

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCÉANS

76/4043 ET 77/4074

"ASPECTS SÉDIMENTAIRES LIÉS À L'HERBIER DE POSIDONIES"

RECHERCHES DE GÉOLOGIE SÉDIMENTAIRE

SUR LES HERBIERS A POSIDONIES

DU LITTORAL DE LA PROVENCE

JEAN J. BLANC

Professeur de Géologie Marine et Sédimentologie Appliquée

et

ALAIN JEUDY DE GRISSAC

Docteur de Troisième Cycle

1978

CENTRE D'OCÉANOLOGIE D'ENDOUME-LUMINY

LABORATOIRE DE GÉOLOGIE MARINE ET SÉDIMENTOLOGIE APPLIQUÉE

SOMMAIRE

. Evolution des herbiers à Posidonies sur le littoral méditerranéen français, la formation des "mattes" et les cycles "accretion-érosion". Les limites dynamiques et bathymétriques. Etat actuel des recherches.

. Les trois modalités essentielles des herbiers à Posidonies. Equilibre stable, altération et dégradation : modes réguliers, imbriqués et dispersés.

. Essai de classification des herbiers à Posidonies : H. des aires à hypersédimentation, H. de sites abrités, H. de sites exposés, H. des passes et détroits, H. "profonds".

. Sédimentologie dynamique et évolution des herbiers à Posidonies. Exemples d'évolutions rapides et polygéniques, altérations diverses, modes de dégradation plus ou moins prononcés, cas de stabilité et de régénération. Domaines complexes et sites en cours d'aménagements, tels que le secteur oriental du golfe de Fos, baie de Sanary et du Brusca, Toulon-Est et rades de Giens et d'Hyères, golfe de Saint-Tropez, etc...

. Sur le plan local, d'autres zones sont étudiées : littoral de la Nerthe, massif des Calanques, archipel de Riou, baies de la Ciotat et de Bandol, Toulon-Ouest, littoraux du Cap Bénat et des Maures, passes des Iles d'Hyères.

. Causes possibles du recul général des herbiers, érosion des "mattes", nature des altérations et pollutions, capacité de régénération.

. Pour ce, les auteurs ont abordé l'étude des facteurs hydrodynamiques (houles, vagues, courants orbitaires, courants de marées, courants de décharge) et les réponses aux phénomènes météorologiques. L'érosion sous-

marine est accompagnée d'une étude sur les épanchages terrigènes (décharges détritiques et influence du littoral, flux turbides d'origine rhodanienne ou issus des torrents côtiers et rivières.)

L'influence des pollutions et des aménagements littoraux a été étudiée (installations d'épis, brise-lames, "marinas" et remblais, déplacement des zones hydrodynamiques vers le large, etc...).

. A partir de plongées, prélèvements et comptages, il a été procédé à une analyse multivariée et factorielle (composantes principales) des "allochers" et des paramètres granulométriques. L'ordination met en évidence les influences de la profondeur, des peuplements benthiques, des décharges détritiques, fronts d'envasements et autres modalités hydrodynamiques : courants de compensation, vagues, etc...

ABREVIATIONS UTILISEES

- HP : herbier à Posidonies,
HFD : herbier à P. dégradé,
PL : sédiments du "prisme littoral",
EB : éboulis littoral,
SFHN : sables fins des hauts niveaux,
SVMC : sables vaseux de modes calmes,
SGCF : sables et graviers sous l'influence des courants de fond,
SGBC : sables et graviers bien calibrés,
DC : sédiments du "détritique côtier",
DCC : sédiments du détritique côtier concrétionné,
ECE : sédiments du détritique côtier envasé,
VTC : vases terrigènes côtières.

MOTS DESCRIPTEURS :

herbier, Posidonies, sédiments, biodétritique, littoral, Provence, hydrodynamique, apports terrigènes, pollution, aménagements.

- PREFACE -

Les études réalisées ont montré, depuis plusieurs décennies, l'importance des herbiers littoraux et notamment des "prairies à Posidonies" sur les équilibres sédimentaires et biologiques. Or, la zone supérieure de la marge continentale est l'objet d'une altération inquiétante liée d'une part aux phénomènes normaux (et parfois cycliques) de l'érosion sous-marine, et, d'autre part, aux multiples interventions humaines.

La régression assez continue et souvent rapide des herbiers à Posidonies, - malgré des régénérations locales non négligeables -, a motivé ces recherches commanditées par le Centre National pour l'Exploitation des Océans (base océanologique de Méditerranée). Ce travail, réalisé en deux années et demi, a cependant bénéficié de travaux antérieurs effectués par notre groupe de recherche depuis 1955. En fait, la protection des herbiers du littoral méditerranéen français est devenue un objectif prioritaire dont l'importance n'échappe aujourd'hui à personne.

Les auteurs ont l'agréable devoir de remercier ici les personnes efficaces et dévouées sans lesquelles ce mémoire n'aurait jamais vu le jour :

- Monsieur le Professeur J.M. Pèrès, Membre de l'Institut et Directeur de notre Centre d'Océanologie.
- Monsieur J. Picard, Directeur de recherches au C.N.R.S.,
- Monsieur Chomel de Varagnes, C.N.E.X.O., Directeur de la base Océanologique de Méditerranée,
- Monsieur Lardeau, du C.N.E.X.O., a été l'organisateur tenace et dévoué de ces études. Aujourd'hui, les recherches effectuées sur ce thème des herbiers, qui lui tenait particulièrement à coeur, lui doivent beaucoup.
- Madame L.Blanc-Vernet, Maître de recherche au C.N.R.S.,
- Messieurs P.Clairefond et Orsolini, docteurs de 3ème Cycle,
- Mesdames Acquaviva, Froget, Martin et Tiercelin, pour la partie technique et la gestion,

- Les équipages des chalutiers du Centre d'Océanologie d'Endoume et les plongeurs ou accompagnateurs bénévoles.

Nos recherches ont enfin bénéficié des résultats, discussions ou de l'aide directe de personnes ou d'organismes, parmi lesquels il nous plaît de citer :

- les commandants Monguilan et Taillez,
- Messieurs F. Blanc, H. Chamley, C. Froget, M. Bourcier,
- le B.R.G.M. (section Provence-Corse) et son directeur Régional : Monsieur J. Collin,
- le personnel de l'Institut Géographique National et de l'Observatoire de la Mer " aux Embiez,
- le service de la Météorologie Nationale à Toulon (Monsieur L. Blanc), COMEX-DATA à Marseille, Marine Nationale (base de l'île du Levant: Messieurs Boudigues et Rose), la direction du Parc National de l'île de Port-Cros (Monsieur Ravetta), etc...

Fig.1

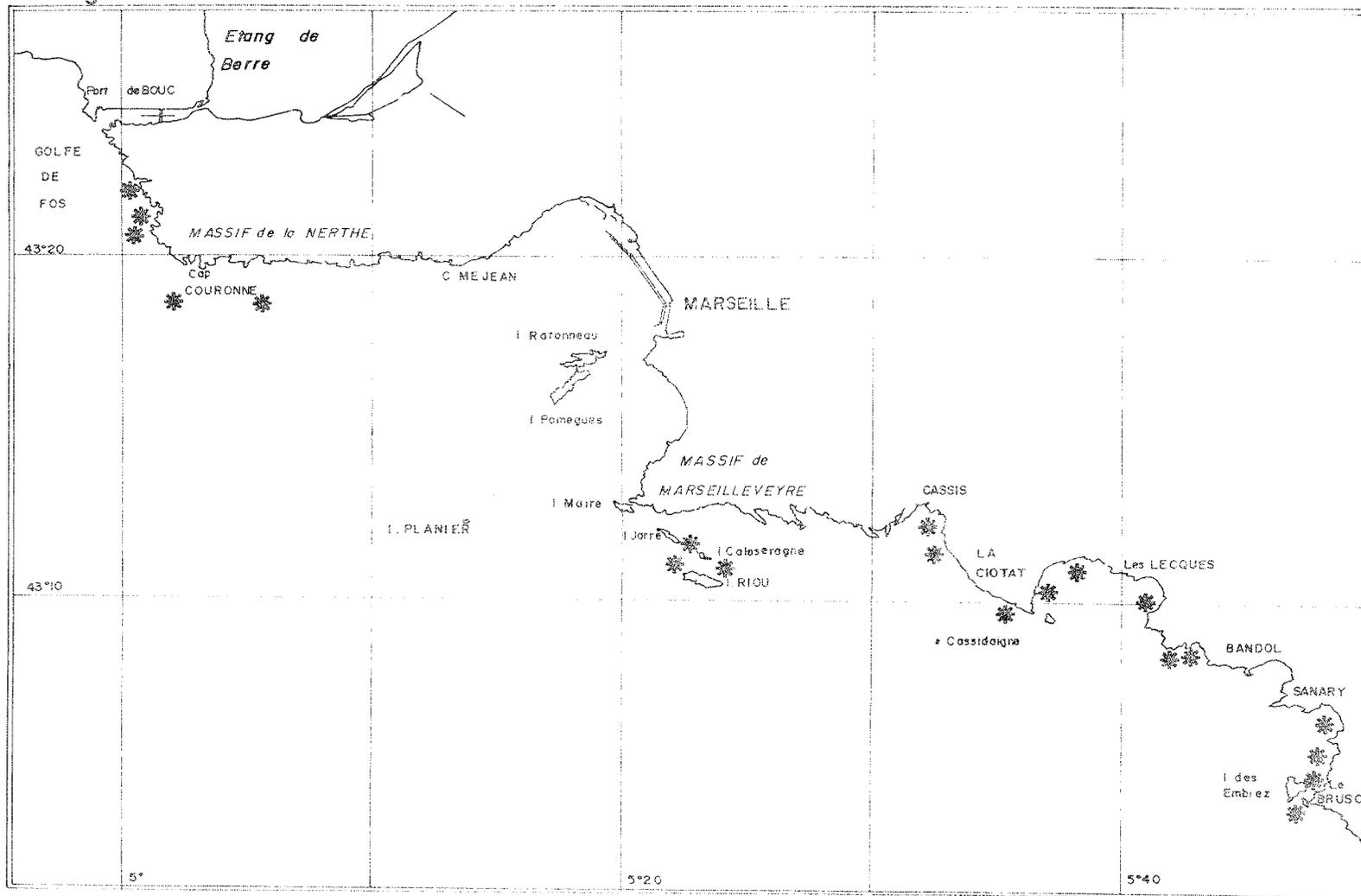
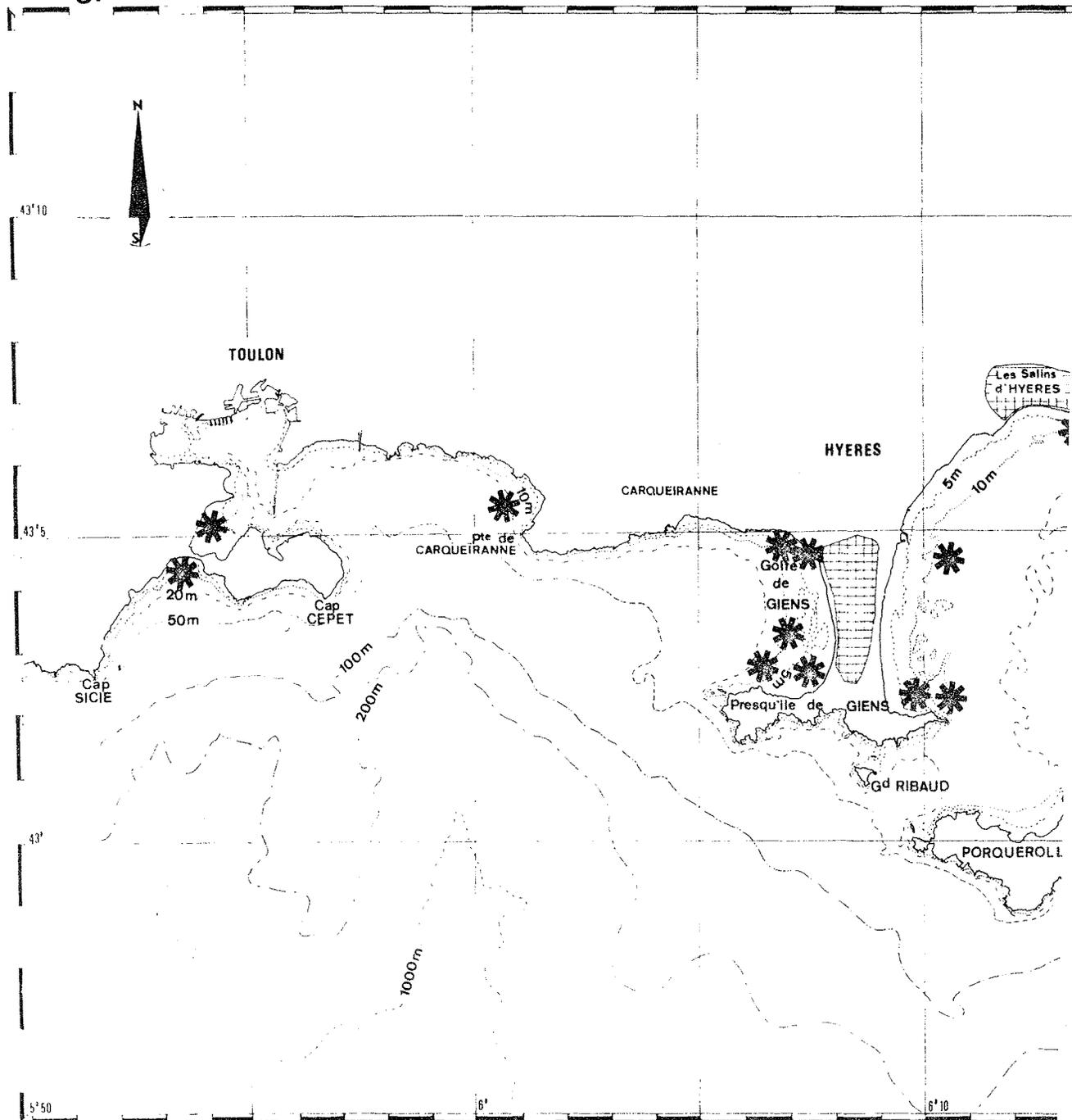
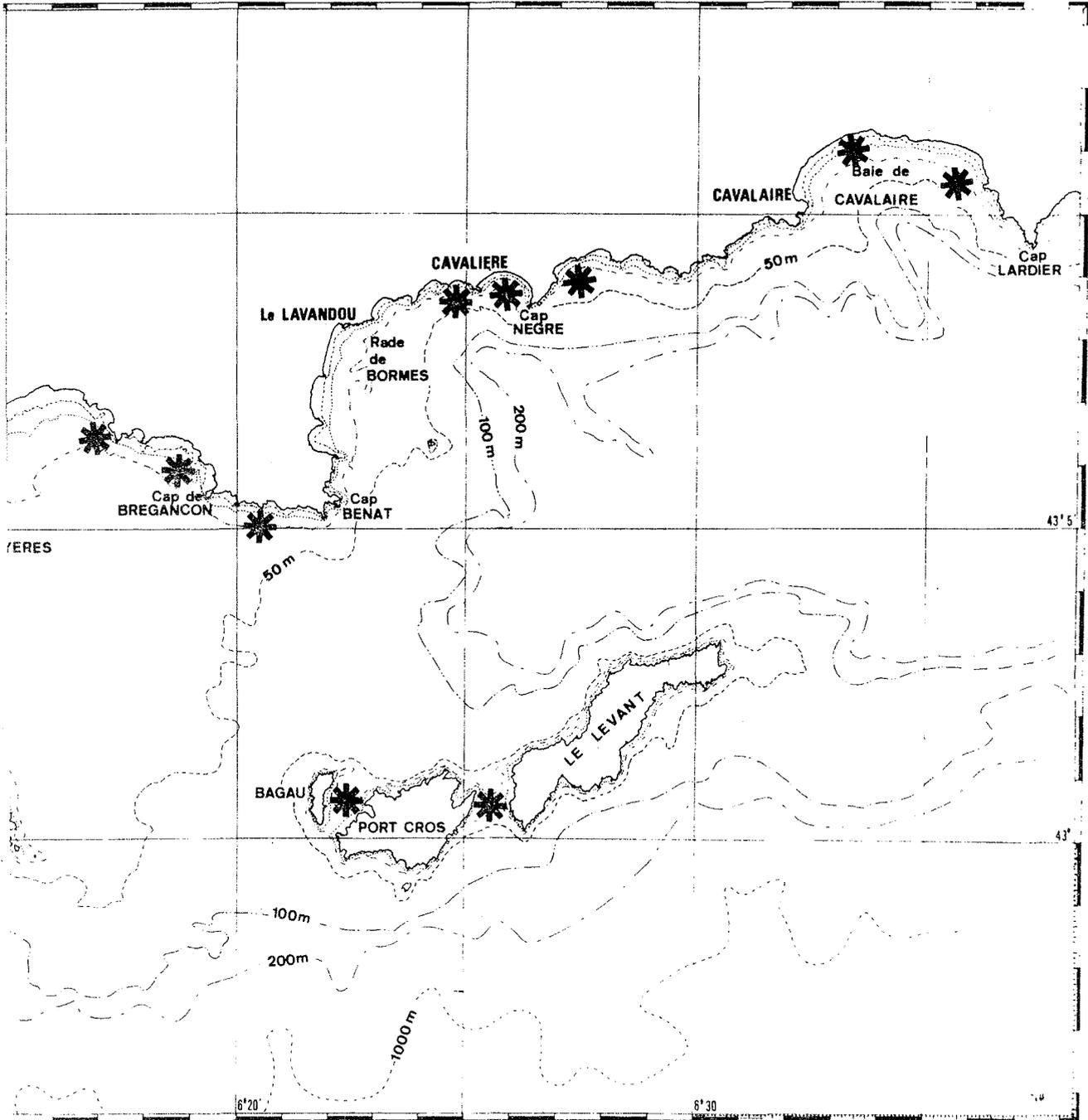


Fig.1 bis





I - LES HERBIERS A POSIDONIES

A - INTRODUCTION.

L'importance des herbiers vis à vis des phénomènes sédimentaires sous-marins est remarquée depuis le Jurassique et le Crétacé (Termier, 1951-1952 ; Arnaud-Vanneau, 1975). L'espèce *Posidonia oceanica* (L) Delile est connue avec certitude depuis l'Eocène, mais il est possible que son apparition remonte au Crétacé supérieur (Den Hartog, 1976).

Les recherches de Molinier et Picard (1952 - 1954), Blanc (1959 - 1974), Blanc-Vernet (1969), ont établi, sur la marge continentale, le rôle essentiel des Posidonies dans la rétention des sédiments et l'évolution du littoral. En fait, la zone maritime superficielle frangeant les rivages méditerranéens (infralittoral) demeure sous la dépendance étroite de l'état d'équilibre des herbiers à Posidonies en ce qui concerne le développement des fonds de pêches et la sécurité des grèves.

Cet état d'équilibre demeure généralement fragile. Il se trouve continuellement altéré par les actions hydrodynamiques et les phénomènes naturels d'hypersédimentation (colmatages), les décharges détritiques, les rejets d'effluents et pollutions liés aux aménagements.

Les biocoenoses des prairies sous-marines à frondes de *Posidonia oceanica*, comportent des peuplements photophiles, et en sous-strate, des peuplements sciaphiles à tendance pré-coralligène. Les Algues photophiles infralittorales sont *Padina pavonia*, *Halopteris scoparia*, *Laurencia obtusa*.

Les *Posidonia oceanica* sont des espèces endémiques méditerranéennes (et australiennes), présentant à chaque automne la chute de leurs frondes qui s'accumulent au rivage ou dans les chenaux d'érosion et "marmites" de l'herbier. Les fibres rouies de Posidonies, très riches en cellulose, s'agglomèrent en galets sub-sphériques nommés "aegagropiles".

Les Posidonies se développent sur le fond par bouturage, marcottage, amenant une extension verticale et latérale des souches. Lors des étés particulièrement chauds (1973 - 1974), on observe une floraison et une fructification des Posidonies avec formation d' "olives de mer". Il s'ensuit alors une régénération naturelle efficace des herbiers pouvant quelquefois compenser des altérations accidentelles. Cette dernière, jointe au bouturage naturel des souches, peut amener une extension des prairies et, fait important, la fixation des fonds et du sédiment.

Le sédiment des herbiers à Posidonies (HP) est essentiellement ou partiellement biodétritique. La phase terrigène qu'il comporte est sableuse ou lutitique.

Sa composante biogène est alimentée par les peuplements épiphytes et accompagnateurs de l'herbier. La croissance verticale des herbiers s'accompagne d'une rétention du sédiment formant des banquettes surrélevant le fond et nommées : "mattes". La hauteur maximum des mattes peut atteindre 8 m ; les puissances moyennes oscillent entre 3 à 4 m ou 1 à 2 m selon les sites et les taux de sédimentation terrigènes et biogènes. Dans les sédiments, de nombreux pélecypodes et gastéropodes sont rencontrés, notamment des opisthobranches. On y note également des Bryozoaires et Foraminifères épibiotes. (Pérès et Picard, 1956 - 1958 ; Picard, 1965 ; Molinier et Picard, 1952 ; Blanc-Vernet, 1959 ; Blanc, 1976).

B - UNE EVOLUTION SEDIMENTAIRE COMPLEXE.

Les herbiers à Posidonies se développent à faible profondeur, en milieu infralittoral, dans la zone photophile, de la surface à 40 m (maximum général).

On les trouve au pied des talus détritiques littoraux, au fond des baies ou sur des hauts fonds, parfois au large (Planier, Le Veyron, La Cana, Péloponnèse, Cyclades).

Le développement des mattes, latéralement et verticalement, aboutit au colmatage des pieds de talus détritiques (Cassis, Cap Canaille, Bandol, Cythère, Cap Littinos), des criques et des fonds de baies (Port Cros, le Brusco). La croissance rapide des mattes est confirmée par la découverte d'amphores et d'épaves antiques enfouies. Cependant, les taux de sédimentation ne présentent aucune régularité et varient d'un site à l'autre de 1 m par siècle à la passe de Port Cros (Molinier et Picard, 1954), à 4 m depuis l'époque romaine, à La Londe, voire 1,5 m depuis le 1er siècle avant Jésus-Christ à l'épave antique de Giens.

En Méditerranée, le "volant" de matériaux réalisé par l'ensemble des mattes peut s'avérer important. Dans la mesure où se manifeste une relative stabilité eustatique, il va conditionner une partie de la sédimentation "néritique" infralittorale et même circalittorale (Blanc, 1974). Toute érosion anormale ou *emprunt massif de sédiments* se traduira par une rupture d'équilibre de l'environnement sédimentaire et biologique. Ainsi, la protection de ces types de fonds est une nécessité pour le maintien de l'équilibre littoral (Blanc, 1975).

L'évolution sédimentaire des herbiers à Posidonies de la Méditerranée comporte deux phases :

1 - Accrétion : La croissance verticale de l'herbier amène un colmatage par exhaussement des mattes. De ce fait, pour un site donné, la profondeur diminue

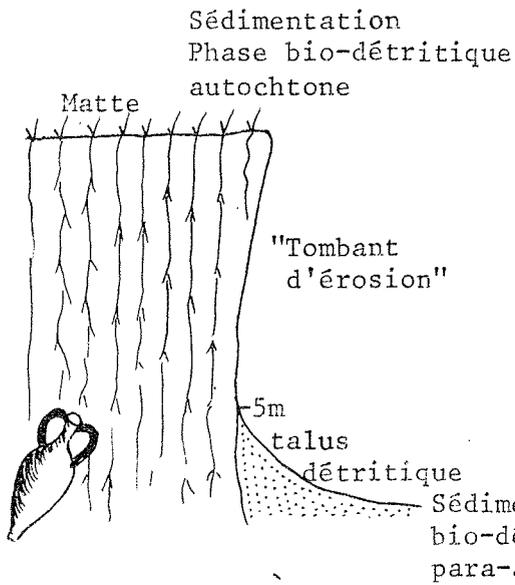


Fig. 2 : HERBIER À POSIDONIES

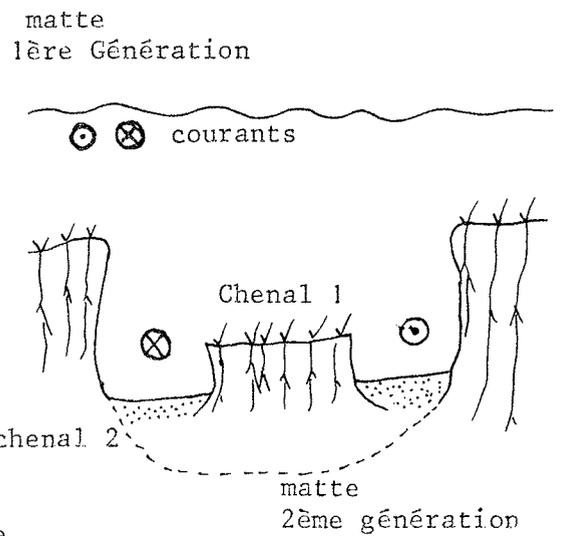


Fig .4 - MATTES EMBOÎTÉES

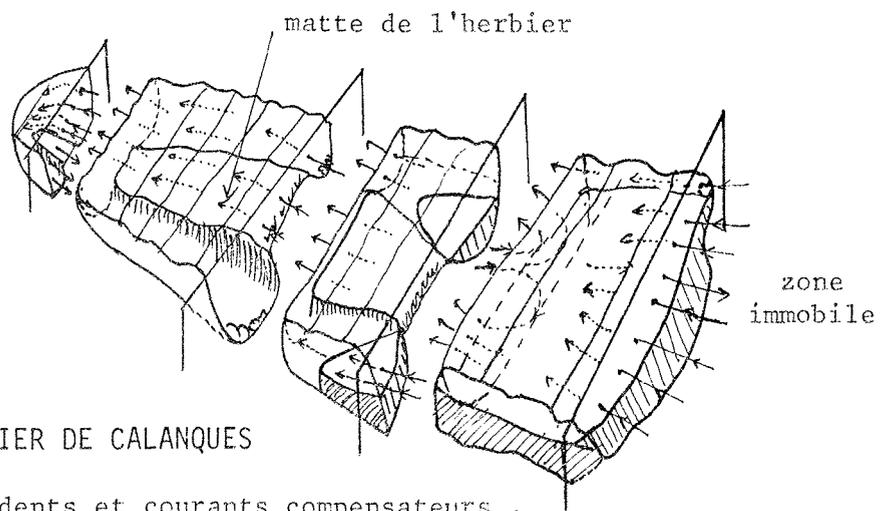


Fig .3 - HERBIER DE CALANQUES

Courants incidents et courants compensateurs .

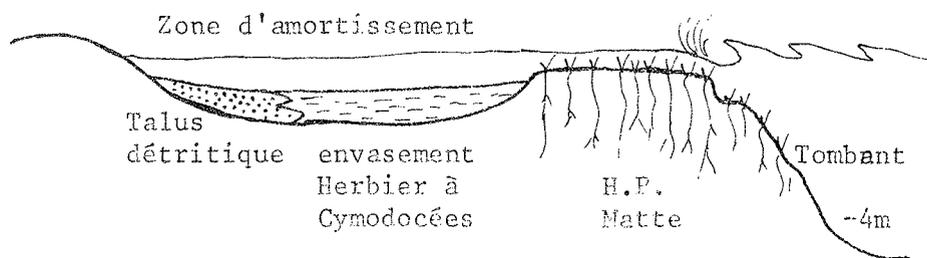


Fig . 5 - HERBIER de MODE ABRITE : PORT-CROS.

jusqu'à un niveau critique où l'action des vagues (zone H_1) et des courants de décharge (zone H_2) arrive à se manifester.

Il est difficile, en l'état actuel, de préciser le taux *réel* de la sédimentation des fonds de l'herbier à Posidonies car plusieurs cycles "courts", érosion-sédimentation, peuvent ainsi se dérouler depuis l'époque antique. La présence d'épaves et amphores insérées dans les mattes, correspondant à un seul cycle apparent, ne peut aider à exprimer le temps réel de la sédimentation.

2 - Erosion : Le développement de l'herbier aux niveaux critiques des zones H_1 et H_2 amène l'érosion et le creusement des mattes par des fronts nommés "tombants". Des "couloirs" et chenaux drainent les courants de décharge, vers le large, jusqu'au niveau de la profondeur d'amortissement. Ces phénomènes ont été observés jusqu'à 12 et 15 m de profondeur ; des recherches récentes (Laborel, Jeudy de Grissac et Blanc, 1976) font état de chenaux et surtout d'épandages détritiques plus profonds pouvant dépasser - 25 m, c'est-à-dire aux limites inférieures de la zone hydrodynamique H_2 .

En deçà, les conditions de calme relatif, en milieu photophile, peuvent amener la formation d'une nouvelle "génération" d'herbier, relativement protégée, qui, ultérieurement aura tendance à s'élever à nouveau (fig. 1 et 2).

On aboutit ainsi à une série de cycles à "courtes" périodes (quelques siècles par ex.), laissant subsister des chenaux avec des témoins de mattes "emboîtés" (Blanc, 1959 - 1974). Les observations réalisées depuis deux décennies en plusieurs points du littoral provençal me conduisent maintenant à envisager, pour la séquence des HP, des "petits cycles" encore plus brefs de l'ordre de quelques années et décennies.

Dans les Calanques et les baies encaissées, l'afflux incident des eaux, lié aux vents dominants, est compensé sur le fond par un courant de décharge temporaire jalonnant par ex. les axes de calanques. Ce courant érode le fond et creuse un "chenal inter-matte" longitudinal dans l'HP. Le courant peut ensuite s'étaler à la surface et donner une dérive *sortant* de la calanque malgré les vagues et le vent portant vers la terre (fig. 3). Au cours du temps, l'érosion longitudinale de l'herbier peut progresser et la position relative du front d'érosion ("tombant") peut indiquer le degré d'évolution du secteur.

La succession des cycles plus ou moins longs (accrétion-érosion) amène la formation de "mattes emboîtées" à la façon de terrasses fluviatiles (fig. 4). Au fond des chenaux creusés dans les mattes, on observe un sédiment lessivé (graviers, sables grossiers, granules), à courbes granulométriques linéaires ou logarithmiques (1)

(1) Nous utiliserons dans ce travail la terminologie définie par les études granulométriques détaillées effectuées par Weydert (1973 - 1975).

Ce sédiment *mobile* présente des figures telles que ripple-marks, méga-ripples, voire antidunes (dunes "régressives") conformément aux définitions exposées par Reineck et Singh (1973).

C - DEPLACEMENTS DE SEDIMENTS.

Le sédiment des mattes détruites est l'objet de deux types de mouvements antagonistes :

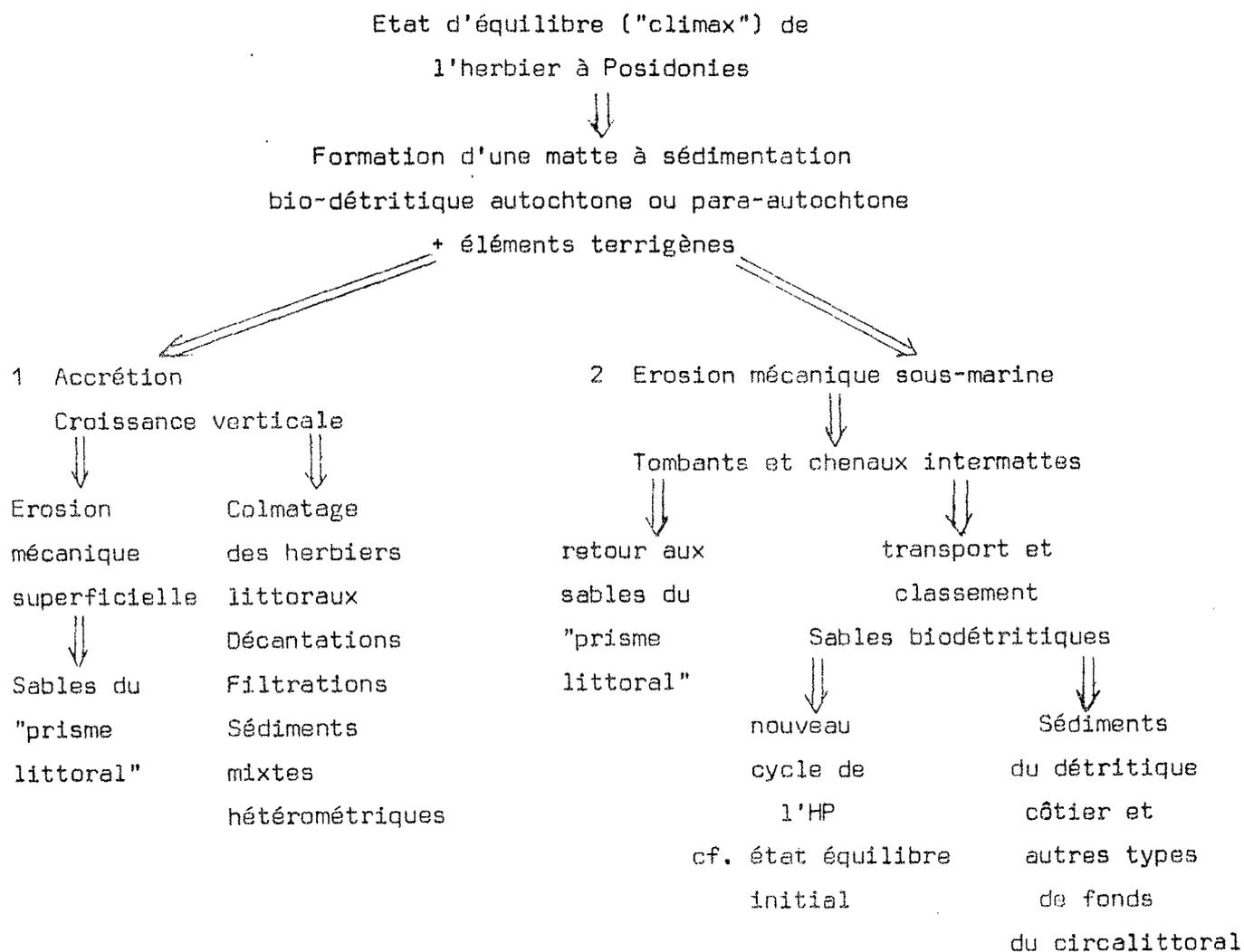
1 - retour partiel au rivage, vers la zone de balancement du "prisme littoral" (H_1), enrichissant le sable des plages et des criques en débris biogènes. Cela est en outre confirmé par la trajectoire de petits galets marqués et l'examen de certaines thanatocoenoses de Foraminifères (Blanc-Vernet, 1969 et 1976).

2 - éloignement vers le large, à partir d'une profondeur de quelques mètres, sous l'action de courants de décharge, alimentant alors la ceinture des sables du *détritique côtier* qui longe les rivages à plus ou moins grande distance (Picard, 1965 ; Blanc, 1968 ; Poizat, 1968).

Picard et Molinier (1952) ont montré qu'au cours de la phase de colmatage, l'herbier à Posidonies peut arriver à l'émersion au fond de certaines baies (Port-Cros, Le Brusco, Corse, Sicile). Entre le rivage et l'écran constitué par les feuilles de Posidonies s'établit une zone calme où les vagues sont amorties (fig. 5). Dans cette "lagune" très peu profonde se déposent rapidement des éléments fins, triés par le "filtre" de l'HP émergeant et où se développe une "pelouse" à *Cymodocea*, *Ruppia*, accompagnée d'une riche microfaune à *Sorites* et *Peneroplis* (Blanc-Vernet, 1969).

Dans ces zones abritées par le front émergeant des Posidonies, on observe une sédimentation hétérométrique, souvent réduite, où une fraction bioclastique importante est mêlée à une matrice détritique décantée, de nature sablo-pélimitique (Port Cros, Giens, golfe de Volo). Dans ce type de "piège", souvent surchauffé et très peu profond (quelques décimètres à 1,5 m), se forment de la pyrite, et de l'hydrotroïlite. La teneur en eau peut être très élevée dans le sédiment qui pourra comporter plus de 25 % de pélites (diamètre inférieur à 50 microns).

L'évolution sédimentaire des herbiers à Posidonies de la côte méditerranéenne tend donc vers un colmatage et peut être résumée comme suit :



II - ANALYSE DES AIRES SEDIMENTAIRES

DE L'HERBIER A POSIDONIES

II - 1 - LES TYPES D'HERBIERS DU LITTORAL MEDITERRANEEN FRANCAIS.

II - 1 - 1 - MODES SEDIMENTAIRES SUR LA MARGE CONTINENTALE.

La répartition des herbiers infralittoraux et leurs relations avec les autres types de fonds présentent trois dispositions essentielles :

1 - Mode régulier.

L'HP se dispose parallèlement au rivage sous la forme d'une zone régulière insérée entre le "prisme littoral" (PL) et les types de fonds du circalittoral (fig. 6), tels que le détritique côtier (DC) ou le coralligène (C).

Parfois, l'herbier se rapproche du rivage, notamment pour le cas de littoraux rocheux accores, adoptant une disposition frangeante. La limite inférieure se situe de - 27 à - 32 m, voire - 40 m en certains cas.

Le mode régulier implique généralement un *état d'équilibre naturel*, proche du "climax", avec possibilités notables d'extensions, dans les limites du domaine photophile.

Deux cas peuvent être distingués :

a) Littoraux rocheux accores.

(ex : côte des Calanques, Port d'Alon, massif de la Nerthe, certaines zones de la côte des Maures, Corse, Crête).

L'érosion marine actuelle est faible, mais les éboulis et les actions mécaniques locales, parfois anciennes, y sont spectaculaires (chutes de blocs au Quaternaire, notamment au Dryas et au Boréal). Il en résulte une alimentation directe en éléments terrigènes (blocs, galets, granules et sables grossiers).

L'équilibre est fréquemment réalisé et, à l'exception des pollutions par les émissaires (massif des Calanques), ces herbiers de zones rocheuses s'avèrent robustes. Deux résultats ont été dégagés :

1) Les teneurs en éléments détritiques terrigènes tendent à diminuer en fonction du temps écoulé et de la profondeur, sauf au voisinage

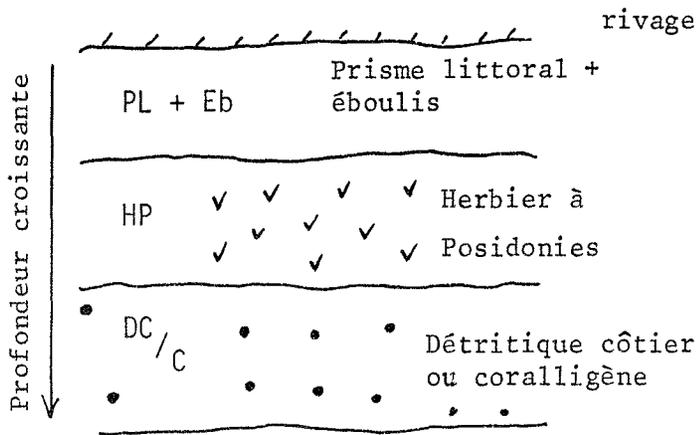


Fig. 6 - MODE REGULIER

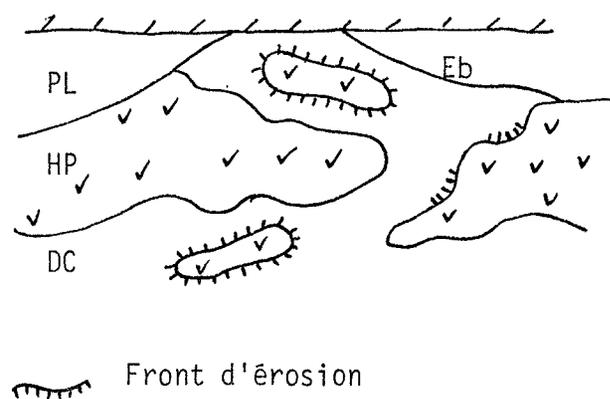


Fig. 7 - MODE IMBRIQUE

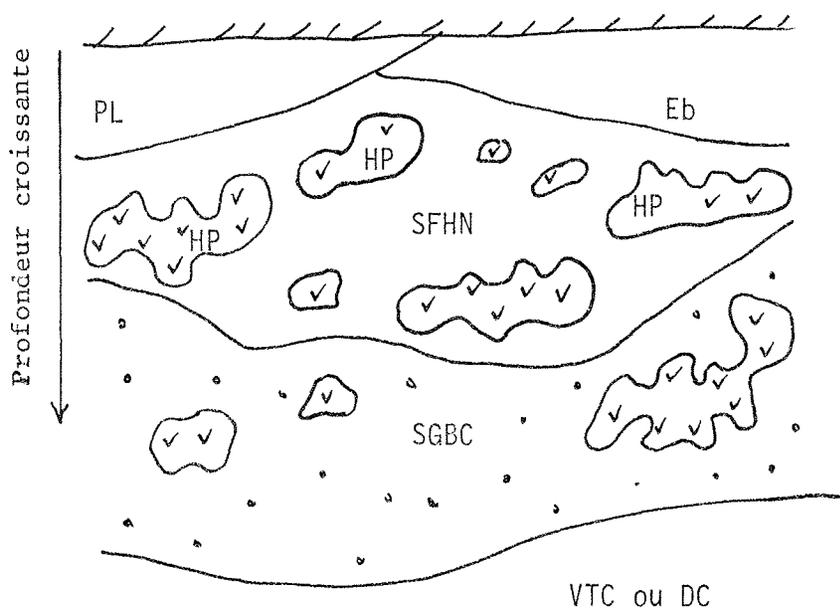


Fig. 8 - MODE DISPERSE

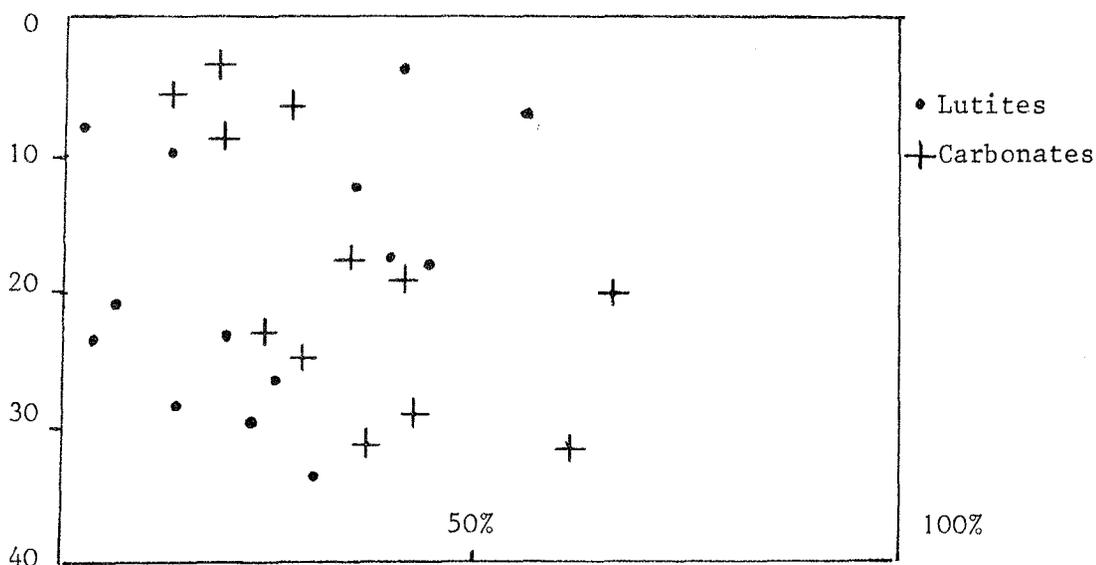


Fig. 9 - HERBIER GIENS-HYERES : Variations de la profondeur/envasement et teneurs en CO₃Ca

du débouché des rivières et torrents.

2) Les pourcentages en éléments biodétritiques s'accroissent au contraire en fonction du temps écoulé et de la profondeur.

Les taux de sédimentation précisés très localement par quelques découvertes archéologiques, compte tenu des réserves précédemment exprimées, sont souvent assez variables et élevés (0,2 à 1 m / 100 A). La sédimentation est *discontinue*.

b) Littoraux sableux.

La composante terrigène est élevée et persiste avec le temps.

Il n'y a pas (ou peu) d'érosion dès la partie inférieure de la zone d'action des vagues "moyennes" (zone H₁). Quant au domaine d'activité hydrodynamique des courants de décharge (zone H₂), il montre un état d'équilibre, et même une progression de l'HP.

L'exhaussement des mattes peut amener la formation d'un *herbier frangeant*, voire *émergeant*. Mais ce dernier demeure assez éloigné du littoral et détermine une zone "*inshore*", entre le rivage et la ligne du déferlement ("*break zone*").

c) Remarques.

1) Possibilités, pour les 2 cas précités, de régénération après une phase d'érosion ou d'altération locale de *courte durée*.

2) Ensemble résistant protégeant le littoral (Maures occidentales).

3) Frayères et fonds de pêches occupant parfois de grandes superficies.

+ CONTRAINTES.

Interdiction de chalutages, décharges et d'exploitations de sables et agrégats. Limitation des mouillages et installation d'émissaires à prohiber.

2 - Mode imbriqué.

Les dispositions respectives du prisme littoral (PL), éboulis (Eb), HP et détritique côtier, voire coralligène d'horizon inférieur de la roche littorale, ne sont plus parallèles entre elles et par rapport au rivage, mais *obliques*, imbriquées, avec des variations latérales importantes (fig. 7).

Les *causes* de ces irrégularités et imbrications sont :

- l'importance des déferlements,
- les courants de fond,
- des altérations diverses telles que les décharges détritiques en provenance de la côte (PL, éboulis, torrents) et les pollutions. Tel est le cas des HP détruits de l'Estaque, et en voie de destruction au Cap Ragnon, au N de la baie de Marseille.

La dissection des mattes se traduit par des tombants, chenaux, "marmites" et îlots vestigiaux de l'HP. Cela implique une *rupture d'équilibre* amorçant une dégradation plus ou moins rapide. L'état frangeant protégeant le littoral fait place à des séquences latérales incomplètes avec "biseautage" et disparition de la "prairie" à Posidonies. Un tel cas s'observe dans les passes et détroits : Port-Cros, Riou, Cyclades.

L'érosion active des fonds montre un double processus :

1) Perpendiculaire au littoral : au voisinage des chenaux inter-mattes, les vagues, déferlements et courants de décharge se manifestent pour la zone H_1 et la partie supérieure de la zone H_2 . L'attaque s'effectue du rivage vers le large. Quant aux courants de décharge, ils se manifestent encore en dessous du domaine d'action des vagues moyennes ($T \neq 4,5$ sec), dans la zone H_2 , donc en deçà de - 7, - 10 m, jusqu'à - 15 m et même - 25 m.

2) Parallèle au littoral : cela concerne principalement la zone H_2 . Il s'agit de tombants et chenaux longitudinaux parallèles à la direction des écoulements permanents ou intermittents, au niveau du fond et déviant même les courants de décharge.

Le *résultat* est un réseau quadrangulaire de chenaux, mattes isolées en "buttes témoins" sous-marines (baies de Giens, Hyères). Des fronts d'érosion, pour un même ensemble d'herbier, sont opposés, tournés vers le rivage et vers le large. Au Brusset à Santorin, on observe des concentrations de vagues sur de grandes mattes isolées (convergence des orthogonales). Ces dernières fonctionnent comme des obstacles sous-marins amenant une protection naturelle efficace mais temporaire du littoral.

+ CONTRAINTE.

La croissance des HP est ici irrégulière, souvent entravée. L'observation montre cependant que des possibilités de régénérations locales demeurent.

Ici, l'herbier est fragile, en état de recul intermittent ou continu. Les altérations telles qu'extractions et pollutions accélèrent le

processus d'érosion naturel, tandis que se réduit la protection des rivages, notamment les plages et les zones basses sableuses.

3 - Mode dispersé.

Les herbiers y sont disséqués et montrent une répartition *dispersée*, en "tache de léopard" sur les fonds sableux (sables fins des hauts niveaux : SFHN) (fig. 8). En fait, la superficie de l'HP diminue considérablement et il demeure un herbier vestigial en voie de disparition.

L'état de ce déséquilibre est accentué :

- par une dégradation des fonds due à l'érosion mécanique,
- par un étouffement lié à une hypersédimentation fine.

On note la présence de lobes détritiques sous-marins et de petits talus de progradation, larges ou étroits :

- larges : éventails de SFHN : la Nartelle (Maures Est), Bon-Porté (Maures Ouest), Giens.

- étroits : sables et graviers des "bouchons de Calanques" (Picard, 1965), ouvertures de baies, passes de l'archipel de Riou, (Blanc, 1974 - 1975), sables et graviers de Port Cros et du Levant.

La surface d'herbier perdue au cours du temps ne peut être compensée par une régénération naturelle, et l'on évolue vers un état irréversible.

Les *taux de sédimentation* sont variables :

- parfois élevés, du fait des envasements (baie des Canebiers, golfe de Saint Tropez),
- par ailleurs, faibles ou nuls : cas de l'érosion des vagues obliques (zone septentrionale du golfe de Saint Tropez, à l'Ouest de Sainte Maxime), dispersion et dissection de l'herbier se continuant en zone H₂ (baie de Sanary). On observe encore l'empiètement "transgressif" des vases terrigènes côtières (VTC), ennoyant les herbiers (golfs de Fréjus et Saint Tropez, côte de l'Esterel). La "*mud line*" se rapproche du rivage au cours du temps ; elle peut ainsi passer de - 30 à - 12 m.

+ CONTRAINTES.

Mêmes interdictions que pour les cas précédents. Il demeure difficile de prévoir à l'avance le résultat d'actions visant à protéger les sites. La dégradation définitive de l'HP aboutit à un changement complet des faciès sédimentaires (DC ou VTC). Tel est le cas des herbiers à Posidonies du golfe de Fos, entièrement détruits. Par ailleurs, l'envasement inéluctable et rapide de certains secteurs accélère le processus de disparition (golfe Nord

de Marseille, zone SE de Fos, Saint Tropez, Fréjus).

II - 1 - 2 - CLASSIFICATION DES HERBIERS.

On distingue, au point de vue géologique, plusieurs types d'herbiers, en milieu actuel :

- herbiers des aires à hypersédimentation,
- herbiers de sites abrités,
- herbiers de sites exposés,
- herbiers des passes et détroits,
- herbiers profonds.

1 - Herbiers des aires à hypersédimentation.

Ce sont des herbiers et pelouses plus ou moins denses, à Zostères, occupant fréquemment de grandes étendues caractérisées par :

- de très faibles pentes,
- taux d'envasement ou d'ensablement très rapides.

Parmi les exemples spectaculaires de ces types, on citera : herbiers au Sud du golfe de Fos, à Zostéracées (anse de Carreau), fond du golfe de Gabès, en Corse, les golfes de Santa Manza, Porto Vecchio et Tizzano, golfes de Venise, Caorle, Chioggia, etc ...

+ Les caractères hydrodynamiques sont les suivants :

- sites généralement très abrités, absence de houles notables et de vagues, déferlantes. Seuls s'y observent des dépôts locaux à très courte période,
- la faible, ou très faible profondeur (souvent moins d'un mètre), combinée à une pente réduite, met en évidence l'amplitude de la marée. Au fond des golfes, cette dernière est amplifiée par les phénomènes de résonance et on peut y discerner parfois une zone intertidale (étage médiolittoral).

Les variations barométriques et la présence de seiches s'ajoutent à cet effet de marée amplifiée et les dénivellations peuvent atteindre 2 m (Golfe de Gabès), 1,20 m (Nord de l'Adriatique), 0,80 m (Rovin, en Istrie) et 0,45 m (Golfe de Fos).

- courants de marées et de seiches (0,05 à 0,4 m / sec à Fos), courants de dérive (0,10 m / sec) très variables.

- émergences temporaires, eaux très réchauffées (24 ° à 27 °), dégagements gazeux, milieu sédimentaire réducteur.

- accumulations sableuses périodiques, liées aux nodaes des seiches.

+ Le sédiment se dépose à très faible profondeur, de quelques mètres au maximum, à moins d'un mètre.

Ce sont des vases sableuses, des graviers vaseux à matrice lutitique, s'intégrant aux faciès des sables vaseux de mode calme (SVMC) définis par Picard (1965). Les teneurs en lutites y sont élevées (5 % à 40 %) et la nature des phyllites rencontrées reflète l'origine de l'alimentation terrigène majeure (cas du Rhône et du Pô par ex.).

Le taux de sédimentation est très rapide et les colmatages des fonds de baies assez spectaculaires : des bancs sablo-vaseux émergent et l'isobathe - 1 m se trouve reportée assez loin vers le large. On peut tabler, en certains cas, sur des valeurs de 0,10 m / 10 A.

Ces herbiers de zones colmatées, très riches en faune et microfaune sessiles ou vagiles, sont particulièrement vulnérables (rejets, pollutions, mouillages).

2 - Herbiers de sites abrités.

Malgré certaines ressemblances avec le type précédent, ils en diffèrent par un taux de sédimentation beaucoup plus réduit et un renouvellement des eaux mieux réalisé, à des profondeurs souvent plus élevées, de quelques mètres à l'émersion.

Des exemples de ces types ont été naguère étudiés par Picard et Molinier (1952), notamment à Port-Cros, au Sud du Brusç et à Bandol (1). On retrouve ces dispositions dans certaines calanques abritées, telles que Port-Miou, au Brégançon Sud, Golfe de Saint Tropez et notamment, la baie des Canebiers, etc ...

Le site est abrité des vagues et grosses houles. Les déplacements s'exercent sur les mattes "off shore", déterminant un "tombant" orienté vers le large, affouillé par les turbulences.

En arrière, c'est-à-dire vers le rivage, en deçà de la ligne de déferlement, la matte "in shore" demeure abritée. Une "lagune" à colmatage rapide, décrite à Port Cros par Molinier et Picard (1952), montre l'émersion du front de l'HP et le développement, entre ce front et le littoral, d'une "pelouse" à Cymodocées plus ou moins envasée. Ainsi, le front temporairement émergé de l'HP délimite deux domaines différents :

(1) Aujourd'hui, l'herbier de Bandol a été entièrement détruit.

1) Herbier "off shore" : "tombants", tourbillons, renouvellement de l'eau, déferlement des vagues et houles. Le sédiment, riche en peuplements benthiques infralittoraux, est un sable grossier à moyen, lessivé, à composante bioclastique dominante, riche en Miliolidae, Elphididae et Peneroplidae (Blanc-Vernet, 1969). En ce milieu relativement agité s'exercent l'action des vagues et des transferts des masses d'eaux.

2) Herbier "in shore" : milieu abrité situé en arrière du déferlement lié aux mattes frontales. Il en résulte un colmatage rapide, l'émersion des frondes de Posidonies ("récif barrière" de Molinier et Picard) et l'établissement de la "pelouse" à Cymodocées. Le sédiment est un sable vaseux réduit, hétérométrique, parfois pyriteux, riche en Miliolidae, *Sorites*, *Peneroplis*.

Cette "lagune" abritée des vagues est l'objet de dérives locales. La faible tranche d'eau (0,50 m à moins) est l'objet d'oscillations liées à la marée et aux seiches, avec établissement d'une frange intertidale à peuplements médiolittoraux. L'aspect évoque certaines analogies avec les herbiers et sédiments des lagons ou chenaux d'arrière récifs (Mondon, 1976 ; Weydert, 1973).

Ces herbiers sont également très vulnérables de par leur situation (aires touristiques : Parc Nat. de Port Cros, aires portuaires en voie d'extension : Bandol, Le Brusq). Les taux de sédimentation sont très variables mais généralement assez rapides : 0,50 m / 30 A au Brusq Sud ; 0,10 m / 10 A à Port Cros.

3) Herbiers de sites exposés.

Ils correspondent à un ensemble très répandu, complexe, englobant tout l'étage infralittoral.

+ Les sites manifestent cette variabilité. On distingue :

- pointes rocheuses, zones battues : Giens Ouest, Caps Canaille, Lardier, Devenson, Cap Doro (Eubée),
- roches isolées : roches de Carro, d'Arnette et de l'Aragnon, le Veyron, Ile Verte, Planier et Pierre à la Bague,
- calanques exposées et falaises rocheuses : Couronne, Carro, Iles d'Hyères, Port d'Alon, Koroni (Péloponnèse) Lindos (Rhodes), Dia (Crète Nord), Cap Littinos (Crète Sud),
- affleurements sous-marins : plateau des Chèvres à Marseilleveyre, Karst immergé (Port d'Alon, Istrie, Umag),

- baies ouvertes exposées aux vagues et houles du large :
Marseille Sud (baie du Prado), Giens, Hyères, Cavalaire, etc ...

+ Les actions hydrodynamiques sont actives et variées. De ce fait, l'envasement est généralement plus faible, à nul, malgré quelques exceptions.

J'ai distingué ainsi trois zones à partir du rivage :

1/ Zone H_1 : de la bordure du swash à - 7 m ou - 10 m selon les cas. On y observe les turbulences littorales :

- déferlements ("break zone"),
- "surf" ou vagues de translation ("surf zone"),
- jet de rive ("swah zone") et "flot de fond",

La forte action des *vagues* est accompagnée par deux manifestations :

1 - Transferts littoraux ("long shore currents"), généralement parallèles au rivage,

2 - Courants compensateurs de décharge, courants sagittaux, suivant généralement la plus grande pente des fonds.

2/ Zone H_2 : de - 10 m environ, à - 25 m en moyenne, avec des écarts oscillant entre - 15 m et - 32 m.

C'est la zone où l'action des vagues s'atténue en "régime moyen" (T inférieure ou égale à 4,5 sec), mais où se manifestent les courants de décharge. Ces derniers s'amortissent rapidement jusqu'à une *profondeur limite* (limite inférieure de la zone H_2), égale à la demi longueur d'onde des tempêtes moyennes annuelles (Blanc, 1974).

Les courants de décharge et les lobes détritiques qu'ils déterminent se manifestent le plus souvent suivant des axes perpendiculaires aux rivages. En zone plus profonde, ils s'infléchissent latéralement et se trouvent déviés par l'action d'un courant géostrophique permanent.

Par tempêtes moyennes ($T = 6$ ou 7 sec), les courants orbitaires de la houle sont nettement actifs au niveau du fond.

3/ Zone H_3 : de - 25 m en moyenne à l'ensemble du précontinent (- 160 à - 180 m).

Nous abordons un domaine plus profond où les mouvements sont plus atténués mais demeurent parfois importants. Ces mouvements y revêtent un caractère permanent ou occasionnel :

- permanent : courants (et contre courants) géostrophiques, courants de marées (détroits de Sicile et des Cyclades).

- occasionnel : courants de gradient, ondes de tempêtes et action sur le fond des vagues par très gros temps (tempêtes violentes, exceptionnelles en Méditerranée, où $T = 8$ à 10 sec).

+ Les herbiers considérés (type 3), sont soumis à *toutes* les influences des zones H_1 et H_2 . Les érosions sous-marines y sont donc prédominantes et développent deux réseaux de chenaux perpendiculaires et parallèles au littoral (Giens, Hyères), amenant aux modes imbriqués et dispersés précédemment décrits. Le recouvrement est étendu, mais discontinu.

+ Cela peut expliquer, par ailleurs, la variabilité des taux de sédimentation apportés par l'examen des anciennes sondes et leurs diminutions systématiques, la comparaison des missions aériennes depuis 22 A et les découvertes archéologiques. On note des valeurs oscillant entre $1 \text{ m} / 100 \text{ A}$ à $0,3 \text{ m} / 100 \text{ A}$, voire 3 à $4 \text{ m} / 2.200 \text{ A}$ à La Londe ou $1,5 \text{ m} / 2.200 \text{ A}$ à l'épave de Giens. Mais il nous faut envisager, en ces sites, la possibilité de plusieurs cycles accrétion - érosion et nos évaluations en sont faussées car elles ne concernent que le dernier.

+ Ces herbiers sont essentiellement menacés par l'érosion mécanique affectant les zones H_1 et H_2 . Ce phénomène apparaît inéluctable, mais peut revêtir un déroulement cyclique, comme il a été exposé. D'où la possibilité et l'observation de régénérations naturelles. Il est alors nécessaire d'établir des "bilans sédimentaires" locaux et provisoires.

La protection devra concerner la qualité des eaux et des sédiments en transit ou fixés. L'établissement d'émissaires constitue la menace essentielle. Ainsi, l'égoût de Cortiou, émissaire de Marseille, non épuré, se déverse en zone H_1 . Il en résulte la destruction rapide des HP de la côte des Calanques (travaux de Picard, Bellan et Collab). La pollution par les hydrocarbures est également bien connue, notamment celle des "galets" de mazout observés dans les herbiers de Ponteau, Fréjus, Villefranche et Savona.

4) Herbiers des passes et détroits.

En Méditerranée, les zones peu profondes des passes et détroits relèvent de l'étage infralittoral et comportent ainsi des HP. Ce sont des zones très agitées, de quelques mètres à $- 40 \text{ m}$ selon les cas, exposées aux vagues, courants de dérives, courants géostrophiques, voire courants de marées. Les sédiments y sont oxydés et lessivés.

Ces types ont été observés à Santorin, aux passes des Cyclades (Paros, Naxos), à Rhodes, Riou, Giens, Porquerolles, Bagau, Port Cros, Le Levant.

+ Les actions hydrodynamiques y revêtent deux aspects :

1/ Les houles du large et vagues forcées se concentrent au niveau des passes, là où la profondeur diminue. Il en résulte une accumulation de l'énergie en un volume de plus en plus restreint. La vitesse des courants de dérive et des "vagues forcées" s'accélère au niveau de la passe tandis que diminue la pression hydrostatique par "*effet Venturi*".

Au débouché "*aval*" de la passe, les ondes diffractées et les vagues forcées s'étalent en augmentant de volume ("vagues de décharge"), tandis que se sédimentent les sables et graviers arrachés aux herbiers de la zone sommitale du détroit. Cette conséquence du "paradoxe de Venturi" amène ainsi l'érosion des mattes en chenaux longitudinaux, et la "re-déposition" des sables et graviers par excès de charge, là où la section concernée par le transfert du fluide augmente à nouveau (Cas de la passe entre Bagau et Port-Cros).

2/ Courants géostrophiques permanents et unidirectionnels (ex. passe de Porquerolles, cf "courant général" ligure, orienté de l'Est vers l'Ouest, etc ...), et courants de marées (détroits de Sicile, de Thrace, des Cyclades). Ces derniers se manifestent à plus grande profondeur, jusqu'à l'étage bathyal, bien en deçà du domaine infralittoral.

+ Au niveau du fond, l'herbier est découpé par des couloirs, chenaux et lobes longitudinaux, parfois longs de plusieurs hectomètres et larges de un à plusieurs décamètres. Les herbiers sont parfois entièrement érodés et la roche sous-jacente est dégagée (écueils du Milieu et du Miet, à Riou-Calseraigne ; écueil de la Dame à Port-Cros - Ile du Levant). A Riou, des affleurements würmiens et des dalles de grès sont exhumés de leur recouvrement de "mattes" et sables. Les ravinements sont importants dans les "couloirs" (plus de 1 m au cours d'une saison à plusieurs grosses tempêtes). On y note la traction de blocs et gros galets en zone H_1 et au sommet de H_2 (de quelques mètres à - 14 m).

+ Ce type d'herbier se dégrade rapidement, mais il se régénère aux débouchés des passes en zones plus profondes, liées à une brusque alimentation par excès de charge (Riou, Hyères). Cet herbier profond s'individualise en un ensemble autonome lié aux formations bio-détritiques des sables et graviers sous l'influence des courants de fond et le détritique côtier concrétionné. La profondeur limite séparant l'ensemble superficiel érodé et l'herbier profond demeure variable car elle reste sous la dépendance des impulsions dynamiques déterminant l'onde incidente (vent, marée, gradients divers) et de la géométrie des sections du détroit. On peut tabler sur d'assez larges variations concernant, pour cette profondeur limite de la zone H_2 , vers - 12 m à - 30 m selon les cas.

+ Les taux de sédimentation sont faibles ou nuls, ou encore négatifs (érosion). Les couloirs occupent des positions variables en fonction du temps, avec déplacements latéraux des axes de transit. Il en sera de même pour la situation des "mattes". Les zones à fortes pentes sont très vulnérables ; les herbiers faiblement inclinés, au contraire, peuvent montrer une surface de frondes homogène, résistant bien aux ravinelements sous-marins, même en zone H_1 , à la condition de se trouver à "l'aval" de l'éventail de Venturi.

+ Ces herbiers, outre leur érosion mécanique naturelle, sont menacés par des pollutions diverses, notamment des rejets d'hydrocarbures. Les passes et détroits correspondent en effet à des routes maritimes très fréquentées.

5) Herbiers profonds, problèmes hydrodynamiques.

Ces herbiers homogènes s'intègrent aux modes réguliers ou imbriqués, à la zone inférieure de l'infralittoral, de - 20 à - 30 m, voire - 40 m en eaux très claires (Sud de la Crête où la zone photophile est très étendue, jusqu'à - 45 m). On retrouve des mattes au large du détroit de Sicile, au sommet du haut fond du banc Talbot (- 40 m) (Blanc, 1958). Au point de vue hydrodynamique, l'herbier profond est soumis aux conditions de la zone H_2 . L'action des vagues s'y trouve atténuée et permet le développement de vastes "prairies" intactes.

Parmi les localités, citons : au large du massif de Puget, baies de La Ciotat, baie de la Moutte (Bandol), Hyères, Port-Cros, Caps Léoube, Bénat, Taillat, Sud de la Crête, Est de Rhodes, Péloponnèse (Baie de Gherolimín, Cap Matapan, baie de Scutari).

Cette homogénéité demeure apparente. On observe en effet des chenaux, épandages de sables et graviers liés aux courants de décharge à la limite inférieure de la zone H_2 . En d'autres cas, les chenaux sont parallèles aux rivages et leur relation éventuelle avec des courants compensateurs n'est point établie.

Parfois, l'inflexion des lobes et "couloirs" sableux est sous la dépendance de l'action conjuguée des courants de décharge et de la déviation liée à un courant de fond permanent ou intermittent (Cap Blanc).

+ Les chenaux profonds présentent des "ripple-marks" (habituelles), des "méga-ripples", voire, plus rarement, des figures d'"anti-dunes", jusqu'à des profondeurs de - 37 m. Cela suppose un nombre de Froude supérieur à 1 (Gilbert, 1914), où :

$$F = \frac{V^2}{g \cdot y}$$

V = vitesse du courant de fond en cm / sec,
 y = épaisseur de la lame d'eau en mouvement,
 g = 980 cm / sec².

Cet état précède le stade de formation des sillons d'érosion parallèles au sens du courant, observé dans les herbiers du type 4. Ici, pour $F = 1,10$ en considérant $y = 0,10$ m contre le fond, on a une vitesse théorique : $V = 1,2$ m / sec et, pour $F = 1,30$, V serait égale à 1,8 m / sec, ce qui nous amènerait à la limite des domaines érosion - transport pour les sables grossiers et les granules, d'après Hjulström.

Il s'agirait ainsi de vitesses quatre à cinq fois plus rapides que les célérités mesurées habituellement, par mer "moyenne", à ces profondeurs. Des actions aléatoires, parfois violentes, ne sont point à exclure (tempêtes exceptionnelles : $T = 10$ sec, $L = 156$ m et profondeur d'amortissement : 78 m). On remarquera que, pour une profondeur de 30 m, une onde de $T = 10$ sec, $H = 5$ m, donne une vitesse orbitaire atteignant 0,88 m / sec, d'après la formule :

$$U \text{ max} = \frac{H}{T \cdot \text{sh} \frac{2\pi Z}{L}}$$

où : $U \text{ max}$ = vitesse orbitaire sur le fond,

Z = profondeur,

T = période,

H = hauteur de la houle.

Les mesures, dragages et calculs montrent ainsi que sables et graviers peuvent être déplacés en zones H_2 et H_3 par gros temps. Les essais et calculs du L. C. H. F. montrent que la limite d'action des *houles seules*, susceptibles de déplacer des sédiments, ne dépasserait guère une profondeur de 20 m, malgré des paramètres élevés où $T = 11$ sec et $H = 7$ m (en fait, - 15 m le plus souvent, d'après les expériences du C. E. A., dans le golfe de Gascogne, avec du sable radioactif). Il y a une certaine contradiction avec d'autres résultats expérimentaux où des mesures directes de Comex - Data, à Marseille, ont mesuré des vitesses de 1 m / sec à - 11 m, - les enregistrements portant sur de longues séquences de temps englobant parfois des tempêtes.

Il est possible que la combinaison de tempêtes exceptionnelles avec des courants de décharge, à la condition d'admettre des gradients de pression élevés, soit de nature à expliquer la présence de certains chenaux profonds.

Or, les trains de vagues de tempêtes, généralement obliques par rapport aux tracés des rivages, occasionnent une surélévation du niveau pouvant atteindre jusqu'à 1/10 ou 1/15 de l'amplitude de la houle au large. Il en résulte le déséquilibre d'importantes masses d'eaux compensé par un flux dirigé vers le large (courant de décharge). L'énergie transmise est une fonction de la pente des chenaux conformément à la formule de Chézy où :

$$V = C \sqrt{R \cdot I}$$

V = vitesse moyenne du flux en m / sec,

C = coefficient de rugosité du fond, soit 2,6 pour un fond sableux,

I = pente ($\text{tg. } \alpha$), si α est l'angle du fond par rapport à l'horizontale.

Les dénivellations théoriques au rivage oscillent entre 0,30 et 0,60 m. Elles sont accentuées par l'amplitude des dépressions barométriques (jusqu'à 743 et 750 mm Hg). Il en résulte des dénivellations réelles plus importantes ; nous avons mesuré : 0,70 m à Giens (exceptionnellement : 0,90 m), 0,90 m aux plages d'Agde et de la Tamarissière, 1 m au Racou (Pyr. Orient.) et à Faraman (Camargue).

La célérité du flux compensant ce déséquilibre diminue rapidement en fonction de la profondeur et du rayon hydraulique (cas des courants de Calanques). On soulignera l'analogie avec les courants de gradient dont la vitesse décroît paraboliquement avec la profondeur (Defant, 1961).

+ En régime "normal", la zone H₂ concernant l'herbier peut être le siège de courants modérés et même de courants de marées, pour les baies ouvertes, et s'inversant. A 1 m du fond, à - 22 m à l'herbier des Goudes (Sud de la baie de Marseille), des mesures effectuées en 1976 par Comex - Data, montrent des vitesses de 2 à 22 cm / sec (enregistrement continu, marée semi-diurne amplifiée par un phénomène de résonance locale), tandis que, pour le même régime, le courant orbitaire (théorique et mesuré), demeure quasiment nul à cette profondeur.

+ Les sédiments "profonds" prélevés dans les herbiers, de - 20 à - 32 m montrent la bi-polarisation habituelle :

- composante terrigène : sables fins et teneurs en lutites généralement en augmentation, sans qu'il y ait une loi précise (de 14 à 40 %),
- les teneurs en graviers et sables grossiers biogènes sont aléatoires, irrégulières (de 5 à 20 %).

+ Le passage de l'herbier au détritique côtier ou aux fonds coralligènes s. l. s'effectue généralement de - 35 m (parfois - 32 m) à - 40 m. Les caractères sédimentologiques généraux de cette "*zone de passage*" sont les suivantes :

- granulométries complexes et irrégulières,
- mauvais classement,
- composante bio-détritique importante masquant souvent les caractères de dépôts mixtes lessivés ou sédimentés par excès de charge,
- tendance à l'envasement, parfois rapide, pour certains sites (Saint Tropez, Fréjus, Dramont, Agay). En d'autres lieux, au contraire, on note, sauf par gros temps, une transparence remarquable des eaux.

Le taux de sédimentation n'est point connu. Il apparaît assez faible et variable.

+ Les dangers d'altération des herbiers profonds sont essentiellement :

- l'installation d'émissaires situés au large ou à la côte,
- la pollution par les hydrocarbures,
- l'extension des cellules d'envasement au fond des baies.

En contre partie, les herbiers profonds montrent de bonnes possibilités de régénération naturelles, surtout lors des années chaudes.

Le tableau suivant résume les principaux caractères de la classification des herbiers méditerranéens :

Classification	Profondeur	Hydrodynamique	Sédiment	Taux de sédimentation
1 - Herbiers des aires à hypersédimentation	Très faible 0 à - 1,5 m, Zone parfois intertidale	Très abrités, Marées, zone intertidales Seiches Dérives	Sables vaseux Vase sableuse Mat. organ. Larges étendues Pelouses zostères	Elevé à très élevé
2 - Herbiers de sites abrités	Faible 0 à quelques mètres	Abrités Zone H_1 Front d'émersion et "lagune" Marées et seiches Dérives	Mattes, tombants au large Sable bio-détritique Sable vaseux décanté	Elevé
3 - Herbiers de sites exposés	Tout l'infra littoral	Exposés Zones $H_1 + H_2$ Grande variabilité Vagues et courants de décharge Déferlements	Mattes et tombants Chenaux, intermattes, Sable bio-détritique, lessivé	Elevé à variable
4 - Herbiers des passes et détroits	Quelques mètres à - 40 m	Zones $H_1 + H_2$ Vagues, houlès Effet Venturi, Courants de fond très variés et dérives, courants de marées	Chenaux longitudinaux Mattes Roches affl. Sable grossier lessivé	Variable Faible ou nul
5 - Herbiers profonds	- 20 à - 40 m	Zone H_2 Ondes de tempêtes Courants de décharge Courants de fond variés, Marée	Chenaux profonds Lobes sableux, Sable grossier bio-détritique et lessivé	Variable

II - 2 - ANALYSE DES GRANDS HERBIERS DE LA RADE DE GIENS ET DE LA BAIE D'HYÈRES.

L'herbier à Posidonies montre une étendue maximale, pour le littoral méditerranéen français, aux sites de la baie de Giens et de la rade d'Hyères (Blanc, 1958 - 1973 - 1975) ; Jeudy de Grissac, 1975). En vue de la protection de ces "prairies" sous-marines très menacées, totalisant une superficie d'environ 40 km carrés, les études récemment entreprises permettent de dégager les remarques suivantes :

1 - L'action de la houle et des vagues se manifeste à toutes les profondeurs de l'herbier. La limite d'extension de l'HP est à - 32 m, tandis que les faciès de passage au détritique côtier s'étagent de - 35 à - 39 m.

A partir de mesures de période et hauteur de houles au rivage et de longueurs mesurées sur photographies aériennes, le calcul permet d'établir les états suivants : (1)

Etat de la mer	T sec	H au large en m.	L au large en m.	W Vitesse du vent : m / sec	V m/sec Vitesse courant de dérive en surface	Profondeur d'amortissement en mètres
moyenne	4	0,55 - 1,10	25	5,5 à 8	0,08 à 0,10	12 à 13
grosse	6	1,3 - 2,5	56	11 à 12,5	0,16 à 0,18	28
forte	7	2,5 - 4,5	77	12,5 à 15	0,18 à 0,22	39
maximum observé	8,2	4,5 - 6	88	> 15	> 0,25	45

Par gros temps, l'agitation s'exerce à tous les niveaux de l'herbier. Mais, dès la profondeur de 12 m se réalise un amortissement rapide, ce qui à 1 ou 2 m près correspond à la limite des zones H₁ et H₂. Par beau temps

(1) Les vitesses de vent et les courants de dérive (jusqu'à l'état de mer "grosse") ont été mesurés (Station Météorologique et flotteurs). H au large et certaines L au large par mer grosse et au-delà, sont calculées.

et petites vagues (H inférieure à 0,50 m), l'amortissement quasi complet est réalisé dès la zone H₂.

A partir de vents à 10 m / sec et dès que T s'avère supérieure à 4,5 sec, on observe des dérives notables à 0,15 m / sec et davantage et la possibilité de mouvements sur le fond.

2 - Influence du courant orbitaire de la houle.

Par mer forte ou grosse, jusqu'au régime maximum observé, les mouvements orbitaires, au niveau où la profondeur $Z = L/2$, varient entre 3 et 20 cm (diamètre D des orbites). Cela peut se traduire, étant donné la nature du sédiment (sable grossier, sable moyen), à des mouvements de traction ("charriage" sur le fond), voire de saltations momentanées.

Le calcul montre que la célérité orbitaire maximale U max, au niveau du fond, est très faible et non significative jusqu'à T = 4,5 sec, pour montrer ensuite des valeurs de 0,03 / sec (T = 6 sec) et 0,18 m / sec (T = 7 sec). Pour U max = 0,18 / sec, des particules supérieures à 2 mm peuvent être déplacées par traction en fonction de la loi d'impact, pour des grains "libres" non solitaires du fond (la vitesse nécessaire à l'arrachement est supérieure à U max. et non connue pour le cas présent).

La majorité du sédiment constituant le substrat des HP entre dans le domaine du "transport" sur l'abaque d'Hjulström (pour les vitesses à partir d'une mer "grosse"), ainsi que dans la "zone de roulement" de Passega.

Les valeurs suivantes ont été calculées pour 4 modèles d'état de la mer :

Etat de la mer	T sec	Profondeur amortissement en M.	Diamètres orbitaires à la profondeur d'amortissement, en m.	Vitesse de dérive à la surface en m / sec	U max. au fond en m / sec
moyenne	4	12 à 13	0,03	0,08 à 0,10	-
grosse	6	28	0,07	0,16 à 0,18	0,03
forte	7	39	0,14	0,18 à 0,22	0,18
maximum	8,2	45	0,20	plus de 0,25	plus de 0,60

3 - Hétérogénéité du sédiment.

Jeudy de Grissac a effectué une étude détaillée sur les sédiments des herbiers à Posidonies de Giens et d'Hyères. Les caractères *moyens*, exprimés en pourcentages pondérés, ressortent par rapport aux sables du prisme littoral des mêmes sites :

Nature des éléments		Gastéropodes	Lamelli-br.	Foramini-fères	Détritique terrigène	Lutites	CO ₃ Ca %
Sables du prisme littoral	Moyenne	13	8	2	75	4	7
	Ecart	0 - 20	0 - 20	0 - 5	70 - 80	0 - 10	0 - 10
Herbiers à Posidonies	Moyenne	32	17	17	17	23	54
	Ecart	25 - 45	10 - 25	10 - 45	0 - 20	10 - 50	40 - 70

Les remarques *générales* suivantes peuvent être dégagées :

1) Les éléments d'origine biodétritique sont prépondérants dans les sables d'HP,

2) Il demeure toujours une phase minérale d'origine terrigène relativement importante,

3) Les teneurs notables en sédiments fins (lutites) traduisent un gradient d'envasement et des phénomènes de rétention ("piégeage"), par les frondes de la "prairie" à Posidonies (Jeudy de Grissac). Les teneurs en lutite présentent de forts écarts,

4) Les proportions en calcaire sont *ici* directement liées à la possibilité biologique des fonds et notamment aux peuplements benthiques. Ainsi, l'HP est le domaine préférentiel de nombreux Gastéropodes et Foraminifères étudiés par Blanc-Vernet.

Des différenciations plus détaillées et souvent difficiles à interpréter s'observent encore pour les *faciès annexes* tels que les *chenaux* et les épandages de *sables et graviers* sous l'influence des courants de fond (SGCF).

+ Moyenne pour 5 chenaux (profondeur moyenne : - 10 m), en pourcentages ; herbier et Posidonies :

Détriti-ques terrigènes	Gastéropo-des	Lamelli-br.	Débris bio-gènes di-vers	Foramini-fères	Lutite	CO3Ca
5	35	10	20	25	15	65

+ Exemple de lobe SGCF (4 échantillons) :

Détriti-ques terrigènes	Gastéropo-des	Lamelli-br.	Débris bio-gènes di-vers	Foramini-fères	Lutite	CO3Ca
5	30	5	30	10	0	85

- Les teneurs en lutite diminuent dans les axes empruntés par les courants de décharge. Cette diminution accompagne aussi l'éloignement des épandages pollués du Gapeau et du Pansard comme l'ont montré les travaux cartographiques de Jeudy de Grissac. En milieu infralittoral, la proportion en lutite s'avère *indépendante de la profondeur*.

- Les tests en place, et surtout remaniés, de Foraminifères et Gastéropodes s'accumulent dans les "couloirs" de sables lessivés, augmentant de ce fait la teneur en carbonates.

Les Lamellibranches montrent une distribution variable non encore expliquée. Quant aux minéraux détritiques, ils diminuent en fonction de la distance à la côte, c'est-à-dire proportionnellement à l'éloignement des formations du prisme littoral et des sables fins des hauts niveaux.

En conclusion, l'hétérogénéité du sédiment apparaît déterminée par la nature des peuplements benthiques et des facteurs hydrodynamiques. On notera l'influence variable, lourde en conséquences, des éléments terrigènes et de la pollution.

4 - Variations de la profondeur, envasement et teneurs en calcaire (fig. 9).

Les travaux de Jeudy de Grissac montrent l'indépendance de la profondeur vis à vis des teneurs en lutite et en carbonates. Donnons ici, à titre d'exemple les valeurs suivantes :

Stations	Profondeurs en m.	% CO ₃ Ca	% lutite	Remarques
56	5	16	47	envasement littoral
51	8	11	0,5	lessivage
53	10	27	57,5	envasement
62	12	16	7	lessivage, faible
69	15	38	44,5	production
75	19	42	49,5	envasement
27	20	54	19	forte productivité
96	22	44	11	biol.
30	24	20	0,5	} lessivage
87	26	26	0,6	
31	28	39	8,5	
101	29	54	15	forte productivité
19	30	36	29,5	biol. décantation au large

- Une forte productivité biologique s'accompagne d'une teneur moyenne à faible en lutites (état d'équilibre, eaux claires et propres) indépendamment de la profondeur,

- Un lessivage ou un envasement excessifs diminuent la productivité biologique carbonatée, indépendamment de la profondeur,

- Les décantations normales de lutites (25 % à 30 %) concernant les herbiers profonds du large ne paraissent pas incompatibles avec une bonne productivité biologique carbonatée. L'herbier atteint, à ces niveaux, un état d'équilibre (- 25 à - 32 m),

- L'influence terrigène du prisme littoral se manifeste, pour les herbiers, jusqu'à une profondeur de - 20 m. Les éléments siliceux (quartz, phyllites, min. du métamorphisme) sont dispersés en deçà de la zone de déferlement ("break line"), vers le large. Dès - 20 m, cet apport détritique sableux diminue brutalement et la composante biodétritique prend le relais. Quant aux fractions fines terrigènes (lutites), elles montrent des gradients d'envasements liés aux zones littorales abritées et axes d'épandages et de pollution (émissaires, Gapeau et Pansard).

5 - Les trois zones de l'herbier à Posidonies.

Trois faciès sédimentologiques ont pu être détaillés pour les grandes étendues d'herbiers :

5.1. Les herbiers superficiels.

Jusqu'à une profondeur de - 20 m. Cette limite inférieure peut être reportée à - 25 m en certains cas. Elle correspond à la demi-longueur d'onde des houles moyennes des tempêtes pour les sites considérés (Giens, Hyères, Brégançon, Iles d'Or). Elle se place hors de la zone H_1 et près de la limite inférieure de la zone H_2 , où s'amortissent les influences mécaniques d'origine strictement littorale (sauf pour T supérieure à 4,5 sec).

Les teneurs en graviers et sables biodétritiques augmentent en corrélation inverse avec les composantes terrigènes. La répartition des sables moyens, fins et lutites demeure sous la dépendance des envasements locaux, de la pollution, et de la teneur en montmorillonite, interstratifiés (épandages terrigènes liés aux rivières et torrents). Ce dernier fait a déjà été précisé par Chamley et Jeudy de Grissac.

5.2. Les herbiers profonds.

Leur extension se situe de - 20 m (ou - 25 m) jusqu'à - 30 m.

+ Au point de vue hydrodynamique, on remarquera ici :

- l'action des seules ondes liées à des périodes plus élevées ($T > 5$ sec), jusqu'aux tempêtes à $T = 8,5$ sec, responsables de ravinements sur le fond et d'arrachage des frondes de Posidonies,

- courants compensateurs très exceptionnels, liés aux flux des tempêtes, orages et crues, probablement canalisés par des chenaux profonds jusqu'à - 32 m,

- courants permanents, unidirectionnels ou alternatifs : marées, seiches, "branches" latérales ou contre-courants issus du courant permanent (courant géostrophique du large). Il est prouvé que ces derniers types de mouvements ont une action sédimentaire d'ensemble assez continue, discrète et importante au point de vue quantitatif (travaux en cours).

Les vitesses y sont plus lentes et, de ce fait, les arrachements moins fréquents. D'où la possibilité de régénération des herbiers à Posidonies souvent plus importante qu'on ne le croit en cette zone.

En fait, pour cet étage de l'HP, en sites exposés (large baie, rivage rectiligne), le milieu liquide est loin d'être immobile. On évoquera la dérive superficielle, assez spectaculaire et liée au vent. Elle s'atténue très rapidement à ces profondeurs et s'oriente parfois en sens inverse du courant de surface.

+ Le sédiment paraît étranger à ces modalités :

- taux aléatoires des graviers, sables grossiers, sables moyens,

- les sables fins augmentent irrégulièrement avec la profondeur, sans que cela soit une règle stricte,

- la proportion de lutite augmente encore pour les zones envasées et polluées. Ces dernières ne dépassent guère une profondeur de - 25 m, à moins que les débits d'effluents ne s'élevèrent très élevés (égoût de Marseille) ou que la bathymétrie de l'émissaire ne soit reportée à un niveau inférieur.

5.3. Zone de passage de l'herbier au détritique côtier.

Elle s'étend généralement de - 35 m à - 40 m. Dès cette dernière profondeur, on observe les peuplements et les sédiments du DC proprement dit. Ondes de tempêtes et courants permanents demeurent, semble-t-il, les seuls facteurs dynamiques appréciables.

La granulométrie irrégulière et complexe, de cette zone, nécessiterait des études détaillées. Mais, à plus grande profondeur, dans le DC de la baie de Marseille, à - 55 m, nous savons que des modifications assez continues dans la granulométrie des sédiments, reflètent avec un certain décalage, les conditions météorologiques (Castelbon, Reys et Weydert, 1974).

Ici, les courbes granulométriques sont irrégulières avec des fluctuations importantes, un mauvais classement.

Le tableau suivant résume des mesures réalisées par Jeudy de Grissac.

GIENS HYERES	Profondeur en M.	Eloignement moyen du rivage en M.	% graviers et sable grossier	% sable moyen	% sable fin	% lutites
Herbiers superficiels	4	600	1	2,5	41	55,5
	10	1 100	15	15	12,5	57,5
	12	1 600	11	8	11	7
	15	2 500	19,5	18	18	44,5
	18	3 100	26	26	43	5
Herbiers profonds	22	2200 à 4800	19	17	28,5	35,5
	28	6 500	15	28	40	16,5
	30	3200 à 6500	9	10,5	51	29,3
Passe de l'herbier au détritico-côtier	35	variable	7	18	58,5	16,5
	38	de 1 500	4	21	72,5	2,5
	39	6 500	9,5	48,5	33,5	8,5
Détritico-côtier	40	d°/	5	34	55	6

II - 3 - TAUX DE SEDIMENTATION.

La vitesse de croissance verticale des mattes est fonction de l'alimentation en éléments terrigènes et surtout de la productivité biologique. Ces deux facteurs peuvent être précisés pour certaines localités. Mais, il n'en est généralement point de même pour les durées et fréquences des cycles accrétion - érosion. Ainsi, le taux de sédimentation *apparent*, établi sur quelques années d'observation sera important, faible, nul ou négatif (érosion du fond) selon la situation, dans le temps, du "créneau" plus ou moins long d'observation, vis à vis de cycles du 1er ordre (quelques siècles) ou du 2ème ordre (quelques décennies).

Les travaux effectuées aux Bahamas, pour des herbiers à *Thalassia* et à Algues, montrent que des "mattes" de 2 m d'épaisseur s'accroissent au contraire lentement, au taux de 0,12 m / 1 000 A, pour une "densité" *actuelle* de l'herbier de 22 plants / m². Le nombre de plants au m² (parfois plus de 50 à 70 pour l'herbier à *Posidonies*), conditionne la rapidité de la sédimentation biogène autochtone ou para-autochtone (phénomène de "piégeage"). Mais les herbiers des Bahamas sont soumis à des marées, en milieu plus abrité (boues aragonitiques, sables à débris d'*Halimeda* (Neumann et Land, 1975).

Chassefière, Got, Leehardt (1974) et Delserre (1974) ont réalisé des sondages dans les mattes de l'herbier à Posidonies et dans le détritique côtier, à l'aide du "sparser". Les fréquences de pénétration étaient de 4 KHz pour les sables détritiques terrigènes du prisme littoral, 6 à 12 KHz pour les sables vaseux, sables fins et vases sableuses du DC. L'herbier à Posidonies et les accumulations de graviers biogènes ont exigé l'emploi d'un "boomer" à 800 KHz. A partir des temps doubles de parcours, les couches isopaques ont été dressées en quelques sites lors de contrats en collaboration avec le C. N. E. X. O. (département 2), pour des vitesses de 1 550 m / sec à 20°. Donnons ici quelques épaisseurs d'après les travaux précités :

Localisation	Epaisseur en m.	Type de fond	Profondeur	Contrôles plongées
Baie de La Ciotat	0 à 3,75	HP dense	20 m	plus de 2 m
Baie de La Ciotat	1,5 à 2,25	HP dense profond	30 m	
Fort-Sainte, Cap St Louis baie des Lecques	1,5 à 3	"	25 à 30 m	plus de 2 m
Ouest de l'Ile Verte (La Ciotat)	1,5	HP un peu dégradé	25 à 30 m	1,5 m
Cap Couronne	1,5 à 3,75	HP dégradé	10 à 12 m	1,5 m
<u>Archipel de Riou</u>				
- N de la Pte du Baou Rouge	3,75 à 0,5	HP dégradé	10 à 15 m	plus de 2 m
- Sud de Jaïré	2,25 à 3,75	HP dense	15 m	?
- Est de Calseraigne	1,5 à 3,5	HP pollué	15 à 20 m	?
- Calanque de Marseille-veyre	0,75 à 1	HP dégradé	5 à 6 m	0,5 à 1
- Calanque de la Mounine	0,75 à 1	HP dégradé	5 à 6 m	0,5 à 1
- Calanque de Fontagne	4,5	HP dense	8 à 15 m	plus de 3 m
- Calanque de l'Aigle et Mounastéréou	4,5 à 5,25	HP + ?	6 à 12 m	plus de 2 m
Podestat	2 à 4 m	H dégradé	15 m	?
Les Keïrons	2,25	"	15 à 10 m	1,5 m
Rade d'Hyères	1,5 à 2,25	HP dense	20 à 25 m	1,5 à 2 m

St Mandrier, les Sablottes	1,5	HP érodé	16 m	?
La Garonne (E. Toulon)	1,5	HP	12 à 18 m	1,5

Il sera nécessaire d'étendre systématiquement ces investigations et de tracer, lorsque cela sera possible, des cartes isopaques des mattes profondes à Posidonies, dans la mesure où l'on dispose d'une pénétration et d'un pouvoir séparateur suffisant, ce qui ne sera pas toujours possible étant donné la consistance du sédiment (vides, débris biogènes, lutites intercalées, teneurs en gaz) et la présence des frondes réfléchissantes de la "prairie". D'où la nécessité d'opérer des contrôles, le plus souvent possible, par lançage, vibro-fonçage et carottages à grande section (cf. appareillage du B. R. G. M.). Ces données permettraient de préciser des taux de sédimentation plus exacts et d'avoir éventuellement connaissance de l'existence possible de plusieurs cycles.

o

o o

III - SEDIMENTOLOGIE DYNAMIQUE ET TENDANCES

EVOLUTIVES DES HERBIERS A POSIDONIES

III - 1 - PROPOS LIMINAIRES - METHODOLOGIE :

. Choix des sites.

Le délai imparti a nécessité le choix de sites déjà explorés, parfois depuis plus d'une décennie dont le contexte bionomique s'avérait relativement bien connu. Notre choix a encore été motivé par deux considérations :

- milieux sédimentaire et hydrodynamiques bien tranchés, généralement à évolution nette, s'incorporant à des types d'herbiers assez bien définis,

- zones en voie d'aménagements et d'équipement : centrale thermique E. D. F. des Laurons, côte Bleue, côte des Calanques et archipel de Riou, baie du Bruscarades de Toulon, Giens, Hyères, Iles d'Or, etc ... Pour ces derniers sites, les problèmes de pollution, d'altération et de protection des herbiers nécessitent une étude et un traitement urgents.

Il eut été nécessaire de consacrer plusieurs années à l'examen complet, aux points de vue physique, géologique ou sédimentologique, de tous les herbiers littoraux ; cette étude ne comporte en fait que des données établies sur les localités estimées importantes.

. Recherches préliminaires.

Elles comportent l'examen des travaux antérieurs, archives et relevés inédits, comptes rendus de plongées. Certains travaux systématiques et détaillés remontent à 1950 et 1951. Depuis 1973, on assiste à une multiplication des recherches fondamentales ou sous contrat, sur le littoral méditerranéen français, accompagnées de relevés cartographiques et de missions aériennes. Ces dernières, devenues systématiques depuis 1945 - 1949, ont été poursuivies par l'I.G.N. à une cadence accrue, parfois annuelle, (émissions panchromatiques, couleur ektachrome, infrarouge fausses couleurs, etc ...). Les données des satellites (E. R. T. S., etc ...) et les thermographies I. R., n'ont pas eu d'applications *directes* pour le programme concerné.

. Travaux détaillés.

Missions et plongées, sur le rivage, en "Zodiac" et avec les navires du Centre d'Océanologie d'Endoume ("Alcioppe" et "Antedon", "Sainte Marie"), avec la participation active de MM. Jeudy de Grissac, Clairefond et Orsolini. Les radiales de prélèvements ont été complétées par des observations directes, photographies sous-marines, travaux de laboratoire, mesures physiques et météorologiques, données inédites aimablement communiquées par une amicale collaboration avec COMEX DATA (courantomètres et stations autonomes de mesures), etc ...

Les recherches sur le milieu naturel ont toujours été complétées par une photo interprétation très poussée, pour les missions aériennes successives et de plus en plus rapprochées dans le temps.

III - 2 - HERBIERS A L'EST DU GOLFE DE FOS ; ZONE A EVOLUTION

RAPIDE DU CAP COURONNE - SAUSSET,

Ce secteur est très important du point de vue des problèmes de protection (pollutions par les hydrocarbures et les métaux lourds, "pollution thermique"), des aménagements actuels (installations portuaires de Fos, raffineries à Lavera - Fos : hydrocarbures, centrale thermique E. D. F. aux Laurons, cimenteries et métallurgie à Fos, etc.) ou des aménagements futurs (extension des raffineries, de la métallurgie, projet de centrale nucléaire Ponteau - Les Laurons).

Cette altération des milieux naturels, liée aux complexes industriels de Fos, Martigues et Berre, se traduit par une évolution rapide des biotopes et de leurs substrats.

La présence du Cap Couronne se manifeste par une sorte de "pivotement" des influences hydrodynamiques et sédimentaires. A l'Est de ce cap, nous pénétrons dans un secteur mieux protégé montrant par ailleurs un autre type d'évolution presque aussi rapide. De ce fait, il est nécessaire de considérer ces deux domaines comme des entités distinctes montrant certains caractères communs.

A - La zone orientale du golfe de Fos, de Ponteau au Cap Couronne.

On assiste, pour ce secteur à un accroissement rapide de la pollution, des envasements et de la destruction des herbiers. Les actions hydrodynamiques naturelles s'exercent par le déferlement des fortes houles venant de l'W, W.NW et W.SW et des vagues courtes et cambrées liées au Mistral. Quoiqu'il en soit, on observe, depuis 1960 un recul rapide de l'HP.

Deux remarques sont à dégager :

1/ L'altération des herbiers, la destruction des mattes et la dispersion du prisme littoral amènent un étalement de sables fins bien calibrés (SFBC) par les courants de décharge. Ces actions seront maximales au Sud, près du "pivot" du Cap Couronne où se conjuguent les lobes de Carro et du Verdon (fig. 10).

2/ Réfraction des houles incidentes et forts déferlements obliques tout au long de l'alignement des écueils sous-marins d'Arnette et de Carro, orienté NW - SE. Il en résulte, après cette dissipation de l'énergie, une déflexion vers le SSE, la formation d'une dérive pareillement orientée déportant l'eau à proximité immédiate du Cap Couronne et au-delà de l'anse de Couronne - Vieille (fig. 10 et 11).

Ce transfert ne paraît point concerner les sédiments et paraît s'amortir en profondeur, mais il contribue activement au déplacement des pollutions flottantes d'hydrocarbures.

+ Il est important de souligner le rôle *défecteur* des écueils d'Arnette, des Ragues de Carro et des "tombants" rocheux sous-marins du Cap Couronne. Le flux pollué épargne ainsi la majeure partie des rivages et herbiers de Sausset et Carry, constituant ainsi une véritable "zone d'ombre", (fig. 11).

Au large de la "zone d'ombre", le mouvement vers l'Est est accentué par un régime permanent (contre-courant de la Nerthe) ou irrégulier (régimes et dérives de Mistral et Tramontane).

Examinons quelques sites du NNW vers le SSE et l'Est :

+ Ponteau.

L'herbier a montré depuis 1957, une régression spectaculaire

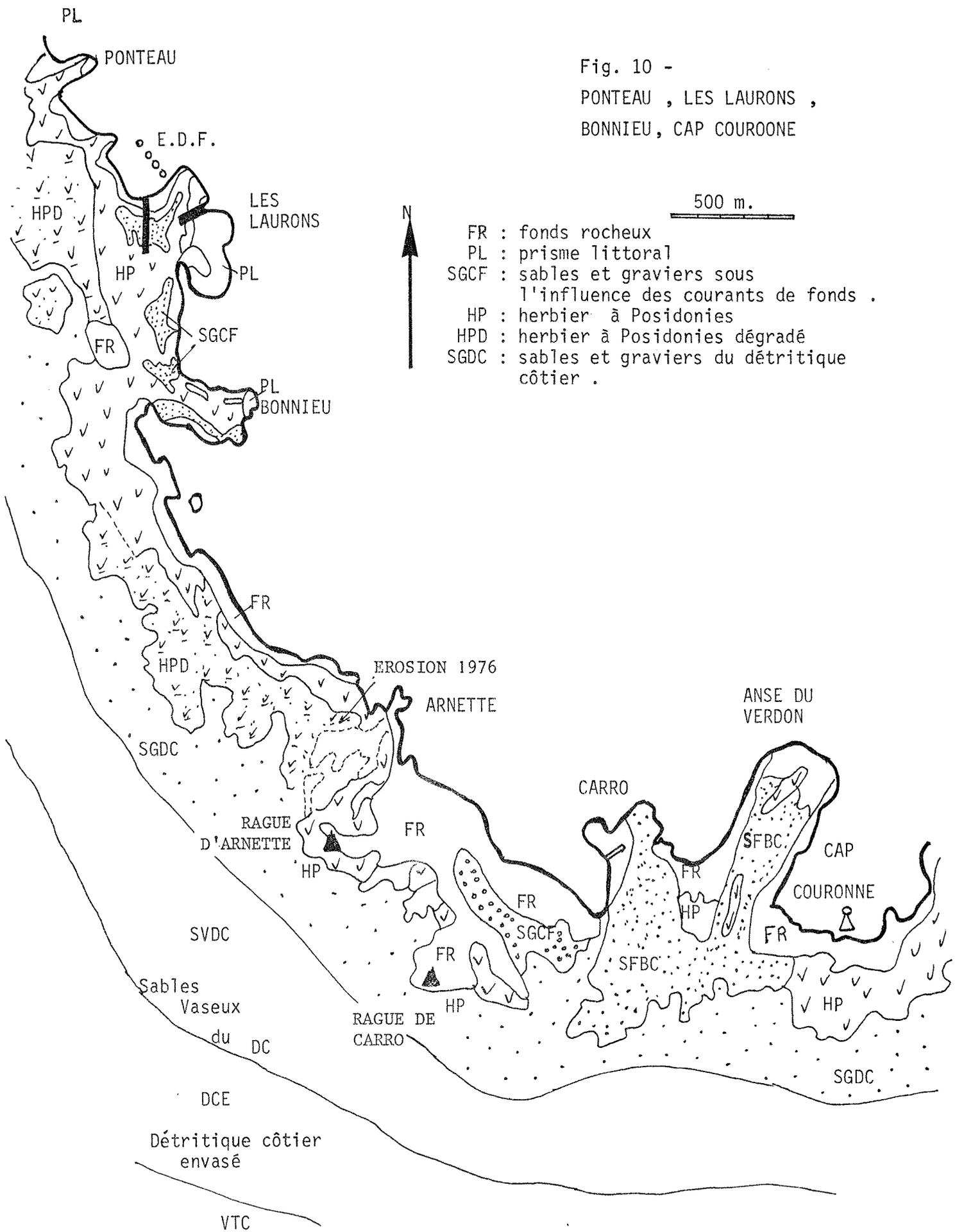


Fig. 10 -
 PONTEAU , LES LAURONS ,
 BONNIEU, CAP COURONNE

au taux de 15 m / A. Cette dernière est liée aux envasements et aux polluants de Fos, Caronte et de la raffinerie de Lavéra (BP), les effluents sont activement déportés le long du littoral vers le S et le SSE, ainsi qu'en témoignent les observations, mesures courantologiques, thermographies I.R et clichés I.R "fausses couleurs".

Des vestiges d'HP s'observent aux débouchés des criques et aux roches littorales. En profondeur, l'HP altéré se maintient, mais la régression par envasement affecte également le détritique côtier et le coralligène. En fait, l'extension des pollutions et des vases terrigènes côtières ont détruit l'équilibre naturel.

+ Les Laurons, (fig. 12).

Ici, la régression des HP apparaît davantage liée aux facteurs hydrodynamiques qu'aux pollutions proprement dites. On soulignera le rôle déflecteur de la digue de prise d'eau de la centrale électrique thermique. Cet obstacle nouvellement établi accentue les turbulences liées aux vagues d'Ouest, W. NW et W. SW, amène des diffractions et la déflexion du flux d'eaux chaudes vers le S, SSW. En fait, le panache thermique se dilue rapidement à 400 m de son émissaire. Il ne présente aucun inconvénient pour les herbiers environnants, déjà dégradés par les pollutions et les facteurs hydrodynamiques. En fait, le flux réchauffé attire de nombreux poissons qui cheminent vers l'origine du panache thermique, augmentant la productivité de la pêche artisanale locale.

On notera le phénomène des "eaux blanches", lié à une mortalité planctonique au contact des eaux plus chaudes (22° à 25°) provenant de la centrale E. D. F. Parmi les micro-organismes, on notera l'abondance de Diatomées mortes, d'où la coloration des eaux et l'attraction particulière du poisson. Par régime normal, la dérive du panache d' "eaux blanches", qui ne sont pas à confondre avec les eaux *chaudes* proprement dites, atteint vers le Sud l'anse des Laurons, avec une déflexion sur la jetée antique immergée (où une vedette lance torpille allemande est venue s'échouer au cours de la dernière guerre). Les blocs immergés de la jetée et l'épave modifient ainsi, par léger Mistral (régime habituel), la courantologie induite par les rejets de la centrale (Monguilan, 1976 : prospection hélicoptérée à très basse altitude, dépouillement, photo interprétation et vérification sur place de l'auteur).

Le recul de l'HP des Laurons a été sérieusement amorcé entre 1955 et 1960, antérieurement aux aménagements précités. L'érosion sur le

Fig. 11 - CAP COURONNE

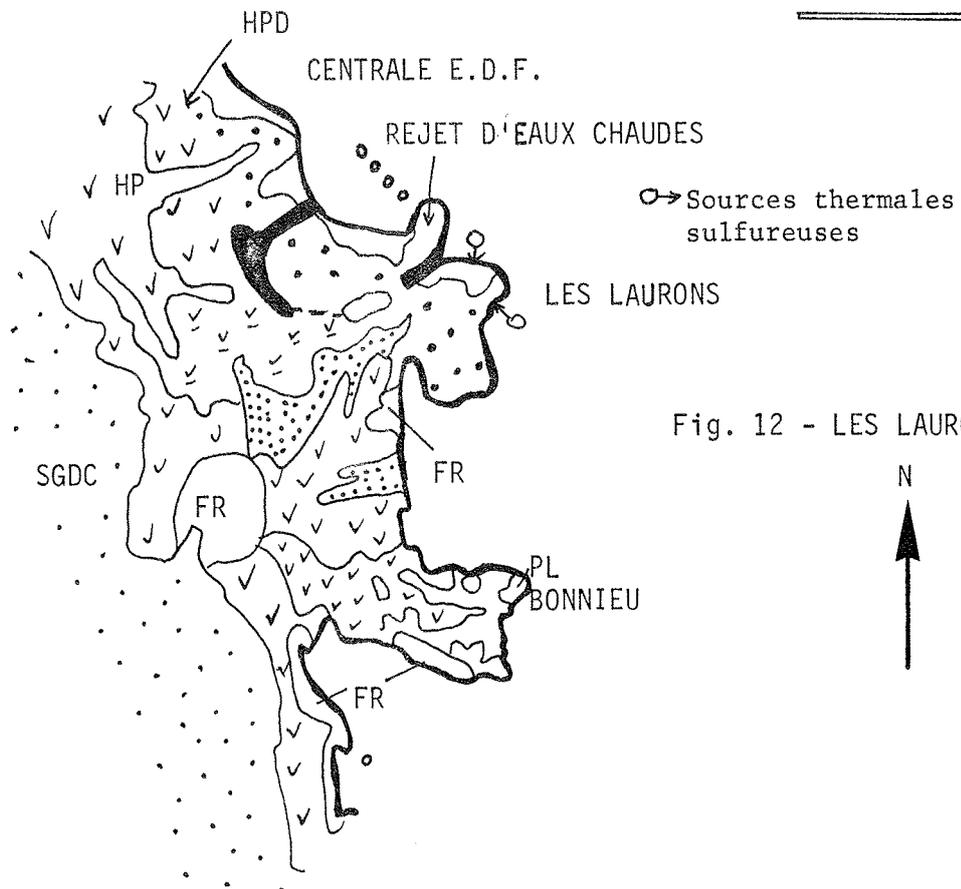
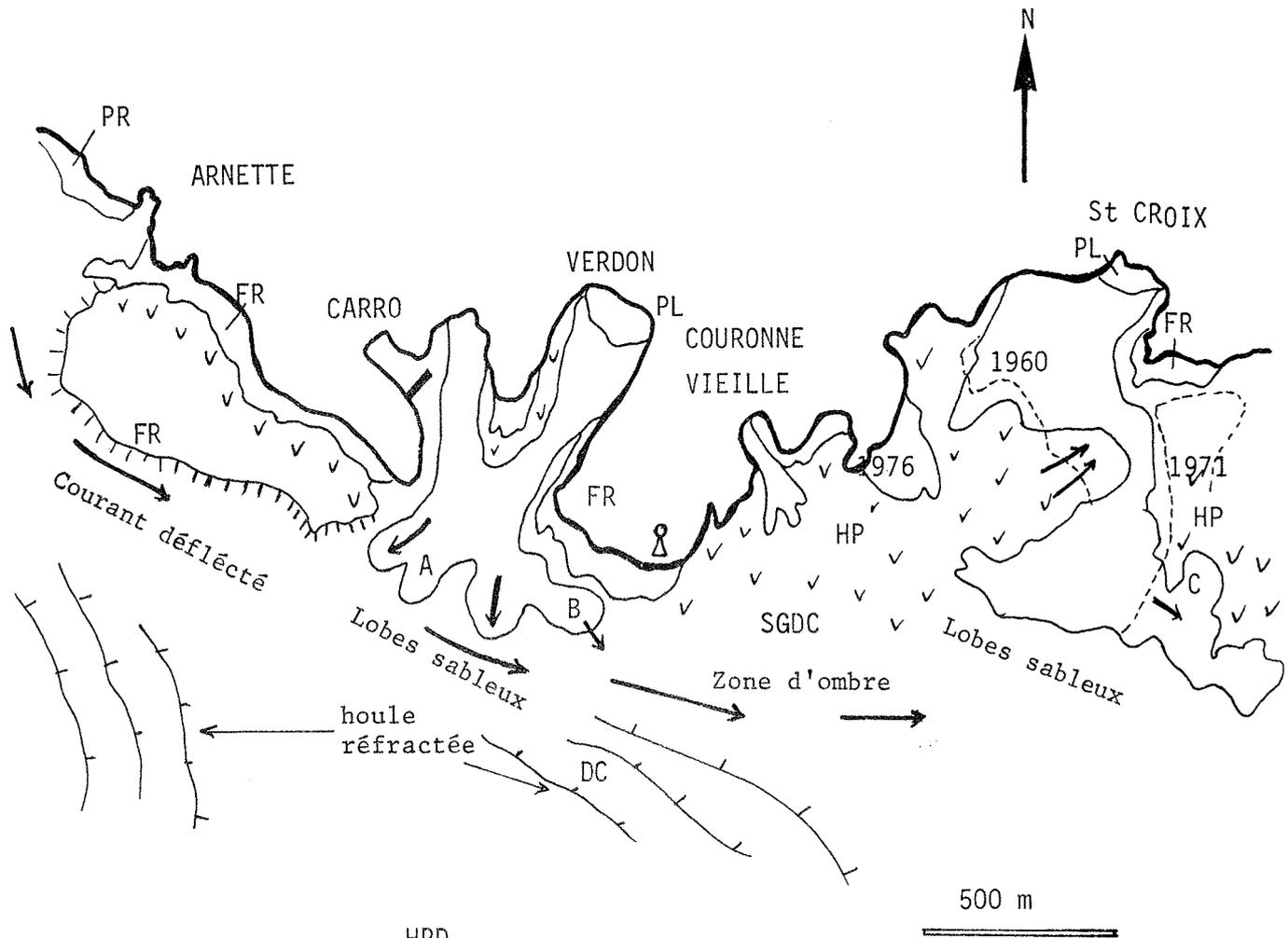


Fig. 12 - LES LAURONS

fond fait maintenant apparaître des céramiques dégagées d'une ancienne épave lors des tempêtes d'automne 1975. Depuis 1960, l'HP est presque complètement détruit et présente, sur 17 années d'observations, un recul au taux de 5 à 10 m / A. Entre les Laurons et l'anse de Bonnieu (fig. 10, 11 et 12), subsiste un liseré d'HP de 50 à 70 m de large, alors que ce dernier présentait une extension de 140 à 180 m en 1955.

L'action de la digue déflectrice de la centrale E. D. F. des Laurons est surveillée, depuis trois années. Nous confirmons la déviation du flux d'eau chaude (22° à 25°, débit : 17 m³ / s) vers le S et le SE sans inconvénient majeur du point de vue sédimentologique. Le pivotement dû à ce brise-lames et la diffraction au musoir amènent de forts déferlements aux roches situées au S de la centrale et, en conséquence, un fort courant de décharge au niveau du fond (peuplements dégradés, graviers et sables polygéniques).

+ Anse de Bonnieu.

Depuis 1960, on note la régression de l'HP au fond de la calanque (fig. 10) par extension des sables du prisme littoral (plusieurs dizaines de m. entre 1955 et 1957). La régression se poursuit jusqu'en 1971 et depuis, le front de l'herbier paraît stabilisé. A quelques mètres de profondeur (4 à 6 m), l'HP subsiste, au débouché de la calanque. Plus à l'Ouest, vers le large et indépendamment des influences littorales, l'herbier montre une nouvelle régression liée à l'envasement et aux dépôts de dragages du golfe de Fos. Ici, encore, il faut préciser que cette régression, notée dès 1955, apparaît antérieure aux aménagements ou aux "dumpings".

La progression de la sédimentation littorale terrigène correspond au développement des talus et du "prisme", avec coalescence de lobes de progradation montrant, en moyenne, une progression de 1 m / A. Depuis l'époque antique, à Bonnieu et aux Laurons, Monguilan estime que le colmatage a été de 30 ou 40 m (découverte d'anciens établissements portuaires).

+ Anse d'Arnette.

Régression de l'HP observée depuis 1960 avec courants de décharge, sillons d'érosion au N des Ragues d'Arnette (déferlements très puissants, zone dangereuse balisée et nombreuses épaves, parfois superposées à l'écueil quadrangulaire d'Arnette). Jusqu'en 1976, cette dégradation, liée aux seuls agents hydrodynamiques, se poursuit et se manifeste encore vers le SE, en direction de Carro. Le recul de l'HP, observé sur 11 ans y atteint

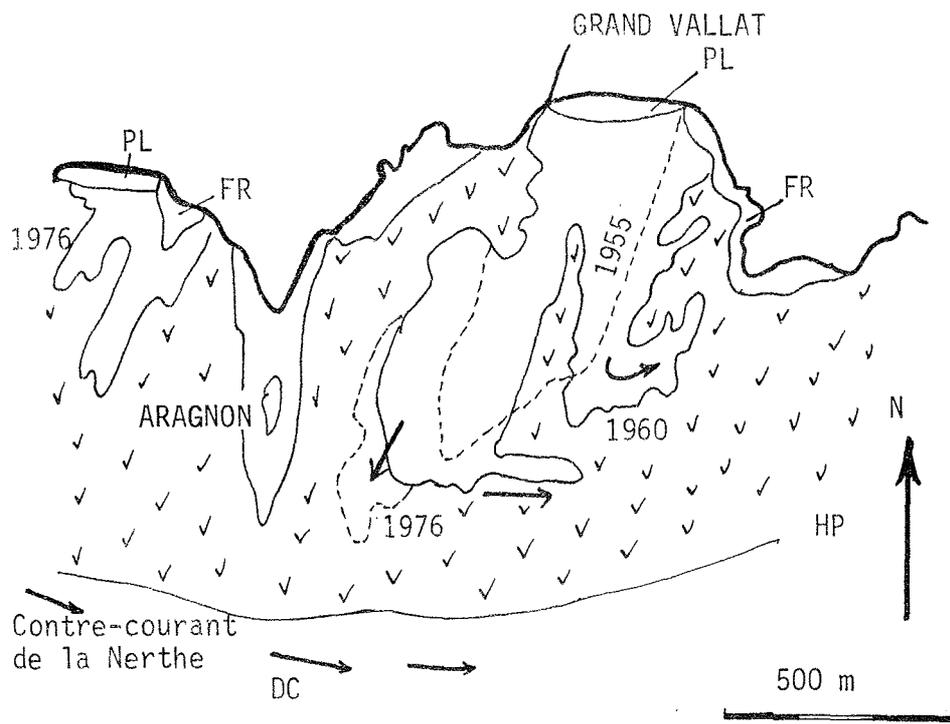


Fig. 13 - EXTENSION DES LOBES SABLEUX DE L'ARAGNON.

le taux de 1,4 m / A. De la même manière, l'écueil sous-marin balisé des Ragues de Carro, est balayé par les déferlements et les courants et montre un recouvrement sporadique de Posidonies. Autour de ces deux écueils ("Ragues"), se développent les sables et graviers liés aux courants de fond (SGCF) et les SGDC (sables et graviers du détritique côtier) (fig. 10).

+ Carro.

Contrairement aux sites précédents et pour la première fois en ce secteur, on note une reprise sensible des herbiers à Posidonies entre Carro et la "rague". La régénération concerne une bande de 500 m de long, sur 100 m de large sans qu'il soit encore possible d'en estimer la vitesse.

+ Anse du Verdon et Cap Couronne (fig. 10 et 11).

Une dégradation de l'HP paraît avoir été liée à l'extension des sables terrigènes du prisme littoral et des SFBC, notamment pour la période comprise entre 1955 et 1960. Cette érosion a eu pour effet d'oblitérer l'HP au centre et au débouché de la Calanque du Verdon, à l'exception des bordures de parois rocheuses et à la base des talus. Sous l'action d'un courant sagittal, les sables grossiers du prisme littoral (PL) se rassemblent aux deux côtés de la calanque, tandis que les SCBC sont établis dans la zone axiale. De même, à la Couronne - Vieille, l'herbier a montré une régression de 0,7 m / A, observée sur 11 A et les SGBC apparaissent "en traînée" depuis la dernière décennie.

Depuis 1976, on note une stabilisation apparente de la situation à l'anse du Verdon et à la Couronne.

B - La "zone d'ombre", du Cap Couronne à Sausset.

Malgré des caractères assez différents, on observe une évolution rapide en ce secteur plus abrité des pollutions et des influences du golfe de Fos (fig. 11 et 13). Les caractères suivants peuvent être dégagés :

1/ Erosion mécanique des HP observée dès 1955 avec progression de lobes d'accrétion sableux, ou sablo-graveleux (SFBC). L'extension de ces derniers, du rivage à l'isobathe - 20 m, arrivait déjà à interrompre le mode régulier des HP et réalisait, notamment à 600 m au Sud de Sainte Croix, la jonction avec les sables et graviers du détritique côtier (SGDC). Sur 16 années d'observation, l'extension des lobes de SGBC, aux dépens des herbiers, a atteint, au SSE de la Couronne - Vieille, le taux de 10 m / A.

Même remarque pour l'herbier littoral de Sainte Croix presque totalement détruit au rivage où la vitesse de recul mesurée atteint 8 à 9 m / A.

Au Sud de Sainte Croix, un lobe d'accrétion, suivi depuis 1960 (fig. 11), formé par les éléments sédimentaires des sables fins de hauts niveaux (SFHN) et les SGCF, poursuit sa progression continue et rapide en 1971. Puis, de - 14 à - 15 m, ce dernier se trouve dévié vers l'ESE par l'action du contre-courant permanent de la Nerthe qui se manifesta dans la masse d'eau à partir d'une certaine distance du rivage (700 à 500 m).

2/ En 1976, l'herbier superficiel est presque entièrement détruit, mais la situation se stabilise car l'herbier profond, dès - 20 m, hors de la zone H_1 , se trouve mieux protégé en deçà de la zone d'action des vagues moyennes et des courants de décharge. Ainsi, cet HP intact paraît amorcer un nouveau cycle.

3/ De part et d'autre de l'écueil de l'Aragnon, et de ses "tom-bants" rocheux sous-marins (fig. 13), creusés de surplombs souvent éboulés, les manifestations du recul de l'HP montrant une rapidité singulière et une aggravation de la situation.

- A l'Ouest de l'Aragnon, les tempêtes d'Est occasionnent un fort courant de décharge étalant les SFHN jusqu'à - 12 m. En 20 années, nous y avons observé un recul de l'herbier à la vitesse de 10 m / A, dans l'axe de l'épandage terrigène, il est vrai (fig. 13).

- A l'Est de l'écran rectiligne formé par cet écueil sous-marin, se poursuit l'extension du lobe sableux détritique du grand Vallat (fig. 13) : SFHN jusqu'à - 7 m et - 10 m, puis des SGCF, de - 16 m à - 20 m.

Le mouvement de recul de l'herbier obéit à deux directions :

. Composante liée aux vents d'Est, du côté occidental où se développe un courant de fond orienté du NNE vers le SSW (recul de l'HP de 8 m / A observé sur 11 A).

. Composante liée probablement aux vents des secteurs W, WSW ou W.NW, développant une migration du sédiment (houle "défléctées" de Mistral et Largeade augmentées de certains courants compensateurs liés aux régimes d'Est. Il en résulte une plus grande importance de cette dernière composante dont les manifestations sont observées depuis deux décennies. Le recul de l'HP, dans l'axe de l'épandage, mesurée sur 11 A, atteint la vitesse de 14 m / A.

- Au Sud de ce dispositif, dès la profondeur de - 21 m, la situation apparaît stabilisée depuis plus de 10 A et l'herbier profond, au large, demeure intact.

4/ Evolution de la zone au Sud de Sainte Croix et du Grand Vallat ; raccord avec les fonds en équilibre.

L'écueil et les hauts fonds de l'Aragnon, orientés N - S, canalisent les flux et accélèrent les processus d'érosion de l'herbier.

. Vers - 10 m, l'HP s'étend vers l'Est, dès la zone H₂, et sa *progression* a été évaluée à 100 m pour 5 A (20 m / A), suivant une direction W - E parallèle au rivage et à l'orientation du contre-courant de la Nerthe. Cette régénération locale compte parmi les plus rapides que nous ayons observé dans la région.

. Cette régénération est contrecarrée par une rapide régression de l'HP vers l'Est, au côté oriental de l'Aragnon où l'herbier a parfois reculé à la vitesse de 50 m / A, pour 5 A d'observation, ce qui constitue un maximum pour ce type de littoral.

En fait, la régénération des parties détruites de l'herbier n'apparaît que locale et ne concerne seulement que 25 % à 30 % des superficies perdues au cours des quinze années précédentes.

La présence d'écueils accélère généralement les manifestations de l'érosion sous-marine et malgré des reconstitutions locales, les herbiers à Posidonies connaissent une phase d'ablation rapide.

Le tableau suivant résume les observations précédentes :

Localisation	Etat de l'herbier	Hydrodynamique	Facteurs observés
Ponteau	Régression : 15 m/A rapide	H ₁	Envasement, pollution très active
Les Laurons	Régression continue	H ₁	Hydrodynamique Déflexion
Bonnieu	Régression	H ₁	Ensamblage Envasement
Arnette	Régression : 1,4 m/A	H ₁ - H ₂	Déferlement, Courants de fond
Anse du Verdon et Cap Couronne	Régression : 0,7 m/A à 10 m/A	H ₁ - H ₂	Courants de surface et de fond, déferlements, zone d'ombre
Sainte Croix	Régression : 8 à 10 m/A	H ₁ - H ₂	Courants de fond, vagues déferlantes
L'Aragon	Régression : 10 à 14 m/A	d°	contre courant de la Nerthe, lobes
Grand Vallat	Régression	d°	d'accrétion
	Stabilisation dès - 21 m Régénérations limitées	H ₃ et H ₂ inf.	Sédimentation et contre-courant de la Nerthe

III - 3 - L'ARCHIPEL DE RIOU ET LA CÔTE DES CALANQUES -

EXTENSION DES POLLUTIONS.

A - Agitation du milieu.

Au large de la côte des Calanques et dans les passes de l'archipel de Riou se manifestent des phénomènes d'érosion sous-marine en relation avec un régime de courants et dérives rapides : Mistral, W, W. NW et vents d'Est, E.SW (grosses vagues).

Le Mistral y forme des vagues très cambrées.

Le vent d'Est correspond à des vagues plus grosses où H peut atteindre 4 à 5,5 m par gros temps.

Les substrats sont généralement rocheux (écueils immergés de Miet et du Milieu) et les profondeurs faibles (6 à 11 m).

Au niveau du fond, par tempêtes ou mer "moyenne", des courants étalent le sable suivant des couloirs orientés E - W, parallèlement aux directions des courants des passes. L'énergie en cause parvient à déchausser par affouillement des dalles de grès würmien, excavant des "tombants", etc ... On y observe le faciès des SGCF s'insinuant entre les herbiers disséqués dont la superficie se réduit au cours du temps.

Depuis 1960, aux passes de l'archipel de Riou (fig. 14), les effets de la *seule* érosion mécanique paraissent en voie de stabilisation. On notera sur le plateau des Chèvres, mouillage du Four à Chaux et NE de Jaïré, des reculs localisés de mattes, notamment pour les petits fonds de la zone H₁ (- 4 à - 8 m), très exposés aux tempêtes d'Est.

Depuis 1960, s'étendent des "traînées" de SGCF à la grande Passe de Riou, au N de Fontagne et du Mounastéréou, par - 15 m (zone H₂), sous l'action des courants de fond.

Au pied des falaises rocheuses (calcaire à faciès urgonien) de l'Oeil de Verre et du Devenson (Côte des Calanques), les mattes de l'herbier sont assez dégradées, établies sur une blocaille anguleuse, comme à En-Vau. Jusqu'à une profondeur de - 8 m, les turbulences contre les parois sont d'une grande violence, en site exposé, et l'herbier n'apparaît que par "touffes" isolées. Puis, en zone H₂, l'HP se développe irrégulièrement, affouillé par les courants de décharge qui s'amortissent vers - 17 m.

On y observe des chenaux inter-mattes à graviers et sables

grossiers, débris bioclastiques et méga-ripples jusqu'à une profondeur de 14 m. Il s'agit donc de chenaux relativement profonds. A plus de 17 m, l'herbier à Posidonies se développe normalement, en zone H₃. Mais son extension demeure entravée par un envasement au voisinage du détritique côtier et très compromise par une *extension très rapide de la pollution* (fig. 14).

B - Extension de la pollution, le problème de l'égoût de Cortiou.

L'extension accélérée de la pollution est liée à la présence de l'égoût de Cortiou (émissaire de la ville de Marseille), se déversant directement en surface sans épuration préalable. Cette zone est surveillée depuis 30 années. Elle fait actuellement l'objet de recherches détaillées (MM. Picard, Bellan, Arnoux et collab.). L'aire contaminée s'accroît rapidement dans deux directions, aux dépens des peuplements de l'HP et du DC (fig. 14).

. Direction W.SW.

Liée aux régimes d'Est.

Le "rayon de contamination" à l'entour des deux débouchés de Cortiou montre les extensions suivantes, d'après les travaux des chercheurs du Centre d'Océanologie d'Endoume :

- 1945 ... 400 m
- 1950 ... 600 m
- 1960 ... 1 000 m
- 1976 ... 2 500 m.

Les HP au large de Podestat et des Keïrons ont été détruits au cours des quinze dernières années sur plusieurs km carrés.

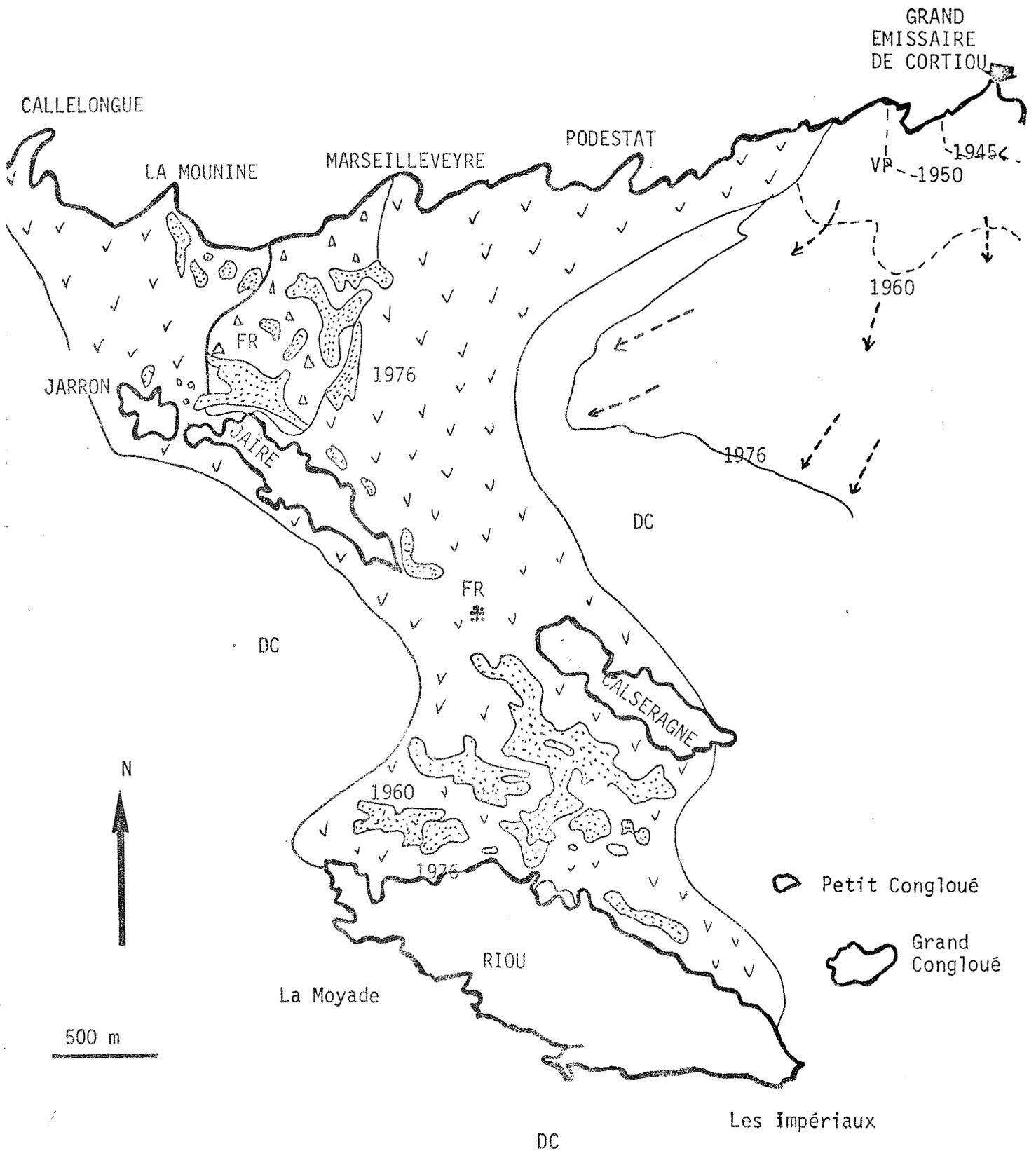
. Direction E.SE.

En relation, avec les régimes d'Ouest et avec le Mistral (N.NW, NW). Les aires polluées sont en train de contourner le cap Sormiou menaçant à brève échéance les herbiers de cette calanque. Cette composante est donc une rapide progression vers l'Est au taux *actuel* de 90 m / A. La régression de l'herbier n'est point seule en cause, mais elle s'accompagne de celle des peuplements coralligènes et de l'envasement accéléré du DC.

C - Recherche d'une solution.

La protection des fonds et peuplements marins, en voie de destruction rapide, au littoral du massif des Calanques et à l'archipel de

Fig. 14 - PASSES DE L'ARCHIPEL DE RIOU .



Riou, doit être immédiatement entreprise et apparaît très onéreuse. Deux opérations apparaissent nécessaires :

1/ Epuration normale et soignée des effluents avant leur arrivée à la mer,

2/ Rejet au large par un émissaire long de 5 000 m, par 90 m de fond, au niveau des fonds du "détritique du large" où la dilution serait satisfaisante, d'autres conditions se trouvant par ailleurs réalisées (thermoclines, influence du courant géostrophique permanent, orienté de l'Est vers l'Ouest). Malgré ces problèmes de financement, épuration, mise en charge et dispersion, on aboutirait à un assainissement du littoral et à une régénération certaine des herbiers.

Le site choisi demanderait une étude préalable détaillée. Il semble possible d'envisager un rejet au SSE de la Pointe de Caramassagne (Riou). Toute solution intermédiaire (économique) visant à établir un émissaire sous-marin moins profond et plus proche du littoral, dans le détritique côtier par ex., me paraît devoir être proscrite car on aurait une pollution continue des herbiers profonds et du DC, malgré de passagères améliorations.

III - 4 - ALTERATIONS DES FONDS D'HERBIERS : CAP CANAILLE, CAP SOUBEYRAN, BAIES DE LA CIOTAT ET DES LECQUES, POINTE GRENIER.

A - Cap Canaille et Cap Soubeyran.

Il s'agit de grands éboulis sous-marins bordant un littoral de falaises abruptes (grès turoniens) de 250 m de haut (Mont Canaille). Ce rivage désert demeure très exposé aux vagues de Mistral, W et W.NW. Par régime d'Est, l'exposition y est moindre, mais le milieu demeure toujours agité et les déferlements puissants sont accrus par un "semis" de blocs irréguliers (écueils immergés). Par gros temps, de forts courants de dérive entrent ou sortent de la baie de Cassis, parallèlement à la côte, suivant la nature du régime dominant.

Des vestiges d'HP dégradés s'observent entre les blocs, mais une destruction quasi totale est notée en zone H₁. Dès - 10 m ou - 12 m, se présentent des mattes dégradées par les épandages de galets tractés (voire de blocs). Les tourbillons autour des plus gros blocs, insérés dans

les mattes, déterminent des affouillements périphériques ("marmites annulaires") rapidement étendus au voisinage.

A une profondeur de - 27 m, l'HP devient homogène et non altéré (zone H3, absence de courants de décharge). Il passe, vers - 35 m, aux SGCF, puis au DC.(1)

La frange "utile" de l'HP se réduit avec le temps et le "mode régulier" passe maintenant au "mode dispersé", signe d'une altération et de déséquilibres notables.

Ces derniers sont le résultat de l'extension, durant plus de vingt années, de lobes détritiques formés par des éboulis et des SGCF (Blanc, 1975). Ces lobes d'accrétion se fusionnent de - 24 m à - 30 m, à la faveur d'une très forte pente, au Sud de la Grande Tête et vers - 42 m, au S.SE du Sémaphore de La Ciotat (fig. 15).

B - Problème des émissaires de Cassis et de La Ciotat.

. Emissaire de Cassis, Pointe des Lombards.

L'extension des SGCF dans la baie de l'Arène fait reculer l'HP depuis 1955 (date des premières observations), au taux de 4,5 m / A. Ce recul se manifeste du N vers le S. Les pollutions issues de l'émissaire de Cassis, débouchant à la surface (fig. 15), se dispersent suivant une trajectoire N - S, donnant quelques "boucles" serpentant au gré des régimes (contre courants), vers l'Est et la baie de l'Arène où la pollution s'avère aussi un facteur de régression de l'herbier. La pollution de l'anse de l'Arène s'accroît, aggravée par un taux de fréquentation trop élevé. Des recherches plus détaillées seraient nécessaires.

. Emissaire de La Ciotat (NW de Figuerolles) (fig. 15).

Progression de l'aire polluée vers le N.NW par vent d'Est et le SE, par Mistral, renforçant le courant côtier permanent dirigé vers le Cap de l'Aigle. En 1955, l'extension des effluents était très limitée (profondeur de l'accroissement du rivage : - 20 à - 35 m, accompagnée des caractéristiques d'un site très exposé). Il en est autrement depuis l'urbanisation rapide de la région de La Ciotat et la progression de la zone polluée s'est étendue, de 300 m à 600 m par rapport à la limite de 1955. Ainsi,

(1) Des recherches plus détaillées sont actuellement en cours dans cette zone.

Fig. 15 - COTE DU MONT CANAILLE ET DU SOUBEYRAN.



l'herbier, de mode régulier, a régressé de 15 m / A à 30 m / A.

- vers le NNW, la pollution s'étend jusqu'à l'anse du Canier,
- vers le SE : menace directe sur la calanque de Figuerolles en voie de contournement et qui commence à fonctionner comme un piège à détritits.

La pollution est ainsi très avancée au fond de la calanque de Figuerolles. En 1954, Molinier, Picard et Blanc relevaient un réseau de mattes à Posidonies encore vivaces malgré une érosion déterminant un tombant terminal en arc de cercle (zone de départ d'un courant de décharge). Actuellement, les mattes sont détruites, mais l'herbier demeure vivace en profondeur, de - 20 m à - 36 m, à la condition expresse que la pollution soit absente (Anse Gameau, Cap de l'Aigle).

Au débouché vers le large de la calanque de Figuerolles se situe un lobe de progradation formé de SGCF ("bouchon de calanque", cf. Picard, Blanc, 1974 - 1975). Ce dernier est coalescent en profondeur avec la crique de l'émissaire et l'anse Gameau. L'érosion des HP alimente le lobe précité. Il a été établi une migration du sédiment de - 28 m à - 52 m, avec "délestage" des courants compensateurs en milieu circalittoral (fig. 15).

C - Baie de La Ciotat (fig. 16).

La baie de La Ciotat se trouve exposée aux régimes d'Est, et de NW. L'abri du Cap de l'Aigle et de l'Ile Verte détermine la présence d'une zone de diffraction (Blanc, 1975). De même, à l'Est (baie des Lecques), on observera une zone de réfraction au N de la Pointe Grenier. Il en résulte plusieurs circuits comportant des courants de dérive temporaires, assez actifs, et des faibles courants permanents.

L'herbier se présente sous un mode régulier, jusqu'à - 32 m avec de fortes altérations au pourtour de l'Ile Verte où pivotent les houles et à la Passe des Cannoniers, encombrée par deux écueils, entre cette île et le Cap de l'Aigle. L'herbier y recule depuis 1946 et les courants de fond dispersent le matériel infralittoral remanié jusqu'à - 56 m, au SE de l'Ile Verte. D'où le développement des lobes de SGCF et de sables biogènes s'apparentant aux faciès du détritique côtier.

En bordure du littoral, l'extension des épandages du prisme littoral et des SFHN amène des modifications temporaires en zone H1 (fig. 16). Mais, dès 1955, la progression des sables lessivés du PL s'avère modérée et localisée à l'Est de la plage de Font Sainte (2,5 m / A). Il

Fig. 16 - BAIE DE LA CIOTAT.

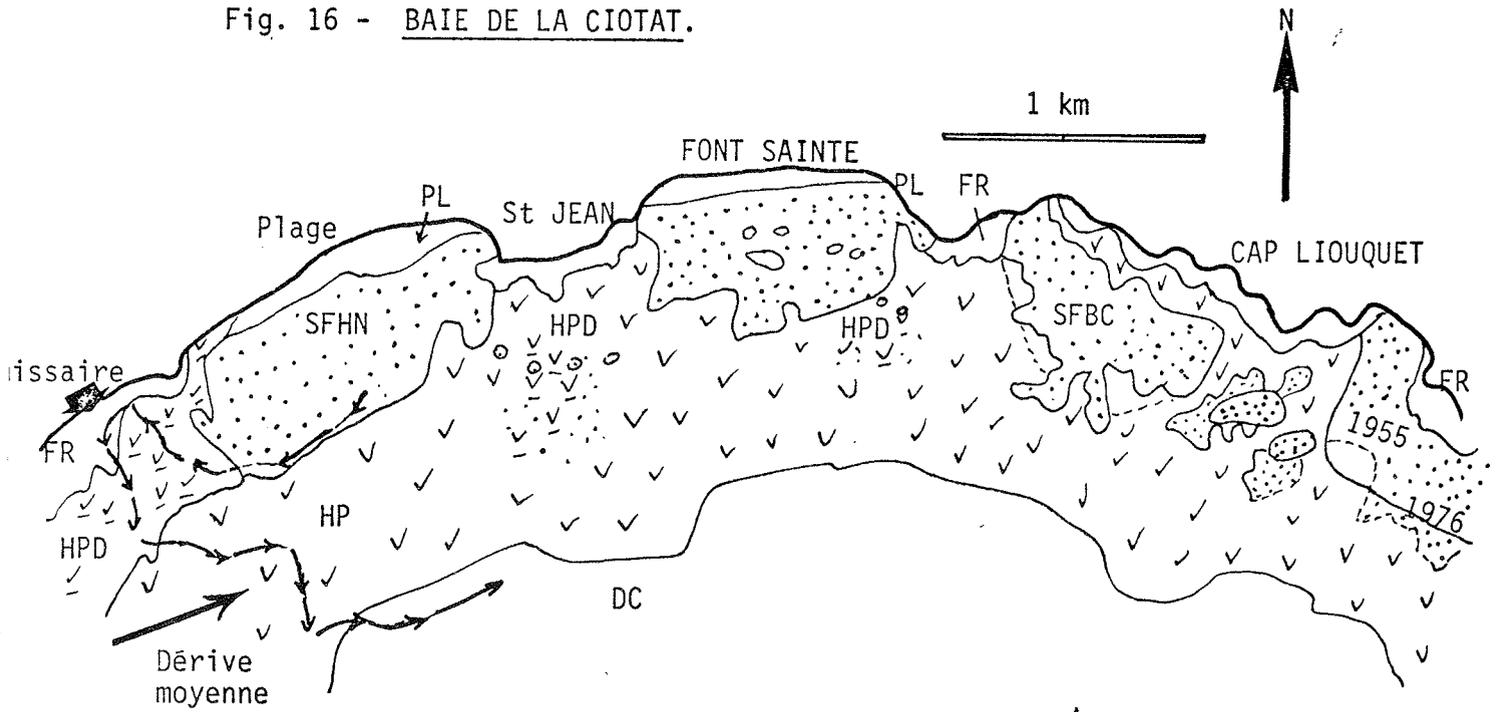
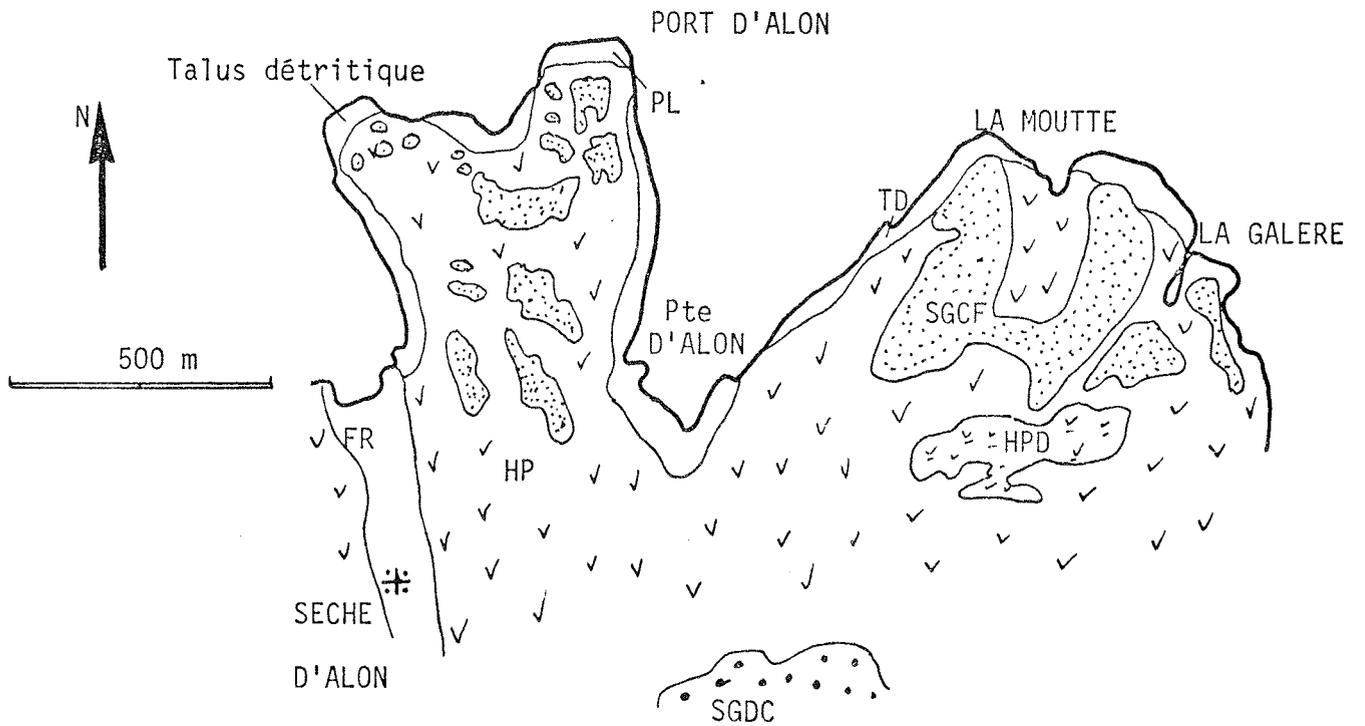


Fig. 17 - BAIE DE PORT D'ALON.



en est de même au Cap Liouquet.

En 1976, l'état des HP dans la baie de La Ciotat demeurait satisfaisant *malgré* :

- les rejets d'un émissaire près de la Villa des Tours. Ces derniers forment un panache suivi sur 2 km (thermographie I.R), dirigé vers le SE et ramené ensuite vers l'E.NE par le contre courant de la baie de La Ciotat au niveau de l'HP profond et du DC (- 35 m). Certains éléments sont ainsi dressés sur la plage de La Ciotat et de Font Sainte (littoral en cours d'aménagement). Les débits d'effluents et une dispersion moyenne ne paraissent point entraver sérieusement le développement des herbiers à la condition que le volume rejeté ne soit pas augmenté.

- les récents aménagements portuaires et la construction de jetées complémentaires à La Ciotat, sis sur le rocher. Les turbulences et déferlements ont été reportés sur un herbier littoral assez dégradé à l'origine. Il en résulte quelques érosions locales sans gravité, jusqu'à - 12 m (au large de la jetée externe : Mugel) et - 6 m (jetée de la Tasse et des Capucins).

En fait, malgré ces altérations liées aux activités humaines, interviennent avec succès *deux* mécanismes compensateurs :

1/ Régénération latérale des herbiers, vers le Cap Liouquet, notamment, résorbant les taches sableuses par de nouveaux implants naturels (marcottage),

2/ Stabilisation du front de l'HP vers le large. Nous y avons même noté une progression, depuis deux décennies, au taux moyen de 2 m / A, à la condition que les profondeurs s'avèrent supérieures à une moyenne de 20 m (zone H2).

D - Baie des Lecques.

. Zone du Cap Saint Louis.

Située la plus à l'Ouest et mieux exposée aux vents et houles du large, elle demeure assez dégradée par les courants de décharge : forte érosion des HP et même arrachement de dalles de grès (coriacien). L'herbier, assez malmené (mais très "propre") y demeure vivace malgré de fortes ablations jusqu'à - 12 m et même davantage. A - 25 m se situe un herbier dense et non dégradé (base de la zone H₂).

. Baie des Lecques.

Il s'agit d'une zone dégradée en état de rupture d'équilibre et fort exposée aux houles déferlantes d'Ouest. Le recul des HP est le résultat de l'extension des lobes terrigènes (SFHN), des rejets de matériaux et remblais, installations portuaires des Lecques au N et de la Madrague des Lecques, au S. Les courants de décharge ont étalé le matériel terrigène, aux dépens de l'herbier, jusqu'à des profondeurs de - 16 m en formant deux lobes. De ce fait, au Sud des Lecques, le recul des HP, en 21 années, est évalué à 7 m / A.

E - Madrague des Lecques, Pointe Grenier.

L'herbier recule ici au taux de 2 m / A et aucune régénération n'a été observée. Les petits fonds, jusqu'à - 12 m sont les plus altérés (zone H₁), surtout en milieu agité. Les tombants d'érosion atteignent 1 m à 3 m. De - 3 m à - 5 m, on observe des sillons d'affouillement avec transit de galets (diamètre : 7 à 19 cm). On note l'accumulation de débris (ordures) dans les chenaux et contre les tombants.

Dès - 10 m, l'herbier, assez dense, résiste mieux aux érosions si la pente n'est point trop forte. Les mattes présentent des "marmites" parfois colmatées par des lutites décantées. Plus au large, dès - 12 m, le passage aux formations de graviers infralittoraux, puis circalittoraux, montre quelques régénérations partielles. A ces niveaux, on constate une dilution des pollutions et l'affaiblissement de l'action des vagues.

En résumé :

Pour les secteurs C et D précités, le recul des herbiers à Posidonies, accentué au cours de ces dernières années, paraît être le *résultat conjugué* des pollutions, importants rejets de matériaux au littoral (en plus des décharges détritiques naturelles des ruisseaux le Fainéant et le Dégoûtant se jetant dans la baie des Lecques), actions hydrodynamiques (augmentation de la pente et diminution de l'abri).

Caractéristiques des secteurs examinés :

Localisation	Etat de l'herbier	Facteurs observés
Anse de l'Arêne (Cassis)	Herbier régressif : 4, 5 m / A	Emissaire, extension des éléments détritiques
Cap Canaille Cap Soubeyran	Herbier détruit jusqu'à - 10 m	Zone H ₁ , forts déferlements
	Herbier dégradé jusqu'à - 27 m	Zone H ₂ , courants de déchar- ge
	Herbier intact à plus de 27 m	Zone H ₃ , équilibre
	Lobes d'accrétions et fortes pentes, SGCF Mode régulier passant au mode imbriqué.	
Ile Verte, Cap de l'Aigle	Herbier érodé	Zones H ₁ et H ₂ , diffractions SGCF, mouvements en zone H ₃
Baie de La Ciotat	Mode régulier - Reculs 2,5 M / A - Equilibre relatif	Extension du prisme littoral et des SFHN, émissaire, Déferlements, Zone H ₁ Aménagements portuaires
	Régénérations dès - 12 m	Circuits courantologiques régime alterné, contre- courants
Cap Saint Louis	Erosion à plus de - 12 m Herbier en équilibre à - 25 m	Déferlements, courants de dé- charge - Base de H ₂
Baie des Lecques	Dégradation de l'herbier Lobes terrigènes, 7 m/A	Fortes houles d'Ouest, déchar- ges de matériaux
Madrague des Lec- ques Pointe Grenier	Recul 2 m / A, degrada- tion rapide jusqu'à - 10 m, Equilibre à - 12 m.	Réfractions, pollutions et décharges de matériaux

III - 5 - DEGRADATION MECANIQUE DES FONDS D'HERBIER A PORT

D'ALON, BAIE DE LA MOUTE.

A - Port d'Alon.

Milieu relativement agité malgré des conditions d'abri assez moyennes par Mistral ou vent d'Est. Dans cette large calanque, la croissance de l'HP est médiocre, discontinue, continuellement limitée par des érosions sous-marines étudiées depuis 1957 (Blanc, 1959). La zone axiale comprend des chenaux limités par des tombants de 1 m à 4 m.

- le tombant bordant le côté oriental correspond aux courants de décharge des vagues de Mistral,

- le tombant lié au côté occidental est en relation avec les courants de décharge des vagues de régime d'Est (fig. 17).

Ainsi, se développe un mécanisme alterné. Par fortes tempêtes, les courants de fond excavent le pied des tombants amenant le cisaillement des mattes surplombantes. A - 5 m, des galets de 4 cm de diamètre sont tractés ainsi que des graviers et des matières organiques.

Le long des talus, les mattes de l'HP sont inclinées et détruites par les courants orbitaires, les courants de décharge et les blocs calcaires dessertis de l'éboulis littoral. Les éboulis à la base des talus provoquent des remous supplémentaires et, comme à Canaille, on observe des "marmites annulaires" (- 5 m).

Les mattes dénudées à l'automne, arrasées par les tempêtes, sont parfois recouvertes d'un épandage de graviers (à - 6 m, diamètres : de 1,5 à 15 cm).

Les chenaux d'érosion se poursuivent de - 4 m à - 14 m, avec méga-ripples, matières organiques et divers détritiques. Galets et graviers peuvent s'y disposer en amas irréguliers tandis que se poursuit l'ablation des mattes.

Les modalités de l'érosion des HP montrent plusieurs stades : "taches" de graviers, dénudation et altération des mattes, mattes détruites avec touffes vestigiales de Posidonies. Un plan de détail montre un mode dispersé pour les zones les plus dégradées. L'érosion paraît maximale en zone H₁ et aux changements de pente des talus littoraux. Les chenaux sont :

1/ perpendiculaires au rivage (fig. 18) :

. débutant au pied des falaises et escarpements, avec encombre-

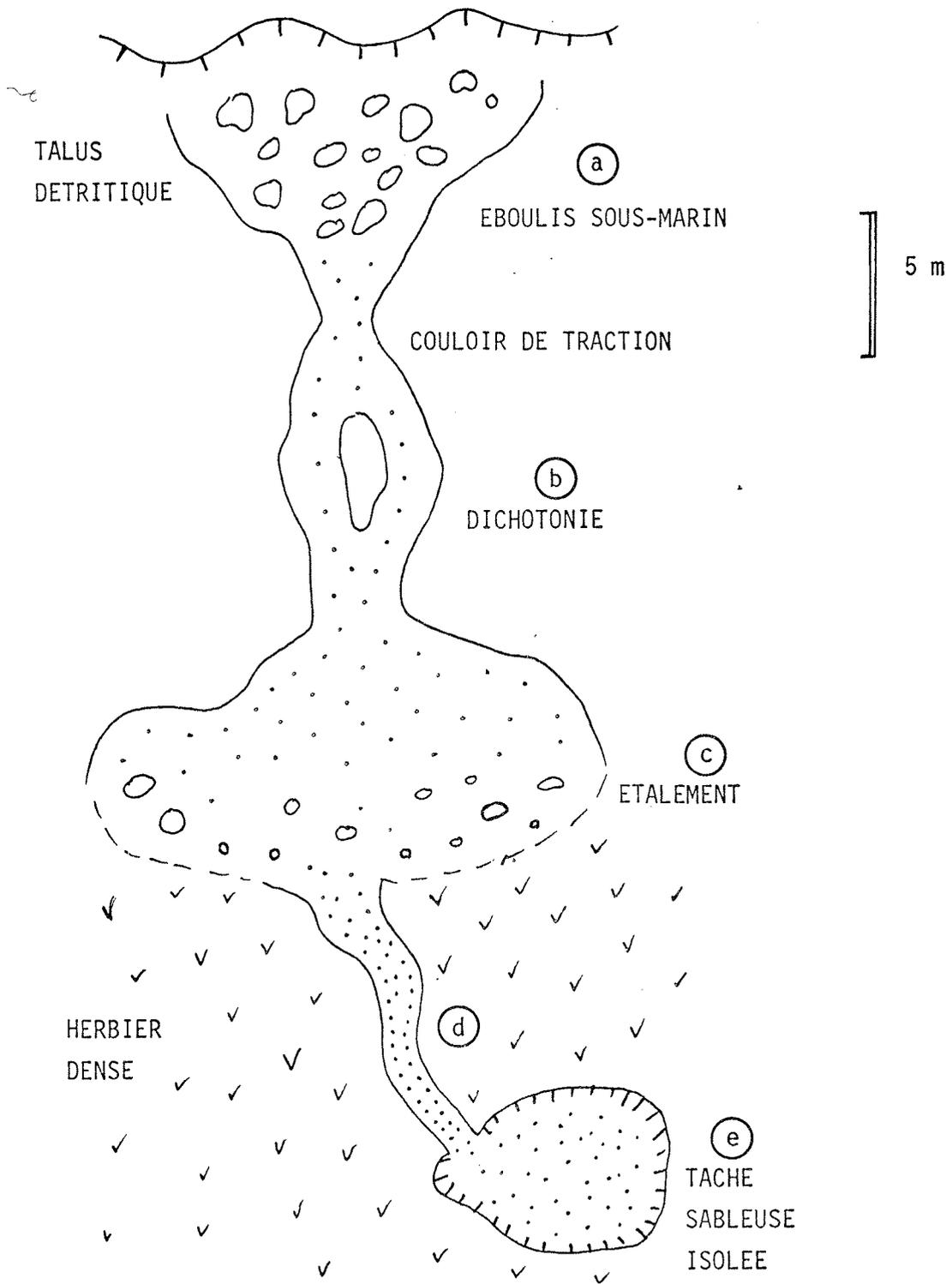


Fig. 18 - CHENAUX DE PORT D'ALON.

ments d'éboulis de blocs peu mobiles (diamètre 0,30 à 0,40 m) (zone a, fig. 18) : domaine H₁,

. continuation par un couloir de traction, long de 8 à 12 m, de - 5 m à - 7 m, jalonné de galets et graviers lessivés, gros blocs contre les parois, les déplacements y sont courants par tempêtes (zone b) : domaine H₁,

. puis, on note un étalement en profondeur, de - 8 m à - 10 m (zone c). Les blocs et les plus gros galets s'y déplacent peu ou par tempêtes exceptionnelles. Ils conservent leur revêtement algal durant de longues périodes d'immobilité. Les courants de décharge commencent à s'y ralentir, d'où la formation d'un *lobe d'accrétion* par phénomène de *délestage* en zone H₂,

. enfin, de - 12 m à - 15 m, (zone d) se poursuivent d'étroits couloirs sinueux et irréguliers reliant des "taches" isolées (e, fig. 18) ou des "marmites". A - 17 ou - 20 m, nous pénétrons dans l'herbier profond et dense mieux préservé (zone H₃ ou base de H₂ selon les cas). Dès - 15 m, on observe des possibilités de régénération.

2/ Chenaux longitudinaux (fig. 17) : suivant les axes de la calanque, jusqu'à - 14 m.

La *régénération* peut débiter sporadiquement et sans succès apparent dès - 10 m, sur les graviers des chenaux profonds. En deçà de - 15 m, cette dernière s'avère efficace, en eaux claires et non polluées. Malgré de fortes dégradations locales, surtout en zone H₁, quelques progrès ont été réalisés depuis la *floraison* de l'été particulièrement chaud de 1973.

B - Baie de la Moute.

L'herbier est bordé de lobes de SGCF et entaillé par des chenaux débutant au littoral, où se trouvent tractés à - 8 m de gros galets. A - 15 m ou - 20 m, on note un changement du régime hydrodynamique et de la pente du fond qui passe de 12° à 3°, d'où le freinage et l'amortissement des courants de décharge. De - 6 m à - 15 m, le diamètre médian du sable passe de 0,5 cm à 0,3 mm. Jusqu'à - 16 m, l'herbier est assez altéré par les érosions et les déplacements de sédiments par gros temps. Dès - 25 m, un herbier homogène se développe.

C - Tendances évolutives.

La dégradation rapide des herbiers superficiels apparaît pleinement :

. A Port d'Alon.

Depuis vingt années, la régression est assez rapide liée à une intense fréquentation du site, comme pour le cas de Port Man, au Parc National de Port Cros. On y soulignera l'action néfaste des mouillages répétés arrachant les frondes de Posidonies, des pollutions et accumulations de détritiques et des rejets de matériaux terreux.

Ainsi, le mode imbriqué est passé en zone supérieure, à un état dispersé, 25 % de la surface des HP ont été perdus en 20 A et on soulignera quelques reculs localisés à la vitesse de 2,5 m / A à 5 m / A. Dès - 20 m, l'herbier apparaît plus homogène et non dégradé.

. A la baie de la Moute.

On observe la stabilisation de deux lobes d'accrétion contigus, en forme de H (fig. 17), depuis les deux dernières décennies. Au Sud, vers les Engraviers, on note l'extension d'un herbier et de mattes dégradées de - 15 m à - 25 m. Il y aurait donc en profondeur d'autres causes locales de régression au voisinage des sables du détritique côtier.

III - 6 - LA BAIE DE SANARY ; UN HERBIER TRES MENACE.

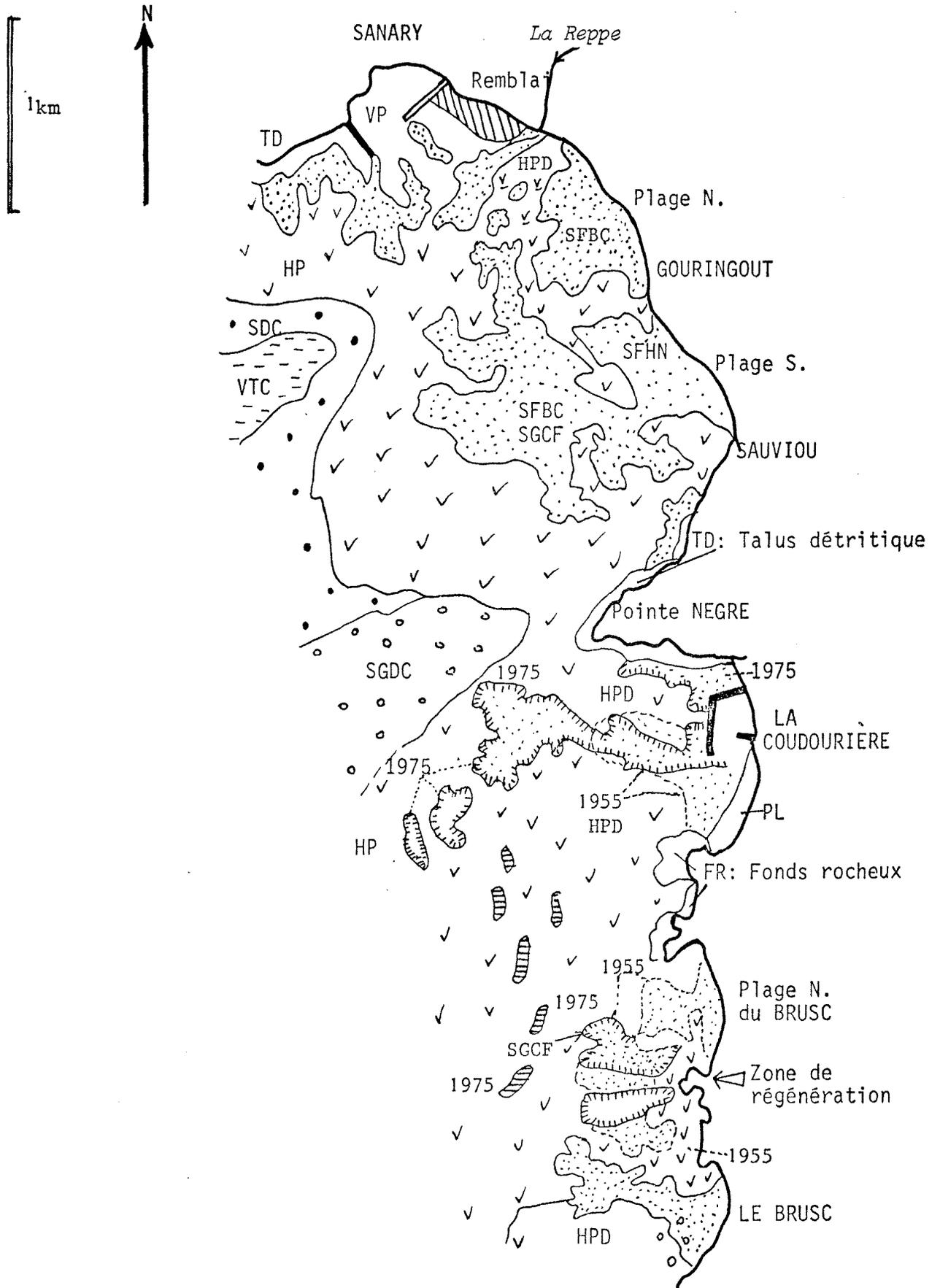
De Sanary au Brusco, les fonds littoraux montrent une répartition complexe en relation avec plusieurs régimes de vagues obliques incidentes, des circuits courantologiques variés et un envasement assez progressif de la baie de Sanary (Blanc, 1975) (fig. 19).

Nous distinguerons plusieurs secteurs, du N au S, en relation avec un HP fortement dégradé.

+ Au Sud du Port de Sanary.

Depuis 1955, date des premières observations, l'HP paraît subir une régression continue, en rapport avec les décharges de la Reppe (très forts débits et inondations locales à Ollicioules par violents orages) et les pollutions de cette rivière, l'établissement de jetées et surtout de

Fig. 19 -
BAIE DE SANARY



remblais. Ces derniers, accompagnés de décharges de matériaux, ont reporté les turbulences au niveau de matras d'herbiers. La Reppe forme un lobe détritique très pollué (fig. 19), orienté NE - SW.

En 1960, la poursuite de l'ensablement et des pollutions de la Reppe organisent une dégradation des matras et une extension des taches sableuses au SE de Sanary, par une jonction "en tenaille" à quelques hectomètres au Sud des jetées (phénomènes de diffraction possibles, mais non établis).

L'action de la Reppe et les fortes vagues obliques ont fait, en ces lieux, reculer l'HP aux taux de 5 m / A à 10 m / A, pour cinq années d'observations.

+ Plage de Gouringout.

Les vagues obliques déterminent à cet endroit un système de tourbillons et de courants "en cardioïde" (Blanc, 1959) érodant la plage et disséquant l'herbier. Sur le rivage, s'observent des colmatages et érosions avec de petits transferts alternatifs. Depuis 1960, malgré des rejets de matériaux et des pollutions, l'évolution paraît se stabiliser en deçà d'une profondeur de - 7 m. Au-dessus demeurent quelques vestiges de matras dégradées.

On observe deux lobes d'accrétion formés de SFHN et de SGCF, aux contours très tourmentés, se contournant et s'anastomosant (fig. 19). Des replis, liés à des courants de décharge (vagues et tempêtes de Mistral) sont assez spectaculaires vers le Sud, devant Sauviou.

Jusqu'à - 12 m (zone H₁), l'HP demeure fortement altéré. Puis, il est stabilisé jusqu'à - 20 m de profondeur et passe graduellement aux SGCF et au DC, comme le montrent les recherches de Muschotti (1973).

+ Baie de la Coudourière.

Au Sud de la Pointe Nègre, on note l'extension rapide, d'un lobe sableux d'accrétion vers l'Ouest sous l'action de courants compensateurs issus des vagues de tempêtes d'W et W.NW. Des décharges répétées de matériaux ont accentué les colmatages de ces fonds (rejets des carrières de la Coudourière), jusqu'à - 15 m et - 25 m. Durant deux décennies, la progression s'est réalisée à une grande vitesse "moyenne" : 40 m / A. l'HP a donc régressé d'autant.

En profondeur, pour des fronts de 200 à 300 m, l'HP a aussi reculé aux dépens des graviers infralittoraux (- 20 m) en relation avec l'évolution générale de la baie de Sanary (Muschotti, 1973 ; Blanc, 1975). Les causes exactes ne sont encore point connues et l'envasement, marqué par la progression des VTC n'est point seul en cause. Il semblerait que de violents courants de fond, en relation avec des ondes de tempêtes, puissent être évoquées. En vingt années, quoiqu'il en soit et sur plusieurs fronts, le recul de l'HP peut être estimé à 900 m (vitesse moyenne de recul : 45 m / A). Cet exemple peut être considéré parmi les plus alarmants avec les cas observés à Giens. La zone maximale de dégradation s'étend vers l'Ouest jusqu'à - 20 m et davantage réalisant la jonction avec les sables et graviers du détritique côtier (DC). L'herbier atteint ainsi le mode dispersé correspondant à une nette rupture d'équilibre.

+ Plage Nord du Brusé.

Les lobes d'accrétion notés en 1955 sont maintenant interrompus, en des sites mieux abrités, par une régénération de l'herbier qui, à proximité du rivage, a regagné de la superficie par accroissement latéral, à la vitesse moyenne de 12 m / A. Cette fixation bénéfique du fond, caractérisant cette zone littorale au Sud de la baie de Sanary est également liée à un déplacement latéral des axes de courants sagittaux en relation avec les vagues d'Ouest. On notera, d'autre part, l'absence de rejets de matériaux en cette portion du rivage.

Mais, plus au large, de - 15 m à - 25 m, se continue une érosion discrète des HP. On y observe des couloirs allongés et fermés, des "marmites" longitudinales orientées N - S (fig. 19). Un mécanisme analogue a été observé à Giens (Blanc, 1975). Il constitue la phase initiale de l'établissement d'un *réseau parallèle au littoral* référable à l'action de "long shore currents" en zone H₂.

En résumé :

Localisation	Etat de l'herbier	Facteurs observés
Sud de Sanary	Dégradation rapide, Erosion Apports terrigènes, Recul 5 m / A à 10 m / A	Pollutions et apports terrigènes de la Reppe, diffraction vagues incidentes sur les jetées
Plage de Gouringout	Destruction au-dessus de - 7 m, altération à - 12 m Equilibre à - 20 m (H ₂)	Vagues obliques, circuits tourbillonnaires et courants en cardioïde. Deux lobes d'accrétion complexes, diffractions sur ouvrages
Baie de la Coudourière	Rejets et colmatages jusqu' à - 15 m et - 25 m, Régression très rapide : 40 m / A Régression en profondeur (- 20 m)	Rejets de matériaux s'ajoutant à lobe d'accrétion en progression, courants compensateurs, envasement de la baie de Sanary par extension des VTC
Plages Nord du Brusac	Régénération latérale de 12 m / A	Déplacements d'axes de courants sagittaux, pas de rejets
	Erosion profonde de - 15 à - 25 m	Organisation d'un réseau parallèle au rivage : "long shore currents"

III - 7 - LA BAIE DU BRUSC : UN DOMAINE COMPLEXE EN COURS

D'EVOLUTION.

A - L'état initial.

Les conditions sédimentologiques et hydrodynamiques particulières à la Baie du Brusco ont été décrites par ailleurs (Blanc, 1959 - 1975) et nous ne considérerons ici que l'évolution des herbiers à Posidonies.

En 1955, l'état des herbiers montrait une altération déjà avancée par le fait des facteurs dynamiques (houles, vagues, courants et déferlements), en premier lieu et d'envasements en progression pour la zone septentrionale (baie de Sanary), en deuxième lieu (fig. 20).

+ L'érosion mécanique se manifeste, en zone H₁, au niveau des plages et des écueils. La conséquence des forts déferlements se traduit par des courants compensateurs et notamment, des courants sagittaux, au N du Brusco. En zone H₂, les courants de décharge érodent les mattes sous la forme de sillons et chenaux orientés généralement N - S, en relation avec des régimes de tempêtes d'W, W.NW et NW et des courants de passes pour l'archipel des Embiez. Ainsi, de forts ravinements sont observés à l'écueil des Magnons, le plus au large à l'Ouest, à la passe entre les Magnons et le Grand Rouveau, à la passe entre le Grand Rouveau et l'Ile des Embiez et, enfin, au voisinage des trois écueils constituant le Petit Rouveau. Dès - 18 m ou - 20 m, un vaste herbier se trouvait en équilibre et, au Sud de Sanary, s'étendait largement dans la rade du Brusco.

+ De - 25 m à - 42 m se manifestait un léger envasement lié au colmatage de la baie de Sanary et aux apports de la Reppe (Chamley, 1971).

Dès 1952, Molinier et Picard signalaient un fort envasement en progression, au Sud de la baie du Brusco, en arrière du front d'émergence de l'HP. Ce colmatage se présentait sous la forme de graviers mixtes (quartz, phyllades et bioclastes), de sables vaseux à Cymodocées et de sables vaseux de mode calme (SVMC) (fig. 20).

+ Au Sud de l'archipel des Embiez, tourné vers la haute mer, en milieu très exposé à tous les régimes et sur de fortes pentes, un her-

bier étroit borde directement le rivage et les nombreuses roches sous-marines (fig. 20). On y observe un mode régulier déjà altéré, avec, à partir du littoral des Embiez et du massif de Sicié, la séquence : HP - SGDC - DC. On note le développement de quelques ravinements normaux et de lobes d'accrétion, notamment à la passe située entre le Grand Gaou et l'Île des Embiez.

B - Etat intermédiaire : missions 1960.

1/ Passes et écueils de L'archipel des Embiez :

- à l'Ouest de l'écueil des Magnons, forte extension d'un lobe détritique de SGCF au taux de 10 m / A, en direction de l'Ouest,
- au Grand Rousseau : légère extension des SGCF,
- au Petit Rousseau : stabilisation de l'herbier dégradé,
- au Grand Gaou : régénération naturelle des HP à la passe des Embiez.

Deux processus contradictoires se développent : continuation de l'érosion des HP au Nord de l'archipel des Embiez et régénération partielle de ces derniers.

2/ Zone Nord du Brusé.

Les lobes sableux paraissent en voie de stabilisation. On observe une progression du N vers le S, d'un herbier dense recouvrant d'anciennes mattes assez altérées. Ce bilan positif, observé sur cinq années, se développe très rapidement à la vitesse de 14 m / A à 30 m / A.

3/ "Récif barrière" de Posidonies et "lagune" du Brusé.

- zone "off shore" : le front septentrional de l'herbier émergent présente une régression malgré l'état vivace des Posidonies. Le "filtre" de l'HP émergent est parfois arraché par les tempêtes sur 50 % de sa longueur. Il n'y a pas d'élargissement notable des chenaux et mattes emboîtées observées de 1953 à 1955 (Blanc, 1959).

- zone "in shore" : dans la lagune on observera l'extension des SVMC (décantations) et des sables à Cymodocées aux dépens des graviers (poursuite d'un envasement).

4/ Littoral accore du Sud des Embiez et du Brusé.

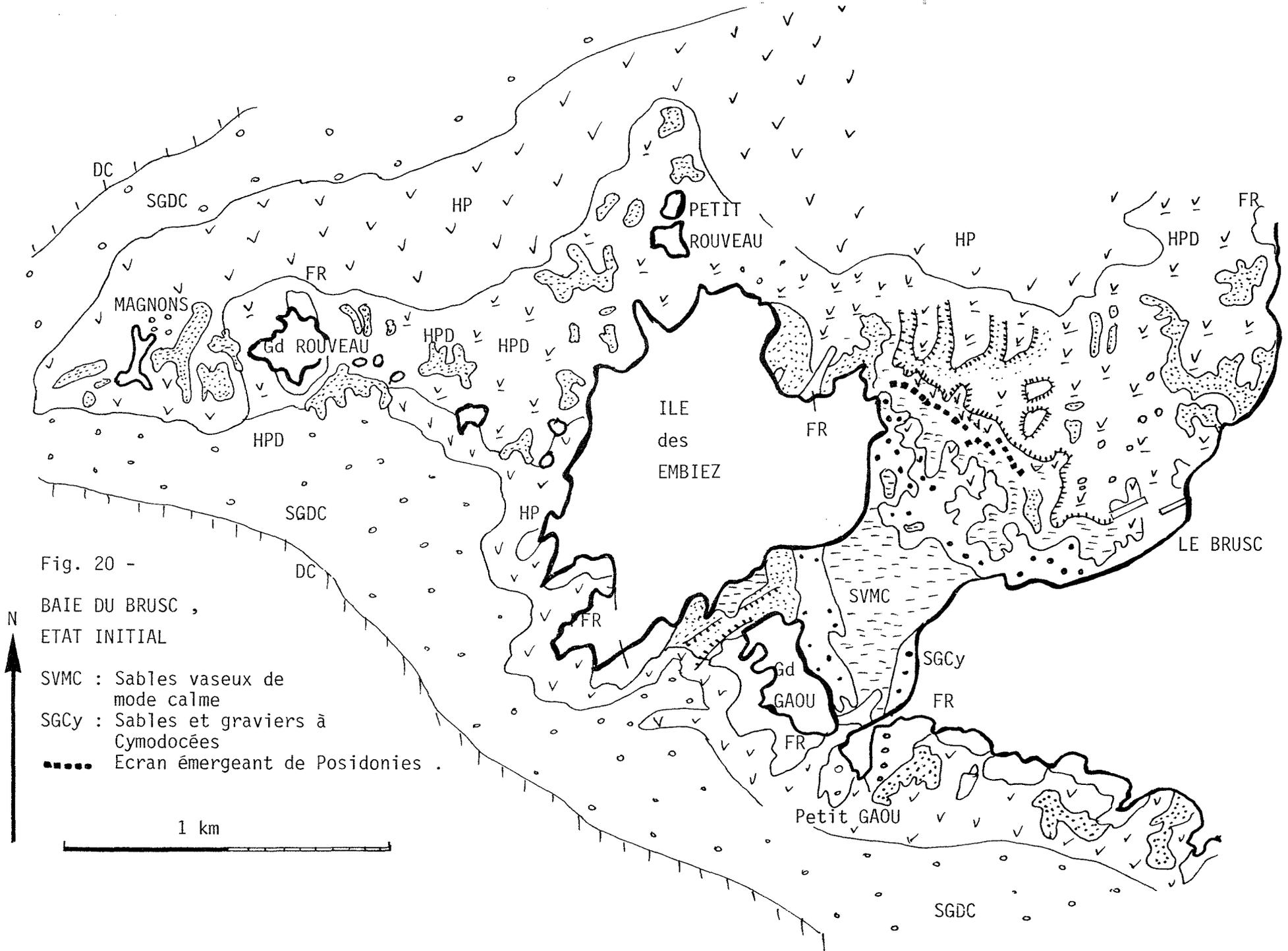


Fig. 20 -
 BAIE DU BRUSC ,
 ETAT INITIAL

- SVMC : Sables vaseux de mode calme
- SGCy : Sables et graviers à Cymodocées
- Ecran émergeant de Posidonies .

1 km

L'érosion apparaît réduite et une régénération de l'HP fait apparaître un bilan légèrement positif.

C - Etat actuel.

Missions 1975 et 1976 (fig. 21). Plusieurs remarques peuvent être dégagées après deux décennies d'observations :

1/ Recul général et dégradation des HP au Nord de la baie du Brusco et de l'archipel des Embiez : aux taux de 5 à 10 m / A entre le Grand et le Petit Rousseau et 20 m / A au N et N.NW des jetées du Brusco. Une étude des sites a permis de mettre en évidence les facteurs suivants :

- 1) Présence de courants de décharge et de courants sagittaux
- 2) Chocs, déferlements et réflexion des vagues obliques, notamment pour le secteur septentrional,
- 3) Travaux portuaires au Brusco et à l'île des Embiez, (jetées, bassins creusés, mouillages, rejets, et accentuation de la "macro-pollution" malgré des efforts sérieux en voie de progression).

2/ Maintien et développement modéré des HP au Sud des Embiez, du Brusco, et de la partie occidentale du massif de Sicié. Le mode régulier y persiste du fait de l'absence de décharge et d'aménagements littoraux. Les fortes pentes amènent rapidement, vers - 35 m, le contact avec les SGDC et, à - 50 m, avec le DC s. 1.

La régénération et la progression de l'HP peuvent se développer en milieux très agités, notamment à :

- S de l'écueil des Magnons, écueils intermédiaires et Grand Rousseau : vitesse de 2,5 m / A à 5 m / A.
- Ouest des Embiez et passe du Grand Gacou : vitesses de 15 m / A à 20 m / A.

Cette zone très exposée se trouve à peu près dépourvue de pollutions (visibles) et exempte d'aménagements. Il en résulte que le bilan positif actuellement observé correspond à un *changement naturel du cycle alternant érosion - accrétion*. La période de ce cycle, compte tenu de nos observations (insuffisantes) serait, peut-être, de l'ordre de 35 à 45 ans à titre d'hypothèse.

Quoique jouant un rôle *moteur essentiel* dans les cycles érosion - accrétion de l'HP, les conditions hydrodynamiques demeurent relativement indépendantes si on les considère pour une large échelle de temps (plus de 20 à 25 années). Il en va tout autrement à court terme (quelques années). En fait, *la profondeur et la régularisation des fonds, liées aux taux de sédimentation, apparaissent les facteurs essentiels, pour des cycles du 1er et du 2ème ordre, car ils conditionnent la situation des zones H₁ et H₂ vis à vis des herbiers à Posidonies.*

3/ La "lagune" du Brusco (fig. 20 et 21) constitue une *zone fragile*, confirmant les premières observations de 1952. Elle se trouve en communication avec le domaine "off shore", par l'intermédiaire de *courants de dérive* (2,5 à 4 m / mn : vent d'Est modéré, 34 m / mn par fort Mistral) et de *courants de marée*.

On mesure des dénivellations pouvant atteindre 0,40 m au fond de la baie du Brusco, découvrant ainsi une frange médiolittorale. Des phénomènes de résonance, non étudiés, combinés à des fortes fluctuations barométriques, peuvent accentuer ces déséquilibres du plan d'eau.

Les sables et graviers à Posidonies et les SVMC ont continué leur extension, notamment vers le Nord aux dépens d'un ancien herbier émergent, très vivace, à Posidonies. A l'exception de quelques vestiges, les îlots de mattes en "buttes témoins" et les chenaux avec mattes de deuxième génération, ont presque partout disparu.

La construction de la nouvelle jetée Ouest du port du Brusco et un important remblai, ont amené la destruction d'un proche herbier à Posidonies et de sables vaseux à Cymodocees.

La sédimentation "in shore" de la "lagune" du Brusco n'a point été étudiée dans le détail. Assez hétérogène, on peut y distinguer les ensembles suivants :

1) Graviers biogènes autochtones ou sub-allochtones. En ce dernier cas, ils proviennent de l'érosion de l'herbier frontal (type 1) et sont tractés par les courants de dérive s'exerçant dans une tranche d'eau de plus en plus faible : de 2,5 m à 0,5 m.

2) Sables vaseux et lutites sableuses, hétérométriques, à Cymodocees, d'origine mixte, terrigène et biogène.

3) Sables vaseux et lutites assez argileuses, d'origine terrigène, formant des amas ("*mud mounds*") dans les zones de décantation (zones

"d'ombre" des courants et fonds quasi-horizontaux), découvrant parfois à marée basse, dans l'angle SE, près des rochers des Gaou.

L'hydrodynamique de ce secteur appelle les remarques suivantes :

- abri des fortes vagues,
- faibles dénivellations liées aux marées s. l,
- courants équilibrant les dénivellations des plans d'eaux, amplifiées par les résonances, et empruntant les passes des Gaou.

Ce renouvellement naturel des eaux est essentiel au Brusca et ne doit être entravé en aucun cas, sous peine de créer rapidement une zone envasée putride où s'accumuleraient les détritits et les matières organiques.

L'examen détaillé des accumulations de sables et graviers à Cymodocées montre une répartition en bandes allongées, orientées NNW - SSE ou N - S, larges de 80 m à 100 m et espacées de SVMC constituant des interruptions de 50 à 100 m, sub-périodiques. Comme pour les baies de Fréjus et les étangs de Thau, Maughio et La Roque (Camargue), nous observons ici des accumulations sédimentaires au niveau des nodales (*seiches*) (Bellaiche, 1970 ; Blanc, 1975) (fig. 21).

4/ Conséquences pratiques des nouveaux aménagements :

4.1 : Epis :

L'implantation de deux épis, au NE du Brusca, a stabilisé le littoral et engraisé une plage artificielle (fig. 21). Mais la réussite de ces ouvrages au niveau du rivage s'accompagne, en profondeur, de phénomènes de *déflexion* de courants et d'ensablements amenant un lobe terrigène contourné progressant aux dépens d'une matte.

4.2 : Extension des jetées, remblais et mouillages du Brusca :

Le résultat est la destruction des mattes et de la zone SE de l'HP en voie d'émersion ; destruction également des herbiers abrités à Cymodocées. Le nouveau môle accentue les chocs des houles obliques incidentes aux dépens de l'herbier frangeant et des mattes voisines.

4.3 : Port des Embiez : Déblais, bassins creusés et nouvelles jetées. Cet ensemble ne paraît point comporter d'actions néfastes du fait de la dégradation naturelle initiale du site.

Au Nord du port des Embiez, on observe l'extension des mattes

dégradées (sur plus de 200 m d'emprise) au détriment de l'herbier profond équilibré. Ce recul, éloigné de 500 m à 600 m, apparaît indépendant de l'établissement des jetées et doit être attribué à la phase normale de l'érosion des herbiers liée aux facteurs précités. Un remblai, au Nord de l'installation est à surveiller, mais il n'apparaît point dangereux, car il recouvre un talus d'érosion et des fonds initialement dégradés.

4.4 : Conduite à tenir : Nous déconseillons l'installation de tout nouvel aménagement en cette zone. En outre :

- rejets de toute nature à prohiber,
- maintenir *impérativement* le renouvellement des eaux à la "lagune" du Brusco,
- le littoral rocheux et abrupt du Sud doit constituer une zone à protéger. Ce sera à partir de cette dernière que l'on peut espérer une reprise naturelle et partielle des herbiers à Posidonies.

III - 8 - TOULON SUD : L'HERBIER DES SABLETTES.

A - Caractères généraux.

Le courant général géostrophique, orienté de l'Est vers l'Ouest, à faible vitesse (0,4 n.), passe au large de Saint Mandrier et du Cap Sicié, au niveau duquel il s'accélère légèrement. Ce mouvement donne un *contre-courant*, orienté de l'Ouest vers l'Est, au voisinage du littoral, dans la baie des Sablettes. Ce dernier a une influence dans le transport des sédiments issus du massif métamorphique de Sicié et se trouve renforcé par de fortes dérives de Mistral (Blanc, 1959) (fig. 22).

L'herbier des Sablettes, initialement de mode régulier (séquence : PL, HP, SGCF, DC) est passé en vingt années au mode imbriqué, puis dispersé. Cette dégradation accélérée risque de se traduire par une rupture, peut être irréversible, des équilibres naturels. Essayons d'en analyser les causes.

B - Baie des Sablettes.

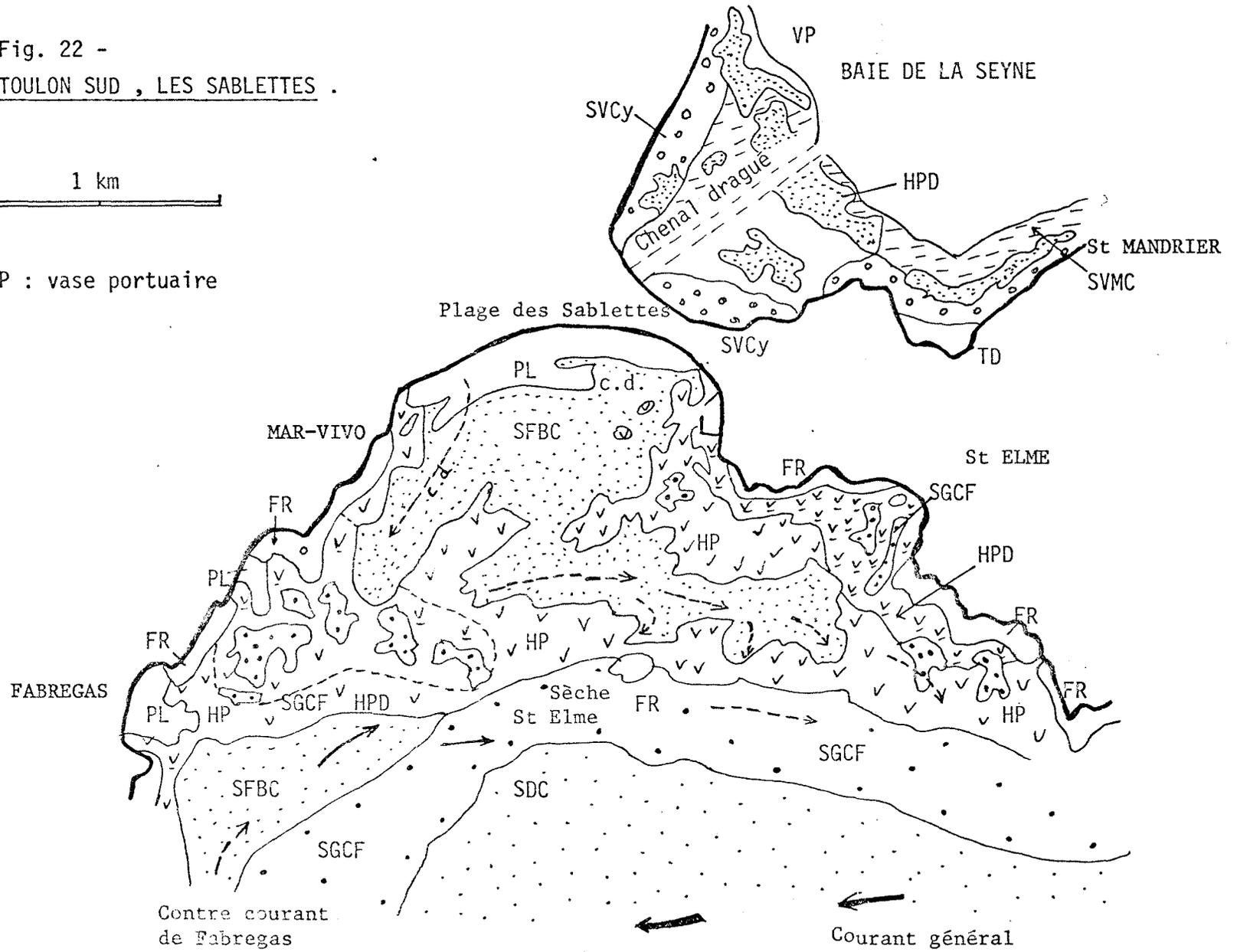
L'HP est disséqué par une forte érosion sous-marine accompagnée d'un important épandage de sable issu du PL et des SFBC, voire SFHN. L'action des seuls agents mécaniques semble devoir être évoquée. La pollution



Fig. 22 -
TOULON SUD , LES SABLETTES .

1 km

VP : vase portuaire



liée à l'émissaire de Toulon, au Cap Sicié, ne semble point en cause du fait de l'excellente dispersion des effluents en zone profonde et agitée.

Les lobes d'accrétion sont perpendiculaires au rivage jusqu'à - 8 m (fig. 22), en zone H_1 . De - 10 m à - 14 m, ils présentent un changement net dans leur direction et s'étendent parallèlement au littoral, de l'Ouest vers l'Est, sous l'influence du déplacement général des masses d'eaux (contre-courant). Ce transfert sous-marin longitudinal est observé sur 1 500 m et ne paraît fonctionner que par gros temps.

La présence d'un écueil sous-marin rocheux (Sèche de St Elme à - 8,7 m) provoque une réfraction des ondes incidentes obliques avec une dissipation de l'énergie à partir de houles à $T = 3$ sec (mer "belle"). D'où une protection naturelle efficace de la plage des Sablottes. Cependant, l'herbier situé entre le rivage et la Sèche de St Elme, demeure, de 0 à - 20 m, profondément érodé en zones H_1 et H_2 par des mouvements transversaux et longitudinaux. A partir de - 35 m, dans les sables du DC, les mouvements s'atténuent au niveau du fond.

C - Baie de la Seyne - Sud.

La zone méridionale de la baie de La Seyne, comportant des herbiers et seule étudiée, représente partiellement l'aboutissement de l'évolution d'un mode abrité, "type Brusco", sans communication avec la pleine mer, du fait de l'isthme sableux de St Elme. La dégradation y est totale par l'envahissement des envasements, rapides en baie de Toulon, et des pollutions.

Les actions hydrodynamiques sont faibles et se bornent à des clapotis de surface, seiches et marées (amplitude : 0,20 m). Il n'y a pas d'érosion mécanique. Le dragage d'un chenal (fig. 22) a amené le cloisonnement de ces dispositions.

Près du rivage, on observe un sable vaseux à Cymodocées, analogue à celui du Brusco, puis des SVMC recouvrant d'anciennes mattes brusées, une frange irrégulière externe et quelques îlots témoins de mattes dégradées. Extérieurement, les vases gluantes de la baie de Toulon, dès - 5 m, envahissent et colmatent les fonds.

La *frange externe* de l'herbier dégradé correspond aux vestiges d'un "filtre" émergent, formant un écran, maintenant détruit, analogue à celui du Brusco.

Accompagné de pollutions, l'envasement est total ; des mattes enfouies paraissent orientées NW - SE. Les décantations, au fond de cette

"impasse" aboutissent, comme à Fos et au Brusq, au dépôt des SVMC et au développement d'une "pelouse" à Cymodocées.

III - 9 - TOULON - EST : LES HERBIERS DE LA GARONNE ET DE LA POINTE DE CARQUEIRANNE.

A - Introduction.

Les HP montrent un état de régression assez continu. A l'exception de la côte accore méridionale (Pointe de Carqueiranne ; cf. Cap Garonne), l'évolution tend vers un état de dégradation : le mode régulier initial passe au mode imbriqué et même dispersé au Sud des plages du Pradet (fig. 23).

Le secteur considéré : plages du Pradet, de la Garonne, baie de l'Oursinière, Pointe de Carqueiranne, est assez fortement exposé aux houles d'Ouest (régime de Mistral) et d'E. SE (houle réfractée). Des épandages pollués, issus de l'Ouest, du Cap Brun à l'Eygoutier, progressent en direction de la Garonne et de l'Oursinière, en relation avec une urbanisation rapide de la région est - toulonnaise.

B - Deux facteurs apparaissent primordiaux.

1/ Envasement et pollution à partir de l'Ouest et à une certaine distance du rivage (400 m à 1 200 m) (fig. 23). Le contre-courant de la baie de Toulon - Est, orienté de l'W vers l'E, augmenté par le courant de dérive de surface lié au Mistral, accélère le cheminement des pollutions et la progression des fonds du détritique côtier envasé (DCE).

2/ Erosion et ensablement par lobes d'accrétion, issus des plages de La Garonne et du Pradet, jusqu'à - 20 m (fig. 23). L'action des vagues obliques étale le prisme littoral (PL) jusqu'à - 7 m ; vers - 10 m, se réalise la coalescence des deux lobes qui se développent et s'élargissent de - 18 m à - 20 m. A ces profondeurs (zone H₂), comme aux Sablottes, on observe une déviation vers le SSE et le SSW, sous l'action d'un courant permanent de fond amenant la sortie des eaux de la baie de La Garonne. Or, la progression des sables pélagiques du DCE vers l'Est, puis vers le SE et le SSE, suit un tel mouvement.

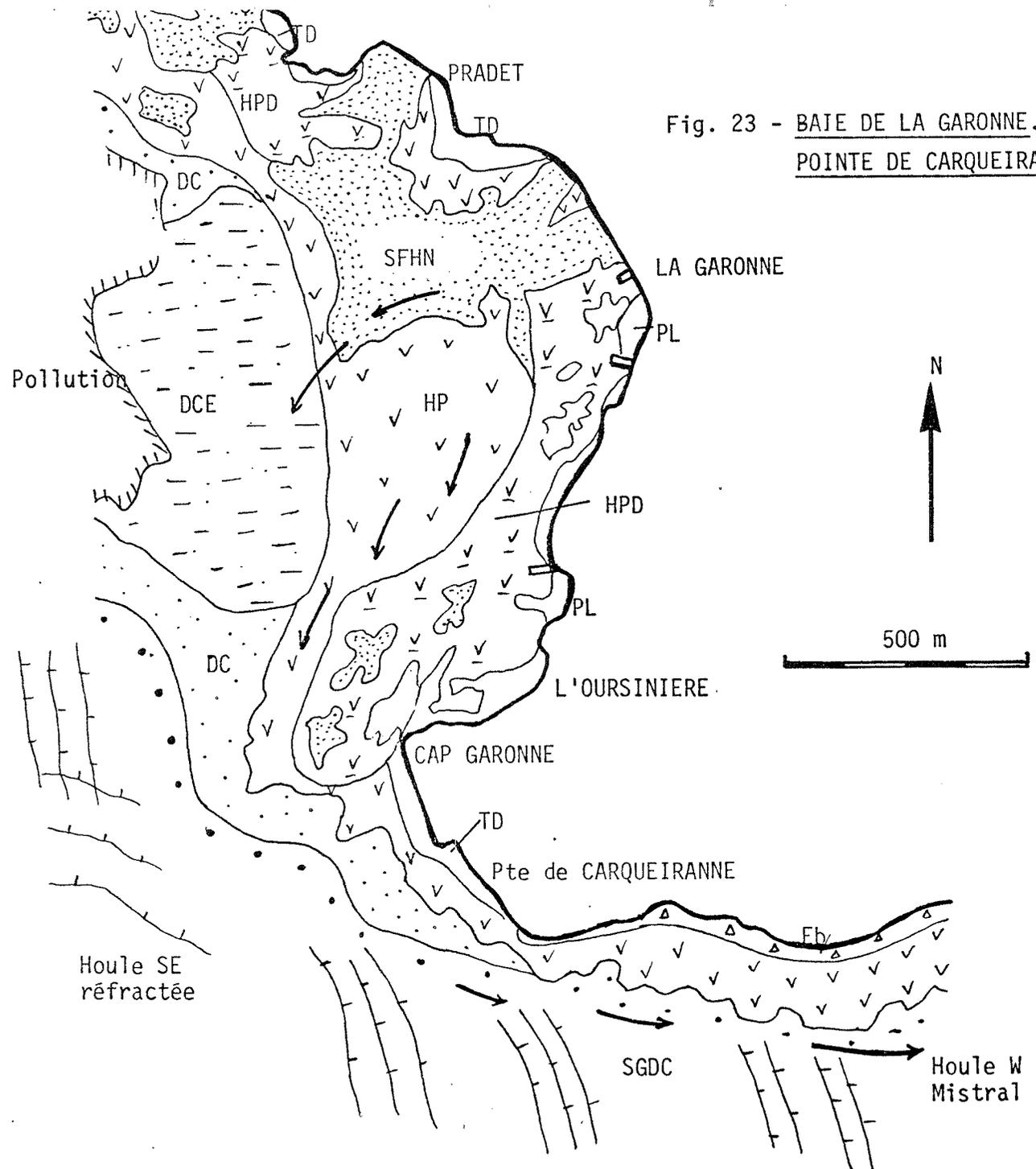


Fig. 23 - BAIE DE LA GARONNE.
POINTE DE CARQUEIRANNE.

C - Dégradation des herbiers.

+ Formation de chenaux, "marmites" d'érosion jusqu'à - 5 m et parfois à - 10 m (très fortes turbulences en zone H₁), devant la Garonne et l'Oursinière. En zone H₂, les mattes sont encore dégradées, de - 14 m à - 20 m par les accumulations polluées (envasements et détritiques), issues des deux émissaires de Toulon - Est et par les courants de décharge.

+ Près du rivage, on observe un étroit HP frangeant et subsistant sans altération jusqu'à - 28 m, tout au long du littoral accore rocheux et *désert* de la Pointe de Carqueiranne (fig. 23). Nous avons affaire ici à un mode régulier, en équilibre, présentant à partir du rivage, la séquence sédimentaire latérale : éboulis au pied des falaises, HP frangeant, sables et graviers du DC (- 33 m, assez fortes pentes). L'agitation des eaux demeure élevée, courants de surface assez forts et portant généralement vers l'Est, eaux claires et ventilées.

Nous avons insisté sur le mécanisme de sortie des eaux du NE vers le SSE et surtout, le SW. Dès la Pointe de Carqueiranne, un mouvement de ces dernières est observé, de l'W vers l'E, en direction de la Baie de Giens (fig. 23).

Signalons une *zone d'interférences* à la Pointe de Carqueiranne (fig. 23) (Ondes régimes W et régimes E. SE, vagues réfractées). On notera encore l'influence des vagues *réfléchies* au niveau de la pointe et de la jetée du nouvel aménagement portuaire de l'Oursinière. Le résultat global est une dégradation plus accentuée de l'HP.

D - Evolution sédimentaire.

+ Dégradation continue des HP au Nord (recul de 10 m / A à 8 m / A), assez rapide, par élargissement en profondeur des lobes sableux.

+ Herbier toujours dégradé à la zone d'interférences de la Pointe de Carqueiranne. Les "taches" de sable s'y sont élargies à la vitesse de 2.3 m / A (pour vingt deux années d'observation). Mais l'HP, ici de mode dispersé tendrait à se maintenir vers le large.

+ Au centre de la baie de La Garonne, vers - 22 m, l'herbier profond a progressé en direction de l'Ouest et demeure homogène malgré quelques altérations locales. Mais des menaces sérieuses se manifestent du fait

de la progression des pollutions venant de l'Ouest (émissaires).

+ Au S du Cap Garonne, Pointe de Carqueiranne, l'herbier de mode régulier est intact et une légère progression s'observe vers le large depuis 22 A.

En résumé :

Localisation	Etat de l'herbier	Facteurs observés
Baies du Pradet et de La Garonne	Forte dégradation : 9 m / A Extension de lobes sableux jusqu'à - 20 m Extension du DCE	Vagues de Mistral et houles réfractées E - SE Pollution - émissaires Courants de décharge
Fonds de l'Oursinière et Cap Garonne	Dégradation 2 m / A Marmites Courant de sortie	Zone d'interférences Ondes réfléchies, jetées
Littoral Sud et SE de la Pointe de Carqueiranne	Mode régulier équilibré en légère progression	Pentes fortes, absence d'aménagements, eaux agitées (vagues et courants)

III - 10 - GIENS - NORD : REcul GENERAL DES HERBIERS,

Les conditions sédimentologiques et hydrodynamiques, leurs relations avec la dégradation des herbiers ont été analysées par des travaux antérieurs (Blanc, 1974 - 1975 ; Jeudy de Grissac, 1975). L'extension des émissaires et les ondes incidentes ont amené une rapide dégradation des herbiers ; des rejets au rivage et l'extension du PL ont complété les mécanismes précités, en relation avec une relative fragilité du tombolo Ouest (1) (fig. 24).

Rappelons que la progression de l'érosion sous-marine a dégagé une dalle de grès holocène sous-jacente tandis que s'organise un double réseau de chenaux et couloirs de décharge perpendiculaires au littoral et, plus au large, parallèles aux courbes de niveau et au tracé des tombolos. Telle est l'action des courants compensateurs, pour le premier cas, et des "long shore currents" pour le cas du réseau d'érosion longitudinal.

+ En 1955, on observait un HP vivace au Sud de la jetée sous-marine vestigiale (Montguilan, 1976) et des vestiges antiques de Pomponiana. En 1960, cet herbier disparaît, tandis que les mattes dégradées progressent vers la profondeur. Les épandages de SGCF forment des lobes plus étendus (2 à 3 m de progression en 5 A). Plus au large, dès - 15 m, il n'y a pas encore d'altérations nettes de l'HP. En 1975, la situation de l'herbier profond paraît stabilisée au S de Pomponiana.

+ Au tombolo Ouest, la zone très menacée des Passe Pieds présente une évolution rapide et inquiétante.

Dès 1955 - 1960, puis 1972, on notait : (fig. 24) :

- l'extension de deux lobes, conditionnés par les courants sagittaux très érosifs des Passe-Pieds, vers l'Ouest. Il en résulte un recul des HP et une progression des sédiments du PL et des SGCF au taux exceptionnel de 12 m / A à 18 m / A, pour vingt années d'observation. Il s'ensuit le dégagement généralisé des dalles de grès et des modifications bathymétriques sensibles (Maggi, 1973 ; Jeudy de Grissac, 1975).

(1) Travaux précédents et contrat C. N. E. X. G. 73/718 et 74/920, expertises D. D. E., etc ...

- à une *plus grande échelle*, on observe une érosion rapide des HP au Sud des lobes SGCF des Passe Pieds. L'herbier dense, conformément aux observations de Cooper et Maggi, a été "refoulé" à - 25 m au large, voire davantage. De ce fait, la zone des mattes très dégradées (HPD) s'est étendue sur une emprise moyenne de 800 m en 20 A, soit un taux global de 40 m / A, parmi les plus rapides qu'il ait été donné de relever.

Ce bilan désastreux constitue une menace pour le littoral malgré le dégagement des fonds de grès plus résistants. L'action d'une série de très fortes tempêtes rapprochées dégraderait définitivement la plupart des herbiers superficiels.

+ L'état actuel, en 1975 et 1976 confirme le maximum d'érosion aux points B, C et aux Passe Pieds (Blanc, 1975). La destruction de l'herbier profond s'accroît par l'extension continue des deux lobes de courants sagittaux des Passe Pieds (fig. 24) auxquels se joint un nouveau lobe au point B.

L'extension des lobes d'accrétion s'avère très rapide vers l'Ouest : 40 m / A à 26 m / A, pour 3 A d'observation. Au lobe des Passe Pieds (près du point C), on mesure des progressions de SGCF de 84 m / A à 116 m / A. *Ces maxima extrêmes observés* soulignent la rapidité de l'érosion des HP et l'évolution très active des fonds. Il est impossible de préciser si l'on se trouve à la "frange" des célérités majeures du phénomène cyclique.

- les chenaux transversaux tendent maintenant à rejoindre et à s'anastomoser aux épandages sableux longitudinaux, parallèles au littoral, vers - 13 m, - 14 m, à la limite de l'herbier profond.

- pour le tombolo oriental (fig. 24), malgré des érosions locales préoccupantes aux rivages de la Capte et au Sud du Port d'Hyères (1), l'herbier a tendance à se stabiliser en dépit de quelques altérations et pollutions. Dès une profondeur de - 10 m, on n'observe point de recul inquiétant, hormis une tendance à l'envasement liée aux pollutions du Capreau (Jaudy de Grissac, 1974) et aux mouillages de l'Aiguade et d'Hyères. Malgré une certaine extension des éléments terrigènes, fins et grossiers, l'équilibre sera maintenu dans la mesure où persiste un mode régulier comprenant : PL, HP frangeant et dégradé, HP dense, DC.

(1) Les érosions, issues de zones de départ de courants sagittaux au rivage, ont été accentuées par la création des jetées du Port d'Hyères.

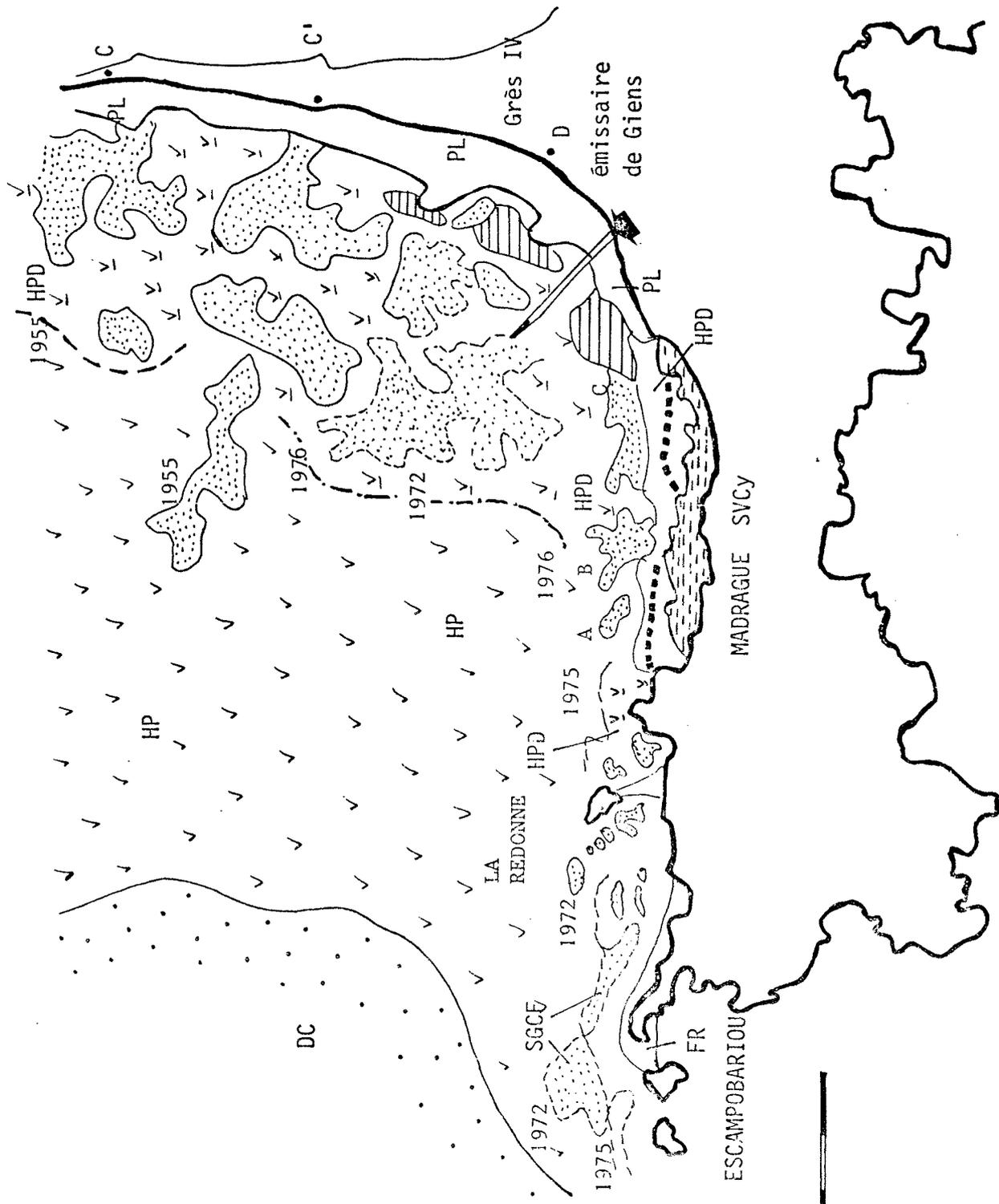


Fig. 25 -
 SW. GIENS
 Herbier émergeant

III - 11 - ZONE SW DE LA BAIE DE GIENS.

Les observations sont échelonnées au cours de plusieurs missions effectuées en 1972, 1974, 1975 et 1976. Elles montrent une évolution assez spectaculaire et préoccupante depuis 21 A.

+ Embase S du tombolo occidental de Giens :

En 1972, on observait un état assez critique avec une dégradation généralisée des HP. Les causes étaient l'érosion mécanique habituelle et la présence de l'émissaire de Giens, installé en 1959 et débouchant à - 4 m dans les mattes. Sur le fond, l'érosion décape le sédiment sur plus de 1 m par endroits en dégageant des bancs gréseux.

On constate la disparition totale de l'herbier dense observé par moi-même en 1952 et 1955 (arrachement des mattes, agrandissement des tombants et leur recul).

Les influences érosives observées au Sud du point C et des Passe Pieds (fig. 25) se transmettent en ce domaine par le développement d'autres lobes de courants sagittaux. En 17 A, l'herbier sain a reculé sur un front dépassant 800 m.

Au cours des vingt dernières années, des lobes ramifiés et anastomosés de SGCF ont apparu et se sont rapidement étendus (fig. 25). Leur progression s'est réalisée au taux de 20 m / A à 30 m / A, assez comparable à celle des Passe Pieds. L'épandage le plus occidental et la frange d'herbiers dégradés qui le borde paraît étroitement liée à l'extension des effluents de l'émissaire de Giens.

Un ralentissement apparent de l'érosion sous-marine est noté, dès 1975, au Sud des points C et au large du point D, (fig. 25).

+ Madrague de Giens :

Une séquence d'herbier de mode abrité avait été décrite en 1952 par Molinier et Picard, puis Blanc (1959) ; du large au rivage, on notait : herbier dense, mattes érodées, front émergeant de l'HP, orienté E - W, "lagune" de sable vaseux à Cymodocées, talus détritico littoral.

Depuis, le front d'érosion de l'herbier émergeant s'est accentué, ainsi que l'extension des mattes dégradées. Cette régression a permis la mise en évidence de l'épave antique du 1er siècle avant Jésus Christ, insérée dans les mattes.

En vingt années, on observait le développement, sur 200 m, (10 m / A), de trois lobes sableux d'accrétion complémentaires (A, B et C, fig. 25). Actuellement, comme pour la localité précédente, on note une certaine stabilisation de l'herbier émergeant et des grandes mattes au Nord de la Madrague. Il est possible que l'état présent corresponde à la fin d'une période d'érosion.

+ Parages de l'îlot de La Redonne :

Les herbiers y sont très érodés et, dès 1960, j'y avais établi un taux de recul de 0,4 m / A. Les mattes dégradées se sont étendues à la vitesse de 2,5 m / A à 4 m / A, disséquées de "couloirs" sableux se fusionnant entre eux.

Depuis trois années, deux remarques ont été effectuées :

1/ Stabilisation relative des fronts d'érosion et reculs de tombants de mattes,

2/ Tendence à la régénération de l'HP en mode agité.

+ Herbiers d'Escampohariou :

Forte érosion, comme ailleurs, au cours des deux décennies précédentes, où l'étalement des lobes détritiques de SGCF a progressé au taux de 2,5 m / A à 4 m / A, (fig. 25).

Actuellement, les zones très battues de l'Escampohariou et notamment les roches septentrionales montrent *une bonne régénération de l'HP* qui s'installe à nouveau sur les graviers et sables grossiers lessivés (SGCF). D'où le colmatage des "taches" et le passage d'un mode imbriqué à une disposition régulière. La vitesse de régénération y est estimée à environ 17 m / A, voire à un maximum de 37 m / A (pour trois années d'observations), à des profondeurs de - 8 m à - 20 m.

III - 12 - SECTEUR GIENS - S. E. : EXTENSION DES LOBES

SABLEUX (FIG. 26).

+ Les missions 1959 et 1960 confirmaient l'active sédimentation, en fin de transfert, à l'embase Sud du tombolo oriental de Giens (Blanc, 1959). En cinq années, l'extension terrigène littorale, (PL et SFHN) avait fait reculer des herbiers dégradés sur 200 à 300 m (50 m / A en moyenne). Le colmatage s'avère continu et les fonds diminuent.

L'apport terrigène et l'action de courants de fond (courant de décharge orienté de l'Ouest à l'Est, réalisant la sortie des eaux du circuit de la rade d'Hyères), ont amené, à l'Est de la Pointe de l'Esterel, l'extension de SGCF. Aux dépens d'un herbier dense, on observait des coalescences de "taches" et chenaux et d'importants reculs. Même altération pour les HP de l'Estanci (fig. 26), mais stabilisation en zone plus profonde, au Sud de la Pointe de l'Esterel.

+ En 1972, une régénération modérée des herbiers s'annonce près des rivages accores, au Sud de la Pointe de l'Esterel.

Mais, les travaux de Joudy de Grissac (1974) et de moi-même montrent, à l'Est de cette même pointe, une extension orientale des SGCF et des SGDC. En douze années, 500 m à 600 m ont été gagnés vers le large (confirmation par missions aériennes) : taux moyen = 45 m / A. A cet endroit, nous observons une des plus rapides et des plus spectaculaires régressions de l'HP.

En baie de l'Estanci, on note l'allongement et la progression de deux lobes parallèles de SGCF, vers l'Est du taux de 45 m / A. Destruction totale de l'HPD observé en 1960 au Nord de l'Estanci. De ce fait, l'altération gagne l'herbier à Cymodocées. Plus au large, des tombants régressent de 7 m en 12 A (recul \neq 0,60 m / A).

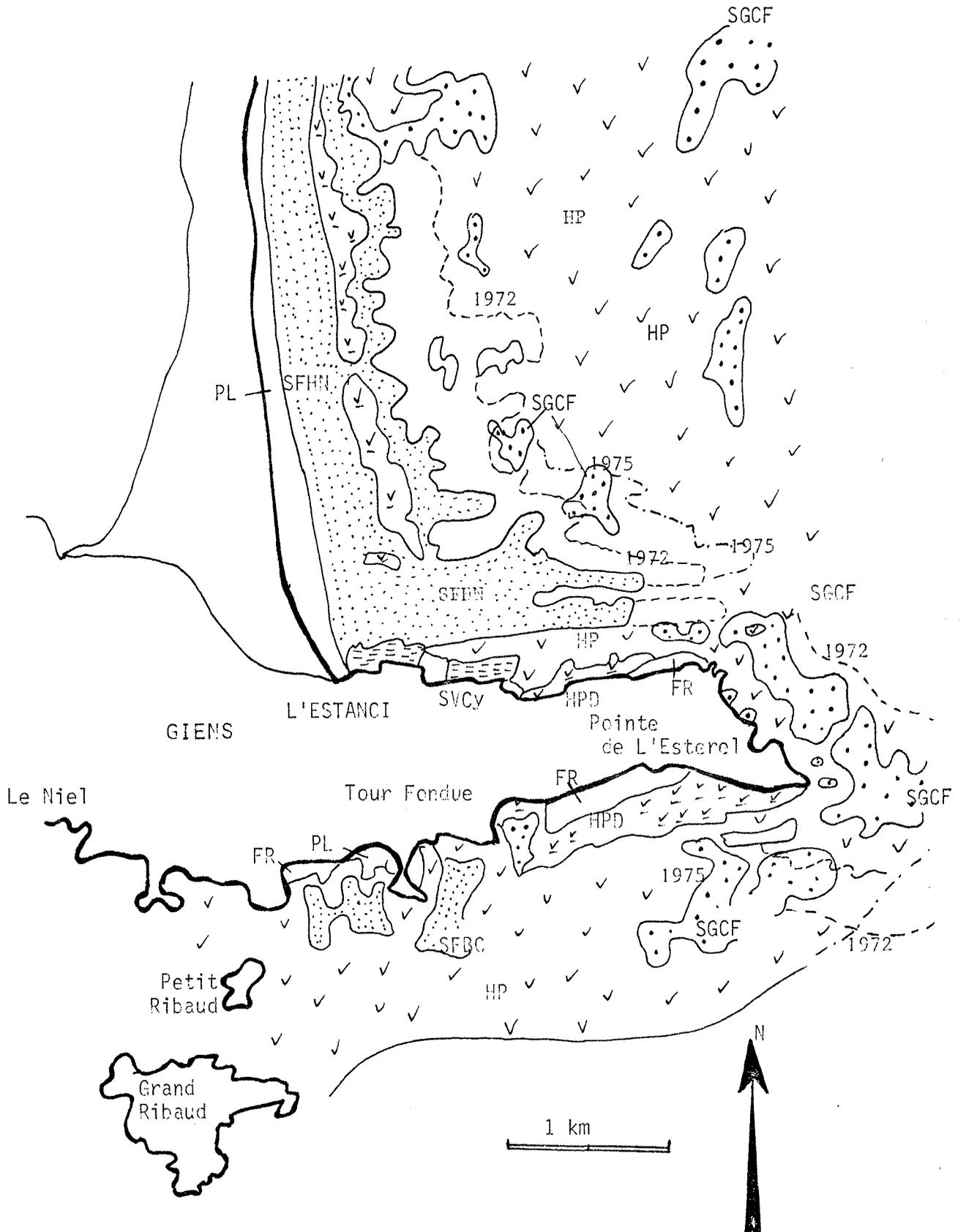
A l'embase sud du tombolo Est, on observe :

- l'extension normale et importante du PL au taux moyen de 5 m / A,

- l'extension des SFHN, puis des épandages de SGCF.

La disparition de la ceinture des HPD est devenue totale (forte régression dès 1960). La progression du front détritique est très spectaculaire : 17 m / A à 25 m / A.

Fig. 26 - S.E. GIENS.



- l'herbier demeure intact et vivace dès - 27 m à - 30 m.

+ En 1975 et 1976 se poursuit l'extension précitée des SFHN et des SGCF. Cependant :

- au Sud de la Capte : stabilisation des fonds du PL, HPD et SFHN.

- à la baie de l'Estanci et à la Pointe de l'Esterel, on observe la poursuite de l'extension vers l'Est des deux lobes sableux précités, (fig. 25), jusqu'à des profondeurs de - 10 m à - 12 m. L'herbier y régresse pour trois années d'observation, aux *taux très rapides* de 115 m / A à 65 m / A, (dans les axes d'épandage, il est vrai).

- à la Pointe de l'Esterel et au Sud, en zone plus profonde (- 13 m), stabilisation, puis régénération des herbiers érodés en 1972.

Un résultat très encourageant est noté au Sud de la Pointe de l'Esterel où l'herbier régénéré progresse sur d'anciennes "taches" de SGCF. La progression de cet herbier a été, elle aussi, très rapide : 250 m / 3 A. soit un taux moyen approximatif de l'ordre de 83 m / A, en mode imbriqué ou régulier. Cette régénération, dont les états initiaux avaient été constatés en 1972, s'accroît et se poursuit dans la Grande Passe de Porquerolles comme l'a établi Jeudy de Grissac (1974 - 1975). Ici encore, les conditions naturelles observées sont :

1/ Sites exposés aux houles et vagues, et notamment aux ondes d'Est, E. SE, à fetch relativement important,

2/ Courants se superposant aux dérives habituelles,

3/ Fonds à forte pente,

4/ Absence de pollution et d'envasement.

III - 13 - HYERES - EST, LES SALINS.

Ce secteur est caractérisé par des érosions sous-marines et des reprises assez paradoxales de l'herbier.

Entre 1955 et la mission de 1960, le transfert normal de Giens Est, orienté de l'E vers l'O (Blanc, 1975), accentue son action de colmatage au littoral (sables et galets du PL, en provenance du Gapeau, du Pansard ou du massif des Maures. (Blanc, 1959 ; Picard - Tarbouriech, 1969 ; Jeudy de Grissac, 1974).

A l'E des Salins d'Hyères, l'engraissement s'étend sur environ 600 m. On n'observe aucune variation du "point neutre", pivot naturel entre la zone sédimentée et le secteur érodé, au rivage.

Au Sud du cordon isolant l'ancien étang de Fabrègas, on remarque une régénération partielle de l'HP (fig. 26). Vers La Londe, en direction de l'Est, les "taches" sableuses et "marmites" d'érosion s'étendent aux dépens de l'herbier dégradé en s'allongeant en "couloirs" sinueux occlus, orientés E - W (direction du "long shore current") ou suivant un réseau NE - SW, (vagues obliques).

Entre le port de La Londe et les Bormettes, le PL est en équilibre ou en extension très modérée (quelques mètres en 5 A). L'érosion sous-marine est accentuée sous la forme de sillons orientés, comme le "long shore current", dans le sens E. NE - W. SW. L'herbier est donc régressif auprès du rivage. En revanche, on note une certaine progression vers le Nord, de l'HP dense, face à la plage des Bormettes. Le bilan global paraît légèrement "bénéficiaire". Partout, les sables du PL sont repris par le transfert et les courants de décharge. La seule érosion littorale, assez modérée, concerne un rivage désert, à l'Ouest de La Londe- Plage (courants sagittaux et arrêt partiel du transfert par les jetées du port). D'où l'implantation de deux épis, ce qui a reporté le problème plus à l'Ouest, à 1 500 m de La Londe, au domaine des Salins du Midi (quelques m. de recul en 15 A.), (fig. 26).

En 1972, 1975 et 1976, les recherches nous amènent à trois remarques :

1/ Progression vers le rivage des HP et arrêt de l'érosion, malgré l'agitation des eaux :

- au Sud du cordon littoral de Fabrègas : bilan positif et progression des Posidonies de 7,5 m / A à 10 m / A (moyenne pour vingt années d'observation).
- au Sud des Bormettes et au SE de la plage de La Londe :
 - . de 1955 à 1960 : 22 m / A,
 - . de 1960 à 1976 : 3 m / A et parfois 18 m / A, notamment sous l'influence des décharges du Pansard reprises par la dérive de Mistral. Le taux de sédimentation demeure ici élevé.

2/ Extension du prisme littoral et des lobes turbides du Gapeau contournant l'épi des Salins (épi de la Marine, allongé en 1970, jetée de Port Pothuau débordée (5 m / A). A la jetée du Port de La Londe, deux lobes

étendus, développés par les courants sagittaux, s'étendent vers le Sud au taux moyen de 10 m / A à 15 m / A (vingt années d'observation).

L'extension des lobes formés par les sédiments du PL et des SFHN et SGCF, est ainsi favorisée, comme en d'autres sites, par l'édification d'ouvrages transversés au littoral, à proximité de rivières à régime torrentiel. Cette progression des éléments terrigènes et biodétritiques est également influencée, dès quelques mètres de profondeur, par le mouvement de transfert des eaux.

3/ Erosion partielle du rivage, probablement sans gravité, à suivre cependant, aux pinèdes des Salins (Cordon de Fabrègas, à l'Ouest des ouvrages transverses de La Londe). Elle est une des conséquences de la destruction avancée d'un herbier littoral.

A partir de - 8 m, l'HP peut être considéré en équilibre à l'exception d'une frange de pollution terrigène, issue du Gapeau et déportée de l'Ouest vers l'Est par une dérive superficielle de Mistral, au Sud des Salins d'Hyères.

Le tableau suivant résume l'état des recherches à la baie de Giens et à la rade d'Hyères.

Localisation	Etat de l'herbier	Facteurs reconnus
Giens - Nord	<p>Recul général très rapide Réseau d'érosion transversal et longitudinal de 12 m / A à 40 m / A Lobes d'accrétion : PL et SGCF Maximum 116 m / A aux Passe Pieds, équilibre vers - 25 m.</p>	<p>Vagues obliques Courants de décharge Secondairement : pollution par les émissaires Houles à forte cambrure</p>
SW Baie de Giens	<p>Recul général très rapide à rapide. Lobes d'accrétion 20 m / A à 30 m / A, érosion de l'HP abrité de la Madrague de Giens. Régénération à Escambolarion, en eaux agitées, sur les faciès des SGCF</p>	<p>Mêmes facteurs que pour Giens Nord Pollution émissaire de Giens, érosion vive des fonds. Etat d'équilibre vers - 25 m et en eaux non polluées</p>
Giens SE	<p>Recul par extension du PL et des SFHN, Régression rapide à très rapide : 115 m à 65 m / A Lobes d'accrétion et chenaux d'érosion. Régénération très nette en profondeur et à Pte de l'Esterel.</p>	<p>Transfert littoral du N au S, hypersédimentation, Houles longues et courants de décharge, important courant de sortie de la rade d'Hyères Régénération en H₂, avec absence d'envasement</p>
Hyères Est, Les Salins	<p>Erosions sous-marines et reculs locaux, lobes d'accrétion : 10 à 15 m / A</p>	<p>Transfert latéral Vagues obliques Courants de décharge</p>
	<p>Régénération et progression 3 à 22 m / A, HP en équilibre dès - 8 m.</p>	<p>Décharges du Gapeau et du Ponsard Influence du transfert Dérives de Mistral Pollutions locales sans gravité.</p>

III - 14 - CAP LEOUBE, BREGANCON, CAP BENAT.

La zonation sédimentaire montre ici une évolution intéressante, sur ce littoral relativement peu aménagé, riche en sites naturels (fig. 27).

A - Etat initial.

Depuis les premières recherches de 1955, le littoral considéré montre un type régulier se transformant en mode imbriqué. En effet, à partir du rivage, la séquence latérale : PL, SFHN, HP dégradé, HP vivace, DC, se trouve altérée par des phénomènes de courants tourbillonnaires de surface, décantations locales et courants de fond. Les lobes d'accrétion s'y développent largement jusqu'à - 15 m et parfois, - 25 m, du fait de pentes sous marines plus élevées et de l'exposition du secteur aux houles grosses des régimes d'Est (golfe de Gênes). On observait, de l'Ouest vers l'Est :

+ Cap Léoube : HP vivace en progression vers le rivage et sur les "taches" de SFHN.

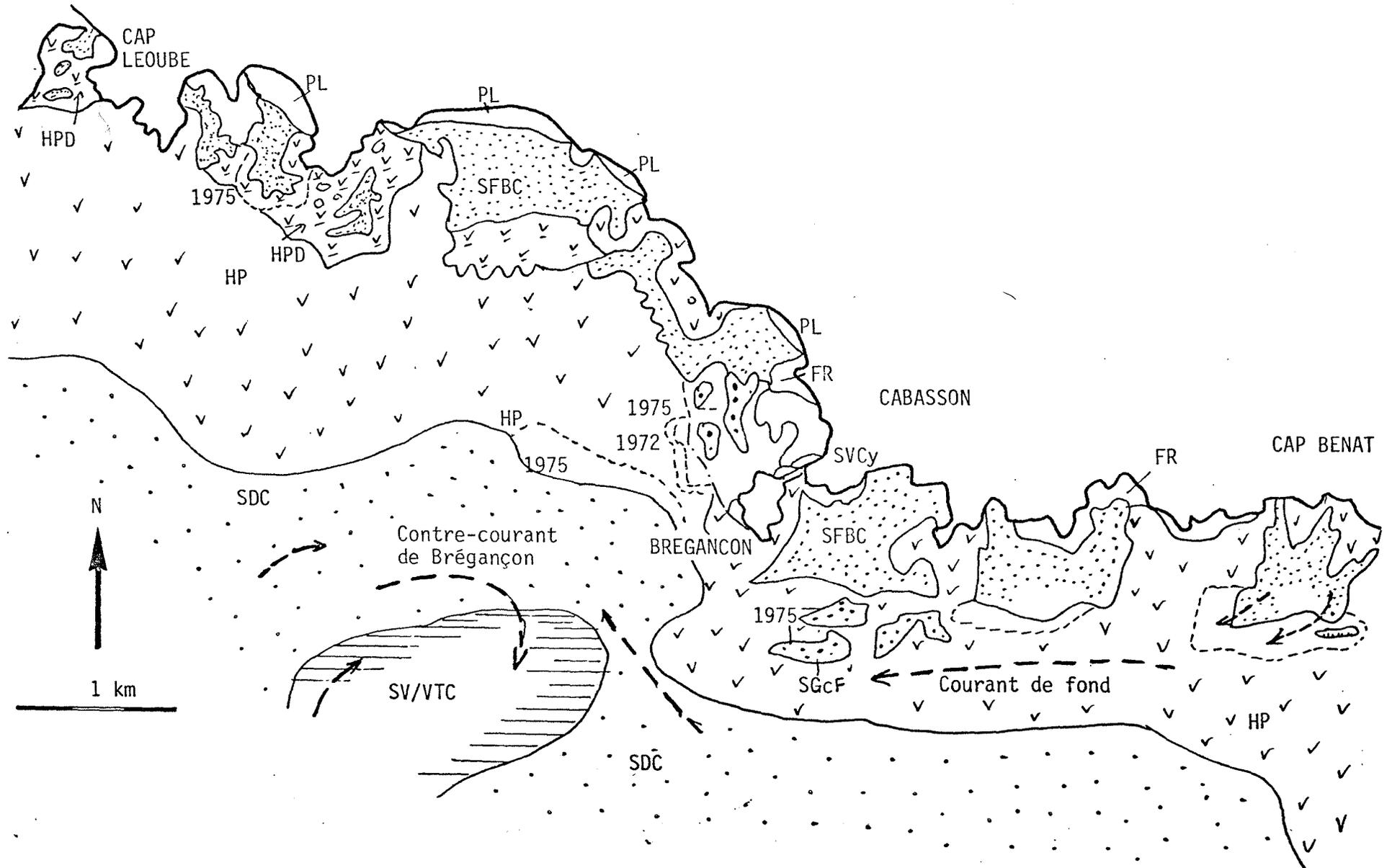
+ Plages de Cabasson : Creusement de "lunules" d'érosion dans un herbier dégradé et ensablé. Dès la profondeur de - 15 m, l'herbier dense ne montrait aucune érosion.

+ Brégançon : Extension vers le SW de lobes d'accrétion (PL et SFHN) aux dépens des herbiers. Ceci amena la coalescence de plusieurs "taches" de sable à une vitesse estimée à 15 ou 20 m / A (sur 5 A), suivant un axe orienté NE - SW. Les courants de décharge agissent indépendamment par rapport à un contre-courant de surface habituel.

+ Côte rocheuse au Sud du massif du Cap Benat (fig. 27) :

On note le "cloisonnement" du mode régulier initial par des lobes d'accrétion perpendiculaires au littoral, formés de SGCF. Entre ces derniers, la zonation de l'herbier apparaît intacte. Nous avons établi que ces aires non érodées et exemptes d'épandages détritiques correspondaient à des *zones de divergence* des orthogonales (ondes incidentes). Ces dernières sont isolées par des *zones de convergence* où se manifestent les courants de décharge sur d'assez fortes pentes. D'où un cloisonnement des masses d'eaux en

Fig . 27 - CAP LEOUBE , BREGANCON, CAP BENAT.



mouvement, isolées par des "cellules" de calme où se développent les herbiers, ces derniers s'accommodant d'un enrichissement en particules fines décantées.

B - Evolution de 1972 à 1976.

+ Cap Léoube.

Stabilisation moyenne des HP, contrairement aux observations effectuées à Giens - Hyères. On observe : érosions locales et reculs de l'HP aux roches situées à l'Est du Cap Léoube (12 à 20 m / A), mais compensations naturelles latérales.

+ Cabasson et Brégançon.

- Stabilisation de tous les lobes sableux jusqu'à des profondeurs de - 11 m à - 16 m.

- Continuation de la dégradation des fonds d'herbiers à Cabasson et Brégançon (fig. 27). Les lobes sableux progressent de 4 à 6 m / A, tandis que l'HP s'envase en profondeur du côté du large (1). Les courants sagittaux amènent la coalescence de plusieurs amas de SGCF, d'où la progression, comme à La Londe, de deux lobes vers le Sud. L'herbier est donc toujours menacé, sauf en sa partie profonde, lorsque la profondeur s'avère inférieure à la demi longueur d'onde des tempêtes "moyennes".

- La baie de Brégançon continue à s'envaser, contre la digue, montrant un petit herbier à Cymodocées de mode calme établi sur des sables micacés.

En dehors du secteur abrité, l'érosion sous-marine demeure vive, aboutissant à un mode dispersé, ce qui avait amené le dégagement d'une épave grecque du Ve siècle avant Jésus Christ.

- Parallèlement à ces actions, on observe une régénération des herbiers par une profondeur de - 18 m à - 20 m, amenant la disparition de trois larges "taches" sableuses au SE de Brégançon. Au cours des trois dernières années, aux étés particulièrement chauds (notamment août 1973), la progression de l'HP a été notable en ce secteur où l'équilibre naturel tend à se rétablir dans la mesure où l'on évitera les pollutions et les aménagements (jusqu'à 13 m / A de progression).

Vers - 35 m se situe un herbier dense et étendu formant une

(1) Recherches de Jeudy de Grissac, (1974).

large bande de 1,5 à 2 km et s'élargissant encore au Sud du Cap Bénat.

+ Le littoral au Sud du massif du Cap Bénat.

Les courants de décharge jalonnent les axes de convergence des orthogonales des ondes incidentes. Le flot de retour sur le fond apparaît conforme aux axes d'épandage des matériaux terrigènes issus de l'éboulis littoral et des SGCF. Ceci jusqu'à - 15 m, voire - 25 m.

Plus au large, pour des profondeurs allant de - 25 m à - 30 m, en deçà du domaine d'action des courants de décharge (zone H₂), on observe des *corps sableux* allongés de l'Est à l'Ouest, dans le sens du cheminement général des masses d'eaux (zone H₃). Le matériel est représenté par des SGCF, voire, en profondeur (- 40 m), par les SGDC. Ici, et à ces niveaux, apparaît l'influence d'un écoulement permanent sur le fond cheminant au large des caps et massifs abrupts.

En résumé :

Localisation	Etat de l'herbier	Facteurs reconnus
Cap Léoube	Stabilisation moyenne Erosions locales : 12 m / A Régénérations latérales	Vagues obliques Courants de décharge
Cabasson et Bré- gançon	Dégradation jusqu'à - 15 m - Lobes d'accrétion Envasements locaux	Courants sagittaux Vagues obliques
	Régénération notable de - 18 m à - 20 m (13 m / A)	Zone H ₂
	Herbier équilibré, parfois envasé vers - 35 m	Zone H ₃ Contre courant rade d'Hyères
Littoral au Sud du massif du Cap Bénat	Erosion des herbiers et lobes d'accrétion jusqu' à - 15 m et - 25 m	Courants de décharge en zone H ₂ (convergences)

Suite ...	Herbier vivace	Zone H ₂ (divergence des orthogonales)
	Corps sableux allongés E - W et herbier en équilibre : - 30 à - 40 m	Courant de fond permanent en zone H ₃ Courant général au large des caps.

III - 15 - PASSES DE PORT CROS ET DU LEVANT.

C'est le domaine des courants de fond, encore mal connus.

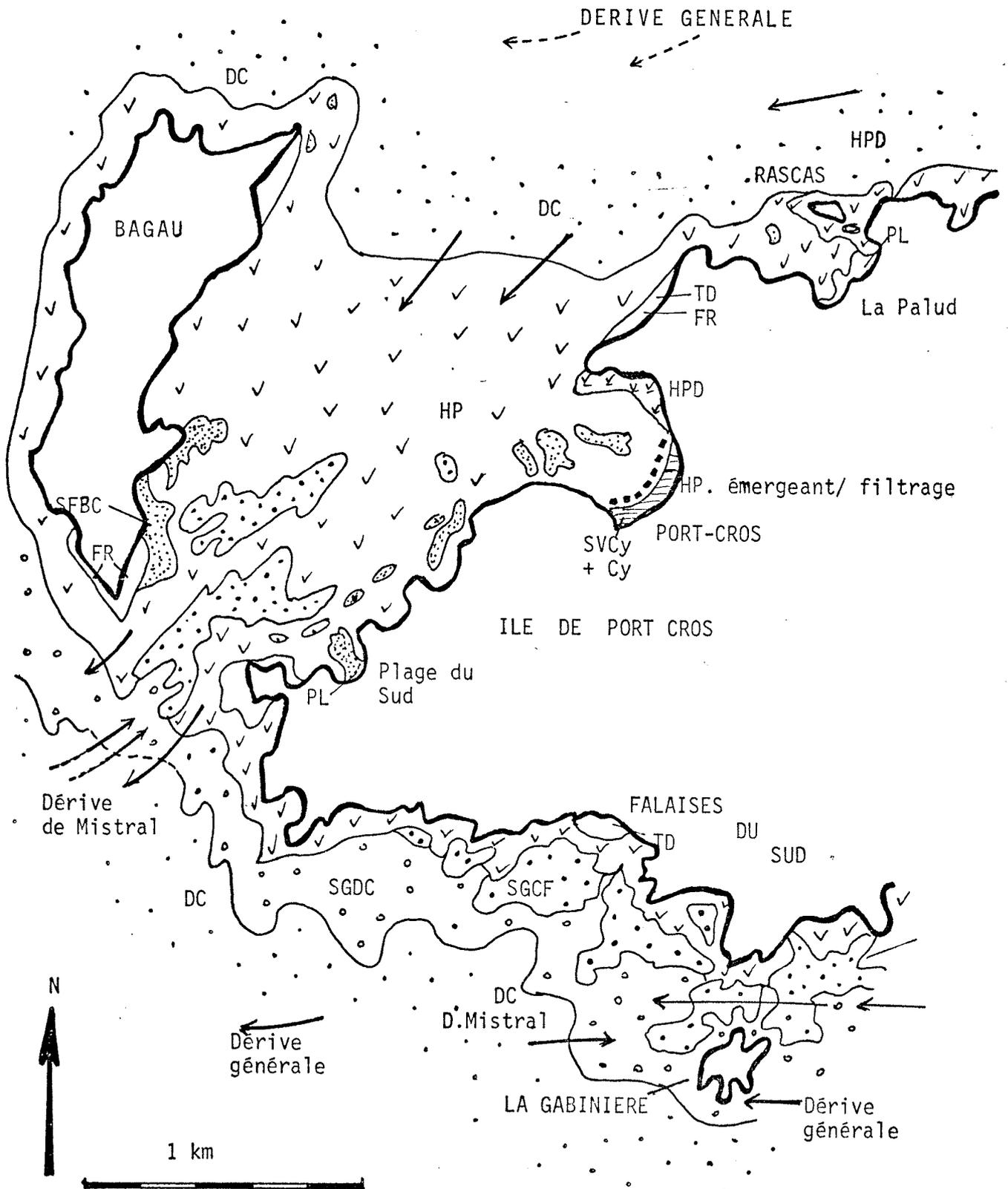
A - Port Cros.

+ L'herbier de Port Cros et de La Palud fut étudié pour la première fois par Molinier et Picard (1952), puis Blanc (1959). A Port Cros, il s'agissait d'un type, devenu classique, d'herbier abrité avec "récif barrière" de *Posidonies* émergentes et, en arrière, "lagune" à *Cymodocées*. En 1969, Blanc - Vernet déterminait les assemblages de Foraminifères de ces milieux et leurs relations avec la nature des sédiments. La création du Parc National de Port Cros devait assurer une protection efficace à ces milieux. En 1970, Augier et Boudouresque constatent une dégradation accentuée, depuis les premières observations de 1953. En 15 A., une "tache" centrale de sable et graviers s'étend aux dépens de l'HP sur une emprise de 30 m (2 m / A de régression à cet endroit). Les causes évoquées sont les pollutions et les mouillages abusifs en période estivale. Une mission réalisée en 1973, me faisait partager cette opinion.

La régression du "récif barrière" à *Posidonia oceanica* (L) Delile est étudiée à nouveau, ainsi que l'ensemble de la végétation marine à Port Cros, par Augier, Boudouresque, Belsher, Coppejans et Perret en 1975. L'examen d'anciennes photographies montre que cette altération des herbiers remonte au début du siècle, donc, bien antérieurement à l'afflux touristique, dit "de masse". Puis le phénomène s'est accentué sous l'effet de plusieurs causes conjuguées :

- aménagements et chenaux d'accès aux appontements,
- explosifs (guerre 1945) et pêche clandestine),
- mouillages intensifs,
- début d'une pollution certaine.

Fig. 28 - PASSE DE PORT-CROS



Augier, Boudouresque et collab. évoquent encore une régression générale des Posidonies à la suite d'une "désadaptation climatique" dans le golfe du Lion. Les eaux concernées, à Port Cros et à l'Est de Giens se rattachent en fait, plutôt, au régime du golfe de Gênes.

A la Palud, de nombreux travaux ont traité du milieu agité dégradant l'HP : Molinier et Picard (1952), Blanc (1959), Poizat (1969), Augier, Boudouresque et collab. (1975). On y relèvera l'action d'un courant de décharge, fonctionnant par fort Mistral et ravinant l'herbier tout au long du rocher des Rascas, ainsi que l'extension du PL. Les différents types granulométriques correspondant ont été définis.

+ La baie de Port Man s'apparente aux régimes de la passe des Grottes, entre Port Cros et le Levant (fig. 29). Depuis vingt années d'observations, on constate une régression spectaculaire vis à vis d'un herbier de mode abrité. Cette dernière est liée à deux causes :

1/ Erosion par les vagues forcées, à courtes cambrures, donnant une dérive entrant dans la calanque large par régime d'Est s. l. Il en résulte une double altération :

- extension des sables à grenats du PL et rabotage des anciennes mattes garnissant le fond de Port Man,
- courants de décharge accentuant le creusement d'un "cirque" en demi-lune, limité par des tombants, tout comme à Figuerolles (La Ciotat), mais à plus grande échelle. Après un "goulet", en voie d'agrandissement, l'étalement de SGCF forme un éventail de décharge à l'entrée de la calanque. Ce délestage, assez voisin des "bouchons" décrits par Picard (1954), donne un corps sédimentaire singulier formant une sorte de "delta" sous-marin, de - 15 à - 22 m, passant ensuite, à - 32 m, aux SGDC.

2/ Extension des pollutions, décharges "sauvages" de détritiques, notamment des mouillages de trop nombreux navires.

La baie de Port Man, exige une protection renforcée et un nettoyage onéreux. Il convient d'y préconiser une limitation assez stricte des mouillages en période estivale.

B - Passe de Port Cros.

En l'état préliminaire des recherches, on observe la présence d'un réseau de chenaux et de "couloirs" sableux allongés, orientés NE - SW, garnissant la passe entre Port Cros et Bagau (fig. 28), par des fonds de - 15 m à - 26 m. Ces corps sédimentaires, assez analogues aux épandages de SGCF des passes de Riou, ne présentent pas d'évolution connue et il convient, dès maintenant, de les surveiller attentivement. Deux épandages parallèles ont été examinés, marquant quelques inflexions vers la plage du Sud. Au SW, ils passent aux SGDC. Ailleurs, pour le reste de la passe, un grand herbier apparaît homogène et en bon état d'équilibre, de - 17 m à - 29 m, malgré l'intensité des houles d'Est et l'importance des courants de dérive orientés SW - NE (régime de Mistral) et NE - SW (régimes d'Est). Quant à la "branche" du courant permanent, lent, orientée elle aussi NE - SW, ses effets éventuels ne peuvent être précisés.

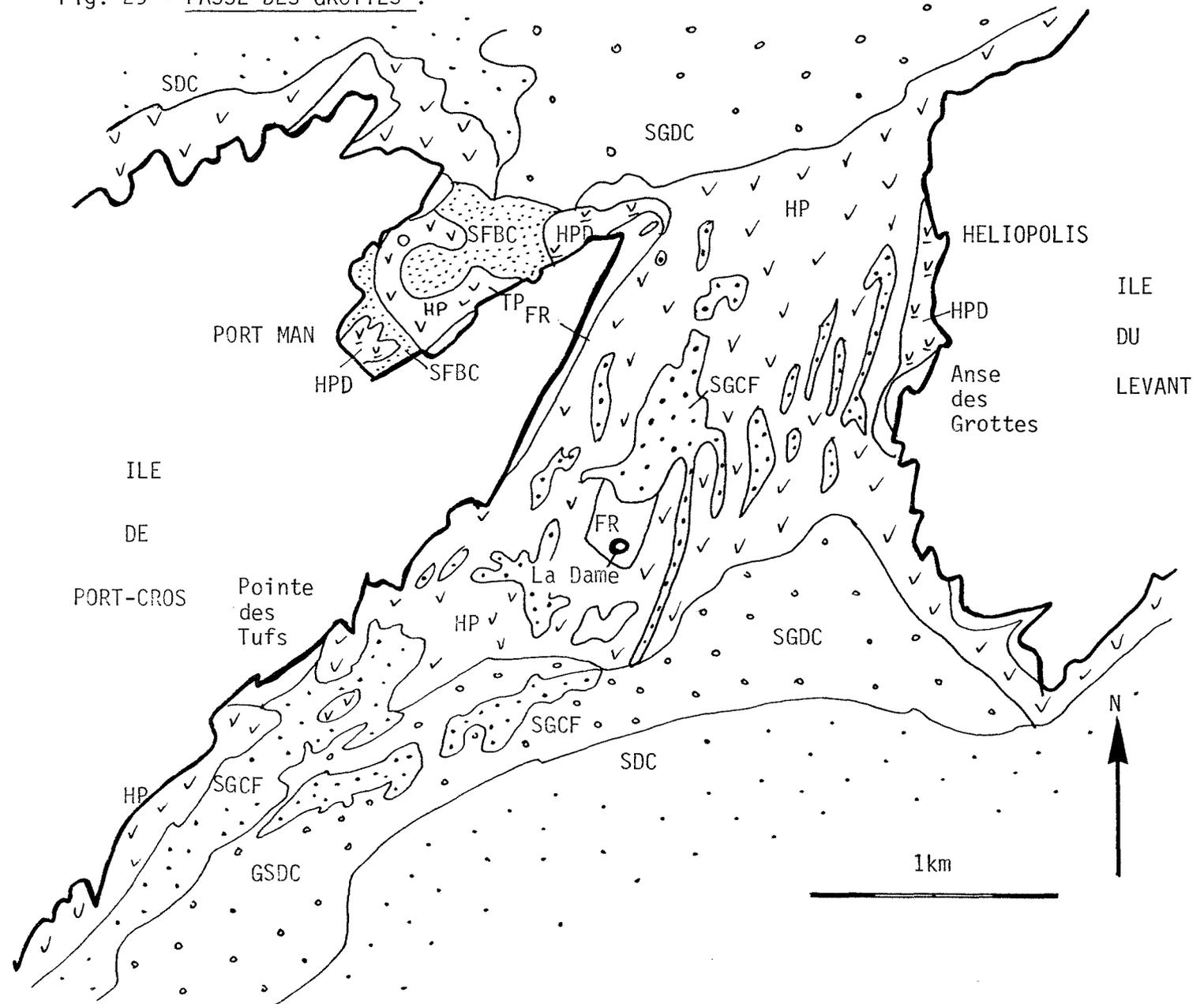
+ Au pied des falaises sauvages du Sud, nous retrouvons le régime des côtes accores exposées au large (Caps Sicié, Bénat, Blanc) : effet du courant général (0,8 à 1 n.), courants de dérive, fortes à très fortes vagues. Comme au Cap Bénat, un HP frangeant, en équilibre, établi sur de très fortes pentes, présente un mode régulier évoluant vers un mode imbriqué sous l'action des courants de décharge. De - 23 m (herbier profond) à - 50 m, on assiste au passage rapide de la séquence latérale : HP - SGCF - SGDC - DC. Vers - 35 m, des courants de fond orientés de l'Est vers l'Ouest, en relation probable avec le courant général, devient, dès la zone H₃, les lobes d'accrétion de SGCF, vers l'Ouest. M. Poizat (1969) a montré le transport vers le large (DC) des sablons et lutites / phyllites à partir des stocks terrigènes littoraux (talus détritiques).

C - Passes du Levant (Passe des Grottes).

La comparaison des missions 1955 et 1975 - 1976 montre les faits suivants (fig. 29) :

1/ Présence d'un réseau dense et complexe de chenaux, lobes allongés et couloirs sableux, formés de SGCF et orientés NNE - SSW, puis NE - SW, par des profondeurs de - 17 m à - 26 m, voire parfois à - 40 m. Ce système de passes est compliqué par quelques replis et crochons (turbulences, ondes réfractées, contre-courants) et par des fusions (coalescences

Fig. 29 - PASSE DES GROTTES .



latérales). L'écueil de la Dame correspond à un important relief rocheux sous-marin amenant la dichotomie du flux général orienté du NE au SW. On observe sensiblement le même système de dérives de surface (NE - SW - et SW - NE) qu'à la Passe de Port Cros mais ici, l'HP apparaît plus dégradé, surtout au Sud, peut être par accentuation de l'effet "Venturi".

2/ L'HP profond est mieux protégé et montre une relative stabilité, sauf au large de Port Man et d'Héliopolis, Anse des Grottes (Ile du Levant). A - 28 m et - 35 m, par une série intermédiaire mal connue, il passe aux SGDC. Au Sud de l'écueil de la Dame, on observe une régénération partielle de l'HP, au taux élevé de 5 à 10 m / A, depuis vingt années. Il en est de même pour l'herbier frangeant et étroit au Sud de la Pointe des Tufs (fig. 29), en milieu très agité et pour de fortes pentes, tout comme à Escampobaridou (Giens) et au Cap Bénat.

En résumé :

Localisation	Etat de l'herbier	Facteurs reconnus
Port Cros	Dégradation de l'HP émergeant de mode abrité, antérieure au peuplement	Erosion mécanique habituelle - Pollutions, travaux - Mouillages
La Palud	Dégradation locale et HP équilibré	Courant de décharge, Vagues obliques, Talus détritique
Port Man	Dégradation poussée Cirque d'érosion et lobe d'accrétion Progression des SGCF et des SGDC	Courants de décharge, Vagues incidentes très cambrées, talus détritique Pollution accentuée Mouillages abusifs
Passe de Port Cros Bagau	Lobes sableux, couloirs et sillons NE - SW Erosion jusqu'à - 26 m Herbier dense et équilibré ailleurs	Courants de dérive Courants de fond Milieu encore mal connu

Falaises Sud Port Cros	Herbier frangeant étroit, en équilibre, lobes d'ac- création SGCF, pentes très fortes Dispersion des lutites	Courants de décharge Courant permanent en pro- fondeur, grosses houles
Passe des Grottes (Ile du Levant)	Réseau dense lobes et couloirs NNE - SSW - SGCF Ecueil de la Dame Dichotomies et régénéra- tions partielles Passages SGCF - DC	Milieu encore mal connu Dérives de surface Courants de décharge Courants permanents Effet "Venturi" au Sud

III - 16 - ROLE PROTECTEUR DE L'HERBIER AU LITTORAL DES MAURES

(CAVALIERE, PRAMOUSQUIER, CAVALAIRE),

A - Cavalière et Pramousquier (fig. 30).

L'herbier présente un *double recul* par progression du prisme littoral (PL) vers le large et régression du large vers le rivage. Le phénomène est observé depuis 1972, mais doit être antérieur.

1/ La progression du PL sableux (sable à grenats, disthène et staurotide) s'effectue vers le large au delà de la ride littorale. Les taux suivants ont été mesurés sur 22 A : 2,5 m / A à Pramousquier et 4 m / A, à Cavalière. Cette progression terrigène liée aux apports torrentiels s'effectue aux dépens de l'HP.

Pour tous les cas, le transport s'effectue, en moyenne, de l'Est vers l'Ouest (transfert), de quelques mètres à - 15 m.

2/ L'herbier est, en outre, entaillé par les courants sagittaux et le flot de retour. On observe l'agrandissement de petits cirques et de lunules d'érosion, du *côté du large*, avec des "buttes témoin", d'anciennes mattes traduisant l'extension initiale. Les mouvements des courants compensateurs sont dirigés en éventail vers le SSW, le Sud et le SE, en fonction de l'orientation de l'onde incidente et de la topographie sous-marine. Il en résulte une altération sinueuse de l'HP du côté du large où il se trouve

Fig. 30 - HERBIERS DE CAVALIERE ET PRAMOUSQUIER.

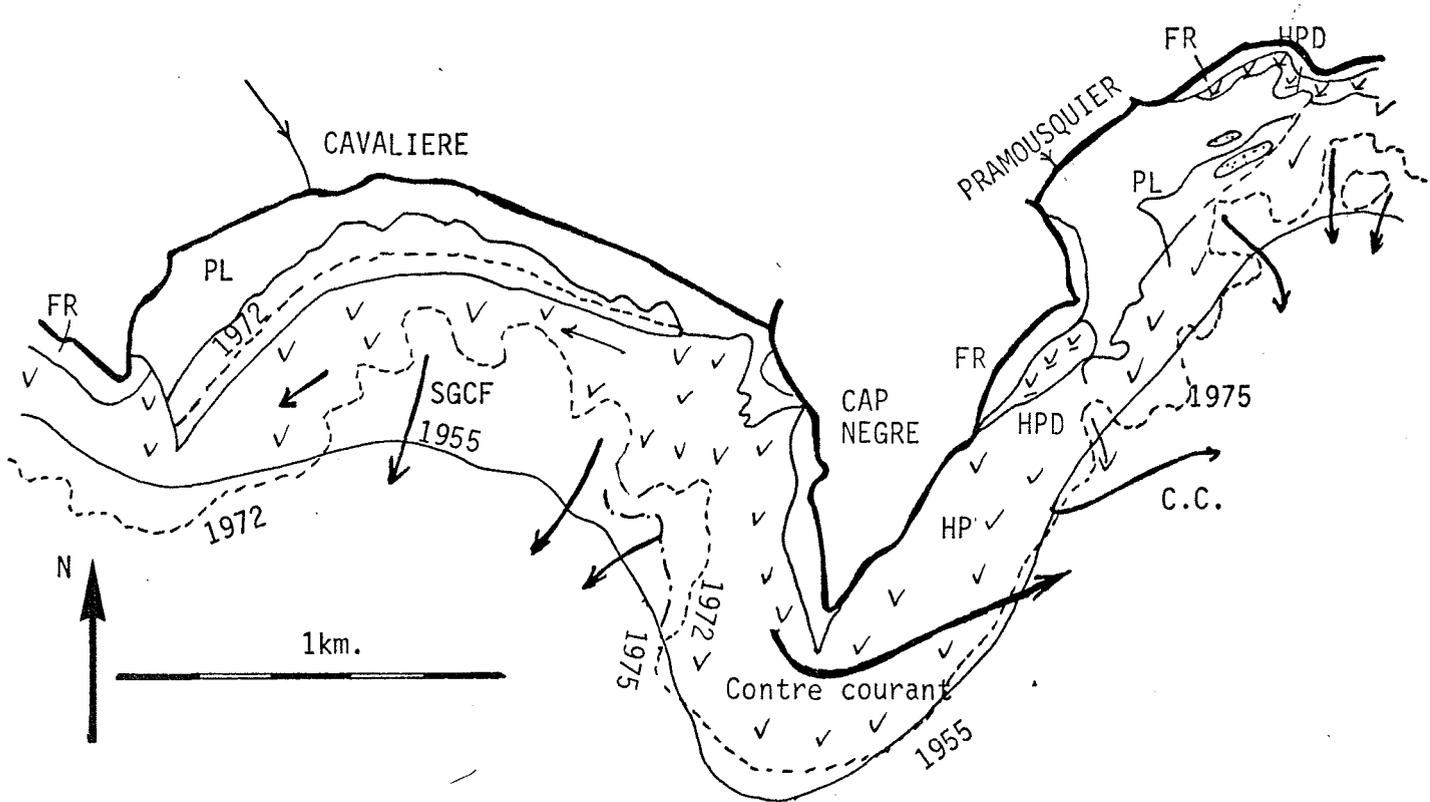
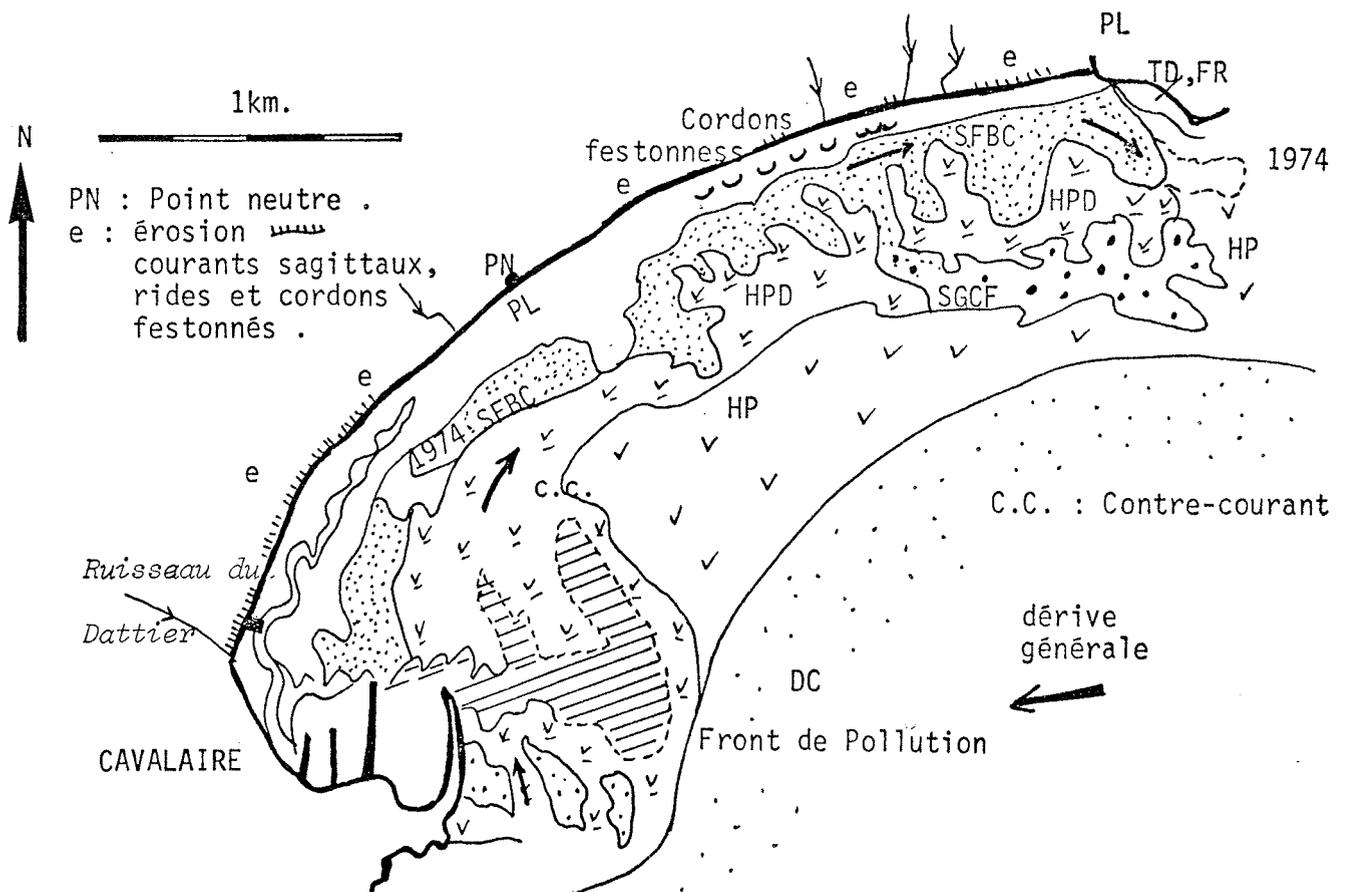


Fig. 31 - HERBIER DE LA BAIE DE CAVALAIRE .



remplacé par des épandages de SGCF. Les vitesses de recul, observées sur 22 A, sont assez inquiétantes :

- Pramouquier : 2,8 m / A à 8,3 m / A,
- Cavalière : 2,8 m / A à 14 m / A.

L'herbier demeure au contraire en équilibre au niveau des pointes rocheuses, en eaux claires et agitées (Cap Nègre). A ces endroits, il peut même progresser modérément vers le large (0,5 / A à 4 m / A).

En fait, le *bilan général* des HP apparaît fortement déficitaire à cause de ce "double recul". Cette érosion globale des herbiers peut se traduire par une tendance à l'amaigrissement des littoraux sableux, dans la mesure où la régénération naturelle ne peut compenser. Ce déséquilibre se traduit par un passage du mode régulier à un mode imbriqué.

Depuis 1975, on note un arrêt (provisoire ?) de l'extension des sables du PL vers le large (diminution de la fréquence des forts orages).

Par des fonds de - 12 m à - 17 m, on confirme une récente régénération des herbiers, probablement en relation avec des étés chauds. La progression mesurée a été de 16 m / A (3 années d'observations).

B - Baie de Cavalaire (fig. 31).

Cette zone, étudiée par ailleurs (Blanc, 1975), montre les caractères suivants :

- 1/ Apports terrigènes notables par orages violents (plusieurs ruisseaux à régime torrentiel).
- 2/ Influence du contre-courant de la baie de Cavalaire, orienté de l'Ouest vers l'Est.
- 3/ Pollution liée au port et au ruisseau du Dattier.

La dégradation des herbiers s'accroît vers l'Est (transfert) et le Nord, en liaison avec la déflexion des vagues due à l'établissement de la nouvelle jetée. Quant aux pollutions, elles sont reprises par le contre-courant et reviennent partiellement aux plages.

La frange littorale de l'herbier déjà dégradé (HPD), se trouve de plus en plus réduite par l'érosion ou les épandages des courants sagittaux, jusqu'à - 7 m et - 12 m.

Puis, en profondeur, un HP dense paraît mieux résister, de - 15 m à - 37 m. L'absence de mesures et d'observations antérieures ne nous permet pas de fixer un taux de dégradation. Comme d'habitude, au niveau des

côtes et des pointes rocheuses, l'HP est vivace jusqu'au littoral. Ici, le mode régulier passe au mode imbriqué, tandis que le DC se rapproche du littoral (- 38 m).

L'action des courants de fond est complexe :

1/ Le sédiment est d'abord déporté vers le Sud, de - 10 m à - 12 m, perpendiculairement aux isobathes (courants de décharge).

2/ Puis, un courant de fond, dirigé vers l'Est, déplace les SGCF et les SFHN (contre-courant de la baie de Cavalaire). Il en résulte un contournement singulier et une asymétrie des lobes terrigènes (fig. 31).

De - 4 m à - 10 m, en 5 A, les SFHN ont progressé vers le large à la vitesse de 10 à 25 m / A. Entre le débouché du torrent de la Croix et celui des Arbouses (fig. 31), on note la formation de 8 à 10 cordons festonnés (lignes nodales). Les distances entre les nodales sont de 70 m. Ainsi, les houles incidentes, génératrices d'interférences, présenteraient au large, une période *moyenne* égale à 6,8 sec.

L'amortissement est pratiquement réalisé dès - 20 m, d'où la bonne tenue de l'HP profond qui se poursuit jusqu'à - 35 m à l'Ouest, et à - 25 m, à l'Est (ensablement des fonds lié au transfert, "long shore current"). Dès la profondeur de - 15 m, la diminution du courant de fond est sensible. On calcule, pour $H = 3$ m (forte tempête au rivage), une vitesse de 0,47 m / sec. Par gros temps "moyen" où $H = 2$ m, la célérité ne serait plus que de 0,25 m / sec.

En l'absence de mesures directes, on peut supposer une tendance à la reconstitution naturelle des herbiers dès - 15 m, en zone H_2 , encore bien agitée, ce que confirment nos relevés. Ici, la menace consiste en l'extension d'un front de pollution venant de l'Ouest, issu de Cavalaire (port) et du débouché du torrent du Dattier.

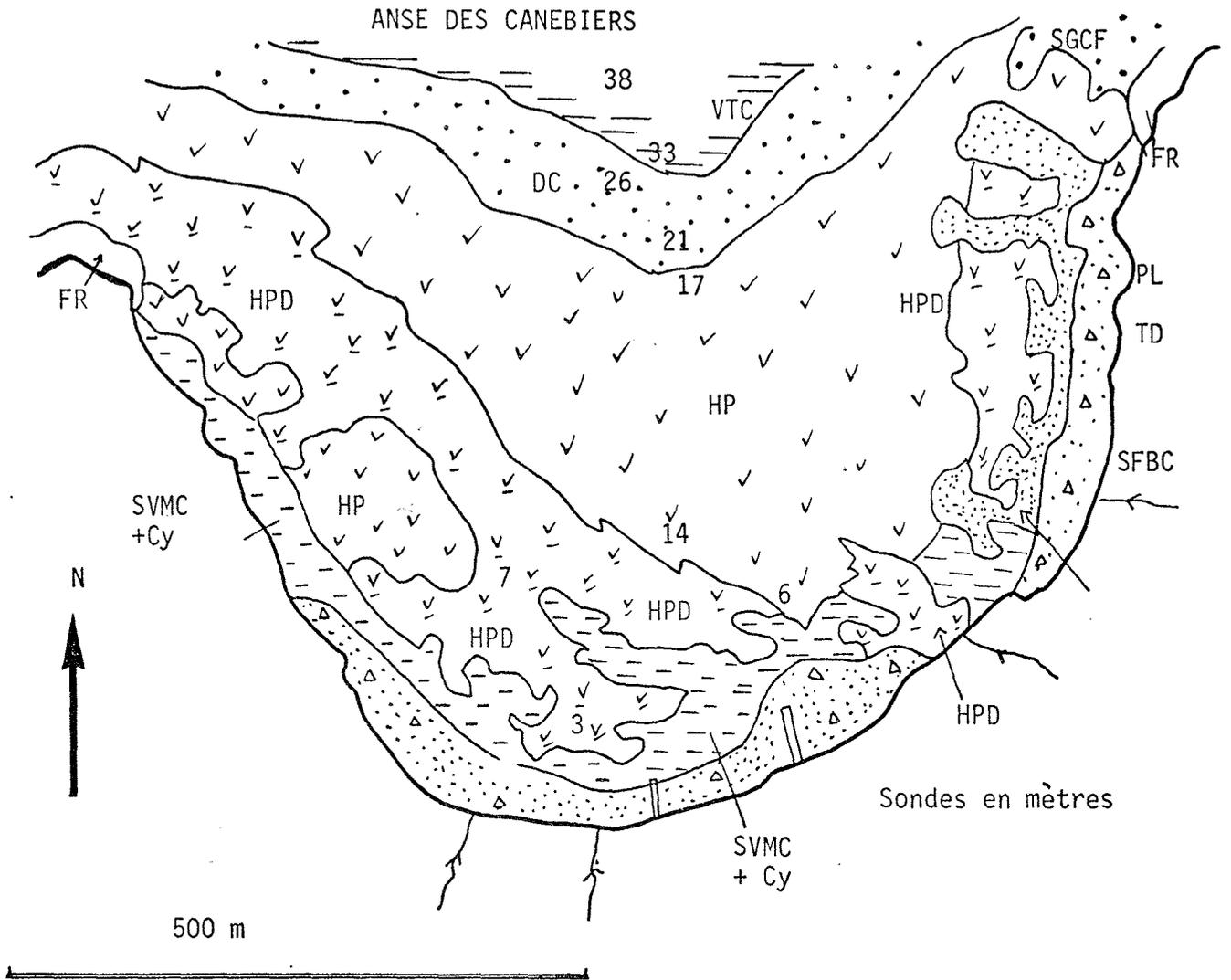
III - 17 - L'ANSE DES CANEBIERS A SAINT TROPEZ ; "PIEGE" A

SEDIMENTS EN MODE ABRITE (FIG. 32).

On soulignera une certaine analogie avec la baie de la Seyne et de Tamaris. Mais ici, le colmatage, pourtant actif, n'a point été suffisant pour arriver au stade de l'herbier émergeant.

La dégradation de l'HP dense semble devoir être en relation avec :

Fig. 32 - BAIE DE SAINT TROPEZ



- pollution accrue : chantiers, ateliers, ruisseaux, détritiques et mouillages intensifs. Cette dernière se trouve aggravée par les conditions abritées et l'absence de courants notables. Les débris de Posidonies s'y accumulent.

- du côté du large : progression des envasements de la baie de Saint Tropez (VTC et DCE) (Blanc, 1975).

+ L'herbier dégradé est altéré par des chenaux et "couloirs" vers le large, de - 8 m à - 15 m, attribués, hors de l'abri maximum, à des courants de décharge. Au Sud et à l'Est, des tombants et sillons allongés s'observent, disposés parallèlement au rivage, du NE au SW, de - 2 m à - 6 m. Leur formation n'a point été expliquée et ce secteur mériterait une étude détaillée.

Depuis deux années (1975 - 1976), on note une stabilisation apparente du prisme littoral. Les SVMC comportent une pelouse à Cymodocées (cf. Fos, Brégançon, Giens SW) doublant le PL. A faible profondeur, on observe un échauffement et la décantation des pélites (20 % à 50 % de lutite). Les sables vaseux s'insinuent entre les "cupules" de recul et les indentations de l'HP, jusqu'à - 5 m et - 6 m (fig. 32).

Ce secteur demanderait une étude détaillée (Sédimentologie, Foraminifères) accompagnée de mesures de protection rapides avant d'aboutir à une complète dégradation comme pour la baie de la Seyne - Tamaris.

Le tableau suivant résume les observations précédentes :

Localisation	Etat de l'herbier	Facteurs étudiés
Cavalière, Pramousquier	Régression due au PL et courants de décharge jusqu'à - 15 m (4 m à 2 m / A, Max. 14 m / A)	Epandages terrigènes torrentiels, érosion habituelle, courants sagittaux Transfert latéral
	Equilibre en zones rocheuses et régénérations partielles à - 12 m, - 17 m (16 m / A)	Zone H ₂ Eaux claires et agitées
Baie de Cavalaire	Erosion forte jusqu'à - 15 m - Lobes d'accrétion SGCF - Progression des SFHN - Amortissement à - 20 m - Ensablement et reprise des HP en zone H ₂	Courants sagittaux Interférences, nodales Contre-courant et transfert - Pollutions et apports terrigènes, courants orbitaires
Anse des Canebiers, baie de Saint Tropez	Piège à sédiments Herbier dégradé fortement Extension, au large des VTC et DCE - HPD jusqu'à - 6 m	Envasement, colmatage et pollution élevés Rôle des SVMC, Milieu très abrité

o

o o

III' - LES SEDIMENTS DE L'HERBIER A POSIDONIES .

FACTEURS DE LA SEDIMENTATION.

III' - 1 - MÉTHODOLOGIE .

1.) Choix des coupes .

Des coupes dans les herbiers ont été effectuées en des sites précis déjà étudiés : Cap Couronne, Sormiou, Port d'Alon, Archipel des Embiez, Giens - Hyères, Brégançon et Cap Léoube, baie des Canebiers.

2.) Etude des échantillons.

2-1 . Comptage des minéraux et bioclastes, méthode des pourcentages pondérés, à l'issue des tamisages (déterminations : quartz, micas, bioclastes s.l., Algues, Foraminifères, Lamellibranches, Gastéropodes et Echinodermes). Teneurs en lutites et en carbonates .

2-2 . Analyse granulométrique : méthode Weydert (1973 et 1976). Détermination des indices de Folk, Ward et Weydert. (Calcul à l'ordinateur : programme Weydert, Indice 1): médiane (Q2), taille moyenne (TM), étalement dimensionnel (GT) de Rivière (1952), classement (D FI), facteur hydrodynamique (FH), normalité de la distribution (Kurtosis ou Kg), triage ou σ 1 (Sigma), Symétrie (Skewness ou SK1)

On a :

$$TM = \frac{M_{16} + M_{50} + M_{84}}{3}$$

$$\text{Médiane} = M_{50}$$

$$GT = \log \frac{M_0}{M_{100}}$$

$$DFI = \frac{M 75 - M 25}{2}$$

$$FH = Kg - DFI \quad Kg = \frac{M 95 - M 5}{2,44 (M 75 - M 25)}$$

$$\text{Triage} = \sigma_1 = \frac{M 84 - M 16}{4} + \frac{M 95 - M 5}{6,6}$$

$$SKI = \frac{(M 16 + M 84) - 2M 50}{2 (M 84 - M 16)} + \frac{(M 5 + M 95) - 2M 50}{2 (M 95 - M 5)}$$

Les calculs sont effectués à l'ordinateur "Iris 80", (programme P. Weydert)

3.) Analyse multivariée : marche à suivre:

- calcul de la moyenne, variance, écart-type
- calcul des coefficients de corrélation des paramètres, droites de régression, pente, intercept, χ^2 de Pearson. Ces derniers sont réalisés par les programmes usuels des calculatrices électroniques (programmes enregistrés "magnétiques").
- matrice des observations (mode Q)
- matrice des variables (mode R)
- matrice des coefficients de similitude, par exemple, distance euclidienne : $d_{ij} = \arccos (r_{ij})$
- établissement de dendrogrammes ("clusters analysis", analyse de "grappes"). Seuil dr adopté, significatif = 0,030.
Les grappes dichotomiques ou "cluster" font apparaître des groupes de mesures. Ces dernières ne sont pas des groupes de facteurs mais une représentation de la hiérarchie des informations contenues dans une matrice. Nécessité de calculer (abaque), la zone d'indétermination des coefficients de corrélation et l'intervalle de confiance.

4.) Analyse factorielle en composantes principales :

On sait que cette dernière permet de dégager un nombre minimum de variables renfermant le maximum de l'information. Un nombre réduit de facteurs significatifs (3,4 ou 5 , groupe les n variables considérées.)

Marche à suivre:

- matrice (mode R ou mode Q), calcul des "loadings" et des "résidus", matrice des "résidus", pour chaque facteur retenu (utilisation de l'ordinateur ou de calculatrices programmables.)
- établissement d'une matrice des facteurs principaux et des échantillons / ou variables originelles ("loadings"). "Facteurs scores" des facteurs dégagés et calcul du pourcentage de la variance absolue et relative qu'ils représentent. Commentaire du tableau des "facteurs scores" ("unrotated factor loading".)

5.) Ordination :

Les objets de la matrice des données sont repérés sous forme de points dans les espaces définis par les axes correspondant aux facteurs successifs retenus : F1, F2, F3, ... On recherchera les tendances des points à se grouper ("clustering"), ou à s'aligner; leurs distances respectives reflètent leur dissimilarité (non-corrélation). Ce procédé d'ordination complète les données des dendrogrammes en mettant en évidence les relations graduelles parmi les objets traités dans les matrices de corrélation et de similarité. On met ainsi en évidence, non intuitivement, des facteurs et des faciès "primaires", voire des modèles liés aux environnements et leurs conditions-limites.

Les résultats qui vont suivre seront, dans un but d'allègement, présentés sans les calculs intermédiaires.

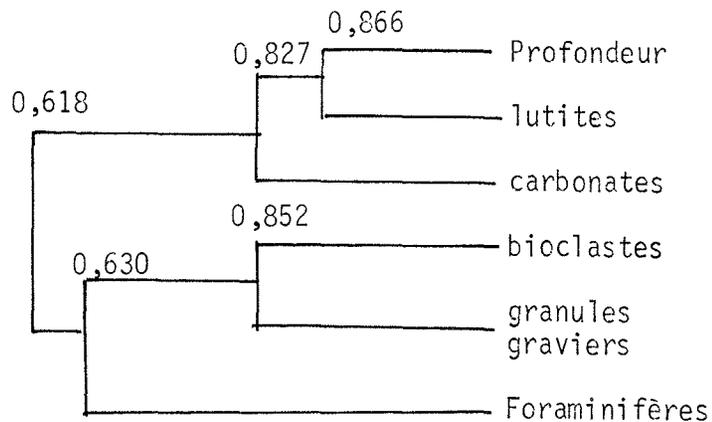
III' - 2 - HERBIER DE SITE EXPOSÉ : LE CAP COURONNE .

- Matrice des variables (mode R)

	Profondeur	lutite	carbonates	graviers granules	foraminifères	bioclastes
Profondeur						
Lutite	0,866					
Carbonates	-0,748	-0,827				
graviers et granules	0,531	0,177	0,618			
Foraminifères	-0,062	0,223	-0,382	-0,630		
bioclastes	-0,601	-0,407	0,336	0,852	0,238	

- r signif = 0,162 pour P = 0,95 (5% de risque)

- dendrogramme :



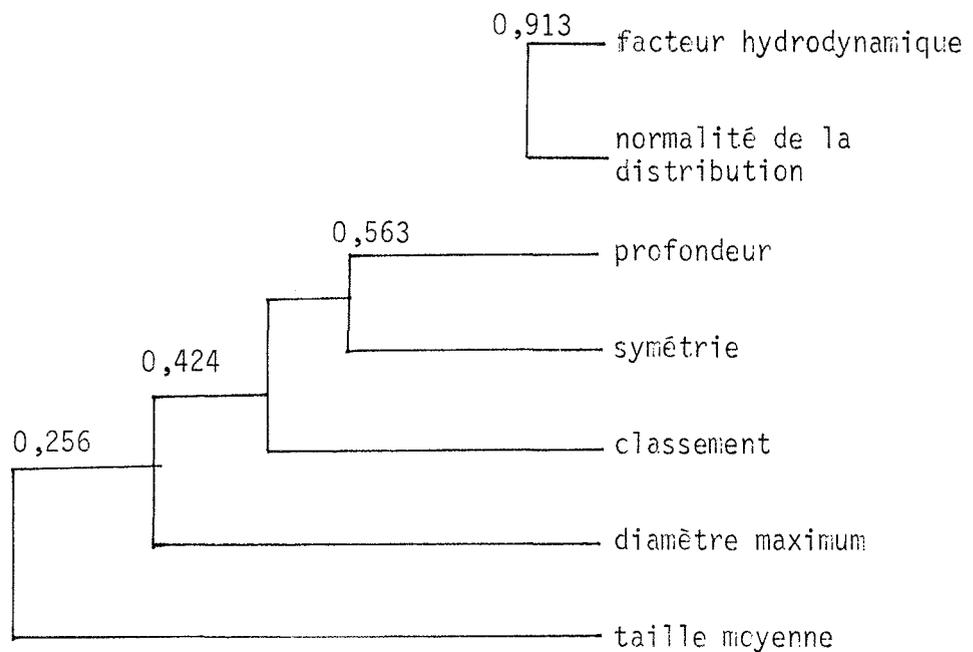
Influence de la productivité biologique et d'un envasement lié à la profondeur .

- Matrice R des variables granulométriques .

	TM	D MAX	FH	KG	D FI	SK 1	profondeur
TM							
D MAX	-0,007						
FH	-0,556	-0,520					
KG	-0,264	-0,267	0,913				
DF I	0,042	0,424	-0,910	-0,655			
SK 1	0,007	-0,116	-0,169	-0,296	0,341		
Profondeur	0,256	0,123	-0,709	-0,334	0,543	0,563	

χ^2 à P = 0,95 r = 0,135 (risque : 5%)

- dendrogramme



Liaison entre la facteur hydrodynamique et la normalité de la distribution. Cette dernière apparait indépendante des autres facteurs.

La profondeur est associée moyennement à la symétrie et au classement, puis, plus faiblement, au diamètre maximum et à la taille moyenne.

Classement et facteur hydrodynamique sont en corrélation inverse très stricte.

- Cette complexité nous a fait réaliser une matrice de similarités où:

$$d_{ij} = \arccos (r_{ij}).$$

z = profondeur en mètres .

r signif = 0,136 pour P = 0,95

	TM	D MAX	FH	KG	D FI	SKI	Z
TM							
D MAX	90,40						
FH	123,77	121,33					
KG	105,30	105,48	24,07				
D FI	87,59	64,91	155,50	130,91			
SK 1	89,59	96,66	99,72	107,21	70,06		
Z	75,17	82,93	135,15	109,51	57,11	55,73	

En ce site très exposé aux déferlements et aux dérives, on confirme l'influence de l'impact hydrodynamique sur la distribution . La profondeur, la symétrie et le classement forment un "cluster" suivi par le diamètre maximum et la taille moyenne .

- Analyse factorielle en composantes principales .

Variabes	facteur 1	facteur 2	facteur 3	facteur 4
Profondeur	-0,341	0,180	0,390	0,276
lutites	0,115	0,106	0,409	0,062
carbonates	-1,177	0,381	- 0,001	0,318
graviers	0,943	1,129	1,009	0,923
foraminifères	-0,641	0,463	0,153	0,343
bioclastes	0,249	0,218	0,562	0,325
% variance relative	31,04	27,29	24,58	17,08

- *Facteur 1* : 31 % de la variance : exprime les apports grossiers issus des littoraux . (héritage détritique).

- *Facteur 2* : (27% var.): en relation avec stocks carbonatés liés au substrat molassique et aux organismes (Foraminifères principalement).

- *Facteur 3* : (24% var.) : influence des peuplements benthiques liés à la profondeur et à l'envasement (apports terrigènes d'origine rhôdaniennne et proximité des fonds du "détritique côtier" envasé).
- *Facteur 4* : (17% var.): fraction grossière carbonatée en majeure partie d'origine bioclastique .

- Analyse factorielle en composantes principales des paramètres granulométriques.

variables	F1	F2	F3	F4
taille moyenne	0,244	0,101	0,119	0,153
diamètre max	0,326	0,384	0,374	0,410
facteur hydrodyn.	- 0,486	0,130	0,160	0,162
normalité distrib.	0,049	0,132	0,250	0,353
classement	0,401	0,115	0,058	0,048
symétrie	0,681	0,551	0,342	0,462
profondeur	0,738	0,350	0,348	0,335
% variance relative	71,21	12,68	6,64	9,75

- *F1* : (71% var.) lié à la profondeur, symétrie + et classement. Liaison négative avec le facteur hydrodynamique. En relation avec l'abondance des débris bioclastiques
- *F2* : (12,6% var.) : dimension et symétrie des éléments grossiers, puis liaison avec la profondeur
- *F3* : (6,3% var.) : pratiquement non significatif.
- *F4* : (9,7% var.) : lié aux paramètres granulométriques du sédiment avec une assez faible dépendance de la profondeur .

Si nous comparons avec les données de l'analyse multivariée et du dendrogramme, on constate que le facteur hydrodynamique n'apparaît pas ici caractéristique et présente des redondances avec la normalité des distributions. (influences granulométriques possibles des bioclastes). Les peuplements de l'herbier apparaissent prépondérants suivis par les phases détritiques héritées grossières et fines, puis vient l'influence (moyenne) de la profondeur.

La nature du sédiment est loin de traduire la totalité des faits réels ; il est nécessaire de compléter ces données par des analyses physiques, chimiques et biologiques .

- Ordination (fig.33).

- Dans les espaces définis par les axes F1 -F2, F1-F3 et F1-F4, le facteur hydrodynamique s'oppose à la profondeur, la symétrie, les tailles moyennes et maximales .

- pour l'espace des axes F2 et F4 : la profondeur, le facteur hydrodynamique et la taille moyenne sont groupés avec de faibles inter-corrélations.

- l'analyse factorielle des allochems, lutites et carbonates (fig.34) montre :

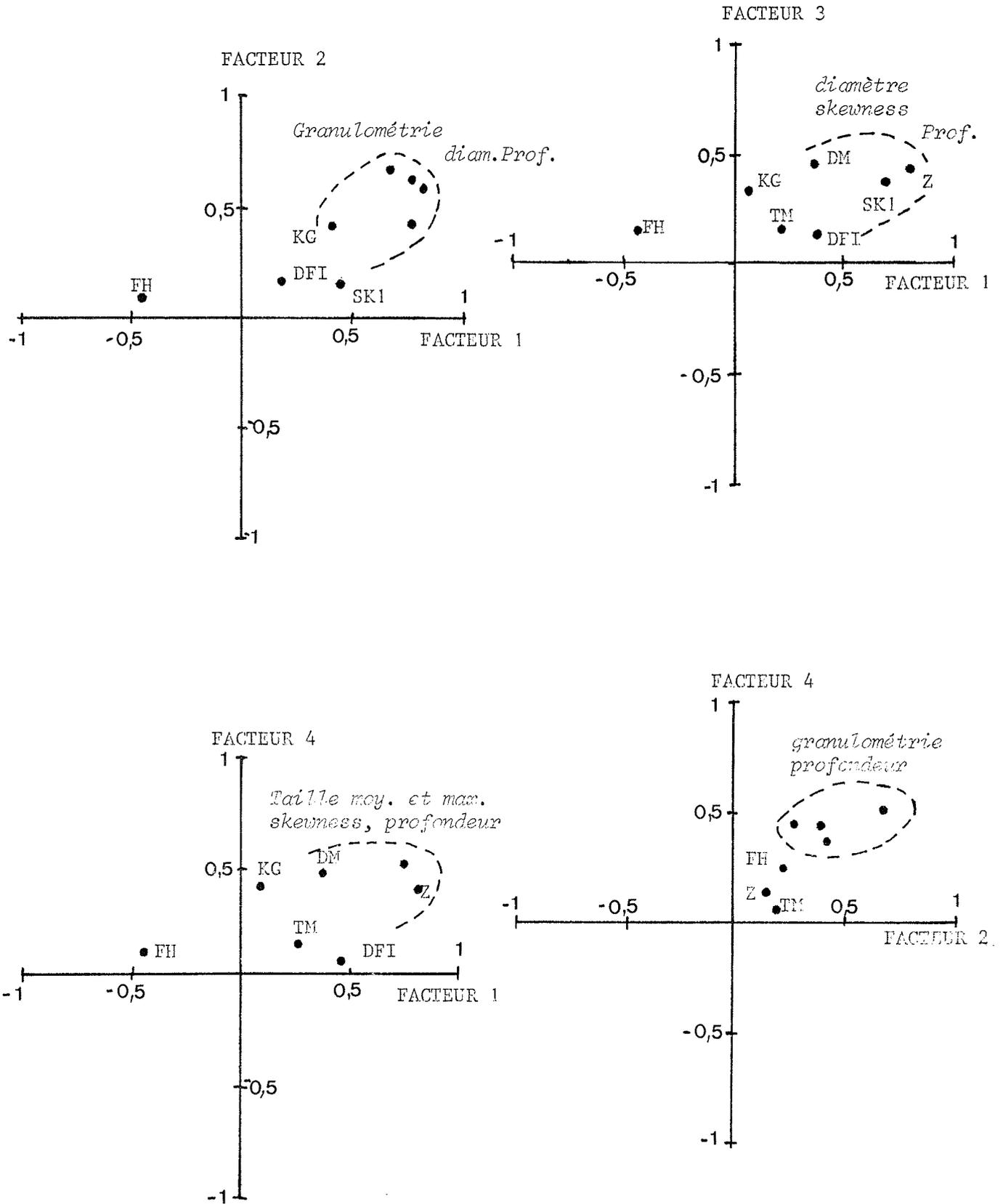
- pour l'espace F1-F2 : l'opposition des graviers avec les foraminifères et les carbonates. Des galets et granules siliceux sont responsables de cet état .

- Les espaces F1-F3 , F1-F4 et F2-F3 montrent l'influence moyenne de la profondeur sauf pour le cas des lutites, voire des bioclastes dont la teneur s'accroît avec la bathymétrie.

Fig.33

HERBIER à POSIDONIES DU CAP COURONNE .

Analyse factorielle : Ordination



III' - 3 - L'HERBIER A POSIDONIES DES CALANQUES

I - CARACTÈRES GÉNÉRAUX .

Durant la campagne de l'été 1977, trois sites ont été étudiés en détail .

1) Calanque de Sormiou .

Zone agitée par régime d'Est et de SE, en substrat calcaire, prisme littoral et courants de compensation. Il s'y trouve un herbier profond en bon état mais relativement menacé par les particules fines et les effluents du collecteur de Cortiou doublant le cap Sormiou par fort Mistral.

2) Calanque de Port d'Alon.

Près de Bandol, exposée selon les secteurs aux régimes W-NW (Mistral) ou S-SE (Blanc,1968,1975). L'herbier est dégradé à faible profondeur et entaillé par des chenaux et "tombants" très prononcés (cf. étude hydrodynamique précitée). Malgré une certaine pollution et la présence de roches karstiques immergées, l'herbier montre un état d'équilibre net vers - 10 à -12 m. et en deça. Le substrat est un calcaire dolomitique du Dogger.

3) L'Anse des Canebiers.

Au sud de la baie de St Tropez, en substratum métamorphique, l'Anse des Canebiers présente un milieu assez différent. Ici, les actions hydrodynamiques sont discrètes et amorties par les qualités exceptionnelles de l'abri. De ce fait, les envasements se manifestent, du côté du large, par l'extension du faciès des "vases terrigènes côtières" dans la baie de St Tropez, tandis que qu'au littoral s'observe un ensablement riche en pélites . Malgré l'influence des dérives littorales, la pollution y apparait maximale et responsable d'une dégradation prononcée de l'herbier .

A la suite des plongées et relevés de la campagne estivale, il a été procédé à une analyse multivariable et à une analyse factorielle en composantes principales portant sur 12 paramètres et 22 plongées .

Variable	Moyenne	Variance	Ecart type
Profondeur	11,95m	2,70	1,64
Teneurs en carbonates	58,45%	28,61	5,34
Lutite	8,6%	13,82	3,71
Médiane	7,20	1,03	1,01
Classement	4,73	0,41	0,64
symétrie	3,59	0,22	0,47
Bioclastes s.l.	74,48%	35,70	5,97
Foraminifères	22,98%	6,90	2,62
Gastéropodes	22,19%	5,38	2,32
Lamellibranches	20,89%	4,36	2,08
Quartz	20,17%	3,76	1,94
Mica	10,94	1,50	1,22

On remarquera que la profondeur, en site relativement abrité se tient à la limite des zones hydrodynamiques H1 et H2. La teneur en carbonates présente une variance élevée du fait de circonstances locales (peuplements benthiques, nature géologique des substrats).

L'envasement demeure assez faible sauf pour le Baie des Canebiers, au golfe de St Tropez. Des cellules locales, où s'effectuent les décantations, expliquent les valeurs élevées de la variance.

Les bioclastes considérés dans le détail des fréquences respectives: Foraminifères, Lamellibranches et Gastéropodes montrent une très apparente homogénéité masquant en réalité une complexité liée aux peuplements et aux micro-milieus révélée par les observations en plongée et l'analyse factorielle.

2 - LES DONNÉES DE L'ANALYSE MULTIVARIÉE :

2-1 - Tableau de mesure (données brutes).

Tableau de mesures , données brutes.

Stations	Profond.	CO ₃ Ca	Lutite	Mediane	Classement D FI	Symétrie SK1	Total Bioclastes	Foraminif.	Gastérop.	Lame'llibr.	Quartz	Micas
Sormiou												
S.3	19	89,0	0,4	1,50	0,66	0,50 AT+	80,4	26,7	33,9	10,1	0,6	0,0
S.4	19	84,3	0,9	1,20	1,29	-0,33 AT-	77,1	29,7	33,7	4,8	0,0	0,0
S.11	13	84,3	0,3	1,70	0,65	-0,60 AT-	69,1	18,8	33,4	8,5	0,0	0,0
S.12	13	71,1	0,6	0,50	0,63	0,50 AT+	62,8	19,4	24,0	9,1	5,9	0,0
S.18	6	41,3	1,0	0,15	0,17	0,02 S	19,0	12,9	3,0	0,1	68,9	0,0
S.19	8	41,3	2,4	0,23	0,83	-0,65 AT-	43,7	13,8	11,4	9,1	32,9	0,0
S.20	8	41,3	2,4	0,15	0,21	0,33 AT+	27,8	15,2	2,4	6,6	57,9	0,0
Port d'Alon												
PA.1	25	84,3	0,7	1,17	1,09	0,21 AT+	98,9	19,8	26,6	8,8	1,1	0,0
PA.2	25	86,0	1,0	0,82	1,55	0,70 AT+	99,8	14,3	20,4	4,8	0,2	0,0
PA.5	16	84,3	0,1	0,78	0,79	0,02 S	94,6	7,8	31,2	4,0	3,2	0,0
PA.6	16	72,7	0,6	0,50	0,82	-0,15 A-	91,7	19,9	17,0	8,1	8,3	0,0
PA.11	6	71,1	1,0	0,31	0,72	-0,12 A-	90,7	11,8	11,2	5,2	8,4	0,0
PA.12	6	76,0	0,1	2,20	0,56	-0,42 AT-	95,4	2,2	15,6	2,9	2,7	0,0
PA.17	2	61,2	2,5	0,30	0,74	-0,66 AT-	73,5	11,8	11,7	5,7	24,1	0,0
PA.18	2	62,8	1,0	0,20	0,38	-0,30 A-	86,4	19,4	7,0	7,9	13,6	0,0
Canebiers												
C.2	28	64,5	32,7	0,12	0,83	0,05 S	95,0	46,4	6,9	25,0	0,0	5,0
C.8	6	33,1	2,5	0,50	1,58	-0,02 S	97,5	21,6	18,6	18,1	0,0	2,5
C.9	11	61,2	35,1	0,63	0,88	0,41 AT+	93,3	18,0	21,2	19,6	6,7	0,3
C.12	15	34,7	67,6	0,04	0,94	0,03 S	64,4	25,6	5,3	24,4	1,1	34,6
C.13	9	54,5	33,2	0,10	0,86	0,01 S	77,0	30,1	12,2	18,8	0,0	23,0
C.14	9	50,0	3,0	1,00	0,20	-1,00 AT-	98,8	26,7	19,8	33,4	0,6	0,6
C.17	1	2,0	0,1	1,00	0,82	-0,57 AT-	1,7	1,3	0,0	0,2	64,6	2,5

2-2 : Matrice au niveau des observations : mode Q

	S.3	S.4	S.11	S.12	S.18	S.19	S.20	PA 1	PA 2	PA 5	PA 6	PA11	PA12	PA17	PA18	C.2	C.8	C.9	C.12	C.13	C.14	C.17	
S.3																							
S.4	0,996																						
S.11	0,995	0,991																					
S.12	0,990	0,982	0,982																				
S.18	0,330	0,787	0,708	0,395																			
S.19	0,534	0,779	0,728	0,421	0,781																		
S.20	0,512	0,723	0,670	0,452	0,781	0,868																	
PA.1	0,651	0,765	0,724	0,632	0,751	0,795	0,727																
PA.2	0,724	0,795	0,761	0,718	0,754	0,799	0,707	0,997															
PA.5	0,770	0,816	0,792	0,769	0,732	0,807	0,692	0,993	0,815														
PA.6	0,799	0,833	0,812	0,800	0,717	0,816	0,677	0,991	0,826	0,706													
PA.11	0,818	0,844	0,825	0,821	0,601	0,823	0,670	0,969	0,836	0,613	0,993												
PA.12	0,833	0,935	0,795	0,837	0,591	0,824	0,660	0,970	0,770	0,624	0,983	0,837											
PA.17	0,839	0,913	0,802	0,844	0,590	0,834	0,659	0,951	0,782	0,559	0,974	0,782	0,657										
PA.18	0,847	0,914	0,810	0,853	0,443	0,839	0,656	0,949	0,789	0,567	0,975	0,795	0,669	0,571									
C.2	0,828	0,889	0,808	0,850	0,436	0,825	0,643	0,940	0,792	0,572	0,955	0,796	0,676	0,575	0,589								
C.8	0,827	0,875	0,807	0,847	0,430	0,816	0,630	0,933	0,725	0,577	0,947	0,801	0,683	0,581	0,595	0,875							
C.9	0,830	0,872	0,810	0,848	0,426	0,812	0,625	0,930	0,732	0,583	0,942	0,778	0,691	0,587	0,601	0,891	0,908						
C.12	0,807	0,817	0,789	0,824	0,416	0,781	0,607	0,896	0,716	0,580	0,895	0,766	0,684	0,585	0,600	0,845	0,750	0,671					
C.13	0,808	0,817	0,798	0,823	0,411	0,774	0,597	0,891	0,719	0,583	0,892	0,769	0,687	0,589	0,595	0,867	0,781	0,704	0,635				
C.14	0,812	0,822	0,792	0,826	0,406	0,773	0,589	0,893	0,711	0,589	0,896	0,776	0,694	0,589	0,487	0,875	0,854	0,734	0,628	0,589			
C.17	0,769	0,738	0,752	0,783	0,412	0,749	0,589	0,831	0,697	0,576	0,822	0,744	0,673	0,582	0,480	0,719	0,656	0,638	0,569	0,531	0,623		

χ^2 P 95 % = 0,170

2-3 : Dendrogramme des observations .

L'analyse de "grappe" montre 4 groupements ou "clusters" :

1°) Herbiér profond de Port d'Alon, à -25 m, au passage des zones hydrodynamiques H2 et H3 où s'amortissent les courants compensateurs ($r=0,997$). Ce groupe homogène est lié ($r=0,831$) à l'influence de la zone H2 (-16m) et aux horizons superficiels des Canebiers (talus détritiqué riche en quartz).

2°) Herbiér de Sormiou : groupe homogène pour une calanque exposée aux vents d'Est (S3,S4,S11,S12), notamment à l'herbiér profond très riche en bioclastes. Le matériel, très carbonaté, grossier, est mal classé ou moyennement classé. Le sable y est mobile et peu envasé, déplacé par les courants de fond en zone H2 ($r= 0,996$ à $0,980$).

3°) Herbiér "frangeant" mélé aux formations du "prisme littoral " (Sormiou et Port d'Alon). Ce sont des sables terrigènes grossiers, voire des galets ou graviers en zone très battue (H1) où se manifestent les déferlements ($r=0,868$;S19,S 20,PA19). L'herbiér y est très dégradé, y compris la zone de passage au niveau H2 ($r=0,807$ à $0,787$).

4°) Le "cluster" le plus important est une "grappe" très homogène ($\Delta r=0,030$) de $0,850$ à $0,820$. Elle comporte :

- les fonds relativement abrités de la baie de Port d'Alon en zones H1 et H2, avec apports terrigènes notables mais irréguliers et lessivés (pas d'envasement).

- la baie des Canebiers, très abritée et fortement envasée (jusqu'à 6% de quartz et, au maximum, 67% de lutite). Ce sont des sables vaseux peu carbonatés.

L'analyse multivariable montre des corrélations nettes entre les "grappes" mentionnées. Ces dernières n'impliquent pas nécessairement une relation de cause à effet : herbiér profond - "prisme littoral", agitation de l'eau-abri lié aux calanques. L'intervalle de confiance (I.C.) traduit cette marge:

$r=0,997$; $0,996$	I.C.= $0,900$; $0,981$
$r=0,980$	I.C. # d°
$r=0,868$	I.C.= $0,670$; $0,942$
$r=0,800$; $0,807$	I.C.= $0,580$; $0,930$
$r=0,795$	I.C. # d°
$r=0,787$	I.C.= $0,520$; $0,920$

$P_{ij}/p_i = p_{j/i}$: probabilité d'avoir j sachant que l'on a i (probabilité conditionnelle pour un ensemble I à n éléments tels que i (prélèvements), - et un ensemble J (descripteurs, variables) à p éléments tels que j).

On calcule les rangées :

$$n_i = \sum_{j \in J} n_{ij}$$

et les colonnes :

$$n_j = \sum_{i \in I} n_{ij}$$

pareillement :

$$p_i = \sum_{j \in J} p_{ij} \quad p_j = \sum_{i \in I} p_{ij}$$

(méthode in Cugny, 1975).

On a une matrice des intercorrélations p_{ij}/p_i (rangées = prélèvements i et colonnes = variables j). On peut, avec la même méthode calculer la distance entre deux éléments : $d^2(j, j')$ pour le mode R (descripteurs) ou $d^2(i, i')$ pour l'espace des prélèvements (mode Q): on a donc une variante de l'expression de la distance euclidienne classique : (distance du "chi-deux" proposée par J.P. Benzecri, 1970):

$$d^2(j, j') = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} (p_{ij}/p_j - p_{ij'}/p_{j'})^2 \text{ en } R$$

$$d^2(i, i') = \sum_{j=1}^p \frac{1}{p_j} (p_{ij}/p_i - p_{i'j}/p_{i'})^2 \text{ en } Q$$

On peut ainsi grouper des "clusters" de prélèvements en fonction de la probabilité d'apparition de tel "allochem" (ou variable) en fonction d'une autre variable (lutite = envasement , fréquence du quartz = décharges détritiques).

Ainsi, trois "clusters" essentiels apparaissent sur le dendrogramme obtenu à partir de la matrice de corrélations des probabilités conditionnelles obtenue au niveau des observations (mode Q).

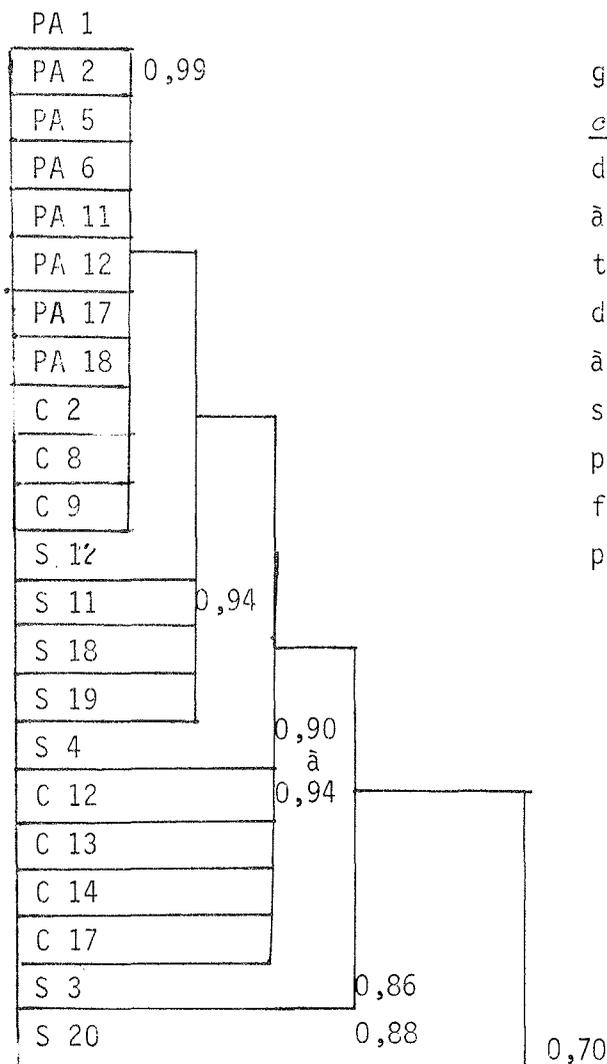
1°) Herbier de Port d'Alon et zone H2 de l'herbier des Canebiers (amortissement des houles, courants compensateurs et tendance à l'équilibre): $r = 0,99$ ($\Delta r = 0,030$)

2°) puis, pour $r = 0,94$: herbier de Sormiou, en zone H2, assez dégradé par les courants de décharge, mattes érodées et "tombants", sable

remanié. La profondeur diminue pour ce "cluster" de - 13 m à - 8m.

3°) "Grappe" de 0,90 à 0,94 groupant l'herbier profond de Sormiou (-19m) en équilibre et l'herbier des Canebiers, du rivage à - 15m. Ici on notera l'envasement, l'enrichissement en quartz et micas détritiques et d'importantes fluctuations parmi les teneurs en bioclastes. L'asymétrie négative souligne la progression du colmatage tandis que le classement montre la faiblesse des mouvements au niveau du fond.

Par ailleurs, l'herbier profond de Sormiou, en deçà de - 20 m et l'étalement du prisme littoral de la même calanque demeurent plus faiblement corrélés avec les grappes précédentes (0,86; 0,88 ; 0,70).



Cette représentation du dendrogramme obtenu à partir d'une matrice des corrélations de "probabilités" s'avère différente de 2-3 et correspond davantage à la localisation géographique des échantillons. En classification automatique des sites et radiales, on peut avoir intérêt à adopter une analyse multivariée basée sur les probabilités plutôt que les simples pourcentage corrélés. Mais l'influence des facteurs actifs peut y apparaître "écrasée" par la variance des échantillons.

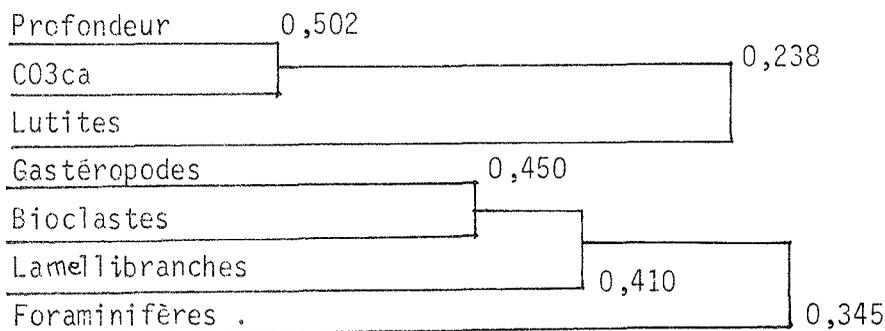
Dendrogramme de la matrice au niveau des observations (mode Q) : probabilités conditionnelles .

2-5 : Matrice au niveau des variables (mode R).

	Prof.	CO3Ca	Lutite	Q2	DFI	SKI	Bioc.	F	G	L	Q	M
Prof.												
CO3Ca	0,502											
Lutite	0,238	-0,480										
Médiane	0,169	-0,135	-0,368									
Classem.	0,139	-0,180	-0,152	0,740								
Symétrie	0,122	-0,210	-0,350	0,940	0,290							
Bioclastes	0,134	0,440	0,090	0,040	-0,060	-0,210						
Forams.	0,144	0,450	0,400	0,008	-0,060	-0,210	0,345					
Gastérop.	0,154	0,520	0,210	0,020	-0,050	-0,190	0,450	-0,116				
Lamellib.	0,154	0,310	0,490	0,070	-0,020	-0,240	0,410	-0,450	0,200			
Quartz	0,102	0,020	0,200	0,090	-0,008	-0,220	-0,590	-0,710	-0,230	-0,150		
Micas	0,100	-0,240	0,500	0,180	0,050	-0,210	-0,480	0,130	0,110	0,240	-0,160	

χ^2 P 95 = 0,192

2-6 : Dendrogramme des corrélations positives des herbiers (calanques).



Les données des variables sont assez faiblement corrélées et paraissent "écrasées" par les observations (échantillons) et leurs variances. Parmi les liaisons significatives :

Deux "grappes" :

1°) relations entre la profondeur et le taux en carbonates ($r = 0,502$), très faiblement liée aux envasements (lutite), avec $r = 0,238$.

2°) Total des bioclastes dénombrés et Gastéropodes ($r=450$), puis, Lamellibranches (0,410) et enfin, assez faible corrélation avec les Foraminifères (0,345).

2-7 : Dendrogramme des corrélations négatives (herbiens de Calanques).

Lutite	-0,368
Médiane	
Symétrie	-0,210
CO3Ca	

1°) opposition "triviale" ; lutite - médiane (-0,368)

2°) corrélation négative : symétrie - teneurs en carbonates (-0,210).

Le quartz et les micas sont généralement en corrélation négative très faible et non significative avec la plupart des composants bioclastiques (χ^2 P 95% = 0,192). La validité des corrélations entre variables est très affaiblie par les marges des intervalles de confiance .

3 - ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTES PRINCIPALES .
(MODE R ; VARIABLES),

Herbier à posidonies (calanques de Sormiou, Port d'Alon, Anse des Canebiers).
Campagne 1977.

Matrice des "facteurs scores" (Unrotated factor loading)

Variabiles.	F1	F2	F3	F4
Profondeur	- 0,397	-0,864	0,666	0,710
Carbonates	- 0,885	-0,150	-0,187	0,589
Lutite	1,018	0,024	0,299	0,426
Médiane	1,021	0,070	0,908	0,661
Classement	2,194	0,585	0,354	0,405
Symétrie	1,484	-0,051	-0,453	-0,117
Bioclastes	0,548	0,408	0,597	0,376
Foraminifères	-1,063	-0,574	-0,240	0,223
Gastéropodes	0,174	0,090	0,290	0,499
Lamellibranches	1,128	0,689	0,342	0,387
Quartz	-1,107	1,296	0,587	-0,176
Micas	-4,667	0,818	0,125	0,177
Variance	2,979	0,332	0,149	0,071
Variance cumulée	2,979	3,311	3,460	3,531
% Variance relative	83,21	9,40	5,38	2,01

- Le facteur 1 (83,21% de la variance relative) est en liaison négative avec les teneurs en minéraux détritiques d'origine littorale, notamment le quartz et les micas, ce qui diminue d'autant les teneurs en carbonates, en fonction inverse de la profondeur. Ce facteur 1 est donc partiellement responsable de l'envasement et par ce fait, en relation avec les teneurs en lutite et les paramètres granulométriques tels que classement, médiane et symétrie.

Liaison négative forte vis à vis des Foraminifères et, inversement, liaison positive avec les pourcentages des Lamellibranches.

- Facteur 2 (9,40 % de la variance) : beaucoup moins significatif. Il paraît lié au quartz et aux micas (épandages détritiques littoraux), au classement (action des courants sur le fond) et aux Lamellibranches. Influence modérée de l'ensemble des stocks d'origine bioclastique en fonction inverse de la profondeur.

- Facteur 3 (5,38 %). Ce dernier facteur peut être lié à la profondeur croissante et à des triages granulométriques sélectifs (courants de fond), agissant sur la médiane, le classement et la symétrie négative (gradient d'envasement). Influence faible ou non significative des peuplements.

- Facteur 4 (2,01 %) : très peu significatif, lié à la profondeur et à la teneur en carbonates d'origine essentiellement biogénique. Cela explique une liaison moyenne vis à vis des paramètres granulométriques et des peuplements benthiques (Lamellibranches, Gastéropodes, Foraminifères).

ORDINATION ET CONCLUSIONS ,

Nous considérerons essentiellement les espaces les plus significatifs correspondant aux axes factoriels F1, F2 et F3 (fig.33' et 33").

1°) Le plan factoriel F1-F2, le plus riche en informations, confirme l'affinité : lutite, médiane, symétrie et bioclastes. Mais il apparaît (fig.33')

Fig.33'

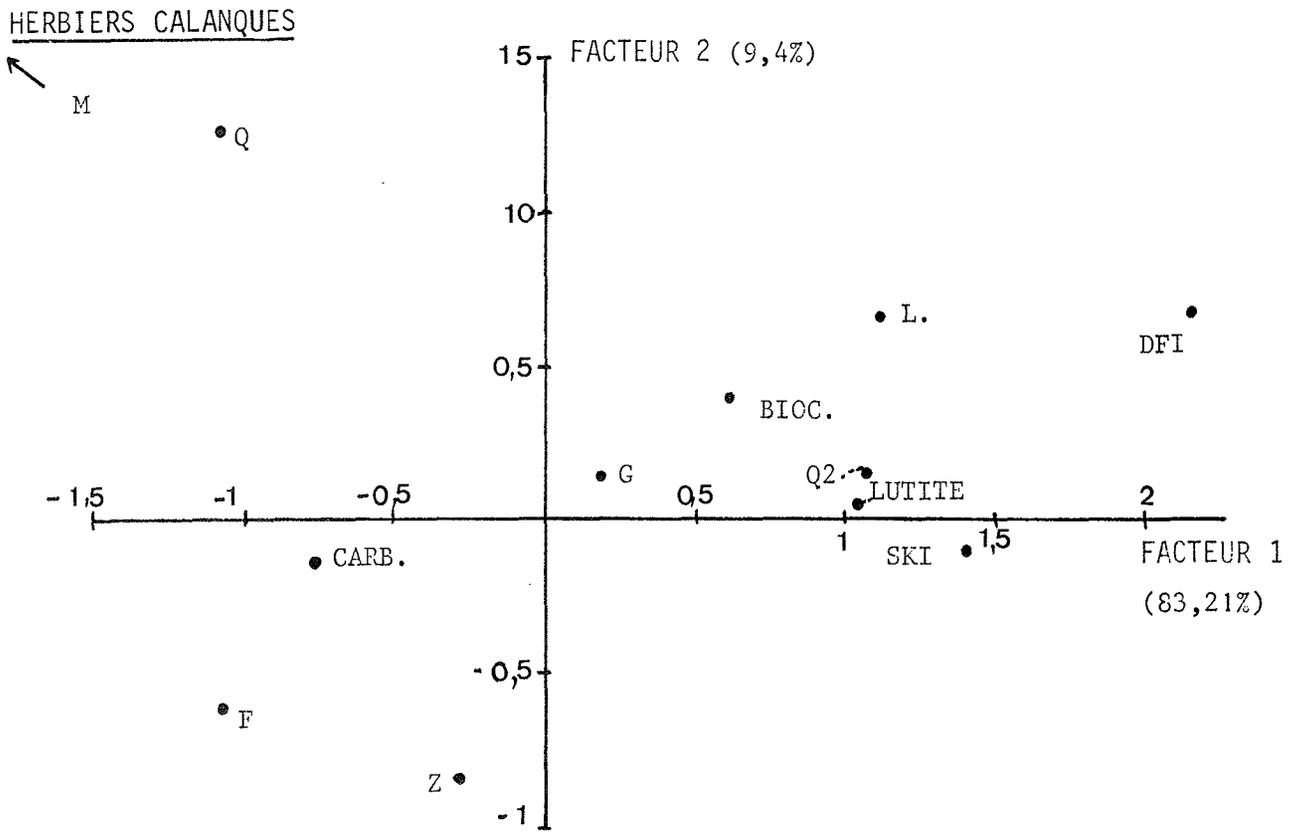
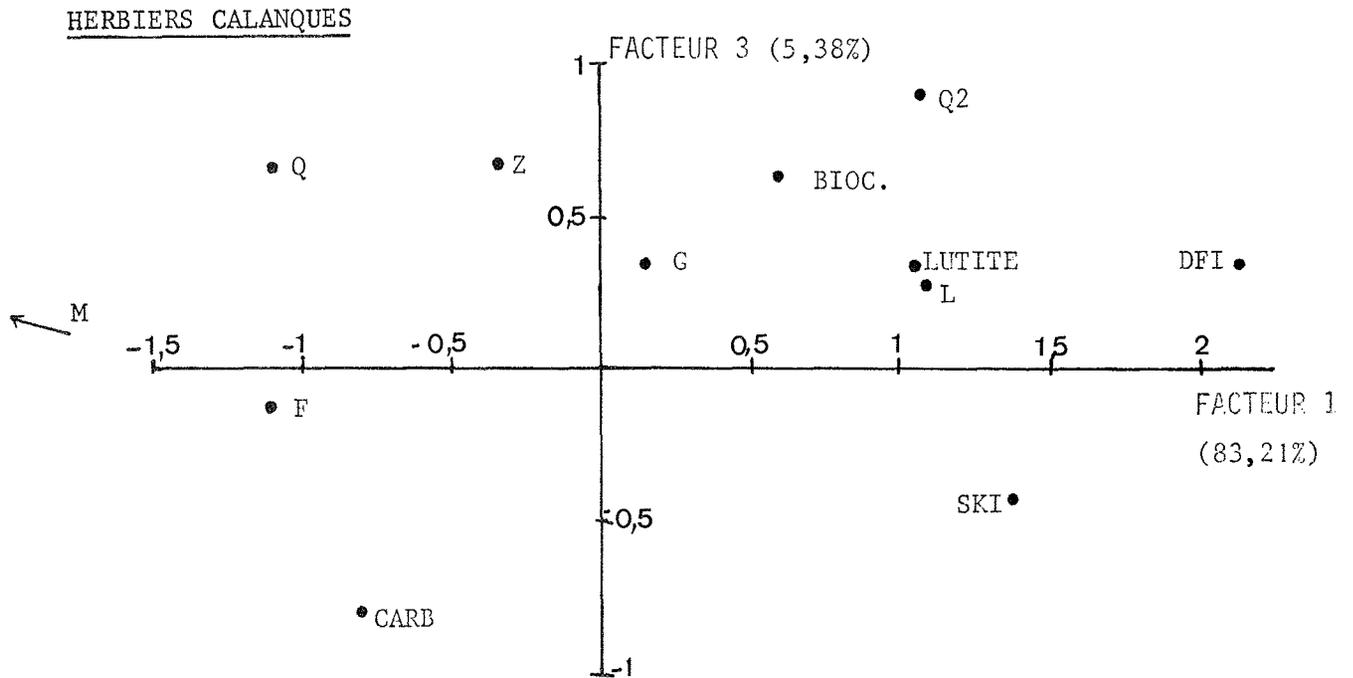


Fig.33''



M : micas
 Q : quartz
 Z : profondeur
 Q2 : médiane
 BIOC. : bioclastes

F : Foraminifères
 G : Gastéropodes
 L : Lamellibranches
 DFI : Classement
 SKI : Symétrie
 CARB. : Carbonates

que les carbonates et les Foraminifères s'avèrent indépendants des autres bioclastes- Lamellibranches et Gastéropodes. Pour les calanques de Sormiou et de Port d'Alon, une fraction notable des carbonates est imputable au substratum crétacé ou jurassique, ce que confirment les observations microscopiques.

- Le quartz et surtout le mica sont repoussés au "quart" F2 (+) et F1 (-).

On peut effectuer les hypothèses suivantes :

- l'axe F1 conditionne essentiellement les paramètres granulométriques, le taux d'envasement et les mouvements hydrodynamiques .

- l'axe F2 est à rattacher partiellement à une diminution de la profondeur et aux peuplements à Gastéropodes .

Deux remarques :

1) le quartz et le mica détritiques sont "tirés " à la fois par le facteur "négatif" F1 et le facteur F2 (diminution de la profondeur au niveau des talus du "prisme littoral").

2) à l'exception des Foraminifères, les bioclastes sont liés ici, à la profondeur et surtout aux facteurs granulométriques et hydrodynamiques.

2°) Considérons maintenant le plan des axes F1 et F3, moins riche en informations mais demeurant significatif.

L'axe F3 correspond à une augmentation de la profondeur et aux fréquences des Gastéropodes (fig.33").

- quartz, micas, carbonates et Foraminifères sont "tirés" dans l'"espace négatif" de F1, correspondant partiellement à une diminution de la distance au rivage.

- à l'opposé, classement, symétrie, teneurs en lutite paraissent influencés par le degré d'agitation des eaux .

- la médiane, les bioclastes et les Gastéropodes dépendent, pour leur répartition, à la fois des phénomènes hydrodynamiques et de la profondeur (amortissement des courants orbitaires).

III' - 4 - EVOLUTION RAPIDE

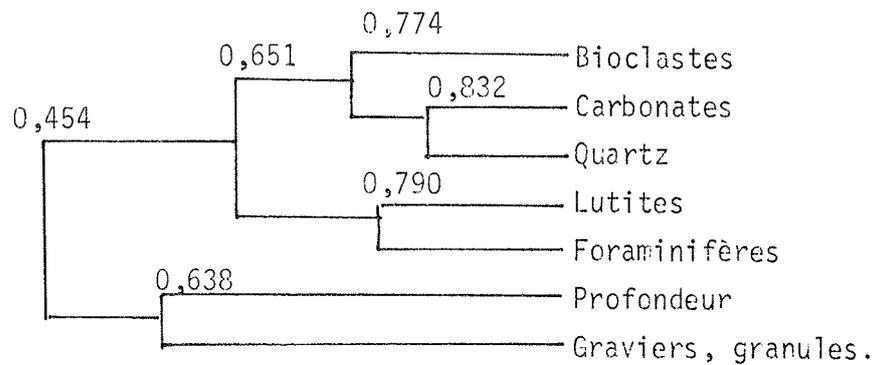
HERBIER DU BRUSC ET DES EMBIEZ.

- Matrice des variables (mode R) : "allochems".

	Profondeur	Lutite	Carbonates	Graviers et granules	Foraminifères	Bioclastes	Quartz
profondeur							
lutite	0,158						
carbonates	0,352	0,314					
graviers granules	0,638	-0,454	-0,087				
Foraminifères	0,075	0,790	0,573	-0,210			
Bioclastes	0,134	-0,058	0,774	-0,437	-0,485		
Quartz	0,284	-0,115	-0,832	0,055	-0,651	-0,679	

$r_s = 0,136$ $P=0,95$

- Dendrogramme



On note l'importance des apports détritiques quartzeux issus du littoral et de la productivité biologique. La microfaune des herbiers se corrèle avec un envasement indépendant de la profondeur. Cette dernière régle la teneur en graviers et granules pelygéniques.

- La matrice des similarités montre que le taux des Foraminifères est associé aux lutites (envasement) et aux bioclastes remaniés. Les graviers bioclastiques augmentent avec la profondeur .

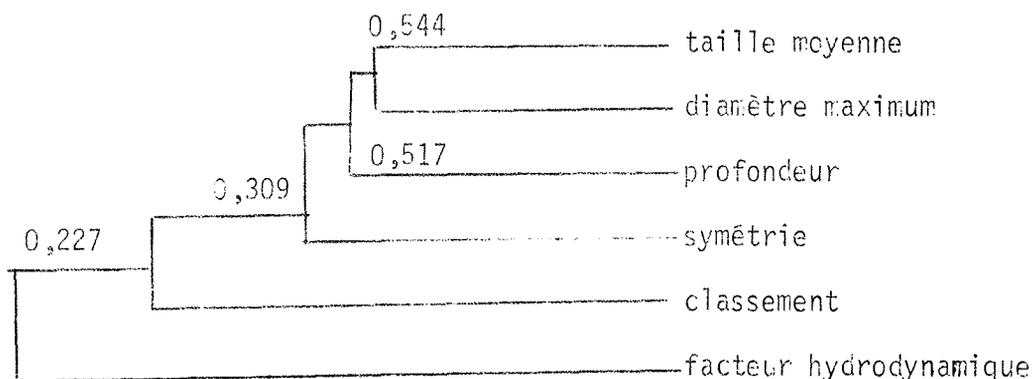
- Matrice des corrélations granulométriques (mode R)

	TM	d max	FH	DFI	SK1	Z
TM						
d Max	0,544					
FH	-0,118	-0,024				
DFI	0,039	0,425	0,227			
SK1	0,511	0,368	-0,325	0,302		
Z	0,263	0,517	-0,340	0,309	0,375	

$r = 0,162$

$P = 0,95$

- Dendrogramme.

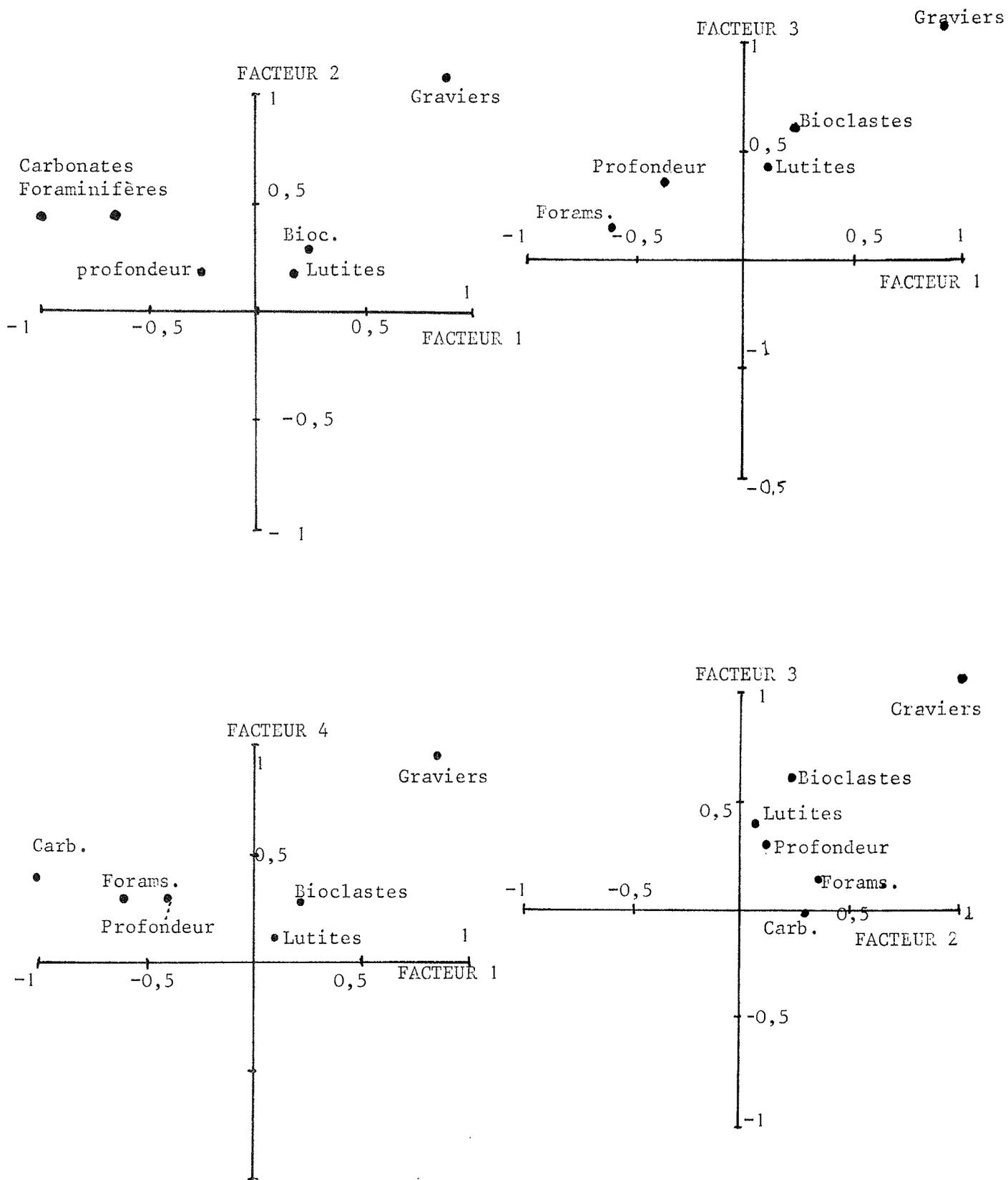


Les matrices mettent en évidence le rôle des stocks liés aux peuplements benthique et réglant la taille moyenne et le diamètre maximum du sédiment. Puis, vient l'influence de la profondeur associée à la symétrie des distributions. Les corrélations sont médiocres avec le classement et le facteur hydrodynamique.

Fig.34

HERBIER à POSIDONIES DU CAP COURONNE .

Analyse factorielle et ordination.



- Analyse factorielle (allochems, lutite, carbonates).

Facteurs scores ("unrotated factor loading").

Variabiles	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
profondeur	0,730	0,979	0,158
lutite	-0,11	0,608	0,458
carbonates	1,030	0,760	0,469
graviers/ granules	0,014	0,188	0,274
Foraminifères	0,230	0,405	0,526
bioclastes	-0,271	0,092	0,260
quartz	-0,110	-0,441	1,044
% variance relative	55,35	37,05	7,58

- F1 :(55,3 var.) : teneurs en carbonates et profondeur, conditions édaphiques générales du milieu infralittoral biogène, agité et non envasé.

- F2 :(37% var) : il régit la profondeur, les teneurs en lutite (envasement) et les carbonates, en fonction inverse du quartz détritique d'origine littorale.

- F3 :(7,5% var.) : éléments détritiques quartzeux issus des talus littoraux. Secondairement : taux de Foraminifères , teneurs en carbonates et en lutite.

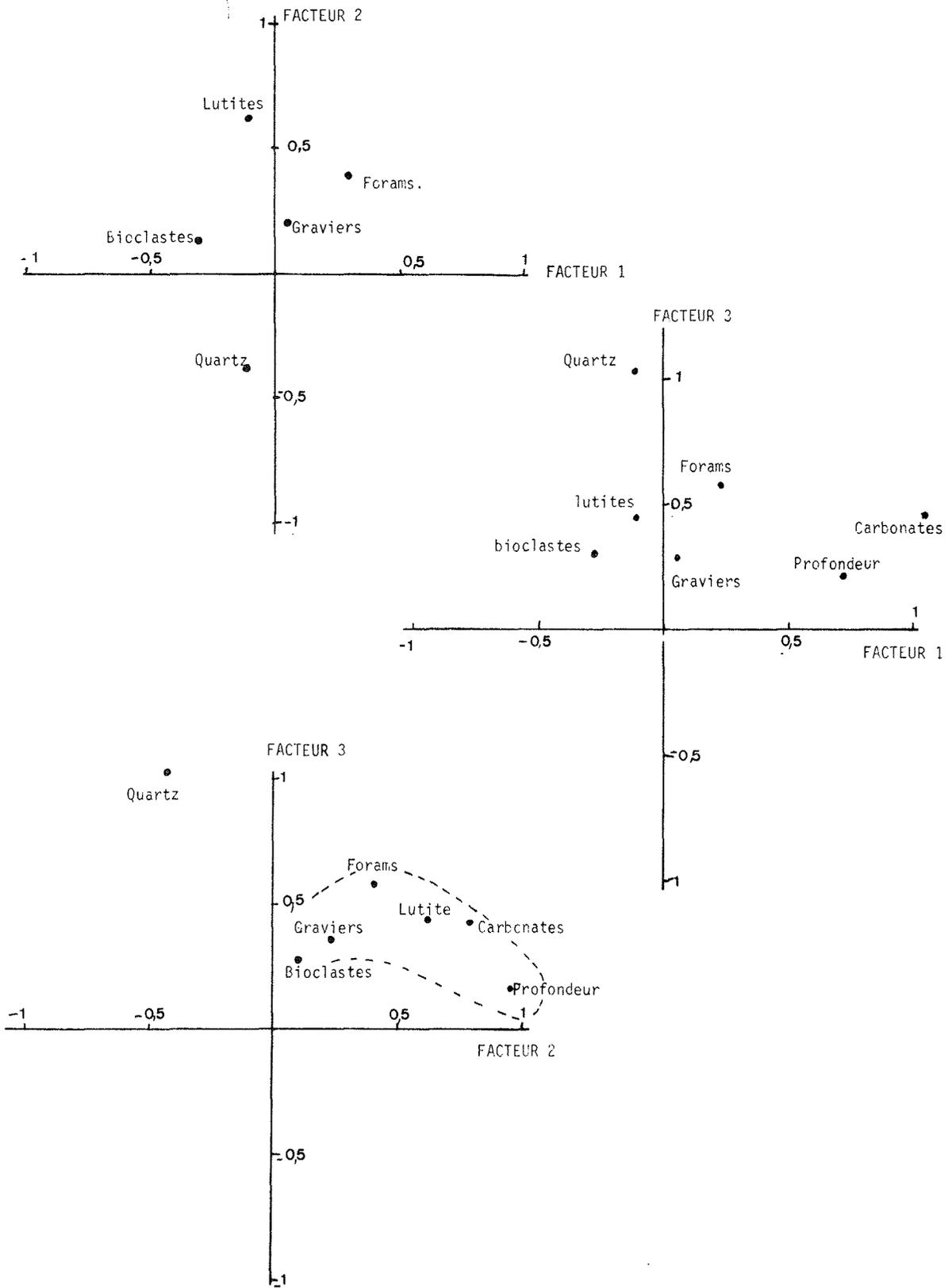
L'analyse factorielle en composantes principales fait mieux apparaître le paramètre "profondeur". Le dendrogramme paraît exprimer certaines redondances quant aux mesures concernant l'envasement , les graviers et les Foraminifères (Fig.35.).

- Ordination (fig.35).

- L'espace des axes F1-F2 montre une forte dispersion des variables liée à notre échantillonnage (8 plongées). Profondeur et teneurs en carbonates liées s'opposent au pôle détritique (quartz).

FIG.35

HERBIER A POSIDONIES : LES EMBIEZ . ANALYSE FACTORIELLE ET ORDINATION.



- L'espace défini par les axes F1-F3 montre le groupe : profondeur, carbonates opposé à l'ensemble lutite et bioclastes. Tous les carbonates ne sont pas biogéniques (lutites polygéniques). On a toujours l'opposition du pôle "quartz détritique".

- Pour le graphe des axes F2-F3, outre l'indépendance du quartz, on a un ensemble orienté des graviers et bioclastes vers un envasement, une profondeur et un taux en carbonates (polygéniques) croissants.

- Analyse factorielle des indices granulométriques.

Tableau des facteurs scores .

Variabes	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
Taille moyenne	0,642	0,302	0,243	0,291
diam. maximum	0,812	0,454	0,341	0,512
facteur hydrodyn.	0,120	0,335	0,288	0,358
classement	0,660	0,234	0,337	0,425
symétrie	0,640	0,284	0,412	0,401
profondeur	0,609	0,277	0,360	0,415
% variance relative.	82,14	7,14	3,57	7,14

F1 : (82,14 var) : ce facteur essentiel concerne les données granulométriques telles que le diamètre maximum, le classement, la symétrie et la taille moyenne du sédiment.

L'ordination confirme l'importance du paramètre : "diamètre-maximum" et sa liaison avec la profondeur, le classement et la symétrie de la distribution. Ce facteur exprime les caractères granulométriques des sables et graviers bioclastiques caractérisant les fonds de l'herbier à Posidonies, déterminés par la nature des peuplements benthiques.

F2 : (7,1 % var) : assez peu significatif, il paraît lié aux facteurs hydrodynamiques (DM et FH).

F3 : non significatif.

F4 : (7,1 % var.) : assez peu significatif, il groupe des paramètres granulométriques conjugués avec un facteur hydrodynamique net. La profondeur

y montre une certaine influence . Ce facteur est difficile à interpréter ; il peut être partiellement assimilé à une résultante globale d'actions hydrodynamiques.

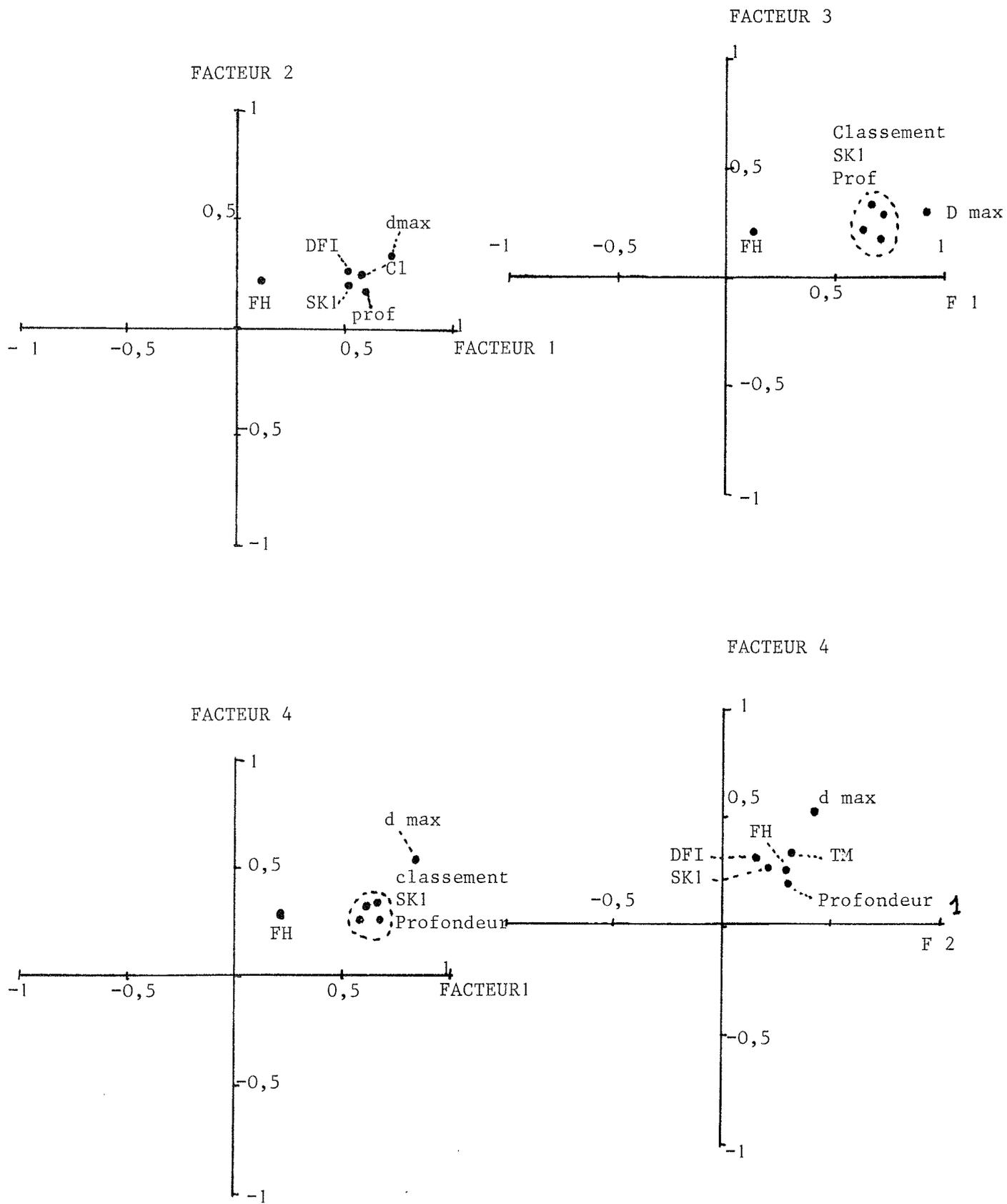
- Ordination des indices granulométriques (fig. 36).

Les espaces des axes F1 - F2; F1-F3 ; F1-F4 et F2-F4 montrent un groupement systématique traduisant un sédiment homogène, grossier, lessivé, moyennement lié à la profondeur (SK1, D FI, TM, d Max) .

A l'exception de l'espace des axes F2-F4, le facteur hydrodynamique s'avère indépendant des paramètres précités . Son groupement exceptionnel avec les autres, lié à la présence du facteur 4 peut être rattaché , à titre d'hypothèse, à l'action de déplacements importants au niveau du fond. Ces derniers ont été confirmés par d'autres méthodes (observation, Foraminifères).

HERBIER A POSIDONIES DES EMBIEZ

Ordination des paramètres granulométriques .



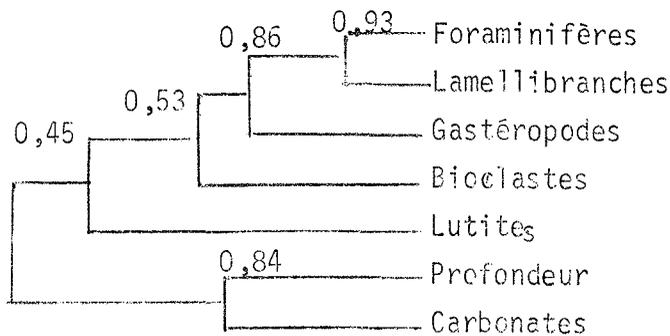
III ' - 5 - HERBIER DE BAIES OUVERTES : RADE D'HYÈRES.

- Matrice des corrélations : allochems, profondeurs, lutites (moder).

	Prof.	CO3 Ca	Lutite	Biocl.	Forams	Gasterop.	Lamellib.	Quartz	Micas
Profondeur									
CO3 Ca	0,84								
Lutite	-0,60	-0,50							
Bioclastes	0,21	0,47	0,44						
Forams.	-0,33	-0,07	0,53	0,69					
Gastérop.	-0,47	-0,11	0,46	0,58	0,82				
Lamellib.	-0,47	-0,15	0,61	0,63	0,93	0,86			
Quartz	-0,27	-0,51	-0,38	-0,99	-0,69	-0,56	-0,64		
Micas	0,17	-0,10	-0,23	-0,04	0,14	0,11	0,03	0,004	

seuil signi. $r = 0,057$ $P=0,95$

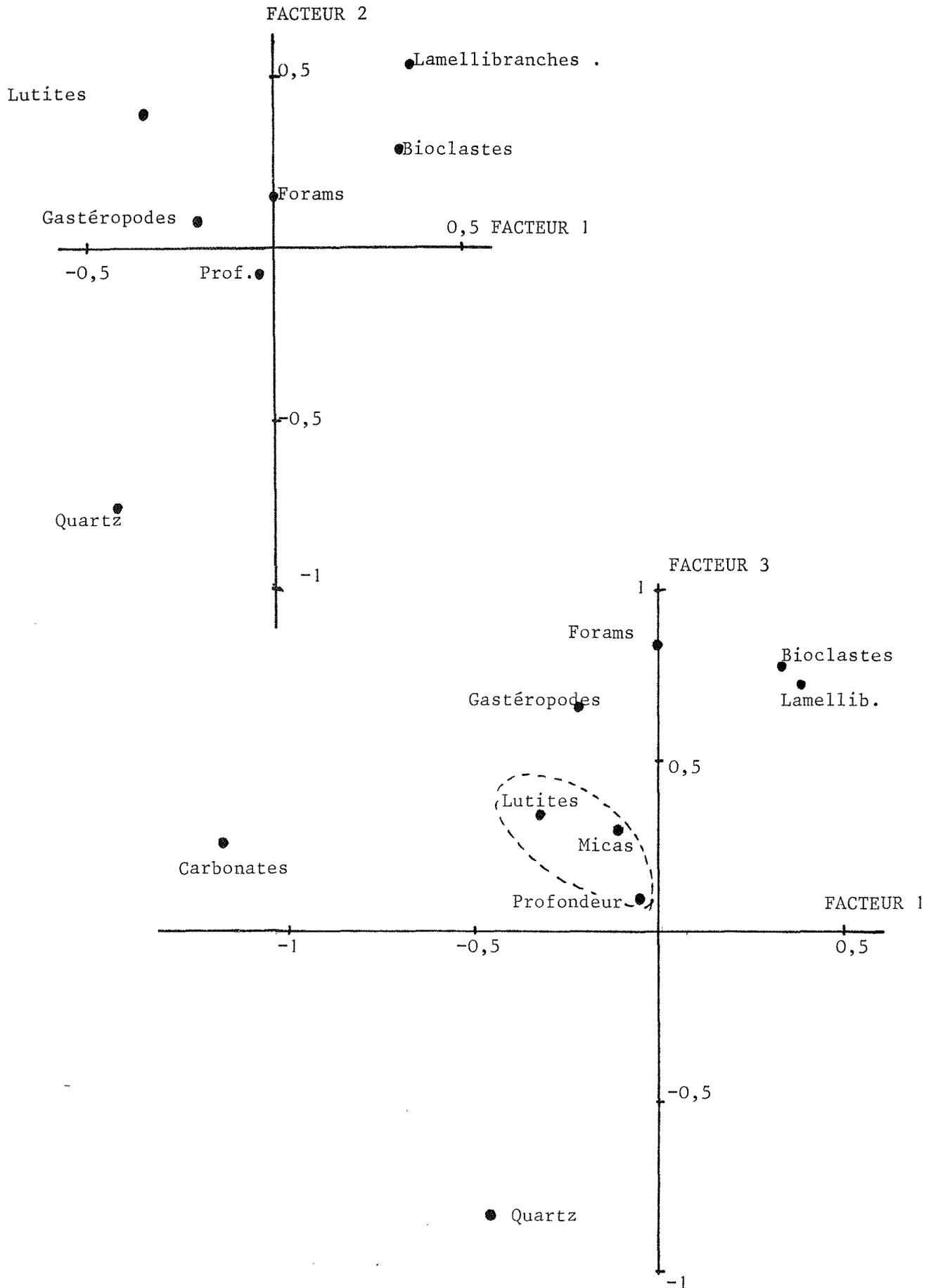
- Dendrogramme.



Le dendrogramme traduit l'influence des peuplements benthiques et de leurs débris : Foraminifères, Lamellibranches, puis Gastéropodes. Profondeur et teneur en carbonates expriment une autre "grappe", en étroite corrélation. Cette dernière est partiellement liée à la distance du prisme littoral (plages d'Hyères et du Ceinturon).

L'envasement est lié aux apports d'orages et aux crues du Gapeau et du Pansard ; il demeure préjudiciable aux peuplements de l'herbier.

HERBIERS A POSIDONIES DE LA RADE D'HYERES . Analyse factorielle .



L'importance des corrélations négatives se traduit par les deux "pôles" opposés : teneurs en quartz détritique et teneurs en bioclastes.

-Analyse factorielle : allochems, lutites, carbonates.

Facteurs scores.

Variabes	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
Profondeur	- 0,021	-0,780	0,020	0,016
Teneur en carbonates	- 1,110	1,380	0,250	- 0,914
Lutites	- 0,346	0,459	0,380	0,131
Bioclastes	0,352	0,295	0,860	- 0,194
Foraminifères	0,000	0,131	0,870	- 0,003
Gastéropodes	- 0,212	0,055	0,780	- 0,431
Lamellibranches	0,391	0,511	0,810	- 0,154
Quartz	- 0,457	- 0,882	- 0,870	- 0,207
Micas	- 0,028	- 0,047	0,310	- 0,006
% relatif de la variance .	36,03	30,27	17,83	15,85

- Facteur 1 (36 % var) : en relation avec les peuplements benthiques infralittoraux de l'herbier, prospérant en fonction inverse des envasements et apports détritiques grossiers .

- Facteur 2 (30 % var) : ce facteur paraît dépendre de la teneur globale en carbonates et du gradient d'envasement. Les peuplements à Lamellibranches contribuent à l'accroissement de la fréquence des carbonates biogéniques.

- Facteur 3 (17,8 % var) : Peuplements benthiques et stock biodétritique carbonaté ; bioclastes et Foraminifères principalement, indépendamment de la profondeur, dans la limite de l'étage infralittoral.

- Facteur 4 (15,8 % var) : il semble exprimer une relation inverse des taux en carbonates biogéniques vis à vis de la fraction fine décantée en milieu calme (lutite). Ce facteur complexe et mal défini, peut être en relation avec un amortissement de la houle et des courants à une certaine distance du rivage.

En comparant avec les résultats de la "cluster analysis", on confirme l'importance de la productivité biologique dans l'élaboration du sédiment et la corrélation inverse avec les décharges détritiques (quartz). Cette dernière est moins prononcée pour les micas du fait d'un phénomène de transport vers le large par flottation.

- Ordination (fig. 36' et 37).

Les espaces définis par les axes factoriels appellent les remarques suivantes :

- Axes F1-F2 : opposition significative : lutites vis à vis des Lamellibranches et bioclastes , indépendamment de la profondeur .

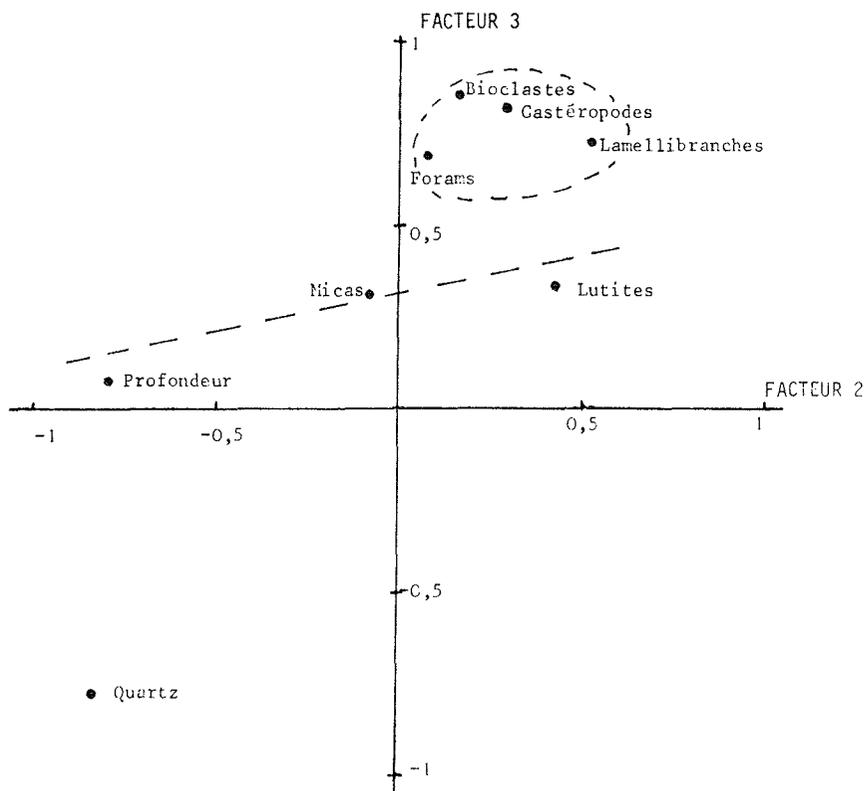
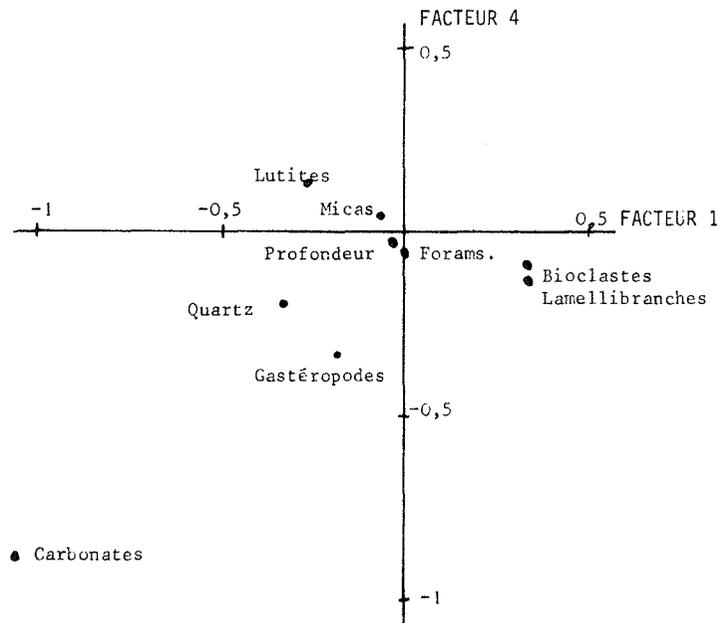
- Axes F1-F3 : les carbonates comportent une fraction d'origine détritique et non biogénique (apports du Gapeau), opposés par ailleurs au "pôle" : bioclastes, Lamellibranches. Le "pôle" quartz détritique est opposé à la fois aux carbonates et aux bioclastes -lamellibranches. Les micas flottés se lient , vers le large, à la profondeur et au gradient d'envasement .

- Axes F1-F4 : assez peu significatif . Opposition du quartz et des lutites aux lamellibranches -bioclastes .

- Axes F2-F4 : le "nuage" : Bioclastes , Gastéropodes, Lamellibranches et Foraminifères s'oppose au quartz. Les micas (flottés), ont une position intermédiaire sur un axe : profondeur - micas - lutites .

FIG.37

HERBIERS A POSIDONIES DE LA RADE D'HYERES.



III ' - 6 - HERBIER EN MODE AGITÉ (HOULES ET COURANTS) :

BRÉGANÇON ET CAP LÉOUBE (MAURES OUEST).

- La matrice des données et la matrice en mode Q font apparaitre, pour cette série, la variabilité des profondeurs et surtout, des teneurs en lutites. Les valeurs mesurées montrent de forts écarts .

variables	moyenne	variance	écart type.
profondeur	19,85	43,80	6,62
Lutites en %	17,14	187,25	13,68
carbonates %	31,14	329,83	18,16
Graviers granules %	6,00	17,85	4,25
Algues	2,52	5,23	2,28
Foraminifères	21,08	138,13	11,75
Bioclastes	11,15	26,15	5,11
Lamellibranches	11,08	62,88	7,92
quartz	17,08	785,56	28,02

- Matrice des allochems , mode R

Z = profondeur

Lut = lutites

CO3Ca = carbonates

Gr = graviers et granules

A = Algues

F = Foraminifères

B = bioclastes

G = Gastéropodes

L = Lamellibranches

Q = quartz

M = Micas

III ' - 6 - HERBIER EN MODE AGITÉ (HOULES ET COURANTS) :

BRÉGANÇON ET CAP LÉOUBE (MAURES OUEST).

- La matrice des données et la matrice en mode Q font apparaitre, pour cette série, la variabilité des profondeurs et surtout, des teneurs en lutites. Les valeurs mesurées montrent de forts écarts .

variables	moyenne	variance	écart type.
profondeur	19,85	43,80	6,62
Lutites en %	17,14	187,25	13,68
carbonates %	31,14	329,83	18,16
Graviers granules %	6,00	17,85	4,25
Algues	2,52	5,23	2,28
Foraminifères	21,08	138,13	11,75
Bioclastes	11,15	26,15	5,11
Lamellibranches	11,08	62,88	7,92
quartz	17,08	785,56	28,02

- Matrice des allochems , mode R

Z = profondeur

Lut = lutites

CO3Ca = carbonates

Gr = graviers et granules

A = Algues

F = Foraminifères

B = bioclastes

G = Gastéropodes

L = Lamellibranches

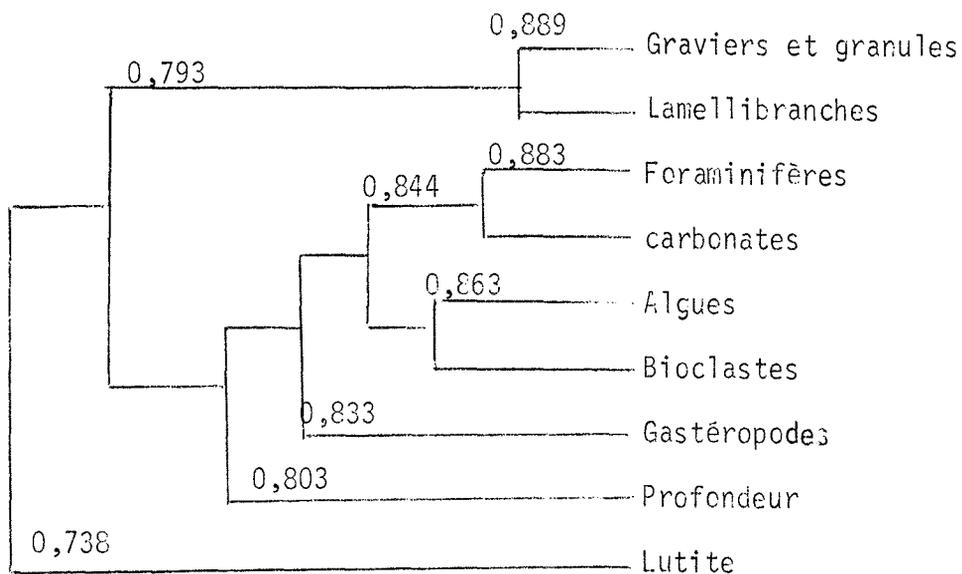
Q = quartz

M = Micas

	Z	Lut	CO3Ca	Gr	A	F	B	G	L	Q	M
Z											
Lut	0,521										
CO3ca	0,803	0,465									
Gr	0,668	0,399	0,793								
A	0,714	0,000	0,799	0,785							
F	0,720	0,545	0,833	0,651	0,601						
B	0,547	0,637	0,844	0,598	0,863	0,830					
G	0,786	0,124	0,833	0,789	0,497	0,596	0,428				
L	0,751	0,738	0,715	0,889	0,467	0,668	0,397	0,742			
Q	-0,614	-0,581	-0,826	-0,731	-0,624	-0,917	-0,714	-0,695	-0,761		
M	-0,670	-0,433	-0,470	-0,481	-0,314	-0,209	-0,274	-0,550	-0,468	0,044	

r signif < 0,005 P = 0,95

- Dendrogramme



L'analyse de "grappes" comporte :

- 1) la liaison des graviers et granules aux biocoenoses benthiques à Lamellibranches.
- 2) La teneur élevée en carbonates paraît modulée par les taux en Foraminifères , puis Algues et bioclastes.

3) La profondeur croissante de ces milieux infralittoraux paraît favoriser le développement de la productivité biologique benthique, notamment en zone H2, en deçà de l'action majeure des vagues et déferlements .

4) Les variations inverses s'observent :

- corrélation inverse entre les décharges détritiques (quartz) et les taux en foraminifères. Cette incompatibilité s'avère moindre pour les micas qui, transportés par flottation, peuvent se décanter assez loin du littoral.
- corrélation inverse classique : quartz / teneurs en carbonates.

La matrice et le dendrogramme de similarités confirment ces points de vues. On remarque l'influence modérée des envasements en zones agitées (H1 et H2) accompagnée, pour ces mêmes niveaux, du rôle essentiel des graviers et granules, en corrélation avec les Lamellibranches.

L'analyse multivariée confirme, comme pour la baie d'Hyères, l'influence majeure des peuplements, et les taux en carbonates qui en sont la conséquence, les gradients hydrodynamiques liés à la profondeur et à d'autres facteurs non analysés, le rôle négatif des décharges détritiques.

- Matrice de corrélation des données granulométriques

Q ²	Médiane Q2	d max	FH	Classement DFI	Profondeur Z
d max	-0,263				
FH	0,256	-0,298			
DFI	0,168	0,621	-0,686		
Z	0,005	0,598	-0,307	0,425	

r signif = 0,188

P=0,95

Le sédiment polygène (terrigène et bioclastique), montre de fortes irrégularités (observation : 10 plongées) au niveau de Q2, d_m et FH. Ce dernier est plus élevé dans les chenaux et au voisinage des "tombants". Le classement varie :

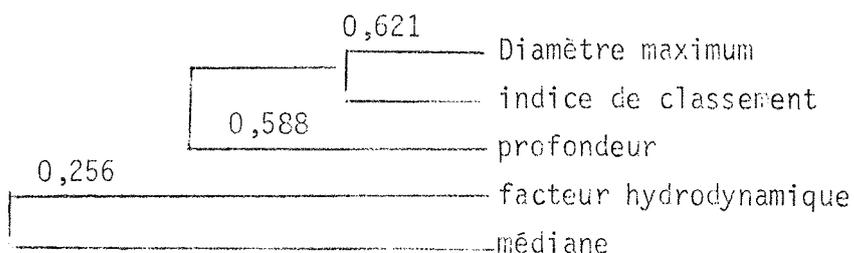
- échantillons très bien classés (0,36)
- échantillons extrêmement bien classés (0,14 à 0,24)
- échantillons non classés (2,00)

Symétrie variable et difficile à interpréter à ce stade de l'analyse multivariée .

On résumera la variabilité de la matrice des données par le tableau:

Variable	moyenne	variance	écart-type
médiane (Q2)	0,135	0,001	0,032
Diamètre max. (d Max)	1,748	1,267	1,125
facteur hydrodynamique (FH)	0,904	2,203	1,484
classement (DFI)	0,728	0,810	0,900
distribution (KG)	2,169	1,581	1,257
Symétrie (SK1)	0,094	0,057	0,239
profondeur (Z) en m.	17,8	62,96	7,934

Dendrogramme



Il n'y a plus de liaison significative entre les deux "grappes": FH/Q2 et dm, DFI puis Z, du fait du χ^2 (P = 0,95).

La liaison entre le diamètre maximum et le classement (pour les valeurs les plus élevées) est observée d'une manière significative et concerne surtout les stocks bioclastiques .

On note une assez forte corrélation négative entre la valeur d'un classement poussé et l'influence du facteur hydrodynamique. cela peut, à titre d'hypothèse, traduire l'autochtonie de la composante biodétritique majeure pour ces types de fonds infralittoraux .

Analyse factorielle des paramètres granulométriques

facteurs scores.

Variabes	F1	F2	F3	F4	F5
médiane Q2	0,474	0,519	0,570	0,802	0,748
Diam. Maximum	0,674	0,653	0,269	0,315	0,458
Indice Hydrodyn. FH	-0,014	-0,038	-0,061	-0,063	-0,073
Classement D FI	0,621	0,227	0,283	0,221	0,219
profondeur Z	0,700	0,289	0,349	0,398	0,185
% variance relative	21,49	17,75	12,77	24,29	23,67

- Facteur 1 (21,4% var) : essentiellement réglé par la profondeur et les facteurs des zones hydrodynamiques. Les conséquences les plus directes concernent le diamètre maximum, la médiane et le classement.

- Facteur 2 (17,7% var) : propriétés granulométriques du sédiment et notamment la fraction bioclastique grossière; liaison très atténuée mais vraisemblable avec la profondeur .

- Facteur 3 (12,7% var) : facteur peu significatif et difficile à interpréter. Intervention de la médiane et de la profondeur.

- Facteur 4 (24,2 % var) : il intervient sur la distribution statistique (gaussienne) du sédiment et la profondeur .

- Facteur 5 (23,6 % var) : sous la dépendance de facteurs granulométriques tels que la médiane et le diamètre maximum. Relative indépendance vis à vis de la profondeur et des zones hydrodynamiques.

L'influence de la profondeur (facteur 1) dans l'amortissement des interventions hydrodynamiques, ne régit qu'une partie de la variance relevant notamment des paramètres granulométriques essentiels. La nature des peuplements benthiques intervient, comme par ailleurs, et cela peut expliquer la complexité et les redondances des variables granulométriques et de la nature des bioclastes, comme il ressort des facteurs 3 et 4 et des données de l'analyse multivariée.

Ordination . (Fig.38).

Le facteur hydrodynamique se trouve toujours dans le domaine négatif (dissemblance) des espaces factoriels, en opposition avec la médiane et, souvent, le diamètre maximum. Profondeur et classement se tiennent en situation généralement intermédiaire (fig.38) vis à vis de l'axe : FH -dm, DFI, Z et Q^2 .

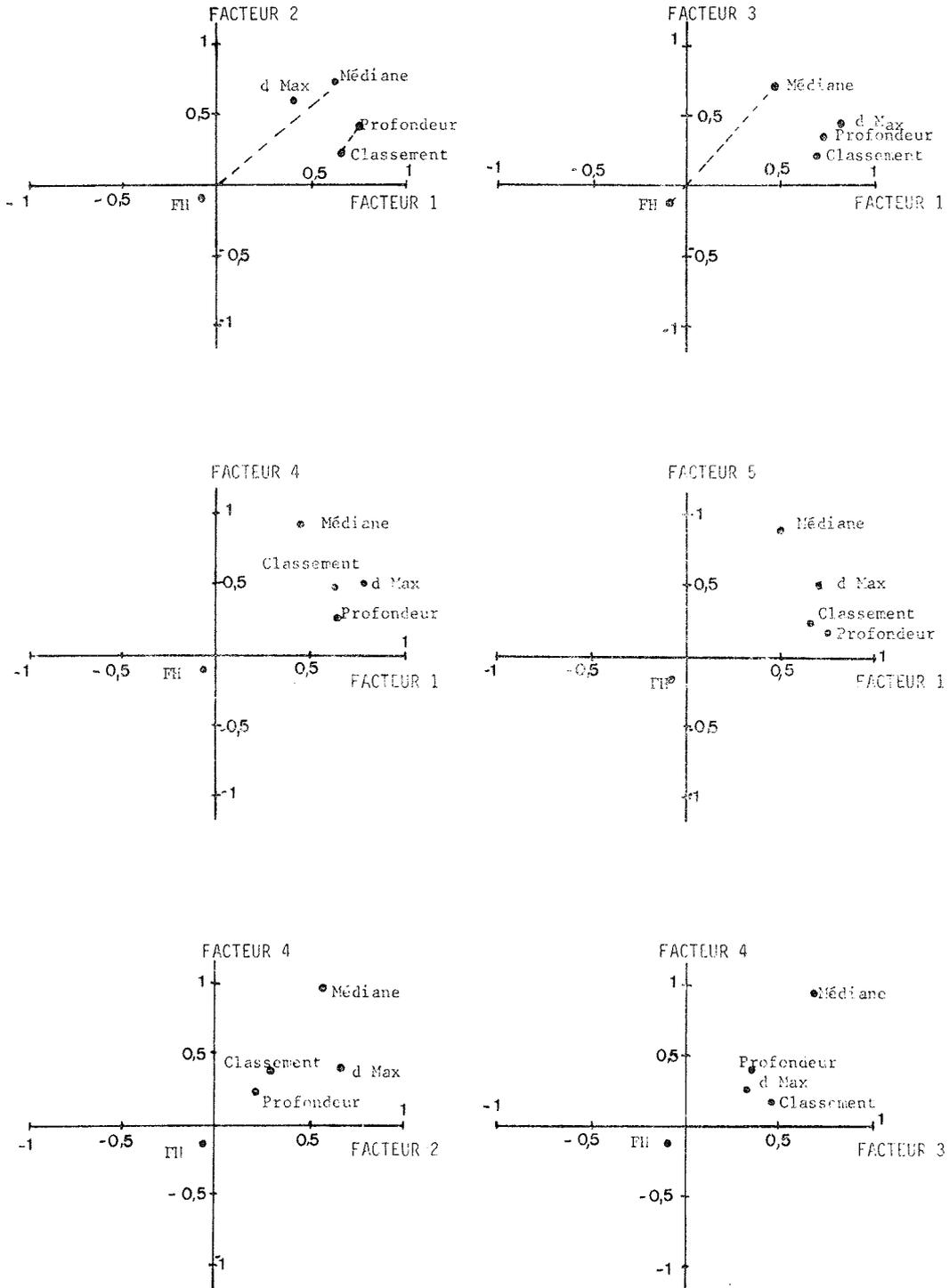
On notera le groupement fréquent (sauf pour l'espace: X=F1 et Y = F2) des variables relativement corrélées : classement, diamètre maximum et profondeur.

L'analyse factorielle des allochems doit nous apporter des renseignements complémentaires :

FIG.38

HERBIER A POSIDONIES : CAP LEOUBE - BREGANCON

ORDINATION DES PARAMÈTRES GRANULOMÉTRIQUES.



- Analyse factorielle des allochems .

Facteurs scores .

Variabiles	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
Profondeur	1,900	0,864	0,485	0,23
Lutites	0,818	0,565	0,227	-0,309
Carbonates	1,723	0,957	-0,065	0,423
Graviers et granules	-0,094	0,885	-0,107	0,456
Algues	-0,298	0,792	-0,093	0,276
Foraminifères	-0,425	0,883	-0,117	0,358
Bioclastes	-0,141	0,852	-0,059	0,427
Gastéropodes	-0,661	0,752	-0,522	0,535
Lamellibranches	-0,045	0,853	-0,117	0,581
Quartz	-1,855	-0,896	-1,034	0,473
Micas	0,057	-0,467	-0,019	-0,026
Variance	1,031	0,352	0,136	0,088
Variance cumulée	1,031	1,383	1,519	1,607
% variance relative	64,15	21,90	8,46	5,47

- Facteur 1 (64,15 % var) : il exprime l'augmentation de la profondeur et l'envasement consécutif (augmentation de la teneur en lutites). Cela est accompagné de corrélations négatives avec les composantes du stock biodétritique et les quartz d'origine littorale. Seuls, les micas flottés échappent à cette règle ainsi que les carbonates dont une partie s'avère indépendante des stocks littoraux (thanatocoencoses possibles). Cela peut rendre compte de certaines complications granulométriques.

- Facteur 2 (21,9% var) : il correspond aux carbonates d'origine biodétritique, liés strictement à la nature et à la fréquence des allochems des peuplements benthiques infralittoraux. Par ordre d'importance : Foraminifères, bioclastes, graviers biogènes; Lamellibranches, Algues, Gastéropodes. Ce facteur demeure encore très lié à la profondeur du fait de la pénétration de la lumière et moyennement dépendant de l'envasement .

La corrélation négative avec les éléments détritiques terrigènes est évidente (quartz, micas).

- Facteur 3 (8,4% var) : peu significatif; lié à la profondeur et au gradient d'envasement. Cette hypothèse serait alors confortée par l'opposition (valeurs négatives fortes) avec les éléments détritiques littoraux et les peuplements de l'herbier normal.

- Facteur 4 (5,4 % var) : peu significatif. Liaisons moyennes ou faibles en relation avec les apports détritiques littoraux (quartz) et les peuplements à Lamellibranches et Gastéropodes.

Ordination (allochems) ; (fig.39 et 40).

La réalisation des graphes permet de préciser les données granulométriques (fig.38).

-L'espace des axes F1-F2 montre l'opposition du quartz détritique vis à vis des allochems, de la teneur en lutite, carbonates et profondeur. Ce quartz voit donc se confirmer son origine littorale, tandis que les micas flottés ont une plus faible dissimilarité vis à vis des autres facteurs .

On note le groupement significatif des Gastéropodes, Foraminifères , Algues, graviers (origine essentiellement biogénique), Lamellibranches, bioclastes. Ce "nuage" correspond à la productivité benthique des herbiers. Il s'oppose, pour une certaine mesure, à l'axe : lutite (envasement défavorable aux herbiers à Posidonies), carbonates et profondeur.

L'opposition (dissimilarité) des carbonates vis à vis des stocks bioclastiques et, notamment des Gastéropodes et Algues, semble montrer pour ces derniers, une autre origine partielle liée aux fractions détritiques très fines, voire à des peuplements plus profonds (carbonates pélagiques et influence du détritique côtier c'est à dire , présence d'une lutite carbonatée augmentant avec la profondeur). Ce fait a d'ailleurs été observé par C.Poizat au large du massif des Calanques .

Les autres espaces factoriels : F1-F3, F2-F3 et F1-F4 par exemple;

- confirment l'opposition quartz détritique littoral - augmentation de la profondeur ,

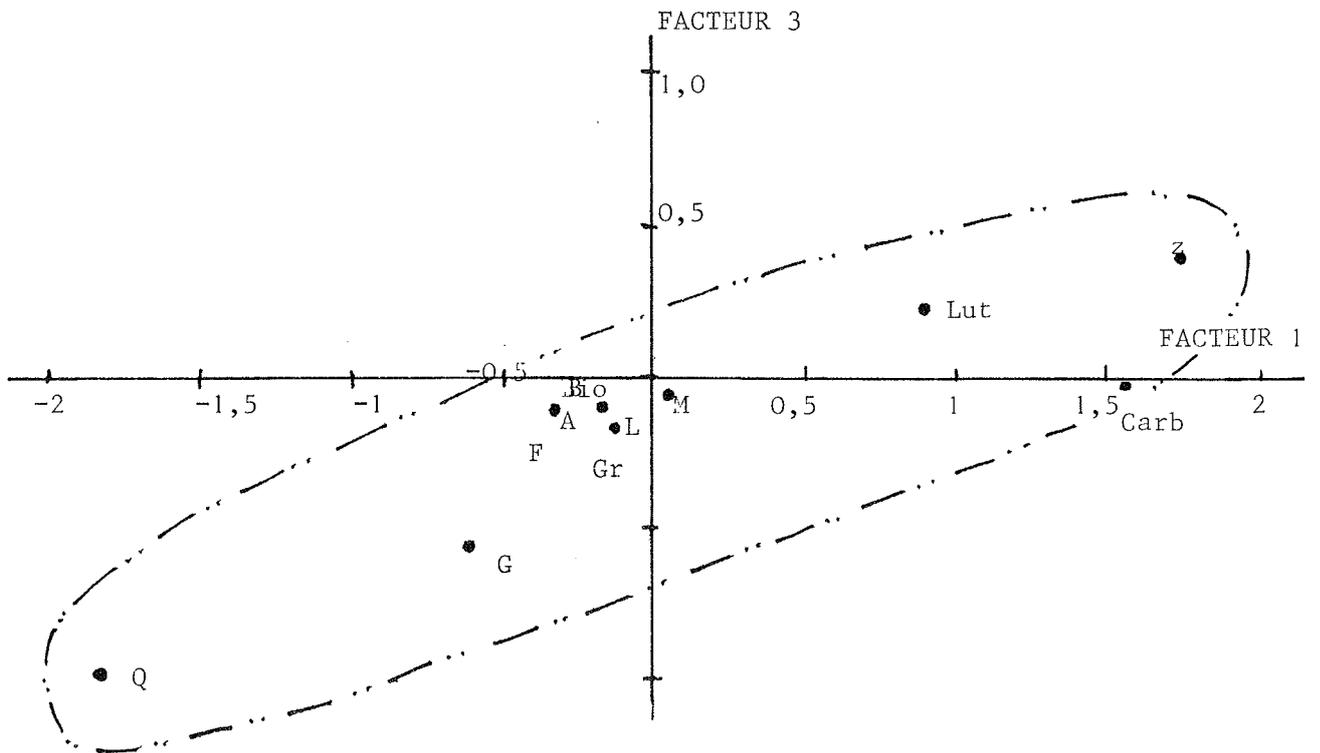
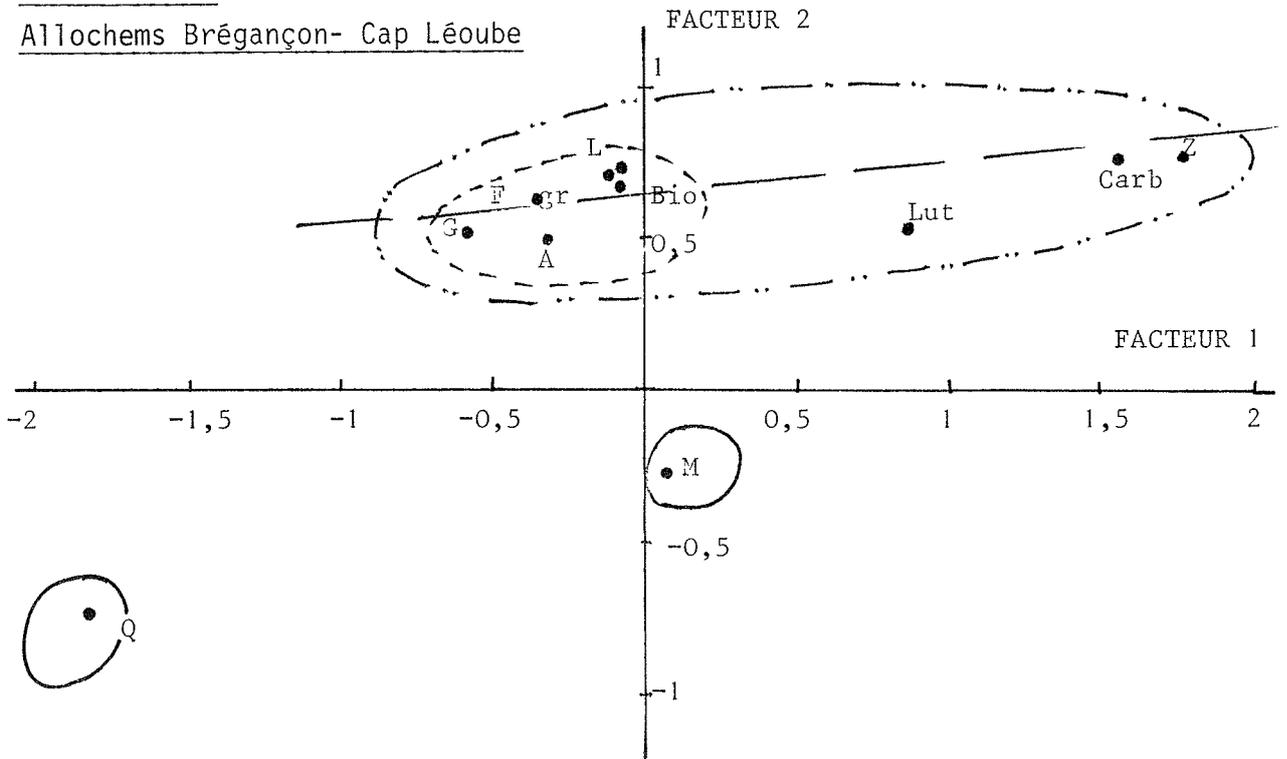
- comportement différentiel du mica flotté tendant à se piéger dans les herbiers (axes F3-F1, F1-F4).

- allongement du "nuage" suivant l'axe : quartz-graviers, Gastéropodes, bioclastes, lutites, profondeur : axes F1-F3 et F1-F4.

- Fig. 39 -

ORDINATION :

Allochems Brégançon- Cap Léoube

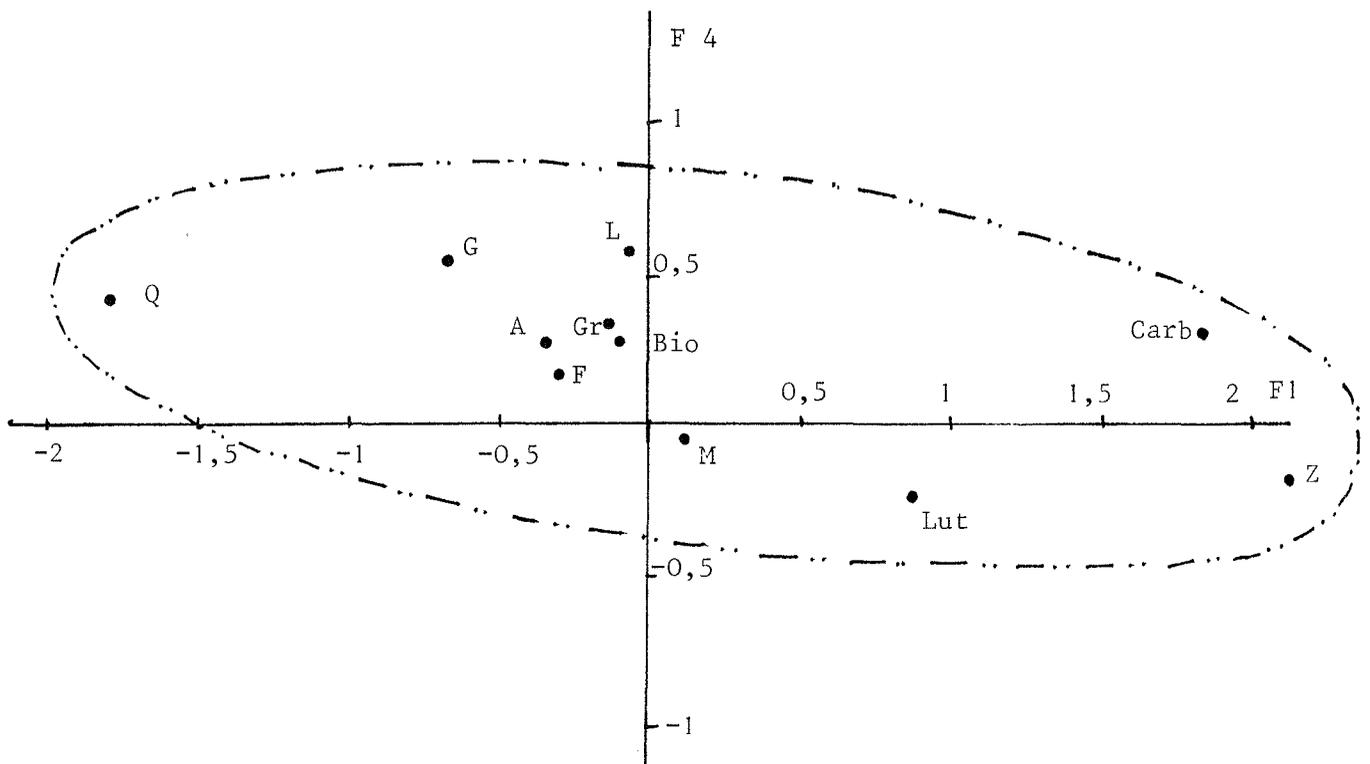
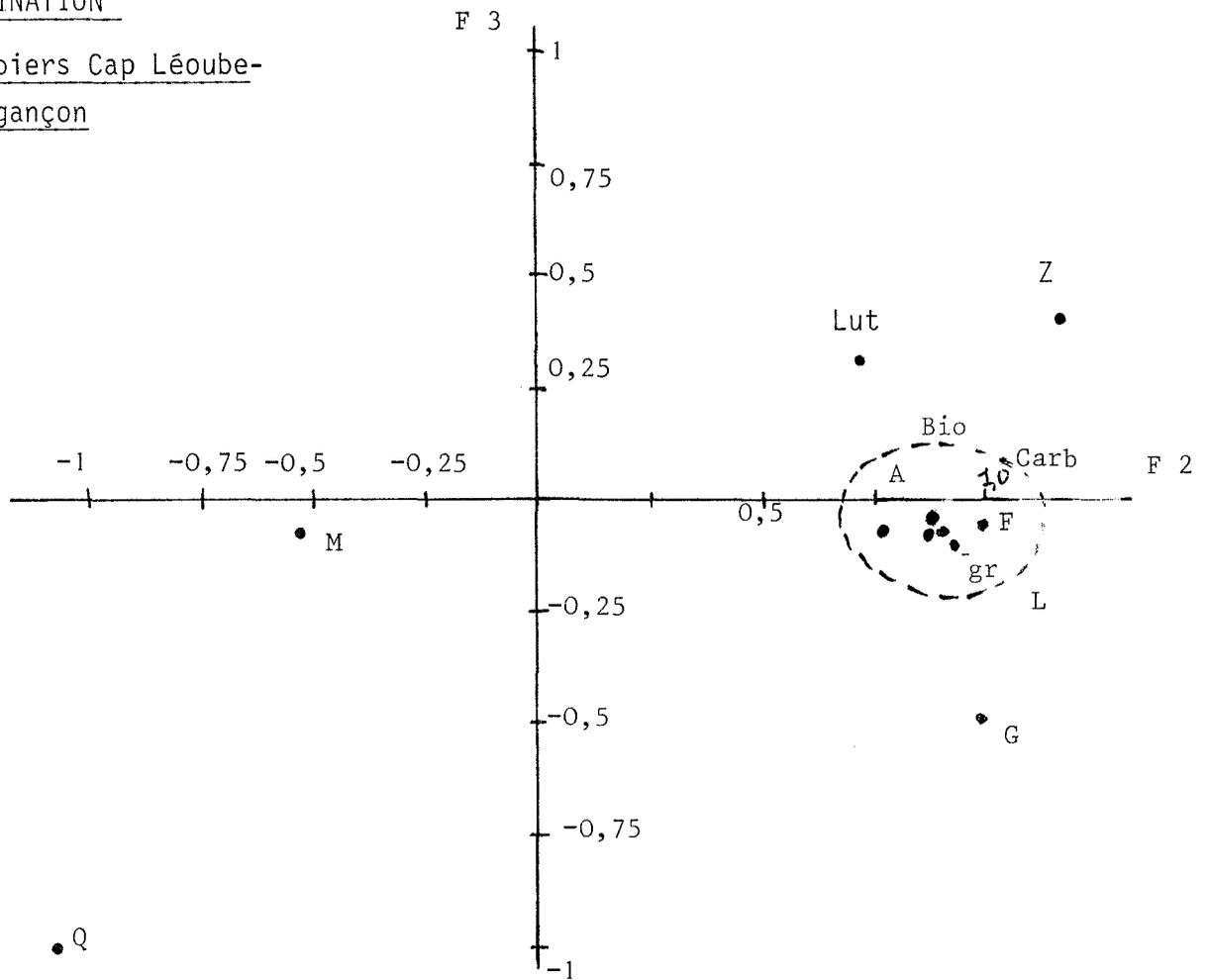


- Fig. 40 -

ORDINATION

Herbiers Cap Léoube-

Brégançon



- bon groupement des allochèmes et bioclastes de l'herbier à Posidonies , notamment pour l'espace F2-F3 avec une tendance "excentrique" des Gastéropodes à corrélation négative vis à vis des autres organismes benthiques (axes F1-F3 et F2-F3).

- CONCLUSIONS -

HERBIER À POSIDONIES

ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTES PRINCIPALES .

I - PROPOS LIMINAIRES :

Les recherches de Beker B., Blanc F., Blanc J.J. et Jeudy de Grissac A., ont porté sur les échantillons de l'herbier à Posidonies des sites suivants :

- Cap Couronne, Iles des Embiez
- rades de Giens et d'Hyères
- cap Lécube et Brégarçon

Total sur 30 échantillons (observations, mode Q) et 11 variables (mode R) : profondeurs, lutites, carbonates, quartz, graviers et granules, Algues, Foraminifères, Gastéropodes, Lamellibranches, Echinodermes, Bioclastes.

L'analyse factorielle en composantes principales prend en compte les observations (Q) et les variables (R).

Les graphes d'*ordination* mettent en évidence, dans une certaine mesure :

1) les "*noyaux d'affinité*" des échantillons aboutissant à une vérification mathématique (et un contrôle) de la classification des sédiments de l'herbier (chap. 1 et 2) - Classification réalisée, à l'origine, d'après des méthodes qualitatives .

2) détermination des *variables corrélées* positivement et négativement. Les distances sur le graphe sont proportionnelles aux dissimilarités. On note les "*couples dissemblants*", par exemple "Algues-quartz détritique" ou "talus détritique-zone envasée", "herbier profond homogène - herbier frangeant, talus détritique".

3) compte tenu du pourcentage relatif de l'information rapportée à chaque axe et des remarques exprimées en 1 et 2, on pose les *hypothèses* appliquées aux facteurs dégagés , par ordre de variances (contributions) décroissantes . (cf. paragraphe 6).

II - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

CONTRIBUTION DES VARIABLES

5 facteurs triviaux sont demandés à l'ordinateur :

Saturation des variables

profondeur	0,182	0,182	-0,258	0,328	-0,165
% lutites	0,109	0,425	<u>0,842</u>	-0,204	-0,395
% carbonates	0,358	0,205	0,220	0,164	0,189
% quartz détrit.	-0,396	0,146	-0,286	-0,110	<u>-0,512</u>
% graviers et granules	0,376	-0,240	<u>-0,784</u>	<u>-0,732</u>	-0,212
Algues	0,287	0,181	-0,204	0,269	0,340
Foraminifères	-0,293	0,330	0,386	0,111	<u>-0,714</u>
Gastéropodes	0,452	-0,144	<u>0,685</u>	-0,223	-0,480
Lamellibranches	0,261	0,401	-0,205	-0,176	<u>-0,663</u>
Echinodermes	0,330	-0,337	0,107	-0,343	<u>-0,728</u>
% en bioclastes	0,310	0,159	-0,285	-0,124	0,249
	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5
% des valeurs propres	31,3	24,1	15,0	11,4	5,8

Une partie de l'information n'est point dégagée en analyse factorielle (mode R) : 12,4 %, du fait de paramètres non mesurés ou non homogènes (facteurs chimiques, hydrodynamiques, biologiques probables).

Le tableau précité mentionne *en les soulignant*, les fortes saturations positives ou négatives ; ainsi :

- le facteur 3 : importance des envasements (0,842 pour les lutites) et liaison avec des peuplements de Gastéropodes(0,685). En revanche, liaisons négatives avec les teneurs en graviers et granules, incompatibles avec une zone de décantation (-0,784)

- pour le facteur 4 : influence négative des graviers et granules ("loading" à - 0,732)

- en revanche, le facteur 5, exprimant 5,8 % seulement de la contribution relative (des variables), apparaît complexe et surtout entaché de *saturations négatives* : Foraminifères (-0,714), Echinodermes (-0,728), Lamelli-branches (-0,663), quartz (-0,512). Aucune explication nette n'apparaît à ce stade de l'analyse.

III - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

CONTRIBUTIONS DES OBSERVATIONS (échantillons).

Ici encore, cinq facteurs triviaux sont demandés à l'ordinateur (Iris 80 C.2I).

Coordonnées des observations .

N° st.	Saturation des observations ("loadings")					région
1	0,418	-0,365	-0,352	-0,187	-0,200	cap Couronne
2	0,160	-0,253	0,101	-0,378	0,706	
3	0,177	-0,296	0,871	-0,548	0,550	
4	-0,143	-0,124	0,141	-0,243	0,130	
5	0,938	-0,206	0,614	-0,476	0,115	
6	-0,466	-0,142	0,155	0,209	0,898	
7	0,158	-0,195	-0,321	0,170	-0,208	
8	-0,490	-0,421	0,103	0,449	-0,238	Iles des Embiez
9	-0,150	-0,104	-0,351	-0,153	0,250	
10	-0,590	0,195	0,179	0,965	0,159	
11	-0,770	0,224	0,216	0,120	-0,152	
12	-0,245	0,102	0,214	-0,218	0,256	
13	-0,295	-0,110	-0,195	-0,543	0,474	
14	-0,316	-0,128	-0,824	0,147	-0,136	
15	-0,812	-0,733	0,128	0,367	0,339	
16	0,165	0,392	-0,379	-0,266	0,723	Giens Hyères
17	-0,302	-0,103	-0,194	-0,867	-0,430	
18	0,159	0,888	-0,106	-0,180	0,346	
19	0,153	0,120	-0,943	-0,115	-0,221	
20	0,159	0,160	-0,112	-0,125	-0,321	
21	0,179	0,586	-0,141	0,149	0,485	
22	0,116	0,346	-0,177	0,236	-0,128	
23	0,140	0,925	-0,315	0,362	0,128	
24	-0,118	0,950	0,762	0,547	-0,298	Brégançon
25	-0,455	-0,13	-0,202	-0,294	-0,435	
26	0,552	0,386	0,221	0,160	-0,593	
27	-0,959	0,129	0,623	0,106	-0,102	Léoube
28	0,616	0,179	0,250	-0,391	0,141	
29	-0,208	0,193	0,399	-0,176	-0,109	
30	-0,368	-0,812	-0,569	-0,595	0,129	
	Facteur 1 31,3	Facteur 2 24,1	Facteur 3 15,0	Facteur 4 11,4	Facteur 5 5,8	pourcentage des valeurs propres.

IV - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (Corrélations échantillons)

CONTRIBUTION DES OBSERVATIONS : Mode Q.

Coordonnées des observations . (loadings)

N° St.	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	régions
1	0,232	-0,150	-0,307	-0,197	0,122	cap Couronne
2	0,313	0,326	0,579	-0,961	0,922	
3	0,309	0,382	0,667	-0,399	0,409	
4	0,320	0,157	-0,245	-0,567	-0,197	
5	0,309	0,400	0,152	-0,102	0,212	
6	0,318	-0,170	-0,366	-0,225	-0,543	
7	0,320	-0,153	-0,170	-0,652	-0,775	
8	0,309	-0,296	-0,940	-0,541	-0,274	Ile des Embiez
9	0,296	0,652	-0,436	0,883	0,349	
10	0,272	-0,122	-0,692	0,983	-0,535	
11	0,243	-0,148	-0,555	0,147	-0,141	
12	0,289	-0,119	-0,725	0,434	0,219	
13	0,142	0,202	-0,207	0,372	-0,125	
14	0,214	0,491	-0,157	-0,106	0,446	
15	0,317	0,562	-0,271	-0,592	-0,364	
16	0,117	0,470	0,216	0,191	0,925	Giens Hyères
17	-0,699	0,283	-0,156	0,660	0,360	
18	0,240	0,135	0,173	0,457	0,443	
19	0,238	0,126	0,175	0,708	-0,469	
20	0,256	0,143	0,143	0,762	0,255	
21	0,267	0,130	0,144	0,249	-0,257	
22	0,227	0,160	0,153	0,119	-0,482	
23	0,265	0,122	0,909	0,122	-0,850	
24	0,278	-0,107	-0,436	0,379	-0,906	Brégançon Lécube
25	-0,695	0,236	-0,211	0,724	0,167	
26	0,305	-0,700	-0,505	-0,363	-0,337	
27	0,238	-0,147	-0,594	0,102	-0,675	
28	0,238	-0,166	-0,307	0,504	0,107	
29	0,217	-0,162	-0,454	0,135	0,115	
30	-0,500	0,212	-0,221	0,113	0,273	
	58,8	14,9	12,3	7,3	2,3	

V - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

CONTRIBUTION DES VARIABLES . Mode R

Nature des variables	Loadings des variables				
	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
Profondeur	-0,194	-0,450	-0,469	0,411	-0,437
teneurs en lutites	<u>-0,555</u>	-0,190	0,411	0,277	0,160
teneurs en CO ₃ Ca	0,108	-0,496	-0,199	-0,122	-0,219
Quartz détritique	-0,364	0,464	-0,383	<u>0,843</u>	0,139
Graviers et Granules	-0,112	0,171	0,370	-0,235	<u>0,700</u>
Algues	-0,418	<u>-0,812</u>	<u>0,679</u>	-0,107	<u>-0,821</u>
Foraminifères	<u>0,764</u>	-0,282	-0,145	0,155	0,123
Gastéropodes	0,927	0,177	0,651	-0,124	0,164
Lamellibranches	-0,195	0,106	0,911	0,385	0,162
Echinodermes	-0,486	-0,760	0,576	-0,132	-0,680
Bioclastes	0,399	0,360	0,415	0,125	-0,708
Facteurs	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
Pourcentages des valeurs propres ("Eigenvalues").	58,8	14,9	12,3	7,3	2,8

Remarques :

- Facteur 1 : variance relative très élevée (58,8%), en relation avec les peuplements à Foraminifères et Gastéropodes, opposés aux actions de colmatage et d'envasement, plutôt indépendant de la profondeur. Il apparaît lié aux peuplements benthiques.

- Facteur 2 : (var. 14,9 %) : lié à la clasticité (apports détritiques d'origine littorale), en relation inverse avec les peuplements à Algues et Echinodermes.

- Facteur 3 : (var. 12,3 %) : facteur essentiellement biologique, en zone infralittorale, en faible corrélation inverse vis à vis de la profondeur : peuplements benthiques à Lamellibranches, Algues et Echinodermes.

- Facteur 4 : (7,3 % de la var) : lié principalement aux décharges de quartz détritiques d'origine littorale (éboulis, torrents). Faible corrélation avec la profondeur. La distance au rivage n'a point été prise en compte dans nos calculs .

- Facteur 5 : (2,8 % var) : très peu significatif : teneurs en graviers et granules polygéniques, en corrélations inverses fortes avec les Algues , Echinodermes et Bioclastes .

VI - DISCUSSION DES RESULTATS ET SIGNIFICATION DES AXES FACTORIELS.

L'analyse en composantes principales a été réalisée sur les *observations* (matrices de mode Q) et sur les *variables* (matrice de mode R).

6 -1 : Analyse en composantes principales sur les OBSERVATIONS

L'ordination a porté sur le total des observations et des variables en fonction des programmes Fortran établis par F.Blanc.

- Axe F1 : (58% de la variance rel.) exprime essentiellement le total des carbonates d'origine principalement (mais non exclusivement) biogénique. Il détermine également une partie des facteurs hydrodynamiques (degré d'agitation, érosion du fond).

- Axe F2 : (14,9 % var) : lié aux apports détritiques avec un "couple de dissemblance", entre le quartz et les teneurs en lutites .

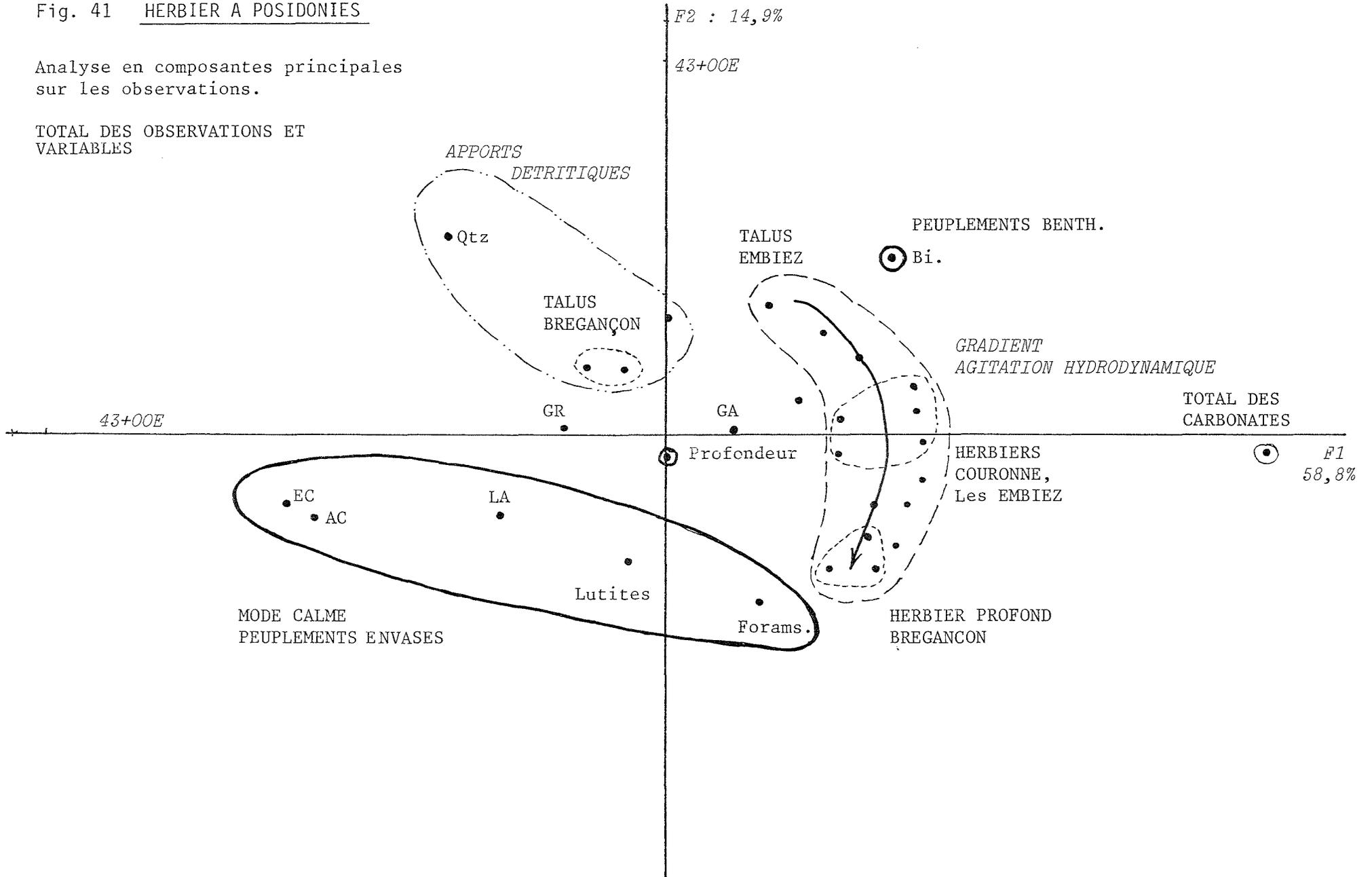
On observe la relation avec les herbiers installés sur les éboulis et prismes littoraux des zones métamorphiques (Brégançon). Cet axe demeure également en relation avec l'état d'agitation des eaux, indépendamment de la profondeur (Fig.41).

- Axe F3 : (12 % var) : augmentation de la profondeur et de l'envasement souvent corrélatif. Ce facteur est lié à des herbiers très envasés, riches en phyllites et bioclastes, notamment Lamellibranches.

Fig. 41 HERBIER A POSIDONIES

Analyse en composantes principales
sur les observations.

TOTAL DES OBSERVATIONS ET
VARIABLES



- Axe F4 (7,3 % var.) : il exprime partiellement le degré d'exposition : milieux agités en zones H1 (vagues et courants) et H2 (courants compensateurs). On note une corrélation inverse avec les fortes teneurs en carbonate total

Herbiers des zone photophiles superficielles .

- Axe F5 (2,8 % var) : contribution relative peu significative (corrélation négative moyenne avec la profondeur).

L'espace des axes factoriels 1 et 2 met en évidence :

- un gradient d'agitation hydrodynamique (fig 41) : talus très exposés des Embiez , herbiers de la Couronne, herbier profond de Brégançon.
- deux "noyaux d'affinités" : les apports détritiques littoraux et les peuplements de mode calme (envasement).

L'ordination sur les axes 2 et 4 fait ressortir plusieurs "nuages" :

- herbiers envasés, incluant les lutites, Foraminifères et Lamellibranches et un "ensemble inscrit" correspondant aux herbiers profonds de Brégançon et du cap Léoube.
- herbiers des talus détritiques, quartz, etc...
- peuplements à Algues et Echinodermes, riches en carbonates
- un large ensemble, "tiré" par l'axe 4, allant du mode agité au mode moyennement exposé .

Enfin, le plan défini par les axes 4 et 5, à faible contribution montre cependant des noyaux évidents :

- toujours les herbiers envasés profonds et les herbiers des talus détritiques,
- les herbiers en équilibre relatif à haute productivité biologique,
- les graviers correspondant aux herbiers de mode agité : cap Couronne,
- les fonds à haute teneurs en carbonates incluant le 3ème "noyau" précité.

6 -2 :Analyse en composantes principales sur les VARIABLES.

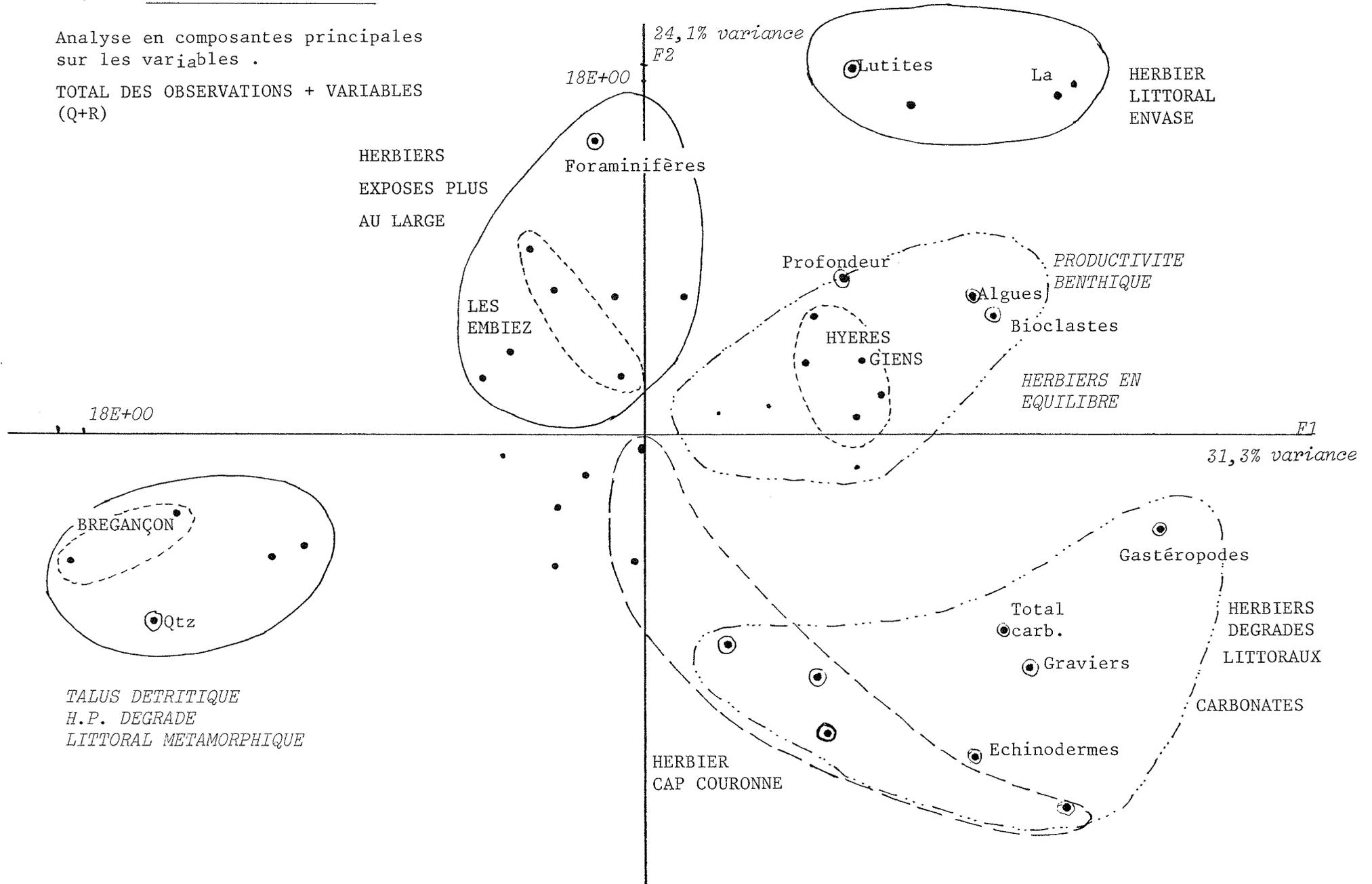
Axe F1 (31,3 % var) : (Fig.42) : ce "facteur" est complexe et correspond partiellement à plusieurs influences :

- teneurs en carbonates biogènes, fonds à haute productivité benthique (Algues, bioclastes) incluant la sous-ensemble Hyères-Giens,

Fig.42 HERBIER A POSIDONIES .

Analyse en composantes principales
sur les variables .

TOTAL DES OBSERVATIONS + VARIABLES
(Q+R)



herbiers dégradés des littoraux calcaires, fonds à Gastéropodes, influence modérée de la profondeur .

- à l'opposé du "pôle" productivité benthique - teneurs en carbonates, se situe l'ensemble des talus détritiques du littoral métamorphique incluant partiellement les herbiers de Brégançon.

- Axe F2 (24,1 % var) : envasement partiel et peuplements à Foraminifères et Lamellibranches .

- Axe F3 (15,0 % var.) : influence forte de l'envasement avec taux élevé de Foraminifères et Lamellibranches, comme pour F2. Ici, la différence réside dans le fait que cet envasement, lié aux Echinodermes, apparaît indépendant de la profondeur (apports terrigènes, influence des rivières et du Rhône, en certains cas, Cap Couronne).

- Axe F4 (11,4 % var) : en relation partielle avec la profondeur, le taux de Foraminifères élevé. Pour la zone profonde des herbiers, l'augmentation de la bathymétrie s'accompagne parfois d'une élévation de la fréquence des Algues, ce dernier paramètre étant aussi "tiré" par l'axe F1 .

- Axe F5 (5,8 % var) : difficile à interpréter ; liaison positive avec les Algues et la taux en carbonate biogénique (graviers, Gastéropodes bioclastes).

L'espace factoriel F1 -F2 (fig.42) montre les "noyaux" suivants: (maximum de l'information):

- herbier littoral envasé
- herbier dégradé des littoraux calcaires
- herbier exposé au large (type "les Embiez").
- herbier en équilibre (certaines zones de la baie d'Hyères)
- herbier exposé au littoral - type "cap Couronne"),
- herbier des talus détritiques du littoral métamorphique (partiellement : cap Léoube, Brégançon).

Le plan des axes F1 et F4 est beaucoup moins significatif en informations mais il traduit les "nuages" d'affinités exprimant plusieurs types de milieux recoupant la classification observée des herbiers à

Posidonies :

- herbier profond en équilibre (Algues, carbonates)
- tendance aux envasements (lutites, Hyères)
- talus détritiques, forts courants (Brégançon)
- modes de dégradation intermédiaires ; cap Couronne, archipel des Embiez, Giens, Hyères .

o

o

o

Ce paragraphe a été rédigé d'après les travaux originaux de B.Beker, F.Blanc, J.J.Blanc et A.Jeudy de Grissac. (Programme Fortran IV : F.Blanc).

IV - RUPTURES D'EQUILIBRE D'ORIGINE HYDRODYNAMIQUE

IV -1- RÉPONSES AUX PROCESSUS MÉTÉOROLOGIQUES ;

VAGUES SIGNIFICATIVES ,

COURANTS DE DÉRIVES ENGENDRÉS.

L'apparition des fortes houles et des trains de vagues demeure le plus souvent liée à des fluctuations de la pression atmosphérique. Ces dernières s'exercent de deux manières :

1°) l'abaissement de la pression est accompagné de fortes sautes de vent, puis par l'apparition d'un front froid. Il est alors courant de constater l'augmentation de la hauteur des vagues et le développement de fortes dérives .

2°) les modalités du gradient barométrique occasionnent fréquemment des changements brusques de la direction des vents. Alors se modifie l'angle d'attaque des rouleaux à forte énergie par rapport aux tracés des rivages. Il en résulte des modifications dans le système des "*longshore currents*".

Les herbiers à Rosidonies se trouvent ainsi érodés à plusieurs niveaux :

1) Erosion littorale superficielle, à faible profondeur, sous l'action des vagues, rouleaux, etc ...(zone H1).

2) Erosion par les courants de décharge, courants sagittaux ("*rip-currents*") , creusant des chenaux perpendiculaires, en général, au tracé des rivages (zones H1 et H2).

3) Erosion par les courants de fond, lors des tempêtes, pour les herbiers profonds , en zone H3.

LES VAGUES , MAREES , COURANTS .

L'irrégularité naturelle des "trains" de vagues nécessite un traitement statistique simple des observations. Nous distinguerons :

- La vague "moyenne", définie par une hauteur H_m résultant de la moyenne des observations. Dans la mesure où le spectre de répartition des fréquences de vagues, classées par leur hauteur, s'avère gaussien, il y a identité pratique entre la vague médiane ($H_{50\%}$) et la vague moyenne H_m .

--La vague significative" définie par la vague moyenne correspondant au 1/3 des plus grosses vagues, soit H_s ou $H_{1/3 \text{ sup}}$.

- La vague "maximale" enregistrée à l'houlographe .

Les séquences de mesures sont de 10 mn toutes les 4 heures .

Nous traiterons quelques exemples :

1°) Mesures COMEX-DATA, du 1er Aout au 31 Décembre 1972, au SE de Pomègues, à - 32 m, au niveau d'un herbier profond passant au détritique côtier .

- vent : Mistral dominant (NW): correspondant à 21,25% du temps de l'enregistrement .

- vitesse W du vent :

- Supérieure à 5m/sec (10 noeuds) pour 58 % du temps
vitesse moyenne : $W = 4,2$ m/sec (50 % du temps)

- Supérieure à 10 m/sec : plus de 4 h en 14 séquences
et plus de 12 h en 4 séquences.

- Vitesses nulles ("calmes") : 4,65 % du temps .

Les régimes de vents *maxima* déterminent l'apparition des vagues et dérives érosives : le dépouillement par ordinateur réalisé à COMEX-DATA ("Ocean service") , donne :

$W = 18$ m/sec	0,24 % (Nord)
$W = 14$ m/sec	0,48 % (Nord et Est)
$W = 12$ m/sec	1,22 % (SE, S , NW)

- Vague maximale : 2 m (abri relatif de l'Ile Pomègues)

- Vague significative : 1m à 0,3m. 91 % des H_s sont inférieures à 0,3 m.

- Cambrures : ce peuplement, égal au rapport H/L est très signifi-

catif quant à l'énergie érosive des oscillations mesurées. (de 1/10 à 1/40).
(de 1/10 à 1/40).

- Les trains de vagues précités déterminent, dans la masse de l'eau, un courant qui a été mesuré et enregistré à - 12 m. On note les caractères suivants:

- vitesse maximale; 0,7 noeud

- 83 % des séquences montrent des mesures inférieures à 0,05n.

Ces très faibles valeurs, sans action érosive, paraissent difficiles à interpréter.

- sur 26 % des séquences, de faibles courants sont orientés parallèlement au littoral méridional de Pomègues ; il y a aussi des mesures sporadiques dans tous les azimuths.

- Les courants mesurés au niveau du fond (-32m), pour les mêmes séquences, présentent les caractères suivants :

- existence d'un courant de fond entrant dans la baie de Marseille. (Etude statistique, matrice des données enregistrées : direction-vitesse). D'où la confirmation de la direction des envasements de la baie du Prado (conformément aux travaux de J.Picard, F.Picard-Tarbouriech, C.Castelbon). Vitesse moyenne : 0,7 à 0,8 n, azimuth : du 50° au 70° NE.

- directions mesurées du 10° au 130 °, NNE , NE , ENE.

- vitesse maximale contre le fond : 1 n, du 50° au 90°.

- Les gradients de pression (mesurés toutes les 4 h), sont partiellement les moteurs de ces phénomènes . On relève :

- minimum à 943 mb, le 11 octobre

- 5% des séquences à 1025 mb.

- 50 % des séquences à 1017 mb.

(760 mm/Hg =1005 mb).

Mais les corrélations d'enregistrement montraient la possibilité d'autres facteurs réglant l'hydrodynamisme au niveau du fond .

2°) Mesures COMEX-DATA, en Mars 1976 : enregistrement situé dans l'herbier des Goudes, à - 22 m (baie du Prado, Marseille-Sud), au droit des chenaux Maître-capCroisette et Maître-Tiboulen.

- existence d'une marée semi-diurne (12h) : enregistreur de pressions.

- Marnage amplifié par résonance et régime de vent d'Est (dépression précédant une tempête), atteignant jusqu'à 0,80 m.

- Courant de marée s'inversant, (mesuré à 1m du fond). Les vitesses passent de 2 cm/sec à 22 cm/sec, du NNE au SSW.

Ces faits nouveaux traduisent, pour les baies plus ou moins abritées et où se manifeste la résonance, une dynamique active au niveau du fond et indépendante des vagues de la surface.

3°) Mesures de la Marine Nationale (C.E.M. Ile du Levant) par bouée houlographe DATAWELL (mesures à 06h, 09h, 12 h, 15 h, et 18 h). Bouée mouillée à W,SW de l'Ile du Levant, par 43°01'30" N et 06°33'00"E, face aux influences du large.

- période des mesures : 16 avril au 8 juillet 1976. Régime des tempêtes de Printemps, forte tempête en avril, avec vagues supérieures à 2m ; en mai, tempêtes plus faibles mais fréquentes, beau temps en Juin malgré quelques vagues de 1m. En juillet, 8 jours de très beau temps (petites vagues ou pas de vagues).

- total des mesures : 420 sur 83 jours (relevés communiqués aimablement par MM.Boudigues J et Rose). Dans nos calculs, nous n'avons considéré que les vagues d'une hauteur supérieure ou égale à 1 mètre. (vagues "significatives").

- "écrêtement" lié aux vagues "significatives" ; 65 mesures pour 15,47 % du total général des observations (83 jours).

- résultats dépuillés : jusqu'à T = 7 sec, conditions du large et absence de réfraction au droit de la Bouée.

	T sec	H en m	L calculée au large	U en m/sec 3m	U _{5m}	U _{10m}	U _{25m}
Vague maximale	7	2,5	77	2,3	2,0	1,1	0,41
Vague significative moyenne	4,55	1,28	32	0,6	0,48	0,20	-
variance	0,54	0,09					
Ecart-type	0,74	0,30					

U exprimée en m/sec = vitesse orbitaire de la houle du large aux profondeurs de 3m, 5m, 10m, et 25m (U_{3m}, U_{5m}, U_{10m}, U_{25m}).

Si l'on se réfère aux travaux de Channon et Hamilton (1976), on note la présence de courants orbitaires déplaçant les sédiments, jusqu'à des profondeurs de 20 m, concernant donc l'herbier à Posidonies, pour des vagues maximales ($T = 7$ sec et $H = 2,5$ m). Quant aux vagues significatives moyennes ($T = 4,55$ sec et $H = 1,28$ m), elles ne déplacent le sédiment que légèrement en deçà de 5 m de profondeur (herbier superficiel), pour des fonds horizontaux.

EN CONCLUSION :

Les mesures directes permettent de préciser 3 types de faits :

1) Liaison entre les fluctuations du gradient barométrique, la cambrure des vagues, l'apparition d'un courant de dérive rapide et de courants de fond actifs pour toute l'étendue des herbiers.

2) Action effective des marées et des courants de fond périodiques, non négligeables, amplifiés par les phénomènes de résonances pour les herbiers des baies et des passes entre les îles.

3) Action des courants orbitaires liés aux houles du large, jusqu'à des profondeurs de 20 m en régime normal, et bien en deçà, comprenant alors la totalité des herbiers, pour les gros temps exceptionnels.

LES COURANTS DE DERIVE .

Liés à l'action directe des vents, ils sont exprimés en eaux libres du large par la formule d'Eckman :

$$V = \frac{W \cdot 0,013}{\sqrt{\sin \varphi}}$$

où : V = vitesse du courant de dérive en m/sec.

W = vitesse du vent en m/sec.

φ = latitude .

Cette formule apparaît valable par grands fonds, hors des influences littorales et en régime permanent (mesures de Grovel, 1970). Mais nous devons la considérer ici comme une valeur maximum et les mesures effectuées en Camargue, Golfe de Fos, Giens, etc... montrent que les dérives réelles

présentent une valeur moindre (mesures de dérive de flotteurs, fluoresceine, rhodamine).

La diminution de la célérité réelle par rapport au calcul paraît liée à des paramètres variés mais en intercorrélation :

- influence du fond et de sa topographie
- indentations du tracé littoral
- zones "d'ombre" (effet d'abris et cavitations)

Par Mistral établi, pour des fonds de 10 m, on a mesuré au cap Couronne et Golfe de Fos:

Vitesse du vent en m/sec	Vitesse du courant de dérive en m/ sec.	Vitesse calculée en m/sec.
2,8 (10km/h)	0,041	0,042
11,2 (40 km/h)	0,06	0,16
14,0 (50 km/h)	0,16	0,21
19,6 (70 km/h)	0,25	0,29
28,0 (100km/h)	0,33 à 1,08	0,42

IV - 2 - ACTION DE LA HOULE EN PROFONDEUR,
COURANTS ORBITAIRES.

Les rayons orbitaires de la houle théorique (modèle de Gerstner), diminuent exponentiellement avec la profondeur jusqu'au niveau d'amortissement de l'onde.

Si z est la profondeur et L la longueur d'onde exprimée en mètres, le rayon orbitaire r devient très faible dès que $z \ll L/2$

On calcule, à partir de la longueur d'onde L au large, le rayon orbitaire r par la formule :

$$r = r_0 \cdot e^{-kz}$$

où r_0 est le rayon orbitaire à la surface = $H/2$

Au rivage, on mesure la période T sec. de la houle incidente. T demeurant constante en eau profonde, on tire :

$$L = 1,56 T^2$$

On calcule la vitesse orbitaire pour une profondeur z

$$\text{vitesse orbitaire en cm/sec} = \frac{2 \pi r}{T}$$

$$\text{Au large : } L = \frac{g T^2}{2 \pi}, \text{ donc l'influence de la période de la}$$

houle incidente déterminera le niveau d'énergie requis. Clos-Arceduc a montré que seules des houles à période égale ou supérieure à 4,5 sec. présentaient de ce fait, une action significative vis à vis des sédiments .

En eau peu profonde, près du rivage, où $z \ll L/2$, l'influence du fond déforme les orbites circulaires en ellipses dont le grand axe est parallèle à la direction de propagation. Les travaux du séminaire de Floride (1976) et le traçage des vagues à l'ordinateur, tout au long d'une orthogonale, jusqu'à la "surf zone" (programme WAVENRG) montrent :

1°) Trois paramètres définissent les orbites au niveau du fond :

- 1) le diamètre orbitaire $2r$
- 2) la vitesse orbitaire maximum U_{\max} *
- 3) l'accélération

2°) Ces trois paramètres sont en inter-corrélation positive et montrent des gradients vers le rivage. L'excellence des corrélations fait que l'un d'eux peut être choisi comme indicateur de l'autre.

3°) Les changements de pente du fond sont responsables du départ d'un nouveau gradient à partir d'une variation linéaire initiale. Ces gradients orbitaires de fond s'avèrent très différents des gradients de H/L des vagues incidentes près des côtes, vagues induites par le vent, vagues forcées .

La stratégie de recherches, pour un site déterminé , consiste :

- 1) connaître les rapports $2 r_0/H$ et $2r_0/U_{max}$
- 2) repérer, au début de chaque expertise, les changements de pente. On note ainsi, une zonation hydrodynamique plus ou moins parallèle au littoral (H1, H2, H3, J. Blanc ,1977), avec différents types de figures (rides) ou de sédiments :

(cf. travaux du séminaire de Floride (1976) Balsillie, Campbell, Coleman, Entsminger, Glassen, Hajishafie, Hang, Tunsoy et Tanner.)

Le calcul du courant orbitaire au niveau du fond, courant alternatif et oscillant, montre son intervention au niveau des sédiments . Cette dernière est confirmée par l'observation directe .

Soit U_{max} , la vitesse orbitaire sur le fond :

$$\text{On a : } U_{max} = \frac{H}{T \operatorname{sh} 2 \pi \frac{z}{L}}$$

La force tractrice f_0 , nécessaire à l'entraînement du sédiment est liée à la vitesse orbitaire par la relation :

$$f_0 = \rho \cdot u^2$$

ρ = masse spécifique de l'eau de mer # 1,03

d'où l'on tire f_0 , exprimée en newton/m² (N/m²)

Par exemple:

Une forte houle de $T = 10$ sec, par $z = 10$ m, donnera sur le fond :

$$f_0 = 1,7 \text{ N/m}^2 \quad \text{pour } H = 8\text{m.}$$

$$f_0 = 0,45 \text{ N/m}^2 \quad \text{pour } H = 2\text{m}$$

L'abaque de Larras montre que de petits graviers ou des sables très grossiers pourraient, théoriquement, être déplacés en deçà d'une profondeur de 10 m (limite de la zone H1 et de la zone H2). Si f_0 dépasse un seuil critique d'érosion, l'oscillation alternative du sédiment se transforme en déplacement, et ce dernier sera lié à la seule présence de la houle.

Les essais et calculs du L.C.H.F. et du C.E.A. (sable radioactif), montrent que la limite d'action des houles seules ne dépasse guère une profondeur de 20 m (15 m le plus souvent, malgré des grosses houles de $T = 11$ sec et $H = 7$ m). Les déplacements de matériaux observés en deçà de 20 m sont alors imputables à d'autres mécanismes (courants compensateurs), courants de marées, etc...).

En zone H2 et H3, les courants compensateurs paraissent prendre le "relai". En effet, par fortes tempêtes, les trains de vagues arrivant généralement obliquement au rivage, occasionnent une surélévation du niveau moyen. Cette dernière peut atteindre 0,80 m, voire même 1 m, à 1,5 m (en Camargue), et se trouver fréquemment supérieure au 1/10 ou au 1/15 de l'amplitude de la houle au large.

Les trains d'ondes situés au voisinage de la "vague maximale" (parfois 3 à 4 rouleaux), accumulent ainsi une importante masse d'eau au rivage (Bellessort et Migniot, 1976). L'équilibration est assurée par un courant de décharge sur le fond, et, en certains cas, par l'*undertow* ou un système de "*nip-current*" (courants sagittaux).

Ces mouvements sont très importants entre 0 et - 7 ou - 10 m. Entre - 10 et - 15 m, Rivière et Laurent ont montré que les matériaux sont :

- dispersés vers le large par des courants compensateurs ne fonctionnant que par tempêtes,
- soit ramenés progressivement à la côte par beau temps.

IV - 3 - VITESSE D'ENTRAÎNEMENT DES SÉDIMENTS .

Ces dernières concernent des types distincts de déplacements:

- courants orbitaires
- courants de décharge
- courants de marées

Nous avons adopté la méthodologie suivante :

- détermination des paramètres sédimentologiques et notamment la médiane et le diamètre maximum.
- calcul de U max pour les houles de tempête
- abaques de Bonnefille

Bonnefille fait intervenir la valeur D_* ou "diamètre sédimentologique". Si D est le diamètre médian du matériau, ρ' la densité relative de ce matériau sous l'eau, c'est à dire

$$\rho' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

(ρ_s : poids spécifique du matériau, $\rho = 1,03$)

et si γ est la viscosité cinématique de l'eau,

On a
$$D_* = \left(\frac{\rho' \cdot g}{\gamma} \right)^{1/2} \cdot D$$

Si U_* est la vitesse de cisaillement sur le fond, c'est à dire

$$U_* = \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad t = \text{contrainte de cisaillement}$$

$$U_* = \sqrt{\frac{t}{\rho}} = \sqrt{g \cdot z \cdot I} \quad I = \text{pente de la surface libre}$$

On calcule la valeur R_* telle que :

$$R_* = \frac{U_* \cdot D}{\gamma}$$

L'abaque de Bonnefille exprime la relation entre D_* et R_* .
On en tire, en fonction de z , la vitesse de début d'entraînement du sable de diamètre D .

Une autre approche est proposée par un récent travail de Channon et Hamilton (1976) à partir de la capacité de transport ou compétence d' un courant déplaçant les sédiments .

Soit t_o la valeur critique, force horizontale à l'interface eau - sédiment, exprimant la compétence du courant .

Soit U_* , la vitesse d'entraînement du sédiment .

On a, d'après les expériences de Shield (1936), White (1940) et Bagnold (1942) :

$$U_* = \sqrt{(t_o / \rho)} \quad \rho = 1,03$$

Soit U_{*t} le seuil minimal de la vitesse d'entraînement d'un sédiment donné. Le graphe d'Inman (1949) exprime les valeurs de U_{*t} en fonction des différents diamètres du sédiment, en eau douce. En eau salée, la vitesse U_{*t} sera légèrement diminuée, à diamètre égal.

Appelons \bar{U}_z la moyenne des vitesses mesurées au courantomètre et z la distance au dessus du fond (interface eau/sédiment). Soit z_o la rugosité liée au sédiment, à la forme des grains et à la géométrie du fond.

L'équation de Karman-Prantl

$$\frac{\bar{U}_z}{U_*} = 5,75 \log_{10} \left(\frac{z + z_o}{z_o} \right)$$

... a été vérifiée pour différents milieux (Channon, 1971).

Si $z_o \ll z$, on a
$$\frac{\bar{U}_z}{U_*} = 5,75 \log_{10} \frac{z}{z_o}$$

d'où U_* , de laquelle on tire la contrainte horizontale t_o .

On distingue quatre niveaux d'énergie contre le fond :

- 1) pas de mouvement de sédiment : $t_o = 0$, $U_* = 0$
- 2) mouvement de sédiment
- 3) formation de rides
- 4) "plane beds ".

CONCLUSION

1°) Le freinage des courants de dérives s'avère notable au niveau des herbiers peu profonds (Port-Cros). Malgré des valeurs élevées (15 à 35 m/mn, maxima à 60 m/mn), les célérités sont en diminution par rapport au large. Sur le fond, l'amortissement est rapide, pareillement orienté et non conforme à la théorie d'Eckman du fait de la très faible profondeur.

2°) L'action des courants orbitaires s'avère nette et aisément calculable jusqu'à 15 ou 20 m de profondeur. Elle est compliquée et, en deçà de - 20m, relayée par le mécanisme de courants variés : courants de marées, courants de décharge, ces derniers liés aux fortes tempêtes.

3°) Les cambrures des ondes incidentes, les vitesses orbitaires au niveau du fond et les ruptures de pentes apparaissent comme des paramètres déterminants et commodes à évaluer pour les sites à étudier.

Les irrégularités ("mattes" et "tombants") présentées par les zones de l'herbier à Posidonies amèneront une évolution dynamique plus complexe que pour les fonds sableux réguliers. Les mécanismes de courants de décharge l'emportent souvent sur les effets naturels des courants orbitaires proprement dits.

En outre, les surélévations temporaires, liées aux dépressions et aux tempêtes seront, en de nombreux cas, les mécanismes de départ des processus érosifs. La dissection des herbiers, une fois amorcée, amplifiera le phénomène.

4°) La destruction des herbiers à Posidonies serait totale si n'intervenaient deux mécanismes régulateurs naturels :

1) augmentation de la profondeur, donc du rayon hydraulique, d'où l'arrêt des courants de décharge et l'effacement des courants orbitaires, dès 20 m pour ces derniers. On assiste alors à la régénération d'un herbier profond et au départ d'un nouveau cycle.

2) Possibilités de régénérations latérales, surtout à partir de la zone H2 où cessent et s'atténuent les courants orbitaires.

5°) Les processus d'érosion , ou vitesses d'entraînement des courants de fond sont fonction de plusieurs variables encore imparfaitement connues :

- la profondeur,
- les ruptures de pentes
- le "diamètre sédimentologique" des matériaux,
- la contrainte horizontale de cisaillement,
- la célérité moyenne du fluide en transit .

6°) Les causes : au départ, la tendance érosive est amorcée par deux mécanismes indépendants ou concomittants :

- 1) action de fortes vagues ou houles à incidence généralement oblique, d'origine lointaine ou locale,
- 2) surélévation et augmentation temporaire de la pression hydrostatique au niveau du littoral, en fonction des conditions météorologiques au large.

IV - 4 - LES CHENAUx D'ÉROSION DE L'HERBIER À POSIDONIES .

A) SITE EXPOSE : CAP CANAILLE.

Il s'agit de talus et chenaux entre des blocs , herbier très dégradé. Forte exposition aux régimes d'E.SE réfractés et W.NW. Des tourbillons et courants de décharge se manifestent entre les blocs et dissèquent l'herbier à Posidonies.

2 zones s'observent

1) Zone de l'éboulis sous-marin : avec couloirs, de - 4 m à - 8m.

Epanchages de galets et graviers .

2) Mattes érodées, de - 6 à - 12 m, "couloirs" à graviers et granules .

Energie des vagues

$$\text{La formule } E = \frac{P \cdot L \cdot H^2}{8},$$

où : L = longueur de crête : 1 m, P = poids du m³ d'eau de mer ; H = 2 m (mer agité), donne E = 512,5 Kgr/m.

Vitesse de propagation des rouleaux déferlants

La formule d'Inman et Nassu (1958)

$$C = \sqrt{g (z + H)}$$

où z = profondeur en m, H = hauteur du rouleau, donne :

- zone de l'éboulis ; où z = - 5m C = 8,25 m/sec

- zone de l'herbier ; où z = -10m C = 10,82 m/sec

Courant orbitaire

Soit une houle moyenne de forte tempête où T = 7 sec et L = 77 m au large.

$L/2 = 38 \text{ m}$, le site se trouve dans la zone de réfraction.

- pour la zone de l'éboulis où $z = - 5 \text{ m}$; $U_{\text{max}} = 1,35 \text{ m/s}$
- pour le zone de l'herbier où $z = - 10\text{m}$, $U_{\text{max}} = 0,71 \text{ m/s}$.

Entrainement des matériaux

1) la zone de l'éboulis ($z = 5\text{m}$) montrera, pour une houle ou $H = 2\text{m}$, un déplacement de sédiment d'un diamètre maximum de $0,75 \text{ cm}$. Le mouvement de galets qui a été observé (à posteriori) correspond à une houle de $H \geq 4,3 \text{ m}$. Le stock de galets "moyens", pour un diamètre de 4 cm et $U_{\text{max}} = 2,7 \text{ m/sec}$, pourra correspondre à des vagues de $H \geq 3,5 \text{ m}$. Il y aura donc déplacement de matériaux pour de fortes tempêtes et seulement en ces cas. Ceci a été confirmé par des galets repérés entre deux périodes de gros temps.

2) La zone de l'herbier , à $- 10 \text{ m}$, montre des granules d'un diamètre de $1,5 \text{ cm}$ et du sable grossier à $1,5\text{mm}$.

- Granules : pour $H = 2\text{m}$ et $C = 10,82 \text{ m/sec}$, $U_{\text{max}} = 0,71\text{m/sec}$.
 U_{max} nécessaire , sans faire intervenir des courants de décharge = $1,8 \text{ m/sec}$ au moins, d'après le calcul, ce qui nécessiterait $H \geq 4\text{m}$ au début du mouvement. Ces hauteurs sont possibles mais non jamais été observées en ces lieux , ce qui souligne la présence d'un autre mécanisme non évalué, probablement un fort courant de décharge .

- Sable grossier : pour la même profondeur et $H = 2 \text{ m}$, on a :
 $U_{\text{max}} = 0,70 \text{ m/sec}$. Le déplacement prouvé du matériau est compatible avec le courant orbitaire de la houle ($H = 2 \text{ m}$ est une valeur observée), sans qu'il soit nécessaire d'envisager un autre facteur .

D'où la probabilité de stocks en traction pour l'herbier et la possibilité de saltation momentanée et traction pour les chenaux littoraux et "inter-blocs". Une étude granulométrique détaillée pourrait préciser les mécanismes et catégories de stocks en mouvement .

B) SITE MOYENNEMENT ABRITE : L'HERBIER DE PORT D'ALON .(BANDOL).

On considérera :

- les chenaux perpendiculaires au rivage ,
- les chenaux longitudinaux parallèles au rivage.

A) CHENAUX PERPENDICULAIRES AU RIVAGE .

Plusieurs zones sont observées :

A1 - talus de départ au pied de la falaise : chute de blocs volumineux, peu mobiles et coincés: \emptyset : 0,30 à 0,40, de - 4 à -6 m.

A2 - un couloir de traction du matériel fait suite, entraînant débris, blocs et galets, sur une longueur de 8 à 12 m, de -5 à - 8m. \emptyset moyen = petits galets, graviers : 2 cm. Ces "couloirs" peuvent présenter des dichotomies .

A3 - ils aboutissent, de - 8 à - 10 m à un corps sédimentaire étalé en lobe contre le fond, à galets de 2 à 3 cm et sable lessivé grossier (1 à 1,5 mm).

A4 - à leur terme, vers - 12 à - 15 m, le sédiment passe graduellement à un herbier dense à Posidonies, localement en voie de régénération.

- Considérons une houle incidente de "beau temps" normal (mer peu agitée), pénétrant dans la calanque (T = 5 sec).

On a les valeurs U max des vitesses du courant orbitaire contre le fond en m/ sec .

T = 5 sec	A1	A2	A3	A4
	- 5m	- 8m	- 10 m	- 15 m: herbier dense
H = 1m	0,5	0,30	0,18	0,02
H = 2m	1,2	0,60	0,50	0,13

- Par gros temps et tempête notable, une houle réfractée à T = 8sec va se traduire par les vitesses orbitaires suivantes:

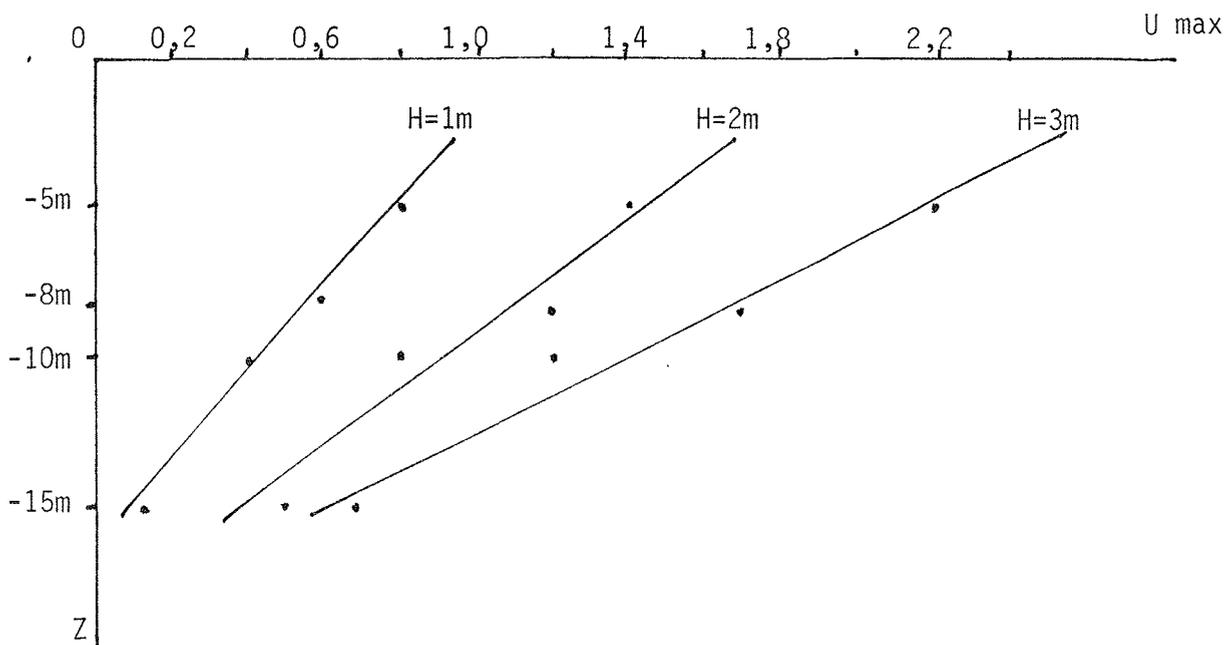
T = 8 sec	A1	A2	A3	A4
Profondeur	0 à - 5m	-8m	-10 m	- 15 m
Faciès	Chutes de blocs gros galets	Chenal de traction	lobe d'épandage	Herbier dense
Type de sédiment	Blocs coincés roche lisse	blocs, galets graviers lessivés	gravier sable grossier lessivé	sable de mer $\varnothing = 0,3$ mm
H = 1 m	0,8	0,6	0,4	0,13 valeurs de U max
H = 2 m	1,4	1,2	0,8	0,50 d°
H = 3 m	2,2	1,7	1,2	0,70 d°
mécanismes	Apports chutes tourbillons	Traction lévigation	Déccélération dépôt	Dépôt mouvements momentanés
Influences	Terrigène faibles apports	Terrigène et bioclastique	Terrigène et bioclastique	Biodétritique dominante

A ces observations poursuivies de 1973 à 1977, on peut noter les remarques suivantes :

1) La séquence latérale : chute de blocs, gros galets, zone des tourbillons - chenal de traction - lobe d'épandage - herbier dense, est accompagnée, en fonction de la profondeur croissante,

- d'un changement dans la nature des éléments sédimentaires constitutifs où les influences biodétritiques l'emportent dès - 10 m.

- d'une diminution linéaire de la vitesse U max en fonction de la profondeur. Des vagues incidentes où H = 2 m suffisent à mobiliser le sable grossier jusqu'aux lobes A3 (-10m) et à l'herbier dense A4 (-15m). Pour tous les régimes où $H \leq 1$ m il n'y a plus à cette profondeur d'érosion notable, d'où la possibilité de régénération naturelle de l'herbier à Posidonies :



D'après les diagrammes C-M de Passega, le sédiment grossier considéré demeure dans le domaine du roulement et la vitesse minimale de mouvement des particules reste au moins égale à 0,7 m/sec, en fonction de la loi d'impact. Seul un gros temps où $H \geq 2$ m peut amener, dans les lobes A3 et l'herbier A4, la présence de courants érosifs.

La présence de ripple-marks symétriques de -8 à -15 m traduit:

- un nombre de Froude $F < 1$
- des vitesses critiques d'érosion de l'ordre de 0,5 m/sec, ce qui est réalisé à -15 m, en A4, pour $H = 2$ m (0,70 m/sec), pour $H = 3$ m (tempête exceptionnelle).

B) CHENAUX PARALLELES AU RIVAGE .

Les chenaux transverses (type A), débouchent dans un "collecteur" axial, parallèle à l'axe de la calanque (Blanc 1958).

Ils montrent des "tombants" de 0,50 à 3 m.

On a, du fond de la calanque vers le débouché :

B1 - -4 à -4,5 m : chenal de matie affouillée, débris divers, forte pollution.
Tombants 1 à 2,5 m, galets ($\emptyset = 4$ cm), graviers .

B2 - -5 à -6 m : graviers et sables grossiers : $\emptyset = 1,5$ à 1,5 mm .

Larges ripple-marks asymétriques, pollution des chenaux par les débris (notamment bouteilles et pots de yaourt, enveloppes en matières plastiques).

B3 - - 10 - -15 m : zone profonde du chenal où s'amortissent les courants de décharge. Sables grossiers à moyens et amas de graviers et petits galets formant des "tumuli" irréguliers. La matse de l'herbier montre toujours des traces de ravinement tandis que les zones axiales, où les sédiments ne se déplacent qu'exceptionnellement par gros temps, auraient tendance à se régénérer sporadiquement.

	Prisme littoral	B 1	B 2	B 3
Profondeur	0 à -3m	-4 à -5m	-5 à -6m	jusqu'à -10m et - 15 m.
sédiment	Galets, sables grossiers	Galets et graviers	Graviers et sables grossiers	sables grossiers à moyens Galets et graviers sporadiques .
Mécanismes hydrodynamiques	"swash" déferlement	Tombant 1 à 2,5 m courant de décharge	Tombant 3m courant de décharge	Erosion encore notable mais délestage du courant de décharge.
U max calculée en m/sec (tempête)	Régimes de tempête seulement	> 1, 4	1,4 à 2,2	0,3 à 0,7
Pollution	importante	très importante	très importante	régénération locale de l'herbier

CONCLUSION

Les causes réelles des ruptures d'équilibre que constituent les chenaux et "couloirs" de l'herbier à Posidonies paraissent multiples .

1°) Dans le temps , l'existence des chenaux s'avère provisoire :

- si l'herbier est totalement et définitivement oblitéré, le type de fond s'apparentera à la catégorie des sables et grayiers lessivés sous l'influence des courants de fond. (S.G.C.F.)

- très fréquemment, les chenaux profonds voient se régénérer un nouvel herbier se développant en deçà de la profondeur critique d'érosion. Il y aura aussi la possibilité d'un marcottage latéral. Ainsi, l'évolution du chenal participe au cycle de l'herbier : accrétion - érosion - accrétion.

2°) Dans l'espace , les chenaux s'ordonnent suivant plusieurs dispositions :

- réseau des chenaux transverses, perpendiculaires au littoral, liés au courants de décharge et à des flux exceptionnels à haute énergie (formation de rides, érosion).

- réseaux de chenaux longitudinaux "doublant" le littoral et liés à un système dynamique très différent : transferts, " *longshore currents*", courants permanents, circuits de courants de baies, voire courants de marées.

Ces flux , à moyenne énergie, ne sont aptes à l'érosion qu'à la condition de se combiner et de s'exercer lors des tempêtes exceptionnelles. A ces moments, une érosion active demeure possible, mais aucune mesure n'a pu être réalisée. Cependant, les rares mesures continues effectuées, montrent des courants modérés (0,1 à 0,7 n.), parfois alternatifs (influence de la marée semi-diurne), mais quasi permanents , surtout au large des pointes, hors des circuits habituels des baies. Par plus gros temps, au Prado, dans des chenaux, à - 10 m, contre des "tombants", COMEX DATA a pu enregistrer des vitesses fort érosives de 1 m/sec. Ces maxima s'avèrent très discontinus et sont en cours d'étude.

Il est probable que les périodes actives de creusement sont discontinues et relativement brèves, liées à des régimes exceptionnels.

En revanche, un certain lessivage du sable (et des matières organiques), accompagné d'une absence de sédimentation, apparaît continu, notamment au niveau des chenaux des passes et au large des caps.

Les courants orbitaires ont une action générale et sont partiellement responsables de la dégradation des herbiers. Ils se manifestent aussi nettement dans les chenaux mais ils n'agissent jamais seuls par gros temps comme le montrent les calculs et les observations de matériaux marqués ou repérés (galets, pavés, colorations).

En l'absence d'enregistrement nombreux et continus, il demeure encore très difficile de faire la part exacte revenant à des facteurs dynamiques précis. Il ne faut pas oublier, en outre, que les très fortes tempêtes, avec H voisine de 10 m (observées au houlographe situé au large de Fos), tempêtes "rarissimes" mais non absentes, se manifestent sur tous les fonds du précontient et peuvent donc altérer durablement la zone des herbiers profonds.

3°) En de nombreux cas, les courants érosifs montrent des vitesses dépassant 1,2 à 1,4 m/sec; pour de brèves périodes. L'érosion proprement dite y est accompagnée de tourbillons, chute de matériaux, lessivages, tractions, levigation et décélérations. On y observe encore des suspensions momentanées de sable fin et de matières organiques. Un stock bioclastique et terrigène grossier est tracté, lessivé, puis secondairement déposé en "aval". Une étude granulométrique et physique détaillée apparaît nécessaire dans ces chenaux qui s'avèrent des zones très sensibles à une importante pollution.

V - RUPTURES D'EQUILIBRE LIEES A LA SEDIMENTATION TERRIGENE.

Une sédimentation terrigène trop active entrave le développement des herbiers. Ces derniers s'accomodent cependant , selon les sites, d'un taux d'envasement parfois relativement élevé, comme il a été montré. Par exemple, les Posidonies, sur ce point, s'avèrent beaucoup moins tolérantes que les Cymodocées, prospérant en zones abritées et envasées (golfe de Fos).

La régression des herbiers par hypersédimentation peut être rapide. Elle obeit à trois types d'évolution distincts .

V - 1 - EXTENSION DES LOBES SABLEUX D'ACCRÉTION .

Une sédimentation variée s'observe au niveau des talus détritiques littoraux : blocs, éboulis, graviers et galets quartzeux, sables et pélites . Aux stocks détritiques se mêlent les composants biogènes issus des peuplements infralittoraux.

Cette sédimentation polygénique est alimentée par :

- les éboulis des versants et falaises
- écroulements et glissements des talus rocheux ,
- apports éoliens ou torrentiels limités .

Les courants de décharge érodent les dépôts élaborés en zone H1 et les répartissent, plus profondément en zone H2, là où les courants orbitaires s'amortissent rapidement .

Il en résulte la formation de lobes d'accrétion sableux, lessivés, progressant rapidement jusqu'à - 25 m, à la limite inférieure de la zone H2.

Le faciès est :

- un sable fin lessivé et isométrique, au large des baies et plages exposées. Les "sables fins de haut niveau" passent à un "sable fin bien calibré" (cas des plages du Ceinturon, de la partie Sud du Tombolo Est de Giens, la Nartelle, etc...)

- soit, un sédiment sablo-gravelleux lessivé, à hétérométrie variable mais asymétrie positive (du "côté" des éléments grossiers). Ces graviers sont mêlés à des galets et petits blocs et s'étagent de - 12 m à - 26 m. Leur faciès est celui des S.G.C.F. de Picard. Cette deuxième modalité est connue au cap Couronne, Carro, Sausset, passes de l'archipel de Riou, débouché des Calanques, criques et talus du Cap Bénat et cap Léoube.

Ces deux types de lobes s'arrêtent dès la zone H3 où ne demeurent que des flux à faible énergie (courants de marées, courants géotrophiques). A l'exception des très fortes tempêtes (où les remaniements dépassent des profondeurs de 80 m), les éléments terrigènes sont freinés à ce niveau et se déposent par excès de charge (Giens); leur progression vers le large s'arrête. Cela permet le développement équilibré des herbiers profonds.

Les zones à haute énergie (H1 et H2) montrent des reculs moyens de plusieurs mètres par an. Les manifestations mécaniques se combinent aux ensablements; les lobes peuvent s'anastomoser entre eux dégradant alors rapidement de très grandes surfaces d'herbiers (parfois de 100 m de front perdus en un an sur 10 à 20 m de profondeur). Tels sont les cas observés à Sausset, Sanary, Giens et baie d'Hyères Sud.

Le recul alarmant est souvent temporaire car deux processus naturels compensateurs interviennent rapidement (en quelques années):

1°) le déplacement latéral des axes de courants sagittaux (Giens, Hyères). Les surfaces ensablées initiales constituent alors un excellent substrat pour l'implantation d'un nouvel herbier en mode agité (Porquerolles). Un taux de sédimentation modéré mais net, accompagné d'un lessivage actif, sont des facteurs propices à l'installation d'un herbier à la condition expresse d'une absence de pollution.

2°) bouturage latéral naturel et rapide, en zone H2, dès - 10 à - 12 m, avec conquête d'une nouvelle "matte" sur les "tumuli" de graviers (Sausset, Carry, Cap Canaille, Les Embiez). Ainsi, des surfaces importantes sont naturellement réparées dans la mesure où se trouvent réalisées les conditions suivantes:

- lessivage très actif et faible taux de sédimentation (mais des apports terrigènes modérés sont nécessaires),

- zone H2 et amortissement des courants orbitaires .

La profondeur doit être comprise entre le quart et la moitié de la longueur d'onde moyenne des houles significatives annuelles .

- absence de pollution, eaux claires et agitées, milieux à haute énergie.

V - 2 - LE DÉBOUCHÉ DES RIVIÈRES ET TORRENTS CÔTIERS.

Depuis les travaux de Molinier et Picard , l'on sait que les herbiers denses sont interrompus aux débouchés des rivières et torrents du fait de l'étouffement par hypersédimentation, turbidité et pollution élevées. On notera une certaine analogie , qui n'est point due au hasard, entre les "mattes" de l'herbier à Posidonies et les appareils construits des récifs frangeant des mers chaudes. Ce parallélisme, probablement lié à un "climax", s'étend à d'autres domaines tels que l'hydrodynamique et les paramètres sédimentaires .

Les débits sont généralement assez faibles :

- intermittents et très irréguliers : régime torrentiel méditerranéen : de 0 à plusieurs m³/ seconde.

- continus , mais avec de forts écarts :

- Huveaune : 7 à 40 m³/sec. avec des crues à 80 m³/sec, voire 120 m³/sec.

- Reppe : de quelques l/sec à plus de 90 m³/sec, avec forts dégâts et inondations de la route aux gorges d'Ollioules (plusieurs noyés).

- Giscle et Môle conjuguées : probablement plus de 150 m³/sec par fortes crues (imperméabilité du substratum).

- Préconil : de quelques m³/sec à 45-50 m³/sec.

Ces flux temporaires et irréguliers montrent les caractères suivants:

1) apport sableux limité mais épandage de lutites polluées s'étendant par gros temps sur le précontinent et ennoyant les herbiers infralittoraux (cas de l'Huveaune dans la baie du Prado, du Grand Vallat en baie de Bandol, Reppe en baie de Sanary, Fainéant et Dégoûtant , en baie des Leques).

Ces colmatages sont généralement sans gravité et de courte durée.

En zone H1, par exemple, l'oscillation des courants orbitaires lessive assez rapidement les "prairies" superficielles des herbiers. Mais les pélites et lutites s'accumulent en zone H3 et parfois en zone H2 inférieure (Hyères). Cette dernière action sera parfois un facteur de régression irrémédiable et les biotopes du détritique côtier envasé supplanteront ceux de l'herbier .

2) les épandages turbides (et toujours pollués) sont immédiatement déviés par les "*longshore currents*" en fonction des régimes météorologiques et de l'incidence des vagues obliques. Ainsi, le flux n'est point dilué dans les eaux du large mais rabattu au niveau des eaux littorales et incorporé dans les circuits des courants et contre-courants des baies .

Cette deuxième caractéristique est , en fait, responsables de la dégradation parfois rapide des herbiers pour les exemples suivants :

- La Reppe : baie de Sanary, dégradation de la zone sud (circuits en "cardioïde").

- Le Gapeau : envasement de la baie d'Hyères suivant deux lobes correspondant respectivement aux régimes de Mistral et de vent d'Est (Jeudy de Grissac).

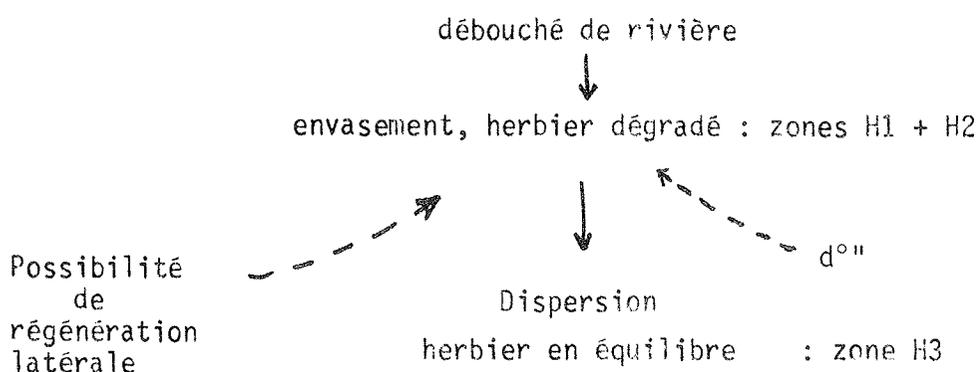
- Le Préconil , à Ste Maxime, où un transfert entrant, vers le NW, en baie de St Tropez, dégrade rapidement l'herbier littoral vers le villa "Sabi Pass", Beauvallon et Port Grimaud. Ce courant littoral peut être rapide et nous avons mesuré, par vent d'Est, des dérives superficielles de 0,30 m/sec. L'action de dégradation est aggravée par les rejets d'orages (très violents), des ruisseaux des Mûres, de la Garde et du Bourrian . A ces avatars s'ajoute l'action mécanique très érosive de vagues obliques à forte cambrure qui ont nécessité la construction d'épis rapprochés .

Contrairement aux précédents, ces types de dégradation s'avèrent généralement irréversibles et le recul des herbiers paraît inéluctable.

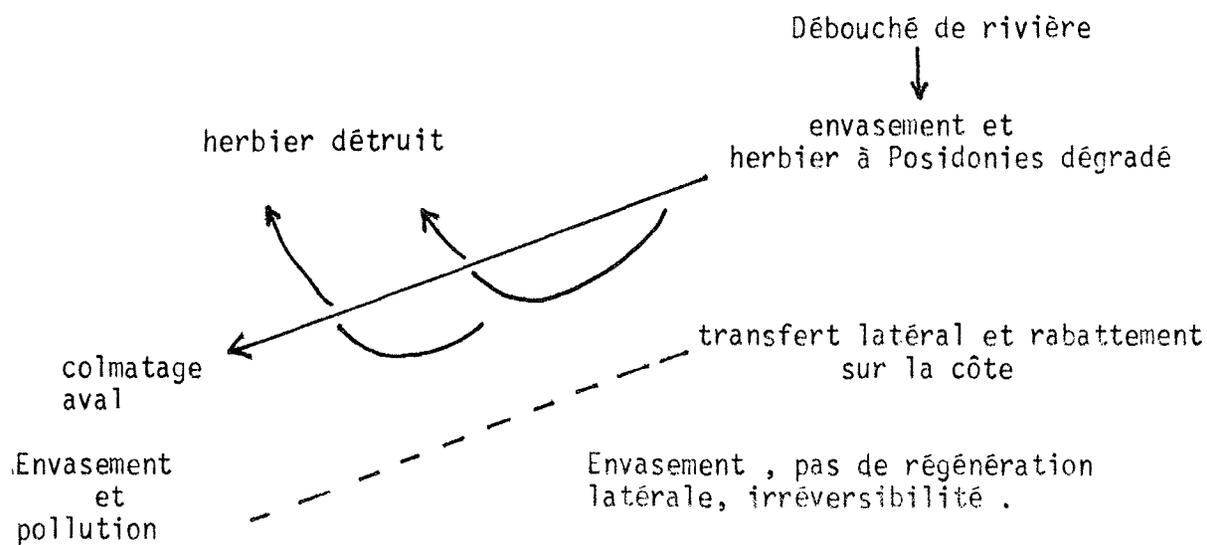
EN RESUME

Deux mécanismes peuvent être observés :

1°) Mode exposé : exemple : "type Sanary", courants en "cardioïde"



2°) Mode " longshore " : exemple : "type Ste Maxime".



V - 3 - L'EXTENSION DU FACIÈS DES VASES TERRIGÈNES CÔTIÈRES.

Ce phénomène remontant à plusieurs décennies, est responsable de la perte irrémédiable de très grandes surfaces d'herbier. L'extension des vases terrigènes côtiers sur le précontinent provençal a été souligné par J. Picard et collab. Ses effets sédimentologiques sont connus (Arnoux et Chamley, 1974 ; Blanc, 1974, 1975, 1977). En fait, une zone de plus en plus importante du précontinent se trouve régulièrement envahie par des lutites d'origine nettement fluviatile. Le même phénomène s'observe en Ligurie et en Adriatique. Il y a une évolution rapide de la sédimentation vers des faciès fins et il n'apparaît, en l'état actuel, aucune possibilité de "rattrapage" des aires envasées .

A - LES PRINCIPALES ZONES DE DESTRUCTION DES GRANDS HERBIERS SONT :

1°) Le golfe de Fos . Disparition totale des herbiers à Posidonies de la zone septentrionale (enfouissement des "mattes de St Gervais", connues et bien visibles il y a trois décennies). Régression très rapide des herbiers à l'Ouest du littoral de la Nerthe (Ponteau, Les Laurons, Bonnieux, Cap Couronne).

2°) La zone nord du golfe de Marseille: destruction totale des herbiers dès le cap Ragnon . L'extension des V.T.C. doublant le cap Caveaux, menace maintenant la baie du Prado (J. Picard, F. Picard-Tarbouriech).

3°) Baie de Sanary : extension encore limitée au Nord.

4°) Baie de Toulon : destruction quasi totale des herbiers en baie de la Seyne ; des vestiges de "mattes" récentes sont encore visibles. Destruction totale des herbiers en baie de Toulon ; régression rapide en baie de Toulon-Est, du Mourillon (vestiges d'herbiers) au cap Garonne.

Les zones de Giens , Hyères Cap Bénat s'avèrent relativement épargnées malgré les envasements locaux du Gapeau, du Pansard et du Préconil (Bormes).

5°) Baie de Saint Tropez : la topographie de cette baie et les conditions hydrauliques particulières (Blanc ,1975) en font un "piège à sédiment" favorable à un envasement en extension . La régression des herbiers y est générale (les Canebiers, St Tropez, Ste Maxime).

6°) Baie de Fréjus : disparition de l'herbier devant les littoraux sableux et urbanisés. Maintien d'une étroite frange, très menacée, au droit des rivages rocheux.

7°) Littoral de l'Estérel :étroite frange d'herbier très dégradé et menacé (Blanc ,1975). Vers l'Est et les Alpes-Maritimes, l'extension du faciès des V.T.C. ne permet que le maintien d'une frange réduite de l'herbier .

En fait, le grand herbier à Posidonies de la baie d'Hyères correspond au seul vestige important actuel d'un biotope naguère fort étendu. De ce fait, il doit être impérativement protégé, tout comme les beaux ensembles observés à La Ciotat, Porquerolles et Port-Cros.

B - QUELLES SONT LES CAUSES DE L'EXTENSION DES VASES TERRIGENES COTIERES ?

La régression générale des herbiers précités paraît être la conséquence indirecte de facteurs anthropiques tels que :

- le déboisement et les incendies de forêts
- l'établissement d'ouvrages fluviaux, sur le Rhône et la Durance en particulier, ouvrages du Verdon, etc...

Ces deux actions mettent en circulation une quantité de plus en plus importante de matériaux fins (pélites). Les barrages retiennent les sédiments grossiers tandis que les fleuves et rivières ne transitent que des limons fins et des argiles .

Mais cet envasement , noté par A.F.Marion était amorcé bien antérieurement aux phases d'aménagements des lits fluviaux . L'érosion littorale demeurant fort modérée (Froget, 1963, Blanc,1974,1975) et souvent quasi nulle, sans doute faut-il voir dans cette extension des V.T.C., les conséquences d'une érosion plus active des sols liée à une dégradation relative du couvert végétal : remplacement du "climax" stable du chêne vert par les forêts fragiles de pin? Les auteurs ne présentent cette opinion qu'au titre d'une hypothèse

de recherche et sans doute faut-il aller rechercher des facteurs physiques et biologiques .

C- ESSAI D'INTERPRETATION

Les travaux de recherche de nos prédécesseurs et de nous mêmes permettent en certains cas, de saisir les facteurs responsables de ces envasements.

Zones observées	facteurs établis
Golfe de Fos	envasement rhodanien en extension
Zone N du golfe de Marseille	envasement rhodanien en extension, développement des vases portuaires .
Baie de Sanary	envasement d'origine rhodanienne
Baie de Toulon	extension limite des terrigènes fins rhodaniens, vases portuaires et effet de piège à sédiment.
Baie de Saint Tropez	extension des terrigènes fins du Var et de l'Argens apports terrigènes de la Giscle et de la Môle, piège à sédiment, hydraulique de la baie.
Baie de Fréjus	apports terrigènes du Var et de l'Argens, ruisseau de Vallescure et du Cougourdier, épandage issu de la catastrophe du barrage de Malpasset, urbanisation accélérée.
Littoral de l'Estérel	apports terrigènes du Var et de la Brague.

VI - RUPTURES D'EQUILIBRE LIEES A DES CAUSES ANTHROPIQUES .

L'extension des vases terrigènes côtières demeure, *pro-parte*, la conséquence indirecte d'ouvrages fluviaux et de la dégradation continue du couvert végétal. Il en résulte l'importance croissante attribuée aux facteurs liés à l'activité humaine. En plus du déboisement et des barrages, ces derniers peuvent se classer en deux catégories :

- facteurs liés aux pollutions
- facteurs liés aux aménagements .

VI - 1 - FACTEURS LIÉS AUX POLLUTIONS ET AUX REJETS DE MATÉRIAUX.

A-) ROLE DES EMISSAIRES ; REJETS DIVERS

Les effluents des émissaires se déversent en surface ou à l'intérieur de la zone H1, parfois à la limite des zones H1 et H2 (vers -10 à -12 m). Ils réalisent ainsi des fronts de pollution très actifs amenant un recul rapide des herbiers. Ce dernier peut alors atteindre des valeurs surprenantes : 90 m/ an à Cortiou, 30 à 15 m/an à La Ciotat-Ouest.

Ce recul est général. Les herbiers régressent aux débouchés de tous les émissaires. Il convient d'éviter l'installation de ces derniers dans les fonds d'herbiers infralittoraux. En certains cas soigneusement étudiés, les effluents, préalablement épurés, peuvent être rejetés en zone H3, au niveau du détritique côtier par exemple.

Dans un premier stade, un enrichissement en matières organiques n'est point défavorable aux herbiers, à la condition que le milieu demeure agité et non dessalé. En fait, l'influence de la pollution a dans une certaine mesure, en effet bénéfique sur le développement du phytoplancton, comme il ressort des travaux de Travers (1971) et de Patrìti (1976).

Lorsque le débit des effluents augmente, le milieu des herbiers s'enrichit rapidement en substances toxiques :

- sels minéraux, phosphates, nitrates
- détergents
- métaux lourds (Pb, Hg), hydrocarbures
- germes pathogènes

Il ne nous appartient pas de traiter ici de cette question étudiée par les spécialistes. Nous présenterons seulement quelques remarques issues des observations :

1) la régression de l'herbier est très rapide même pour les milieux exposés à haute énergie (Cortiou, Cap Sicié, Giens W).

2) comme pour le cas précité des éléments terrigènes, le danger est amplifié par les circuits des courants de baies et les transferts latéraux. Les herbiers côtiers sont altérés et disparaissent en quelques années au voisinage d'un secteur urbanisé (Cortiou, forte régression à Cassis, La Ciotat-Est, Fréjus, Esterel).

Un rejet en zone H3, sous une thermocline n'échappera point au régime des dérives littorales, mais ces dernières peuvent y assurer une meilleure dilution notamment au niveau des fonds du détritique côtier. Les faibles pentes, voire les contre-pentes, seront dangereuses (euxinisation du sédiment). Même dans le cas des fortes inclinaisons, favorisant la dilution au large d'eaux plus froides, l'herbier profond est, lui aussi, irrémédiablement détruit. Nous manquons d'exemples en vraie grandeur pour évoquer des solutions de correction, mais il est possible que des améliorations concernant des émissaires profonds, soient suivies d'une reprise assez spectaculaire des herbiers dans la mesure où l'on évite l'eutrophisation.

Les herbiers sont également le siège de rejets clandestins, émissaires "particuliers". Les chenaux, "couloirs" et "marmites" sont alors très rapidement encombrés de débris divers (bois, pneus, matières plastiques, ferrailles et galets de mazout). Les sites très exposés peuvent s'accomoder temporairement de ces altérations (Bandol, Agay, le Dramont). Lorsque le niveau d'énergie vient à diminuer (zones plus abritées), les dépressions des herbiers deviennent des zones d'accumulation non drainées et la

destruction s'avère plus rapide que d'éventuelles régénérations latérales favorisées par le flux des "*longshore currents*". Tel est le cas des "mattes" de sites très fréquentés, notamment lors des périodes estivales et des mouillages abusifs : la Madrague des Lecques et certains fonds de calanques, Figuerolles, Port-Cros, Port-Man, côte des Maures et de l'Estérel, baies de Cavalaire, des Canebiers, du Bon Porté. Le voisinage des lotissements récemment implantés est l'objet d'une altération des mattes par les détritiques auquel s'ajoutent les effets des érosions et arrachages de frondes de Posidonies résultant des mouillages (recherches de Laborel et Harmelin au Parc National de Port Cros).

B-) DECHARGES DE MATERIAUX ET " DUMPINGS" .

Les décharges de matériaux, notamment d'éléments terrigènes (déblais), riches en pélites et phyllites, étouffent rapidement les herbiers, si elles ne sont précédées, au rivage, d'une digue filtrante efficace. De cette façon, ont disparu de grandes surfaces depuis deux décennies : baie des Lecques, destruction partielle de l'herbier de Bandol, baie de Sanary, St Tropez, etc...

Les rejets en mer, ou "*dumping*" forment des cônes sous-marins mobiles et irréguliers. Au golfe de Fos, ils envahissent les fonds du "détritique côtier" sans concerner directement les herbiers vestigiaux du littoral (Roux). A La Ciotat et au SSW de l'île Verte, les "*dumpings*" sont heureusement situés en deçà de l'infralittoral et n'altèrent point les herbiers (Bourcier et Picard). A Port-Miou (Cassis), des déblais de blocaille calcaire, non polluants, ont localement détruit quelques biotopes aux débouchés des calanques (Poizat).

En résumé : les déblais sont à proscrire en milieu littoral et infralittoral en l'absence de digue filtrante au front de mer. Dans ce cas là, on ne perdra qu'une superficie limitée des biotopes marins, en toute connaissance de cause et sous la responsabilité des riverains (intérêts économiques, touristiques).

Les "*dumpings*" au large peuvent être possibles en milieu circalittoral envasé, à la condition de réaliser une étude détaillée des sites et une expertise biologique.

Quant aux extractions sous-marines de sables et agrégats, elles seront à proscrire rigoureusement dans les herbiers à Posidonies (Blanc, 1976).

VI - 2 - FACTEURS LIÉS AUX AMÉNAGEMENTS .

Ces derniers sont variés et non complètement inventoriés. Citons: la construction des jetées portuaires et "marinas", les implantations d'épis les remblais .

A -) JETÉES PORTUAIRES ET "MARINAS "

L'implantation d'une jetée nouvelle se traduit par d'importantes perturbations dans le milieu marin. Ces dernières ne sont point obligatoirement néfastes ; il importe de les prévoir avant d'entreprendre la réalisation de l'aménagement .

1°) *Les jetées frontales et les brises lames* déportent vers le large la zone des chocs et turbulences. Il en résulte un déplacement des zones hydrodynamiques H1 et H2 qui se trouvent particulièrement resserrées. Le flux des courants de décharge détruira de ce fait les fonds d'herbiers contigus, parfois jusqu'à des profondeurs de 15 à 20 m. (cas des jetées de La Ciotat). L'herbier en zone H3 ne sera pas altéré. Ce déplacement de la zonation a été souligné par Picard et Bourcier (1976) . En fait, les dégâts sont limités eu égard à l'intérêt économique de l'aménagement (équipement industriel des chantiers de La Ciotat, aménagement de nouveaux ports de plaisances).

2°) *Les jetées portuaires* bloquent les transferts et déportent vers le large les "*longshore currents*". Il en résulte un ensemble de phénomènes précis:

- sédimentation accélérée en "amont" de l'ouvrage (Hyères, Port de Bormes) et engraissement du littoral.

- Mais, érosion dangereuse en "aval" de l'ouvrage avec recul du littoral et destruction des herbiers de la "zone d'ombre" (port d'Hyères, Blanc 1975).

- la déflexion vers le large du flux en transit peut amener la migration de sédiment et de "crochons" de réflexion obturant la passe, mais elle peut aussi alimenter un herbier plus profond et favoriser son développement.

3°) *Problèmes de pollution* habituels aux marinas et aires portuaires.

B -) IMPLANTATION D'EPIS ET DE PLAGES ARTIFICIELLES .

Lorsque la situation justifie l'implantation d'une série d'épis et lorsque ces derniers sont couronnés de succès (ce qui n'est pas toujours le cas), l'érosion littorale est enrayée . Ce résultat est parfois accompagné par la destruction délibérée de l'herbier superficiel au voisinage des ouvrages et cette dernière doit être considérée, au préalable, en connaissance de cause. Les zones détruites sont limitées (Sanary, Le Brusç) et peuvent être secondairement régénérées après la stabilisation du littoral.

La présence d'épis modifie la position des déferlements et peut engendrer des interférences et des ondes de Bragg assez bénéfiques. Mais elle détermine, en revanche, l'accélération du flux de retour lors des tempêtes et des surélévations du niveau, d'où une reprise locale de l'érosion des herbiers au "droit" des ouvrages. Chaque cas demande à être considéré avec attention lors des études préalables et des essais en modèles réduits.

Ces ouvrages et l'installation de plages artificielles avec digues frontales brise-lames auront encore pour résultat le déplacement latéral des "points neutres" séparant les secteurs érodés des zones engraisées . Il en découlera des possibilités non négligeables d'érosion ou de régénération vis à vis des herbiers frangeants. Un bilan sera à établir avant la réalisation des travaux.

Il importe de prévoir attentivement toute modification du cloisonnement naturel des secteurs littoraux délimités par les zones de convergence et de divergence des orthogonales .

C -) ETABLISSEMENT DE REMBLAIS :

Les remblais littoraux (Marseille-Prado, baie des Lecques, St Tropez, Bandol, etc ...) amènent la destruction des fonds correspondants . Ce fait peut être tenu pour secondaire vis à vis des incidences économiques des ouvrages et il ne nous appartient pas de considérer ces problèmes .

En revanche, afin de préserver les herbiers du voisinage, il conviendra d'établir des digues efficaces en enrochements dégressifs antérieurement au dépôt des déblais. Par la suite, on devra s'attendre à un déplacement , généralement sans gravité, des zones de déferlement et de turbulence vers le large.

Lorsque le remblai est réalisé sur un talus détritique particuliè-

rement altéré, ce qui est la cas en général (St Tropez), l'ouvrage ne présente aucune conséquence néfaste. Il en sera différemment si le projet vient interrompre un transfert important ou "défecte" vers un herbier un courant turbide pollué.

o
o o

VII - LES BILANS

A -) CONDITIONS LIMITES .

L'analyse factorielle et l'ordination appliquées aux herbiers font ressortir cinq paramètres essentiels dont l'interaction détermine la présence d'un herbier en équilibre.

1°) La profondeur

Ce facteur est moins important qu'on serait tenté de la croire à priori. Il est susceptible d'appréciables fluctuations dans une "fourchette" allant de 0 à - 32 m. A partir de - 12 m, l'herbier atteint le seuil $z = L/2$ séparant les zones H1 et H2 et l'équilibre tend à se réaliser. Pour les fortes tempêtes, $L/2 = 25$ à 28 m, délimitant ainsi la zone H3 de l'herbier homogène. Bien entendu, la profondeur règle la pénétration des radiations lumineuses indispensables au métabolisme des peuplements photophiles infralittoraux.

2°) Les conditions hydrodynamiques .

Un milieu agité à moyennement agité est très favorable au développement des herbiers à Posidonies et à leur régénération. Les zones à très haute énergie (flux érosif) tout comme les secteurs très abrités, entravent fréquemment l'évolution des cycles accrétion-érosion en aboutissant à deux "impasses":

- enlèvement du sédiment, non sédimentation.
- colmatage par hypersédimentation.

Les conditions hydrodynamiques caractérisent les zones H1, H2 et H3 précitées, dont le comportement particulier induit les caractères sédimentaires et notamment, la granulométrie.

3°) Turbidité.

Ce facteur régit le taux de sédimentation et la progression des fronts d'envasement, le résultat des "longshore currents", les pollutions, etc...

Les herbiers à Posidonies se développent bien (et se régénèrent) en

eaux relativement claires, agitées, faiblement turbides et à taux de sédimentation modéré. Ce facteur conditionne encore la granulométrie (asymétrie et teneur en lutite), la pénétration de la lumière, la nature des peuplements et les taux en carbonates .

4°) Apport détritique.

L'herbier peut s'implanter sur des éboulis sous-marins et des talus détritiques calcaires ou à éléments métamorphiques. La composition des mattes révèle une grande variabilité en ce domaine. Par ailleurs, un herbier développé amène la rétention des sédiments terrigènes en transit et correspond à une stabilisation effective du littoral.

L'herbier développé et en équilibre admet un milieu modérément alimenté par les éléments détritiques d'origines variées (éboulis, dunes, rivières, torrents).

5°) Nature des peuplements benthiques infralittoraux.

L'analyse multivariante et factorielle montre l'importance fondamentale des éléments bioclastiques autochtones ou sub-allochtones dans la composition du sédiment, sa teneur en carbonates et ses caractères granulométriques .

L'effet de "piège" de l'herbier et la croissance verticale des "mattes" favorisent les effets de cette composante biogénique.

B -) SURFACES PERDUES ET GAGNEES. ESSAIS D'INTERPRETATION

Afin de résumer les études précédentes, nous considérerons l'évolution des principales aires examinées:

Localisation des herbiers	Etat global	Facteurs actifs .
Golfe de Fos, Cap Couronne	Régression continue	Envasement, pollution; courants de fond
Côte des Calanques, Riou	Régression rapide	Pollution, Hydrodynamique
Baies de Cassis et de La Ciotat.	Equilibre ou régression lente	Pollution, hydrodynamique
Sanary, Le Brusç; Archipel des Embiez	Régression rapide Régénérations latérales	Pollution Hydrodynamique
Toulon-Est	Régression rapide Equilibres locaux	Envasement, pollution Hydrodynamique.
Baie de Giens	Régression rapides Régénérations locales	Pollution Hydrodynamique
Rade d'Hyères	Régression rapide mais zones équilibrées et régénérations	Envasement Hydrodynamique
Massif du cap Bénat	Erosions locales Equilibre	Hydrodynamique
Iles d'Hyères	Erosion dans les passes régressions locales Equilibre	Pollutions locales, Hydrodynamique
Côte des Maures	Erosions locales Equilibre Régénération	Hydrodynamique
Baie de St Tropez	Régression rapide	Envasement Hydrodynamique
Cote de l'Esterel	Régression	Envasement Hydrodynamique

Ce bilan montre une régression générale, parfois rapide comportant quelques aires en équilibre et des possibilités non négligeables de régénération.

La pollution récente, affligeante et spectaculaire, n'est point la cause unique de cette régression des herbiers à Posidonies. Les érosions hydrodynamiques et l'envasement des vases terrigènes côtières suffisent par eux seuls à expliquer le bilan déficitaire actuel.

La régénération naturelle constitue un espoir, mais, en l'état actuel, elle s'avère incapable de récupérer la totalité des surfaces perdues. Or, cette régénération, pratiquée par marcotage naturel est caractérisée par les conditions suivantes :

- eaux claires, agitées ou très agitées
- absence de pollution notable
- absence d'envasement
- pentes généralement élevées
- floraisons par étés chauds.

Les taux de régénération sont variables : faibles (2 m/an), moyens (15 m/A) à forts (20 à 37 m/A et même : 83 m/A).

On insistera sur le "rôle" d'un "cloisonnement dynamique naturel" particulier aux côtes rocheuses abruptes caractérisées par :

- zones de convergence des orthogonales des flux incidents (houles, vagues) amenant l'érosion des herbiers à Posidonies.

- zones de divergence des orthogonales se traduisant par une dissipation de l'énergie, une décantation des particules fines et un herbier en équilibre malgré un léger envasement éventuel vers - 35m.

- L'espace marin entre ces deux zones est parcouru, le long du rivage, par les "longshore currents". En deçà, vers le large, s'établissent des "cellules" de calme où se développent des herbiers profonds en progression. Ainsi, des *compensations latérales* naturelles peuvent être réalisées.

VIII - MESURES DE PROTECTION

VIII - 1 - MESURES DE PROTECTION IMMEDIATE.

Les mesures de protection immédiate qui découlent des études précitées concernent le milieu physique, les peuplements et le sédiment .

1°) Interdiction de rejets et d'émissaires, même après épuration, au niveau des fonds de l'herbier à Posidonies ,

2°) Interdiction du chalutage et d'extractions sous-marines de sable et d'agrégats.

3°) Eviter d'interrompre les circulations par endiguements , jetées non étudiées, etc... On évitera d'entraver le mécanisme des "longshore currents" et des courants compensateurs .

4°) N'entreprendre aucun aménagement sans une étude préalable pluridisciplinaire et des essais en modèle réduit.

5°) Télédétection infra-rouge et prospection photographique aérienne régulière . Vérifications bathymétriques détaillées pour certains secteurs .

VIII - 2 - PROTECTION A MOYEN ET LONG TERME .

Il est souhaitable de définir des aires de protection aux secteurs suivants :

1°) Zone du cap Couronne à Carry

2°) Massif des Calanques et archipel de Riou

3°) Baie de La Ciotat, Ile Verte, Pointe de la Cride.

4°) Archipel des Embiez

5°) Rade de Giens et baie d'Hyères, Porquerolles

6°) Massifs du cap Bénat, Cap Lardier et cap Taillat.

7°) Côte de l'Esterel, de la Pointe de la Vieille d'Agay au Trayas.

Ces zones seraient accessibles à la pêche artisanale et au tourisme mais les servitudes du paragraphe VIII-1 leurs seraient appliquées .

-Aménagement et prolongation jusqu'en zone circalittorale des émissaires existants , rejet d'effluents épurés au niveau du Détritique côtier. Etude préalable des zones de "dumping".

-Entreprende des études détaillées sur la régénération naturelle des Posidonies et les implants artificiels, sous une surveillance scientifique attentive.

-Nécessité d'études physiques et biologiques préalables .

o

o

o

CONCLUSIONS

I - LES CYCLES DE L'HERBIER À POSIDONIES .

Le développement des "mattes" de l'herbier à Posidonies est lié aux limites d'action efficace, en profondeur, des facteurs hydrodynamiques tels que l'action des vagues, courants orbitaires et courants de décharge. L'érosion ou la sédimentation s'avèrent réglées, pour chaque site, à une profondeur limite déterminée et provisoire. L'état actuel observé ne présente qu'une image "relativement temporaire d'un enchaînement de cycles "accrétion- érosion- accrétion".

Les phénomènes paraissent se dérouler à des échelles variables dans le temps:

- cycles du 1er ordre : correspondant à plusieurs siècles ,
- cycles du 2ème ordre : réalisés au cours de plusieurs décennies ,
- éventuellement, petits cycles courts se manifestant en quelques années, souvent liés à des facteurs climatiques locaux et autres.

Cette évolution peut se traduire par la formation de mattes emboîtées et de dénivellations nettes dans les fonds d'herbiers.

A une certaine profondeur, supérieure à -12 m ou -15 m, les herbiers présentent fréquemment un état d'équilibre. En fait, la profondeur et la régularisation des fonds, les taux de sédimentation très irréguliers, apparaissent les facteurs essentiels conditionnant les actions hydrodynamiques en zone H1 (action des vagues) et H2 (courants de décharge).

Les courants de décharge se traduisent par des modalités variées : retour du sédiment au rivage, éloignement vers le large, mobilisation, filtrage, puis rétention de sédiment au niveau des "mattes".

Deux systèmes essentiels de chenaux ont été décrits :

- 1) Chenaux perpendiculaires au littoral,
- 2) Chenaux parallèles au rivage.

Les premiers sont reliés aux mécanismes des courants de

décharges et des courants sagittaux, tandis que les seconds paraissent en relation avec des courants de fond d'origine variées, "*longshore currents*", etc...

2 - MODES ET CLASSIFICATION DES SÉDIMENTS DE L'HERBIER À

POSIDONIES .

Trois modes possibles ont été observés :

- 1) Mode régulier traduisant un état d'équilibre,
- 2) Mode imbriqué où se manifestent des altérations d'origines diverses,
- 3) Mode dispersé : rupture des équilibres naturels et nette régression,

Les envasements en progression (golfe de Fos, rade nord de Marseille, baies de St Tropez et de Fréjus) et les facteurs hydrodynamiques régissent la répartition des herbiers suivant trois dispositions .

Les études sédimentologiques et dynamiques ont permis un essai de classification des fonds d'herbiers :

- 1) Herbiers des aires à hypersédimentation,
- 2) herbiers de sites abrités ,
- 3) herbiers de sites exposés, en fonction des zones hydrodynamiques H1, H2, et H3.
- 4) herbiers des passes et détroits,
- 5) herbiers profonds , de - 20m à - 40m.

3 - LES SÉDIMENTS DE L'HERBIER À POSIDONIES ,

LES FACTEURS DE LA SÉDIMENTATION .

Le traitement des données par l'analyse factorielle en composantes principales fait apparaître des "noyaux d'affinités" des échantillons, aboutissant à un contrôle de la classification des herbiers établie par les

méthodes qualitatives .

L'établissement de matrices en mode Q et R fait apparaître les variables essentielles corrélées positivement et négativement ainsi que les "couples dissemblants" , par exemple :

- quartz détritique - Algues
- talus détritique agité - zone envasée
- herbier frangeant - herbier profond homogène
- mode agité - mode abrité

Des liaisons positives nettes sont dégagées :

- envasements (fortes teneurs en lutites) - peuplements à Gastéropodes , voire Lamellibranches .
- indépendance relative de la profondeur, en zone infralittorale, vis à vis des peuplements et surtout de la nature du sédiment .
- relation inverse de la clasticité vis à vis des teneurs en Algues et Echinodermes. Influence, non mesurée, de la distance au rivage.

L'ordination permet de dégager les facteurs suivants , exprimés par ordre d'importance (contribution relative):

1) influence primordiale des peuplements benthiques dont la productivité détermine le taux élevé en carbonates biogéniques, en corrélation inverse avec l'importance des décharges détritiques d'origine littorale(58% à 31 % de la variance).

2) influences terrigènes : envasements, peuplements à Lamellibranches, taux en Foraminifères benthiques ; apports détritiques fins ou grossiers. Un couple de dissemblance est exprimé par les "loadings" entre le quartz et les teneurs en lutites (15% de la variance).

3) état d'agitation des eaux, degré d'exposition. L'analyse factorielle fait ressortir trois milieux : agité, moyennement agité, mode calme, conformément aux observations définissant les trois zones hydrodynamiques H1, H2 et H3.

4) augmentation relative de la profondeur et du taux en Foraminifères benthiques et en Algues pour une bien moindre contribution (11 à 12 % de la variance).

D'autres axes factoriels déterminent de faibles contributions difficiles à interpréter .

Enfin, les graphes d'ordination montrent que les espaces factoriels définissent des alignements "couples de dissemblances" et "noyaux d'affinités" permettant d'individualiser les ensembles suivants :

1) herbiers littoraux des talus détritiques (côte des Maures, cap Couronne). La corrélation inverse avec les fréquences du quartz détritique permet en outre, de séparer "mathématiquement" les herbiers des côtes métamorphiques et des rivages calcaires .

2) herbiers envasés profonds (Hyères)

3) herbiers de mode agité (cap Couronne) et très agité (Archipel des Embiez); fonds dégradés , en voie d'érosion rapide.

4) herbiers littoraux dégradés par envasement et pollution, décharges d'éléments terrigènes.

5) herbiers en équilibre , généralement assez profonds et en deçà de la zone H2.

Des modes intermédiaires ou difficiles à interpréter apparaissent également sur les graphes et soulignent d'éventuelles variétés ou altérations.

Ainsi, l'état régressif ou équilibré d'un herbier à Posidonies peut être défini à partir de l'analyse d'un nombre raisonnables d'échantillons et de descripteurs .

4 - RUPTURES D'ÉQUILIBRE D'ORIGINE MÉCANIQUE.

1°) L'examen des vagues significatives et des "longshore currents" fait apparaître une liaison étroite avec les processus météorologiques . Il en sera de même pour les surélévations temporaires du niveau, de l'angle d'attaque des vagues et l'apparition des courants de dérives .

2°) Action effective des courants de fond : courants orbitaires jusqu'à -20m, courants de marées et , surtout, courants de décharge . Les changements de pente du fond et les ondes à forte cambrure se traduisent par les nouveaux gradients de flux à énergie variable. Le phénomène est généralement amorcé par une dénivellation au rivage liée aux vents dominants, houles de tempêtes et pression barométrique . Il en résulte une érosion mécanique active des "mattes" favorisées par les irrégularités de la topographie des fonds.

3°) L'érosion du fond demeure sous la dépendance partielle des paramètres suivants: profondeur, ruptures de pentes, "diamètre sédimentologique" des matériaux, contraintes horizontales de cisaillement, célérité moyenne

du fluide en transit .

La séquence des phénomènes est la suivante :

- pas de mouvement
- mouvement de sédiment ; oscillations des courants orbitaires, courants unidirectionnels (courants de décharge).
- formation des rides
- "plane-beds", puis érosion.

4°) Le phénomène est compensé par l'augmentation de la profondeur et du rayon hydraulique, l'effacement des courants orbitaires et les possibilités de régénérations latérales des herbiers.

5 - RUPTURES D'ÉQUILIBRE LIÉES À LA SÉDIMENTATION TERRIGÈNE.

Elles se manifestent par trois types d'actions :

1) extension des lobes sableux d'accrétion, alimentés par les apports littoraux d'origines variées . Ces derniers concernent les zones hydrodynamiques H1 et H2, en des milieux à haute énergie (déferlements de forts rouleaux et courants de décharge, érosion des petits fonds).

2) débouchés des rivières et torrents côtiers.

- le mode direct, en zone agitée, amène une dispersion rapide et une dégradation localisée des herbiers .

- le mode "longshore" se traduit par un transfert et un rabattement au rivage; d'où la destruction de toute la frange littorale des herbiers et un colmatage par envasement .

3) extension du faciès des "vases terrigènes côtières", d'origine fluviatile (Rhône, Argens, Var, etc...). Cette dernière cause apparaît la plus importante et amène la perte de grandes superficies d'herbiers sur toute la marge continentale. Cette extension de la "mud line" (qui se rapproche des rivages), paraît indirectement liée à des facteurs anthropiques (déboisements et ouvrages sur les lits fluviatiles).

6 - RUPTURES D'ÉQUILIBRE LIÉES À DES CAUSES ANTHROPIQUES .

Ces facteurs amènent des régressions rapides dans les herbiers à Posidonies. Contrairement aux causes de déséquilibre précédemment évoquées, ils peuvent être corrigés ou supprimés .

1°) facteurs liés aux pollutions.

Emissaires et rejets divers. La dispersion des effluents est fonction de l'hydrodynamique et de la profondeur des sites. Les rejets peuvent fréquemment être repris par un système de courants côtiers et rabattus au rivage. Des rejets en zone H3, au niveau du détritique côtier (circalittoral) peuvent être entrepris en certains cas après une étude dynamique et une expertise biologique .

2°) Décharges de matériaux et "dumpings".

Elles sont à proscrire en milieu infralittoral, en l'absence de digues filtrantes .

3°) Facteurs liés aux aménagements .

- Action réfléchissantes et défectrices des digues de jetées portuaires, "marinas", brise-lames des plages artificielles , etc...

- "rejet" vers le large des zones hydrodynamiques H1 et H2 (chocs et turbulences). Cela amène l'érosion limitée d'une nouvelle frange littorale de l'herbier superficiel.

- Blocage des transferts, "longshore currents" avec une sédimentation accélérée en "amont", plutôt bénéfique et une dangereuse érosion à l'"aval", dont il faudra tenir le plus grand compte et dont la protection à prévoir devra être chiffrée au stade du projet initial.

- Les implantations d'épis et de plages artificielles modifient la distribution des déferlements et accélèrent la vitesse du flux de retour. On assiste encore au déplacement des "points neutres" séparant les secteurs

érodés des zones engraisées. Au cours de ces transformations, souvent efficaces et utiles pour les riverains, les herbiers littoraux seront localement érodés et toujours modifiés .

Les aménagements précités et les remblais altèrent le cloisonnement dynamique naturel des secteurs littoraux délimités par des zones de convergence (augmentation du flux d'énergie) et de divergence (dissipation du flux d'énergie) des orthogonales. Cette modification n'est point forcément néfaste par ailleurs, au niveau des équilibres littoraux.

7 - UN BILAN DÉFICITAIRE .

On observe une régression assez généralisée des herbiers à Posidonies .

Cette régression se manifeste à des taux variés :

- régression faible : 1 à 3 m/A, pouvant être compensée ultérieurement,
- régression moyenne : 5 à 10 m/A, aboutissant à un mode imbriqué puis dispersé.

- régression maximale, souvent très spectaculaire, aux taux de 20, 30m/A, jusqu'à 50 m/A avec des maxima à 116m/A dans les axes des chenaux d'érosion. On assiste alors à la destruction totale des fonds d'herbiers.

Des mécanismes naturels compensateurs interviennent souvent , amenant, pour des périodes de 15 A, la "récupération" de 25 % à 30 % des surfaces initialement perdues. L'amorce d'une nouvelle phase d'accrétion permet une extension (temporaire) des herbiers. Cette régénération par marcottage naturel est caractérisés par les conditions suivantes :

- eaux claires, agitées ou très agitées, non polluées,
- absence d'envasement
- pentes parfois élevées
- floraisons par étés chauds.

Les taux de régénération sont variables : faibles (2m/A), moyens (15 m/A) à forts (20 à 37 m/A) et même : 83 m/A.

8 - MESURES DE PROTECTION, CONDUITE À TENIR .

Des mesures immédiates doivent être appliquées et concernent le milieu physique, les peuplements et le sédiment .

1) Interdiction de rejets , émissaires, au niveau des fonds infralittoraux de l'herbier à Posidonies. Cette interdiction concernera également les chalutages dans les frondes de Posidonies et les extractions sous - marines de matériaux dans les herbiers , ou a proximité de ces derniers .

2) Effectuer des études préalables détaillées avant la réalisation des aménagements qui modifient toujours la nature des équilibres littoraux. Il faudra éviter d'interrompre les circulations naturelles : transferts, "longshore currents", courants compensateurs, "upwelling", etc...

On pourra aussi éviter ou atténuer l'érosion des herbiers et leur destruction par "étouffement" et colmatage en milieu confiné.

3) Définition d'aires de protection vis à vis des herbiers menacés, en déséquilibre mais où demeurent des espoirs raisonnables de régénération.

4) Etudes et aménagements d'émissaires profonds .

o

o

o

BIBLIOGRAPHIE

- ALLADEAU P.J. et GROVEL A.P., 1970. Prévision de la houle maximale en un point de la côte et son application à la région Lorient - Ile de Groix. *Lab. Géol. Marine, Fac. Sci. Nantes*. 37 p. et annexes.
- AMOUROUX J.M., 1974. Etude des peuplements infralittoraux de la côte du Roussillon. *Vie et milieu*, 24,(1) : 159-173.
- ARNAUD-VANNEAU A., 1975 . Reflexions sur le mode de vie de certains *Orbitolinidae* (Foraminifères Barrémien-Aptien) de l'Urgonien du Vercors. *C.R.s. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*, n.s., (10), 2-3 : 126-130.
- AUBERT M. et AUBERT J., 1973. Pollutions marines et aménagement des rivages . *C.E.R.B.O.M. et I.N.S.E.R.M.* : 309 p.
- AUGIER H., BELSHER T., BOUDOURESQUE C.F., COPPEJANS E., PERRET M., 1975 . Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc National). X - La régression du récif-barrière de Posidonies. *Trav. Scient. du Parc Nat. de Port-Cros*, 1 : 41-46.
- BELLAN G. et STORA G., 1976 . Effets et conséquences d'un apport artificiel d'eaux douces sur les peuplements benthiques d'un étang marin. *Comm. Intern. Explor. Scient. Méditerranée*. 25^e Congr. Split : 2p.
- BELLAN-SANTINI D. et DESROSIERS G., 1976 . Distribution du benthos de substrat dur dans un golfe soumis à de multiples pollutions (golfe de Fos). *Comm. Intern. Explor. Scient. Méditerranée*. 25^e Congr. Split. 1p.
- BELLESORT B., LECLERC J.P. et MIGNOT C., 1976 . Action de la houle sur les sédiments . *Etudes du CNEXO et L.C.H.F.* : 191 p.
- BELSHER T., 1976 . Etude de similitude entre relevés situés dans une zone polluée (région de Marseille, France). *Comm. Intern. Explor. Scient. Méditerranée* . 25^e Congr. Split : 5p.

- BLANC F. et LAUREC A., 1976 . De l'heuristique au thaumaturgique en traitement des données d'écologie marine . *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Océanogr. 14 : 101-107.
- BLANC J., 1975 . Recherches de sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection. *Centre Nat. Exploit. Océans* : 164 p.
- BLANC J., 1975 . Recherches sur les gîtes de sables et agrégats sur la marge continentale de la Provence . *Bull. Soc. Géol. France*. 7^e sér. 27,(4): 521-528.
- BLANC J., 1976 (1975). Evolution du profil des plages et phénomènes d'érosion littorale. *Tethys* . 7, (2-3) : 299-306.
- BLANC J. ,1976 . Les sédiments de marges continentales méditerranéennes. Essai d'interprétation et de classification. *Conf. Inst.Sc. Terre, Univ. Genève*. 38 p., à paraître in "*Géologie méditerranéenne*", 1978.
- BOUDOURESQUE C.F., GIRAUD G., MARCOT J., MEINESZ A. et VERLAQUE M., 1976 . Indices foliaires de *Posidonia oceanica* (Linné) Delibe, en Corse et dans la région marseillaise. *Comm. Intern. Explor. Scient. Méditerranée*. 25^e Congr. Split : 2p.
- BOUDOURESQUE C.F. et VERLAQUE M., 1976 . Le peuplement algal au voisinage de centrale thermique de Martigues - Ponteau (golfe de Fos, France). *Comm. Intern. Explor. Scient. Méditerranée*. 25^e Congr. Split :4p.
- BOURCIER M., 1976 . Economie benthique d'une baie méditerranéenne largement ouverte et des régions voisines en fonction des influences naturelles et humaines. *Thèse. Univ. Aix-Marseille II* , n° A.0.12.150 : 161 p. et ann.
- BOUYSSÉ Ph., HORN R., LAPIERRE F. et Le LANN F., 1976 . Etude des grands bancs de sable au SE de la Mer Celtique. *Marine Geol.* 20 : 251-275.
- CAMATTE R., 1958 . Océanographie physique de l'anse du Verdon. *D.E.S. Fac Sc. Marseille* : 60 p.

- CARTER R.M., 1975 . A discussion and classification of subaqueous mass-transport with particular application to grain-flow, slurry flow and fluxoturbidites. *Earth Sc. Rev.*,11 : 145-177.
- CHAROLLAIS J. et DAVAUD E., 1976 . Microfacies et ordinateur . *Technip.*:225p.
- CHANNON R.D. et HAMILTON D., 1976 . Waves and tidal current sorting of shelf sediments southwest of England . *Sedimentology* ,23 : 17-42.
- CHASSEFIERE B., GOT H. et LEENHARDT O., 1974 . Comment aborder les travaux de reconnaissance des fonds sous-marins. *Geologia tecnica* ,1 : 20p.
- COLANTONI P. et GALLIGNANI P., 1975 . Sea floor types and recent sedimentation on the continental shelf between Manfredonia and Trani (Southern Adriatic Sea). *Underwater association*; 8th Symp. Polytechnic of North London., London : 115-132.
- COMEX équipement . 1972 . Evaluation of measurements made for the seal shallow water test site area offshore Pomègues Island, South of France. August- December,1972 . Seal Petroleum limited, Environmental data analysis : 20 p.
- COMMISSION POUR L'EXPLORATION SCIENTIFIQUE DE LA MEDITERRANEE. 1976 . Communications présentées aux journées d'études sur les pollutions marines . 25 è Congr. Split : 4p.
- CUGNY P., 1977 . Utilisation de méthodes quantitatives en Paléocéologie. Application à l'étude des microfacies du Barrémien terminal et du Bédoulien de l'Estremadura (Portugal). *Thèse 3ème Cycle . Univ. Paul Sabatier, Toulouse* :120 p.
- DAL CIN R., 1976 . The use of factor analysis in determining beach erosion and accretion from grain size data. *Marine Geol.* 20 : 95-116.
- DEBYSSER J., 1975. Les problèmes de l'environnement liés à l'exploitation des sables et graviers marins . *C.N.E.X.O.* , note techn.n° 51. oct., département "ressources minérales : 11 p.

- DEN HARTOG C. , 1970 . The sea-grasses of the world. *North holland publish. Comp. Amsterdam, London.* 59, (1) : 295p.
- GALLIGNANI P. et FABRI A., 1972 : Ricerche geomorfologiche e sedimentologiche nell' adriatico meridionale. *Giornale di Geologia* ,(2) ,38, 2:453-498.
- GALLIGNANI P., 1973 . I sedimenti della piattaforma continentale pugliese da Bari a Torre Canne. *Giornale di Geologia* , (2), 39, 1 : 115-131.
- GROVEL A.P., 1970 . Etude d'un estuaire dans son environnement. Le Blavet maritime et la région de Lorient. *Thèse*, Nantes, n°CNRS A.0.48-52:122p.
- HARMAN H.H. ,1968 . Modern factor analysis. 2ème ed. *University of Chicago press*, Chicago and London, 474 p.
- HARMELIN J.C. et SCHLENZ R., 1963 . Contributions préliminaires à l'étude des peuplements du sédiment des herbiers de Phanérogames marines de la Méditerranée. *Rec. Trav. Stat. Mar. Endoume.* 47 ,(31) : 149-150.
- HARMELIN J.C. , 1964 . Etude de l'endofaune des "mattes" d'herbiers de *Posidonia oceanica* Delibe. *Rec. Trav. Stat. Mar. Endoume* .51 ,(35): 43-106.
- HOWARD J.D. et REINECK H.E., 1975 . Comparaison of physical and biogenic sedimentary structures of a marine high energy and a marine "zero energy" coast . *IXth Intern. Cong. of Sedimentology*, Nice, 1975, (th.6) : 73-78.
- INMAN D.L., 1949. Sorting of sediments in the light of fluid mechanics. *Journal of Sedim. Petrology.* 19 : 51-70.
- JEDDY de GRISSAC A., 1975 . Sédimentologie dynamique des rades d'Hyères et de Giens (Var). Problèmes d'aménagements . *Thèse 3ème Cycle. Géol. mar. et Sedim. Univ. Provence.* 86 p et annexes .
- JORESKE K.G., KLOVAN J.E. et REYMENT R.A. , 1976 . Methods in geomathematics. Geological factors analysis . *Elsevier* .178 p.

- LACOMBE P., 1965 . Cours d'Océanographie physique, *Gauthier Villars*, Paris.
- LAMOTTE M., 1948 . Introduction à la Biologie quantitative. *Masson ed.* :369p.
- LARDEAU P., 1976 .Enquête sur la floraison des Posidonies (C.N.X.O.), *Comm. Intern.Explor. Scient. Méditerranée* , 25è congr. Split: 6p.
- LARRAS P.; 1961 . Cours d'Hydraulique maritime et de travaux maritimes. *Dunod*. Paris, 560p.
- LARRAS P., 1967 . Nouvelles recherches sur la probabilité d'apparition des houles dont l'amplitude dépasse une valeur donnée. *C.R.Acad. Sci. Paris*. 265.
- MANOHAR M., 1955 .Mechanics of bottom sediment movement due to wave action. *Tech. Mem. Beach Eros. Bd. U.S.A.* 75 : 100p.
- MEINESZ A., 1976 . Note préliminaire concernant quelques expériences de repiquage de végétaux marins, en particulier de l'Algue *Caulerpa prolifera* (Forsk.) Lamouroux. *Comm.Intern.Scient. Méditerranée*. 25è Congr. Split: 5p.
- MEINESZ A. et LEFEVRE J.R., 1976. L'aménagement de la côte entre Menton et Théoule (Alpes Maritimes et Monaco). Inventaire des restructurations du rivage et impacts sur la vie sous-marine littorale. *S.O.S. Vie et Nature*, mém. spé. 19 : 35 p.
- MICHE R., 1954 . Propriétés des trains d'ondes océaniques et de laboratoire. Evolution et amortissement compte tenu des résistances passives. *Publ. C.O.E.C. Serv.Hydr. Mar. Paris*. 135.
- MINAS H.J., 1963 . A propos d'une remontée d'eaux profondes dans les parages du golfe de Marseille (Octobre 1964). Conséquences biologiques . *Cahiers Océanographiques* .20, (8) : 647-674.
- MONGUILAN L., 1976 . Recherches d'Archéologie aérienne en Provence occidentale. Méthodes et essais d'interprétation.*Thèse Univ. Aix-Marseille II*. Centre Univ. Marseille-Luminy : 164p.

- PATRITI G., 1976 . Structure et fonctionnement de la partie planctonique dans l'écosystème des zones fermées et semi-fermées des Ports de Marseille. (Dystrophie et Pollution). *Thèse*, Aix- Marseille II, Centre Univ . Marseille-Luminy.
- PERES J.M. et PICARD J., 1974 . Causes de la raréfaction et de la disparition des herbiers à *Posidonia oceanica* sur les côtes françaises de la Méditerranée . *Aquatic Botany*. 1 : 133-139.
- PICARD J. et BOURCIER M. , 1976 (1975) . Evolution sous influences humaines des peuplements benthiques des parages de La Ciotat entre 1954 et 1972. *Tethys* 7 (2-3) : 213-222 .
- PICARD J., 1976 . Accélération récente de l'extension, au niveau des fonds et du Benthos, de la zone d'épandage du collecteur de Marseille-Cortiou. *Comm. Intern. Explor. Scient. Méditerranée* . 25è Congr. Split: 1 p.
- REYS J.P. , 1976 . Les peuplements benthiques (Zoobenthos) de la région de Marseille (France). Aspects méthodologiques de la délimitation des peuplements par les méthodes mathématiques . *Marine Biology*. 36 : 123-134.
- TERMIER H. et TERMIER G., 1951 . Les herbiers marins et la signification des faunes pyriteuses . *Rev. Scient.* rose. 3309. Janv/Mars.
- TERMIER H. et TERMIER G. , 1952 . Histoire géologique de la Biosphère. *Masson*. Paris : 721p.
- VOS R.G. , 1976 . Observations on the formation and location of transient rip-currents . *Sedimentary geology* ; 16 : 15-19.
- WEYDERT P., 1976 . Manuel de Sédimentométrie et d'Arénologie. *Cours rcneo*. Marseille-Luminy . 61 p.

Centre d'Océanologie d'Endoume
Laboratoire de Géologie marine et de Sédimentologie appliquée
Marseille-Luminy. 13288 Marseille Cedex 2.

Droits réservés : Centre National pour l'Exploitation des Océans.
Blanc J. et Jeudy de Grissac A.