

ETAT DES FONDS DU GOLFE DE FOS EN 1971

SEDIMENTOLOGIE ET MORPHOLOGIE COTIERE

par

ROUX R.M., Assistant

et

VERNIER E., Assistant

Laboratoire de Géologie et Sédimentologie marine

Centre Universitaire Marseille-Luminy

U.E.R. Sciences de la Mer et Environnement

Le présent rapport sédimentologique sur l'état des fonds du Golfe de Fos fait appel à des résultats de recherches effectuées avant le début du creusement des darses (1964), puis au cours des travaux d'installations portuaires (1970-1971).

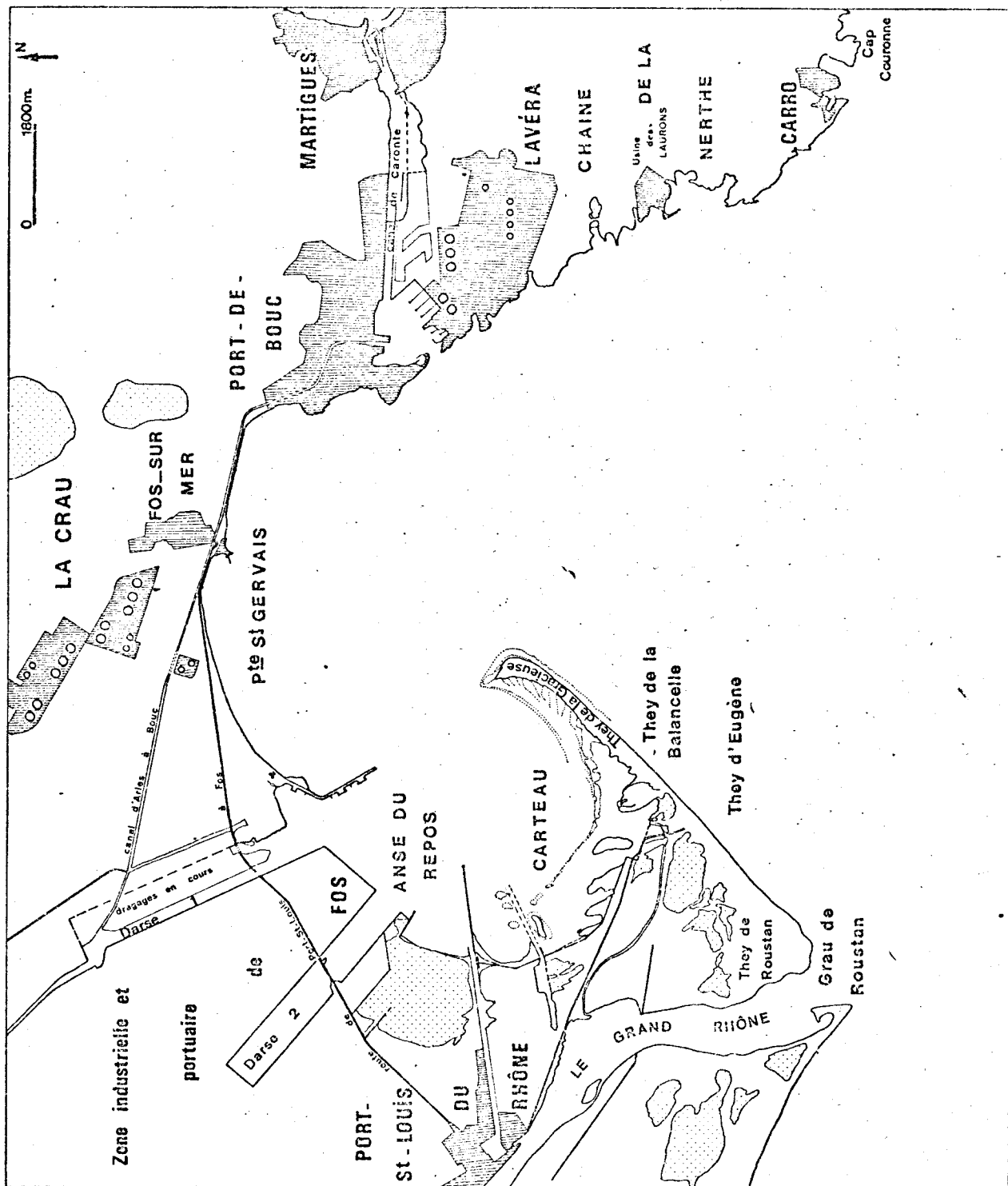
Après un bref rappel du cadre géologique et des mécanismes d'indivisionnalisation du Golfe, nous développerons les aspects sédimentaires (voir plan page 2) dont la connaissance nous a semblé nécessaire dans toute action visant à contrôler la pollution ou diriger l'aménagement de la future zone portuaire.

Pour chacun de ces aspects, nous préciserons d'abord la situation avant le début des travaux, puis nous envisagerons quelles étaient, en 1971, les modifications apportées à ces schémas par la construction des ouvrages maritimes. Depuis lors l'évolution a certainement continué, mais aucune étude des sédiments n'a été, à notre connaissance, entreprise. Le point "0" se situe donc en 1971.

Cette brève enquête, destinée à un public peu familier des problèmes de sédimentologie littorale, est volontairement simplifiée. Le lecteur intéressé voudra bien se reporter aux ouvrages cités en bibliographie.

- SOMMAIRE -

Cadres géographique et géologique	3
Historique et mécanismes d'individualisation du Golfe de Fos ...	4
I Les alluvions apportées par le Rhône	6
A - Les apports en matériaux fins.	
B - Les apports par charriages.	
II Hydrodynamique du Golfe de Fos	8
A - Les houles.	
B - les courants de marée.	
C - les courants fluviaux de sortie du Rhône.	
D - Les courants de vagues et de vents.	
III - Répartition et sédimentation des matériaux rhodaniens dans le Golfe de Fos	13
IV - Evolution récente des côtes occidentales du Golfe de Fos	14
A - Les portions immergées du promontoire de Peygoulie.	
B - Les portions émergées du promontoire de Peygoulie.	
C - Conclusion.	
V - Nature et répartition du sédiment sur les fonds du Golfe de Fos .	19
A - Au début du siècle.	
B - Avant les travaux portuaires.	
C - Après les travaux portuaires.	
D - Conclusion.	
VI - Sédimentologie	23
A - Eléments tributaires des transferts par dérive littorale.	
B - Eléments de la sédimentation différée.	
VII - Conclusion générale	26



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

Il est connu des géographes de l'antiquité grâce au canal (FOSSES MARIENNES) que fit creuser le général romain MARIUS pour relier Arles à la Méditerranée, en débouchant non loin de l'actuel village de Fos-sur-Mer.

Le Golfe est divisé en deux parties par la flèche sableuse de La Gracieuse qui, partant de l'embouchure du Grand Rhône, s'allonge vers le NE jusqu'à 6 km de Port-de-Bouc. La plus grande dimension du plan d'eau, entre la pointe de Roustan et celle de Carro, n'excède pas 15 km, alors que 11 km séparent l'éperon St Gervais du Cap Couronne.

Dans la moitié septentrionale, au Nord de la flèche de la Gracieuse, les profondeurs sont faibles (-5 à -15 m) en raison de l'envasement. Cette zone reçoit les eaux issues soit de l'étang de Berre par le canal de Caronte, soit du Rhône par le canal St Louis, dont l'embouchure n'est qu'à 11 km de Port de Bouc. Les fonds de -20 m pénètrent largement dans la moitié sud, tandis que l'isobathe 50 limite le Golfe vers le large.

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

A l'Ouest, au contraire, des côtes basses limitent les corps sédimentaires en cours d'évolution de l'embouchure du Grand Rhône. Il s'agit de hauts fonds sableux, dont l'apparition et le développement sont liés aux apports rhodaniens. Ces formations émergent peu à peu, parfois signalées par une épave jadis échouée (Tartane, Balancelle), au nom évocateur (Gracieuse, Annibal). Ces atterrissements, dont la forme et la position sont sans cesse en évolution, portent, depuis les marins Grecs, le nom de "Theys".

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

CADRE GEOLOGIQUE

La région du Golfe de Fos et son arrière pays, limitée au Nord et au Sud par les chaînes de la Nerthe et des Alpilles, correspond au débouché sur la vallée du Rhône des dépressions synclinales de la Crau et du bassin d'Aix-en-

AVIATION

↑ N

E = 1/200 000

LA DURANCE

BEAUCAIRE

CHAÎNE DES ALPILLES

ARLES

GRAND RIVON

LA CRAU

MIRANAS

CHAÎNE DE
SICHANAS
LA FAYE

DEPOTS

SABLO- VASEUX

ET
ALLUVIONS DU

DELTA
MODERNE

FOS

PORT DE
BOUC

MASTIGUES

CHAÎNE DE
LA NERTHE

Provence, que sépare le petit chaînon de la Fare-St Chamas.

Dans ce secteur, le bâti structural E-W de la Basse-Provence s'ennevoie sous le complexe deltaïque N-S du Rhône.

A la charnière de ces deux domaines, matérialisée par l'axe NW-SE du Golfe de Fos, l'évolution tectonique néogène a engendré de nombreuses vicissitudes du tracé des réseaux hydrographiques régionaux.

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

Au Pliocène, le sillon péri-alpin s'approfondit et s'enfonça : les dépôts antérieurs, déformés, prirent une allure de gouttière d'axe N-S, alors que des failles ou de très fortes flexures apparaissaient sur les bordures de ce chenal. A l'heure actuelle, l'inclinaison vers l'Ouest des couches miocènes et l'allure rectiligne NW-SE de la côte occidentale de la Nerthe sont respectivement attribuables à ces deux phénomènes.

Enfin, à deux reprises au cours du Quaternaire, la Durance, sollicitée par la dépression d'Arles - Fos, abandonna la portion de son cours située au Nord des Alpilles. Elle vint ainsi répandre ses galets dans la Crau, en passant successivement par les seuils de Roquemartine et de Lamanon.

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

Partant du niveau de la mer à Fos, le toit de ce substratum caillouteux s'incline en direction du SW suivant une pente régulière. Il passe ainsi à -40 m sous le They de la Gracieuse puis s'étend vraisemblablement vers le large sous les vases du plateau continental.

HISTORIQUE ET MECANISMES D'INDIVIDUALISATION

L'aspect actuel de la côte occidentale du Golfe résulte de plusieurs phases successives de construction par les apports rhodaniens échelonnés sur le dernier millénaire.

De la fin du Moyen-Age jusqu'en 1587, le cours du Rhône est en position orientale (phase B du schéma 3). Le fleuve édifie les attérissements compris entre les marais du Galégeon et le lit actuel, en emprisonnant les étangs de la

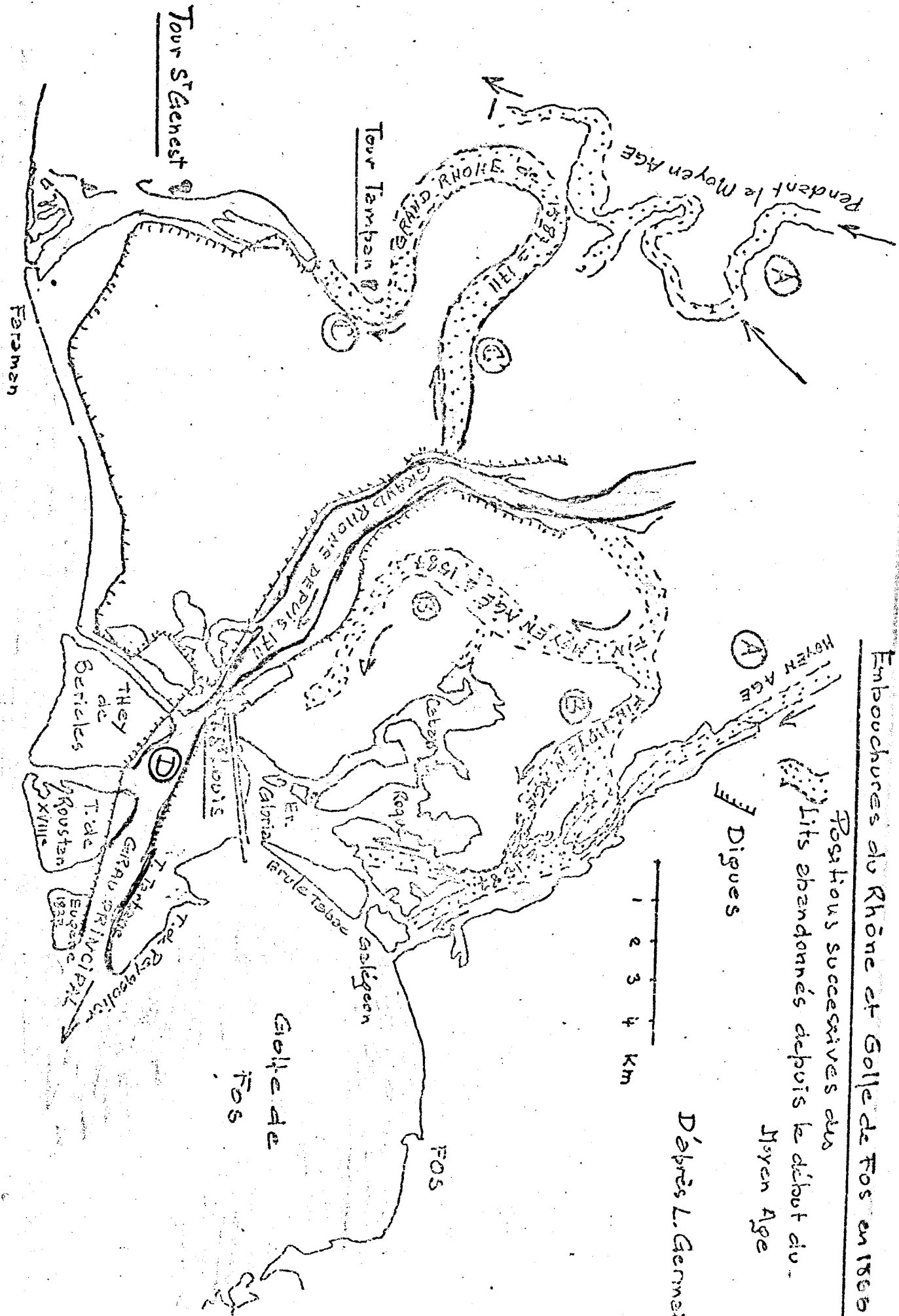
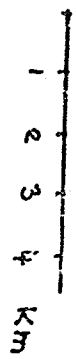
Embouchures du Rhône et Golfe de Fos en 1865

Positions successives des
lits abandonnés depuis le début du
Moyen Age

Moyen Age

Digues

D'après L. Germain



L. Germain

Schéma n°3

Village de Fos

Et. Caben
la Roque

Futur
cours
du
Rhône

GRAS DE FER
GRAND RHÔNE

Tour de Tampion

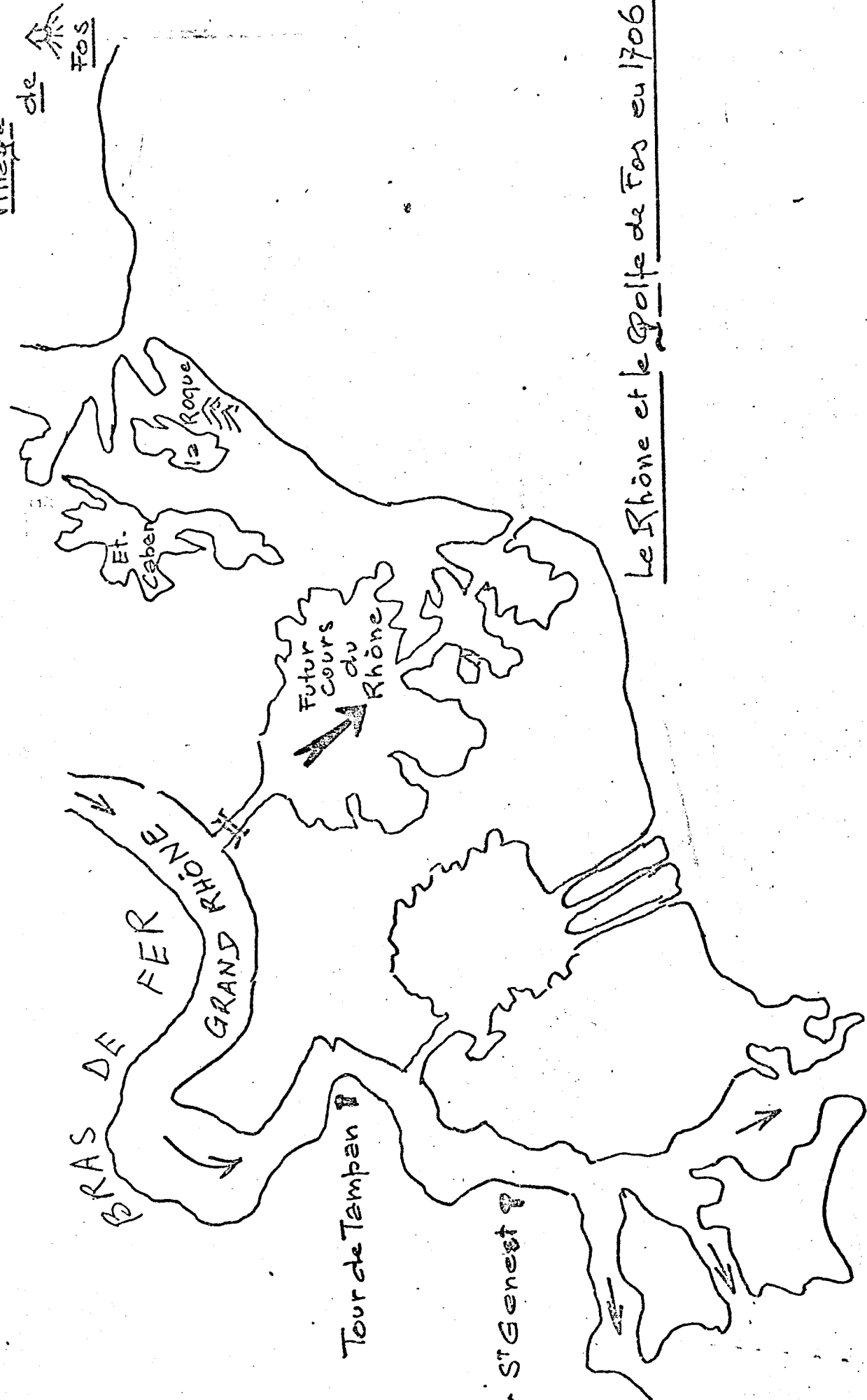
Tour S^r Genest

Le Rhône et le Golfe de Fos en 1706

Future position
des rives de Fermeu

L. Germain

Schéma n° 4



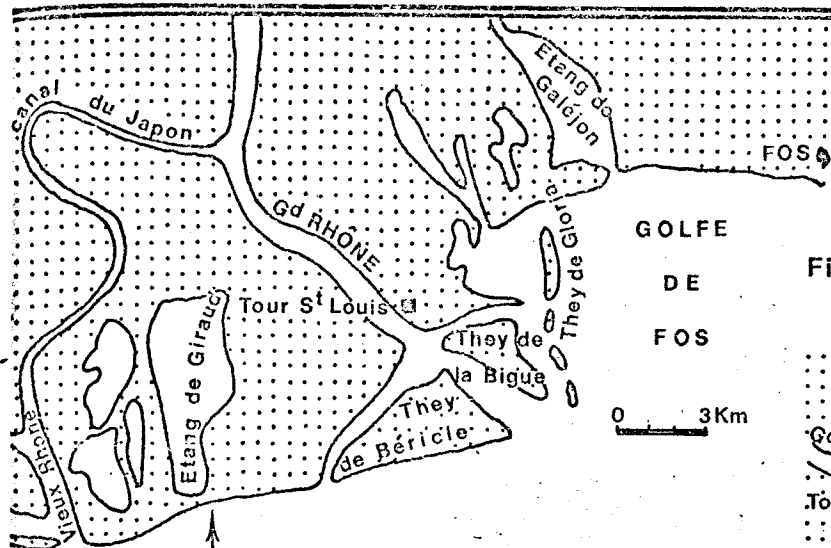


Fig.1. Carte de Cassini -1778

Fig.2- Carte de M^r de la Lauzière-1784

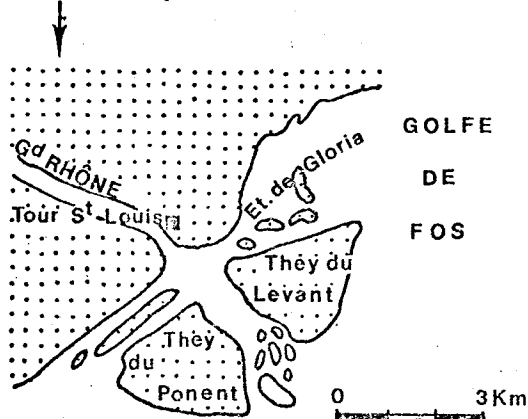


Fig.3- Carte de Matheron-1840

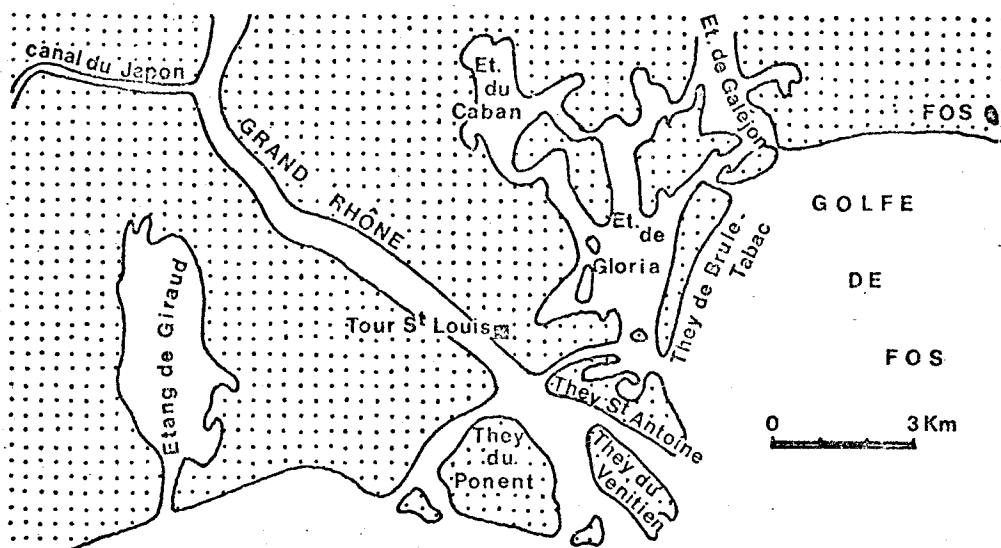
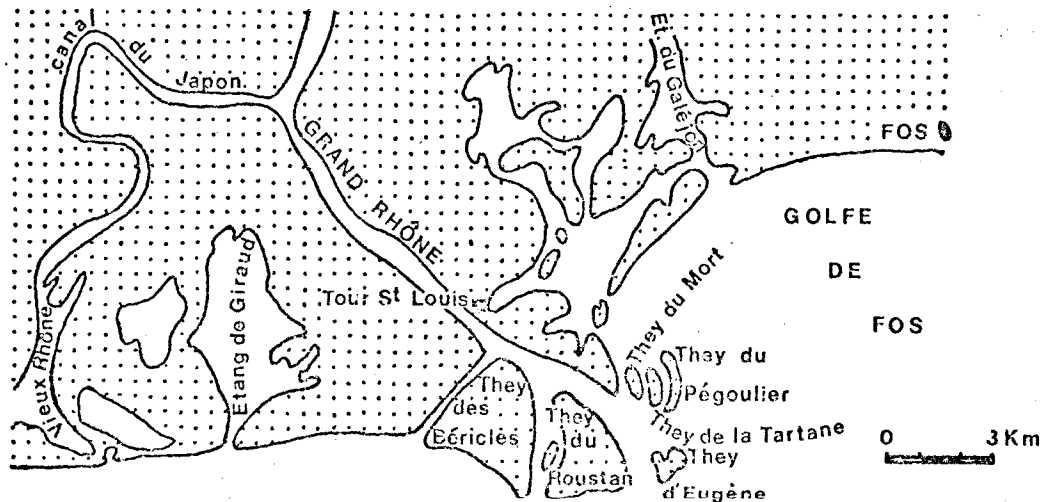
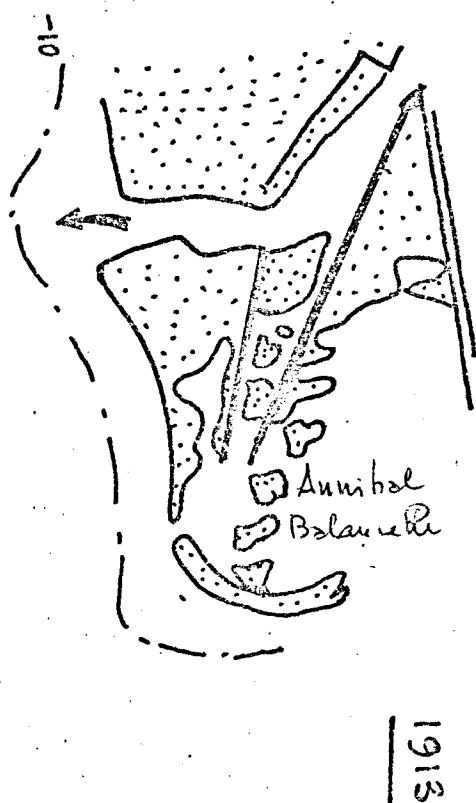
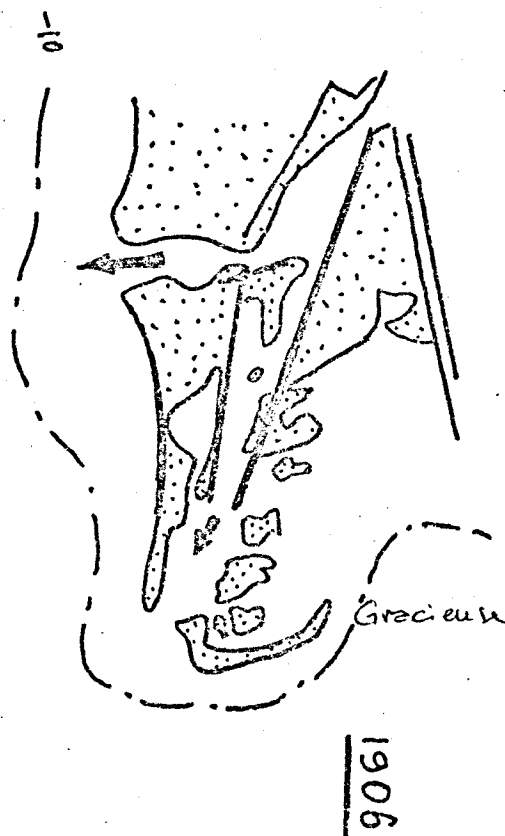
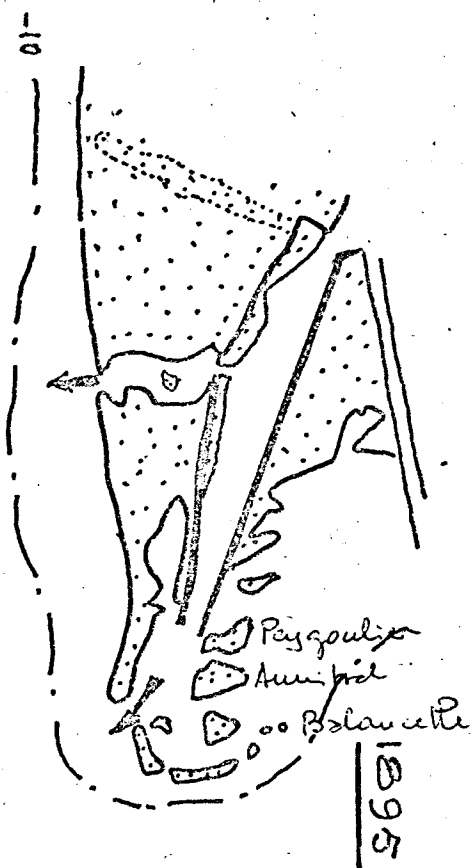


Fig.4. Carte des Ingénieurs Hydrographes de la Marine-1842



Variations Morphologiques des embouchures du Grand Rhône

Stau L. François



0 1 2 3 Km

Schema n° 6

Roque et de Caban. Le Golfe de Fos commence à s'individualiser.

En 1587, le Rhône abandonne ce tracé pour un lit en position occidentale (phase C du schéma 3) qui débouche alors sur le méridien de Faraman : c'est le Bras de Fer qui sera fonctionnel jusqu'au début du XVIII^e siècle. Le Golfe de Fos évolue très peu durant cette période par suite de l'éloignement des sources d'apports. Le schéma n° 4 montre, d'après une bonne carte d'époque, l'allure du littoral en 1706.

En 1711, lors d'une crue, le Rhône emprunte le tracé du canal des Launes, approfondi quelques années avant (flèche du schéma n° 4) et abandonne le Bras de Fer, bientôt envasé. Ce nouveau lit correspond au cours encore actuel du Grand Rhône (phase D du schéma n° 3).

Depuis lors, l'individualisation, puis l'évolution du Golfe de Fos n'ont cessé de s'accélérer.

En 1737, la Tour St Louis est construite près de l'embouchure ; cent ans plus tard elle en sera située à environ 8 km. Dès 1842, l'estuaire est divisé en nombreux graus, entre les Theys de Bericles, Roustan, Eugène et Peygoulhier. Ce dernier ne se trouve alors qu'à une dizaine de km de Port de Bouc. Entre temps, les theys de Brûle-tabac et du Galegeon sont apparus isolant l'étang de Gloria et achevant de donner une allure moderne au Golfe de Fos qui se comble rapidement (schéma 5).

Au milieu du XIX^e siècle, pour tenter de supprimer par chasse hydraulique les barres sableuses qui s'accumulent à l'entrée des passes de l'estuaire, tous les graus sont barrés, à l'exception de celui de Peygoulhier. La totalité des matériaux alluvionnaires, estimés à 17 millions de m³/an par Surell, s'écoule alors en direction du Sud-Est (schéma n° 6 1860).

Les résultats ne se font pas attendre. En 1890, le they d'Eugène a progressé vers l'Est de près de 2 km et les theys de l'Annibal, de la Balancelle et de la Gracieuse sont apparus : l'embouchure n'est plus qu'à 8 km de Port de Bouc.

Ainsi, en 1892, pour éviter le colmatage du Golfe, le grau de Roustan est rétabli (schéma n° 6 1895). Rapidement il devint l'embouchure principale qui progressa depuis lors vers le Sud pour donner au Golfe sa physionomie actuelle (schéma 6 1913).

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

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

1°/ La progression spectaculaire des embouchures successives et les variations bathymétriques des fonds sont tributaires du volume des apports

annuels rhodaniens ainsi que des modalités de répartition et de sédimentation de ces alluvions.

2°/ Au contraire, l'évolution du complexe naturel Roustan-Balancelle-Gracieuse et les variations morphologiques des corps sableux dépendent directement de la mobilisation et du remaniement ultérieur de ces matériaux par les agents hydrodynamiques (houles et courants de tempêtes) du golfe.

Dans les chapitres suivants nous allons rapidement décrire ces divers facteurs qui conditionnent la nature des fonds.

I - LES ALLUVIONS APORTEES PAR LE RHONE

Divers travaux ont montré que 2 modalités d'apports doivent être distinguées selon la granulométrie moyenne des éléments :

- les éléments fins (argiles, vases, limons) sont transportés en suspension au sein des masses d'eaux turbides et leur aire de sédimentation en mer est vaste ;
- les éléments plus grossiers (sables) sont mobilisés par saltation, roulement et charriage contre le fond et leur transport s'interrompt au niveau des barres sableuses voisines des embouchures.

Le volume des matériaux apportés annuellement par le Rhône est encore mal connu.

A - Les apports en suspension de matériaux fins.

. Au milieu du siècle dernier, Surrel évalue à $21.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ les apports annuels globaux en suspension, dont $17.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ pour le seul Grand Rhône.

On peut, en première approximation, adopter une densité allant de 2,0 à 2,6 pour les matériaux alluvionnaires, ce qui donne une décharge annuelle de 34.10^6 à 44.10^6 tonnes. Ces valeurs sont reprises à la fin du XIXe siècle par Guerard.

. Plus récemment, des mesures de débit solide ont été effectuées dans le cours du Rhône à Beaucaire par la SOGREAH (1956-1957). Ces études donnent $14,5.10^6 \text{ T/an}$ de charges en suspension pour un débit total annuel de 56.10^9 m^3 d'eau. Comme la répartition* des débits entre Grand et Petit Rhône, en aval d'Arles, ne semble pas s'être modifiée de façon notable depuis le début du siècle, on peut admettre que seulement $11,8.10^6 \text{ T/an}$ ($4,5.10^6$ à $5,9.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$) transitaient alors en suspension par l'embouchure de Roustan, soit le 1/4 ou le 1/3 des valeurs obtenues par Surrel.

* 16 % dans le Petit Rhône en 1890 (Guerard),
15 % à 10 % en 1931 (Gordon).

La différence entre les deux estimations ne résulte pas d'erreurs systématiques. Elle met en relief l'influence des grands travaux d'aménagement hydro-électrique (Donzère, Genissiat) du cours du Rhône et de certains de ses affluents (Serre-Ponçon sur la Durance). Ces barrages, par les paliers introduits dans les profils d'équilibre, provoquent une importante sédimentation. Ainsi, Serre-Ponçon retient $2.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ d'apports solides, dont une faible partie seulement est restituée à la Durance par les chasses hydrauliques.

. En 1970, Pauc, dans un secteur situé entre la barre deltaïque du Rhône et la bouée de Roustan, met en évidence un remblaiement de 12 m de 1935 à 1950, de 1,80 m de 1950 à 1958 et de 1,20 m de 1958 à 1969. Corrélativement, cet auteur montre que les teneurs moyennes en suspension des eaux turbides ne sont plus en 1969 que le dixième de celles observées avant 1950 par Duboul-Razavet. Ainsi, "avant la construction des barrages (1950) les dépôts s'accumulaient à une cadence de 0,80 m/an ; au cours de leur mise en eau successive (1950-1958) on assiste à un ralentissement progressif de la vitesse de sédimentation qui s'abaisse à 23 cm/an. Enfin, depuis la mise en service de la totalité des aménagements (1958) la vitesse de sédimentation est tombée à 10 cm/an".

En résumé, depuis 1950 on observe une diminution très importante des apports nécessaires à la stabilité sédimentaire du Golfe de Fos. Selon certains auteurs, la décharge annuelle ne serait plus actuellement que le dixième des apports initiaux. On peut, sans commettre d'erreurs graves, avancer comme volume minimum de matériaux limoneux apportés en 1970, les chiffres de $2.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (soit 4 à 5.10^6 T/an) dont une partie seulement sédimente à proximité de l'embouchure.

B - Les apports par charriage de matériaux grossiers.

Entre la confluence de la Durance et la mer, le lit du Rhône montre deux domaines. Une zone de galets s'étend jusqu'en aval d'Arles ; puis un tronçon constitué de sable bien calibré ($\emptyset$ moyen = 0,3 mm) prend le relais jusqu'à l'embouchure. A l'aval de Port-St-Louis apparaît une légère contrepente due à la barre.

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

Pour compléter ces connaissances fragmentaires, le L.N.H. (E.D.F. Chatou) procéda en 1964 à l'immersion de traceurs radioactifs sous forme de poudre de verre marquée à l'iridium 192 et de granulométries comparables à celles des sables des lieux d'implantation (amont de la barre).

On observe ainsi un déplacement très lent des sables, parallèlement aux rides longitudinales du fond. Les vitesses de transport sont en moyenne de 20 à 30 centimètres par semaine, même en période de crue.

Il est difficile de préciser le mode de transport car les auréoles radioactives s'allongent également à contre courant. Ce phénomène est peut-être la résultante de plusieurs facteurs.

Ces expériences n'ont permis de préciser ni l'épaisseur de la couche sableuse concernée, ni les volumes déplacés. Le L.N.H. conclue simplement "le Rhône n'expulse pas de grosses quantités de matériaux (par charriage), même en temps de crue".

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

II - HYDRODYNAMIQUE

L'hydrodynamisme intervient en premier chef dans l'économie sédimentaire des petits fonds (jusqu'à -25 m) du Golfe de Fos. La dispersion des apports rhodaniens dans leurs aires respectives de sédimentation, la redistribution des matériaux des prismes littoraux sont sous la dépendance de courants directement liés aux houles, aux vents, et, à un degré moindre, aux marées.

Rappelons qu'une houle, au large et par grande profondeur, correspond à un mouvement périodique d'amplitude verticale des masses d'eau superficielles. Une certaine quantité d'énergie est ainsi uniformément répartie sur toute la longueur du front de houle. Cette énergie se propage selon une direction normale au front.

Lorsque ces houles arrivent sur des fonds inférieurs à leur 1/2 longueur d'onde deux phénomènes apparaissent :

- l'énergie se redistribue d'une façon hétérogène sur toute la longueur du front de houle en fonction du modelé du relief sous-marin ;
- le mouvement périodique d'amplitude verticale se transforme progressivement en déplacement latéral des eaux selon le sens de propagation de l'énergie.

A l'approche des rivages, les houles se transforment ainsi en vagues dont le déplacement engendre des courants appelés "courants de vagues".

Le déferlement des vagues peut en outre concentrer sur 300 mètres de côte l'énergie correspondant à un front de houle de 1 km au large, grâce à un phénomène de convergence sur les hauts-fonds. Corrélativement, les portions de littoral limitrophes recevront une quantité d'énergie moindre par un phénomène de divergence dans les thalwegs sous-marins. On parle de convergence ou divergence des orthogonales de la houle selon qu'il y a augmentation ou diminution du taux moyen d'énergie de la houle au large. Connaissant la direction des houles au

Plan de lignes théorique

très schématisé par teulpete de SW
Périodes choisies = 6 S.

Orthogonaux
Et quelques lignes de crêtes
Isobathes

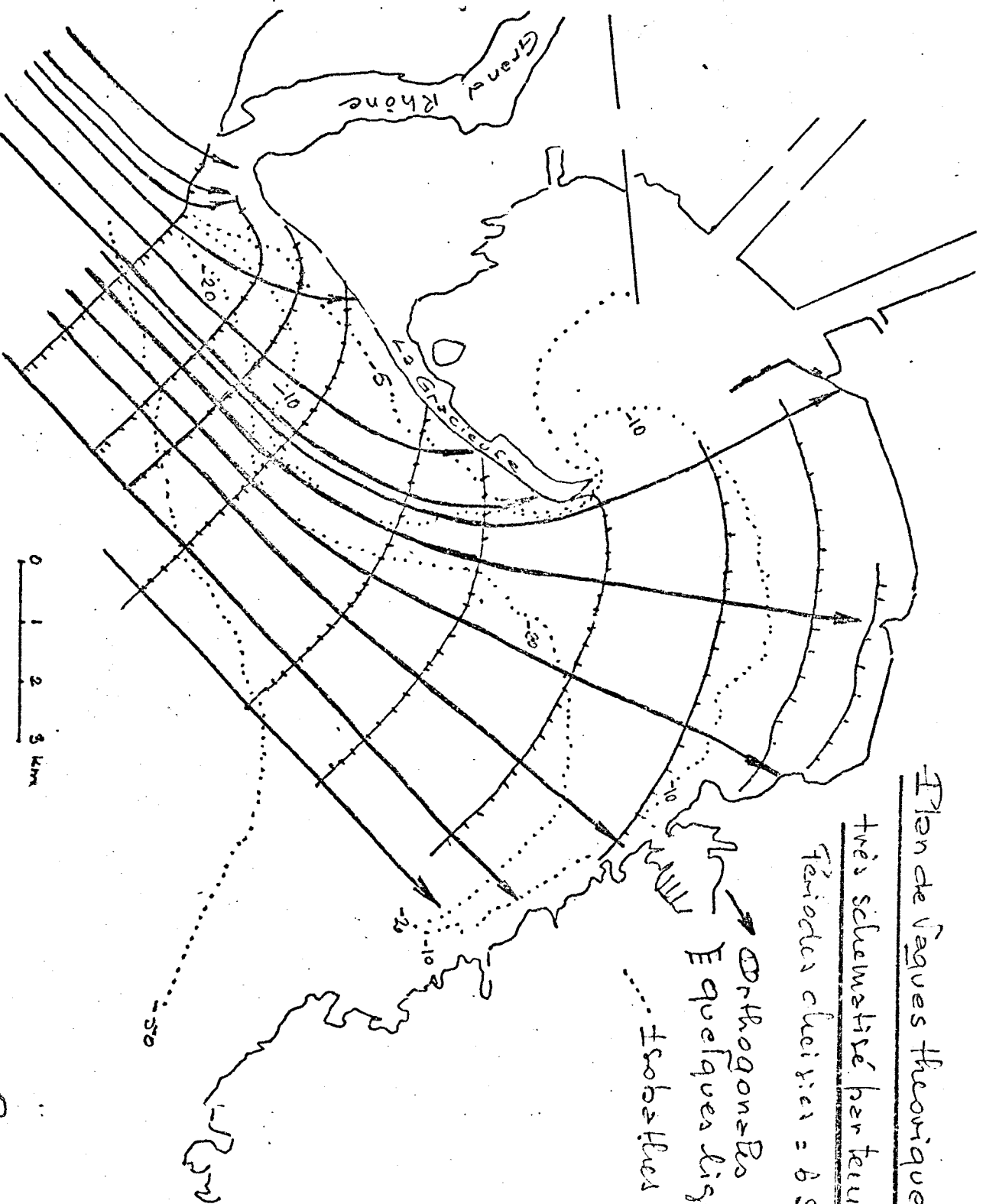


schéma n°7

Plan de l'ague theorique

très schematisé par tempêtes de SE

Periodes choisies 8 secondes

Orthogonales

Quelques lignes de crêtes

Isobethes

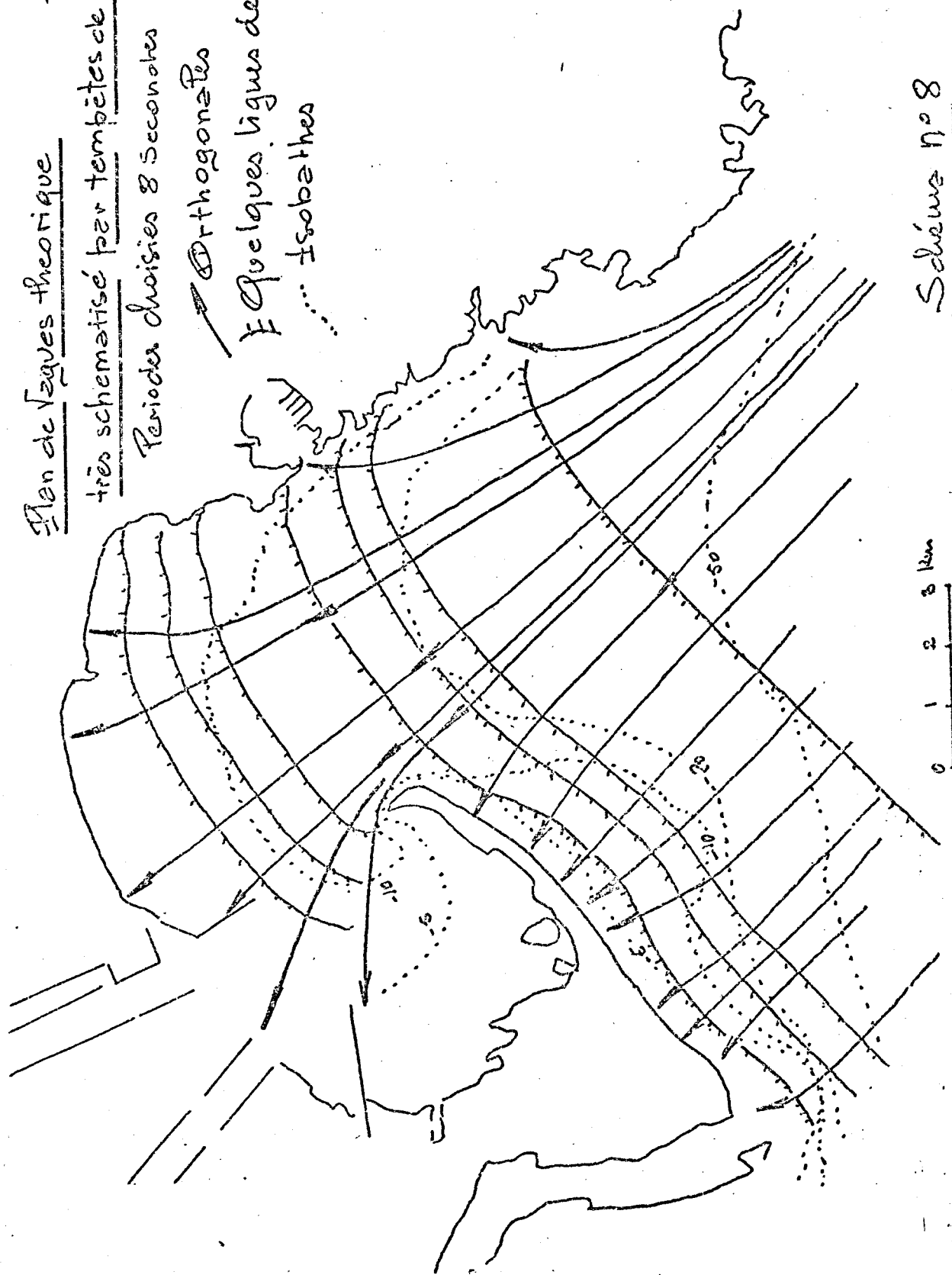


Schéma n° 8

A - Les houles.

Les enregistrements de houles effectués au Cap Couronne par la SOGREAH et les Ponts et Chaussées Maritimes montrent 3 directions prépondérantes de houles majeures qui, par ordre d'importance décroissante, sont :

- houles de SW = 30 % du régime total des houles,
- houles de SSE = 16 %,
- houles de SE = 11 %.

1° - *Les houles de SW (schéma n° 7).*

Elles correspondent à des houles engendrées dans la partie occidentale du Golfe du Lion, sous l'impulsion des vents de terre (Mistral, Tramontane,...) et liés à une dépression centrée sur le Golfe de Gênes.

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

Dans ce cas on observe une convergence des orthogonales au niveau des theys de Roustan et à un degré moindre de la Balancelle, alors que le fond du golfe se caractérise par une divergence nette.

Les vagues attaquent les côtes de la Gracieuse sous une incidence oblique. Parvenues à l'extrémité de la flèche, qui joue le rôle de musoir, les houles s'infléchissent au Nord en se réfractant. Elles s'amortissent et disparaissent ensuite dans le fond du golfe où la zone portuaire et l'Anse du Repos sont à l'abri dans un secteur de grande divergence.

(suite)

large, leur période et leur longueur d'onde, ainsi que le modelé du relief sous-marin, on peut calculer les répartitions d'énergie à la côte.

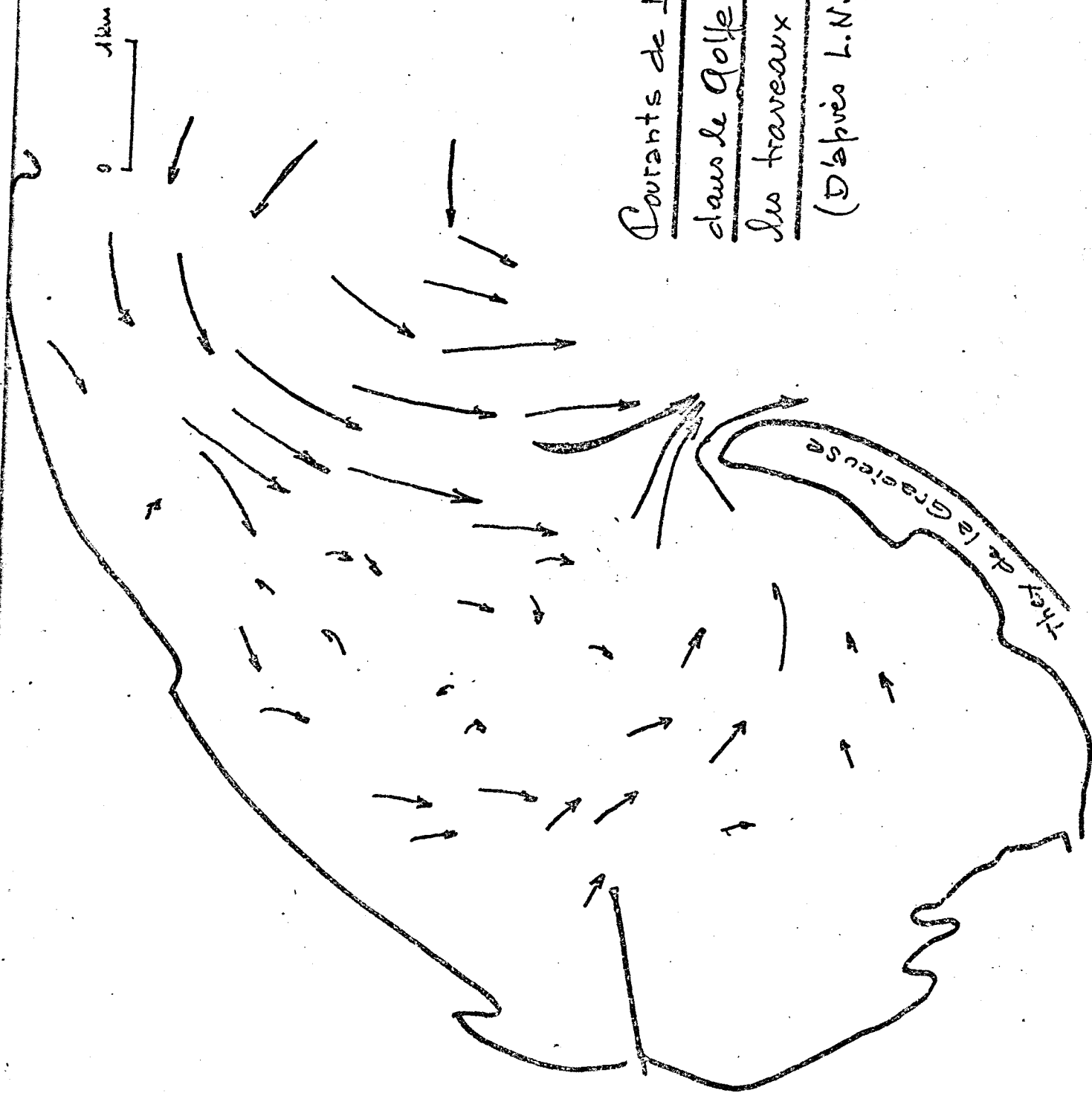
Les vents : par la pression qu'ils exercent sur le plan d'eau ont une double action :

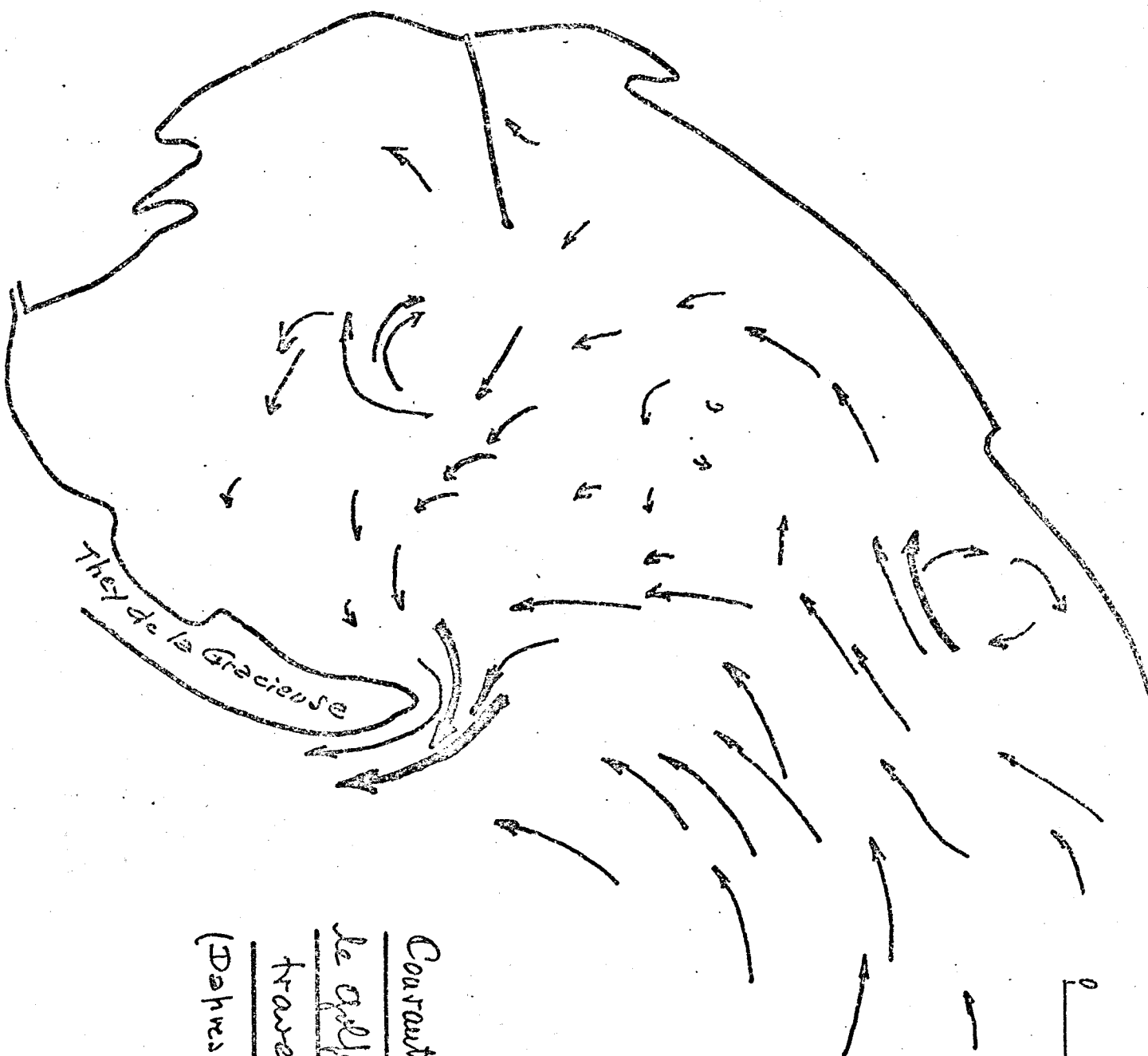
- ils chassent les eaux superficielles et forcent ainsi les vagues à se déplacer selon une direction proche de la leur ;
- ils provoquent, soit un afflux des masses d'eau à la côte lorsqu'ils soufflent de la mer (SE par exemple en Provence), soit une baisse du niveau moyen quand il s'agit de "vent de terre" (Mistral). De telles variations, véritables marées barométriques, peuvent totalement masquer en Méditerranée, les marées lunaires.

Il est bien évident que les dérives vers le large ou les apports à la côte dues aux houles, vagues et vents, se traduisent par des courants de surface. Ces fluctuations de niveau sont généralement compensées par des courants dits de "décharges" qui tendent à rétablir l'équilibre grâce à des circulations plus profondes où localement superficielles.

0 1 km

Courants de Marée descendante
dans le Golfe de Fos avant
les travaux portuaires
(D'après L.N.H.)





Courants de Marée montante dans
le Golfe de Mex avant les
travaux portuaires
 (Dahres L.N.H.)

2° - Les houles de SE et SSE (schéma n° 8).

Elles correspondent à des houles en provenance du Golfe de Gênes, engendrées par "les vents de Mer" (vents d'Est, Sud-Est, etc...) liés à une dépression centrée sur les îles Baléares.

Ces houles se propagent au large d'Est en Ouest. A proximité des côtes, elles subissent plusieurs réfractions successives (Giens, Cap Sicié, Cap Couronne) et pénètrent dans le Golfe de Fos avec une incidence SE ou SSE. La période moyenne de ces houles est de 6 secondes ; par fortes tempêtes on observe des longueurs d'ondes de 100 mètres liées à des périodes de 8 secondes.

Dans ce cas, la convergence des orthogonales au niveau des theys de Roustan et de Balancelle est encore plus nette que précédemment.

De même, exception faite pour le mouillage de Carteau, le fond du golfe et la zone portuaire sont exposés aux houles de SSE et surtout de SE. Les travaux effectués sur modèle réduit par le L.N.H. (E.D.F. - Chatou) montrent que par SE, l'agitation dans la zone d'accostage du Quai W n'est que le 1/3 de celle régnant au large. La direction au NNW de la digue tend à en diminuer l'effet protecteur.

3° - Interprétation.

La concentration de l'énergie, par tous les types de gros temps, au niveau des theys de Roustan et de la Balancelle, s'accompagne de fortes dérives littorales des masses d'eau. Cette convergence s'explique par la présence de hauts fonds sableux qui, de 0 à -10, s'étendent respectivement jusqu'à 1,5 km et 2,5 km du rivage. Ces bancs immergés concentrent l'énergie comme une loupe focalise un rayon lumineux.

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

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

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

B - Les courants de marée.

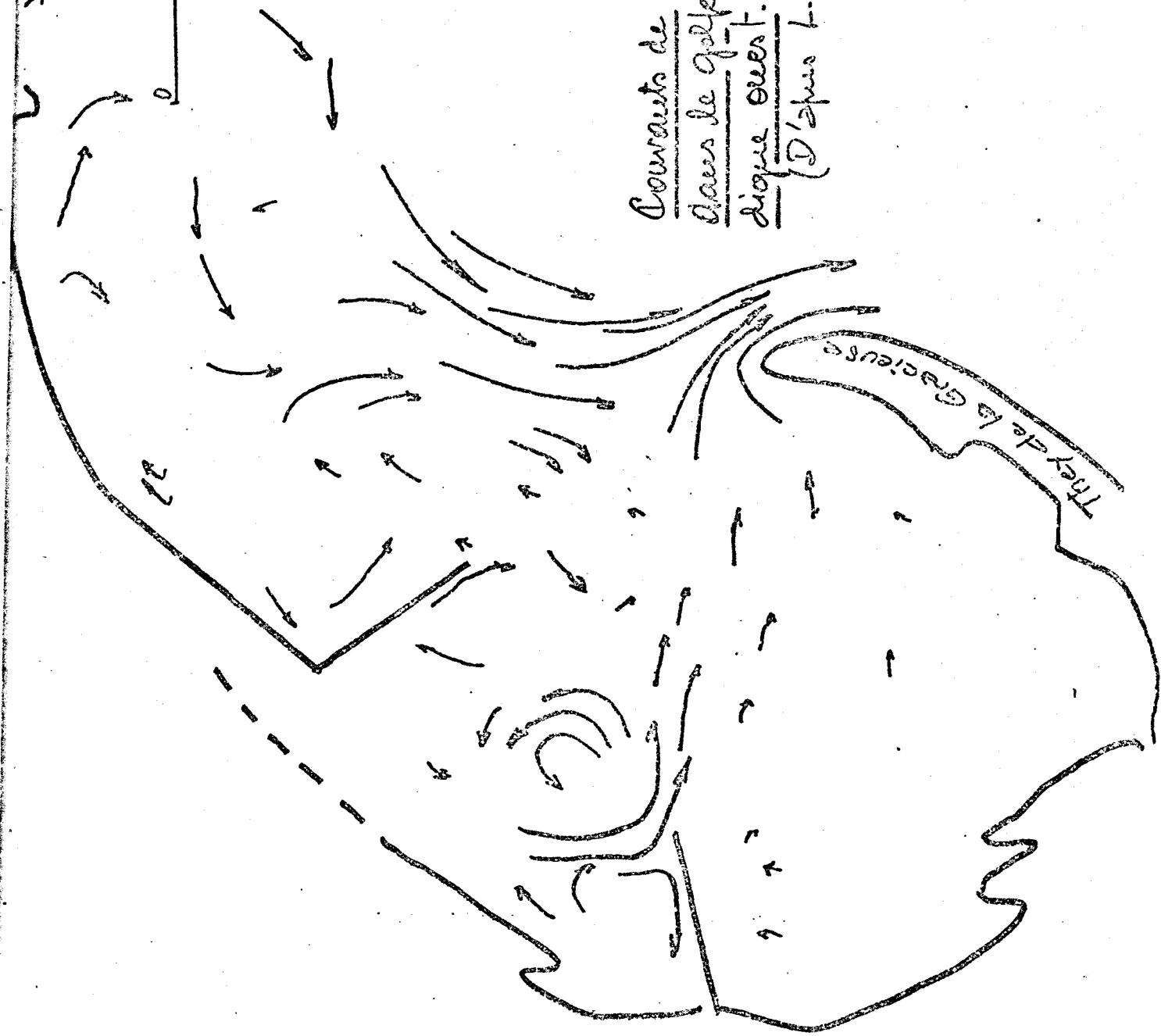
Bien que faibles, les marées existent en Méditerranée, où des marnages (1/2 amplitude) de 15 à 30 cm s'observent au fond du golfe. L'étude des courants de marée a été réalisée sur modèle réduit par le L.N.H. (E.D.F. Chatou).

En l'absence d'aménagements portuaires, les marées montantes (flot) ou descendantes (jusant) se traduisent par un déplacement général d'Est en Ouest des masses d'eau de la moitié orientale du golfe (schéma n° 9 et 10).

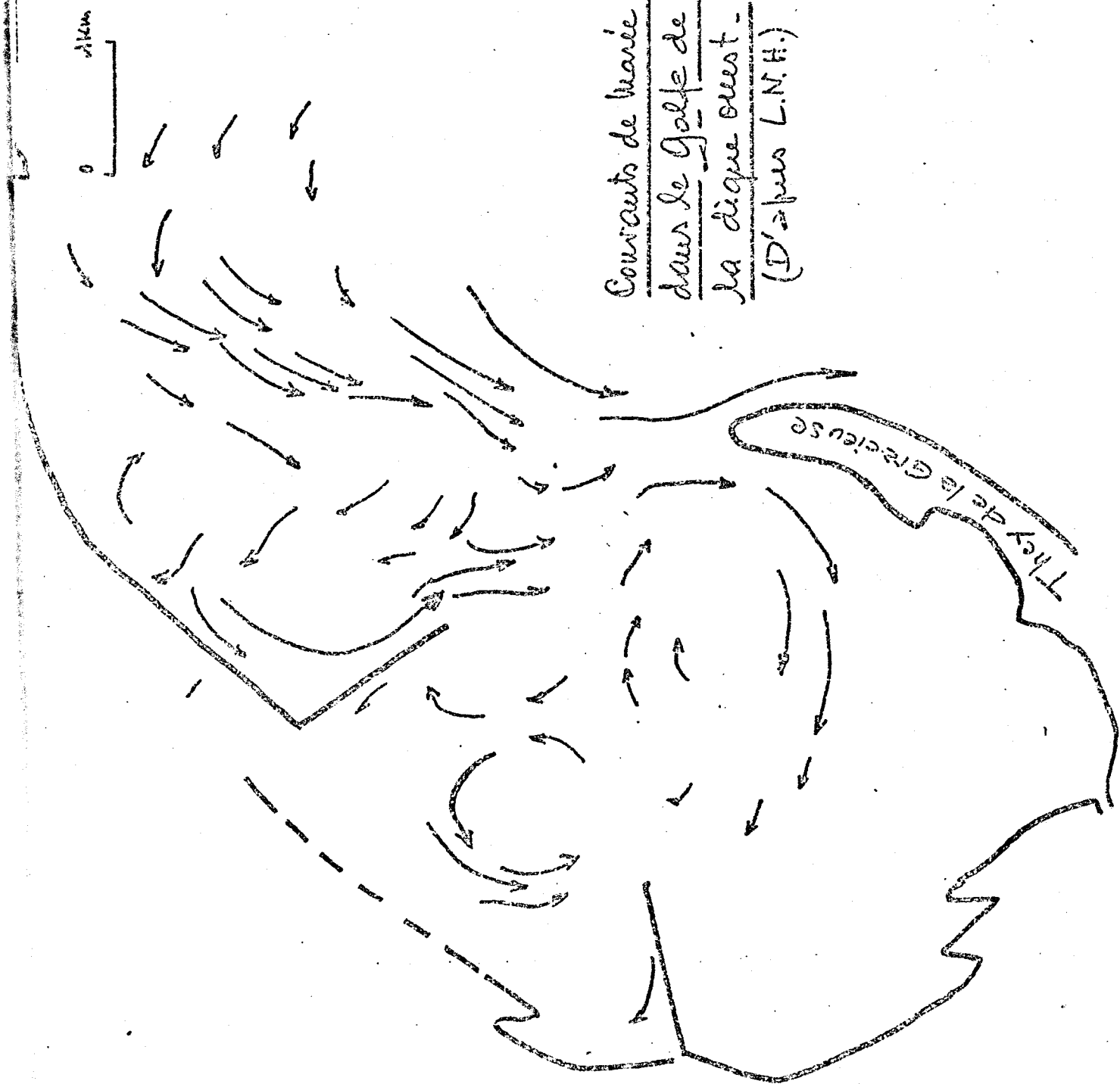
Pchew's room

0 1 Km

Courants de Marée descendante
dans le golfe de Tōs avec la
digue ouest.
(D'après L.-N.H.)



Courants de marée montante
dans le Golfe de Fos avec
la digue ouest.
(D'après L.N.H.)



Avec les aménagements, cette circulation s'amorce, puis est rejetée au Sud par la grande digue Ouest. Des courants tourbillonnaires de flot et de jusant apparaissent dans la zone portuaire et l'anse du Repos (schéma n° 11 et 12).

Dans tous les cas étudiés, un courant sortant longe le talus externe de la Gracieuse et porte au Sud en atteignant 9 cm/s soit près de 1/5 de noeud.

On notera que ces courants s'observent in situ par temps calme seulement. Bien que trop faibles pour gêner la navigation, ils sont capables de déplacer un sédiment fin, préalablement mis en suspension (vagues, dragages).

C - Les courants fluviaux de sortie du Rhône.

La destinée des matériaux amenés par le Rhône à son embouchure est fonction de la configuration du courant de sortie des eaux fluviales et des conditions hydrodynamiques marines locales.

1° - *Le courant fluvial de surface :*

Pauc (1970) a montré que les eaux fluviales, plus légères, pénètrent en mer selon un faisceau superficiel de 500 m de large sur une épaisseur de 4 à 5 mètres. Ce courant se divise rapidement en 2 lignes de forces principales :

- l'une, la branche occidentale, porte au SSW vers le large, puis s'infléchit vers l'W ;

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

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

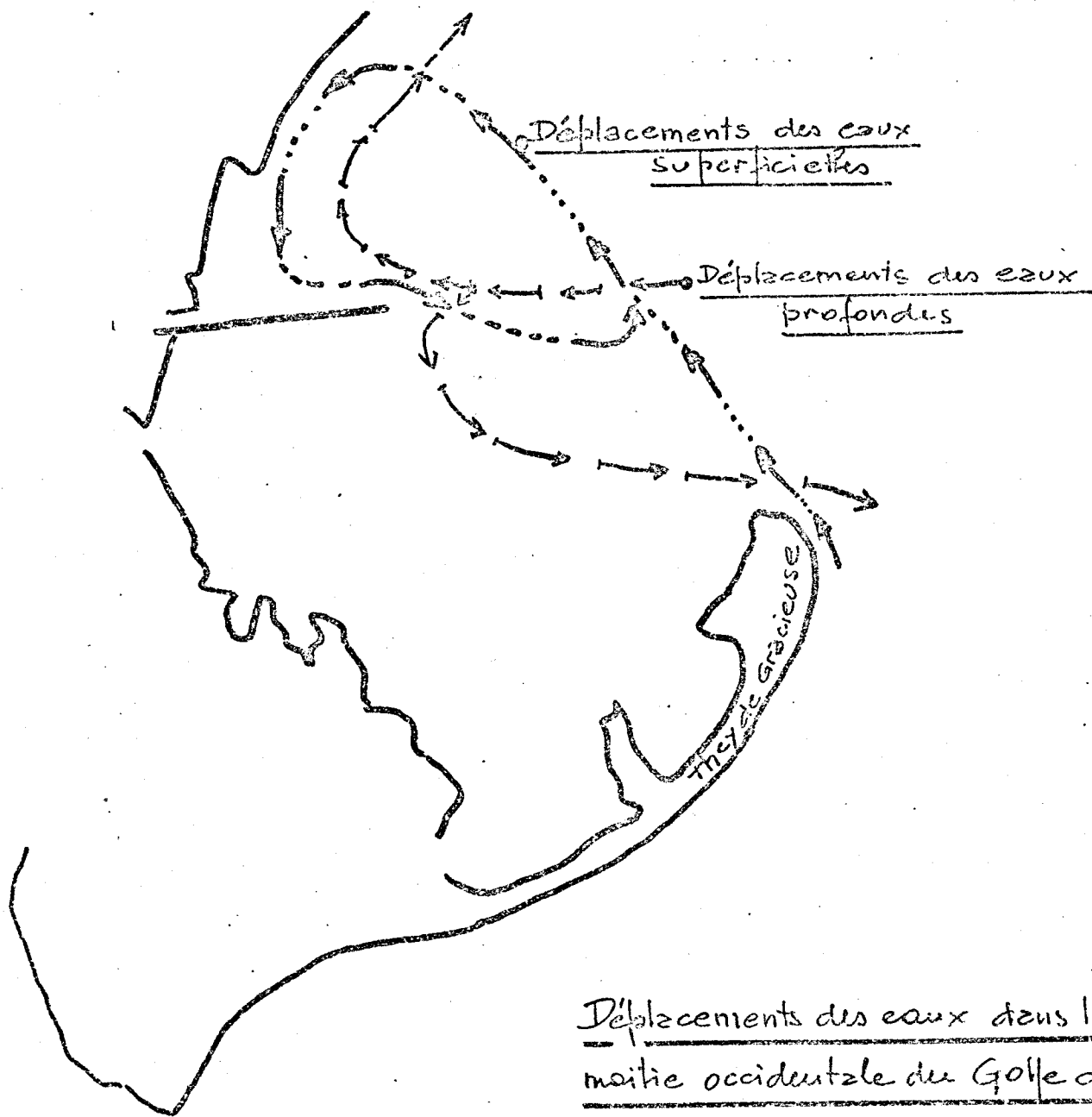
2° - *Les conditions marines locales.*

Divers travaux ont montré qu'un "coin" d'eau salée pénètre dans l'embouchure et le cours inférieur du Rhône, sous les eaux douces. Ces eaux marines pourraient, dans les cas extrêmes, remonter d'une vingtaine de km, selon les régimes du fleuve et les marées lunaires. En eau moyenne, ce phénomène n'est plus perceptible en amont de Port St Louis.

On observe, en outre, un déplacement des eaux marines profondes le long de la pointe Roustan et du they de Balancelle (quelques cm/s). Ce courant double ainsi en profondeur la branche orientale saumâtre de surface. Il se dirige vers le NE puis semble s'infléchir à l'Est.

3° - *En résumé,* on notera que courants de surface et de fond longent les côtes du complexe Roustan Gracieuse en portant constamment au NE et assurent une partie de la dispersion des matériaux limoneux rhodaniens.

Cette circulation permanente vient s'opposer aux courants de marée



Déplacements des eaux dans la
partie occidentale du Golfe de Fos
par vent de SE.

(D'après Duboul-Rezevet)
 1950

0 0.5 1 km

Schema N°13 B



Déplacements des masses d'eau
superficielles par tempêtes du SE. (1951)

Schéma n° 13

A titre indicatif

Ptest Gervais

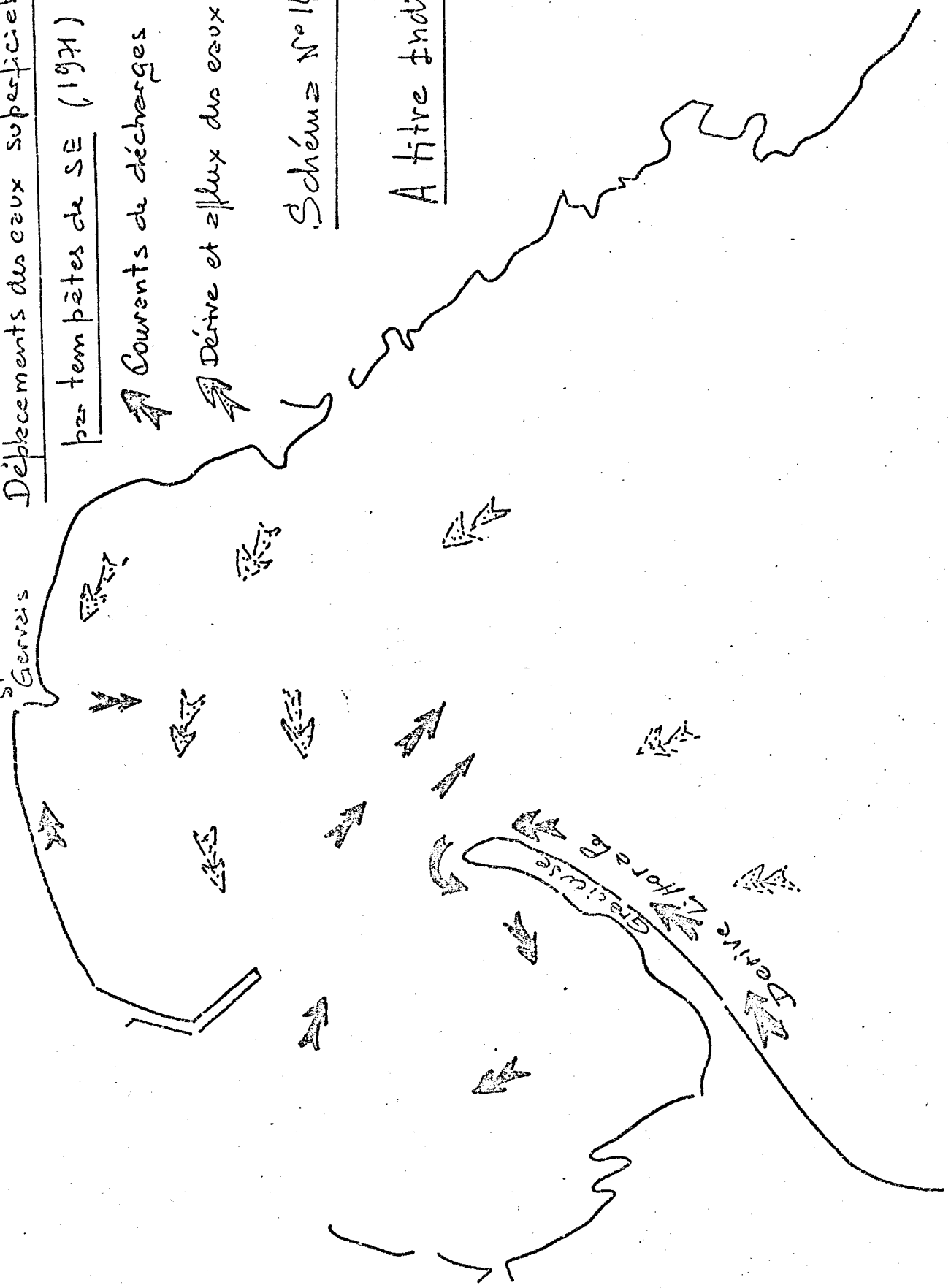
Déplacements des eaux superficielles
par tempêtes de SE (1971)

→ Courants de décharges

→ Dérive et efflux des eaux

Schéma N° 14

A titre indicatif



à la pointe de la Gracieuse, et n'est que peu modifiée par les divers régimes de houles et de vents. Plaquée contre la côte par l'afflux des masses d'eaux de SE et SSE, cette circulation s'en éloigne par Mistral, repoussée vers l'ESE par la dérive au large des eaux superficielles marines.

D - Les courants de vagues et de vents.

A notre connaissance aucune étude courantologique valable du Golfe de Fos n'a été réalisée.

Néanmoins, à partir de certains résultats fragmentaires ou de renseignements oraux (Pêcheurs, chercheurs Station Marine Endoume, etc...) on peut obtenir un schéma qualitatif de la circulation superficielle par tempêtes. Nous en donnons ici un exemple par vent de SE à titre indicatif et avec les plus extrêmes réserves.

Avant les travaux portuaires (schéma n° 13) on observait dans la moitié orientale du Golfe une circulation générale des eaux superficielles vers l'ouest. Un courant de décharge, situé à mi-chemin entre la Pointe de la Gracieuse et la passe de Bouc, sortait du golfe et portait au SE. Un fort courant entrant superficiel longeait le talus externe de la Gracieuse en portant au NNE, vers le fond du golfe. La moitié occidentale était le siège d'une circulation annulaire des eaux superficielles, alors qu'un courant de décharge sortait, selon Duboult-Razavet, contre le fond de cette zone abritée.

Avec les aménagements portuaires (schéma n° 14), la circulation superficielle s'effectue toujours d'E en W dans la moitié orientale. Par contre on observe, semble-t-il, deux courants de retour :

- l'un, situé sur le méridien de la pointe St Gervais, porte au SSW et s'atténue rapidement ;

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

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

On notera que, dans la moitié orientale du golfe, le schéma de circulation par vent de mer (SE) présente de grandes analogies avec les courants de flot. Ceci est normal, car dans les deux cas, une élévation du niveau moyen des eaux doit se traduire par des phénomènes comparables.

Le courant de dérive littorale qui longe le talus externe de la Gracieuse est responsable des différences qui apparaissent dans la moitié occidentale. En effet, le flux entrant vient buter contre le faisceau de décharge défecté par la grande digue. Dans cette rencontre, ce courant de décharge est rejeté vers le SSE, alors que le flux entrant, stoppé dans sa progression au NNE, oblique vers l'Ouest.

En résumé, les phénomènes hydrodynamiques réels apparaissant par tempête dans le Golfe de Fos sont encore mal connus : les déplacements globaux observés (?) ne correspondent pas à la simple addition des caractères de chaque facteur pris isolément.

On notera que les courants de marées et le flux de sortie rhodanien compensent leur faiblesse par leur permanence et leur régularité, ce qui les met à même de jouer un rôle important dans la répartition des particules fines dans le golfe.

Au contraire, le déferlement des vagues nées de la réfraction (énergie) des houles, les courants liés à l'action des vents, les flux de décharge, sont des phénomènes de fortes tempêtes. Ils compensent leur irrégularité par leur intensité capable de remanier les éléments sableux littoraux.

III - REPARTITION ET SEDIMENTATION DES MATERIAUX RHODANIENS DANS LE GOLFE DE FOS

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

- Dispersion par sédimentation différée.

Les éléments de granulométrie très fine ($qq.\mu$) ou les agrégats à surface portante dominante (50 à $200\ \mu$) ainsi que les micas restent en suspension et se répartissent entre les deux courants de dispersion des eaux fluviales, puis vont sédimer loin de l'embouchure.

- Accumulation par sédimentation immédiate.

Le reste des apports, au contraire, sédimente à proximité de l'embouchure (0 à $3\ km$) et est responsable de l'édification du delta-sous-marin, puis de son émergence. Depuis les bancs sableux côtiers, la granulométrie des sédiments décroît le long du talus immergé qui vient se raccorder aux fonds de vases fines.

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

1° - *Sédimentation immédiate : les deltas sous-marins.*

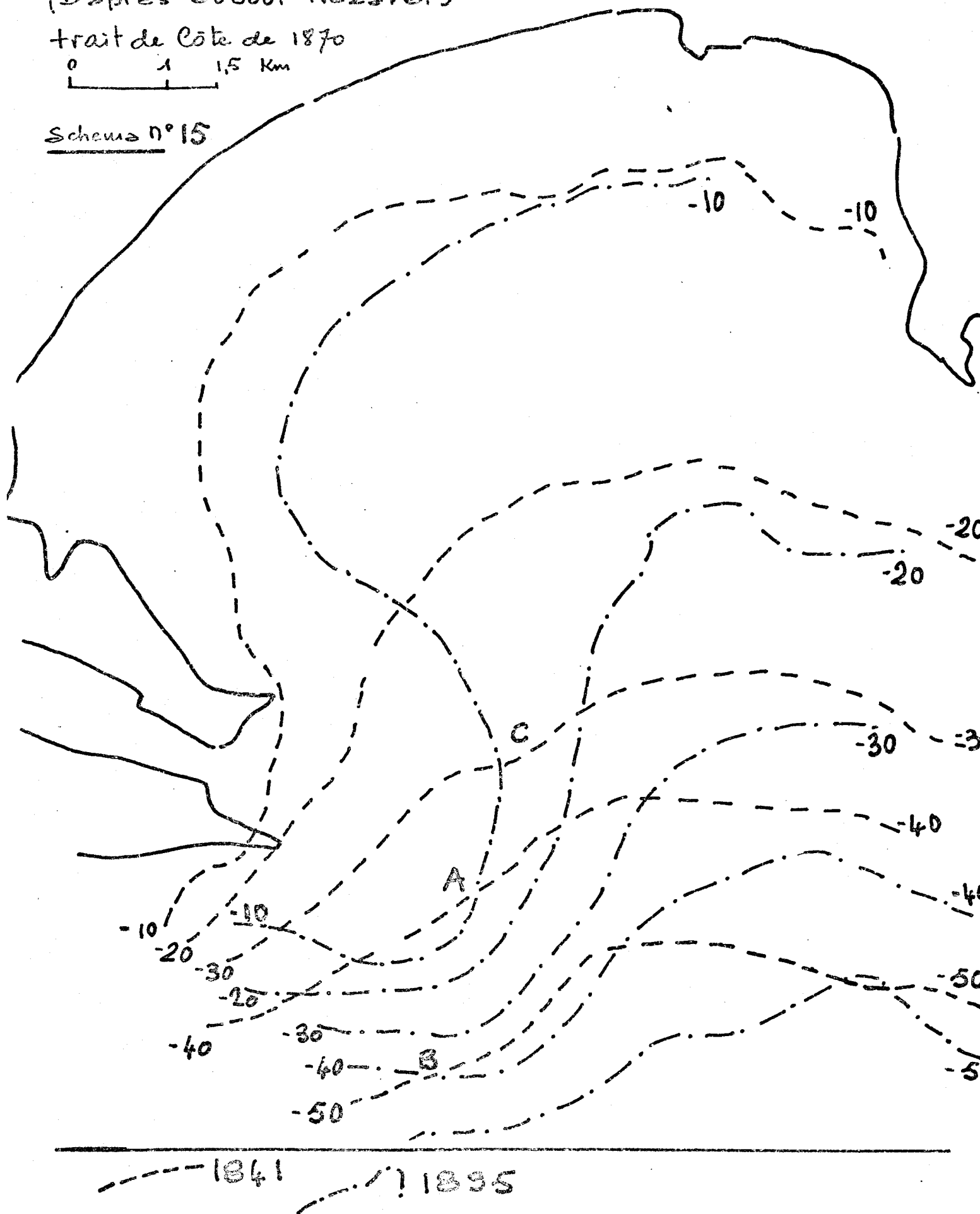
Variations bathymétriques du Golfe de Fos de 1841 à 1895

(D'après Duboul-Razavet)

trait de Côte de 1870

0 1 1,5 Km

Schema n°15



On sait qu'entre 1841 et 1895, le Grand Rhône s'écoulait vers l'ESE par le Grau de Peygoulier, tous les autres graus étant barrés. Au cours de ce demi-siècle, le Rhône édifia un delta sous-marin, en forme de langue, situé de nos jours au large du they de Balancelle. Le schéma n° 15 montre qu'en 50 ans, les fonds initialement à -40 de l'axe du delta se sont exhausés de près de 30 m (point A) ce qui correspond à une vitesse de sédimentation moyenne de 60 cm/an. Au Nord et au Sud, lorsque l'on s'éloigne de la ligne de force principale des écoulements fluviaux (points B et C) ces taux décroissent et s'abaissent rapidement à 20 cm/an.

A partir de 1895, le Grau de Peygoulier barré, le Rhône s'écoule au Sud par le Grau de Roustan. Depuis cette date, un deuxième delta sous-marin, de forme analogue au premier, s'est édifié, tandis que les rives est et ouest de l'embouchure progressaient respectivement de 1,5 et 2 km vers la mer. Au large, dans l'axe du courant de sortie, les fonds à -50 en 1895 se trouvent en 1968 à -13, ce qui correspond à une vitesse de sédimentation moyenne de 60 cm/an, si l'on élimine les 20 dernières années déficitaires.

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

2° - Sédimentation différée.

Il n'en est pas de même pour la moitié orientale du golfe, où l'on assiste au cours de cette période (130 ans) à un comblement très lent, régulier et constant, comme le montre la faible progression des isobathes (schéma 15). Dans ce secteur, les vitesses de sédimentation sont constamment restées inférieures à 5 cm/an jusqu'en 1935 et sont de nos jours de l'ordre du cm par an.

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

Nous montrerons que ce type de sédimentation ne se limite pas aux aires centrale et orientale du golfe, mais déborde largement vers le Sud et SE sur le plateau continental, et s'étend vers l'Est jusqu'au fond de la rade de Marseille.

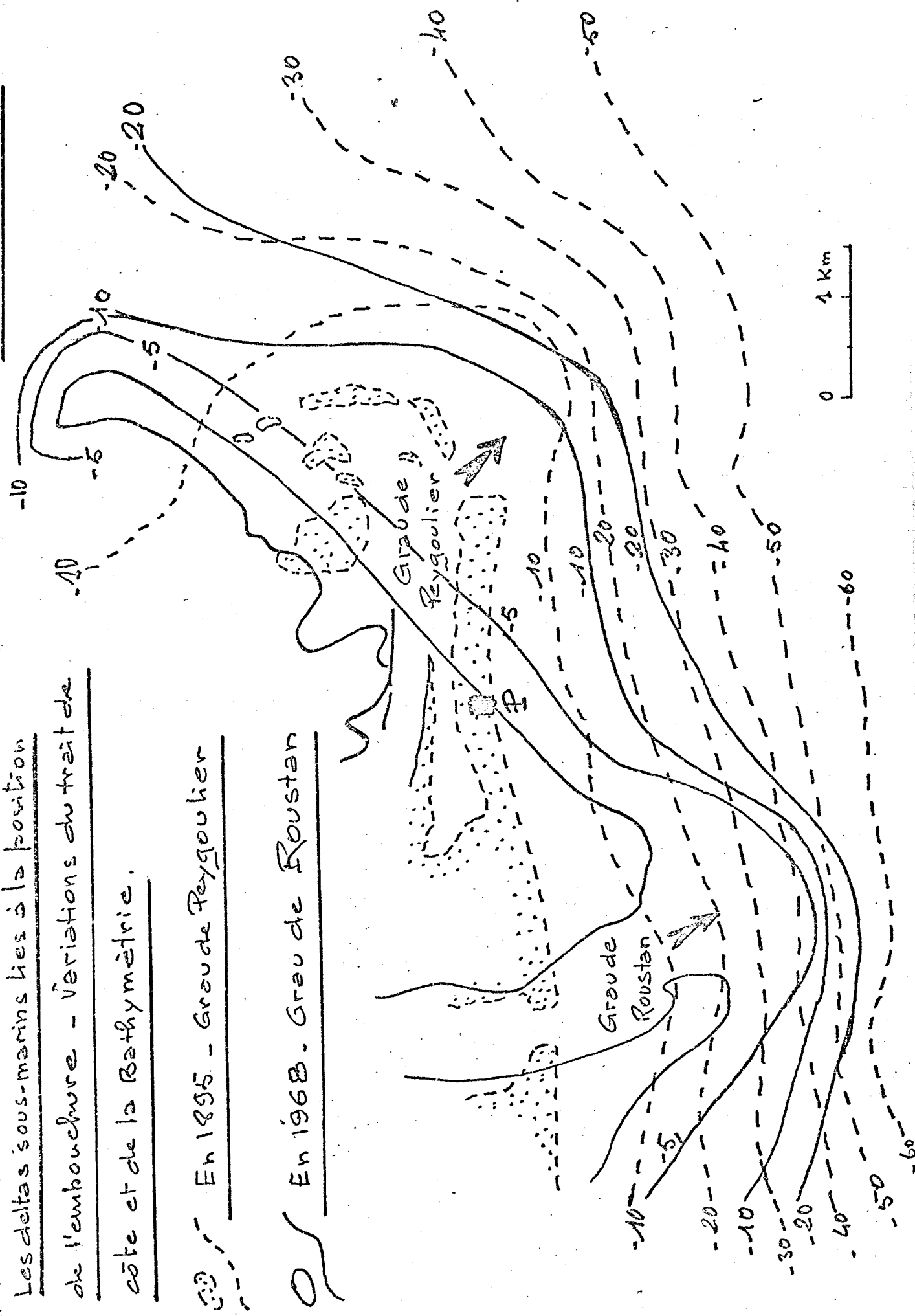
IV - EVOLUTION RECENTE DES COTES OCCIDENTALES DU GOLFE DE FOS

Le schéma n° 16 met en évidence les profondes modifications morphologiques de ce littoral. Depuis 1895, on assiste au démantèlement de l'ancien delta de Peygoulier privé d'apports rhodaniens frais, tandis que le delta actuel de

Les deltas sous-marins liés à la position
de l'embouchure - variations du trait de
côte et de la Bathymétrie.

En 1895 - Grève de Peygoulie

En 1968 - Grève de Roustan



Roustan s'édifie progressivement.

Ces deux phénomènes sédimentaires opposés conditionnent la naissance puis l'évolution de la flèche littorale complexe de Roustan-Eugène-Balancelle-Gracieuse, dont le rôle de jetée naturelle est fondamental pour la protection des installations portuaires.

A - Les portions immergées du promontoire de Peygoulhier sont le siège d'une évolution discrète : les phénomènes d'érosion et de sédimentation se conjuguent pour modifier les profils du talus sous-marin. La SOGREAH observe : "on pourrait schématiser l'évolution en admettant que les profils basculent autour d'une isobathe charnière que l'on pourrait fixer à -25 m".

En effet, alors que l'érosion décape et arase la partie sommitale sableuse du delta, ce qui entraîne une progression au NW (vers la côte) des isobathes -5, -10 et -20, la sédimentation vaseuse actuelle (type différée) en exhausse les aires profondes, ce qui rejette au SE (vers le large) les isobathes -30 et -40.

Cette profondeur charnière de -25 correspond précisément à la demi longueur d'onde des houles de tempête les plus fréquentes (cf. Chapitre II). Au-dessus de cette cote, les houles "accrochent" les fonds et les sédiments sont mobilisés ; au-dessous, les dépôts échappent aux remaniements.

Dans le premier cas, un lessivage du stock sédimentaire initial semble en outre se produire à chaque tempête. La fraction grossière aurait ainsi tendance à être rejetée à la côte par progression contre le fond. Les particules plus fines seraient périodiquement remises en suspension et ne pourraient se déposer définitivement que dans les aires profondes à l'abri de l'agitation.

En 1965, afin de préciser les vitesses et les sens de cheminement des matériaux remaniés, le L.N.H. (E.D.F. Chatou) a utilisé divers traceurs radioactifs (Iridium 192) de granulométries comparables à celles des sables locaux. Les profondeurs d'immersion s'échelonnent de -1 à -6 m, jusqu'à 600 m du littoral de la Gracieuse.

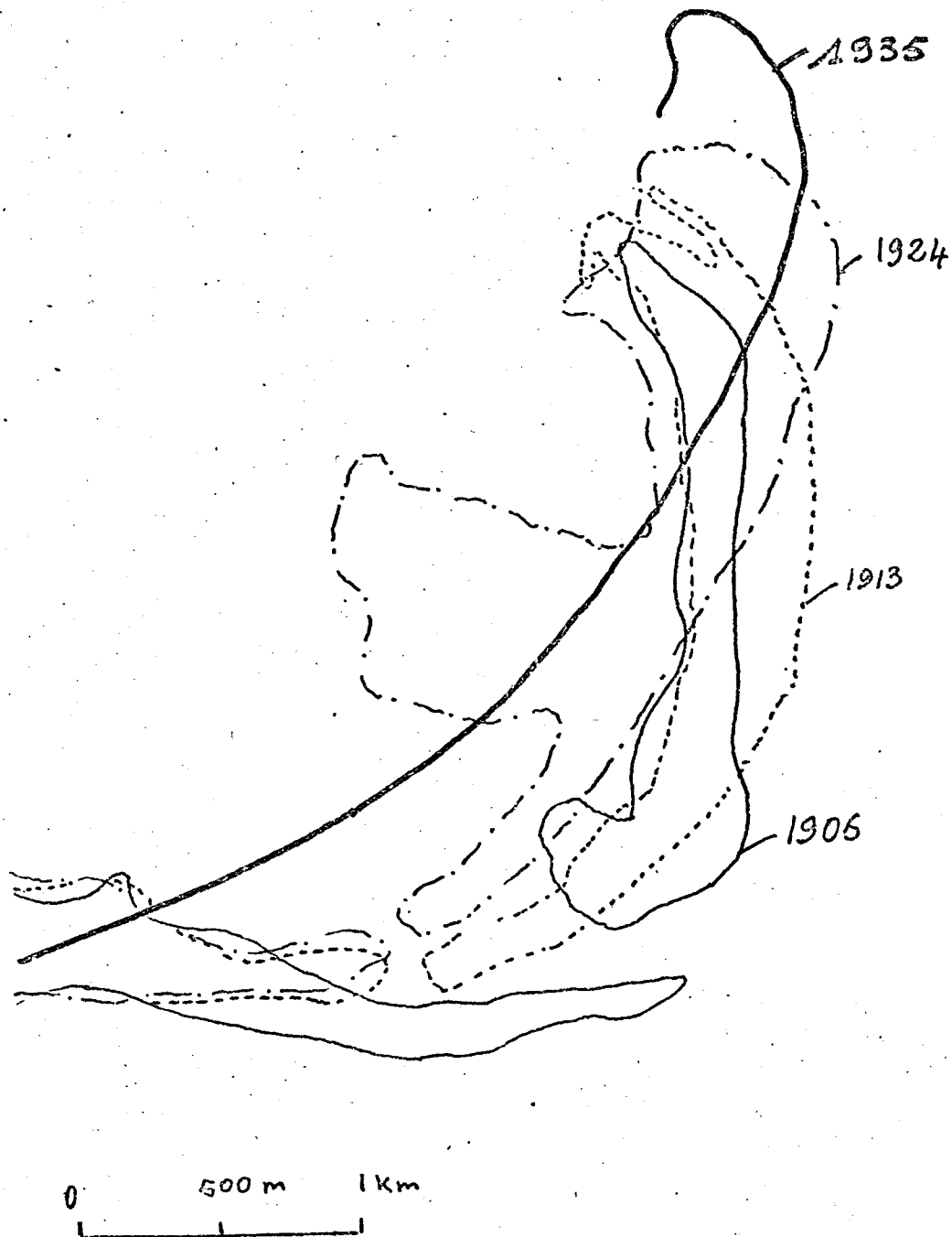
Sur le platier arasé du delta, de -6 à -3 m, les sables et sablons sont entraînés dans des directions allant du NNW au N, selon le sens de propagation des houles réfractées de tempêtes (SE ou SW).

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

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

Variations morphologiques du they de
la Gracieuse en 30 ans - (De 1906 à 1935)

(D'après Duboul-Razavet)



Schema no 17

On pourrait penser que l'érosion des niveaux supérieurs se poursuivra tant qu'un nouveau profil d'équilibre du prisme littoral local n'aura pas été réalisé par la destruction jusqu'à -25 d'une grande partie du promontoire sous-marin.

En fait, le tableau ci-dessus montre que cette érosion s'est surtout traduite depuis 1895, par une extension vers le NW du platier arasé jusqu'à la cote -10. Les modalités de réfraction des houles se modifient ainsi lentement et les énergies apportées se dissipent par détachement et frottement contre le fond sur des distances plus grandes. Les vagues "s'essouffent" ainsi avant d'arriver sur les très petits fonds. Ces phénomènes peuvent finalement entraîner l'apparition d'un gradient négatif de la capacité d'érosion qui se traduit par une diminution progressive des quantités de sables amenées à la côte. A la limite, le recul de la côte peut se poursuivre grâce à un phénomène de soutirage aux rivages par les dérives littorales permanentes, bien que l'érosion du platier submergé s'atténue.

B - Les portions émergées et îlots sableux du promontoire de Peygoulhier sont le siège d'un démantèlement permanent.

Pour des commodités d'exposé, nous distinguerons 3 phases successives, liées chacune à des vitesses et des modalités d'évolution différentes.

1° - *Au cours de la première phase - de 1895 à 1934 - on observe une ablation totale, rapide et particulièrement spectaculaire des corps sédimentaires les plus extrêmes de l'ancienne embouchure (schéma n°17).*

Les lieux de concentration à la côte de l'énergie des houles, situés au niveau de la ligne de puissance maximum du delta, sont les plus atteints. En 28 ans, ce phénomène a ainsi entraîné un recul général de plus d'un km du trait de côte vers le NW. L'ancienne passe et ses divers theys ont complètement disparu, alors qu'un cordon littoral unique relie l'embouchure actuelle (Roustan) au they de la Gracieuse.

Mais ces phénomènes de destruction et de recul ne sont pas seuls en cause : il s'y ajoute un phénomène de transfert latéral des sables et sablons vers le NE sous l'effet de la dérive littorale engendrée par les houles obliques de SE et SW (cf. chapitre II). Les matériaux issus du démantèlement des theys s'ajoutent ainsi aux produits de l'arasement du delta - peut être aussi à quelques apports rhodaniens "frais" - et cheminent alors parallèlement à la côte. Ils migrent vers le NE et concourent à l'élaboration de la pointe extrême de la Gracieuse qui, de 1906 à 1935, a progressé d'environ 1 km.

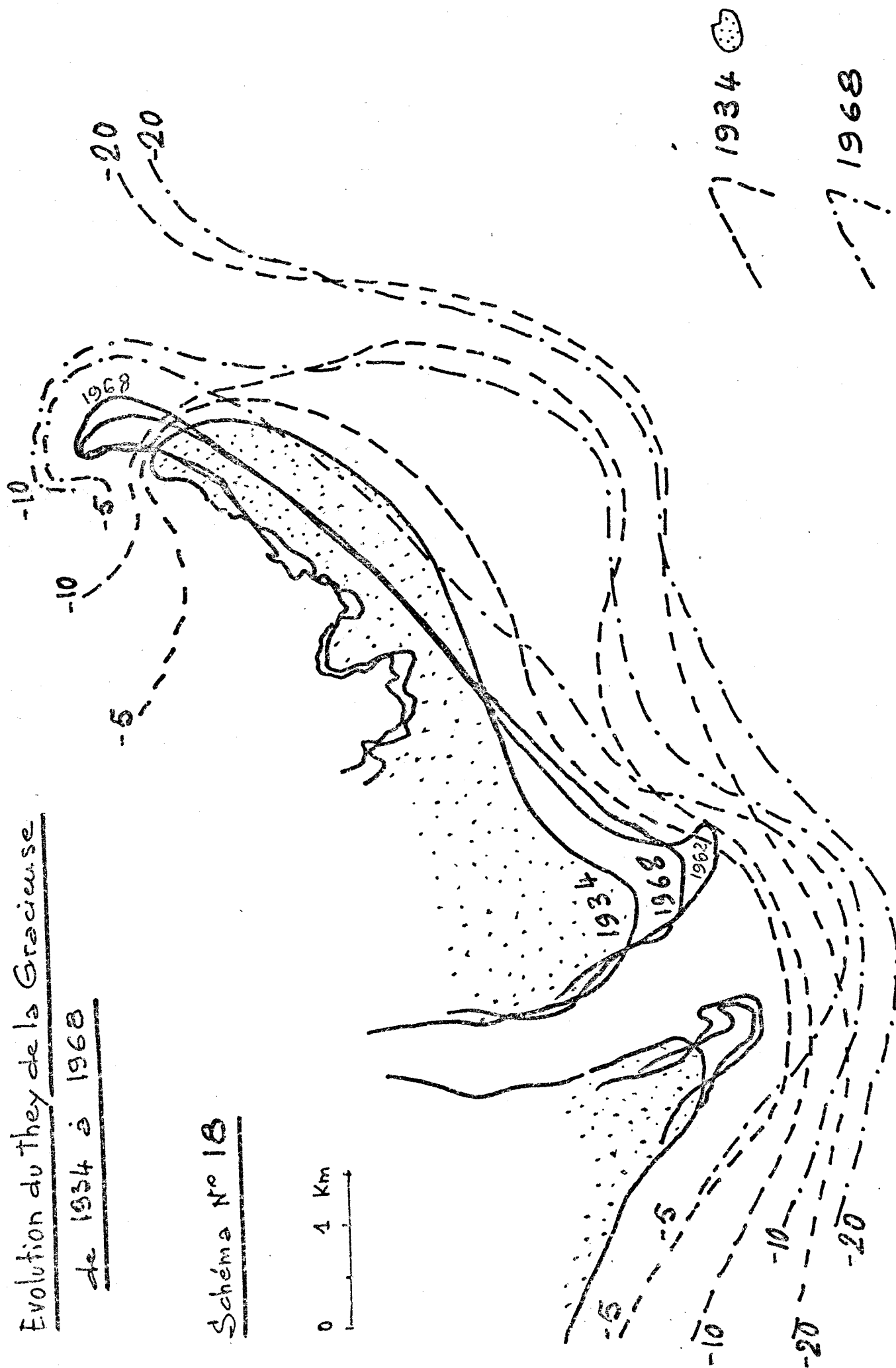
Plus au Sud-Ouest, au contraire, le they de Roustan n'a cessé, au cours de cette période, d'avancer vers le large au même rythme que le delta sous-marin actuel. De 1895 à 1934, plus de 750 mètres ont été ainsi conquis sur la

Evolution du They de la Gracieuse

de 1934 à 1968

Schéma n° 18

0 1 Km



mer grâce à l'accumulation des matériaux rhodaniens à proximité immédiate de l'embouchure.

Les schémas n° 16 et 18 montrent que l'on peut assimiler cette évolution à une rotation de la sigmoïde dessinée par le trait de côte autour d'une petite zone pivot (point P). Ce secteur, situé entre les theys d'Eugène et de Roustan, est le lieu d'inflexion du trait de côte et montre une relative stabilité du rivage. Au Nord de ce point, l'érosion fait reculer la côte ; au Sud, les rivages s'engraissent.

2° - Au cours des deux dernières phases, le phénomène de pivotement s'amortit très lentement pour faire place, à partir des années 1960, à une régularisation du trait de côte qui tend à devenir :

- parallèle à la résultante annuelle des vents de SW,
- perpendiculaire à la résultante annuelle des vents de SE et SSE.

Un tel modelage des formations sédimentaires meubles émergées par les houles dominantes est fréquent.

a - De 1934 à 1962.

Une importante érosion apparaît au niveau de la Balancelle, où le retrait de 450 m entre 1934 et 1954, est encore de 150 m de 1954 à 1962.

De même, l'allongement du they de la Gracieuse a continué à des vitesses d'ailleurs variables. Ces fluctuations résultent de la soudure rapide à la côte de bancs sableux longtemps immergés, avec un ralentissement de la progression apparente ultérieure. La SOGREAH estime que la mise en dépôt annuelle à la Pointe* porterait sur environ 150 à 200.000 m³ pour des vitesses de progression de 20 à 25 mètres par an. De même, les photographies aériennes montrent une croissance de 600 m entre 1934 et 1962, soit 20 m/an. Près de 8-10⁶ m³ de sables auraient ainsi été mis en dépôt à la Pointe, de 1895 à 1954 (SOGREAH).

Pendant ce temps, au Sud du pivot P, le they de Roustan a progressé d'environ 1 km vers le SE, et abrite partiellement des houles de SW les rivages plus septentrionaux. Cette progression constante est indiscutablement liée à la prédominance locale des phénomènes d'accumulation des alluvions rhodaniennes sur la capacité de déblaiement des facteurs hydrodynamiques.

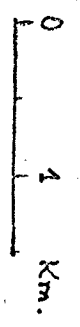
b - de 1962 à 1971.

Il n'en est pas de même à partir des années 1960. Le schéma n° 18 montre que de 1962 à 1971, tout le secteur oriental du they de Roustan n'a cessé de reculer de près de 400 m, ce qui entraîne petit à petit, une inflexion vers l'Est de l'embouchure. Il est manifeste que cette érosion est liée au très fort déficit des apports solides rhodaniens (cf. chapitre I) depuis la mise en service des divers barrages E.D.F.

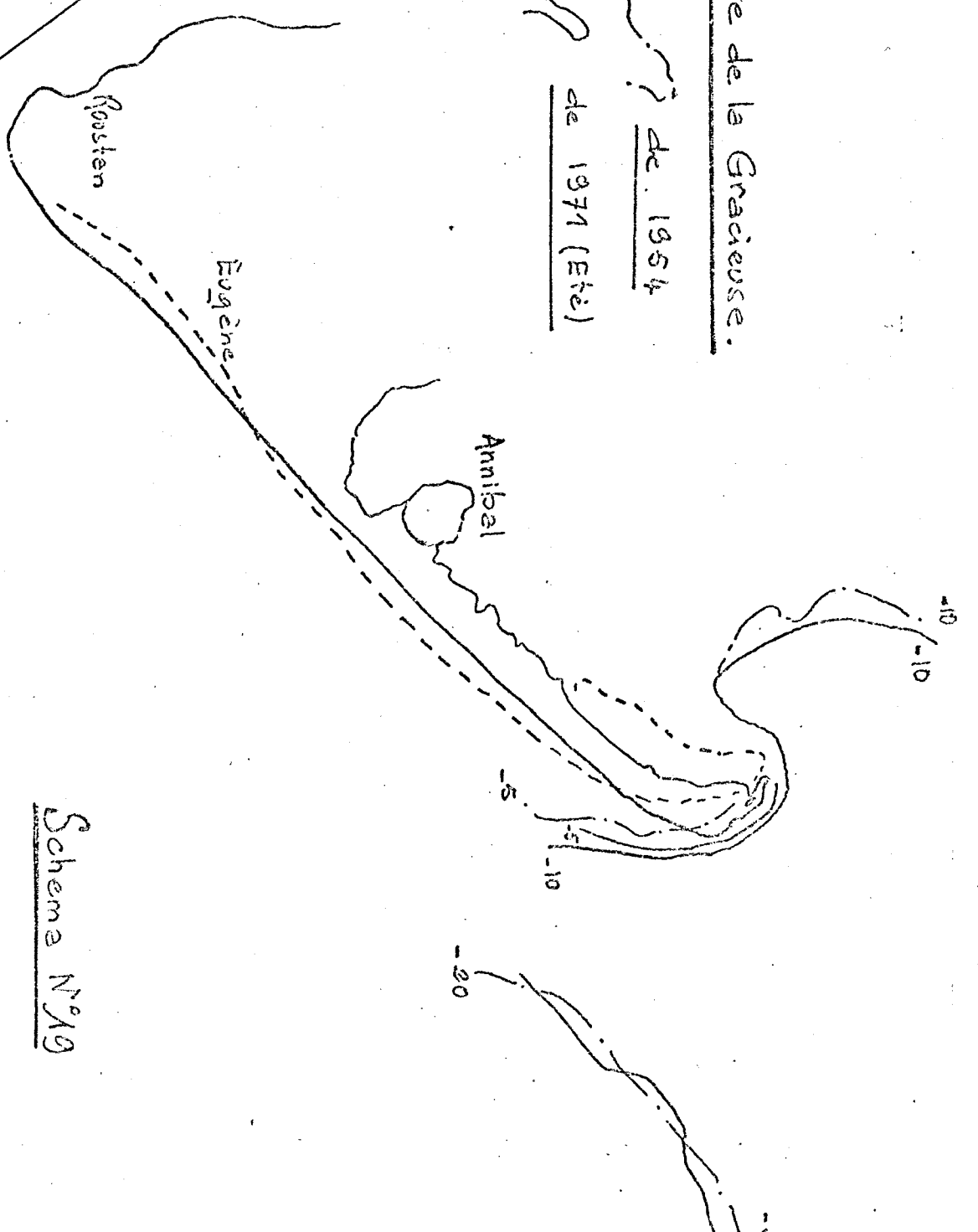
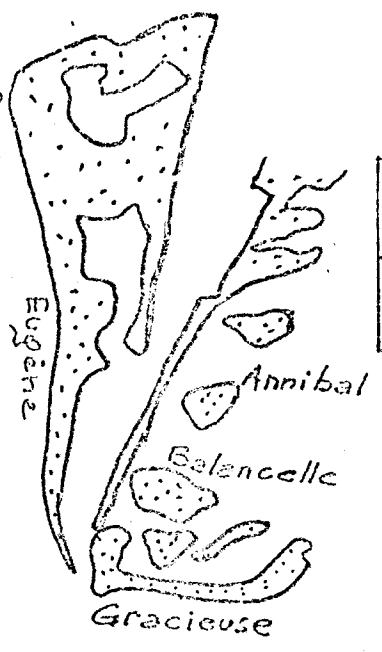
*Section de la pointe 8.000 m², et non compris les fonds.

Evolution Récente de la Pointe de la Gracieuse.

Trait de côte et Iso bathes (Après Port Autonome)
 Trait de côte et isobathes (d'après minutes inédites I.G.N.)



Aspects au début du XX^e S.



Schema N°19

Par contre, entre les theys de Roustan et Balancelle, on observe un engraissement de plus de 150 m de 1960 à 1971 (500 m depuis 1934). Or tout ce secteur est soumis à une légère divergence des orthogonales dans le thalweg sous-marin qui sépare les deltas. On peut penser que ces atterrissements sont liés à une diminution de l'énergie des houles, plutôt qu'à une source précise de matériaux. De 1934 à 1960, il s'agissait d'éléments rhodaniens "frais" ; de 1960 à 1972, l'érosion du they de Roustan assurerait le relais.

Enfin, au N du point de stabilité, les modifications du they de la Gracieuse sont toujours manifestes. Le schéma n°19 (d'après minutes inédites IGN) montre un recul au NW des côtes d'environ 200 m, alors que l'allongement se traduit surtout par une modification de la forme de l'extrémité plutôt que par une forte progression au NE.

Ce phénomène résulte de l'action d'épis et de barges volontairement échouées à la côte par les Ponts et Chaussées, afin de stopper une dangereuse érosion de l'extrême pointe qui s'était récemment fait jour.

On peut relier, semble-t-il, ce dernier phénomène aux modifications apportées par la grande digue aux tracés des courants de tempêtes. Nous avons montré (cf. chapitre II) qu'en 1962 le courant superficiel entrant longeait la Gracieuse, puis s'infléchissait seulement au NNW en assurant la progression des matériaux. Or en 1971, ce courant contourne la pointe, s'oriente vers l'W et a tendance, au contraire, à en éroder l'extrémité.

Ainsi, par le jeu de ces modifications successives, l'allure sigmoïde présentée encore vers les années 1960 par le complexe Roustan-Eugène-Balancelle-Gracieuse tend à s'effacer au profit d'un tracé rectiligne, respectivement parallèle ou perpendiculaire aux houles de SW et SE.

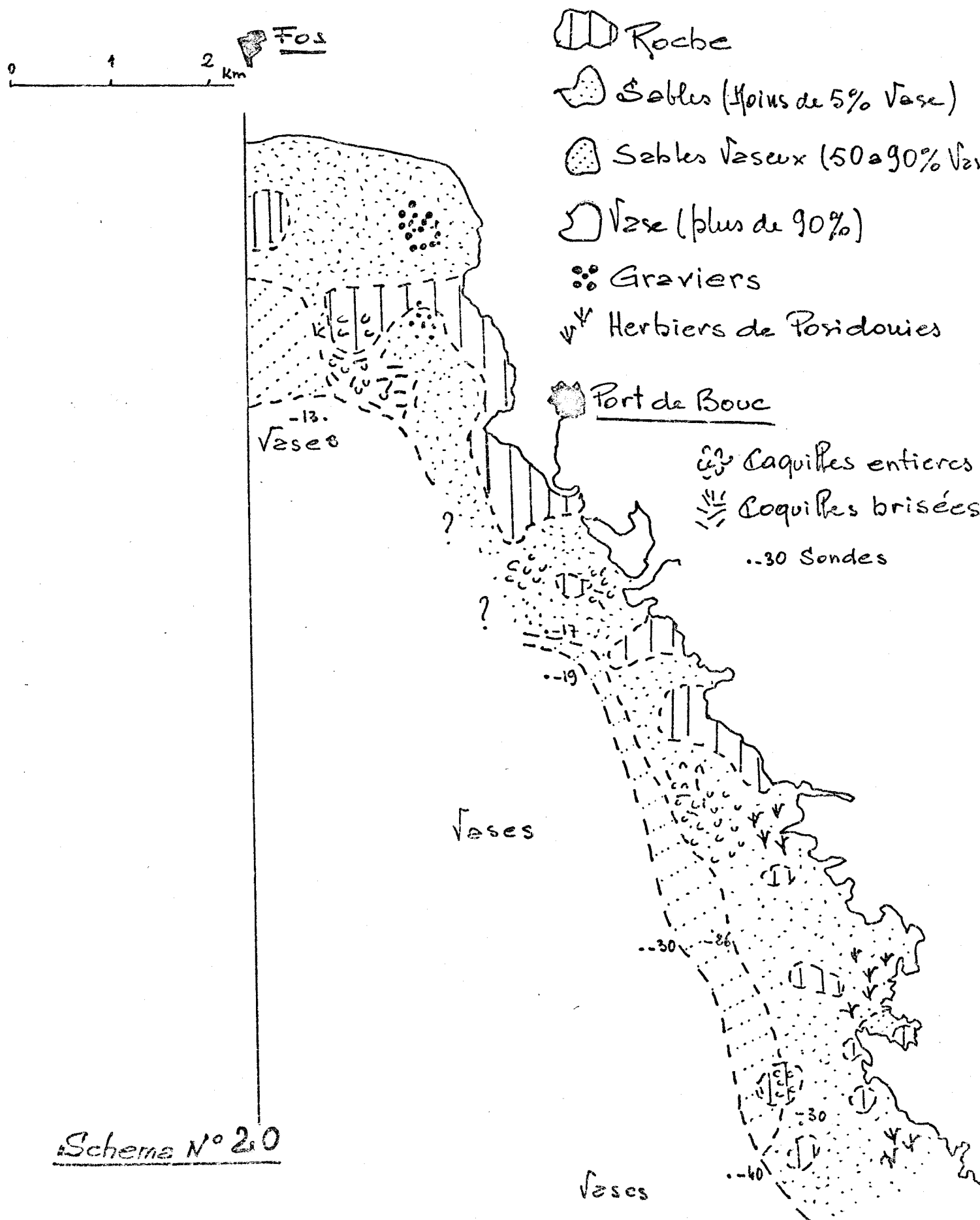
C - Conclusion.

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

. Les alluvions fluviales nourrissent essentiellement la partie méridionale (Roustan-Eugène) et en assuraient, jusqu'en 1950, la stabilité. Les fluctuations locales du trait de côte notées depuis cette date sont liées aux variations du volume des apports solides rhodaniens.

. Les éléments sableux issus de l'érosion du platier sous-marin de l'ancien delta de Peygoulier alimentent à peu près exclusivement, par leur transfert au NNW, la partie septentrionale (Balancelle-Gracieuse). Le recul constant des theys montre que ces apports ne sont jamais parvenus à compenser les volumes soutirés aux rivages par les agents hydrodynamiques. La progression au NE de la Pointe de la Gracieuse montre que l'ensemble de ce matériel est mobilisé par transfert littoral et finalement abandonné à l'extrême Pointe.

Carte schématique des fonds du Golfe de Fos
 (Secteur oriental) en 1918 - D'après CHEVALLIER



Schema N° 20

b - On observera enfin que la transformation continue des contours et le déplacement des positions aboutissent à une lente "dérive" des theys les plus externes (schéma n°19) Eugène, Gracieuse, qui par leur recul, viennent fusionner avec les theys initialement internes : Balancelle, Peygoulie, Annibal.

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

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

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

On voit ainsi que tout aménagement de la branche occidentale du Golfe de Fos ne devra être entrepris qu'avec grande prudence, afin de ne pas bouleverser l'économie sédimentaire locale.

V - NATURE ET REPARTITION DES SEDIMENTS SUR LES FONDS DU GOLFE DE FOS.

A - Au début du siècle.

Les cartes du Golfe de Fos éditées par le Service Hydrographique de la Marine précisent la nature des fonds (roches, sables ou vases et vases sableux) en raison de leurs aptitudes différentes à d'éventuels ancrages. On connaît le soin et l'exactitude apportés à ces déterminations : bien que reposant sur de simples impressions qualitatives, elles n'en traduisent pas moins avec une bonne approximation les caractères dominants de la sédimentation.

En 1916, A. Chevallier, sur la foi de telles indications et de travaux personnels, publie une carte sédimentologique des fonds orientaux du golfe (schéma 20). Il montre ainsi *l'importance des fonds rocheux ou sablo-organogènes qui ceinturent à l'Est le plan d'eau, et la vaste pénétration des vases à plus de 90 % de fraction fine ($\phi < 113 \mu$) jusqu'à l'isobathe 15.*

De 1950 à 1960, divers chercheurs (cf. bibliographie) précisent la morphologie ou les modalités d'édification du vaste complexe deltaïque rhodanien. On retrouve, disséminés dans ces travaux, quelques indications montrant que la carte de A. Chevallier correspond toujours "en gros" à la réalité.

B - Avant les travaux portuaires.

En 1964, R.M. Roux effectue, en compagnie de C. Chevallier-Febvre, une campagne de prélèvements destinée à caractériser l'état sédimentologique et faunistique (associations benthiques) des fonds du golfe, avant le début des travaux d'installations portuaires.

Carte Sédimentologique des fonds
du Golfe de Fos en 1984

(Roux)

Proportions de Fraction Fine

○ Plus de 90%

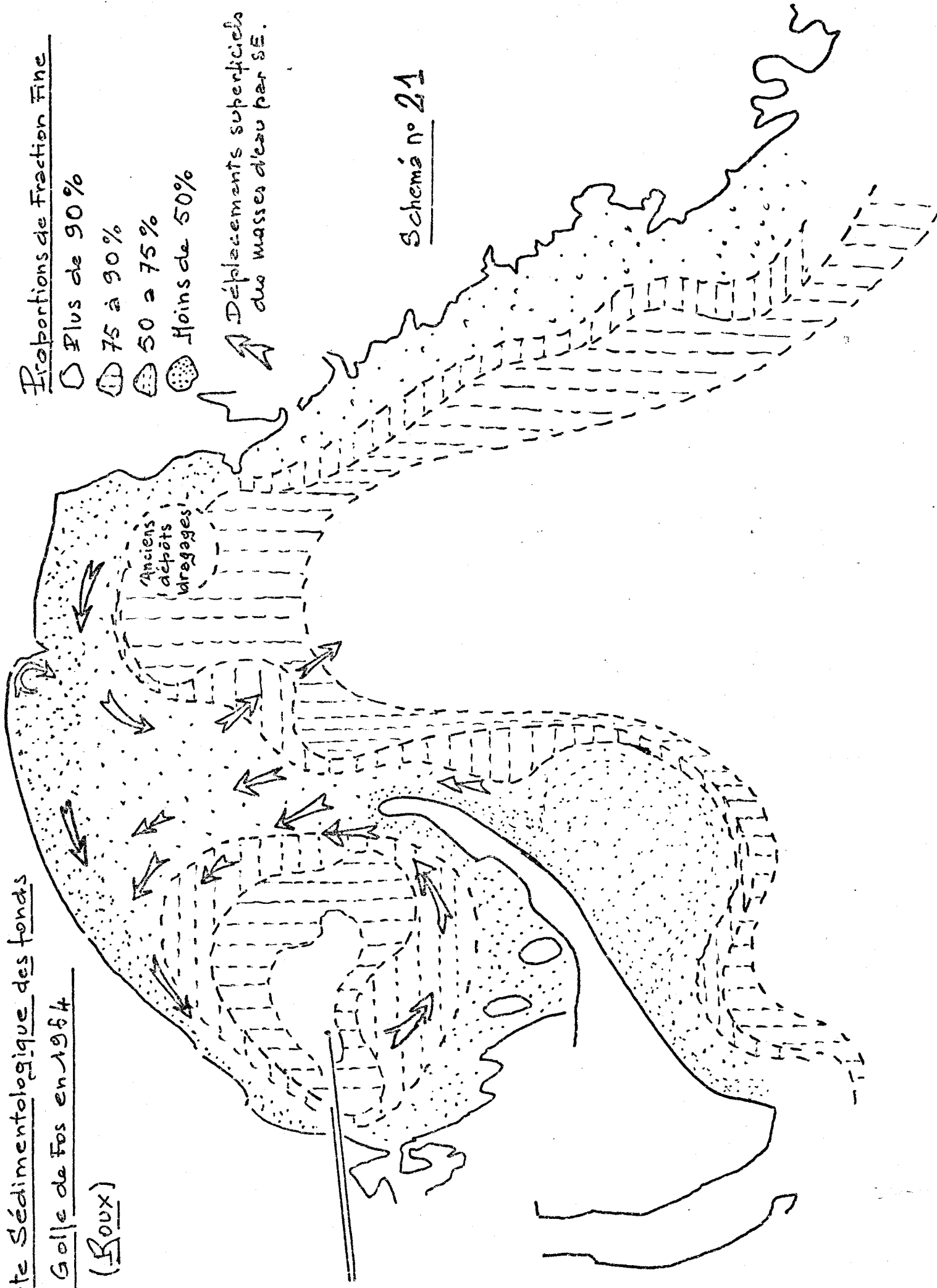
◐ 75 à 90%

◑ 50 à 75%

◒ Moins de 50%

↗ Déplacements superficiels
des masses d'eau par S.E.

Schema n° 21



La partie géologique du travail est fondée sur une étude des proportions de sédiments retenus ou passant au travers, du tamis n°10 à maille carrée de 2 mm de côté et du tamis n°350 à maille carrée de 42-44 μ de côté.

On obtient ainsi 3 fractions :

- Fraction grossière : la plus petite dimension des éléments est supérieure ou égale à la diagonale du carré soit $2\sqrt{2} = 2,8$ mm ;
- Fraction sableuse : la dimension des grains est comprise entre 2,8 mm et $44\sqrt{2} = 63$ μ soit 0,063 mm ;
- Fraction fine (vases ou lutites) : la dimension des particules est inférieure à 63 μ .

Le schéma n°21 indique la nature des fonds selon la richesse en fraction fine (vases, lutites) des sédiments passant au travers du tamis n°10 (2,8 mm). On a distingué 4 types de fonds (schéma n°21).

Les vases pures (lutites), renfermant plus de 90 % de fraction fine, et les vases bioclastiques, dont la proportion en éléments fins reste supérieure à 75 %, recouvrent la quasi totalité des fonds du golfe.

Ces dépôts de lutites sont divisés en deux aires bien distinctes par une bande de vases sableuses (75 à 50 % de fraction fine) dont "l'épine dorsale" est constituée par des sables vaseux (50 - 25 % d'éléments fins) à fraction sablonneuse très fine (63 - 125 μ). Ces faciès mixtes partent des fonds sableux qui ceinturent la pointe de la Gracieuse en les prolongeant, puis progressent vers le NE à la cote -12. Ils viennent finalement rejoindre en s'élargissant les éléments sableux du prisme littoral de la plage de Fos ou graveleux des "mattes" à Posidonies de l'éperon St Gervais.

A l'Est, des faciès sablo-organogènes tapissent les thalwegs ou s'étendent à l'état de tâches entre les affleurements rocheux sous-marins de la côte de la Nerthe.

On voit ainsi que la nature des sédiments du golfe est sous l'étroite dépendance des apports rhodaniens.

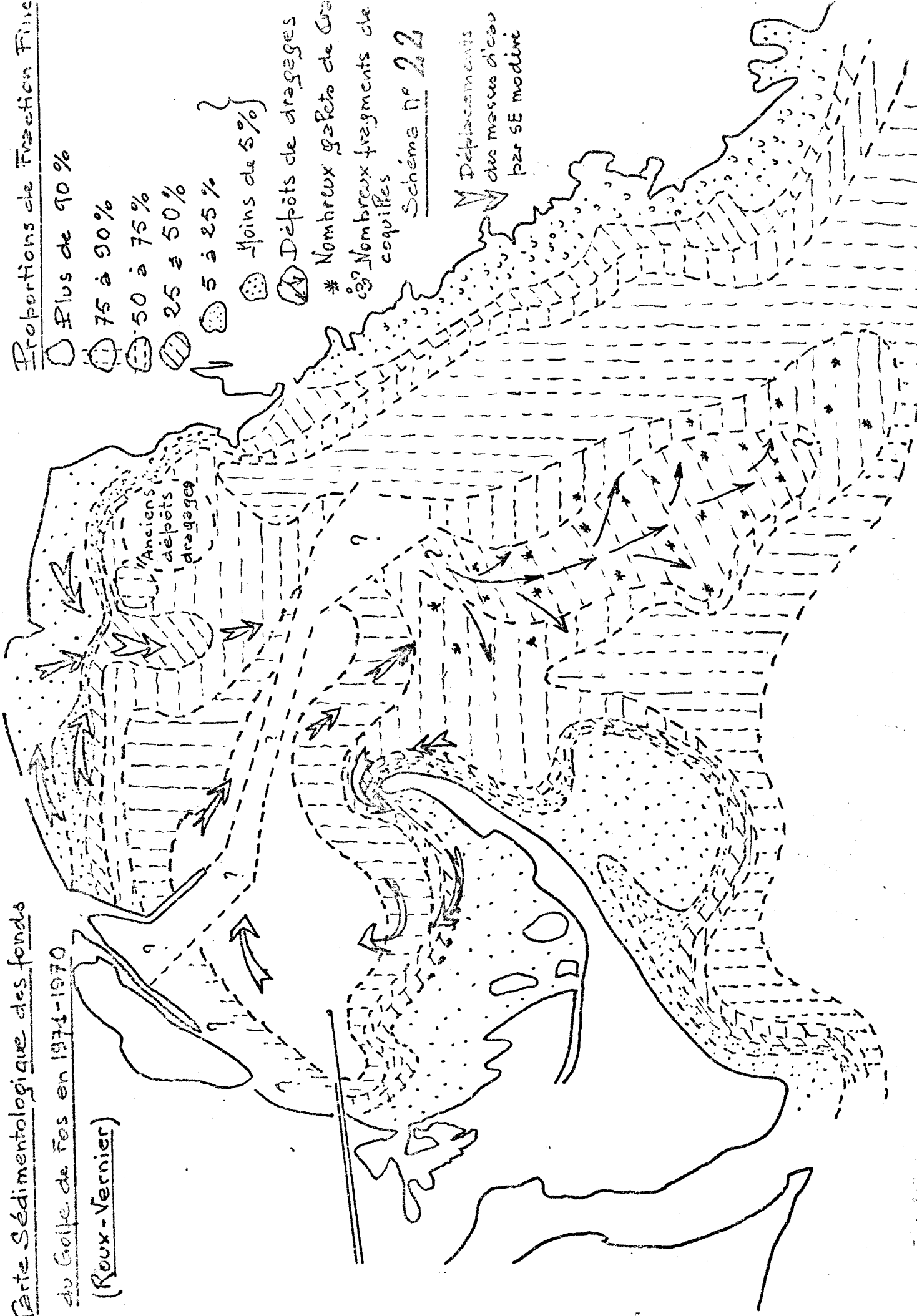
La fraction limoneuse de ces apports, par sa large dispersion, est à l'origine de la sédimentation vaseuse de type différée qui se développe soit dans la partie médiane du plan d'eau en raison de sa profondeur, soit dans une "cellule" de décantation née de l'abri de la flèche de la Gracieuse. Ce type de sédiment n'est pas particulier au Golfe de Fos. Il correspond aux fonds de "vases terrigènes côtières" qui s'étalent au large du delta du Rhône, et recouvrent d'un manteau continu le plateau continental entre la rade de Marseille et le Golfe du Lion.

Les fractions sableuses et sablonneuses des apports, par leur dépôt à peu de distance de l'embouchure (sédimentation immédiate) donnent naissance aux fonds de sables et sables vaseux du talus deltaïque de Roustan. Ce type de matériel se retrouve encore dans les faciès sableux du platier arasé du Peygoulier

Carte Sédimentologique des fonds

du Golfe de Fos en 1971-1970

(Roux-Vernier)



C - Au cours des travaux portuaires (1970).

En 1970 (Eté, Automne) puis janvier 71, R.M. Roux et E. Vernier reprennent l'étude des sédiments du golfe. Nos prélèvements ont été effectués à l'aide d'une drague de type "Spatangue", qui écrème la partie superficielle du sédiment.

La grande darse, sa jetée de protection et le chenal d'accès à -24 m sont alors réalisés, tandis que les travaux d'aménagement se poursuivent.

Le schéma r22 indique la nature des fonds selon la richesse en fraction fine ($<63\mu$) des matériaux passant au tamis 10 ($<2,8$ mm).

Par rapport à leur répartition de 1964, les divers types de sédiments montrent une distribution nouvelle.

1° - *Au Sud d'une ligne Pointe de la Gracieuse-Bouc.*

Les vases pures (>90 % lutites), rejetées au débouché du golfe sur la rade de Marseille, ne dépassent pas vers le Nord l'isobathe 50, sauf au large du they de Roustan, où les positions demeurent inchangées.

A la place occupée en 1964 par ces vases pures, s'étend une langue de vases sableuses (75 - 50 %) et de sables vaseux (50 - 25 %) qui se superpose, au maximum du creux du golfe, à des fonds de vases bioclastiques (90 - 75%).

Partant de l'entrée du chenal dragué, le nouveau domaine à forte fraction sableuse rejoint vers l'Ouest les hauts fonds du they de la Gracieuse et s'allonge NW-SE jusque sur le parallèle du port de Carro.

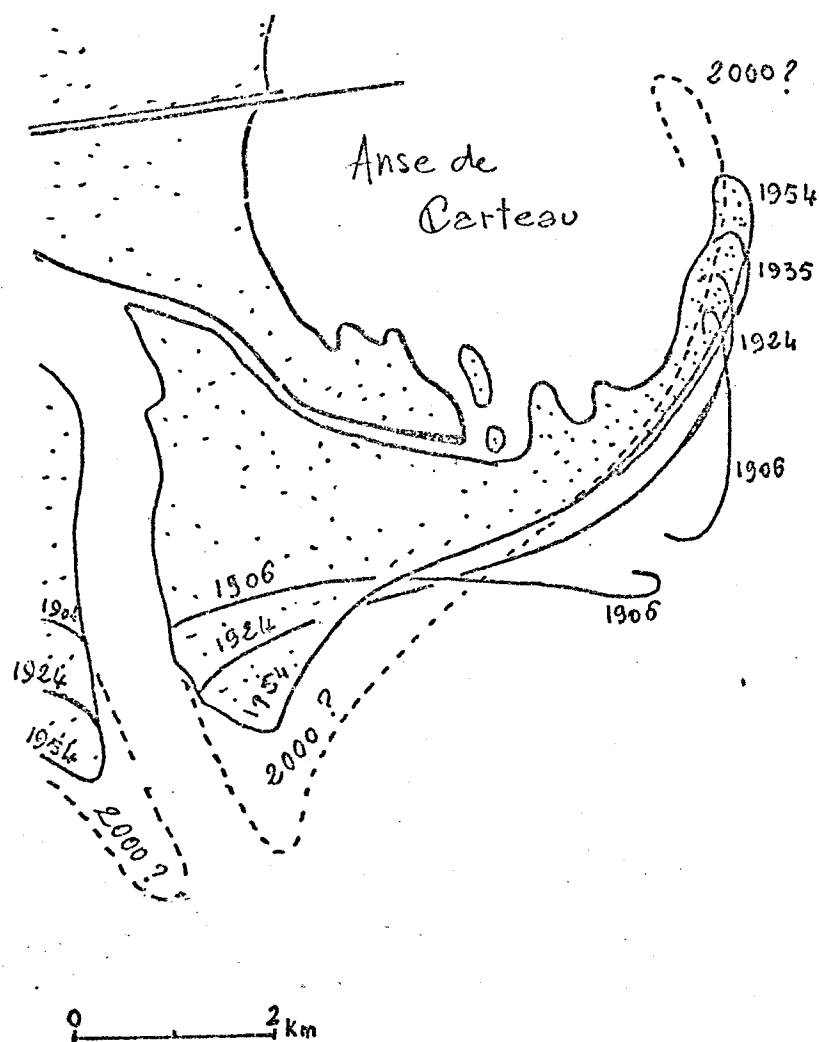
A la fraction sableuse, très hétérométrique, de ces faciès mixtes, s'ajoute une forte proportion de graviers et granules ainsi que de très nombreux galets caractéristiques du cailloutis de Crau. Il est manifeste que ce sédiment hétérogène correspond à un dépôt artificiel.

L'aire centrale de vases terrigènes côtières du golfe est ainsi utilisée comme zone d'épandage des matériaux issus du creusement des darses ou du dragage du chenal d'accès.

2° - *Au Nord d'une ligne Pointe de la Gracieuse-Bouc.*

Les vases pures et leurs auréoles de vases bioclastiques débordent de la cellule de décantation initiale (1964) et se prolongent, par un vaste pédoncule, vers le SE de part et d'autre du chenal dragué. Les dépôts vaseux recouvrent ainsi les faciès mixtes antérieurement observés dans ce secteur, qui sont rejetés sur le méridien de l'éperon St Gervais, dans le quart NE du golfe.

Il est vraisemblable que ce nouveau domaine vaseux correspond en fait à l'aire de sédimentation des fractions fines (lutites) facilement mises en suspension lors du remaniement mécanique des formations sédimentaires locales par les travaux de dragage du chenal d'accès ou des darses.



Evolution de la pointe de la Gracieuse et du
thuy de Roustan et extrapolation en l'an 2000.
selon J.U. van Straaten (1956)

(Apports rhodaniens et Hydrodynamique du golfe de Fos
supposés constants)

D - Conclusion.

Les modifications des faciès, observées de 1964 à 1971, résultent d'une intervention humaine, directe ou indirecte, dans l'évolution naturelle des fonds.

a - Action humaine indirecte :

Les différences des circulations hydrodynamiques, liées à la présence de la jetée de protection, semblent avoir ralenti fortement la progression au NE de la flèche de la Gracieuse.

En 1964 (schéma N° 21) la portion émergée de cette pointe se prolongeait au N par des faciès sablo-vaseux peu profonds, véritables sous-bassements sur lesquels s'effectuait peu à peu la progression du matériel sableux amené par dérive littorale. Il est vraisemblable que ce type d'évolution aurait ultérieurement permis la jonction de la Gracieuse avec le Nord du golfe. Un cordon littoral situé bien plus en retrait vers le NW que l'actuelle flèche, aurait ainsi isolé l'abri de Carteau. (schéma n°23).

En 1971, l'extrême pointe du they de la Gracieuse est artificiellement protégée avec succès contre le courant qui la contourne et va déposer sur les hauts fonds de Carteau une partie des sables amenés par dérive littorale. La tendance évolutive de 1964 est renversée.

b - Action humaine directe :

La disparition des aires de "vases terrigènes côtières" résulte d'une véritable "pollution sédimentaire" par les rejets de dragages qui bouleversent la nature des fonds.

Nous n'insisterons pas sur les dangers qui en résultent : les vases, véritables "sols marins", sont le siège de phénomènes bio-chimiques et biologiques plus ou moins inféodés à la granulométrie globale par facteurs interposés.

On notera que le choix de ce secteur comme lieu de dépôt est d'autant plus regrettable - au point de vue biologie et géologie marine - que les rejets s'effectuent dans une zone de sédimentation différée, où les taux d'accumulation sont actuellement de l'ordre du centimètre par an. Plusieurs dizaines d'années seront nécessaires pour qu'une tranche de 30 à 40 cm de vase vienne à nouveau recouvrir le matériel allochtone, et permette l'instauration d'un nouvel équilibre.

VI - SEDIMENTOLOGIE.

En schématisant à l'extrême, on peut ranger les matériaux du golfe dans des éventails minéralogiques à dominantes différentes selon la taille des éléments et leur mode de sédimentation ou de transfert.

A - Éléments tributaires des transferts par dérive littorale.

Il s'agit essentiellement de la fraction sableuse, dont les minéraux sont, par ordre d'importance décroissante : calcite, quartz, feldspath et minéraux lourds.

1° - *Répartition granulométrique sur les fonds du golfe de la fraction grossière (2,8 mm - 63 μ).*

Quatre classes granulométriques secondaires ont été distinguées selon les normes BRGM :

- sables grossiers et moyens (S1) : 2,8 mm à 0,5 mm;
- sables fins (S2) : 0,5 mm à 0,25 mm;
- sables très fins (S3) : 0,25 mm à 0,125 mm;
- sablons (S4) : 0,125 mm à 0,063 mm.

En 1971 la distribution de ces diverses classes est liée à la nature des sédiments : les fractions sableuses sont d'autant plus fines et plus isométriques que les proportions en lutites sont plus élevées.

a - Les sablons (S4) :

Le peu de fraction grossière que renferment les vases terrigènes est constituée exclusivement par des sablons. Exception faite pour la zone de rejets de dragages, cette classe est ainsi présente dans toute l'aire centrale profonde du golfe, et ne dépasse pas, vers l'Est, l'isobathe charnière -25.

A l'Ouest, les fonds proches de l'embouchure actuelle ou à hydrodynamisme affaibli, ainsi que les secteurs abrités, sont soulignés par une avancée des sablons vers le littoral. Ainsi dans le thalweg séparant les deltas immergés, les sablons "remontent" jusqu'à -5 m dans des fonds de sables vaseux et de sables purs, pour dessiner une insertion en doigt de gant vers le NE. De même, dans la zone abritée de Carteau et dans le fond du golfe, les sablons se retrouvent jusqu'à l'isobathe -5.

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

Exclus des prismes littoraux par l'élutriation des tempêtes, les sablons ne peuvent sédimenter qu'à partir d'une certaine profondeur (-5 à -25) fonction de la turbulence locale (forte ou affaiblie).

On sait que les eaux rhodaniennes (cf. § 1) sont les vecteurs

d'éléments à grande surface portante ($>200 \mu$) formés par des agrégats de particules plus petites et de matières organiques. Leur destruction en mer libère les constituants sur la zone des faciès vaseux.

b - Les sables très fins (S3).

Ils représentent presque exclusivement les dépôts actuels de la "barre" du Rhône et des prolongements sous-marins du they de Roustan. On les retrouve, alliés parfois à moins de 5 % de lutites, sur tout le platier arasé de l'ancien delta de Peygoulter et les petits fonds (-2 m) de la pointe de la Gracieuse et de la plage de Fos.

c - Les sables fins (S2).

Ils caractérisent les portions émergées ou sub-aériennes des corps sédimentaires occidentaux ainsi que tous les hauts fonds sableux de l'anse de Carteau. On notera que la granulométrie de ce matériel est très voisine de celle des sables du lit actuel du Rhône (cf. § 1).

d - Les sables grossiers et moyens (S1).

Alliés à de nombreux débris coquilliers, à des graviers et des cailloutis, ils sont confinés dans deux aires assez réduites.

La première se limite aux chenaux qui érodent les "mattes" de Posidonies de la pointe St Gervais.

La seconde s'étend de taches en taches sur les fonds littoraux de la côte orientale rocheuse du golfe.

e - En résumé, la similitude des sables très fins et fins avec les matériaux de la barre ou du lit fluvial est normale et traduit la communauté d'origine rhodanienne. Les seuls sédiments qui ne présentent aucune affinité avec ce type de matériel sont organogènes (S1) ou d'origine artificielle (rejet de dragages).

2° - Calcimétrie.

Les proportions en carbonate de calcium, exprimées en % par rapport au sédiment total, varient selon la nature des sédiments. Voisines de 34 - 35 % pour les faciès vaseux, les teneurs en calcite s'abaissent à 20 - 30 % pour les sables fins et très fins. Au contraire, ces taux remontent à 45 - 60 % et atteignent 80 - 90 % pour les faciès grossiers sablo-organogènes.

D'autres fluctuations, plus discrètes, apparaissent à l'intérieur d'un même type de sédiment, et sont liées à de multiples causes. Ainsi les sables fins littoraux montrent un enrichissement progressif en carbonates depuis le they de Roustan (25 à 28 %) jusqu'à la pointe de la Gracieuse (31 à 32 %), interrompu par une chute brutale au niveau de l'ancien estuaire de Peygoulter (14 à 24 %).

Enfin des différences nettes s'observent le long des profils de

certaines prismes littorales. Dans l'Anse du Repos, les proportions de CO_3Ca n'excèdent pas 25 % de 0 à -5, puis atteignent 28 - 32 % au-dessous de -5.

3° - Les minéraux lourds.

Particulièrement riches en Fer et en Magnésium, ces minéraux possèdent des densités supérieures à celles du quartz (SiO_2) et de la calcite (CO_3Ca), ce qui leur confère des comportements hydrodynamiques différents.

Ces minéraux se rencontrent en général à l'état dispersé dans les sables fins et très fins du prisme littoral où leur proportion n'excède pas quelques centièmes. Toutefois, de petites concentrations locales peuvent apparaître après tempêtes.

Dans ce cas, ces ensembles, véritables "placers" miniatures, se signalent par leur richesse en associations secondaires, chacune liée à une région bien déterminée du bassin versant rhodanien.

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

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

B - Éléments de la sédimentation différée et des transferts en suspension.

Dans une étude de la charge des eaux superficielles fluviales, Chamley (1971) a montré qu'à des quantités notables de petites particules ($\Phi < 50\mu$) de calcite, de quartz et feldspath, s'ajoute une forte proportion de minéraux argileux typiques du bassin versant rhodanien.

Parmi ces derniers, l'illite et la chlorite dominent largement alors que très peu de montmorillonite (ou interstratifiés) et des traces de kaolinite complètent l'éventail.

La répartition des espèces minérales varie selon la granulométrie. La calcite, le quartz, les feldspaths et, à un degré moindre, la chlorite, sont relativement plus abondants dans les grandes tailles (30 à 50 μ), tandis que l'illite caractérise la fraction inférieure à 8 μ . Les proportions de ces minéraux varient en outre selon les régimes du fleuve.

Les faciès vaseux du golfe de Fos présentent des caractères voisins de ceux décrits ci-dessus. On notera que les taux de montmorillonite, toujours très faibles, augmentent dans les zones abritées (Carteau) ou profondes du golfe.

Un phénomène de sédimentation différentielle, due aux tailles extrêmement petites des particules de ce minéral, semble responsable des fluctuations observées.

Pour conclure ce bref chapitre, on voit que la ségrégation géographique apparente des divers types de matériaux du Golfe de Fos en fonction de la profondeur des dépôts, résulte des modalités de sédimentation initiale (immédiate ou différée) ainsi que des possibilités ultérieures de remaniements (hydrodynamisme)..

VII - CONCLUSION.

L'ensemble des observations échelonnées sur près de deux siècles et demi concordent et montrent bien la succession des phénomènes sédimentaires responsables de l'individualisation puis de l'évolution du Golfe de Fos.

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

Ainsi à deux reprises, en 1850 et 1892, l'intervention humaine s'est opposée à la répartition des matériaux entre les divers graus, et à l'élaboration d'un delta en "patte d'oie" progressant lentement sur l'ensemble de son périmètre.

La concentration artificielle des apports solides à un débouché unique s'est chaque fois traduite par l'apparition d'un delta en forme de langue qui, progressant très rapidement selon un axe privilégié NW-SE (Peygoulier) ou N-S (Roustan), entraîne un état d'instabilité permanente des rivages et des fonds par hypersédimentation.

La mise en dépôt de l'essentiel de la charge alluvionnaire sur une aire de sédimentation restreinte introduit par contrecoup un déséquilibre dans l'alimentation en matériaux frais des portions deltaïques limitrophes. Coupés des sources d'apports, ces secteurs apparaissent rapidement en état d'instabilité permanente par démantèlement, car l'absence de sédimentation à leur niveau permet aux phénomènes d'érosion de devenir prépondérants.

A ce point de vue, la destruction constante du promontoire de Peygoulier apparaît comme le phénomène majeur et caractéristique, alors que la progression spectaculaire de la flèche de la Gracieuse vers le NE n'est qu'un épiphénomène. Cette construction n'est liée que pour une faible part aux apports rhodaniens contemporains, et résulte principalement de la mobilisation et du remaniement des matériaux abandonnés au siècle dernier. Ces dépôts subfossiles sont livrés de nos jours à la dérive littorale par l'érosion progressive des corps sédimentaires initiaux.

Depuis 1950, l'intervention humaine s'attaque aux apports eux-mêmes. La mise en service progressive des aménagements du cours du Rhône et de ses affluents est responsable d'une chute brutale de la charge solide, constituée surtout par des éléments en suspension liés à la sédimentation différée. La pointe orientale de l'embouchure de Roustan régresse déjà, et ce déséquilibre risque de s'étendre, au cours des prochaines décennies, à toute la partie méridionale du complexe deltaïque.

Enfin, depuis 1965, les fonds du Golfe de Fos sont eux aussi atteints par l'action de l'homme. Le rejet des matériaux de dragage entraîne la disparition progressive des aires centrales de vases terrigènes côtières, alors que les ouvrages portuaires, en modifiant le régime hydrodynamique, sont responsables des variations de la nature des fonds plus littoraux.

ORIENTATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

- CHAMLEY, H.^{*}, 1971. Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. Thèse, Marseille-Luminy, 420 p.
- CHEVALLIER, A., 1916. L'étang de Berre. Ann.Inst.Océanographique, VII (4) : 90 p.
- DENIZOT, G., 1939. La Crau, la Camargue et l'Etang de Berre. Travaux lab.Géol. Fac.Sc.Univ.Aix-Marseille. II : 5-159.
- DENIZOT, G., 1941. La formation géologique du delta du Rhône. Rev.d'Arles. 3 : 75-78.
- DESJARDINS, E., 1866. Aperçu historique sur les embouchures du Rhône. Imp. Ch. Lahure, Paris : 133 p.
- DUBOUL-RAZAVET, Ch.^{*}, 1955. Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône. S.G.F., N.S., XXXV (1-2) (76) : 1-234.
- DUBOUL-RAZAVET, Ch., et KRUIT, C., 1957. Sédimentologie du delta du Rhône. Variations du Rhône. Rev.I.F.P., 12 (4) : 299-410.
- FEBVRE-CHEVALIER, C., 1969. Etude bionomique des substrats meubles dragables du Golfe de Fos. Tethys, 1 (2) : 421-476.
- FRANCOIS, L., 1937. Etude sur l'évolution actuelle des côtes de Camargue. Etudes rhodaniennes : Univ. de Lyon. XIII : 71-126.
- GOVERNET, C., 1957. Histoire géologique de la Crau. "Salonensa" Salon-de-Provence, 1 : 5-10.
- GOVERNET, C., 1959. Evolution géologique des relations Bas-Rhône - Basse Durance pendant les temps pliocènes et quaternaires. Ann.Fac.Sc.Marseille. XXIV : 273-279.
- GUERARD, I., 1892. Notice sur Port St Louis du Rhône, in. Ports maritimes de la France. VII, 1ère partie, Paris.
- KRUIT, C., 1955. Sédiments of the Rhône delta : Grain size and Microfauna. Verhand. Kon.Nederl.Geol. Mijnb.Gers., Geol.Ser., XV : 357-513.
- LENTHERIC, C., 1876. Les villes mortes du Golfe de Lyon. Plon et Cie Edit. : 524 p.
- OOMKENS, E.^{*} 1970. Postglacial Rhone Delta complex. in Deltaic sedimentation, modern and ancient. Sté Ec.Paleont.Mineral., sp.pub., (15) : 198-212.
- PAUC, H.^{*}, 1970. Contribution à l'étude dynamique et sédimentologique des suspensions solides au large de l'embouchure du Grand Rhône. Thèse 3^e Cycle, Montpellier, 134 p.
- RUSSEL, R.J., 1942. Géomorphology of the Rhône delta. Ass.Americ.Geographers, XXXII, (2) : 149-254.
- SURELL, 1847. Mémoire sur l'amélioration des embouchures du Rhône. Marseille.
- Van STRAATEN, L.M.J.V., 1959. Littoral and submarine morphology of the Rhône delta. Coastal Geog.Conf., 2 : 233-264.

Divers rapports préliminaires (P.A.M., SOGREAH, L.N.H) inédits ont été consultés avec l'autorisation du Port Autonome de Marseille.

Les ouvrages marqués* contiennent une abondante bibliographie complémentaire..

