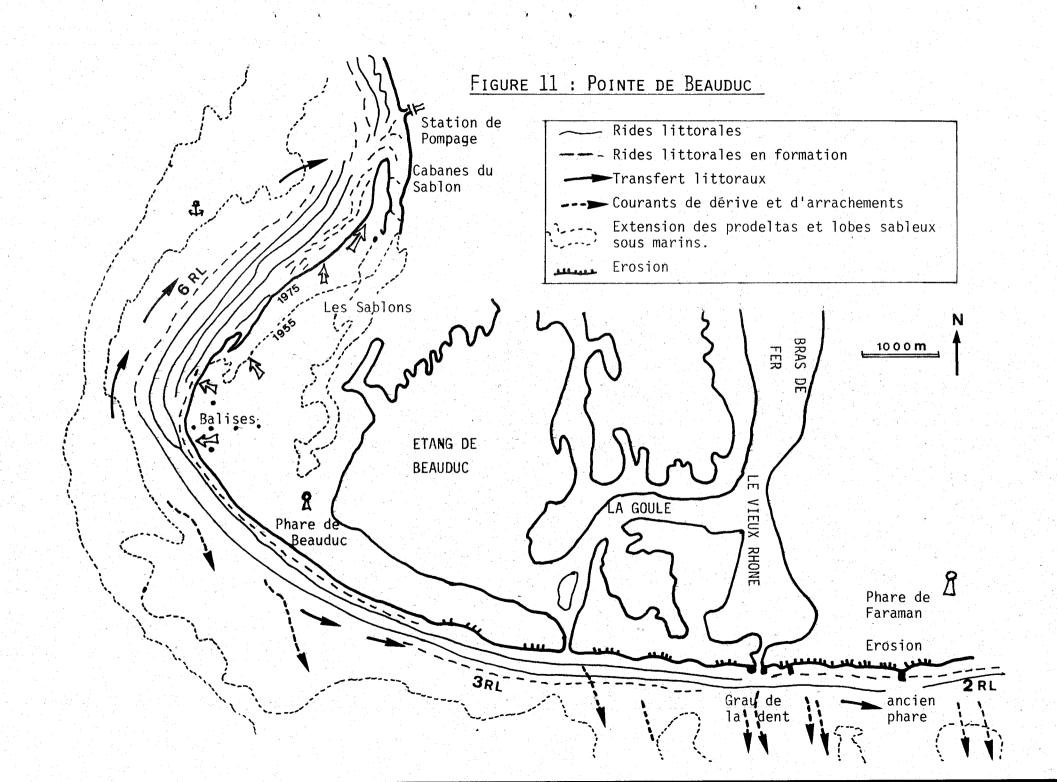
2°) Il serait souhaitable "d'interrompre" le plus rapidement possible le <u>grand épi oriental</u> et de le munir d'"ergot". Il a été récemment prolongé par des blocs immergés dirigés vers le SE.

Cet épi, en sa disposition actuelle et de par ses dimensions a une action également néfaste :

- il entrave les circulations latérales, E-W ou W-E et gêne les transferts; aucun mécz isme compensateur ne peut être réalisé comme cela est le cas pour de nombreuses plages naturelles en équilibre,
- <u>il organise la déflection des courants littoraux en accentuant la dispersion</u> au large responsable de l'érosion. Nous savons, par des exemples récents observés sur le littoral méditerranéen, que les cloisonnements naturels (affleurements rocheux s.m.) ou artificiels (épis longs, digues transverses (Fos) ou jetées, renforcent les mécanismes des courants de décharge (M. Roux, A. Rivière, J. Blanc).
- 3°) Quant aux <u>épis courts</u>, inefficaces et en voie de déchaussement, ils n'ont aucune influence déterminante, en ces lieux, vis à vis de la protection du rivage, contrairement aux ouvrages frontaux.
- 4°) Le mur et les "plots" de béton, les enrochements directement sis au rivage, réalisent une protection assez légère, vulnérable et trop rapprochée de l'agglomération.

#### XI - UNE AIRE DE COLMATAGE RAPIDE : LA ZONE DE BEAUDUC.

- 1°) Du point neutre (plage orientale des Saintes Maries de la Mer) à la station de pompage de Beauduc, située au Nord des Cabanes des Sablons, le littoral s'engraisse progressivement (fig.11):
  - morphologie curviligne très régulière,
- absence de sinuosités et de "niches d'arrachement" caractérisant les courants sagittaux (cf. plages de St Aygulf et de l'Espiguette Est).
  - présence constante d'une double RL:
- au S du phare de la Gacholle, la RL du large s'atténue et disparaît, tandis qu'au rivage, une nouvelle RL apparaît, assurant le relai de la précédente en réalisant toujours deux déferlements majeurs accompagnés du dépôt des sédiments.
- cette asymétrie et ces "relais" de RL inclinés vers l'Est traduisent un transfert du sable de l'W vers l'Est, conformément à la



direction du contre-courant côtier et à la dérive dominante du Mistral.

Cette zone ne présente actuellement aucun problème : le rivage est stabilité (depuis 80 ans) et le colmatage du golfe en ces lieux demeure modéré. Le transfert précité a été confirmé, en outre, par les observations aériennes et les clichés en émulsions panchromatiques, ektachrome et l.R. "fausses couleurs".

Au N.NE de la station de pompage, le colmatage s'accentue; on observe 3 RL successives, à -4 m, -2.5m et -0.7 m et quelques festons d'interférences.

#### 2°) Des cabanes des Sablons à la Pointe de Beauduc :

Cette zone de colmatage exceptionnellement rapide montre d'importantes variations de la ligne de rivage dans le sens du comblement de ce secteur du golfe des Saintes Maries de la Mer (fig.11).

- 1 la progression vers le large a été de 300 m depuis les 80 dernières années, soit un taux moyen de 3,75 m/an.
- 2 une flèche sableuse, longue de 3,5 km, s'est développée durant cette période, au taux moyen d'avancement de 44 m/an orientée du SW au NE et colmatant le fond du golfe.
- 3 à l'extrémité de la pointe de Beauduc, l'avancement du rivage, continuellement balayé par de fortes houles obliques déferlantes, s'avère très modéré (1,25 m/an); les apports compensant à peine la dispersion vers le large des sédiments.

La pointe de Beauduc était déjà bien développée au 17ème s. du fait de la pleine activité du Bras de Fer. Dès 1711, l'obturation de ce dernier amène une évolution relativement indépendante de cette pointe.

4 - l'extension des rides s.m., sur une frange littorale bordière de 1.200 m correspond, elle, à un colmatage beaucoup plus rapide au taux de 3 m/an en direction du N.W, contrairement aux indications de la carte marine 5.116 qui donne des vitesses d'avancement trop élevées (15 m/an) - à moins que ce document ait inclu la flèche sableuse oblique, de 3,5 km, vers le NE (cf. sous paragraphe 2).

Le comblement est réalisé par le développement de RL successives assurant plusieurs déferlements en série. Les caractères généraux de ces corps sableux en progression sont les suivants :

a) jusqu'à 6 RL successives s'observent sur le segment SW-NE doublant la flèche de 3,5 km. Les profondeurs concernées, depuis le rivage, s'étendent jusqu'à l'isobathe 10 m.

- b) les RL sont parallèles entre elles en épousant les contours de la grande flèche oblique (2).
- c) au NE de ce dispositif singulier, entre le rivage actuel (et momentané) de la flèche oblique, se développent des corps sableux festonnés et mobiles assurant un comblement rapide des petits fonds.
- d) le nombre de déferlements successifs de la houle oblique incidente (notamment les régimes W.NW et NW), peut être compris entre 4 et 6)
- e) le cheminement des matériaux sableux est ici dirigé du SW vers le NE. Ainsi, au mouillage de Beauduc se situe *le secteur à colmatage maximum*, là où ce cheminement rencontre la transfert du contrecourant du golfe des Saintes Maries de la Mer, orienté de l'Ouest à l'Est (fig.11).

Mais en cet endroit, aussi, se trouve la prise d'eau des Salins du Midi. Cette dernière est gênée par le sable en transit et les atterissements très rapides de ce secteur. Le déplacement plus au large est difficile à envisager à cause du fort débit exigé (15 m³/sec), de l'allongement des jetées qui formeraient un épi retenant encore plus de sédiment.

- f) les épandages sableux, repérés par l'observation aérienne, progressent jusqu'à une profondeur comprise entre 10 et 14 m.
- cette progression s'effectue vers le N.NE à partir de la pointe de Beauduc, sous l'action du transfert dominant,
- elle se manifeste encore vers le Sud de la pointe et du phare de Beauduc, formant un lobe sableux festonné, jusqu'à -18 m. Les lobes turbides ont été repérés et suivis par une mission "ektachrome" de l'I.G.N. Ils s'orientent en fonction de très fortes dérives de Mistral (fig.11).

Pour ces deux cas, nous ignorons la vitesse des courants de fond et le taux de progression de ces corps sableux.

#### 3°) De la pointe de Beauduc au grau de la Goule :

La courbure du rivage s'infléchit suivant une direction E-W et le tracé est stabilisé depuis 4 ou 5 décennies. On observe 3 RL se relayant en fonction d'un cheminement des matériaux maintenant orienté du NW à l'Est, sous l'action du contre-courant et de la dérive de Mistral (fig.11).

Ainsi, la pointe de Beauduc correspond à une aire de séparation des courants, où prédominent,

- d'une part, l'orientation SW-NE,

- d'autre part, le cheminement habituel de l'Ouest vers l'Est.

Au Sud de l'Etang de Beauduc, les RL se rapprochent du rivage

(400 m au maximum pour la RL externe) et la protection naturelle des

plages s'atténue. On note alors l'apparition des premières lunules d'arrachement traduisant une reprise modérée de l'érosion.

#### XII - UNE EROSION PARADOXALE DANS LE DELTA : LE RIVAGE DE FARAMAN.

#### A - Historique ; les problèmes.

Le Bras de Fer (ou "Vieux Rhône" : 1559-1583) fut obturé et interrompu par une crue majeure en 1711. Le bras vestigial montre une dichotomie à son débouché actuel en :

- un émissaire colmaté (bras principal) débouchant au grau de la Dent (ou de Saint Bequin),
- un bras étroit et sinueux, nommé "la Goule, débouchant dans l'étang de Ste Anne et communicant lui aussi avec la mer par un pertuis.

Du pertuis de la Goule, à l'Ouest, jusqu'à Faraman, vers l'Est, se situe un littoral en voie d'érosion alors que ce dernier correspond au large promontoire deltaïque du Bras de Fer.

Les recherches minutieuses de C. Duboul-Razavet montrent un recul ancien et continu. L'inquiétude des ingénieurs se manifesta dès le 19ème s. comme en témoigne la ruine de l'ancien phare de Faraman, construit en 1830 à 420 m de la plage et maintenant englouti par les eaux (son soubassement immergé se trouve à près de 70 m de la ligne de swash). Partout, en un siècle, le recul s'est manifesté sur 450 à 150 m selon les secteurs, parfois 500 m, devant les salines, de 1842 à 1892 (études inédites et observations de S.A.L.I.C.A.M.).

Cette érosion très vive menaçait l'intégrité des salines de Giraud et du Plan du Bourg. Une digue frontale réalisée pour leur protection doit être constament renforcée, prolongée, munie d'épis et d'enrochements. Aujourd'hui, la plage a totalement disparu dans la zone méridionale bordant le canal des Emprunts.

Les reculs locaux varient entre 25 et 80 m depuis 1895, face à la digue, soit un taux maximum de 1 m/an, - plus généralement, de 0,20 à 0,30 m/an. Ces dispositions frontales ont donc amené un ralentissement très sensible de l'érosion.

#### Quelles sont les causes de ces ablations?

Rivière, de Rouville, Jullien et Duboul-Razavet ont mis l'accent, dès 1951, sur le rôle déterminant des RL et leur rôle de protection. Sans ces dernières, une grande partie de la Basse Camargue aurait été emportée par l'érosion marine. Ils insistent derechef sur le danger et l'inefficacité des épis transverses bloquant le transfert littoral.

Ces auteurs préconisent :

- des obstacles frontaux immergés,
- des obstacles transversaux perméables,
- des épis en T (modèle italien)

... jusqu'au niveau de la lère ride littorale. Le fruit recommandé est de 7/1.

Le "moteur" essentiel paraît être réalisé par l'action des fortes vagues obliques de SE, alors que le Mistral produit un léger remblaiement en fonctionnant comme un "vent de terre" (C. Duboul-Razavet). Les ingénieurs des Salins ont observé des vagues de fortes tempêtes amenant des lames à + 2 m, alors que le nivellement de l'usine des Salins se trouve à +1,20 m. La digue à la mer assure alors l'unique protection des salines et, en fait, de la majeure partie de la Basse Camargue.

Cet ouvrage développé sur plus de 800 m, fut établi en enrochements. Des recharges de blocs furent effectuées de 1935 à 1941. En 1940, il fut envisagé d'établir, plus en arrière, des "digues de repli", notamment dans l'angle du Vieux Sémaphore (fig.12), afin de supprimer l'effet du point anguleux de la digue, que nous avons nommé "point F". Cet ouvrage de "seconde ligne" aurait été destiné à l'amortissement de l'onde en cas de rupture de la digue à la mer. Cette solution a d'ailleurs été réalisée en Camargue occidentale (cf. paragr.8) afin de protéger les installations de l'Etang des Salants et, notamment, les réserves "d'eaux-mères" et des "tables saûnantes".

#### B - Les corps sableux sous-marins.

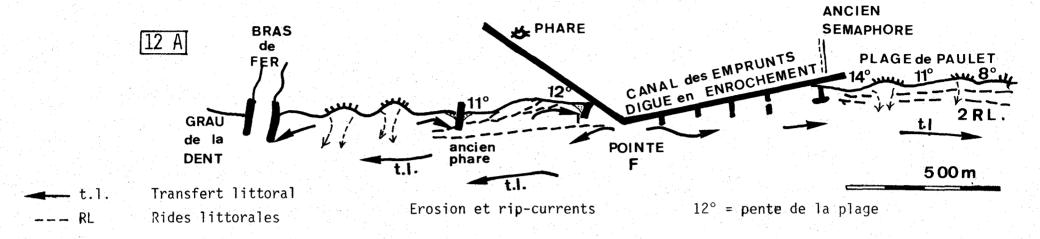
Les problèmes marins doivent généralement être résolus par des méthodes proprement adaptées et "marines".

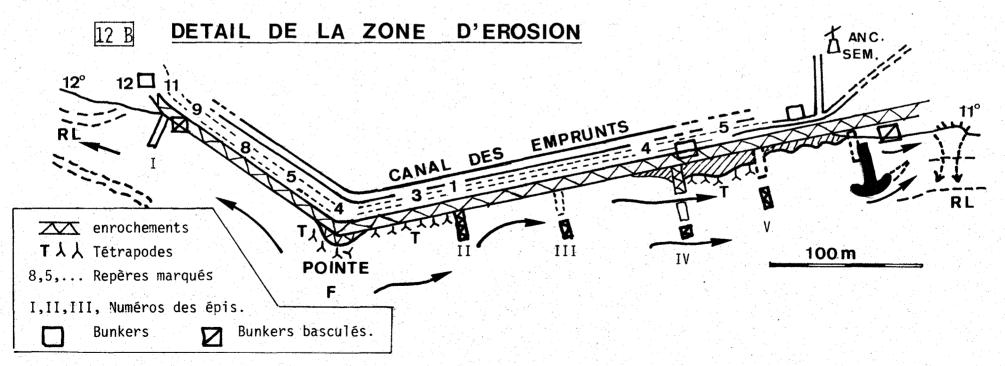
Un examen détaillé des fonds, face au littoral de Faraman, montre qu'une protection naturelle efficace est réalisée par le lobe deltaïque sous-marin du Vieux Rhône (Bras de Fer) et de son annexe (Bras de la Goule).

Les levers sous-marins réalisés en 1973 par moi-même et en 1975 par Roux M. et Jeudy de Grissac A., ont précisé l'extension de ce pro-delta non fonctionnel, très large, de -28 à -33 m. La structure du pro-delta comprend plusieurs unités sédimentaires assez distinctes :

- au sud de la Goule, jusqu'à -33 m
- au sud du Bras de Fer, jusqu'à -33 m

# FIG. 12 : EROSION A FARAMAN





- au sud de Faraman, jusqu'à -21 et -32 m.

La dernière "unité" (Faraman), paraît correspondre au "bras de Passon", situé entre le Bras de Fer et le bras de Piémanson, et maintenant occupé par les salines.

La présence de ces corps sédimentaires se traduit par deux conséquences essentielles :

- 1) protection relative du rivage de Faraman liée à ce "volant" réalisé par l'épandage des matériaux meubles mobiles. Ce littoral se trouvant actuellement dépourvu de RL (une à deux RL peu marquées et trop proches du rivage), demeure très fragile et l'érosion marine eut été assurément beaucoup plus forte, comme aux Saintes Maries de la Mer par exemple, sans la présence de ce "promontoire" deltaïque immergé.
- 2) mais, en contre-partie, les lobes sableux favorisent la réfraction des houles longues du large (T = 9 à 10 sec, L = 80 à 90 m), donc la convergence des orthogonales centrée au Sud du phare de Faraman, concentrant ainsi l'énergie au front de cette zone fragile.

## C - Les régimes érosifs.

Par gros temps, pour tous les régimes, se développent les processus érosifs.

- par Mistral, W.NW, Tramontane (N.NW, N.NE), la dispersion au large demeure favorisée par de fortes dérives malgré des engraissements locaux et temporaires non négligeables et assurant un "volant de sécurité". Le "bilan" général s'avère cependant déficitaire. Erosion moyenne ou légère.
- par régimes "marins" tels : W (Largade), S.SW (Labech), S (Siroco, rare) et surtout SE (Eissero), E.SE (Levant Eissero) et E ("Marin" ou Levant en Provence), de fortes vagues obliques déferlent au rivage mal protégé par une RL unique adjointe d'une autre ride à proximité immédiate de la ligne de <u>swash</u>. Erosion moyenne à forte, surtout à la "courbe à la mer" de la digue du canal des salines, au Sud de l'ancien sémaphore (fig.12).

Malgré un amortissement des houles établi à plus de 2 milles nautiques du littoral, la dispersion s'avère élevée et, par observations aériennes, nous en avons suivi l'épandage turbide jusqu'à 1,8 m.n., par des profondeurs de 9 à 12 m, jusqu'à 0,8 m.n. dans le 60° de la balise dîte de Faraman. Aucun chenal sous-marin n'a été mis en évidence, mais il apparaît que cette dispersion doive être attribuée à des courants sagittaux, tout comme à Cavalaire, St Aygulf ou Fréjus.

La menace très grave pesant sur la Digue à la Mer protégeant les salines et le "Canal des Emprunts" a fait aménager, depuis plusieurs décennies, des épis courts en enrochement, isolés ou groupés. Le succès de ces derniers demeure moyen et une faible partie du sable en transit peut être stockée. La non-édification d'épis transverses longs interrompant le transfert, comme aux Saintes Maries de la Mer, aévité une érosion désastreuse.

Des ouvrages frontaux, petits mais très robustes, ainsi que des corps réfléchissants, cônes de diffraction, etc.. seraient très souhaitables à condition d'implanter ces derniers à une distance convenable du rivage, décalés entre eux, par des profondeurs de 4 à 2,5 m.

Dès la plage de Paulet, la présence de deux RL mieux individualisées et de rides obliques près de la ligne du <u>swash</u>, atténue l'érosion marine et les menaces sur les salines. Cependant, R. Dumas, ingénieur-géologue à l'usine de Salins de Giraud, m'a obligeamment signalé une reprise de l'érosion à la plage du Paulet. Cette dernière ne présente actuellement aucun caractère de gravité mais elle risque, en cas d'accentuation, de menacer les salines - surtout si les nouvelles défenses de Faraman s'avèrent efficaces! (déplacements latéraux des zones dangereuses). J'y ai observé 1 à 2 axes de courants sagittaux, d'où la nécessité d'y établir, dans une deuxième phase, quelques ouvrages frontaux réfléchissant.

. En conclusion: l'extrème rapidité de l'érosion est confirmée depuis la carte d'Anville (1706), où le littoral s'étendait à 4.500m au Sud de l'emplacement du Vieux Phare de Faraman. En ce secteur très menacé, l'érosion a été supérieure aux ablations observées aux Saintes Maries de la Mer. La destruction quasi totale du bas delta en ces endroits depuis les 16e et 17e s., paraît indiquer une phase finale du cycle d'érosion jusqu'à la régularisation totale du tracé et du profil littoral. Cette dernière est dependant loin d'être réalisée, tout comme en Petite Camargue et aux Saintes, et malgré une relative atténuation de la vitesse d'érosion, la menace demeure. Les récents relevés de l'1.G.N. (1972) confirment ce point de vue.

# D - <u>Dispositions et état actuel</u> (fig.12).

Les fortes vagues de tempêtes surrélèvent le niveau à +0,50 m et même, durant quelques heures, à +1,0 m (R. Dumas). Malgré ces conditions, l'érosion a été à peu près contenue de mai 1974 à mai 1975.

En ce qui concerne les dispositions de protection, on peut retenir les faits suivants :

- enrochements des épis et de la digue frontale peu efficaces et irréguliers (notamment à la "pointe F", (fig.12), très exposée pour tous les régimes) (courbe à la mer).
- les tétrapodes, disposés depuis 1962-1963 correspondent à un essai intéressant à développer.
- les épis "perméables" à leur embase et partie moyenne sont inefficaces pour la zone frontale, en saillie, (pointe F) très exposée, des points 9 à 4 (fig.12); leur résultat commence a être sensible dès l'épi IV, près du point 5 (fig.12) où un "rendement" de 15 à 25 % est observé (on appelle "rendement" d'un épi, le rapport de la longueur "ensablée", retenant le sédiment, à la longueur totale, et de pour un seul \_ôté). En principe, le "rendement" d'un épi doit augmenter avec le temps, si son implantation est correcte. Un épi "déchaussé" aura un rendement négatif tandis qu'un épi "contourné", débordé par le sable et parfaitement réussi, aura un rendement de 100 %.

Le littoral en saillie de Faraman, très menacé est une zone de déséquilibre où converge l'énergie des vagues pour la plupart des régimes; comme pour les Saintes Maries de la Mer, il s'agit d'un littoral artificiellement maintenu, à grand peine. Une situation "équilibrée" obtenue en prolongeant, par la pensée, les courbures passant par deux "points neutres" encadrant Faraman, donnerait un rivage "théorique" près de l'ancien sémaphore, voire à plusieurs centaines de mètres au Nord.

Au point de vue technique, épis et défense littorale frontale sont en enrochements hétérogènes, de 0,2 à 0,3 T., parfois beaucoup moins et trop légers (largeur 2 à 3 m). La partie "perméable" des épis transverses est réalisée par des pieux bétonnés doubles, dissipant très partiellement l'énergie de la houle et permettant heureusement la circulation du transfert latéral.

Or, la "Pointe" de Faraman (Courbe à la Mer ou "Pointe F") est un site de convergence des orthogonales où se renverse le sens des transferts latéraux qui divergent en donnant deux dérives de sens opposé :

- vers l'Ouest, où la majeure partie du sable se dirige vers la Pointe de Beauduc,
- vers l'Est, c'est-à-dire en direction des plages de Paulet et de Piémanson (dîtes "plages d'Arles") où une certaine compensation naturelle atténue quelques érosions locales ("<u>rip-currents</u>").

#### . Remarques pratiques :

1° - La digue frontale de Faraman, de part et d'autre de la "Pointe F" (des points marqués 9 à 5) est une zone très menacée à :

protéger en <u>priorité</u> par des ouvrages <u>frontaux</u>, brise-lames décalés entravant l'action des "rip-currents" et amenant les déferlements importants avant leur arrivée au rivage. On étudiera également la possibilité d'implanter des obstacles immergés et notamment des cônes de diffraction (littoral des épis l à IV (fig.12).

2° - de l'épi IV à l'épi VI, vers l'Est, s'observe une zone à protéger plus efficacement et où la vitesse de l'érosion présente un ralentissement. Des obstacles immergés et brise-lames décalés, d'une distance qu'il faudra déterminer, devront être implantés. On renforcera les défenses frontales par de nouvelles lignes de tétrapodes.

Pour les deux cas précités, on remarquera que les blocs de la digue frontale protégeant le canal des Emprunts, sont trop légers et hétérogènes. On pourraît s'inspirer des digues lourdes de Carnon, Bormes et Cavalaire.

# XIII - LA PLAGE DE GRANDE PALUN.

Depuis le début du XVIIe s., ce secteur, lié au fonctionnement du bras secondaire de Piémanson, puis au Grand Rhône, a connu une avancée très rapide comprise entre 8 et 4 km. selon les zones. Le "point neutre" devait se situer à une égale distance du Bras de Fer et du Rhône de Piémanson, aux environs de la plage de Paulet. Sa position actuelle apparaît identique à quelques hectomètres prés.

La protection du rivage est accrue par la présence du lobe deltaïque sous-marin correspondant au bras de Piémanson. Ce dernier, cartographié par M. Roux, A. Jeudy de Grissac et J. Blanc, est assez réduit et ne dépasse guère la profondeur de 10 m. Les houles d'Est, réfractées par la flèche sous-marine occidentale du Grau de Roustan, y arrivent atténuées et freinées. Une protection supplémentaire, enrichie par un transfert dominant dirigé d'Ouest en Est, est réalisé par deux RL bien individualisées et se relayant en direction du Grand Rhône.

Après quelques ablations locales sans gravité à l'Est de Paulet, le littoral est stable, accompagné, au niveau de la plage de Salins de Giraud, d'une ligne de croissants festonnés très irréguliers par très petits fonds. A Grande Palun, ces croissants s'anastomosent au rivage et seule demeure une RL unique, très irrégulière formant, par la suite de nouveaux "croissants" contigus irréguliers, à structure non périodique, jusqu'à la flèche de Roustan.

Ces croissants festonnés irréguliers paraissent résulter d'interférences complexes entre plusieurs trains de houles obliques réfractées sur les lobes sableux sous-marins et au niveau de la partie immergée de la flèche occidentale de Roustan. Ils occasionnent plusieurs déferlements précoces protégeant le littoral.

#### XIV - LE DEBOUCHE DU GRAND RHONE AU GRAND ROUSTAN.

## A - Description (fig.13):

La largeur du débouché (800 m) autorise la pénétration de l'onde marine. C. Duboul-Razavet y signale des vagues d'amplitude 0,70m, remontant à 800 m en amont de grau de Roustan. Par régime de tempêtes d'Est se forme un véritable <u>barrage hydraulique</u> entravant l'écoulement du flux du Grand Rhône, ce qui est confirmé par l'observation aérienne.

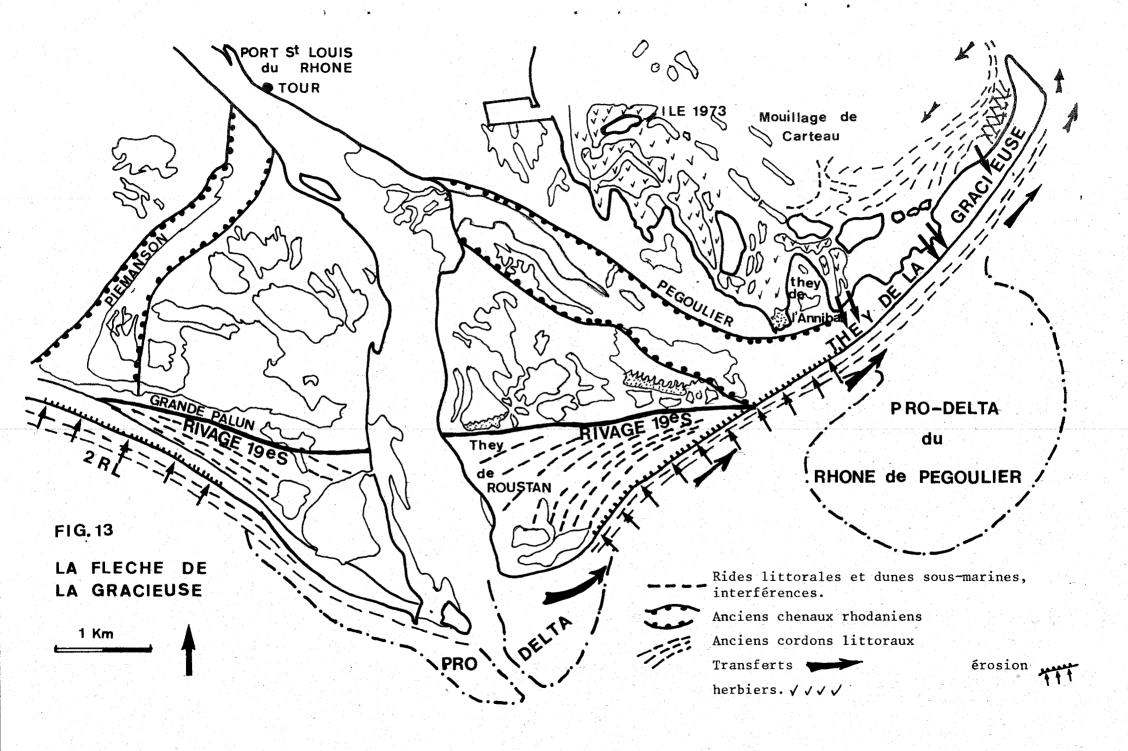
En novembre 1950, C. Duboul-Razavet étudia une situation dangereuse : la crue du Grand Rhône était génée par une forte houle de SE remontante, d'où le gonflement du fleuve et une inondation agravée par la faiblesse (persistante) de la digue rive gauche (submersion des marais de Roustan ; expertise J. Blanc, 1973). L'élévation du niveau s'accentua et menaça Port Saint Louis du Rhône. Fort heureusement, un changement du régime marin permit l'évacuation rapide de la surcharge.

De la plage de Grande Palun aux balises de Roustan, le littoral s'avance vers le SE épousant la géométrie du "promontoire" deltaïque actuel du Grand Rhône. Le chenal de ce fleuve, large de 800 m à cet endroit, se développe entre deux flèches sableuses sous-marines d'importance inégale :

- la flèche occidentale du Grau de Roustan s'amaigrit de moitié dans sa largeur depuis deux décennies mais s'allonge de 200 m vers le SE durant ce même temps. Depuis les recherches de C. Duboul-Razavet (1956), l'obturation du "grau" occidental du Grand Rhône et la jonction de l'île sableuse dans le chenal, ont amené la formation d'un crochon lobé dirigé vers le NE et formant un angle droit par rapport à la flèche primitive (missions I.G.N. de 1971 et 1974) (fig.13). Ainsi le chenal et le flux majeur se trouvent légèrement déportés à l'Est vers la flèche orientale de Roustan, prolongeant la rive gauche du Grand Rhône.
- cette dernière régresse depuis une trentaine d'années et la flèche sous-marine initiale, dirigée plein Sud, forme maintenant un lobe réduit avec des contours et fluctuations locales du littoral, en plus ou en moins, de 300 à 150 m.

Entre ces deux "levées" sous-marines sableuses, le Grand Rhône déverse un flux turbide dans la Méditerranée, parfaitement visible depuis les thermographies spectaculaires du satellite E.R.T.S. 1 et 2

Marseille-Luminy, le 7-11-75 J. BLANC PROFESSEUR GÉOLOGIE MARINE ET SÉDIMENTOLOGIE Avec mon souvenir et mes compliment 



(orbite à 900 km, 1973 et 1974), jusqu'aux multiples missions I.G.N. (1971, 1973, 1974) en émulsions panchromatiques, ektachrome (échelles 1/50.000, 1/30.000, voire 1/15.000). L'épandage forme un panache orienté plein Sud, très tranché, notamment à l'Ouest, s'infléchissant progressivement, à 3m.n. au large, dans la direction du courant général, c'est-àdire de l'Est vers l'Ouest, - sans qu'il faille y voir ici l'influence de la force de Coriolis (vitesse mesurée : 240 m/mn). Par régime de Mistral s.l., le panache s'étend alors vers l'Est, c'est-à-dire vers le golfe de Fos et le cap Couronne. La vitesse du courant est alors de 60 m/mn.

Les thermographies a très haute altitude prises par E.R.T.S. (900 km) montrent par ailleurs des remous et volutes complexes jusqu'à 60 km au large du grau de Roustan, par beau temps. Une partie importante du matériel turbide est finalement déportée par le courant général au large du Languedoc (confirmation par l'étude des minéraux argileux : H. Chamley et alt., cf. mission du N.O. "Norois" (1972) du C.N.E.X.O) Les dérives de Mistral et le contre-courant de la Nerthe amènent également des troubles rhodaniens en baie de Marseille et jusqu'au niveau des îles d'Hyères. Les thermographies de E.R.T.S. confirment les résultats obtenus au cours de ces dernières années par les chercheurs du Centre duOcéanologie d'Endoume et du Laboratoire de Géologie marine de Marseille-Luminy.

De part et d'autre du grau de Roustan, le transfert latéral est dirigé vers le SE et le NE.

# B - Les fluctuations de la ligne de rivage et des corps sableux sous-marins : une rapidité inquiétante :

La région considérée s'intègre à une aire deltatque très changeante, parmi les zones littorales les plus mobiles du globe. On y note en effet, 6 km de colmatages sédimentaires depuis 1737, de Port St Louis du Rhône au grau de Roustan (fig.13) tandis que des reculs de la côte de 2 à 3 km se sont développés depuis le XVIIIe s. aux graus de Pégoulier (comme à Faraman-Piémanson). Au point de vue archéologique, nous disposons ici d'un repère précis en la présence de la Tour St Louis, construite en 1737, au bord de la mer, à 6 km actuellement à l'intérieur des terres.

En certains cas, lors d'un procés avec les Domaines Nationaux, relatif à l'attribution de terres nouvellement créées, les actions dynamiques littorales et la reprise de l'érosion ont été plus rapides que la procédure et les territoires litigieux furent alors "repris" par la mer !

Or, le cours actuel du Grand Rhône au grau de Roustan résulte d'une déviation artificielle de ce fleuve qui utilisait, durant les trois premiers quarts du 19e s., le chenal dit "Rhône de Pégoulier", se jetant à l'emplacement médian du they de La Gracieuse, aujourd'hui envasé, ensablé et jalonné d'étangs et terres basses inondables.

La zone septentrionale de l'étang Napoléon, les marais au NNE de Mazet, des méandres et dépôts allongés en forme de "queue de comète", etc. sont discernables en photographies aériennes panchromatiques et infra-rouges, le long de cet ancien cours (fig.13). Il s'agit de formes encore très "fraiches", bloquées par l'obturation artificielle du chenal du Rhône de Pégoulier (fig.13).

La progression rapide des ensablements au rivage du they de Roustan a donné, depuis 1906-1913, un gain dépassant le kilomètre par l'étalement de cordons successifs (fig.13) se raccordant paraboliquement, à l'Est du they d'Eugène, au point P, véritable "point neutre" et <u>pivot</u> entre des zones littorales alternativement colmatées et érodées.

En ces lieux, à changements très rapides, on devra s'abstenir de tout aménagement durable. Examinons les phénomènes d'érosion :

1° - Pointe orientale et flèche sous-marine du they de Roustan ("they" significie : flèche sableuse à évolution rapide s'incorporant à un promontoire deltaïque ou à un corps sédimentaire annexe).

Les travaux de S. Duboul-Razavet et al. y montrent un recul continu depuis 1947 (plus de 50m). Ce dernier est lié à l'affaiblissement considérable de la charge sédimentaire tractée par le Rhône depuis les aménagements hydroélectriques installés à son lit et à celui de ses affluents, notamment la Durance. Cette charge avait été estimée à 17 millions de m³/an par Surell, au seul Rhône du Pégoulier. Elle doit être ramenée actuellement à seulement 4,5 à 5,9 millions de m³/an, pour le Rhône actuel dit "de Roustan", soit environ le 1/4 ou le 1/3 des valeurs calculées antérieurement d'après les travaux effectués par SOGREAH (1956-1957) (cf. rapport au Port Autonome de Marseille par Roux M. et Vernier E.).

Quant au lobe deltaïque sous-marin, au Sud du they de Roustan, il demeure l'objet d'un amaigrissement <u>relatif</u> beaucoup plus inquiétant, quoique discret. Depuis les recherches de C. Duboul-Razavet (1955-1957) et H. Pauc (1970), entre la barre deltaïque du Rhône et les deux bouées flottantes de "Roustan", le remblaiement sous-marin a très brusquement diminué depuis le début de la période des "aménagements rhodaniens". Les études de H. Pauc montrent :

- 12 m de remblaiement de 1935 à 1950
- 1,80 m de remblaiement de 1950 à 1958
- 1,20 m de remblaiement de 1958 à 1959

Cet auteur a montré que les teneurs en suspension des eaux turbides n'étaient plus, en 1969, que le 1/10 de celles observées en 1956 par Razavet aux mêmes lieux. Malgré d'importantes variations d'origine saisonnière (H. Chamley) dans la charge minérale, il s'ensuit un très grave déficit dans les taux de sédimentation. On passerait, d'après Pauc, de 0,80 m/an, avant 1950, -à 0,23 m/an de 1950 à 1958 (mise en eau des barrages et notamment de Serre-Ponçon) et à 0,10 m/an en 1972 (H. Pauc et E. Vernier).

Ainsi, l'érosion littorale <u>visible</u> continuera à se poursuivre activement en relation avec l'appauvrissement de l'alimentation sédimentaire sableuse du lobe deltaïque sous-marin. Ce dernier, présentant 1,5 km d'extension vers le Sud, on peut raisonnablement s'attendre, pour une durée d'un siècle, à un rajustement du rivage à environ 1 km au Nord de la grève actuelle, en l'absence de coûteuses interventions plus dangereuses qu'utiles en l'ocurrence.

2° - Des zones à léger engraissement compensent assez mal les érosions. On note une avancée relative du littoral au Sud de l'Etang Napoléon et au they d'Eugène (E. Vernier, 1972) : 150 m à 300 m depuis un quart de siècle (missions I.G.N. 1971 et 1974, relevés de l'IGN, mission été 1971 et juin 1972). Il faut cependant remarquer que cet accroissement spectaculaire, s'il protège provisoirement une partie limitée du littoral, demeure la conséquence des fortes érosions sous-marines précitées. Le matériel sableux en transit, déporté par les courants et dérives vers le NE, retourne partiellement au rivage où s'observe une ride littorale. Pour Vernier, la poursuite des mécanismes sédimentaires actuels tendrait à la réalisation d'un littoral rectiligne amenant l'ablation de la zone méridionale du they de Roustan.

# C - Nouvelles observations (1974, 1975) :

Elles confirment cette tendance érosive :

- 1°) E**ro**sion accentuée au rivage et formation, en 1973 et 1974, de lunules et niches d'arrachement. La protection d'une unique RL demeure insuffisante.
- 2°) Disparition d'une double RL là où, en 1955, C. Duboul-Razavet en signalait 2 ou 3; disparition des cordons festonnés observés en 1972, 1973. 3°) Accentuation générale du tracé rectiligne en direction du NE, c'està-dire du they de la Gracieuse.

#### XV - LE THEY DE LA GRACIEUSE.

#### A - Généralités et description :

Le they de la Gracieuse est une flèche sableuse longue de 4,5 km, dirigée vers le NE et s'infléchissant vers le N.NE à son extrémité immédiate du chenal maritime d'accès à Fos (fig.13).

Ainsi, cette flèche a une importance pratique majeure car elle protège les installations portuaires de Fos en représentant une "jetée" naturelle tout en menaçant, par sa progression, l'accès par le chenal.

Le problème s'avère double :

- 1°- protection de la flèche de la Gracieuse, actuellement en cours d'érosion,
- 2°- déviation artificielle et naturelle de son extrémité afin de permettre un trafic portuaire normal.

Ces contraintes pratiques ont nécessité des études détaillées poursuivies depuis, 1972, à la suite des recherches précises préalablement effectuées par C. Duboul-Razavet et H. Pauc.

La flèche elle-même résulte de la réunion, au 19e siècle, de quatre theys (1) : Roustan, au débouché du Grand Rhône, Eugène, la Balancelle et la Gracieuse.

Ces theys se trouvaient isolés lorsque le Grand Rhône s'écoulait par le grau de Pégoulier. Après la déviation artificielle du fleuve par le grau de Roustan, les vagues obliques, une branche du courant rhodanien et les transferts, ont formé un ensemble homogène, unidirectionnel - la flèche de la Gracieuse (improprement appelée, en fait, le "they de La Gracieuse").

Cette pointe sableuse a une largeur moyenne de 300 à 225 m, au minimum. On y relève plusieurs zones faibles au Sud du they de l'Annibal: par gros temps, la largeur n'y atteint que 100 m. Par tempêtes exceptionnelles, j'y ai observé la formation de longs""couloirs" immergés où le sable se dispose en ripple-marks et flute-casts. Ces interruptions temporaires et dangeureuses de la flèche de la Gracieuse sont visibles en photographies aériennes et en thermographie I.R. (Blanc et al., 1973). Elles sont la conséquence, non seulement de fortes tempêtes, mais encore de déséquilibres hydrostatiques liés à la présence des vents dominants (surélévation de 0,50 m et immersion de 150 m de plage, en profondeur) combinés à l'action de seiches (amplitude: 0,40m) et de "marées barométrique" (amplitude atteignant exceptionnellement 0,60 m).

. D'où l'importance particulière des conditions météorologiques et des phénomènes hydrodynamiques :

Le secteur considéré, dépourvu d'abri, est balayé par des vents violents : - secteurs N, N.NW, NW : 43 % jours par an, avec des vitesses pouvant atteindre jusqu'à 90 et 100 km/h ; - secteurs NE, N.NE, E.NE : 4 % j/an ; - secteurs S, E.SE, SE, E.NE : 30 % j/an, avec des vitesses de 30 à 45 km/h et de rares maxima à 60 km/h ; - secteurs S., S.SE, S.SW : 7% j/an ; - vents confus, trop variables et jours calmes : 16 % j/an.

<sup>(1)</sup> On appelle "they", un corps sableux rapidement établi aux débouchés des émissaires ("graus"), évoluant généralement sous la forme d'une île triangulaire.

# B - Evolution récente de la flèche de la Gracieuse :

A la fin du XVIIIe s., le Rhône est subdivé, en sa partie méridionale, par trois "graus" :

- grau de Piémanson (rive droite),
- grau de Roustan (dit grau "Vénitien"), au centre,
- grau de Pégoulier, à l'Est (rive gauche).

Cette disposition "en patte d'oie" favorise la multiplication des "theys"; Roustan, Eugène, le Mort, la Tartane et Pégoulier. En 1890, le delta avance à nouveau et trois nouveaux theys apparaissent: l'Annibal, Balancelle et La Gracieuse. Les chenaux multiples et trop peu profonds entravent la navigation sur le Rhône. Alors, l'ingénieur Surell fait obturer le grau de Roustan en 1852-1856 (E. Vernier, 1972).

L'échec de cette opération amène, en 1892-1893, la réouverture du grau de Roustan tandis que s'obturent très rapidement les graus de Piémanson et de Pégoulier (fig.13). Cela n'empêche pas de voir le Rhône de Prégoulier toujours porté actif sur des documents cartographiques de 1954!

En 1913, les grands traits de la physionomie actuelle du littoral sont acquis.

De 1913 à 1947, la fusion des theys précités amène la formation de la flèche de La Gracieuse. En mer s'individualisent les lobes pro-deltatques de Roustan, lié au Grand Rhône et de Balancelle, lié à l'ancien Rhône de Pégoulier.

# C - Un déficit dangereux du débit solide du Rhône, lié aux aménagements sur le fleuve, amène une reprise de l'érosion

Le débit moyen du Rhône, mesuré à Beaucaire en 1956-1957 donne les valeurs suivantes (Izaute, 1970) :

- débit moyen : 1790  $m^3/sec$  (avec une "fourchette" comprise entre 1000 et 2000  $m^3/sec$ ).
- débit en fortes crues : plus de 8.900 m³/sec
- débit d'étiage : 700 à 800 m³/sec.

Le débit des crues a fortement diminué depuis la construction des barrages : en 1967-1970, on mesure seulement des maxima à 5.745 m³/sec (Izaute, 1970 ; Vernier, 1972).

La décharge annuelle solide serait voisine du 1/10 des valeurs initialement établies par Surell. En 1970, le volume minimum des matières solides en suspension apportées par le Rhône, serait de l'ordre de 2 millions de m3/an. Une partie seulement de ce matériel se dépose aux embouchures et littoraux, les fractions fines (limons, pélites) migrent et enrichissent les fonds de "vases terrigènes côtières". Les panaches obtenues par ERTS montrent l'importance de cette dispersion. Quant au sable en transit, il devient de plus en plus rare au grau de Roustan (et demeure retenu en amont des ouvrages).

A l'exception des zones de colmatage telles que les golfes

d'Aigues Mortes, Beauduc et Fos, le littoral camarguais s'érode et ce déséquilibre peut s'accentuer.

# D - Hydrodynamique et récentes modifications de la flèche de La Gracieuse :

- 1°) Le flux rhodanien se traduit ici par une "branche" orientale annexe formant un courant dirigé vers le NE, longeant la flèche de La Gracieuse, à une vitesse de 60 m/mn par temps moyen. Par faibles vagues ou beau temps, les mesures à la fluoresceine montrent un transfert littoral, le long de La Gracieuse, se propageant à la vitesse de 5 à 40 m/mn.
- 2°) Les recherches de E. Vernier montrent la convergence des orthogonales au niveau des lobes deltaïques immergés de Roustan (actuel) et de La Balancelle (sub-actuel : appareil pro-deltaïque du Rhône de Pégoulier).
- 3°) Observations depuis 1947 : contrôle photographique aérien en 1960, installation de piquets et balises géodésiques, relevé I.G.N. en juin 1972, recherches de E. Vernier (1972, 1973), mission thermographique I.R. de l'I.G.N., mission photographique I.G.N. de 1974, observations en 1975.:

Les résultats sont les suivants :

- érosion du rivage au they de Roustan au taux de 11 m/an.
- érosion de la plage Napoléon au taux de 6 m/an.
- le "point neutre", ou "<u>fulcrum point</u>", véritable pivot du système est situé au Sud, entre les theys de la Tartane et de l'Annibal. Il est resté fixe depuis 27 années.
- amincissement de la flèche de La Gracieuse par érosion du front de mer (piquets-repères maintenant dans l'eau), formation de niches d'arrachement, une seule ride littorale en 1974 au lieu de deux en 1971 et 1972. Le recul du rivage atteint la valeur de 15 m/an.
- allongement de l'extrémité de la flèche de La Gracieuse en corrélation inverse de son amaigrissement en épaisseur ; allongement très rapide au taux de 24 m/an.

# E - Cette croissance singulière est maintenant modifié par l'activité humaine.

1) <u>Le flux déflecté</u> par la récente digue orientale du port de Fos, les vagues frontales obliques, <u>érodent</u> l'extrémité NE. Il a été nécessaire de couler en ces lieux plusieurs barges désaffectées. Ces "épis" improvisés ont fonctionné comme des obstacles réfléchissants et le colmatage a été total en deux années. Les épaves sont maintenant débordées par le sédiment (M. Roux et E. Vernier, 1975).

- 2) <u>Le pivotement des houles</u> à l'extrémité NNE de la flèche de La Gracieuse détermine une pointe sableuse en progression rapide, accompagnée, vers l'W.SW, par une succession de rides sableuses sousmarines (fig.13), "dunes" hydrauliques et "crochons" d'interférences. Le mouvement vers le "mouillage" de Carteau s'amplifie à la vitesse de 110 m/an.
- 3) <u>L'intervention des courants de marée</u> se traduit par un mouvement cheminant dans le golfe de Fos d'Est en Ouest. Ce dernier, arrêté par la digue est dévié vers le Sud avec une vitesse oscillant entre 204 m/mn (jusant) et 500 m/mn (flot).

A marée montante, les travaux de SOGREAH et du Port Autonome de Marseille, ont montré que ce courant se sépare en deux branches en abordant l'extrémité NE de la Flèche de La Gracieuse :

- 1) à l'Est, courant à 180 m/mn
- 2) à l'W, le courant est freiné et forme un tourbillon au mouillage de Carteau. Cette perte d'énergie, assez brusque, se traduit par le dépôt des "sables vaseux de mode calme" (S.V.M.C.), accentuant les colmatages au Sud du golfe de Fos.

Enfin, un autre tourbillon (flot et jusant) a été observé entre les deux digues de Port St Louis et de Fos (M. Roux et E. Vernier 1973, 1975).

#### XVI - LE SUD DU GOLFE DE FOS ZONE DE COLMATAGE RAPIDE.

Il a été exposé que les facteurs hydrodynamiques (réfraction des vagues et houles, freinage, courants de marée, etc...), liés à la Flèche de La Gracieuse, conditionnent une sédimentation très spectaculaire dans cette partie méridionale du golfe de Fos s'étendant jusqu'au mouillage de Carteau.

On y observe la zonation suivante à partir du centre du golfe (cf. Anse du Repos) :

- 1) extension du faciès des "vases terrigènes côtières" et d'une "cellule" de vase décantée (tourbillon) au voisinage du musoir Sud de la jetée du canal de Port St Louis (de -10 à -7 m).
- 2) zonation de plusieurs ceintures de vases sableuses et sables vaseux, de -7 à -4,5 m, décrites par M. Roux et E. Vernier.
- 3) ensuite, dépôt des sables vaseux de mode calme lié au freinage et à la réfraction des ondes contournant la flèche de La Gracieuse, et à la décantation des troubles en transfert à l'abri de cette dernière. Il en résulte la formation de trois lignes de corps

sableux allongés et parallèles, épousant le tracé des isobathes, de -4 m à -0,1 m (cf.13). La ligne la plus interne (vases et sables) émerge partiellement en un chapelet d'îles "néoformées" dont la plus importante, à l'Ouest (400m x 100m) a été nommée "lle 1973". Deux autres "îles" seront bientôt coalescentes au they de l'Annibal (fig.13). Les theys de Pégoulier et de Balancelle seront bientôt englobés, comme le they du Mort, dans un épandage de sable vaseux relié au littoral.

Contre les balises Ouest de l'extrémité de la flèche de La Gracieuse, se développe une sédimentation confuse liée aux interférences des vagues et clapôts : rides obliques se recoupant, "crochons", lobes unidirectionnels s'orientant suivant la direction de freinage du flux.

4) herbiers internes et fonds vaseux à Zostéracées, bancs de sables et vases affleurant, émergeant partiellement à marée basse. Le colmatage y est quasi achevé ("profondeurs" de -0,3 à -0,1 m). Il s'agit des zones situées entre les theys du Mort, de Pégoulier et de l'Annibal et au voisinage de "l'île 1973" et des autres "bancs" arrivés à l'émersion (fig.13).

La comparaison des relevés datant de la dernière décennie nous permet d'apprécier la vitesse de ce colmatage : 0,20 m/an au mouillage de Carteau et au niveau des rides sablo-vaseuses, on enregistre une "hypersédimentation" au taux de 0,35 à 0,70 m/an. En cinq années, les sondes sont passées de -11 à -8 m (vases terrigènes) et de -8 à -6 m (sables vaseux de mode calme).

Dans les années à venir, à très brève échéance, on assistera à la dégradation totale de l'herbier par hypersédimentation et pollution, à l'extension des faciès vaseux et à la formation d'un rivage reporté à l'isobathe -3 m, c'est-à-dire à 1.600 m du littoral actuel.

#### XVII - LES BILANS SEDIMENTAIRES.

#### A - Relevés du littoral :

Les documents suivants ont été utilisés :

- carte de Cassini (1744) : premier relevé "officiel".
- premiers relevés du Service Hydrographique : 1842. Entre les cartes de Cassini et les premières feuilles du S.H., on dispose, dès 1872, de feuilles du Petit Rhône au Grand Rhône. Certaines observations sont en effet antérieures à 1842.
- cartes et observations de C. Duboul-Razavet (1956) et C. Kruit (1955).
  - relevés de l'I.G.N. du trait de côte, rectifié en 1971.
- missions photographiques de l'1.G.N. en 1970, 1972 et 1974 (1/15.000).

# B - Représentation graphique :

La base des abscisses est l'état du rivage en 1975, d'après les missions aériennes de 1974 et de récentes et locales rectifications.

En ordonnées + et -, nous portons le terrain sédimenté ou enlevé par l'érosion, exprimé en mètres, par rapport à l'origine (riva-ge 1975).

Le choix des stations est effectué de l'Ouest vers l'Est : grau du Roi, Pointe de l'Espiguette, débouché du Rhône Vif, épaye de Petite Camargue, plage du Grand Radeau, grau d'Orgon, Saintes Maries de la Mer, plages de l'Ecluse à la cabane des Gardes, Galabert, les Sablons, pointe de Beauduc, phare de Beauduc, grau de la Dent, Faraman, Piémanson, grau de Roustan, plage Napoléon, they de la Gracieuse, they de Pégoulier.

Plus à l'Est, dans le golfe de Fos, les récents aménagements ont bouleversé les conditions naturelles de la sédimentation.

Les abscisses sont exprimées en km, les ordonnées en centaines de mètres. Les points neutres correspondent à l'intersection du graphe avec l'abscisse.

L'aîre des courbes exprime schématiquement les fluctuations des équilibres sédimentaires au cours du temps. Le rapport des aires positives et négatives, par rapport à l'état 1975, pour une période donnée, permet d'apprécier la <u>vitesse relative</u> des phénomènes d'érosion ou de sédimentation et la tendance évolutive d'une portion du littoral (fig.14).

#### C - Résultats :

#### 1° - Relative fixité des "points neutres" du rivage :

Depuis 230 ans, ces PN, véritables "pivots" entre les zones érodées et les secteurs en colmatage, ne présentent que des variations latérales faibles, à l'échelle du secteur étudié (quelques centaines de m). Citons, de l'Ouest vers l'Est:

- le Grau du Roi.
- entre la pointe de l'Espiguette et le Rhône Vif,
- plages à l'Est des Saintes Maries de la Mer,
- voisinage du phare de Beauduc,
- voisinage de l'ancien débouché du Rhône de Piémanson,
- à une époque récente (30 dernières années), plage Napoléon au they de La Gracieuse (observations de M. Roux et E. Vernier).

Le littoral camarguais est ainsi délimité en "secteurs" érodés à bilan sédimentaire "déficitaire" et en secteurs d'accumulation (hypersédimentation).

Le trait de côte de Cassini (1744) montre toujours un décalage des P.N généralement déporté vers l'Est (jusqu'à 2 ou 3 km) en relation avec les débits élevés, à l'époque, du Petit Rhône et du Bras de Fer.

#### 2° - Zones érodées "déficitaires" :

- a) Petite Camarque et Grande Camarque occidentale : le recul "moyen" (surface "intégrée) est de 750 m depuis 230 A., soit un taux d'érosion de 3,5 m/A.
- . <u>Causes possibles</u>: érosion des promontoires deltaïques du Rhône Vif (Rhône de Peccaïs), Petit Rhône, lits annexes: Rhône de St Roman et lits du 15e s. et 16e s. (Rhône de Sylvéréal et Rhône "Mort").

Abandon relatif et fermeture de ces émissaires : exemple : abandon du Rhône Vif naguère ouvert sous l'ordre de François ler, abandon du lit du Rhône de St Férréol capturé par le Vieux Rhône. L'aménagement ultérieur artificiel du lit du Petit Rhône actuel n'a pu compenser le déficit général en sédiment.

Alors l'évolution deltaïque passe d'un type à levées et à flèches ("mississippien") orientées N-S à un type lobé (modèle de Gilbert, orienté E-W).

Les apports sédimentaires ne compensent plus les ablations marines au littoral exposé à tous les régimes. En fait, ces phénomènes sont liés à la migration naturelle des chenaux et à l'activité humaine et non à des causes climatiques ou eustatiques.

- . <u>Lieux de transit du sable</u> : le sédiment est déporté vers l'Ouest et s'accumule à la Pointe de l'Espiguette.
- Dispersion au large du sédiment : la comparaison des aires + et "pondérées" nous amène à un déficit de 38 % pouvant être expliqué par une dispersion au large du sable. Il est important de noter par ailleurs, la conservation relative des lobes sableux sous-marins du pro-delta jusqu'aux isobathes -10 à -18 m. Ces corps sableux immergés assurent la protection du littoral et correspondent à la rétention d'une fraction importante du matériel sableux. Sans eux, la majeure partie de la Petite Camargue et du secteur occidental n'existerait plus et la mer dessinerait un large golfe supplémentaire.
- b) Faraman (Sud de la Grande Camargue): Recul moyen de 1300m, soit une vitesse moyenne d'érosion de 5,65 m/A, toujours pour une période de 230 A, supérieure donc à la vitesse d'ablation mesurée en Camargue occidentale.
- <u>Causes possibles</u> : érosion marine très rapide des promontoires deltafques construits par le chenal principal du Rhône (XVIIIe s.,

1711) ou "Bras de Fer", les émissaires annexes de Faraman et de Piémanson. L'arrêt du fonctionnement de ces chenaux et le déplacement du Grand Rhône vers l'Est ont brusquement privé ce secteur littoral d'une intense alimentation sableuse. D'où un rapide recul allant en se ralentissant heureusement, à partir du 19e s. sans que ce dernier ne cesse pour autant (destruction de l'ancien phare de Faraman et menaces sur le Canal des Emprunts). Ces phénomènes ont été étudiés en détail par C. Duboul-Razavet (1956 et alt.).

- . <u>Lieux de transit du sable</u> : le matériel est déporté par la dérive latérale côtière dans le secteur de la pointe de Beauduc (ou des Sablons), à la suite d'un assez courts transfert (quelques kms).
- . <u>Dispersion au large du sédiment</u> : la comparaison des aires intégrées d'ablation (à Faraman) et de sédimentation (à Beauduc) montre un déficit de 25 %.

lci encore on notera, dans le domaine sous-marin, la présence de lobes sédimentaires sableux vestiges du pro-delta de Bras de Fer, Faraman, Piémanson, aux isobathes -11 m, jusqu'à -33 m. Comme pour le cas précédent, on observe une arasion d'origine hydrodynamique des zones sommitales des talus de progradation, aux alentours des profondeurs -5 à -7 m c'est-à-dire au-delà de la limite du domaine "in shore" et de la ride littorale la plus externe. Cette arasion sous-marine correspond à une profondeur immédiatement inférieure au domaine des tourbillons des grosses vagues déferlantes chargées de sable en suspension.

A partir du niveau où se manifeste la troncature des lobes de progradation vestigiaux, la protection n'est plus assurée que par les défenses efficaces, mais fragiles, des rides littorales sableuses et l'érosion du rivage se poursuit. Compte-tenu de la présence de ces té-moins sous-marins des anciens lobes deltaïques, nous estimons, avec beaucoup d'imprécision, une dispersion au large de 15 à 20 % des stocks du sable littoral, en direction de la ceinture des vases sableuses et formations du détritique côtier.

c) Zone médiane et Nord-orientale du they de La Gracieuse, récemment étudiée par M. Roux et E. Vernier (1972). Antérieurement, les études de H. Pauc et H. Got (1970) avaient établi le récent déficit de l'apport rhodanien en sable au niveau du grau de Roustan, lié aux aménagements successifs du fleuve et, probablement de la Durance.

Le sable érodé au rivage est repris par le transfert du they de La Gracieuse vers le NE, en direction du golfe de Fos, La fraction dispersée au large n'est point évaluée car le départ du phénomène s'avère relativement récent. La présence sous-marine du lobe sableux de La Balancelle, admirablement conservé jusqu'à l'isobathe -20 m, vestige récent du lobe deltaïque frontal du Rhône de Pégoulier (1867) (fin du 19e s), assure la conservation assez précaire de la flèche sableuse qui protège, par le SW, les installations du golfe de Fos. Cette zone sous-marine en déficit et les plages voisines exigent une surveillance attentive.

# 3° - Zones d'accumulation rapide :

De l'Ouest vers l'Est :

- a) <u>La pointe de l'Espiguette</u>: exemple classique, comme pour la pointe de la Coubre, de flèche littorale sableuse en progression rapide. La moyenne pondérée de l'avancée du rivage sableux, exprimée sur 10 km, est de 1.500 m en 230 A, soit un taux <u>moyen</u> annuel de progression de 6,54 m/A, en excluant les zones d'avancée maximale (18 à 20 m/A).
- . <u>Origines du matériel sableux</u> : zones d'ablation précitées du littoral Ouest-camarguais, éléments remaniés de la Sylve Godesque (rivage et cordons de l'époque romaine), voire matériel turbide Issu du contre-courant du golfe d'Algues-Mortes. Ce dernier fait a été récemment confirmé par les enregistrements du satellite ERTS 1. de la NASA, mission de juillet 1972.
- . <u>Conséquences</u> : progression vers le SW et l'W.SW,
   colmatage par le côté oriental du golfe
  d'Aigues-Mortes,
- les aménagements récents et les jetées de Port Camargue accentuent la retenue du sédiment en transit et accélèrent l'édification de flèches sableuses sous-marines au Nord et à l'Ouest, "piégeage" du sédiment dans un étroit secteur compris entre le Grau du Roi et Port Camargue.

#### b) La pointe de Beauduc:

La moyenne de progression, assez difficile à établir, est estimée à 1.950 m en 230 A, soit un taux annuel moyen de 8,5 m/A. Dans le domaine sous-marin, les fonds semblent indiquer une progression maximale de 10 à 12 m/A pour l'isobathe -5 m. A plus grande profondeur les colmatages se poursuivent, à une vitesse moindre non évaluées du fait de l'insuffisance des données bathymétriques au cours du temps jusqu'aux environs de -16, -17 m, en direction du SW et de l'W.NW. Le phénomène montre une analogie frappante avec le cas de la pointe de l'Espiguette et paraît relever des mêmes mécanismes : ici, érosion à Faraman, transfert puis colmatage à Beauduc.

- . Origines du matériel : sable en transit provenant des anciens chenaux rhodaniens (Bras-de-Fer : "cf. Rhône Vieux") à l'issu de l'érosion des plages et anciens promontoires deltaïques. Les recherches récentes (1975) de P. Clairefond tendraient à montrer la présence d'un <u>autre mécanisme</u> d'alimentation issu des zones d'érosions rapides des Saintes Maries de la Mer, à la faveur des houles et du contre-courant littoral du golfe dirigé de l'Ouest vers l'Est . Ainsi, le Grand et le Petit Rhône contribueraient à l'alimentation de la flèche de Beauduc. Les thermographies I.R de E.R.T.S (bande 8-14  $\mu$ ) confirment ce point de vue.
- . <u>Conséquences</u>: "équilibrage" sédimentaire littoral de la Basse Camargue. colmatage par l'Est du golfe des Saintes Maries de la Mer. Cependant, la zone d'accumulation demeure trop éloignée pour assurer une compensation naturelle à l'érosion inéluctable du rivage des Saintes Maries.

## 3° - Le grau de Roustan : débouché du Grand Rhône :

On peut considérér ce secteur comme un des exemples de progression parmi les plus rapides du monde : près de 7 km depuis le XVIIe s. Le taux moyen de progression, en 230 A est estimé à 2450 m, soit une avance moyenne de 10,7 m/A. Depuis deux décennies on observe un assez brusque ralentissement de cette progression, devenue assez faible au rivage, accompagnée d'une érosion amenant le recul sous-marin du lobe deltaïque actuel du Grand Rhône (recherches de H. Pauc, M. Roux et E. Vernier). Il est vraisemblable qu'un nouveau cycle d'érosion s'amorce au grau de Roustan, en relation avec la modification de la charge du Grand Rhône, conséquence des aménagements hydro-électriques. Les érosions observées au they de la Gracieuse, menaçant la flèche sableuse, agraveront la situation à moyen terme.

Pour le moment, les phénomènes d'ablation littorale ou sousmarine s'avèrent discrets. Dans quelques années, lorsque le nouveau cycle d'érosion sera amorcé, d'importantes défenses devront être prévues en ce secteur.

#### 4° - La flèche de la Gracieuse :

Les mêmes réserves s'appliquent à La Gracieuse. Néanmoins, l'origine composite de la flèche, précisée par E. Vernier, - résultant de la coalescence de plusieurs "theys", puis du démantèlement de la "barre'sableuse du Rhône de Pégoulier (1867 jusqu'à 1910), - sulvi du transfert SW-NE actuel, rend difficile une évaluation de la progression.

Les examens cartographiques et les missions aériennes successives font état de progressions annuelles de 40 à 60 m, avec un maximum à 70 m/A. Si nous considérons le trait de côte, extrêmement complexe en ces lieux du fait des theys de l'Annibal, de la Tartanne, du Mort, de la Gracieuse et de Balancelle, etc..., en 1744 (carte de Cassini, très imparfaite), en 1842 (plus exacte, mais fausse 25 années plus tard!), en 1872 (fausse dès 1910, mais "utilisée" officiellement jusqu'en 1954!), nous arrivons à 2.250 m / 230 A, - soit un taux de progression annuel de 9.78 m/A.

Cette moyenne pondérée est inférieure aux observations des trente dernières années, mais elle prend en compte l'édification de tous les corps sableux deltaïques complexes étoilés autour <u>des</u> débouchés du Rhône de Pégoulier. La "fermeture" récente de ce bras a radicalement modifié les mécanismes sédimentaires ; les actions purement marines se sont substituées aux facteurs fluviatiles. A ce moment-là, la progressions de la flèche, orientée en fonction du transfert dominant, s'est accentuée vers le NE à une vitesse inquiétante pour la maintenance normale du chenal d'accès à Fos.

L'évolution actuelle justifie deux préoccupations essentielles :

- 1 maintenir libre le chenal maritime par le pivotement vers le N et le NNW de l'extrémité de la flèche sableuse, pivotement favorisé par le mouillage réussi de plusieurs épaves (diffraction et dépôt accéléré de sédiment).
- 2 érosion du rivage SE de la flèche, amincie et menacée. Afin de conserver cette jetée naturelle protégeant le golfe de Fos, il importe de chiffrer exactement le taux d'ablation et d'étudier des mesures de protection à court terme.

## XVIII - CONCLUSIONS - L'EVOLUTION DU LITTORAL DE CAMARGUE.

### A - En tenant compte des seuls facteurs naturels :

Si nous admettons une régularisation normale du littoral de part et d'autre des "points neutres", à la même vitesse d'érosion ou de colmatage et sans intervention humaine, on aboutira à un tracé subrectiligne, légèrement ondulé.

En postulant, par hypothèse:

- les conditions actuelles de débit du Rhône,
- l'analogie des régimes évolutifs,

... on pourra envisager le schéma suivant :

- 1) lent comblement, par l'Est du golfe d'Aigues-Mortes en moins de trois siècles, et arasion rectiligne de la Pointe de l'Espi-guette.
- 2) érosion générale du littoral de la Petite Camargue et de la Basse Camargue occidentale sur 2 à 1,5 km de profondeur, jusqu'à l'obtention d'un tracé équilibré. Au taux actuel et sans autre phénomène annexe, cela nous amène à un peu plus de deux siècles. Ce rivage futur postule la disparition de l'étang des Salants, Grande Rhée, Grand Radeau, Icard, Orgon et Ste Maries de la Mer.
- 3) colmatage de la partie orientale du golfe des Saintes Maries de la Mer et régularisation de la pointe de Beauduc jusqu'à l'obtention d'un tracé stable à Faraman, à plus d'un km à l'intérieur des terres.
- 4) à l'embouchure actuelle du Grand Rhône (grau de Roustan), l'érosion se poursuivra probablement sur 2 km, se régularisant sur le tracé du 18e s. et peut être même sur celui du 17e s. (plus de 3,5 km). Cela implique la disparition de la flèche de la Gracieuse dont seule une partie de l'extrémité subsistera sous la forme d'une île ("they") analogue aux theys de l'Annibal, de Balancelle et de Pégoulier, etc...

## B - En tenant compte des interventions humaines :

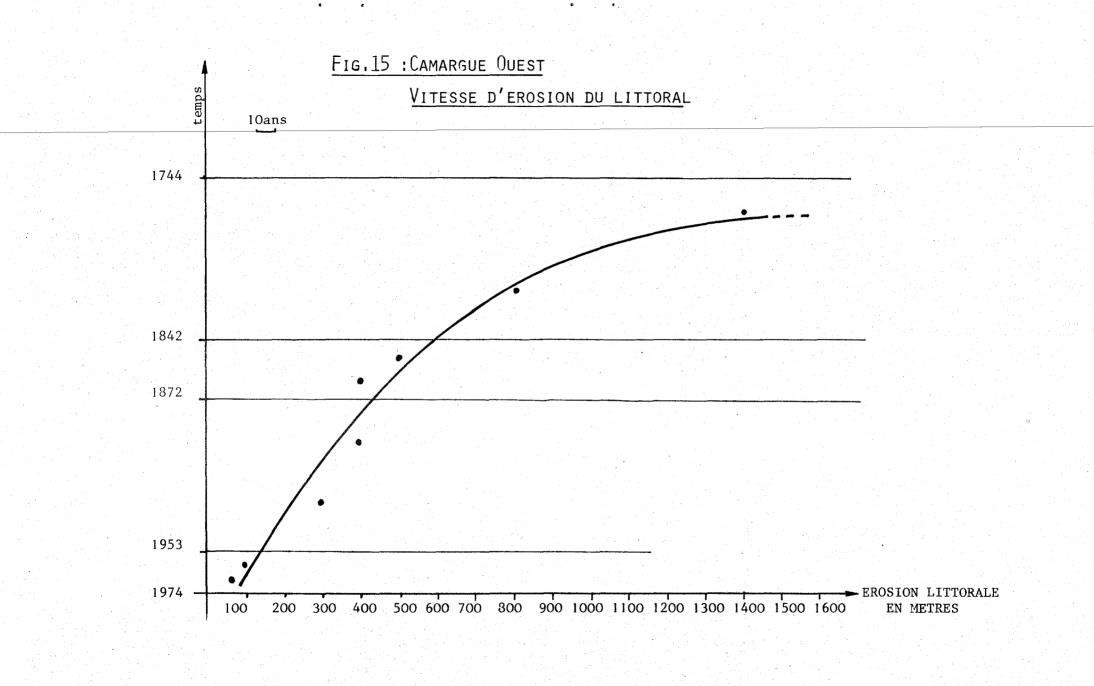
Le schéma précédent stipule un taux constant d'érosion et de sédimentation. En réalité, les vitesses d'évolution du rivage, tout en conservant leur tendance initiale, diminuent au cours du temps :

- au fur et à mesure que l'on se rapproche de la position idéale d'équilibre littoral,
- au fur et à mesure que l'on se rapproche latéralement des "points neutres".

Cette réduction de la vitesse n'est point valable au débouché de l'émissaire principal actif (Grand Rhône) où l'apport détritique a été important et rapide, puis très brusquement réduit ; nous ne pouvons alors chiffrer exactement, à l'époque actuelle, l'importance quantitative de cette rupture d'équilibre.

En d'autres lieux, (Camargue Ouest), où les émissaires ne sont plus fonctionnels (ou très réduits), on assiste à une diminution moyenne de la vitesse de recul du littoral depuis le 18e s (fig.15).

- . de 1744 à 1842 : 98 A = recul de 1.400 à 800 m
- . de 1842 à 1872 : 30 A = recul de 400 à 500 m
- . de 1872 à 1953 : 81 A = recul de 300 à 400 m
- . de 1953 à 1974 : 21 A = recul de 65 à 100 m.



En se tenant éloigné des points neutres, on constate que la courbe des vitesses d'érosion, en fonction du temps, diminue assez régulièrement à un taux voisin de 5 % pour dix années (fig.15).

D'autre part, il est à prévoir que la charge sédimentaire du Rhône risque encore de diminuer, en tous les cas, n'augmentera plus et ceci pourra accélérer les vitesses d'érosion, mais seulement à proximité de Fos et du grau de Roustan. Ailleurs, la diminution des vitesses d'érosion apparaît devoir se continuer.

Cela peut nous permettre d'agir et les mesures de protection devront concerner les zones d'ablations afin d'enrayer la tendance naturelle (érosion) et de fixer le littoral sans rechercher à obtenir un discutable effet inverse (engraissement), impossible à réaliser du fait de l'arrêt des apports sableux fluviatiles.

Les secteurs menacés où des mesures de protection appropriées doivent être entreprises sont, de l'Ouest à l'Est :

- 1 débouché du Rhône Vif et littoral de Petite Camargue,
- 2 littoral des Saintes Maries de la Mer
- 3 littoral de Faraman à Piémanson
- 4 grau de Roustan
- 5 they de La Gracieuse.

L'érosion apparaît cependant inéluctable, jusqu'aux rivages théoriques d'équilibre. Il convient maintenant de préciser la nature générale des dispositifs de protection à court et moyen termes.

# C - Moyens de protection :

Les analyses précédentes montrent que seuls des épis courts et serrés, <u>interrompus</u> et bien étudiés peuvent être efficaces en certains sites. Des épis longs et onéreux interrompent les transferts, arrêtent la charge disponible en transit et déterminent :

- d'une part, une dangereuse reprise d'érosion, en "aval", du transfert,
- d'autre part, accentuent parfois et canalisent le flot de retour en agravant alors la dispersion au large.

Les brise-lames frontaux, en enrochements très lourds sont fort coûteux mais, après une étude détaillée pour chaque site, risquent de s'avérer plus efficaces si l'on considère les défenses de Carnon. Ils peuvent être combinés avec des épis en T et des défenses transverses interrompues.

Les obstacles réfléchissants immergés ("plots", cônes de diffraction) paraissent devoir réaliser une protection locale efficace à la condition de la combiner aux solutions précédentes et après une étude en modèle réduit et quelques essais en vraie grandeur.

Quant aux défenses longitudinales à terre, telles que "plots" bétonnés accumulés, enrochements de digues, perrés, de construction dispendieuses mais parfois nécessaire (Saintes Maries de la Mer), elles paraissent toujours insuffisantes. Des accumulations longitudinales denses de tétrapodes bien étudiés donnent de bons résultats. Généralement, il faudra combiner ces défenses avec des brise-lames et des épis en T, munis d'ergots.

Des "recharges" de matériaux sableux paraissent difficiles à concevoir au vu de l'étendue à protéger et de <u>l'échelle</u> des érosions, vagues incidentes et phénomènes de dispersion.

Mais il faudra s'abstenir de tout emprunt de matériaux sousmarins (sables et agrégats) à l'exception de quelques secteurs à étudier et délimiter (Aigues Mortes, l'Espiguette et Beauduc). Ailleurs, toute extraction est à prohiber.

. <u>La protection à court terme</u> sera le sauvetage des Saintes Maries de la Mer. Le front urbanisé, directement menacé devra être très <u>rapidement</u> équipé de défenses frontales en mer, comme cela a été réalisé à Carnon.

A Faraman et au Rhône Vif, des ouvrages courts et serrés, obstacles réfléchissants, parfois immergés, brise-lames et épis en T devront être prévus.

La protection à moyen terme visera à sauver la Petite Camargue et le they de la Gracieuse. Les recherches devront être poursuivies ; des ouvrages devront être envisagés. Pour la flèche de la Gracieuse, d'une grande "fragilité", il sera nécessaire de surveiller les profils en évitant des ouvrages dangereux (jetées) ou inutiles.

Au grau de Roustan, des "pièges à sable" et des ouvrages réfléchissants peuvent être prévus après une étude détaillée portant sur plusieurs années d'observations.

- . La pollution menace particulièrement les secteurs sulvants :
- cellules envasées et circuits tourbillonnaires d'Aigues Mortes et grau du Roi, évidemment : golfe de Fos.
- littoral du Grau du Roi et de Port Camargue.
- plages aux abords du grau de Roustan (Grand Rhône) et de la flèche de la Gracieuse.
- plages des Sablons, à Beauduc où des cabannes, détritus et installations sauvages souillent le littoral, tout comme à l'Est des Saintes Maries de la Mer.

- . On définira des aires de protection :
- 1) <u>immédiate</u> : grau du Roi, Port Camargue, l'Espiguette, Rhône Vif, Saintes Maries de la Mer, flèche de la Gracieuse.
- 2) <u>rapprochée</u>: Petite Camargue, Grau d'Orgon, Faraman, grau de Roustan, dépourvues d'habitations et d'aménagements.
- 3) <u>éloignée</u> : protection plus large de l'ensemble des autres zones du littoral camarguais : Beauduc, grau de la Dent, etc...

Le tableau récapitulatif suivant résume très brièvement les caractères essentiels des secteurs étudiés.

# - TABLEAU RECAPITULATIF -

# Littoral de Basse-Camargue

1975 = 78 km de côtes explorées (J. Blanc)

	1979 - 78 Kill de COTe	s exprorees (o. branc)	
Site et longueur de rivage	Etat du rivage	Incidences pratiques	Transferts hydrocynamique
grau du Roi (canal du Vidoule) à Port Camargue - 2 km.	Colmatage très rapide Hypersédimentation au golfe d'Aigues-Mortes	Marina de Port Camargue Jetées, ouvrages frontaux, piègeage du sédiment et formation d'une flèche sableuse en progression très rapide. Rôle des jetées de Port Camargue.	de Port Camargue et transfert actif du SW au NE, Rôle des dérives Mistral et du contre-courant du
Pointe de l'Espiguet te et annexes 8 km.	Colmatage actif (3 RL ou 4 RL) mais en di- minution. Erosions très locales.	Pas de problème à Port Camargue sauf pollution Ailleurs sites déserts mais sea line.	Transfert S vers N. Dérive Mistral N vers S. Courants sagittaux.
Débouché du Rhône Vif et annexes - 5 km.	Erosion malgré 2 à 3 RL.	Epis transverses. Zone menacée mais dé- serte. Installations de pompage à protéger Menaces de rupture du cordon.	Courants sagittaux transfert de 1'W vers 1'Est, s'inver- sant par régime de VE.
Littoral de Petite Camargue - 10 km.	Erosions locales ou équilibre précaire, 2 à 3 RL. Lobes sous-marins près du grau d'Orgon.	Erosions assez vives mais locales. Sites déserts, pas d'ouvra- ges. Influence du Petit Rhône à l'Est.	Transfert W vers E, à 1'Ouest ; trans- fert de 1'E vers 1'W; à 1'Est courants sa- gittaux. Souvent, transferts moyens in- déterminés.
Grau d'Orgon et Saintes Maries de la Mer - 5 km.	Panache du Petit Rhô- ne. Colmatage à l'Est du grau d'Orgon. Forte <b>éros</b> ion aux Saintes. Littoral menacée	Erosion dange euse, site urbanisé. Ouvra-ges actuels (épis)peu efficaces ou dangereux Protection frontale très urgente.	Transfert de l'W vers l'E. Forte disper- sion au large. Réten- tion des sédiments en transit par le Grand épi Ouest.
Golfe de Beauduc - 13 km.	Régularisation, puis équilibre et colmata- ge 2 RL.	Aucun problème. Zone déserte.	Transfert de l'W vers l'E. Contre courant du golfe.
Pointe de Beauduc - 9 km.	Colmatage très rapide 6 RL. Avancée d'un lobe deltaïque sousmarin et corps sableux en progression.	Modification très rapi- de du rivage, zone déserte, aucun problè- me.	Transfert SW vers NE rencontrant trans-fert et contre-courant du golfe, Au Sud, transfert du NW au SE.
Faraman et annexes 9 km.	Erosion, localement rapide, modifications de la ligne de rivage.	Menaces sur la digue, le canal des Emprunts et les Salines malgré l ou 2 RL.	Courants sagittaux forts. Dispersion au large. Transfert de l'W vers l'E et réci- proquement.
Plage de Grande Pa- lun - 7 km.	Erosions locales, point neutre à Paulet puis état d'équilibre	2 RL et crochons. Aucun problème.	Ondes réfractées. Colmatage vers l'E. Transfert de l'W à l'E

			سے سے سے سے سے جب ہے ہے ہیں ہے ہیں ہے
Grau de Roustan - 3 km.	kmAvancées locales mais recul global rapide. Panache rhodanien.	Erosion des lobes sous-marins par insuf- fisance de la charge rhodanienne. Erosion accélérée prévisible.	Dérive du panache en fonction du courant général et des trans- ferts.
Flèche de La Gra- cieuse s.l 6,5 km.	Avancée rapide de la flèche vers le NE et le NNE. Recul du riva- ge méridional, assez rapide.	Risque de rupture du cordon sableux proté- geant le mouillage de Fos. Fragilité de la flèche par fortes tempêtes mesures à prendre (renforcement).	Transfert du SW au NE. Action du pana- che rhodanien et dimi- nution de la charge (danger). Erosion de l'extrémité de la flèche par le courant déflecté de Fos.
Zone méridionale du golfe de Fos - 6km	Colmatage exception- nellement rapide, flèches et theys coalescents, îles nouvelles, etc	Pollution et hypersé- dimentation, dispari- tion des herbiers, sables vaseux de mode calme.	Tourbillons, courants de marées. Ondes réfractées et pivotantes, freinage, délestage et interférences.

#### BIBLIOGRAPHIE.

- ALLEN G.P., 1972. Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse univ.Bordeaux 1, n°353 : 314 p.
- ALOISI J.C., 1973. Les facteurs de la sédimentation récente sur le plateau continental languedocien. C.R. Acad.Sci.Paris, 257; 145-148.
- ALOISI J.C. et DUBOUL-RAZAVET C., 1974. Deux exemples de sédimentation deltaïque actuelle en Méditerranée : les deltas du Rhône et de l'Ebre. Bull.Cent.Rech.Pau, S.N.P.A., 8 (1) : 227-240.
- ALOISI J.C., MONACO A., THOMMERET J. et THOMMERET Y., 1975. Evolution paléogéographique du plateau continental languedocien dans le cadre du golfe du Lion. Analyse comparée des données séismiques, sédimentologiques et radiométriques concernant le quaternaire récent. Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn., (2), 17 (1): 13-22.
- ALOISI J.C. et MONACO A., 1975. La sédimentation infralittorale. Les pro-deltas nord méditerranéens. <u>C.R.Acad.Sci.Paris</u>, 280 : 2833-2835.
- ALOISI J.C. et CHARLET J.M., 1975. Intérêt de la thermoluminescence dans l'étude de l'alimentation en quartz du golfe du Lion. Rev. Géogr.phys. et Géol.dyn., (2), 17 (1): 23-38.
- ARNOUX A. et CHAMLEY H., 1974. Minéraux des argiles et détergents des eaux intersticielles dans les sédiments superficiels du golfe du Lion. C.R.Ac.Sci.Paris, 278: 999-1002.
- AUBERT M. et J., 1973. Pollutions marines et aménagements des rivages.

  Rev.intern. d'Océanogr.médic., suppl.1973, C.E.R.B.O.M., INSERM, 309p.
- AUBERT M., BREITTMAYER J.P. et N'GUYEN TAN, 1975. Télédétection par avion et satellite dans l'étude des pollutions marines. Rev.intern.d'Océanogr.méd., 29-30: 33-52.
- BELLAICHE G., 1975. Sur l'origine et l'âge des levées sédimentaires profondes : cas du delta sous-marin du Rhône (Méditerranée nord-occidentale). Marine Géology, 19 : M1-M6.
- BENOIT F., 1940. Le delta du Rhône à l'époque grecque. Rev. Etud. Anciennes 42 : 567-572.
- BERTRAND J.P., GUY M. et L'HOMER A., 1974. Complexité de la sédimentation récente et actuelle du delta du Rhône et de la côte méditerranéenne française (projet Golion). <u>Europe Earth Res. satellite</u>; Congr. Frascati: 121-133.
- BERTRAND J.P. et L'HOMER A., 1975. Les deltas de la Méditerranée du Nord; le delta du Rhône. 9ème Congr.Intern.Sédiment., excursion 16, Nice: 65 p.
- BLANC F., CHAMLEY H. et LEVEAU M., 1969. Les minéraux en suspension, témoins du mélange des eaux fluviatiles en milieu marin. Exemple du Rhône. C.R.Ac.Sc.Paris, 269: 2509-2512.
- BLANC J., 1972. Recherches sur les gîtes sous-marins de sables et graviers sur le précontinent de la Provence occidentale. <u>C.N.E.X.O.</u>; contrat 72/475, départ.2 : 42 p.

- BLANC J., 1975. Recherches de sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection. CNEXO, 164 p.
- BONNET A. et DUBOUL-RAZAVET C., 1952. Note préliminaire sur le Quaternaire de la Camargue. B.Soc.Géol.France, (6), 3: 277-281.
- DENIZOT G., 1961. Les côtes de France et en particulier du golfe du Lion depuis 6.000 ans. Act.du 86eme Congr.Soc.Sav., Montpellier: 145-151.
- DUBOUL-RAZAVET C., 1956. Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône. Mém. S.G.F., (35-76): 234 p.
- COLEMAN J.M. et GAGLIANO S.M., 1965. Sédimentary structures : Mississippi River deltac Plain. Coastal Studies Inst., Louisiana stat.univ., Baton Rouge, tech.rep., 16: 133-265.
- COLEMAN J.M. et WRIGHT L.D., 1974. Mississippi river mouth processes : effluent dynamics and morphology development. <u>Journ. of Geol.</u>, 82 : 751-778.
- COLEMAN J.M., SUHAYDA J.N., WHELAN T. et WRIGHT J.D., 1974. Mass movement of Mississippi River, delta sediments. Coastal Stud Inst., Louisiana stat.univ.Baton Rouge, tech.rep., 174: 1-20.
- DOLAN R., 1966. Seasonal variations in Beach Profiles along the Outer Banks of North Carolina. Coast.stud.inst. Louisiana stat.univ.Baton Rouge, tech.rep., 27: 4 p.
- FEBVRE-CHEVALIER C., 1969. Etude bionomique des substrats meubles dragables du golfe de Fos. Tethys, 1 (2): 421-476.
- FONTANEL A., GUY M. et LALLEMAND C., 1974. Cartographie automatique : exemple de réalisation partielle d'un système. Ex. La Camargue. <u>Bull.</u> Soc.Franc.Photogrammétrie, 56 : 33-38.
- GAUTIER Y.V., 1957. Recherches sur les biocoenoses benthiques des côtes de Camargue et du golfe de Fos. <u>Bull.Stat.Mar.Endoume</u>, Marseille 22 (13): 55-64.
- GUY M., 1973. La complexité de la sédimentation holocène dans le delta du Rhône. Rev. de Photointerprét., 73-1, (6-8): 35-47.
- GUY M., 1974. Dynamic behaviour of coastal sédimentation in the Lions Gulf. Type III Rep.Centr.Nat.Et.Spat., SR, n°901, réf.IFP 22.342.
- HERNANDEZ-AVILA M.L. et ROBERTS H.H., 1974. Form process relationships on island coast. Coastal stut Inst. Louisiana stat. univ., Baton Rouge; tech. reprt. n°166: 1-76.
- IZAUTE J., 1970. Courants fluviaux et maritimes dans la région de Fos. Et.hydr. Port autonome de Marseille, 12 p.
- KRUIT C., 1955. Sédiments of the Rhône delta. Grain-size and microfauna. Mouton ed Gravenhage: 180 p.
- LENTHERIC C., 1870. Le littoral d'Aigues Mortes au XIIIe s. et au XIVe s. Mém. Ac. du Gard., 233 p.
- LENTHERIC C., 1905. Le Rhône. Histoire d'un fleuve. Paris, <u>Plon ed.</u>, 447 p.

- LAGAAIJ R. et GAUTIER Y.V. 1965. Bryozoan assemblages from marine sediments of the Rhône delta. France. Micropaleontology, 11 (1): 39-58.
- Mc. ARTHUR D.S. 1969. Sand movement in relation to beach topography.

  <u>Coast.stud.Inst.</u>, Louisiana st.univ., Baton Rouge, tech.rep.67:1-26.
- MONACO A., THOMMERET J. et THOMMERET Y., 1972. L'âge des dépôts quaternaires sur le plateau continental du Roussillon (golfe du Lion). C.R.Ac.Sci., Paris, 274 : 2280-2283.
- MORGAN J.P., 1963. Louisiana's changing shoreline. Coastal stud.Inst., Louisiana stat.univ., Baton Rouge, techn.reprt.16: 66-78.
- OOMKENS E., 1970. Depositional sequences and sand distribution in the post glacial Rhône delta complex. Deltaic sedimentation, modern and ancient. Soc.Ec.Paleont.Miner., spec.public (15): 198-212.
- PASSEGA R., RIZZINI A. et BORGUETTI G., 1967. Transport of sediments by waves, Adriatic coastal shelf, Italy. <u>Am.Assoc.Petrol.Geol.Bull.</u>, 51 (7): 1304-1319.
- PASSEGA R., 1974. Sorting variations between fluviatile and marine environments. Mem. Inst. Geolog. bassin d'Aquitaine, 7: 381-385.
- PAUC H., 1970. Contribution à l'étude dynamique et sédimentologique des suspensions solides au large de l'embouchure du Grand Rhône (grau de Roustan). Th.3ème cycle. Sc.Nat.Montpellier : 134 p.
- PAUC H. et GOT H., 1970. Etude de l'évolution dynamique récente au large de l'embouchure du Grand Rhône par l'utilisation des rejets du Centre nucléaire de Marcoule. C.R.Ac.Sci.Paris, 271 : 1956-1959.
- PICARD C., 1972. Les peuplements de vase au large du golfe de Fos. <u>Tethys</u> 3 (3): 569-618.
- RIVIERE A., de ROUVILLE A., JULLIEN A. et DUBOUL-RAZAVET C., 1951. Considérations générales sur la défense des côtes meubles. Les ouvrages de protection de la plage de Faraman. <u>C.R.Ac.Sci.</u>, Paris, 233 : 319-321.
- ROUX M. et VERNIER E., 1975. Evolution récente des fonds meubles de la partie occidentale du golfe de Fos. <u>C.R.Ac.Sci.Paris</u>, 280 : 2097-2100
- RUSSEL R.J., 1942. Geomorphology of the Rhône delta. Assoc.Amer.Geogr., 32 (2): 147-257.
- S.O.G.R.E.A.H., 1971. Protection du littoral de Petite Camargue. Rapp. techn. 35 p.
- Van ANDEL T.H., 1950. Provenance, transport and deposition of the Rhône sediments. Thèse Wageningen: 220 p.
- Van STRAATEN L.M., 1957. Dépôts sableux récents du littoral des Pays Bas et du delta du Rhône. Geol.Mijnb., 19eme Joargang : 196-213.
- Van STRAATEN L.M., 1959. Littoral and submarine morphology of the Rhône delta. Sec.coastal Geogr.Conf., Baton Rouge Proc., Nat.Ac.Sc.Nat.res. couneil: 233-264.

- VERNIER E., 1972. Recherches sur la dynamique sédimentaire du golfe de Fos. Thèse 3e cycle, Aix-Marseille II : 72 p.
- WADDELL E., 1973. Dynamics of swash and implication to beach response.

  <u>Coast.stud.Inst.</u>, Louisiana stat.univ., Baton Rouge, tech.reprt. 139:
  1-47.
- WRIGHT L.D., ROBERTS H.H., COLEMAN J.M., KUPFER R.L. et BOWDEN L.W.,
  1973. Process-form variability of multiclass coasts: Baja California
  Coastal stud.Inst., Louisiana st.univ., Baton Rouge, techn.reprt.
  137: 1-54.

MOTS DESCRIPTEURS: Sedimentologie, applications, plages, delta, érosion marine, Rhône, Camargue.

Droits réservés : Centre National pour l'exploitation des Océans et J. BLANC.