

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS

79/4134

FACTEURS DE LA SEDIMENTATION

MARINE ACTUELLE

APPLICATIONS A L'AMENAGEMENT DE LA

MARGE CONTINENTALE SUPERIEURE DE LA PROVENCE

BLANC Jean Joseph

CLAIREFOND Pierre

FROGET Catherine Hélène

JEUDY DE GRISSAC Alain

ONORATINI Gérard

ORSOLINI Patrick

## SOMMAIRE.

*L'établissement d'une terminologie des faciès de la plate forme continentale, en sa marge supérieure, est l'objet de difficultés liées à la complexité des peuplements benthiques et des sédiments eux-mêmes. Or, il importait de préciser les problèmes du fait de l'aménagement potentiel et de la protection du précontinent.*

*Il a été utilisé une méthodologie comportant le choix des variables et des secteurs d'échantillonnage, l'analyse de la variance, analyse factorielle des correspondances et analyse hiérarchique.*

*Les sites étudiés sont les suivants : Maguelonne, baies des Saintes Maries de la Mer et de Beauduc, rades de Giens et d'Hyères, presque île de Saint Tropez et golfe de Fréjus. On insistera sur l'influence des prismes littoraux et des activités humaines, les teneurs en sables et graviers, le calcul des potentialités d'envasement.*

*L'analyse des modèles naturels traite d'exemples tels que :*

- sédimentation terrigène dominante,*
- influence du delta du Rhône,*
- menaces sur les herbiers à Posidonies,*
- côte rocheuse métamorphique.*

*On aboutit à l'essai d'établissement d'un modèle plus général, en zone tempérée et marge stable : variables et groupements significatifs d'échantillons, explication des axes factoriels, classification des faciès sédimentaires et applications, hiérarchie des variables, classification automatique des échantillons.*

*Les modalités concernant les sources de sédiments ont été précisées ainsi que la fragilité du système actuel.*

## ENGLISH SUMMARY.

---

*Establishment of the facies terminology to the upper margin sediments. Main difficulties lies to the benthic communities assemblages and with the internal relations of sands and gravels deposits. These researches deals of the preservation and potentialities of shoreline and bottoms management.*

*We use here some quantitative methods of data treatment in relation to a variable choice and sectorial sampling areas, analysis of variance, factorial analysis (correspondances) and clustering.*

*The sampling areas are : Maguelonne, bays of Saintes Maries de la Mer and Beauduc, roadsteads of Giens and Hyères, Saint Tropez peninsula and golf of Frejus. We deal the influences of sedimentary prism, and the anthropic activities, gravels and sands contents, potential and quantitative mud gradients.*

*Natural models analysis shows some examples such as dominant terrigenous sedimentation, Rhône delta influences, potential and real threat upon the posidonian sea-grasses, metamorphic borderland.*

*An essay of global modelisation of whole data collection, in a temperate climate and stable margin, gives the selection of variables and discriminant samples associations, signification of main factorial axis, classification of sedimentary facies and their applications, automatic clustering of the bottom samples.*

*Specifications about the modalities of the sedimentary supply are considered in correlation to the weakness of actual system.*

## INTRODUCTION.

---

La zone supérieure du précontinent, au large de la Provence, correspond à un exemple de marge stable complexe en milieu tempéré. La diversité des faciès sédimentaires afférents était, à juste titre, confrontée avec une zonation biocoenotique devenue classique, d'utilisation générale, éprouvée par vingt cinq années d'observations et de relevés systématiques. Cependant, le développement des recherches de sédimentologie marine lié à l'activité des signataires et d'autres chercheurs, se heurtait, dès 1976, à des difficultés concernant la nomenclature, l'origine, la description et l'évolution des différents types de fonds meubles du point de vue de leur lithologie. Ainsi fut amorcé le point de départ du programme "SEDIMARGE", développé sur deux années mais correspondant, pour certains d'entre nous, à la continuation logique de travaux, ultérieurement à la soutenance de thèses ou d'opérations commanditées par le Centre National pour l'Exploitation des Océans.

De ce fait, un triage a été réalisé à partir d'un ensemble de sites et d'échantillons beaucoup plus large que le cadre ici retenu. Les recherches systématiques développées au Centre d'Océanologie d'Endoume et au Laboratoire de Géologie marine et Sédimentologie appliquée de Luminy (Marseille) ont fourni, depuis plus de vingt années, un matériel dont le dépouillement est loin d'être terminé. Cela explique les modalités d'une sélection limitée à des exemples concernant des milieux très individualisés, en déséquilibre permanent, du fait des phénomènes naturels et des activités humaines.

Depuis son début, le programme "SEDIMARGE" a bénéficié d'appuis sans lesquels ce travail n'aurait point été possible, qu'il s'agisse de nos prédécesseurs, commanditaires, collègues et amis, techniciens et collaborateurs. Plus particulièrement, nous remercions les personnes suivantes :

- Monsieur le Professeur J. M. Pérès, Membre de l'Institut et Directeur du Centre d'Océanologie d'Endoume (L. A. 41 du C. N. R. S.).
- MM. Chomel de Varagnes et Lardeau du C. N. E. X. O., (base Océanologique de Méditerranée).
- Mr. J. Picard, Directeur de recherches au C. N. R. S., auquel nous devons tant,
- à nos collaborateurs, collègues et chercheurs pour leur aide directe, conseils et discussions : Mr. Blanc F., Professeur au Laboratoire d'Ecologie numérique et Mme Blanc-Vernet, Maître de recherche au C. N. R. S., Mr. Mourre J., MMes Acquaviva et Martin, à tous les plongeurs et accompagnateurs bénévoles.

## OBJET DU TRAVAIL.

---

Ces recherches, développées sous la direction du C. N. E. X. O. et en accord avec nos programmes, ont été menées, en vue d'un triple but :

1°) Obtention d'une classification des faciès sédimentaires meubles correspondant à la marge continentale supérieure (de 0 à - 60 m) de la Provence. Cette nomenclature devait aboutir à la détermination des facteurs sédimentaires essentiels et à des groupements simples.

2°) Relations des ensembles lithologiques avec les problèmes, potentialités et risques d'aménagements de la marge continentale. Essai d'établissement d'un modèle général en liaison avec une protection accrue des milieux marins. D'où une évaluation des altérations d'origine naturelle ou humaine.

3°) Applications à la sécurité des littoraux et aux équivalences possibles vis à vis des faciès lithifiés correspondant aux séries anciennes. Aptitude du sédiment aux impacts mécaniques (naturels ou artificiels) et aux pollutions éventuelles.

## MOTS DESCRIPTEURS.

---

Sédiment marin, marge continentale stable,  
Prismes littoraux, sédimentation biogène,  
Aménagements et protection,  
Analyse factorielle,  
Précontinent, Provence, Méditerranée.

## CHAPITRE 1.

## DIFFICULTES DANS L'ETABLISSEMENT D'UNE

## TERMINOLOGIE DES FACIES DE LA

## PLATE-FORME CONTINENTALE

La définition rapide et complète des faciès sédimentaires de la plate forme continentale nécessite la prise en compte de quatre points de vues :

1) étagement bionomique, des zones superficielles (médio-littoral) aux plus profondes (bathyal), en conformité avec les critères publiés par Pérès et Picard (1958, 1974).

2) profondeur (et ses marges de variations),

3) biocoenoses liées aux peuplements benthiques,

4) faciès sédimentaires correspondants.

Le tableau suivant résume un essai de classification des faciès sédimentaires liés aux marges continentales stables (Blanc, 1974, 1975, 1977, 1979) : les codifications employées ont été mentionnées :

Etage	Prof.	Désignation biocoenotique	Désignation lithologique
Médio littoral (ML)	Zone inter tidale	. trottoir d'Algues	. biolithite à Lithothamniées
		. slikke à ...	. pélites et sables silteux médio-lit.
Infra littoral (IL)	0 à - 40 m		. galets, granules, graviers, . sables grossiers, moyens, fins, ... du prisme littoral (PL)

Etage	Prof.	Désignation biocoenotique	Désignation lithologique
Infra littoral ( IL )	0 à - 40 m		. blocs, galets, granules, . sables grossiers ... de l'éboulis littoral (EB)
	0 à - 12 m	. sables fins des hauts niveaux	. sables fins isométriques de l'IL supérieur
	0 à qq.m	. sables vaseux de mode calme	. s. fins, s. péliteux, pélites } - biogènes - terrigènes
	0 à - 40 m	. herbiers à Posidonies (ou ...) IL	. sables biogènes hétéromé- triques des herbiers à ... IL
Circa littoral (CL)	- 40 m à - 160 ou - 180 m	. Sables et graviers sous l'influence des courants de fond (SGCF)	. graviers, granules biogènes . s. grossiers, s. moyens) terrigenes ... lessivés (chenaux et lobes d'accrétion).
		. Coralligène s. l.	. Concrétionnements circaliti- loraux à Algues/Bryozoaires/ etc. . Biolithites, rudstones, graviers biogènes
		. Fonds à "pralines"	. Rhodolites à Mélobésiées
		. "Maërl"	. Gravelle à Lithothamniées
		. Détritique côtier (DC) - envasé } variantes - concrétionné }	. graviers } . sables } isométr. } biogènes . lutites } hétérométr. } terrigènes . pelites } mixtes

Etage	Prof.	Désignation biocoenotique	Désignation lithologique
circa littoral ( CL )	- 40 m à - 160 ou - 180 m	. Vases terrigènes côtières	. sables pélitiques . lutites . argilites
		. Sables détritiques du large (SDL)	. Sables et graviers "reliques" (à éléments bioclast. fossiles) oxydés, issus du CL ou de l'IL.
Bathyal  (B)	- 160 à - 180 m  à > 200 m	. Coraux profonds ahermatypiques	. Oncoïdes, biolithites épibathyales
		. Graviers du large	. Graviers bioclastiques "reliques"
		. Vases bathyales	. pélites, lutites pélagodétritiques

Cette classification comporte certaines difficultés pour le géologue consulté dans l'aménagement des plates formes et pour toute assimilation éventuelle à des faciès anciens.

Ces difficultés sont de deux ordres : sémantiques et pratiques.

## I) DIFFICULTÉS SÉMANTIQUES.

---

### 1°) Objets désignés.

---

La classification et zonation bionomique de Pérès et Picard est très largement employée. Elle est basée sur des ensembles de peuplements benthiques cohérents (Picard, 1965) groupés en étages à signification généralisable.

Or, ces peuplements montrent une relation variable avec la nature du sédiment :

- relation stricte : graviers à Lithothamniées ("maërl"),
- relation moyenne : sables biogènes des "mattes" de l'herbier à Posidonies,
- absence de relation : concrétionnements coralligènes circalittoraux ou épibathyaux, pélites du détritique côtier envasé, des vases terrigènes côtières ou des vases bathyales.

Il n'est point possible de considérer les types sédimentaires à partir d'une classification liée aux seuls peuplements. Ce problème a longtemps gêné les désignations employées par les membres de l'équipe et d'autres chercheurs.

### 2°) Influence de la profondeur.

---

Contrairement à une opinion parfois répandue chez les géologues, la classification bionomique de Pérès et Picard est liée aux associations benthiques et non à la profondeur proprement dite de ces peuplements.

On observe en effet de fortes anomalies se traduisant par une variabilité notable des marges bathymétriques :

- supérieures : infralittoral - médiolittoral - supralittoral en fonction de l'exposition et des modalités du déferlement,
- inférieures : infralittoral limité, en principe, à - 40 m, - limite d'extension des herbiers profonds (photosynthèse, zone euphotique). Mais d'importantes modifications sont liées :

\* à l'éclairement : infralittoral se poursuivant jusqu'à - 70 et - 80 m en Mer Egée,

\* à la turbidité des eaux : l'infralittoral est limité de - 25 m à - 18 m, et même quelques m. seulement, dans le golfe du Lion, Fos, Camargue, littoral du Congo, etc ...

\* à la physiographie : les limites du circalittoral inférieur sont assez variables et dépendent de la position de la break line amorçant le début du talus. On note l'influence des mouvements de sédiments, des failles et rejeux d'accidents, de - 160 à - 200 m.

\* aux dépôts antérieurs : par exemple :

- rôle des affleurements sous-marins : dalles quaternaires ou miocènes servant de support à des concrétionnements, (Froget, 1974).

- rôle des paléobiocoenoses würmiennes ( - 80 à - 110 m), liées à l'eustatisme, (Muschotti, 1973 ; Froget, 1974).

- sédiments reliques : SDL, graviers du large.

- mélanges polygéniques : SDL et détritique côtier (DC), liés à une paléozonation biocomique.

Cependant, la zonation bionomique s'avère liée à des données bathymétriques relativement définies :

Supratidal = Supralittoral

Intertidal = Médiolittoral

0 à - 40 m = Infralittoral (marge de +/- 20 m)

- 40 à - 180 m = Circalittoral (marge de +/- 30 m)

Mais il n'y a pas de corrélation nette entre les faciès sédimentaires et la profondeur absolue.

### 3°) Ambiguités terminologiques.

3.1. Le "Coralligène" : il correspond, en Méditerranée, à un faciès caverneux de biolithite carbonatée, ne comportant pas ou peu de Coraux, mais des Algues, Bryozoaires, Spongiaires, etc ...

3.2. Le "détritique côtier" (DC) représente un cas complexe. En effet :

- il peut se trouver relativement éloigné d'un littoral et sans relations nettes avec les prismes sédimentaires liés aux rivages.

- il peut aussi n'être pas "détritique", au sens où l'entendent les géologues (épandage ou progradation de débris terrigènes), mais présente souvent une origine mixte :

- . biogène : autochtone, allochtone, relique,
- . biogène et terrigène actuel ou sub-actuel,
- . biogène et terrigène actuel + terrigène relique.

- il peut être aussi "détritique" au sens géologique, côtier ou non.

- les "fonds à pralines" du "DC concrétionné", sont, pour le géologue, des étendues à rhodolites de Mélobésiées. Leur situation sur des bancs, au large, exclut le domaine côtier. Ceci, contrairement au "maërl" circalittoral supérieur, rattaché au DC.

3.3. Les "vases terrigènes côtières" (VTC) sont des pélites, voire des argilites présentant les caractères de marnes en formation. Leur origine apparaît exclusivement terrigène.

- ces pélites (par définition, d'origine terrigène), ne sont pas toujours côtières ; elles forment d'importantes vasières en haute mer, colmatant les marges continentales ou les grands golfes : Venise, Gênes, Lion, etc ...

- ces pélites ont une composition minéralogique définie (Chamley, 1970 - 1971), liée aux formations des bassins versants drainés. Au point de vue granulométrique, elles montrent des hétérogénéités et s'écartent parfois des "vases" elles-mêmes, considérées du seul point de vue rhéologique.

- ces pélites ne sont pas exclusivement localisées à l'étage circalittoral. Elles "remontent" à quelques mètres seulement de profondeur dans les zones à turbidité maximale : Grand Rhône, Grau du Roi, etc ... Mais, en profondeur, elles peuvent passer graduellement aux vases bathyales. Dans les deux cas précités, les analyses minéralogiques et granulométriques ne peuvent clairement les différencier. Seul l'examen de la microfaune (Blanc-Vernet, 1969) peut lever l'ambiguïté, en l'absence de peuplement benthique typique.

3.4. Les "sables détritiques du large" (SDL) :

- ils correspondent à des sables ou des graviers polygéniques :

. détritique grossier ou moyen d'origine terrigène (quartz) et issu de "dépôts reliques" : sédiments quaternaires régressif, oxydés ou présence d'une ceinture de "détritique côtier" fossile (sédiment "palimpseste"), traduisant l'ancienne zonation bionomique (Blanc-Vernet, 1969 ; Blanc, 1974, 1975).

. bioclastique (étymologiquement = (débris) biogènes brisés), avec mélange, ou non, de biocoenoses et paléobiocoenoses, autochtones ou allochtones.

- une partie des remarques formulées à propos du "détritique côtier" demeure ici valable, à l'exception de la désignation "du large", normalement adaptée.

3.5. Les "vases bathyales", formations silteuses, pélitiques, voire argilites hémi-pélagiques, souvent entrecoupées de turbidites sableuses (ou fines), ne paraissent point donner lieu à des ambiguïtés terminologiques. Il en sera de même pour les "massifs" de coraux profonds ahermatypiques.

## II) DIFFICULTES PRATIQUES.

---

Une classification sédimentologique des faciès de plates-formes méditerranéennes ne pourra s'appuyer formellement sur les seuls critères bionomiques et bathymétriques. De plus, la nomenclature utilisée devra s'exprimer en termes de faciès reconnus à la fois, dans la mesure du possible, pour les formations actuelles et leurs équivalences dans les séries géologiques. D'où le rôle essentiel des corps figurés détritiques et biogènes, des ciments matriciels, de la granulométrie (et porosité). On constate que l'appellation "sédiments néritiques" recouvre des ensembles complexes et très variés disposés en fonction de trois modalités:

1°) Mode régulier : les faciès forment des bandes parallèles au littoral. Cet état traduit généralement une certaine stabilité.

2°) Mode imbriqué : un début d'évolution assigne une extension non concordante vis à vis du rivage et des isobathes.

3°) Mode dispersé : en fin d'évolution, en cas d'altération grave des équilibres naturels, certains faciès arrivent à disparaître d'une manière parfois irréversible (Blanc et Jeudy de Grissac, 1978).

2.1. La recherche des équivalences par rapport aux milieux anciens : elles sont résumées par le tableau :

:	:	:
:	Faciès actuel	Faciès ancien après induration
:	-----	-----
:	:	:
:	. Concrétions alguaires à Mélobésiées, trottoirs d'Algues	. Biolithite à Lithothamniées
:	-----	-----
:	. Concrétionnements circalittoraux à Algues ... Bryozoaires	. Biolithites à Algues ... Bryozoaires (Crétacé sup., Danien, etc ...)
:	-----	-----
:	. Coraux profonds ahermatypiques	. Biolithites "coralligènes", oncoïdes,
:	-----	-----
:	. Galets	. Poudingue
:	. granules	. Micropoudingue
:	. sables grossiers, moyens, fins	. grès grossiers, moyens, fins
:	. Gravier biogéniques, maërl	. Brèches, microbrèches, rhodolites
:	-----	-----
:	. "pralines" à Mélobésiées	. Rudites, rhodolites
:	-----	-----
:	. sable des "mattes" de l'herbier à Posidonies	. Rudites et biocalcarénites hétérométriques:
:	-----	-----
:	. sables et graviers sous l'influence des courants de fond	. microbrèches, rudites et bio-calcarénites isométriques
:	-----	-----
:	. sables et graviers d'origine mixte, terrigène et biogène	. rudites et grès, calcarénites détritiques
:	-----	-----
:	. sable silteux, sable pélitique	. grès, silstone, sable marneux
:	-----	-----
:	. pélite, pélite sableuse	. marne, marne sableuse
:	-----	-----
:	. pélite très argileuse	. marne argileuse, argilite
:	-----	-----
:	. lutite carbonatée	. micrite
:	-----	-----
:	:	:

## 2.2. La recherche d'une texture-porosité.

Un colmatage vaseux ultérieur ou synchrone (lutite ou pélite) peut se traduire par une occlusion temporaire ou "définitive" de la porosité primaire. D'où l'importance attachée à la texture du faciès sédimentaire.

Degré d'envasement	Degré d'agitation	Faciès	Porosité Ire
très important	très faible à nul	Mudstone	très faible à nulle
important	faible	Wackestone	faible
faible	moyen, irrégulier	Packstone	moyenne
nul	fort	grainstone	forte

### III) CLASSIFICATION PROPOSEE.

Il sera nécessaire d'envisager un classement des faciès tenant compte du sédiment lui-même et des facteurs édaphiques.

Cinq points de vues seront pris en compte :

- 1) désignation du faciès,
- 2) origine et modes de dépôt,
- 3) correspondances (éventuelles) avec les peuplements benthiques,
- 4) étagement : du médiolittoral au bathyal,
- 5) marges bathymétriques.

Désignation du faciès	Origine	Mode de dépôt	Correspondance par- tielle avec peu- plements benthiques	Etagement	Bathymétrie (Marges)
Biolithite à Mélobé- siées	biogène	trottoir d'Algues		ML	

Désignation du faciès	Origine	Mode de dépôt	Correspondance partielle avec peuplements benthiques	Etagement	Bathymétrie (marges)
galets, sables s.l. et lutites intertidaux	terrigenè	marées		ML	
blocs et galets litoraux	détritique	éboulis		IL	0 à - 30 m
Blocs et parois concrétionnés	détritique terrigenè biogène	éboulis bioconcrétions, parois, grottes		IL à CL	0 à - 30 m
galets, sables s.l. du prisme littoral	terrigenè parfois mixte	Houles, vagues, trans-ferts, micro-deltas	en partie sables fins des hauts niveaux (SFHN)	IL	0 à - 10 m
graviers infralittoraux	mixte			IL	0 à 99 m
sables s.l. infralittoraux	terrigenè	mobiles	SFHN		0 à 10 m
S. grossiers	biogène	"piégés"	herbiers à posidonies		-1 à -40 m
S. moyens	mixte	calibrés	rides sous-marines chenaux	IL	-5 à -25 m
S. fins	pyroclastique	envasés	sables vaseux de calme (SVMC)		0 à 99 m

Désignation de faciès	Origine	Mode de dépôt	Correspondance particulière avec peuplements benthiques	Etagement	Bathymétrie (marges)
<b>sables s.l. infralittoraux</b>		concrétionnés	algues		0 à 99 m
Lutites infralittorales -...sableuses, silteuses -...à graviers biogéniques	terrigenes mixtes	décantation transferts +taphocoenoses +thanatocoenoses	SVMC	IL	- 1 à -25/-30 m
Biolithites circalittorales -pieds de falaises, blocs -plateaux sous-marins -rhodolites	biogène	concrétionnements organogènes	Coralligène ne Cor. Horiz. inf. roche littorale corall de plateau maërl, etc	CL	-35 m à -80 m
Sables et graviers circalittoraux -isométriques -hétérométriques	biogène terrigenes mixtes	mobile concrétionné	Sable et grav. courants de fond détritique côtier concrétionné	CL	-20 à -45 m -25 à -70 m
-hétérométriques	+thanatocoenoses	envasé	Détritique côtier envasé		-40 à -90 m
Lutites circalittorales	terrigenes	transferts fleuves	Vases terrigenes côtières	CL	-30 à -180 m

Désignation de faciès	Origine	Mode de dépôt	Correspondance par-tielle avec plements benthiques	Etagement	Bathymétrie (marges)
.. Sables et graviers reliques	.. biogène .. terrigène .. mixte + thanatoco-enoses	.. paléobioco-enoses .. eustatisme	.. Détritico-du large	CL	- 80 à - 160 m
.. Lutites épibathyales	.. terrigène .. hémipélagique	.. décantation .. transfert au large	.. Vases bathyales	EB	- 200 à - 600 m
.. Biolithites épibathyales	.. biogène	.. Coraux profonds matypiques	.. Coraux profonds	EB	- 200 à - 400 m
.. Turbidites :- blocs :- graviers :- sables s.l.(L+CL) :- silts	.. terrigène	.. courants de turbidité .. cisaillement de talus sous-marins	<del>.. Coraux profonds</del>	EB	- 200 à > 1 500 m

#### IV) CLASSIFICATION DES TYPES DE SEDIMENTS DE LA MARGE CONTINENTALE ET APPLICATIONS

##### PRATIQUES.

Il apparaît ainsi une quinzaine de catégories de faciès étagés de la zone médiolittorale à l'étage bathyal.

Or, d'autres critères, liés aux applications pratiques, doivent être pris en considération :

- milieu hydrodynamique, niveau d'agitation,

- mode de cimentation,
- teneur relative en carbonates,
- porosité,
- teneur mécanique.

D'où le tableau :

: Désignation : du faciès	: Niveau : d'agitation	: Hydrodynamique	: Ciment	: Teneur en : carbonates	: Porosité	: Tenue : mécanique
: Galets, sables : s.l. du pris- : me littoral	: très : agité	: Vagues : Déferlements : transferts	: vide : sable : silt	: variable : à : faible	: Elevée	: Tassements : importants : extraction : prohibée
: Sables et gra- : viers infra- : littoraux	: agité	: Vagues : courants de : décharge	: vide : sable : rarement : lutite	: élevée : à : variable	: élevée : à : moyenne	: bonne en : général : extraction : prohibée en : général
: Lutites infra- : littorales	: calme	: décantation : conditions : d'abri	: lutite : min. : argileux	: variable : à faible	: faible	: danger : tassements : et cisaille- : ments
: Biolithites : circalittora- : les	: agité	: courants de : décharge	: vide ou : carbonate	: très : élevée	: très : élevée	: bonne : extraction
: Sables et : graviers cir- : calittoraux	: moyenne- : ment : agité	: courant de : fond : ondes de : tempêtes	: vide : sablon : lutite	: variable : à : faible	: variable : à : faible	: moyenne : extraction : possibles
: Lutites cir- : calittorales	: calme	: décantation : fin de trans- : ferts	: lutites : argiles	: faible	: faible : à : nulle	: tassements : et : fluages





: Désignation	: Courants	: Faciès	: Classement	: Teneurs	: Aptitudes	: Destina-
: du faciès	: de fond	: granulomé-		: en fines	: à la pol-	: tion en-
:	:	: trique	:	: et min.	: lution	: visagée :
:	:	:	:	: argileux	:	:
-----						
: Sables et	:	:	:	:	:	: rejets :
: graviers re-	:	:	:	:	:	: non toxi-
: -liques (suite_):	:	:	:	:	:	: ques :
-----						
: Lutites épiba-	: Faibles à	: Décantation:	moyen	: très éle-	faible	: Câbles :
: thyaies	: très faibles	: colmatage :		: vée :		: et sea- :
:	:	:	:	:	:	: line, re-
:	:	:	:	:	:	: jets non-
:	:	:	:	:	:	: toxiques:
:	:	:	:	:	:	: :

### Conclusion.

Il apparaît que tout essai de classification des types de sédiments liés aux plates-formes continentales est confronté avec une multitude de facteurs agissant conjointement ou non et ce, à des niveaux différents hiérarchisés. Telle est la difficulté d'une taxonomie analogique des sédiments littoraux et "néritiques". Tout dépend, en fait, du point de vue (et des facteurs correspondants), auquel on se place.

Il en résulte la nécessité d'analyses multivariées, à diverses échelles et à plusieurs niveaux, afin d'exprimer quantitativement (et d'une manière automatique, plus rapide), les catégories et modalités prioritaires de la sédimentation.

## CHAPITRE 2.

---

### METHODES UTILISEES

#### I) COLLECTE DES ECHANTILLONS.

---

##### 1°) Conditions de prélèvements.

---

Prélèvements réalisés par dragages ou plongées . Ce dernier procédé a été toujours préféré lorsque cela était possible, à partir d'un "zodiac". D'autres prélèvements ont été exécutés à la benne par les chalutiers du Centre d'Océanologie d'Endoume ("Antedon" ou "Alciope").

Repérage à terre par des visées ou méthodes du Topofil avec le "zodiac".

La plupart des sites étudiés avaient été préalablement cartographiés (sauf Maguelonne). Les données locales des secteurs étudiés ont été analysées à la lumière de travaux antérieurs, certains ayant été entrepris depuis plus de vingt cinq années par l'un de nous.

##### 2°) Maillage des prélèvements.

---

Ces derniers peuvent être effectués d'une manière aléatoire, mais, pour la plupart des cas nous avons préféré le procédé de radiales orthogonales aux rivages. Le maillage a été arbitrairement réalisé en fonction soit de la profondeur, soit de la distance à la côte.

Seuls les sédiments de la marge continentale supérieure ont été considérés jusqu'à une profondeur maximale de 60 m.

#### II) CHOIX DES VARIABLES.

---

48 variables ont été retenues. Par la suite, du fait de la limitation de nos prélèvements à la zone supérieure du précontinent, ce nombre a été ramené à 46 pour un ensemble de 119 échantillons.

Nous indiquerons la variable choisie, sa codification en format A3, le cas où la variable est disjonctive (présence, absence : 0 ou 1), le "pas", de 0 à 9 (pour un format de 6 (A3, 46 I 1) ... ou autre, de façon à ce que les données d'une station de prélèvement puissent entrer, avec son indicatif A3, dans les 80 colonnes d'une carte perforée).

Liste des 46 variables retenues :

CODE	Désignation	Pas incrémentiel
IL	Infralittoral	0 - 1 : présence - absence
CLS	Circalittoral supérieur	0 - 1 : d°
Z	Profondeur	0 à 7 : 0: intertidal, 1 = 1 à 10 m, 2 = 11 à 25 m, 3 = 26 à 50 m, 4 = 51 à 100 m, 6 = 101 à 150 m, 7 = 201 à 300 m
D	Distance au rivage	0 à 6 : 1 = 0 à 10 m, 2 = 11 à 100 m, 3 = 101 à 1 000 m, 4 = 1001 à 2 000 m, 5 = 2 001 à 5 000 m, 6 => 5 000 m.
SFH	Sables fins des hauts niveaux	0 - 1 : présence - absence
SVC	Sables vaseux de mode calme	0 - 1 : d°
HP	Herbier à posidonies	d°
SGC	Sables et graviers sous l'influence des courants de fond	d°
DC	Détritique côtier	d°
DCE	Détritique côtier envasé	d°
VTC	Vases terrigènes côtières	d°

CODE	Désignation	Pas incrémentiel
ALG	Algues	0 à 9 : 1 = 0 à 10 %, 2 = 11 à 20 %, 3 = 21 à 30 %, ...
G	Gastéropodes	9 = 91 à 100 %
L	Lamellibranches	0 à 9 : d°
DB	Débris biogènes	0 à 9
FOR	Foraminifères	0 à 9
BRY	Bryozoaires	0 à 9
ECH	Echinodermes	0 à 9
REL	Sédiments reliques	0 à 1 : présence - absence
GRA	Graviers et granules	0 à 9
SG	Sable grossier	0 à 9
SM	Sable moyen	0 à 9
SF	Sable fin	0 à 9
SIL	Silt	0 à 9
PEL	Pélites	0 à 9
ISO	Isométrie du matériau	0 à 1 : Présence - absence
HET	Hétérométrie	-
GRN	Texture grainstone	-
PAC	Texture packstone	-
WAC	Texture wackestone	-

CODE	Désignation	Pas incrémentiel
MUD	Texture mudstone	-
RUD	Texture rudstone	-
FLO	Texture floatstone	-
FIN	Teneurs en "fines"	0 à 9
Q	Teneurs en quartz	0 à 9
M	Teneurs en micas	0 à 9
ARG	Teneurs en argile	0 à 9
ML	Minéraux lourds	1 = 1 à 3 %, 2 = 3 à 5 %, 3 = 5 à 7 %, 4 = 7 à 10 %, 5 = > 10 %
		0 à 5
CAL	Calcimétrie	0 à 9
E	Degré d'agitation	0 à 4 : 1 = calme, 2 = Peu agité : 3 = moyennement agité, 4 = agité : 5 = très agité
CD	Courants de dérive	0 à 4 : 0 = absence, 1 = faible, 2 = moyens, 3 = forts, 4 = très forts
CG	Courant général géostrophique	0 à 4 : d°
CF	Influence des courants de fond	0 à 4 : d°
TUR	Turbidité	0 à 4 : d°
POL	Pollution visible	0 à 4 : d°
LIT	Influence lithologique du littoral	0 à 9 : composants ("pas" de 0 à 9 : %) Calcaires, dolomie, molasse,

: CODE :	Désignation	:	Pas incrémentiel	:
:-----:	:-----:	:	:-----:	:
:	Influence lithologique	:	grès, marnes, alluvions, volcani-	:
: LIT :	du littoral	:	que, métamorphique, cristallin	:
:	:	:	:	:

Les indices de chaque variables sont portés en mode fixe (I1) pour une colonne de la carte perforée correspondant au sédiment. On peut pondérer, si nécessaire, certaines variables (courants, agitation, pollution, etc ...).

Les valeurs sont portées sur un bordereau. De l'ensemble des bordereaux on tire un tableau codifié et, ensuite on passe au fichier des données sur cartes perforées, bandes magnétiques ou disque. Il est parfois nécessaire, notamment pour l'analyse hiérarchique, de stocker temporairement les données sur un disque.

Le traitement ultérieur des données permettra de mieux grouper les échantillons (objets) et de choisir les variables les plus significatives : élimination ou groupement de facteurs redondants ou agissant à des niveaux d'ordres différents.

### III) ANALYSE DE LA VARIANCE.

#### 1°) Validité de l'échantillonnage ; utilité de la méthode ; rappel.

Les échantillons étudiés (sédiments) peuvent appartenir à un ensemble (a dans E par ex),  
 ... ou appartenir à un sous-ensemble (A par ex.),  
 ... ou être complémentaires de A : C (A) : le sous-ensemble contenant tous les éléments de E qui n'appartiennent pas à A (cf. schéma) ; de plus :  
 - des échantillons peuvent se trouver dans l'aire d'intersection de 2 sous-ensembles A et B. Leurs éléments communs sont A + B (ex. "détritique côtier" et vases circa-littorales ; prisme littoral et vases infra-littorales, etc ...).

Appartenance : a  $\in$  E

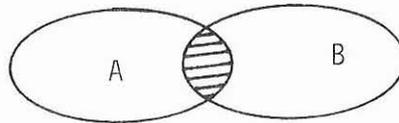


Sous-ensemble : A  $\subset$  E



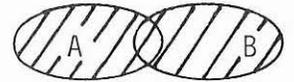
Complémentaire de A : C (A)

Intersection :  $A \cap B$



Réunion :  $A \cup B$

Eléments communs  $A + B$



Indépendance : 

$A \neq B$

La comparaison d'un certain nombre de variables, pour  $N$  échantillons est utilisée pour apprécier ces états classiques.

Soit  $\chi^2$  une variable aléatoire obtenue en totalisant les carrés de variables aléatoires indépendantes, obéissant toutes à une loi normale réduite où :

$$\chi^2 = \chi_1^2 + \chi_2^2 + \dots + \chi_v^2$$

La loi normale réduite correspond à 2 conditions :

- 1) la moyenne est nulle,
- 2) la variance est égale à l'unité.

On démontre que la variable  $\chi^2$  obéit à la Loi de Pearson qui présente les particularités suivantes :

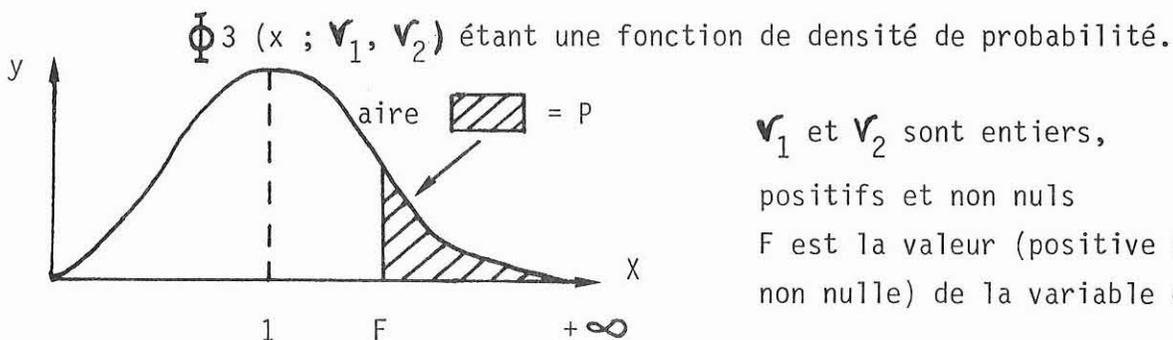
- elle est continue et s'applique à toute valeur de  $\chi^2$ , de 0 à  $+\infty$
- elle dépend de la valeur  $v$  (nombre de variables aléatoires), appelée "nombre de degrés de liberté" de la loi.

D'une manière générale, le nombre de degrés de liberté d'un ensemble de  $n$  éléments est égal au nombre de ces éléments diminué du nombre de relations indépendantes qui les lient. Pour la loi normale réduite (où  $v \geq 30$ ), on a :

$$v = n - 2.$$

Le test de Fisher - Snedecor (test F) est un test de signification faisant appel, pour le calcul de l'intervalle d'acceptation, à la loi de Fisher.

$$P = \text{prob} [X > F] = \int_F^{+\infty} \Phi_3(x; v_1, v_2) dx$$



$v_1$  et  $v_2$  sont entiers,  
positifs et non nuls  
 $F$  est la valeur (positive quelconque,  
non nulle) de la variable continue  $X$ .

On pourra tester, par ex., dans quelles mesures les variances de gravier peuvent être considérées comme identiques pour 2 populations analogues de sédiments. La loi de Fisher est une loi de probabilité d'une variable aléatoire continue (profondeur par ex.), pouvant passer de 0 à  $+\infty$  et dépendant de 2 paramètres entiers, positifs. Le seuil d'acceptation est fixé à  $P = 0,05$  ou  $P = 0,01$ . F est donné par la table.

On comparera des moyennes et des facteurs (profondeurs, peuplements, teneurs en carbonates) agissant simultanément sur une variable mesurée ; (sable fin, etc ...).

Ou, encore, l'influence de la profondeur ou d'un peuplement sur la répartition intrinsèque des différentes phases granulométriques.

. Exemples d'application sur modèles fixes :

- facteur 1 : augmentation de la profondeur,
- facteur 2 : granulométrie ou :
  - teneurs en pélites, (envasement),
  - teneurs en carbonates (peuplements),

. Autres exemples :

- facteur 1 : paramètres granulométriques, ou hydrodynamiques, avec 3 à 4 états (classes : graviers, pélites, sables moyens s. fins).
- facteur 2 : type de sédiment sur la marge continentale avec 3 à 4 états : par ex : prisme littoral, "mattes" de l'herbier, détritique côtier, ...

On calcule les moyennes marginales de chaque facteur et pour chaque état :

Le programme ANVAR (Iris C. I. I. 80) et les programmes Texas TI 59 : ST.15 (1 - WAY) et ST.16 (2 - WAY) traitent les calculs et impriment les résultats suivants :

- moyennes et variances des états sélectionnés,
- données des facteurs et états, avec pointage,
- erreur résiduelle,
- somme des carrés des écarts,
- somme des carrés des colonnes (facteur 1) } pour l'analyse
- somme des carrés des rangées (facteur 2) } à 2 voies.
- valeur de F (AOV : 1 W) ou des F de chaque facteur - hypothèse (AOV : 2 W) :  $F_C$  (effet colonnes) et  $F_R$  (effet rangées),
- $\nu_1$  = degré de liberté au numérateur, exprimant la plus grande variance,

$-v_2$  = degré de liberté au dénominateur, exprimant la plus petite variance.

Les valeurs de F contrôlent la validité des hypothèses choisies : on voit alors si une interaction supposée est significative, si l'échantillonnage est digne de confiance.

On pourra travailler sur des données qualitatives ou semi-quantitatives, à la suite d'un codage approprié. Il est également possible, d'utiliser des facteurs, variables aléatoires (choix au hasard, situations imaginées), en introduisant une probabilité (modélisation).

Mais il ne faudra jamais oublier que les tests (F ou  $\chi^2$ ) impliquent une présomption à probabilité déterminée et non un verdict absolu.

#### IV) ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES.

---

A partir des matrices "échantillons" (observations) et variables (recherche des facteurs agissants), l'analyse factorielle, des correspondances exprime par des graphes et des tableaux les distances (distance du "Khi - 2") et les coefficients des points du nuage ellipsoïdal défini par un système d'axes. Une analyse d'inertie va "sortir" des axes d'ordination exprimant l'information de départ.

On a une représentation simultanée sur le même graphe, des points-échantillons et des points - variables. Chaque axe est caractérisé par un pourcentage de variance exprimant la quantité d'information de départ. Le programme traite 7 axes et, on utilisera la combinaison définissant les plans factoriels : 1 - 2, 1 - 3, 2 - 3, 1 - 4, 1 - 5, ...

Les programmes utilisés : INERTIE, TABLET, ANFACTOR, sortent à l'imprimante :

- les graphes édités sur 1 ou 2 pages,
- les contributions relatives (CR) : cos au carré de l'angle formé par le vecteur des données (échantillon ou variable) avec l'axe considéré. Cette CR a la signification d'un coefficient de corrélation.
- les contributions absolues exprimant le pourcentage de la variabilité par rapport à un axe, donc l'explication par rapport à l'axe choisi.
- le tableau des valeurs propres. Si la CR est supérieure au 1/3 de la valeur propre, il faut enlever la variable qui "tire trop" et absorbe trop de variance. Ces variables éliminées, on fera un nouveau passage en machine après une modification

adéquate du format de lecture des variables.

Il est important de pouvoir entrer dans le programme des variables explicatives (ou "témoins") : on projètera des variables sélectionnées : granulométrie, pollution, degré d'agitation, etc ...

- le programme édite encore le tableau des coordonnées factorielles vis à vis des 7 axes retenus et l'histogramme des variances des axes factoriels. Cela permet de connaître la hiérarchie des informations données par les combinaisons des plans factoriels.

On utilise ici la métrique de la distance du "Khi - 2", donnée probabiliste s'adaptant bien aux données qualitatives disjonctives : 0 - 1 ou semi-quantitatives, ou quantitatives, après codification pour un pas incrémentiel déterminé.

Le résultat sera :

- 1) explication des axes factoriels (qui ne seront point nécessairement des facteurs),
- 2) détermination des variables fortes agissantes (et des variables redondantes à éliminer),
- 3) groupements (ou dispersion) des échantillons. Obtention de nuages éventuels,
- 4) relations variables - échantillons exprimées par leurs distances relatives. Relations des échantillons vis à vis des "pôles" choisis : teneurs en graviers, agitation, argiles ; détection des échantillons aberrants (ou mélangés ...).

Il en résulte un gain de temps considérable et des informations quantifiées vis à vis d'une analyse analogique classique qui nécessitera une grande expérience.

#### V) ANALYSE HIERARCHIQUE.

Au départ, on utilise la matrice des données convenablement codées. Très rapidement, le format de ces matrices donnera des tableaux énormes très difficilement interprétables. L'objet de l'analyse hiérarchique ("Cluster analysis") est de chercher des groupements significatifs concernant les variables et les échantillons. D'où une classification.

Il a été procédé, dans le programme HIERCH 1, à un groupement à partir des classes les plus affines allant, de proche en proche, vers des niveaux, définis

par des "noeuds", de classes de moins en moins compactes, à homogénéités décroissantes.

Le procédé d'agglomération des noeuds est effectué suivant la variance :

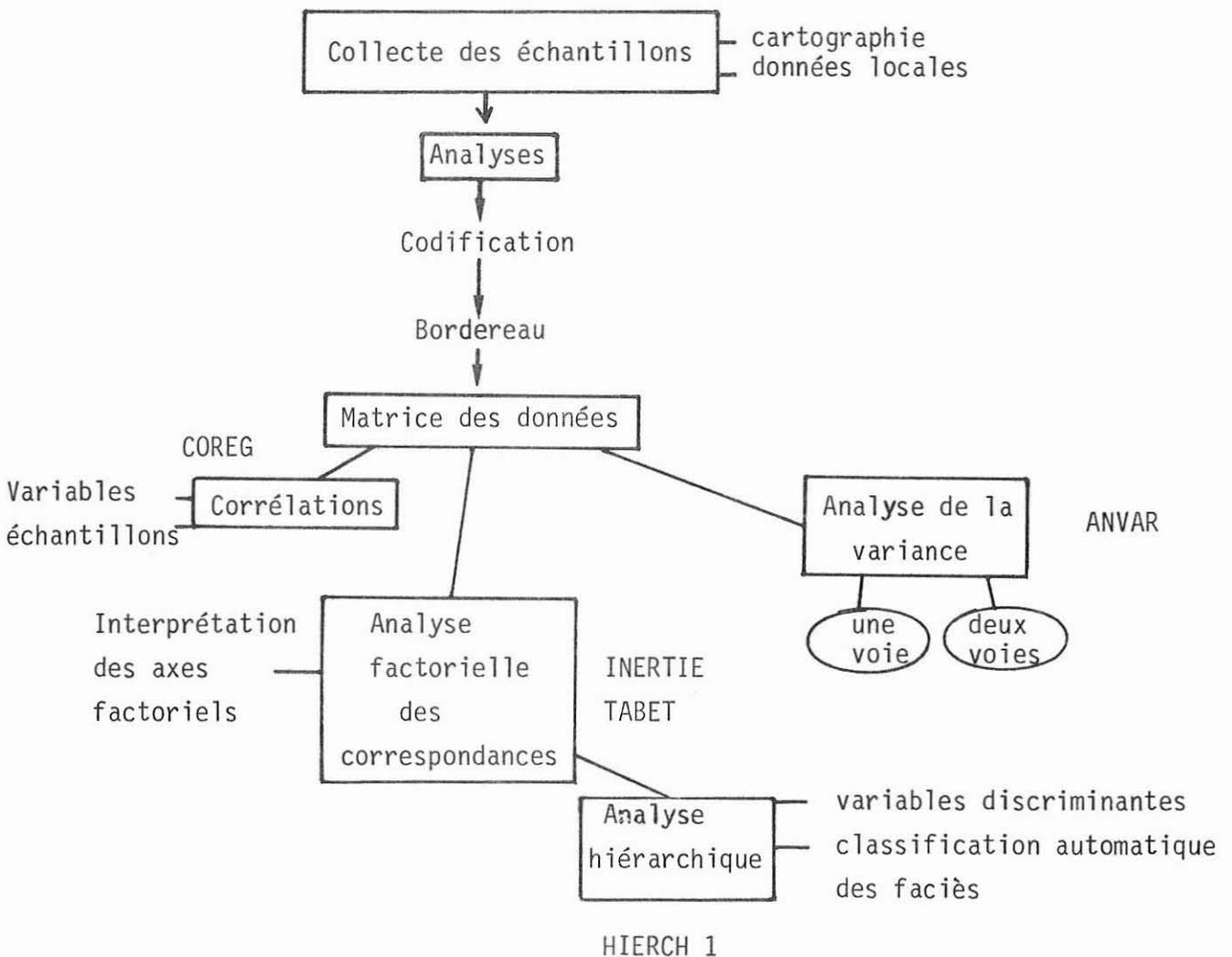
- on minimise la distance intraclasse,
- on maximise la distance interclasse.

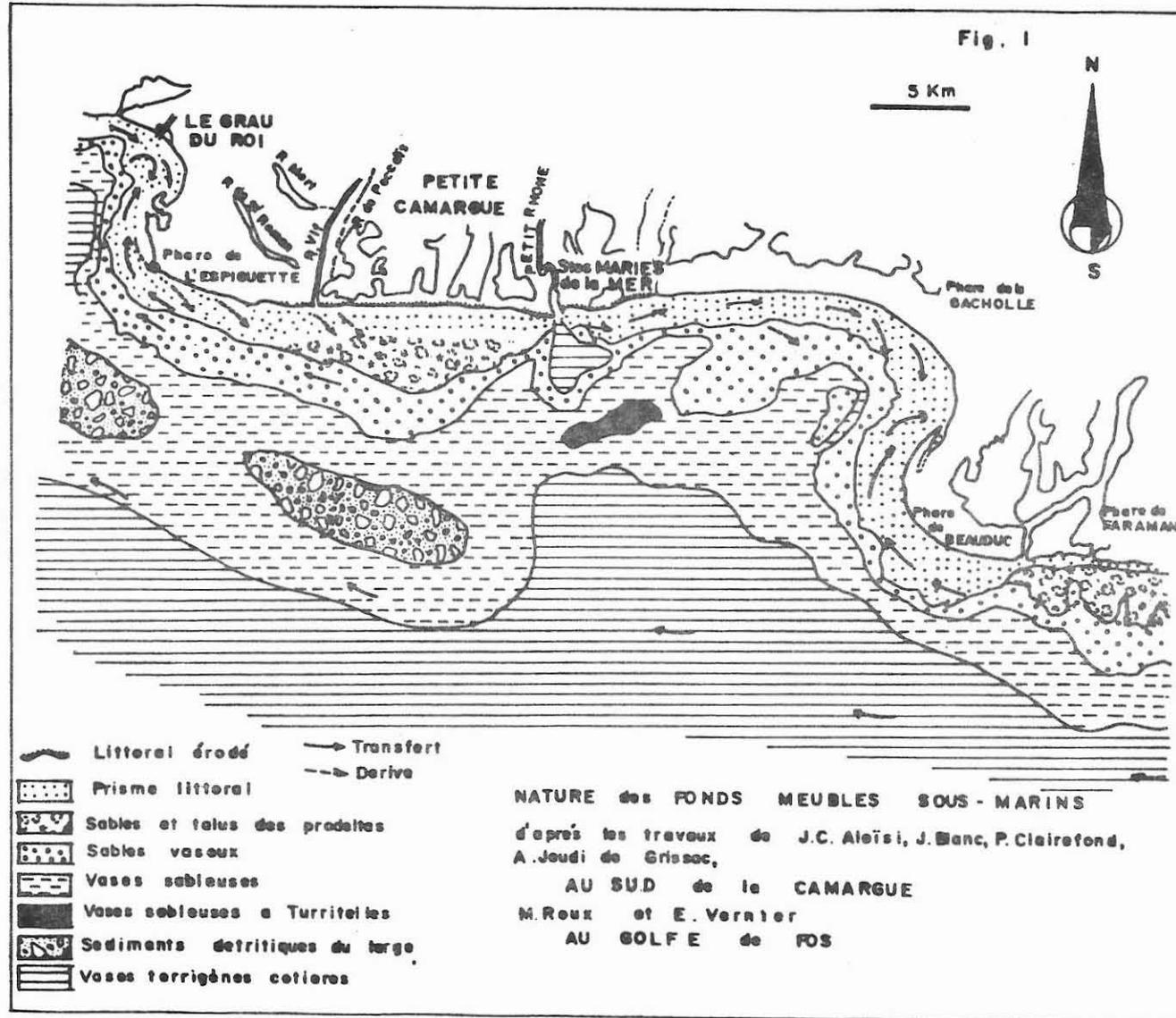
Il faut se fixer, à priori, un certain nombre de classes et ne pas trop les multiplier à cause du tracé de l'arbre ("dendrogramme") qui sort sur l'imprimante. Avec ce procédé, à chaque noeud, on aura un pourcentage croissant de la variance totale qui sera retenu.

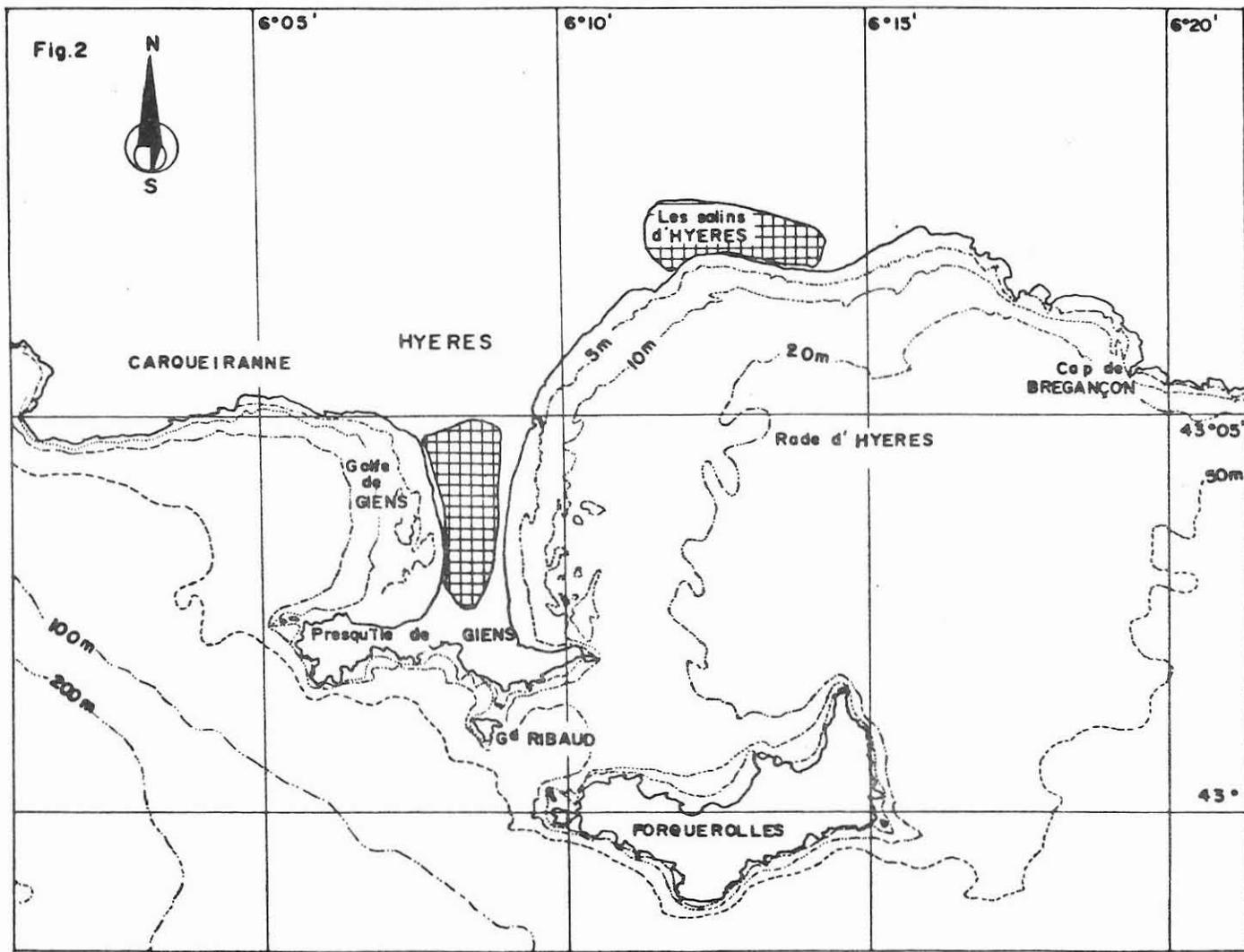
Le résultat sera :

- 1) classification et ordre des variables les plus discriminantes. On arrivera à isoler les variables, en nombre le plus limité possible (rapidité des analyses), donnant le maximum d'informations.
- 2) obtention d'une classification automatique rapide des faciès et des échantillons de sédiments.

En résumé, la procédure des opérations sera la suivante :







## CHAPITRE 3.

## CHOIX DES SITES ETUDIÉS

Les recherches ont porté sur cinq sites (fig. 1 et 2), de l'Ouest vers l'Est et concernant des types individualisés :

1) Maguelonne, à l'Ouest de Palavas, site concerné par des installations d'aquaculture et sous la menace potentielle du Lez et de ses effluents. Le site, à l'état sauvage, ne comporte aucun ouvrage mais demeure soumis à de fortes houles frontales déferlant, à une faible distance de la côte, sur des alignements de dalles de grès et silts quaternaires indurés (fig. 3).

2) Baie des Saintes Maries de la Mer et de Beauduc : (fig. 4).

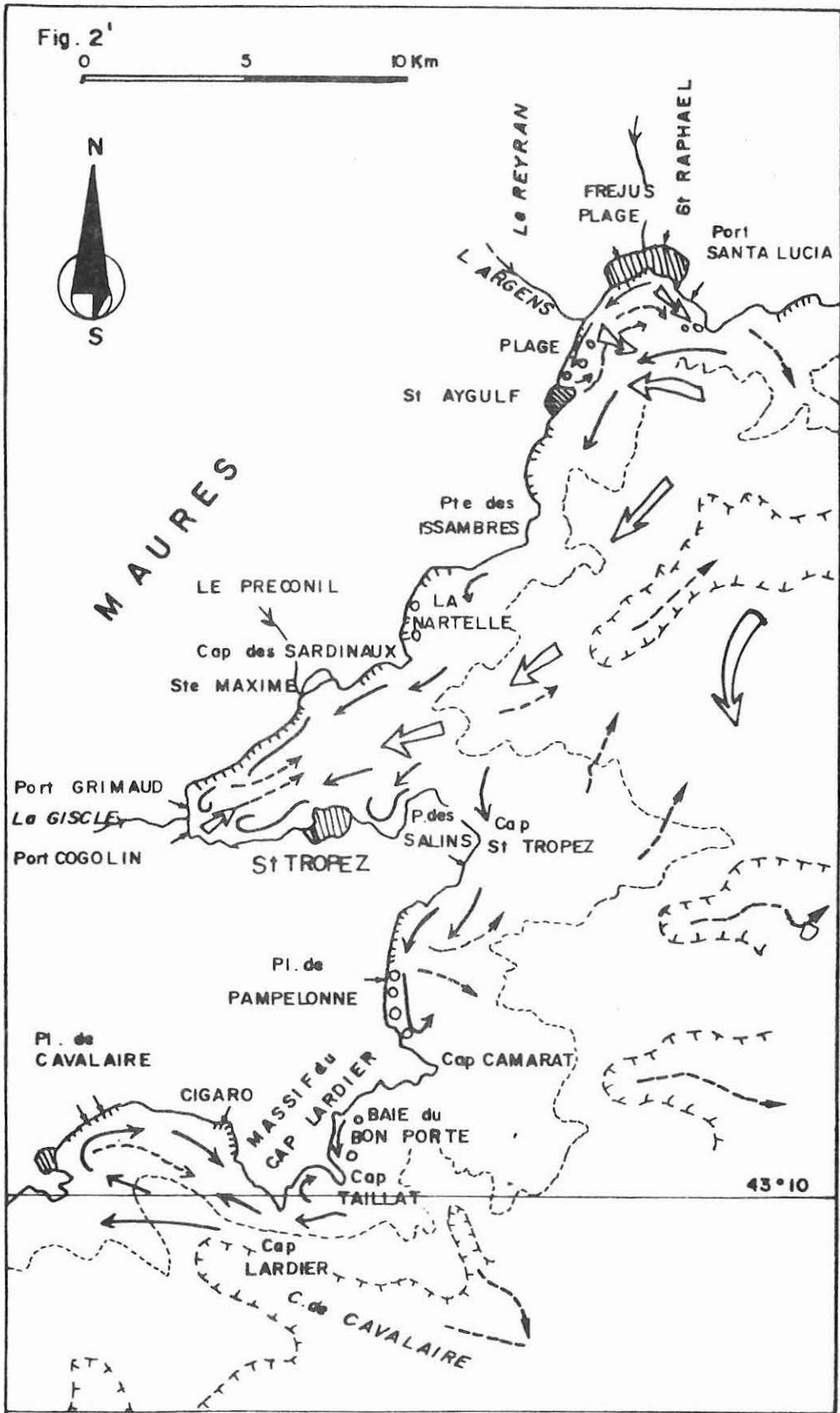
Il s'agit d'une zone d'alluvionnement intense et d'envasement en progression liés au transfert du Grand Rhône et à l'apport direct du Petit Rhône au Grau d'Orgon. Cet état n'empêche point de fortes érosions localisées aux Saintes-Maries de la Mer (Clairefond, 1977 ; Blanc, 1977), récemment étudiées. Le secteur de Beauduc est lié à un colmatage sableux et sablo-silteux avec progression d'un système de six à sept rides littorales et en déplacement latéral vers le golfe des Saintes-Maries.

Le secteur montre un déséquilibre accentué, de forts courants sagittaux, l'influence de crues rhôdaniennes et un envasement constant. Des ouvrages de défense, encore incomplets, ont été aménagés au littoral et, à la Pointe des Sablons, l'alluvionnement pose de sérieux problèmes à la prise d'eau de la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est. Des transferts alternants sont liés aux courants de dérive.

3) Rades d'Hyères et de Giens : (fig. 5 et 6).

Les deux baies, situées de part et d'autre du tombolo double de la presqu'île de Giens, sont l'objet d'une dynamique active où interviennent les phénomènes suivants :

3.1. : ondes incidentes obliques liées aux régimes météorologiques des golfes de Gênes et du Lion. La zone de Giens se trouvant à la limite de ces deux secteurs à régimes différents.



-  Zone de seiches et de colmatage
-  Zone littorale erodee
-  Sens de l'envasement et des Pollutions
-  Transfert et derive WNW et NNW
-  Courants et transferts E ESE SE

Fig.3 MAGUELONNE

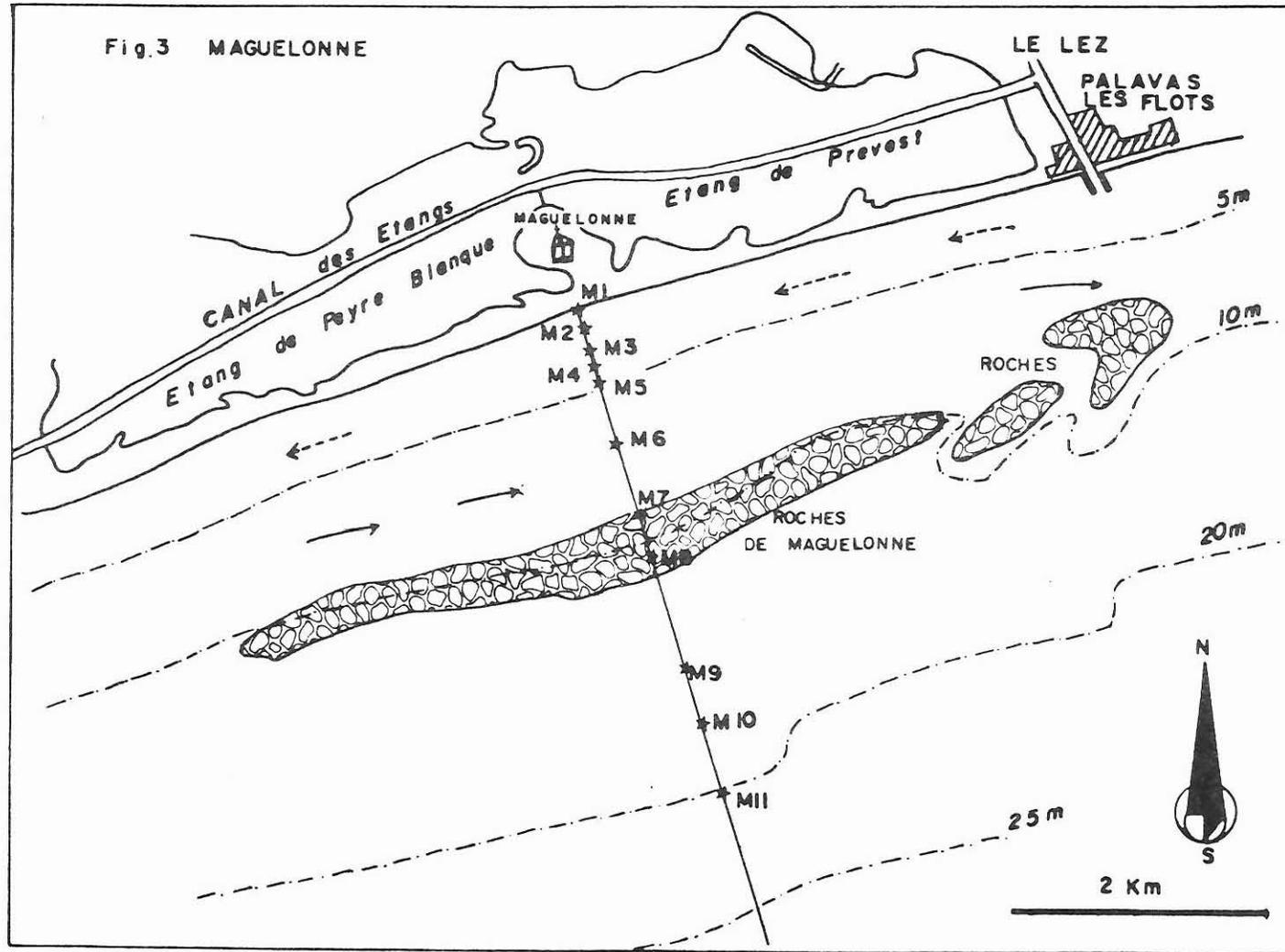
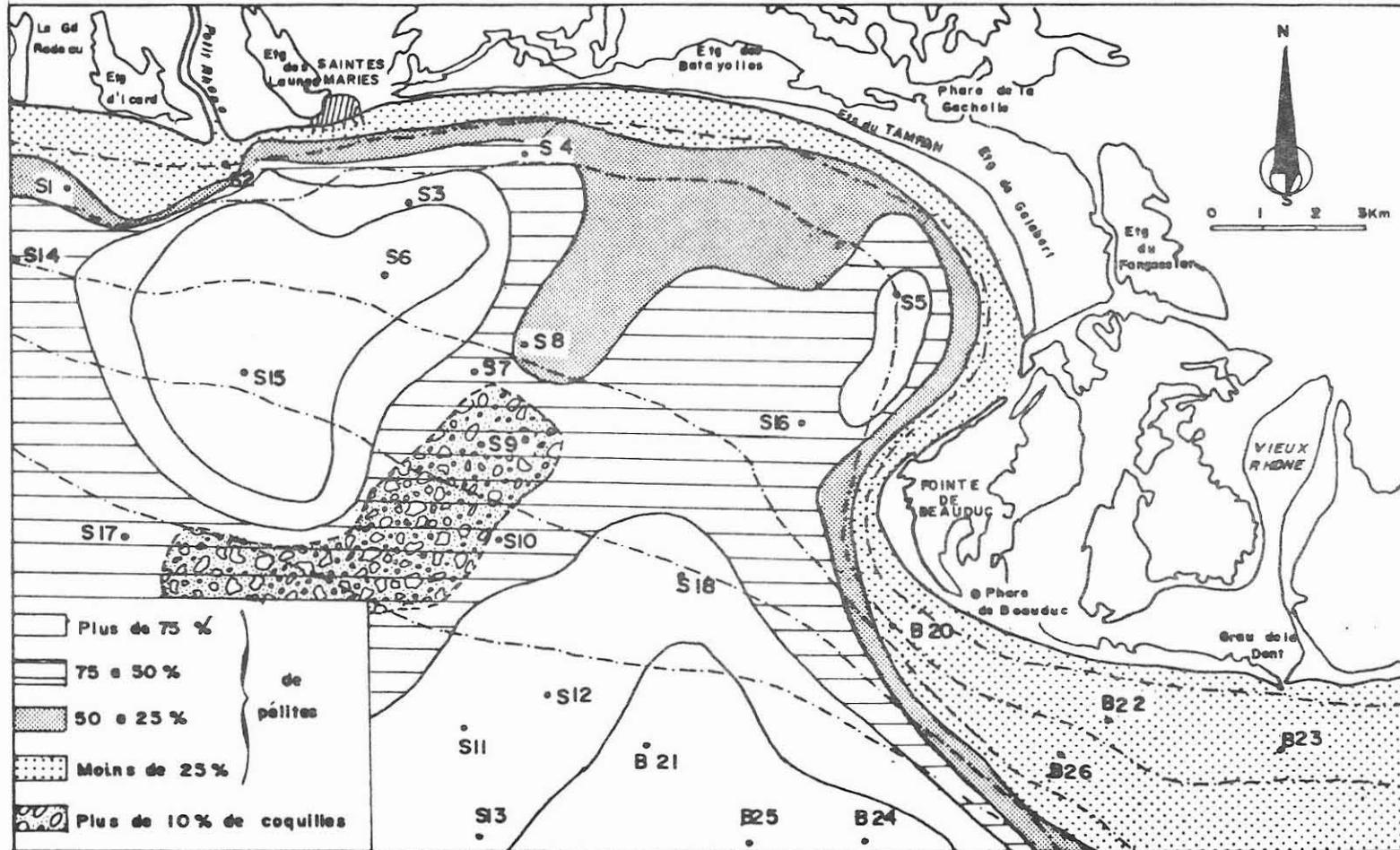
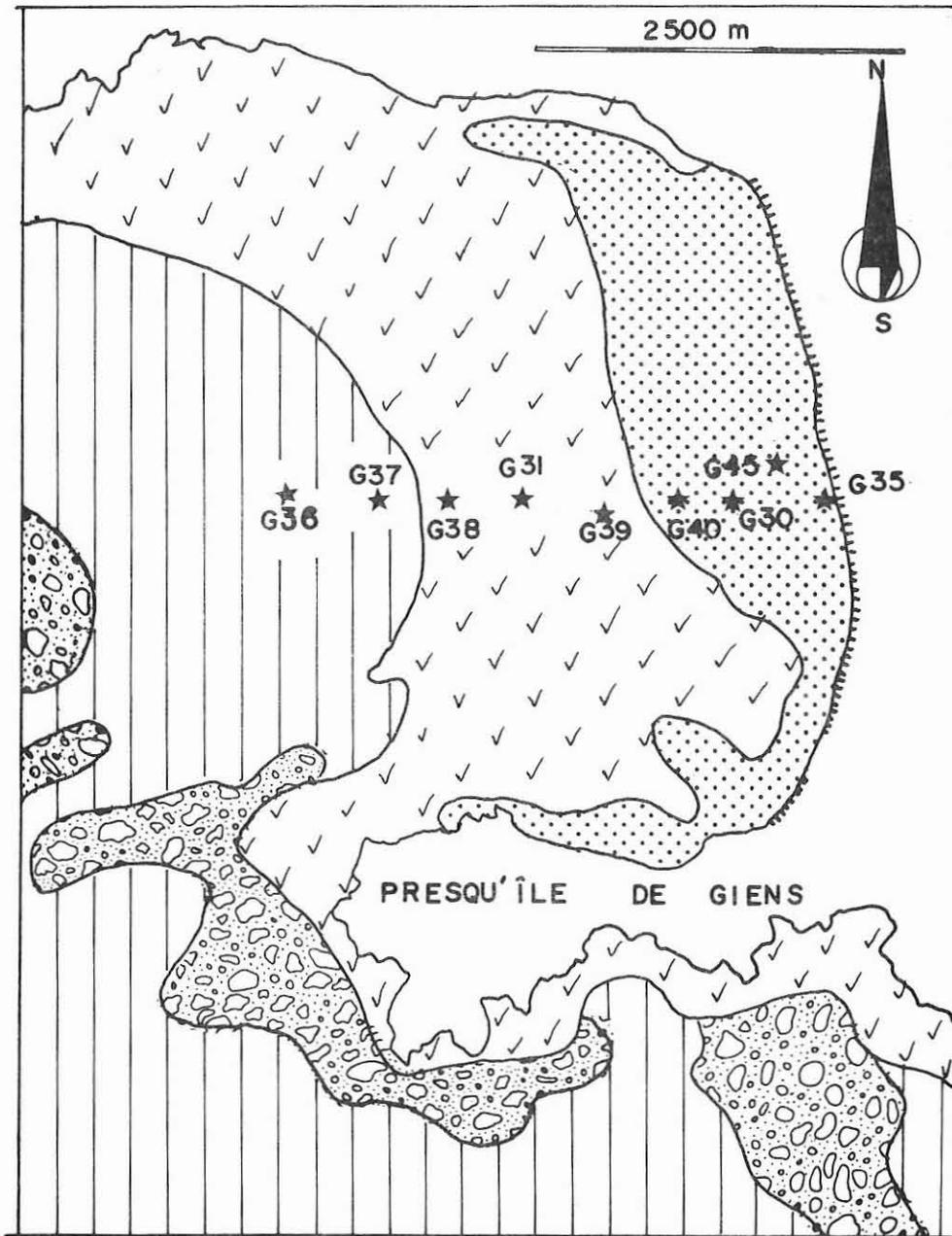


Fig. 4 BAIE DES SAINTES MARIES DE LA MER ET DE BEAUDUC





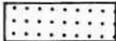
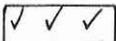
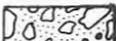
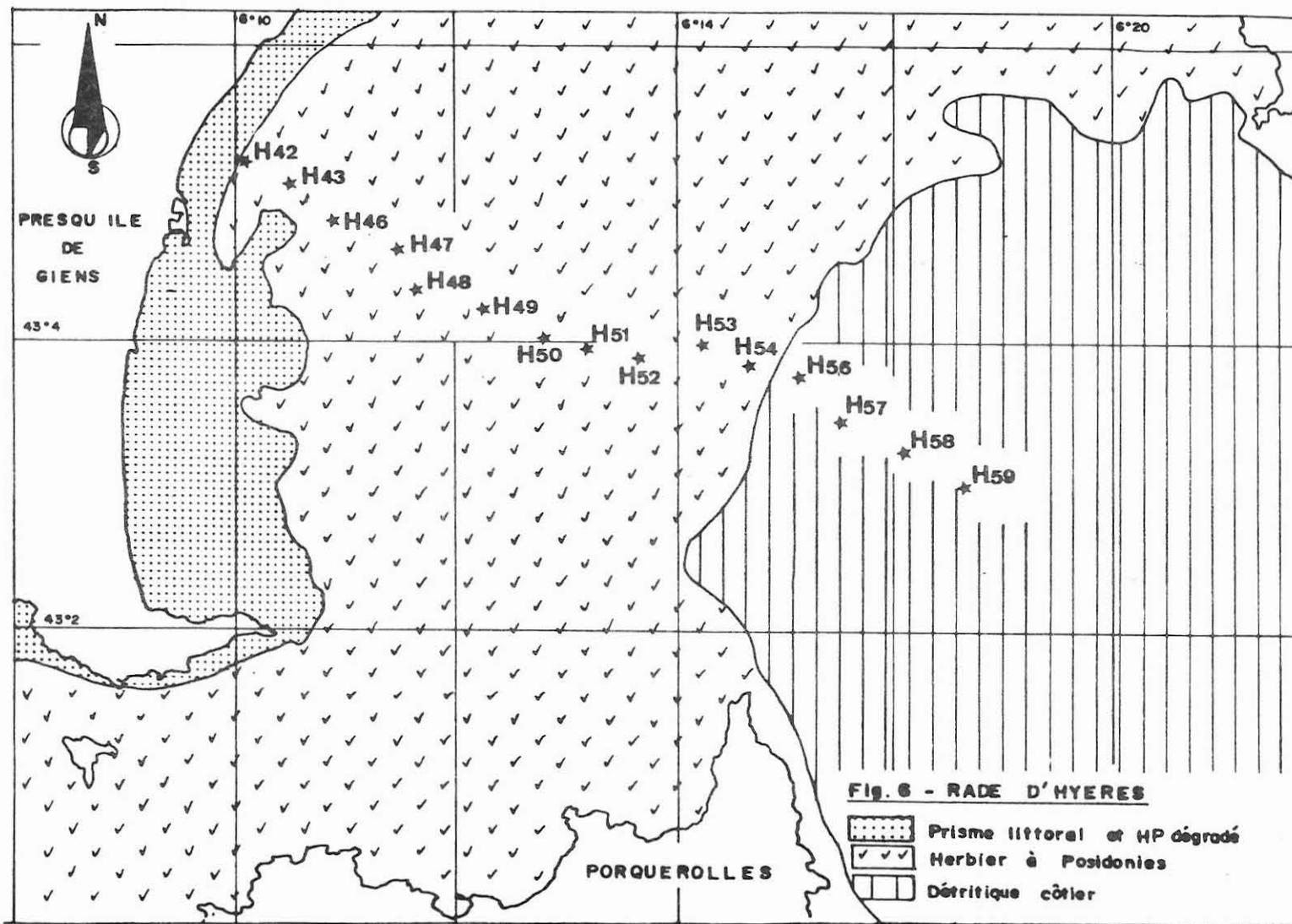
-  Prisme littoral
-  Herbier a Posidonies
-  Détritique côtier
-  Graviers

Fig. 5  
BAIE de GIENS



3.2. : ces ondes déterminent deux transferts (E. NE vers Sud et NNW vers S) responsables de la formation de deux tombolos d'importance inégale. La fragilité du tombolo occidental est liée à l'absence d'alluvionnement actuel et au remaniement de sables issus d'un débouché non fonctionnel correspondant à un ancien cours du Gapeau, au Quaternaire. Le tombolo oriental est alimenté par l'alluvionnement du Gapeau et du Pansard.

De ce fait, la zone méridionale des transferts est l'objet d'un colmatage actif, contre les affleurements rocheux de Giens. L'embase du tombolo oriental, orientée N - S, est le siège d'interférences liées aux ondes obliques et réfléchies du régime d'Est et à l'action de seiches. Il en résulte un système de cordons festonnés concernant des corps sableux infralittoraux, au niveau des nodales. Nous retrouvons le même phénomène aux plages de Pampelonne et de Saint Aygulf.

3.3. : l'herbier de Giens et d'Hyères est l'objet d'un déséquilibre actif et d'une régression préoccupante.

Cette dernière est liée à l'érosion mécanique de forts courants sagittaux (notamment en baie d'Hyères) et à la progression de pollutions (émissaires). L'érosion des "mattes" est très active, avec creusement de "tombants" et d'un système de chenaux complexes orienté parallèlement au rivage (action de "longshore currents") et perpendiculairement à celui-ci (courants sagittaux), (Blanc, 1974 ; Blanc, 1975 ; Jeudy de Grissac, 1975 ; Blanc et Jeudy de Grissac, 1978).

Vers le large, l'herbier à Posidonies montre une extension, moins troublée jusqu'à - 32 m, avec des zones en équilibre et des tendances locales à la régénération. Le passage aux formations du détritique côtier s'effectue avec des transitions. On note la présence de cellules d'envasement et de décantation (Gapeau, Brégançon) et l'influence de sables et granules du Quaternaire.

3.4. : Les aménagements apportés au secteur d'Hyères et de Giens ont accentué les déséquilibres naturels :

- pollution liée aux émissaires de Giens et d'Hyères,
- construction du port d'Hyères : les digues ont interrompu le transfert des sédiments transitant de l'Est vers le S E et le S. Les courants sagittaux de l'Hippodrome, La Capte, préexistants aux ouvrages, ont repris leur activité érosive malgré des défenses faibles et localisées.
- érosions des herbiers et souches de Posidonies arrachées du fait de la multiplication des mouillages liés à une activité touristique intense.

#### 4) Presqu'île de Saint Tropez : (fig. 7).

Le secteur étudié s'étend du Cap Lardier, Cap Taillat, au Cap Camarat et à la Pointe de Saint Tropez.

Il s'agit d'une zone naturelle peu polluée, non aménagée et fortement agitée :

- influence du courant général, assez proche des pointes,
- expositions aux houles d'Est, NE et E, S E,
- circuits courantologiques et forts courants de décharge,
- courants sagittaux, rides littorales et cordons festonnés à Pampelonne et Briandé.

Le rivage rocheux est abrupt, sauvage, constitué d'amphibolites, gneiss, granite d'anatexie, micaschistes. L'éboulis chute directement à la mer ; aucune rivière importante n'aboutit à l'exception de quelques torrents temporaires. On note l'influence particulière de la fracturation.

Les fonds sous-marins sont tourmentés, semés d'écueils granitiques ou gneissiques, filons doléritiques, etc ... entre lesquels s'accélèrent les courants de décharge. Sur les pentes plus externes, vestiges d'une topographie fossile dégagée des limons rubéfiés par la remontée récente du niveau de la mer, s'épandent des lobes d'accrétion et des graviers à Lithothamniées. L'héritage quaternaire, la topographie sous-marine complexe, l'hydrodynamisme fort (courants de fond jusqu'à - 50 m) confèrent des faciès hétérogènes, notamment pour l'ensemble du "détritique côtier" (Orsolini, 1978).

Plus au large, on aboutit aux pentes fortes amorçant le canyon de Cavalaire et ses diverticules. Les zones profondes n'ont point été abordées dans cette étude mais Chamley et Orsolini ont souligné l'importance d'un envasement lié au courant ligure et à l'érosion des éluvions rubéfiées du massif de Saint Tropez (étude des minéraux argileux des sédiments sous-marins et des limons quaternaires rubéfiés (Orsolini, 1978).

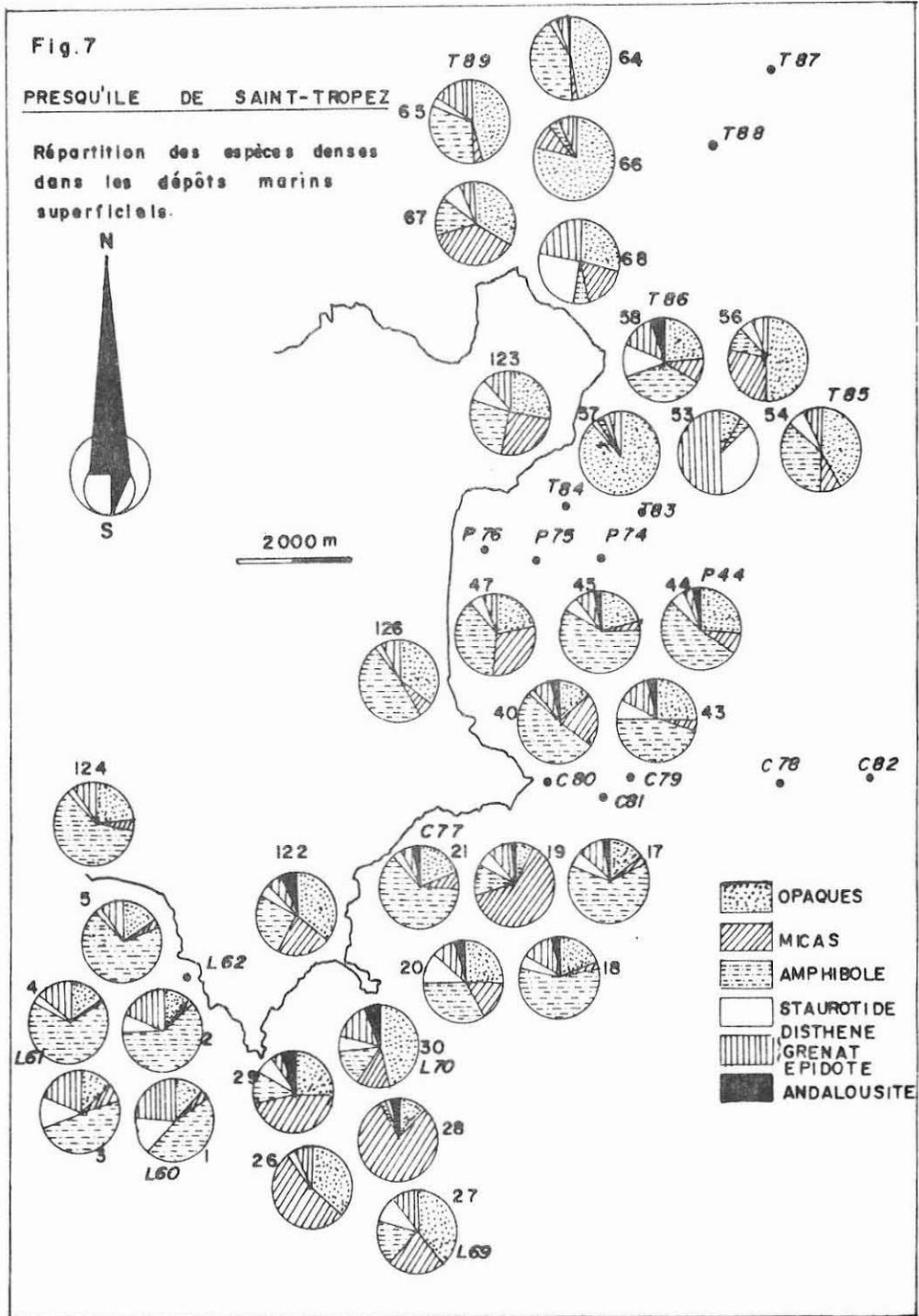
#### 5) Golfe de Fréjus : (fig. 8).

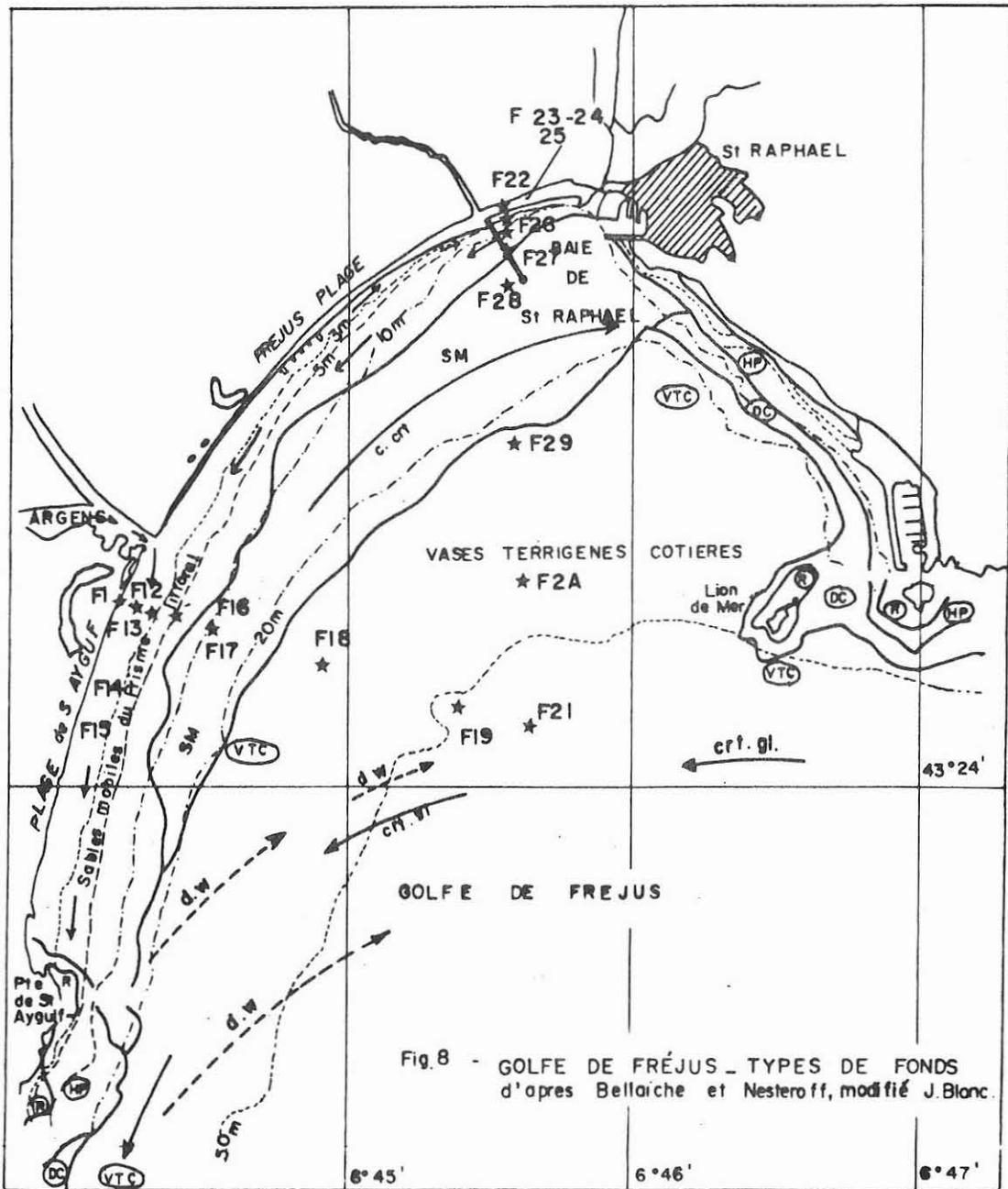
Le fond du golfe est occupé par une importante plaine alluviale liée aux apports de l'Argens, du Reyran, du ruisseau de Valescure, et du Fournel. Cette sédimentation en progression a colmaté le fond de la baie sur 4,5 km depuis l'époque romaine comme en témoignent les vestiges de l'ancien port de Fréjus. Le matériel terrigène, abondamment dispersé par petits fonds, est issu des reliefs métamorphiques des Maures (anatexites, gneiss) et des formations permienne détritiques (grès et pélites) ou volcaniques (rhyolites) de l'Esterel.

Fig.7

PRESQU'ILE DE SAINT-TROPEZ

Répartition des espèces denses dans les dépôts marins superficiels.





Cette sédimentation active est par la suite, influencée par l'exposition du littoral aux houles et vagues des régimes d'Est et SE, parfois à fetch élevé et à forte cambrure. Un transfert actif déporte les alluvions (sables grossiers, s. moyens) de l'Argens et du Reyran vers le S. SW et les plages de Saint Aygulf, avec une tendance au colmatage du débouché du Fournel aux étangs de Villepey.

La dynamique sédimentaire, liée à la sédimentation forte et au degré d'exposition se traduit ici par :

- 1) influence du courant général (c. ligure) à une proche distance du Lion de Mer et de la Pointe de Saint Aygulf, (fig. 8),
- 2) manifestation du contre-courant de la baie de Fréjus, orienté de Saint Aygulf vers Saint Raphaël, (1 noeud),
- 3) transfert précité, de l'Argens à Saint Aygulf et transfert en sens opposé, lié aux courants de dérive du secteur Ouest, de l'Argens, aux plages de Fréjus (Blanc, 1975),
- 4) système de forts courants sagittaux érodant le littoral et ravivant les pentes aux plages de Fréjus et, surtout aux plages Nord de Saint Aygulf. Des ouvrages de protection ont été entrepris mais le problème demeure préoccupant pour la sécurité des rivages, malgré la présence d'une double ride littorale de l'Argens à Villepey (Fournel).
- 5) l'érosion par les courants sagittaux est particulièrement compensée par un système de cordons festonnés sableux, imbriqués et parallèles au littoral jusqu'à - 2,5 m (Bellaïche, 1970). Ces cordons, comme à Hyères, Pampelonne, Briandé, Bougnon, La Martelle, sont liés à des nodales où s'accumulent les sédiments et les pollutions. Deux phénomènes paraissent intervenir :
  - présence d'une seiche au fond de la baie,
  - orientation du rivage N - S, largement exposée aux grandes houles du secteur Est du golfe de Gênes.

L'évolution et la cartographie des types de fonds ont été précisées par Bellaïche (1970, 1972), Nesteroff (1965), Blanc (1975) et Jeudy de Grissac (1975).

1) large extension du prisme littoral, bien alimenté par les rivières côtières drainant les secteurs gréseux ou métamorphiques. Il en résulte la disparition de l'herbier à Posidonies à la Pointe de Saint Aygulf et sa dégradation dès le Lion de Mer.

2) épandage de sable moyen, colmatant la baie de Fréjus, de - 10 m à - 25 m, en relation possible avec le contre courant de la baie et une nette diminution de la pente sous-marine, cette dernière s'avérant abrupte près des rivages (d'où l'énergie érosive des courants de décharge).

3) extension et développement des vases circalittorales ennoyant tous les fonds plus au large. Cet envasement progresse aux dépens des faciès littoraux sableux (Nesteroff, 1965 ; Blanc, 1975 ; Chamley et Picard, 1970).

Le golfe de Fréjus est aussi un exemple de zone en déséquilibre. Aux facteurs naturels précités s'ajoutent de rudes impacts :

1) catastrophe de Malpasset (rupture du barrage le 2 décembre 1959) : un épandage brutal correspond au déversement en mer d'un nuage trouble de 10 km de développement et à 4,5/5 000 m<sup>3</sup> de sédiments déposés dans le golfe de Fréjus (Bellaiche, 1965), avec un recul temporaire de la "mud line" vers le large. Les carottages effectués dans le golfe de Fréjus montrent qu'il s'agit d'un dépôt superficiel de 0,30 m d'épaisseur, recouvrant la VTC et remis en suspension lors des tempêtes. Ce dépôt a maintenant tendance à s'envaser à nouveau (d'après les explorations de 1979).

2) construction de la "marina" et du port de Saint Raphaël à Santa Lucia : aire de destruction de l'herbier, altération du détritique côtier (Jeudy de Grissac, 1975), extension des pollutions et des turbulences vers l'Ouest et le Lion de Mer, avec accentuation des flux de retour au large.

3) l'urbanisation en progression a entraîné la construction de deux émissaires se jetant à - 15 m et à - 25 m (au niveau des vases terrigènes circalittorales pour ce dernier). L'émissaire infralittoral pollue les plages de Fréjus. Pour l'émissaire circalittoral, mieux étudié, les risques de retour à la côte sont moindres étant données les modalités hydrodynamiques, mais, de ce fait, la baie a été l'objet, en périodes caniculaires, de phénomènes d'eutrophisation désagréables et à surveiller attentivement.

#### INFLUENCE DES PRISMES LITTORAUX.

---

. FREJUS.

---

Les minéraux lourds ( $d \geq 2,99$ ) montrent, dans les prismes littoraux,

des teneurs relativement élevées, jusqu'à - 10 m, liées à la zone hydrodynamique H1 (déferlements, transferts et zone d'action maximale des vagues ; lessivages à la zone du swash et par les courants orbitaires, courants de décharge, etc ...).

Leur fréquence, liée aux épandages détritiques, suit celle du quartz (opaques, apatite, hornblende, zircons, staurotide, disthène).

Il en est autrement pour les micas transportés essentiellement par flottation. Ces derniers ont une fréquence variable en fonction :

- de la diminution du degré d'agitation,
- de la distance à la côte,
- du degré d'envasement (silts et pélites) : décantations et pertes de charge.

Latéralement, on peut aussi noter un gradient pour la radioactivité naturelle des prismes littoraux (rad. gamma). Par ex., l'observation de Rivière (1955), en fonction de la distance des affleurements d'embranchites (zircons et monazites dans les gneiss embréchitiques et le Permien). On observe aussi des perturbations expliquées par les blocs d'esterellite et d'amphibolite amenés pour l'édification des épis.

- . Saint Aygulf : 30 c. p. m (impulsions par minute),
- . à 200 m au NNE : 25 c. p. m,
- . embouchure de l'Argens : 18 c. p. m,
- . Fréjus - plage : 16 c. p. m,
- . sable près de l'épi de Saint Raphaël : remontée à 17,2 et 19,2 c. p. m.,

. MAGUELONNE.

---

On observe des analogies et des différences dans le comportement du prisme littoral :

- extension du sable jusqu'à - 15 m, dans tout l'infralittoral,
- extension latérale de 21 km de cordon sableux continu entre Palavas et Sète,
- mais complications au contact des "roches de Maguelonne", grès indurés sous-marins d'âge quaternaire récent, avec individualisation de chenaux et de lobes d'accrétion,
- composition mixte du sable :
  - . éléments siliceux (métamorphiques et volcaniques) et calcaires,
  - . minéraux du basalte : volcans d'Agde et de Maguelonne,
  - . minéraux issus du Rhône, Vistre, Vidourle et Lez.
- gros déferlements au rivage malgré l'obstacle des grés immergés, transferts liés

à de grosses vagues obliques déferlantes (régimes d'Ouest, Labech, Largade).  
- transferts à étudier, mais, par régime d'Est, on note un déplacement latéral des masses d'eaux et du sédiment de Palavas vers Frontignan. Il existe encore un déplacement, lié à des dérives, de sens opposé.

Plus au large, on note l'influence du contre-courant languedocien, portant de l'Ouest vers l'Est (ici du SW vers le NE), pour la zone littorale, jusqu'à - 15 m et à 2 ou 3 km du rivage.

Les grès quaternaires, immergés de - 8 à - 13 m, forment une barrière sous-marine protégeant efficacement un rivage sableux fragile et exposé. Le démantèlement des "roches de Maguelonne" enrichit le sédiment en quartz, minéraux denses et débris biogènes actuels et fossiles.

Vers - 20 m, le sable du prisme passe à un sable fin, puis un sablon devenant légèrement vaseux.

A partir de - 20 m, on détecte l'influence d'une paléobiocoenose würmienne et holocène : gastéropodes et Lamellibranches.

A - 35 m, on note la présence des vases circalittorales, à 9 km du rivage. Ces dernières, comportant parfois 25 % de pélites, peuvent se rapprocher jusqu'à 5 km du littoral (Alloisi, travaux en cours).

Le site de Maguelonne et les sables du prisme détritique afférant, tout comme les sables de Fréjus, montrent des causes de déséquilibre :

1) pollution liée aux épandages du Lez et de Palavas. Les effluents sont essentiellement dirigés vers l'Est (Carnon), en fonction du contre-courant languedocien. Mais, par régime d'Est (vent "grec"), ils sont dirigés vers le site de Maguelonne, entravant le développement des expériences d'aquaculture.

2) exurgences d'eaux douces sous-marines, mises en évidence par thermographie infrarouge. Elles sourdent à la base de la dalle de grès sous-marine, à la zone frontale du Sud, face au large (- 11 m) et s'étalent jusqu'à - 23 m en se trouvant déviées vers l'Est par le contre-courant languedocien.

Les minéraux denses ont été étudiés par F. Picard : augite (A), olivine (A), min. opaques (A), hornblende (PA), grenat (PA), épidote (PA), tourmaline (R), glaucophane (R), biotite (R), Radioactivité gamma: 15 à 17 c. p. m.

. SAINTES MARIES DE LA MER.

---

Les prismes littoraux des Saintes Maries de la Mer montrent des placers de lessivage à partir d'un matériel sableux isométrique issu des prodeltas holocènes.

Il s'agit de placers noirs à l'embouchure du Petit Rhône (rad. gamma : 24 à 30 c. m. m) et à l'Est des Saintes Maries de la Mer (rad. gamma : 80 à 100 c. p. m) : sable "piégé" entre les épis, vers l'Est de la corniche littorale. Plus à l'Est, la radioactivité naturelle retombe à 25 - 30 c. p. m.

A Beauduc, 8 km à l'Est, les prismes littoraux montrent des placers à grenats et à pyroxènes (40 à 50 c. p. m.). La r. a. est plus élevée sur les placers à grenats.

Enfin, à l'Est de Beauduc, le sable ne comporte plus de placers littoraux appréciables malgré un bruit de fond assez élevé : 18 à 23 c. p. m.

Des recherches sont en cours sur les modalités minéralogiques et granulométriques liées à cette radioactivité imputée à l'uranium et au thorium (Rivière, 1955).

Le stock dense comporte de 4,9 à 20,4 % du poids total (Clairefond, 1977), ce qui correspond à une réserve appréciable pour ces prismes littoraux. On relève essentiellement 3 stocks assez complexes dans le détail :

- 1) hornblende verte, glaucophane, chloritoïde : stock alpin,
- 2) augite brune, olivine, andalousite, tourmaline, staurotide : stock du massif Central,
- 3) pyroxène (spessartine), monazite, zircon, rutile, biotite, chlorite, magnétite, grenats, hornblende brune : stock dit "ubiquiste", en réalité, il s'agit d'un ensemble composite, lié partiellement à des granites, radioactif et incomplètement étudié.

## ANALYSE DE LA VARIANCE.

. MAGUELONNE.A) Analyse de la variance à une voie (AOV - 1 WAY).

Nous analysons 4 hypothèses pour 3 distributions :

- 1) profondeur, CO<sub>3</sub>Ca, lutites
- 2) - , quartz, minéraux lourds
- 3) - , distance à la côte, débris biogènes
- 4) - , - , sable fin.

1er hypothèse : radiale de 11 échantillons,

$$V1 = 2 \quad V2 = 30 \quad F = 66,56$$

$$\text{à } P = 0,05 \quad F_t = 3,32$$

La teneur en carbonates peut être liée à l'augmentation de la profondeur ainsi qu'à l'envasement. Il a été en effet établi que la lutite comporte de 50 à 70 % de carbonates.

2ème hypothèse :

$$F = 44,15 \quad F_t = 3,32 \quad \text{à } P = 0,05$$

Teneurs en quartz détritiques et minéraux lourds inversement proportionnelles à l'augmentation de la profondeur.

3ème hypothèse :

$$F = 5,86 \quad F_t = 3,32$$

Distribution très irrégulière des débris biogènes par rapport au binôme profondeur - éloignement du rivage. Là, les perturbations sont dues à la dalle quaternaire des "roches de Maguelonne".

4ème hypothèse :

$$F = 5,43 \quad F_t = 3,32$$

L'hypothèse <sup>est</sup> compatible avec une distribution très irrégulière du sable fin d'origine mixte :

- . terrigène, issu du prisme littoral et du transfert,
- . biogène : peuplements des SFHN et, surtout, perturbations liées à la dalle quaternaire.

:	profondeur:	dist.côte:	% carbon:	% lutites:	% Qtz :	% ML :	% débris <sup>biog.</sup> :	% sable fin:
:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:
:moyenne:	7,81	:1 014,54 :	32,18 :	3,33	: 54,45:	7,25 :	4,89	: 84,92 :
:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:	:-----:
:variance	40,87	:1 733,10 <sup>3</sup> :	20,14 :	47,57	:450,19:	7,51 :	3,06	: 267,0 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:

B) Analyse de la variance à 2 voies (AOV - 2 WAY).

Effet rangées - colonnes

11 rangées (échantillons), 4 colonnes (variables)

Emettons 2 hypothèses pour 4 types de distributions.

1ère hypothèse : profondeur (Z), % quartz (Q), % minéraux lourds (ML), et % sables fins (SF) :

SS = somme totale des carrés = 56.027,08

CSS = somme des carrés des colonnes = 47.600,87

RSS = somme des carrés des rangées = 2.397,52

. test colonnes (var.) :

$F_c = 78,97$  pour  $V_{1c} = 3$  et  $V_{2c} = 30$   $P = 0,05$

$F_t = 2,92$  Hypothèse admissible

. test rangées (échant.) :

$F_R = 1,19$  pour  $V_{1R} = 10$  et  $V_{2R} = 30$

$F_t = 2,60$  Hypothèse rejetée. Echantillonnage non conforme vis à vis des descripteurs choisis.

2ème hypothèse : Z, d, % lutites (LUT), % débris biogènes (DB) :

$$SS = 27.473.10^3$$

$$CSS = 8.402,56.10^3$$

$$RSS = 4.827,79.10^3$$

Résidu =  $SS - CSS - RSS = 14.244$ . Trop élevé et trop de facteurs aléatoires non contrôlables.

. test colonnes :

$$F_c = 5,89 \quad F_t = 2,92 \quad \text{Hypothèse possible}$$

. test rangées :

$$F_R = 1,01 \quad F_t = 2,60 \quad \text{Hypothèse rejetée au niveau des échantillons.}$$

Malgré l'insuffisance de l'échantillonnage, on peut admettre :

- présence d'un fort envasement partiellement carbonaté,
- les minéraux denses évoluent avec le stock quartzeux du prisme littoral et des sables fins bien calibrés,
- le sable fin et les débris biogènes se trouvent à toutes les profondeurs et à différentes distances du rivage. Ils suivent probablement des évolutions séparées.

. SAINTE MARIES DE LA MER.

A) AOV - 1 W :

. Z, sable grossier (SG), pélites (PEL) :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 50 \quad F = 54,18$$

$$F_t = 3,19 \quad \text{Hypothèse non rejetée}$$

Les variances sont très élevées. Peut être y-a-t-il des facteurs hydrodynamiques sous-jacents et influence des peuplements à Turritelles ?

. SG, PEL, % carbonates (CAR) :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 50 \quad F = 59,69 \quad F_t = 3,19$$

Hypothèse non rejetée, mais variance trop élevée.

B) AOV - 2 W :

$$SS = 31.821,61$$

$$CSS = 4.449,68$$

$$RSS = 4.754,44$$

Résidu =  $SS - RSS - CSS = 22.617,49$ . Résidu trop élevé et trop de facteurs aléatoires non contrôlables.

. test colonnes :

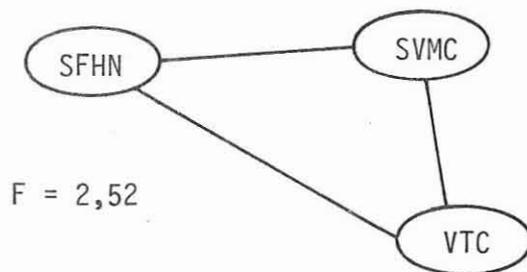
$$V_1 = 12 \quad V_2 = 24 \quad F = 0,393 \quad F_t = 2,18$$

Hypothèse rejetée : pas de liaison prouvée entre la profondeur, les teneurs en pélites et en carbonates.

. test rangées.

$$F = 2,52 \quad F_t = 2,18$$

Hypothèse compatible malgré l'importance du résidu.



Les échantillons paraissent se grouper en ensembles significatifs.

. GIENS.

---

A) A.O.V. - 1 W :

. Z, LUT, DB :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 21 \quad F = 20,48 \quad F_t = 2,42$$

Hypothèse non rejetée. Relations possibles.

. GRA (% graviers), CAR, Z :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 36 \quad F = 5,68 \quad F_t = 3,28$$

Hypothèse admissible. Relations probables.

. Z, sable moyen (SM), PEL (Pélites) :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 36 \quad F = 0,19 \quad F_t = 3,28$$

Hypothèse rejetée : indépendance de la profondeur vis à vis des teneurs en sable moyen et en lutites.

B) A.O.V. - 2 W :

13 échantillons ; 3 variables : profondeur, teneurs en graviers + sables grossiers, teneurs en pélites.

. test colonnes :

$$SS = 13.641,93$$

$$CSS = 368,32$$

$$RSS = 3\ 647,43$$

$$\text{Résidu : } SS - CSS - RSS = 9.626,18 \quad \text{Trop élevé. En effet :}$$

$$V_{1C} = 2 \quad V_{2C} = 24 \quad F_C = 0,459 \quad F_t = 3,40$$

Hypothèse rejetée, descripteurs inadéquats.

. test rangées :

$$V_{1R} = 12 \quad V_{2R} = 24 \quad F_R = 0,757 \quad F_t = 2,18$$

Hypothèse rejetée, échantillonnage non significatif.

. HYERES.

---

A.O.V. - 1 W :

. Z, CAR, LUT :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 36 \quad F = 2,72 \quad F_t = 3,28$$

Hypothèse non retenue. Indépendance des envasements et teneurs en carbonates vis à vis de la profondeur.

. Z, GRA, LUT :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 33 \quad F = 2,90 \quad F_t = 3,30$$

Hypothèse rejetée. Même remarque. La profondeur n'apparaît pas comme un bon critère.

. GRA, SM, SF :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 33 \quad F = 11,93 \quad F_t = 3,30$$

Hypothèse retenue. Relations granulométriques cohérentes, probablement indépendantes de la profondeur.

. CAP LARDIER - PAMPELONNE.

---

A) A.O.V. - 1 W :

. Z, SG, PEL :

$$V_1 = 2 \quad V_2 = 48 \quad F = 7,25 \quad F_t = 3,20$$

Hypothèse retenue. Ici, la profondeur peut influencer les teneurs en sables grossiers et pélites.

. SG, SM, CAR :

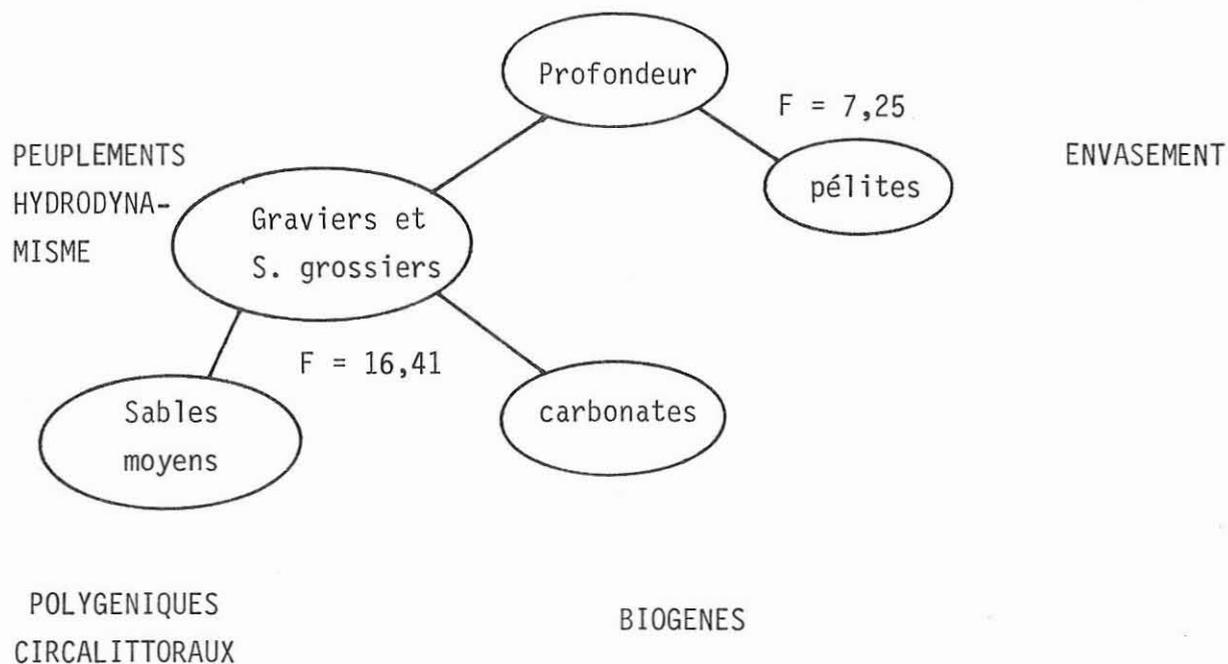
$$V_1 = 2$$

$$V_2 = 48$$

$$F = 16,41$$

$$F_t = 3,20$$

Même remarque : influence des carbonates (essentiellement biogènes ici).



B) A.O.V. - 2 W : 11 éch., 3 var : Z, GRA, PEL.

$$SS = 11.741,90$$

$$CSS = 2.507,13$$

$$RSS = 2.715,57$$

Résidu = 6.519,2. Trop important.

. test colonnes :

$$V_1 = 2$$

$$V_2 = 20$$

$$F_c = 3,84$$

$$F_t = 3,49$$

Hypothèse retenue. La profondeur est peut être significative.

. test rangées :

$$V_1 = 10$$

$$V_2 = 20$$

$$F_R = 0,83$$

$$F_t = 2,32$$

Hypothèse rejetée au niveau des échantillons.  
Non significatifs.

. CAP CAMARAT - POINTE DE SAINT TROPEZ.

---

A.O.V. - 1 W :

. Z, SG, PEL :

$$V_1 = 2 \qquad V_2 = 36 \qquad F = 4,18 \qquad F_t = 3,28$$

Hypothèse retenue.

. SG, SM, CAR :

$$V_1 = 2 \qquad V_2 = 36 \qquad F = 12,06 \qquad F_t = 3,28$$

Hypothèse retenue.

. BAIE DE FREJUS.

---

A) A.O.V. - 1 W :

. hypothèse : Z, CAR, LUT :

$$V_1 = 2 \qquad V_2 = 54 \qquad F = 3,50 \qquad F_t = 3,20$$

Hypothèse retenue.

. Z, Q, ML :

$$V_1 = 2 \qquad V_2 = 54 \qquad F = 9,17 \qquad F_t = 3,20$$

Hypothèse retenue.

. Z, d, DB :

$$V_1 = 2 \qquad V_2 = 54 \qquad F = 10,69 \qquad F_t = 3,20$$

Hypothèse retenue.

. Z, d, SF :

$$V_1 = 2$$

$$V_2 = 54$$

$$F = 9,59$$

$$F_t = 3,20$$

Hypothèse retenue.

Les variables choisies paraissent cohérentes et liées.

paramètres choisis	moyenne	variance	remarques
profondeur en m.	13,26	289,77	pentés faibles, irrégularités de la dalle de grès
teneur en carbonate %	20,52	65,19	irrégularités débris quaternaires
teneur en lutites %	35,04	1 538,19	envasement proche du littoral
teneur en quartz %	31,65	506,06	fonds terrigènes, transferts
teneur en min. denses %	9,71	20,83	lessivages et stocks détritiques
distance à la côte en m	503,68	409 865,37	
teneur en débris biogéniques %	6,98	23,55	influence des stocks fossiles et des peuplements SVMC
teneur en sable fin %	60,81	1 397,18	stock terrigène principal

B) A.O.V. - 2 W :

. 1ère hypothèse : 10 éch. x 3 var. : Z, Q, SF :

$$SS = 36.395,77$$

$$CSS = 13.091,65$$

$$RSS = 4.536,73.$$

Résidu = 18.767,39. Trop important.

\* test colonnes (var.) :

$$V_{1c} = 2$$

$$V_{2c} = 18$$

$$F_c = 6,27$$

$$F_t = 3,55$$

Hypothèse compatible, variables probablement significatives.

\* test rangées (échant.) :

$$V_{1R} = 9$$

$$V_{2R} = 18$$

$$F_R = 0,48$$

$$F_t = 2,49$$

Hypothèse rejetée.

. 2ème hypothèse : d, Q, SF :

$$SS = 7.443.474,07$$

$$CSS = 1.1952.296,45$$

$$\text{Résidu} = 3.904.121,26. \text{ Trop important.}$$

$$RSS = 1.587.056,36.$$

\* test colonnes :

$$V_{1C} = 2$$

$$V_{2C} = 18$$

$$F_C = 4,50$$

$$F_t = 3,55$$

Hypothèse retenue pour le choix des variables.

\* test rangées :

$$V_{1R} = 9$$

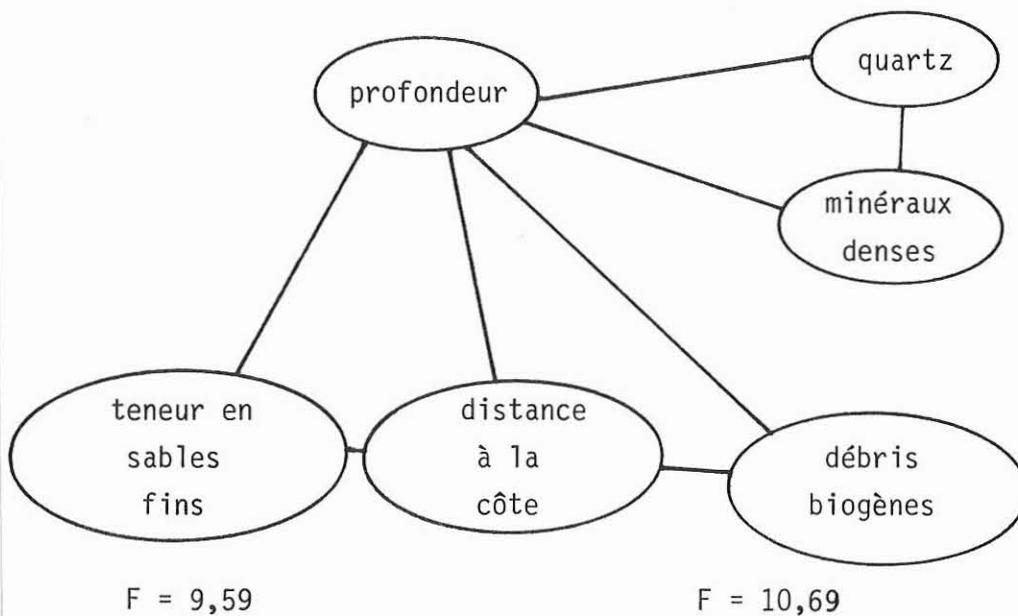
$$V_{2R} = 18$$

$$F_R = 0,81$$

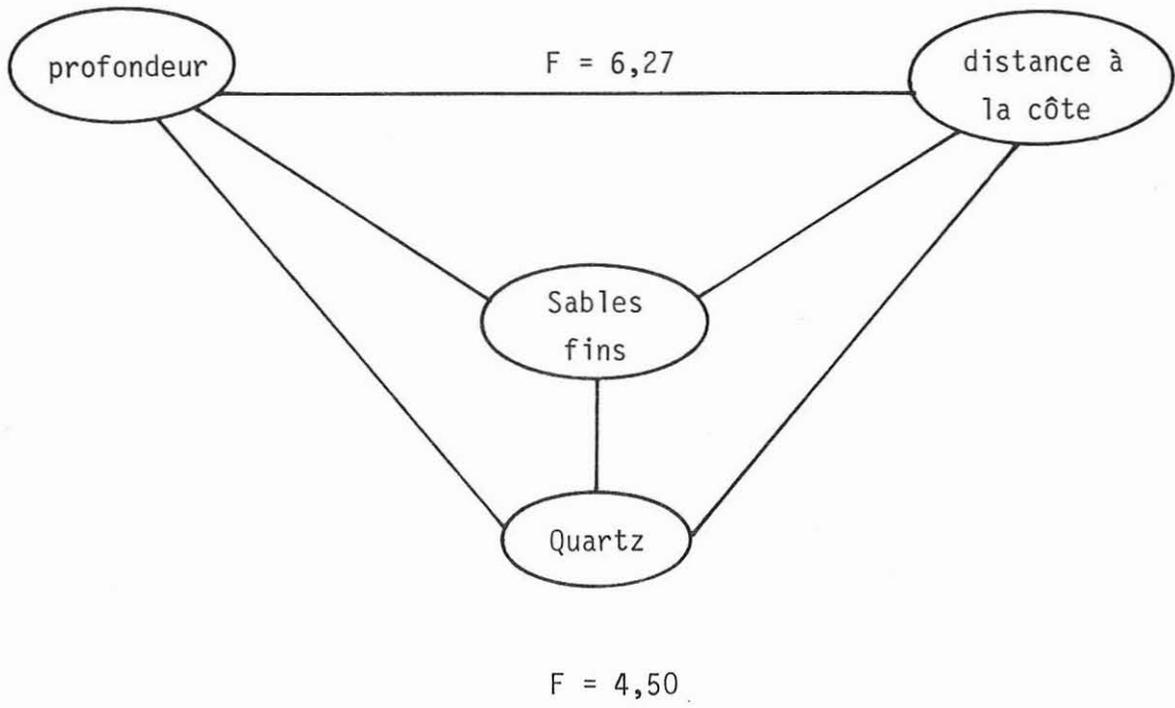
$$F_t = 2,49$$

Hypothèse rejetée.

- pour la variance 1 - W, on aura le schéma :



- pour la variance 2 - W :



## CHOIX DES SITES ET APPLICATIONS DE

## L'ANALYSE DE LA VARIANCE

L'application de l'analyse de la variance à une voie (AOV - 1W) pour un échantillonnage de types de fonds va permettre l'étude des variances intraclases pour :

- les prismes détritiques littoraux, y compris les SFHN,
- les graviers et sables sous l'influence des courants de fond,
- les sables polygéniques circalittoraux ("détritique côtier").

Ensuite, on comparera les distributions correspondant à ces types de sédimentation.

1) On testera l'hypothèse d'une spécificité de ces 3 types de sédiments vis à vis des teneurs en graviers et sables grossiers exploitables.

2) Dans les mêmes conditions, pour 3 distributions :

- sables vaseux (pélitiques) infralittoraux (SVMC),
- sables polygéniques circalittoraux (DC),
- vases circalittorales (VTC).

... on testera l'hypothèse d'une spécificité significative de ces trois ensembles sédimentaires vis à vis des gradients d'envasement (augmentation de la teneur en pélitites).

Ici, 29 échantillons sont répartis en 3 distributions.

On peut envisager d'autres "pôles" que les pélitites ou les graviers.

I) Teneurs en sables et graviers exploitables.

		Teneurs en graviers et sables grossiers en %		
n°	prisme littoral, SFHN	SGCF	Sables polyg. circalitt:	
stations			(DC)	
112 Stes Maries	0,30			
121 Stes Maries	10			
179 Giens	5	$\bar{x} = 5,57$ $s^2 = 12,44$		
10 Cap Lardier	7			
173 Giens		82,5		
4 Cap Lardier		3		
13 Cap Lardier		80		
15 Cap Lardier		24		
73 Pampelonne		1		
33 Cap Camarat		15		
36 -		56,2		
37 -		39		
38 -		10		
39 -		56	$\bar{x} = 38,42$ $s^2 = 802,31$	
62 St Tropez		56		
169 Giens			2	
114 Giens			15	
183 Giens			16	
184 Giens			7,5	
1 Cap Lardier			2	
11 -			6	
17 -			10	
22 -			3	
27 -			22	
70 Pampelonne			16	
71 -			3	
42 Cap Camarat			1,8	
48 St Tropez			2	$\bar{x} = 9,51$ $s^2 = 54,17$
54 St Tropez			25	
60 -			7	
65 -			14	

On calcule :  $V_1 = 2$        $V_2 = 28$        $F = 9,06$        $F_t = 3,34$

pour  $P = 0,05$

Hypothèse retenue pour les 3 ensembles sédimentaires examinés.

Ordre d'intérêt des exploitations : liaison aux moyennes :

- 1) Gravier et sables circalittoraux supérieurs (SGCF),
- 2) Sables polygéniques du circalittoral sup.
- 3) Prismes détritiques littoraux.

... mais profondeur dispendieuse et risques d'envasement pour 2.

... excellent triage et lessivage mais danger pour le littoral en ce qui concerne 3, (exploitation généralement à prohiber).

Les variances conditionnent la régularité des teneurs :

- 1) faible à moyenne pour le prisme littoral,
- 2) élevée pour les sables polygéniques circalittoraux,
- 3) très élevée pour les graviers et les sables grossiers du circalittoral supérieur.

II) Calcul des potentialités d'envasement.

Teneurs en pélites %			
n° des stations	Sables pélitiques infralittoraux;SVMC	Sables polygéniques circalittoraux ; DC	Vases circalitto- rales : VTC
114 Stes Maries	93,44		
115	65,99		
117	76,75		
119	85,76		
125	26,02		
126	65,36	$\bar{x} = 67,84$ $s^2 = 407,61$	
131	61,60		
169 Giens		60	
184 -		7,5	
185 -		48	
1 Cap Lardier		15,9	
11 -		5	
17 -		2	
22 -		1	
27 -		8,5	
44 Pampelonne		5,5	
70 -		39	
71 -		5	
42 Cap Camarat		1,2	
48 St Tropez		38,5	
54 -		16	$\bar{x} = 17,06$ $s^2 = 324,23$
60 -		13	
65 -		7	
136 Stes Maries			80,47
145 -			81,09
146 -			75,83
155 -			99,11
138 -			84,64
143 -			86,22

On calcule :  $V_1 = 2$  $V_2 = 26$  $F = 39,55$  $F_t = 3,37$

Pour  $P = 0,05$  Hypothèse compatible.

Les teneurs en pélites sont liées à des gradients d'envasement pour les trois distributions.

### Applications.

1) expression quantitative du gradient d'envasement :

1.1. : vases circalittorales (VTC) :  $\bar{x} = 84,56$  (en %),

1.2. : sables pélitiques infralittoraux (SVMC) :  $\bar{x} = 67,84$ ,

1.3. : sables polygéniques circalittoraux (DC) :  $\bar{x} = 17,06$ .

2) irrégularités des actions d'envasement et de colmatage des fonds.

Ces dernières sont liées à des crues temporaires, rejets ou modalités de mise en suspension de la phase fine.

2.1. : sables pélitiques infralittoraux :  $s^2 = 407,61$ ,

2.2. : sables polygéniques circalittoraux :  $s^2 = 324,23$ ,

2.3. : vases circalittorales :  $s^2 = 53,24$ .

On notera l'homogénéité et la progression de l'envasement rhôdanien. Par ailleurs, de fortes irrégularités sont en relation avec des "sables reliques" quaternaires, disséminés sur le précontinent, et avec l'influence du courant ligure (presqu'île de Saint Tropez).

## CHAPITRE 4.

---

### ANALYSE DES MODELES NATURELS

#### Introduction.

---

Quatre modèles naturels ont été choisis parmi maints exemples possibles, de Maguelonne à Saint Raphaël :

- 1) Sédimentation terrigène dominante liée à des plaines alluviales : Maguelonne et Fréjus,
- 2) Sédimentation terrigène dominante en relation avec le delta du Rhône : baie des Saintes Maries de la Mer et Beauduc,
- 3) Un herbier à Posidonies menacé : rades d'Hyères et de Giens,
- 4) Côte rocheuse métamorphique : la presqu'île de Saint Tropez.

#### I) SEDIMENTATION TERRIGENE DOMINANTE : MAGUELONNE ET FREJUS.

---

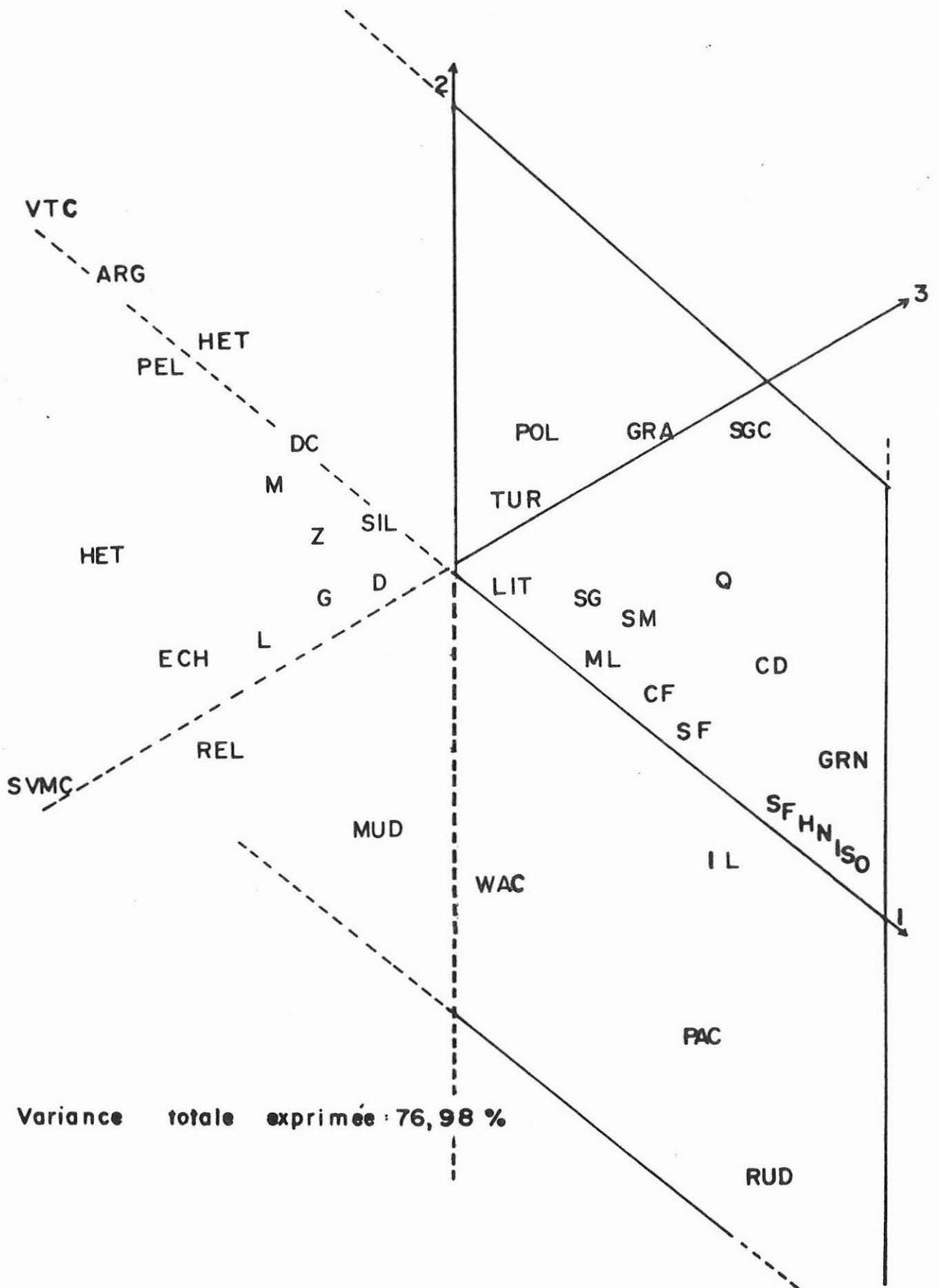
Quatre axes ont été retenus pour l'analyse factorielle des correspondances, exprimant, au total, 81,97 % de l'information :

- . axe 1 : 34,58 % de la variance,
- . - 2 : 28,52 %        -
- . - 3 : 13,88 %        -
- . - 4 : 4,98 %        -

L'ordination des graphes se traduira par un essai d'explication des axes factoriels, la représentation par coordonnées factorielles décroissantes (au niveau des variables et des échantillons), pour les domaines positifs et négatifs (fig. 9).

Fig-9

Représentation des variables dans l'espace des premiers axes factoriels. FREJUS - MAGUELONNE -



Variance totale exprimée : 76,98 %

A) EXPLICATION DES AXES FACTORIELS.. AXE 1 : 34,58 % :

	VARIABLE	ECHANTILLON	REMARQUES
	: Isométrie	:	:. Zones agitées et tria-
	: SFHN	:	: ges, lévignations
	: Grainstone	: Fréjus 25	:
:espace +	: Infralittoral	:	:
	: Courants de dérive	: Fréjus 17	:
	: Sable fin	:	:
	: Quartz	:	:. Fonds colmatés de sables
	: Minéraux lourds	:	: fins, catastrophe de
	:	:	: Malpasset.
	: Envasement : VTC	: Fréjus 21	:. Sédimentation fine
	: Argiles, pélites	: Fréjus 18	: flottation et décanta-
:espace -	: Hétérométrie	: Fréjus 29	: tion
	: Détritique côtier	: Fréjus 2A	:
	: Micas	: Fréjus 28	:. Sédiments circalitto-
	:	:	: raux montrant un gra-
	:	:	: dient d'envasement
	:	:	:

. AXE 2 : 28,52 % :

	VARIABLE	ECHANTILLON	REMARQUE
:espace +	: 0	: 0	: -
:espace -	: Wackestone	: 0	:. Tendance à l'envasement:
	:	:	:

. Espace bissecteur A1 - A2 :

	VARIABLES	ECHANTILLONS	REMARQUES
:espace +	:Sables, graviers, courants de fond :granules :Sédiments reliques	: Fréjus 24, Fréjus 1 : Maguelonne 5 et 7, : Fréjus 15 et 12	: Sables fins des hauts niveaux : Hydrodynamique : Témoins quatern. immergés
:espace -	:Rudstone :Mudstones : envasement :Packstone	: Fréjus 16	: Décharge détrit. Malpas : set et milieu secondaire : rement envasé.

. AXE 3 : 13,88 % :

	VARIABLES	ECHANTILLONS	REMARQUES
:espace +	:Turbidité :Pollution	: Fréjus 26	: Fin des actions de lesivage
:espace -	:Sables VMC :Reliques quatern. :Echinodermes :Lamellibranches	: Maguelonne 11 : et 10 : Maguelonne	: peuplements benthiques actuels et fossiles : envasement littoral des SFHN près de Maguelonne

. Espace bissecteur : A1 - A3 :

	VARIABLES	ECHANTILLONS	REMARQUES
:espace +	:Infralittoral :Isométrie :SFHN, Minéraux lourds :Grainstones :Débris biogènes	: Fréjus 23 et 24 : Fréjus 12 et 13 : Fréjus 17, 15, et 22 : Maguelonne 1	: Actions conjuguée de l'hydrodynamique et des stocks bioclastiques, triages minéralog. : Sables mobiles des prismes littoraux et sélection des minéraux denses

	VARIABLES	ECHANTILLONS	REMARQUES
	:Détritique côtier	: Maguelonne 9	:. Passage au circalittoral:
	:Graviers, SGCF,	: - 7	: et à un envasement accen:
espace -	:Hétérométrie	: Fréjus 28	: tué.
	:VTC et CLS	: - 21	:. Milieu devenant plus cal:
	:Silt	:	: me.
	:Packstone	:	:. Influence des stocks bio:
	:Distance à la côte	:	: gènes issus des peuple-
	:Teneurs en carb.	:	: ments reliques.
	:Profondeur.	:	:

. AXE 4 : 4,98 % :

	VARIABLES	ECHANTILLONS	REMARQUES
espace +	:Sable vaseux	: 0	: SVMC
	:de mode calme	:	:
espace -	:	: Fréjus 16	:. Passage au circalittoral:
	:	: Maguelonne 11	: et aux envasements.
	:	:	:

. Espace bissecteur A1 - A4 :

	VARIABLES	ECHANTILLONS	REMARQUES
espace +	:SGCF, graviers	: Maguelonne 1, 7, 4 et	:. Prismes littoraux et sa-
	:Reliques	: Fréjus 1	2 : bles fins des HN brassés:
	:Rudstone	:	: par les courants de fond:
	:Quartz	:	:
espace -	:Détritique côtier	: Fréjus 27	:. Passage à des faciès de :
	:VTC	: - 28	: plus en plus envasés, des
	:Argiles, pélites	: - 18	: SFHN - VTC
	:Courant général	: - 15	: Gradient vers le circa-
	:Infralittoral, micas	:	: littoral.
	:	:	:



	AXE 1	AXE 2	AXE 3	AXE 4	REMARQUES				
:Echantillons:	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	
: Fréjus 16	:	:	:0,963	:0,915:	:	:	:	:	: Apport détritique Mal:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	: passet
:Maguelonne 9:	:	:	:	:0,757	:0,311:	:	:	:	: Envasement de l'infra:
: - 10:	:	:	:	:0,555	:0,140:	:	:	:	: littoral au large de :
: - 11:	:	:	:	:0,641	:0,207:	:	:	:	: Maguelonne
: Fréjus 27	:	:	:	:	:	:	:0,526	:0,288:	: Sables du détritique:
: - 28	:	:	:	:	:	:	:0,262	:0,162:	: côtier (CLS)

## C) ANALYSE DES VARIABLES.

Seules sont portées les valeurs significatives.

AXES	AXE 1		AXE 2		AXE 3		AXE 4		REMARQUES
	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	
Profondeur	0,634								Axe 1 : Profondeur et
SFHN	0,765								modalités granulomé-
VTC	0,751								triques, minéralogi-
Sable fin	0,880	0,106							ques, action de tria-
Pélites	0,883	0,139							ges hydrodynamiques
Isométrie	0,705								et faciès des sables
Hétérométrie	0,599					0,252			fins des hauts ni-
Grainstone	0,656								veaux.
Fraction fi-	0,907	0,144							
ne									
Quartz	0,622								
Micas	0,545						0,227	0,168	Axe 4 : Sédimentation:
Argiles	0,828	0,169					0,094	0,133	des phyllites
Courants de	0,843								Axe 1 : Courantologie:
dérive									et action des houles
Cts généraux	0,816								
Cts de fond	0,709								
Packstone			0,856	0,166					Axe 2 : Lié à la tex-
Wackestone			0,796	0,118					ture, granulométrie et
Mudstone			0,893	0,126					porosité du sédiment
Rudstone			0,960	0,270					
Floatstone			0,960	0,270					

Axes	AXE 1	AXE 2	AXE 3	AXE 4	REMARQUES				
Echantillons:	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	
Lamellibranches				0,776	0,285				Axe 3 : Fraction bioclastique et peuplements reliques, influence géologique du littoral et des pollutions.
Reliques quat.				0,761	0,104				
turbidité				0,395					
pollution				0,454					
Lithologie litt.				0,351					

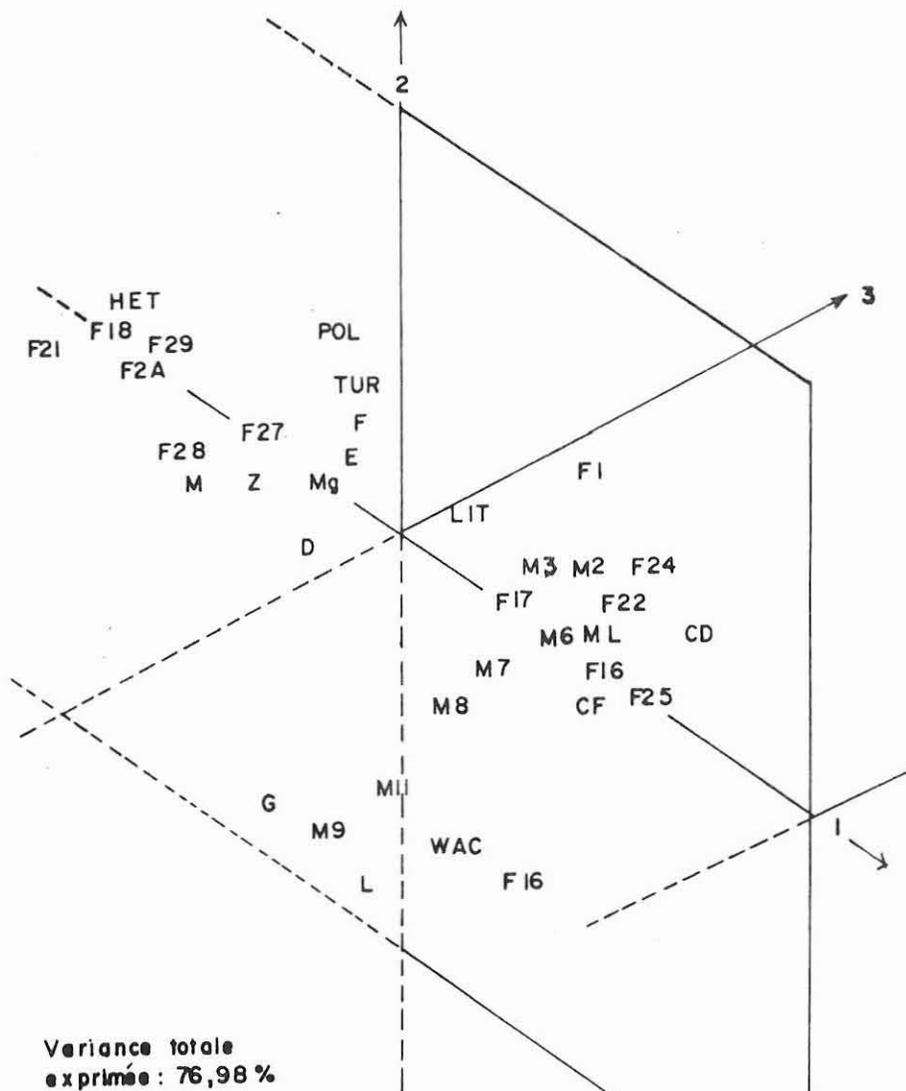
#### En conclusion :

La figure 9 montre que l'espace défini par les 3 premiers axes exprime le maximum d'informations : les faciès à forte agitation sont liés à l'axe 1 (positif) et, en partie, à l'axe 2 (positif). Les peuplements benthiques et les envasements dépendent de l'axe 3 et des zones négatives des axes 1 et 2. Ces 3 premiers axes expriment 76,98 % de l'information.

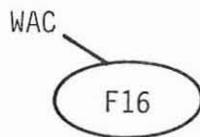
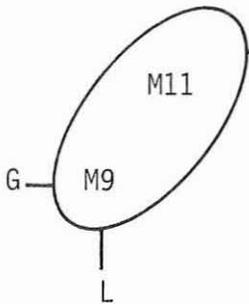
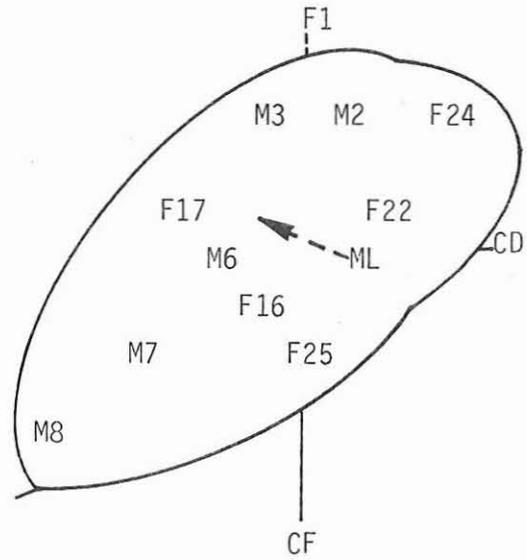
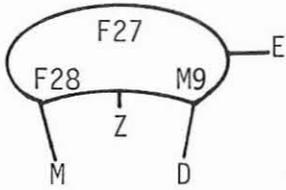
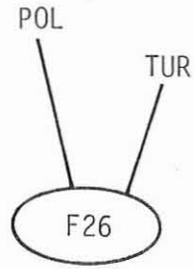
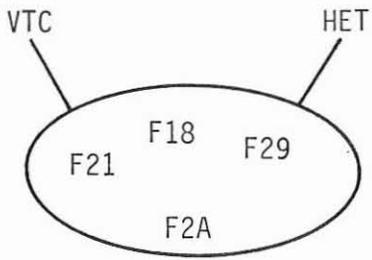
La figure 10 présente la position de quelques variables significatives proches des échantillons ou de groupements d'échantillons (HET, M, Z, D, TUR, ML, CD, CF, G, L, et WAG).

Plusieurs groupements systématiques d'échantillons peuvent être discernés :

Fig.10- Représentation des échantillons dans l'espace des trois premiers axes factoriels - FREJUS - MAGUELONNE -



*On a porté quelques variables significatives  
proches des échantillons ou des groupements  
d'échantillons. (HET, M, Z, D, TUR, ML, CD, CF, G, L, et WAC)*



ESPACE DES  
AXES FACTORIELS  
1, 2 et 3.

1°) Ensemble circalittoral supérieur de la baie de Fréjus, du détritique côtier envasé aux VTC (F<sub>21</sub>, F<sub>18</sub>, F<sub>29</sub>, F<sub>2A</sub>). Ce groupe est conditionné par les pélites des VTC et une hétérométrie des matériaux.

2°) Faciès de passage de l'infralittoral au circalittoral supérieur, à Fréjus et Maguelonne (F<sub>28</sub>, F<sub>21</sub>, M<sub>9</sub>) en liaison avec une diminution de l'énergie, dépôt d'éléments micaçés, relation : profondeur et distance à la côte. En zone plus profonde (M<sub>9</sub> et M<sub>11</sub>), de - 10 à - 25 m, à Maguelonne, les peuplements à Gastéropodes et Lamellibranches conditionnent le type de sédiment.

3°) Un important "nuage" se dégage : il s'agit du prisme littoral mobile et des sables fins terrigènes de Maguelonne et de Fréjus (M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>7</sub>, M<sub>8</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>17</sub>, F<sub>24</sub>, et F<sub>25</sub>). Ce nuage correspond à des sédiments brassés en milieux agités ou très agités. Trois variables montrent une relation systématique :

- courants de dérive (vents, vagues),
- courants de fond (courants de décharge),
- concentrations de minéraux denses par lévigation.

4°) Cas de "proximités" pour échantillons isolés :

- .F26 : VTC au large de Fréjus, circalittoral : pollution et turbidité,
- .F16 : sables envasés de la baie de Fréjus : texture wackestone et diminution rapide de la porosité par colmatage du sédiment. Cet échantillon peut être rattaché, avec quelques réserves, au premier groupe.

#### Applications :

Les modèles de Maguelonne et de la baie de Fréjus montrent, dans l'espace des 3 premiers axes factoriels, un groupement en 3 catégories nettes :

- 1) ensemble envasé du circalittoral supérieur,
- 2) sables fins terrigènes mobiles du prisme littoral et des hauts niveaux infralittoraux, à degré d'agitation élevé,
- 3) faciès de passage entre ces deux groupes.

14 variables suffisent à individualiser ces 3 ensembles sédimentaires. En utilisant 17 variables (à partir des 48 choisies initialement), on arrivera à une subdivision analogue mais il sera possible de mieux préciser les transitions et les tendances évolutives de la sédimentation.

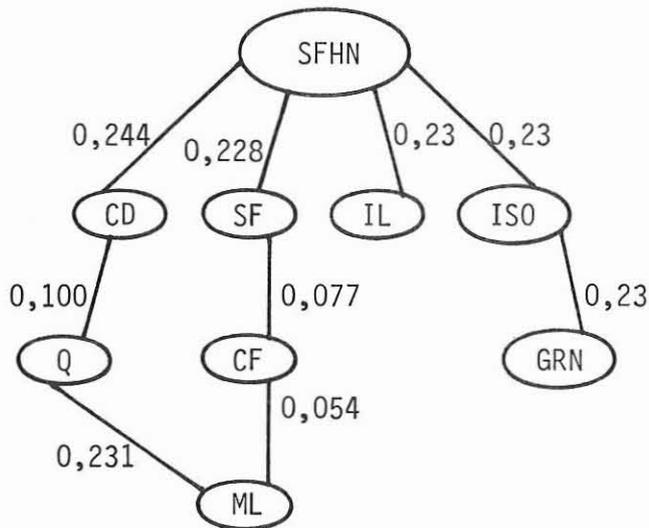
D) ANALYSE DES VARIABLES ENTRE ELLES EN FONCTION DE LA DISTANCE DU "KHI-2" :

On en déduit une analyse hiérarchique des variables agissantes en fonction des distances du "Khi - 2", en utilisant les plans factoriels les plus riches en informations : plan des axes 1 - 2 = 63,1 % de la variance,  
plan des axes 1 - 3 = 48,56 % de la variance.

Les pôles choisis sont : sables fins des hauts niveaux, sables et graviers, vases terrigènes côtières, pollution.

1 - Sables fins des hauts niveaux :

Plan axes 1/2 et axes 1/3. Ils expriment le stock sableux assurant la sécurité des littoraux bas, les fonds de pêches (poissons blancs) et une réserve potentielle mobile de matériaux très fins, isométriques.



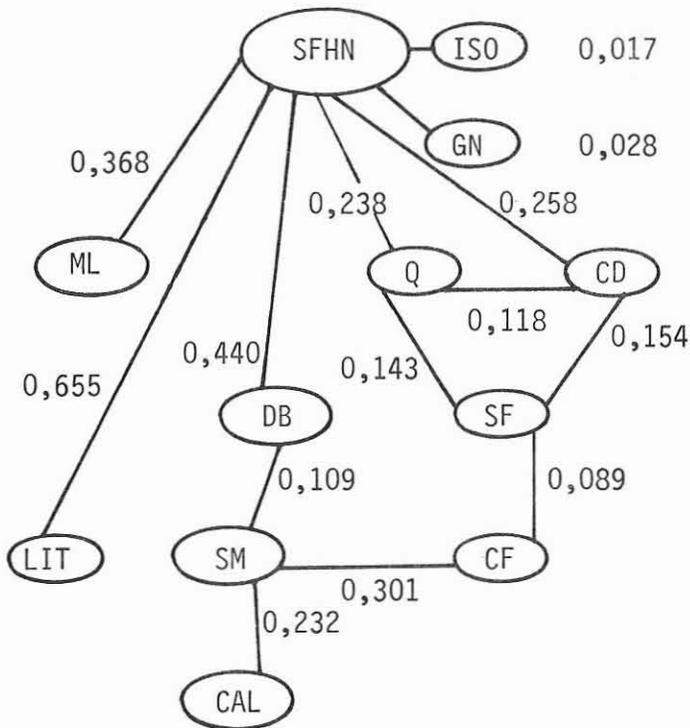
- A) Le plan des axes 1 et 2, dégageant l'information maximale, montre la liaison directe entre les sites des SFHN et :
- les milieux infralittoraux (liaison triviale), (0,230),
  - les sables fins (d°), (0,228),
  - l'isométrie du matériau bien lessivé, (0,230),
  - la présence de forts courants de dérive (0,244).

Plan des axes A1 / A2

(63,1 %)

- . Les courants de dérive règlent les teneurs en quartz (0,100),
- . L'isométrie demeure liée à la texture grainstone et à une porosité très élevée (0,230), fort sensible aux pollutions accidentelles (hydrocarbures).
- . Les accumulations de sables fins sont très étroitement associées aux courants de fond (0,077) et ces derniers, aux minéraux denses (0,054).
- . Les accumulations de minéraux denses (placers) sont en relations avec les épanchages terrigènes quartzeux (0,231), les courants de dérive (0,331) mais, surtout, avec les faciès de sables fins (0,131) et les courants de fond (0,054).

B) Si nous considérons le plan des axes 1 et 3, on distinguera plusieurs niveaux de distances :



. Liaisons très fortes :

- isométrie (0,017),
- texture grainstone et forte porosité (0,028),

. Liaisons fortes :

- teneurs en quartz détritique (0,238),
- action des courants de dérive (0,258),
- teneurs en minéraux lourds (0,368),
- teneurs en débris biogènes (0,440),

. Liaisons faibles :

- influence lithologique du littoral (0,655),

. puis, liaisons du 2ème ordre :

- les débris biogènes sont essentiellement représentés par des sables moyens (0,109), ces derniers étant évidemment carbonatés (liaison triviale à 0,232).
- quartz terrigènes et courants de dérive sont associés à 0,118 et associés aux sables fins à 0,143 et 0,154 respectivement. Les sables fins sont en liaison étroite avec les courants de fond (0,089), phénomène moins évident pour les sables moyens (0,301).

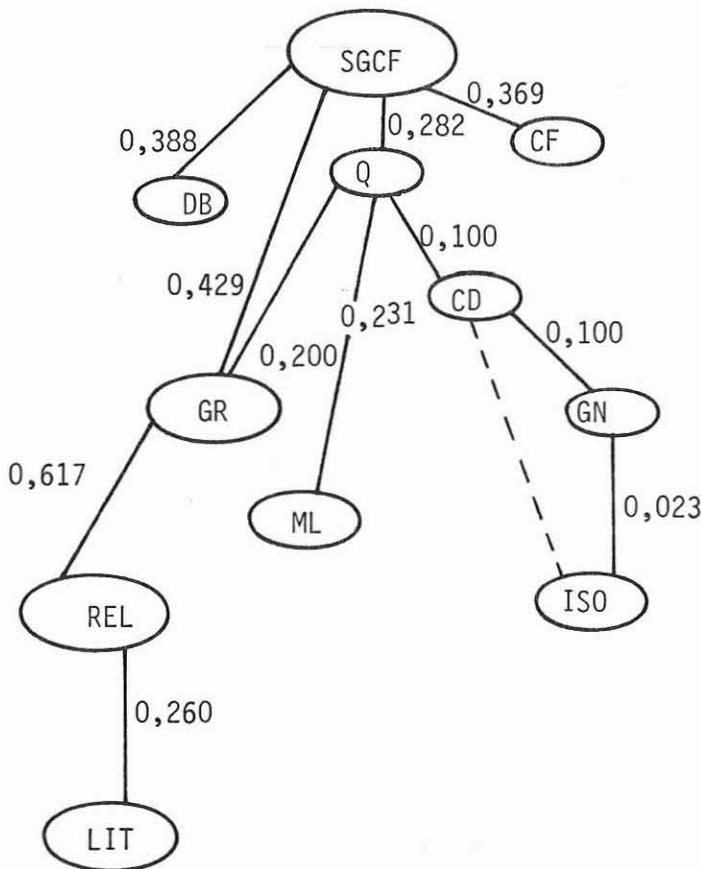
Ainsi, l'examen du plan factoriel lié aux axes 1 et 3, quoique plus

pauvre, globalement, en informations (48,56 %), fait mieux apparaître les processus de formation et d'évolution des sables fins littoraux. L'analyse multivariée, basée sur la distance du "Khi - 2" fait ressortir les relations entre deux faciès granulométriques : sables moyens et sables fins, et les origines biogènes et terrigènes du matériel. Les relations hydrodynamiques et l'influence de la porosité y sont par ailleurs mises en évidence.

## 2 - Sables et graviers sous l'influence des courants de fond :

On considère le plan des axes factoriels 1 et 2.

Les informations dégagées conditionnent une éventuelle exploitation sous-marine en relation avec les conditions hydrodynamiques et sédimentologiques. L'analyse multivariée fait ressortir des interactions complexes :



1) Trois interactions dominantes apparaissent :

- apports de quartz détritique (0,282),
- apports de débris biogènes (0,388),
- influence des courants de fond (0,369).

2) A un deuxième niveau on notera l'action des variables suivantes :

- granulométrie des graviers et granules (0,429) en liaison étroite avec des galets quartzeux (0,200). Ces graviers et granules

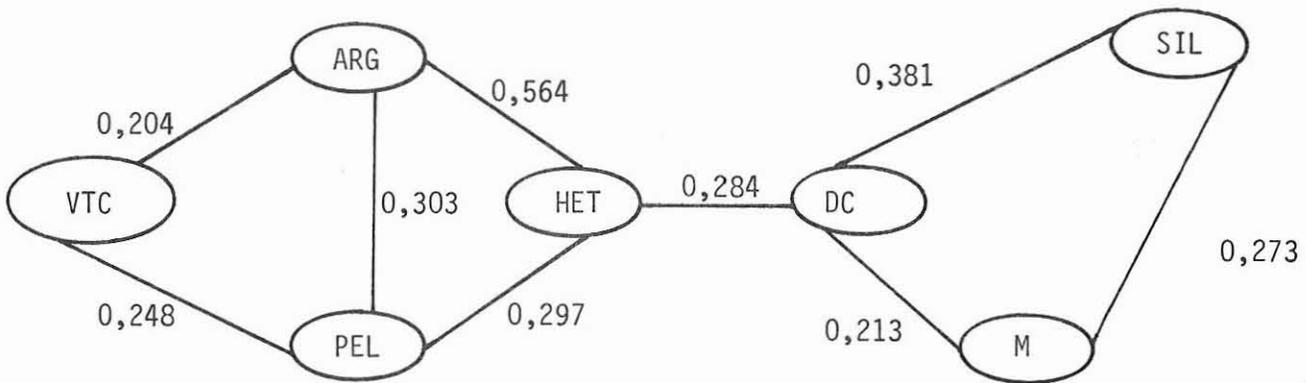
à des "sédiments - reliques" quaternaires (0,617), puis, à l'influence lithologique du littoral (0,877).

- accumulations de minéraux denses (placers sous-marins) à 0,231.

- influence des courants de dérive (vagues, vents) à 0,100 (en corrélation forte avec les apports quartzeux détritiques), puis, à un 3ème niveau, à la texture et forte porosité (0,100), elle-même très liée à une isométrie élevée (0,023).

### 3 - Modalités du front d'envasement :

On choisira le "pôle" des vases terrigènes côtiers pour le plan des axes 1 et 2. On a la "chaîne" suivante :



Il y a un passage des sédiments des VTC aux faciès du détritique côtier. Ce dernier est modulé :

- par la fréquence des argiles,
- la proportion de pélites,
- l'hétérométrie du matériau,

... sans qu'interviennent de manière significative la profondeur et la distance au rivage. L'affaiblissement considérable des phénomènes hydrodynamiques (faciès à basse énergie) se poursuit dans le détritique côtier (ici, circalittoral supérieur), où les actions de décantation amènent d'importants dépôts de silts et de micas.

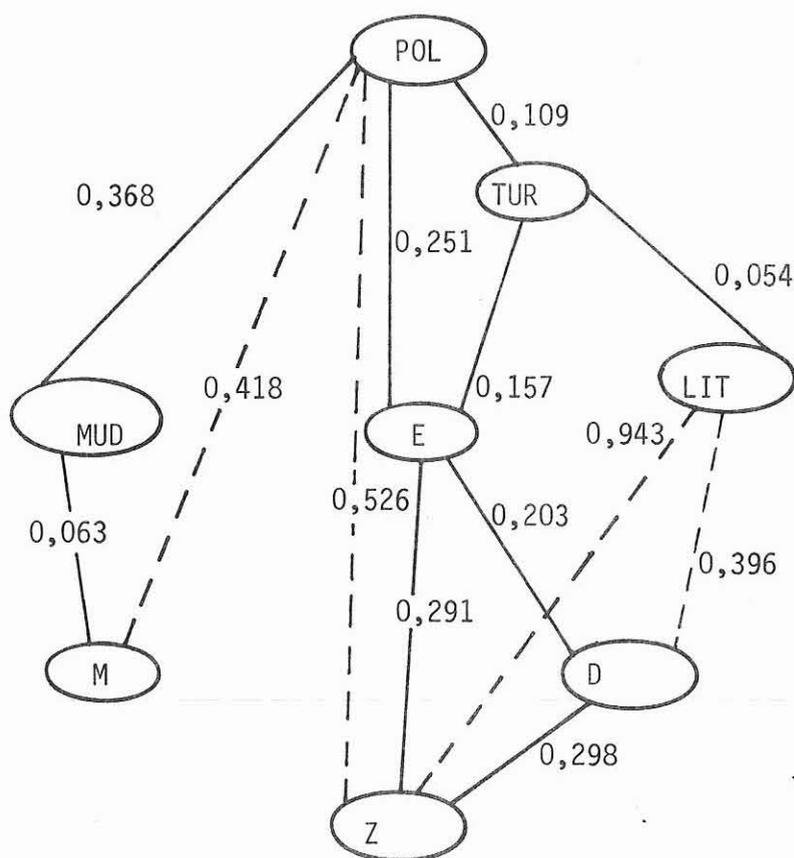
1) Facteurs primaires liés à l'envasement : argiles (0,204) et pélites (0,248).

Une importante fraction des pélites n'est point de nature argileuse (distance argiles - pélites : 0,303), mais carbonatée (lutite d'origine terrigène ou biogène).

2) puis passage à des faciès hétérométriques (0,564) et au détritique côtier (0,284) où l'envasement se poursuit, conditionné par un dépôt de micas décantés (0,213) et de silt (0,381). La majeure partie de ce silt apparaît flottée et se trouve essentiellement composé de particules micaçées (0,273).

### 4 - Modalités de la pollution "macroscopique" :

Le degré de pollution visible (galets d'hydrocarbures, débris, etc...) a été considéré dans le plan factoriel des axes 1 et 3.



1) A un premier niveau, trois facteurs régissent la pollution macroscopique :

1 - turbidité (0,109),

2 - affaiblissement de l'énergie (0,251),

3 - développement de la texture mudstone et de l'absence de porosité (0,368).

La turbidité est très étroitement liée aux influences littorales (0,054), c'est-à-dire pour les exemples étudiés, aux produits rejetés par les importants émissaires (Fréjus, Lez).

2) Deuxième niveau :

- les faciès mudstones sont liés à la décantation des micas : 0,063 et ces derniers à la pollution, en une plus faible mesure (0,418).

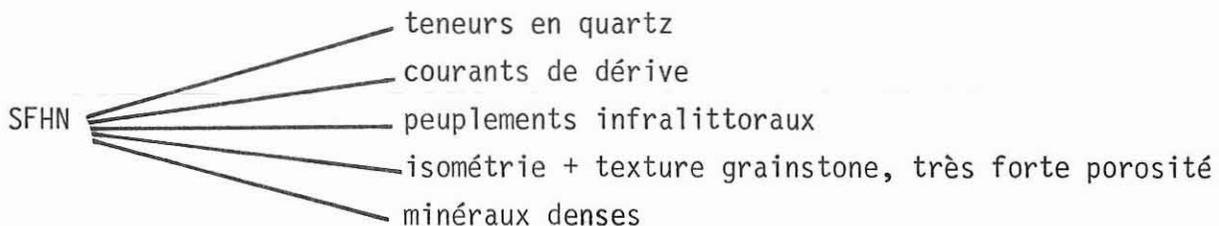
- la diminution relative de l'énergie est corrélée avec l'augmentation de la profondeur et de la distance à la côte (0,291 et 0,203).

Cette relation triviale se renforçant par la régularité relative des profils (corrélation triviale profondeur - distance à la côte à 0,298). Enfin, la pollution n'a qu'un rapport assez faible avec la profondeur (0,526).

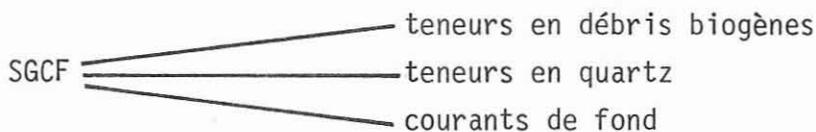
## 5) Applications

L'analyse multivariée, l'analyse factorielle des correspondances, l'analyse des distances du "Khi-2" appliquées à une "modélisation" des baies de Fréjus et Maguelonne, aboutissent à la définition d'un faible nombre de variables significatives. Il en résulte une économie de temps et de moyens dans le "suivi" d'une opération, pour un site donné :

1°) Appréciation de la réserve potentielle des sables fins de hauts niveaux indispensable à la sécurité du littoral et à son exploitation touristique : six variables suffisent :



2°) Réserve potentielle de sables et graviers circalittoraux. Cette dernière peut être conditionnée par trois variables :

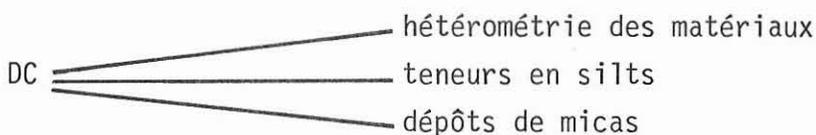


Deux paramètres relatifs à la sécurité devront être considérés en plus : profondeur et distance à la côte (contraintes liées à l'environnement et aux peuplements).

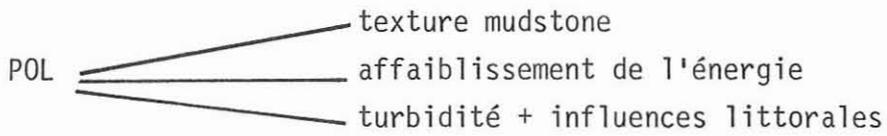
3°) Front d'envasement et développement du faciès des VTC : deux variables :



4°) Passage aux faciès du "détritique côtier" : 3 variables :



5°) Pollution "macroscopique" : 4 variables :



En tout, 17 variables suffisent pour exprimer la dynamique sédimentaire des baies de Fréjus et Maguelonne.

## II) INFLUENCE DU DELTA DU RHONE : BAIES DES SAINTES MARIES DE LA MER ET DE

---

BEAUDUC.

---

### 1°) Plan des axes 1 - 2 (fig. 11).

L'envasement est bissecteur dans le quadrant positif. Le degré d'agitation, les courants de dérive, le lessivage et l'apport en minéraux sont commandés par la partie négative de l'axe 2.

Trois groupes sont individualisés :

1) Vases terrigènes côtières et détritiques envasés, vers le large, riches en fraction fine et en argiles (S13, B24, B25, B21, S10 et S12). L'ordre des variables agissantes (7 var.) est le suivant :

- fraction fine dominante,
- pélites dominantes,
- texture mudstone, perméabilité nulle,
- teneurs en argile élevées,
- distance à la côte,
- hétérométrie du matériau,
- profondeur.

2) Sables fins vaseux, d'origine mixte, infra et circalittoraux : (S3, S8, S9, S16, S7, S4, B28, S14).

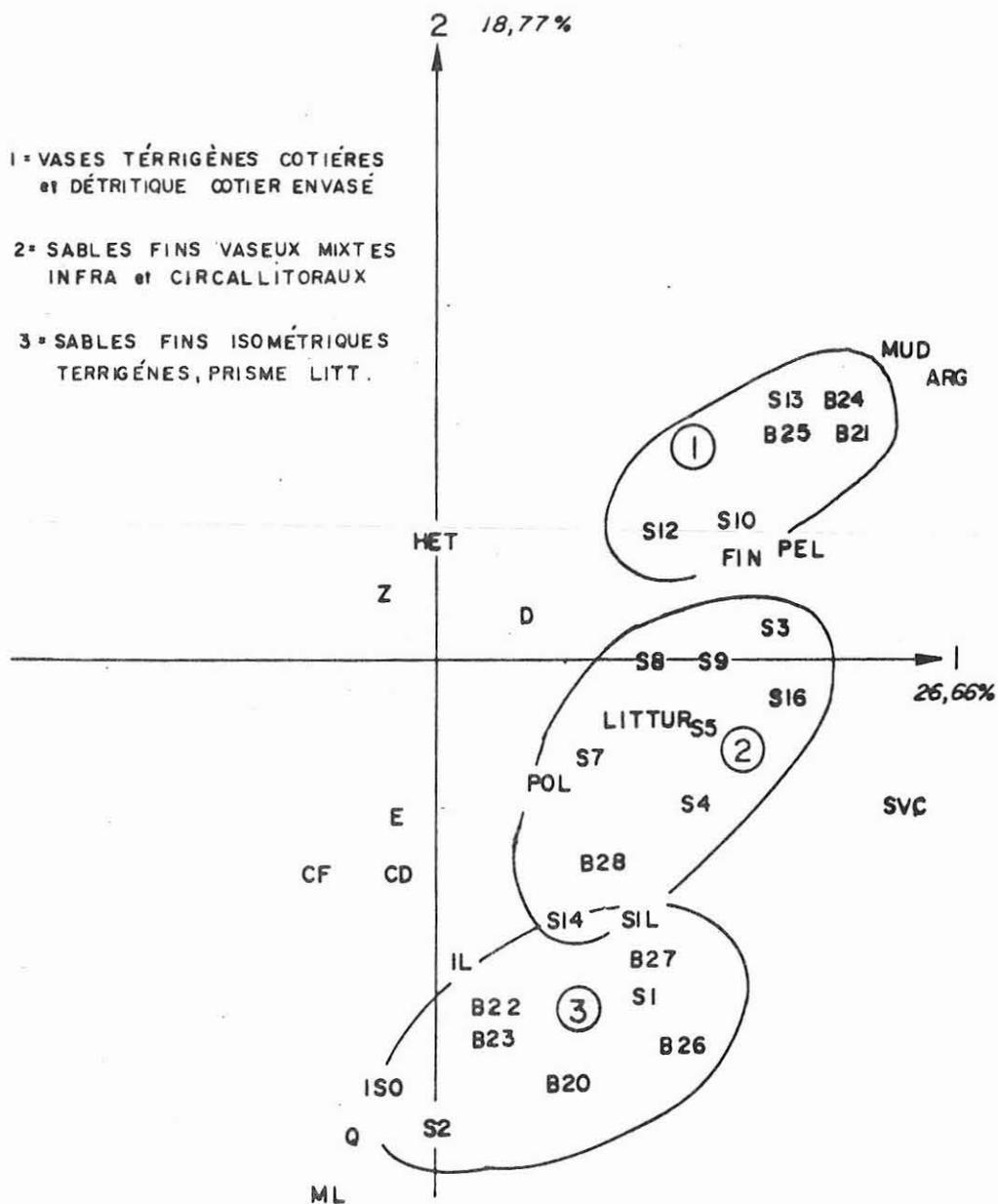
Quatre variables essentielles ordonnées :

- turbidité élevée,
- influence littorale (transfert rhodanien),
- pollution,
- teneurs en silts.

3) Sables fins isométriques, du prisme littoral et d'origine terrigène : 6 variables essentielles, dans l'ordre :

- isométrie du matériau (triage excellent),
- teneurs en silts,
- apports de quartz,
- influence des peuplements infralittoraux (sables à Tellines),
- concentrations de minéraux lourds (cf. placers des Saintes Maries de la Mer),
- courants de dérive.

Fig II - SAINTES MARIES DE LA MER - BEAUDUC.



(échantillons : B27, S1, B26, B22, B23, S2, B20)

16 variables expriment ces subdivisions.

2°) Plan des axes 1 - 3 (fig. 12).

Plusieurs groupes s'échelonnent, "tirés" par l'axe 1 qui exprime le degré d'envasement. L'axe 3 rend compte partiellement, des actions de triage hydrodynamique. Certains échantillons apparaissent isolés sur le graphe.

1) Echantillon isolé S17 : sables mixtes, polygéniques, remaniés au large par les courants de fond, il s'agit d'un sédiment circalittoral (D. C.) ayant subi un début de triage.

3 variables ordonnées : courants de fond, énergie relativement élevée, isométrie.

2) Echantillon isolé S2 : sable et placers minéralogiques infralittoraux des Saintes. Milieu très lessivé et fort degré d'agitation. Présence de peuplements à Tellines et Gastéropodes influençant la granulométrie.

Les variables sont, dans l'ordre :

- quartz abondant,
- Gastéropodes, (infralittoral),
- hétérométrie du matériau,
- teneurs en minéraux denses.

3) Groupe des sables fins du prisme littoral passant vers le large à des faciès envasés (B 22, B23, B20, S14, S1, et S7). 3 variables :

- teneurs en silt,
- peuplements des sables fins des hauts niveaux,
- risques de pollution.

4) Sables vaseux passant au circalittoral, plus au large : S4, S51, S8, S9, S12.

Deux variables très dominantes :

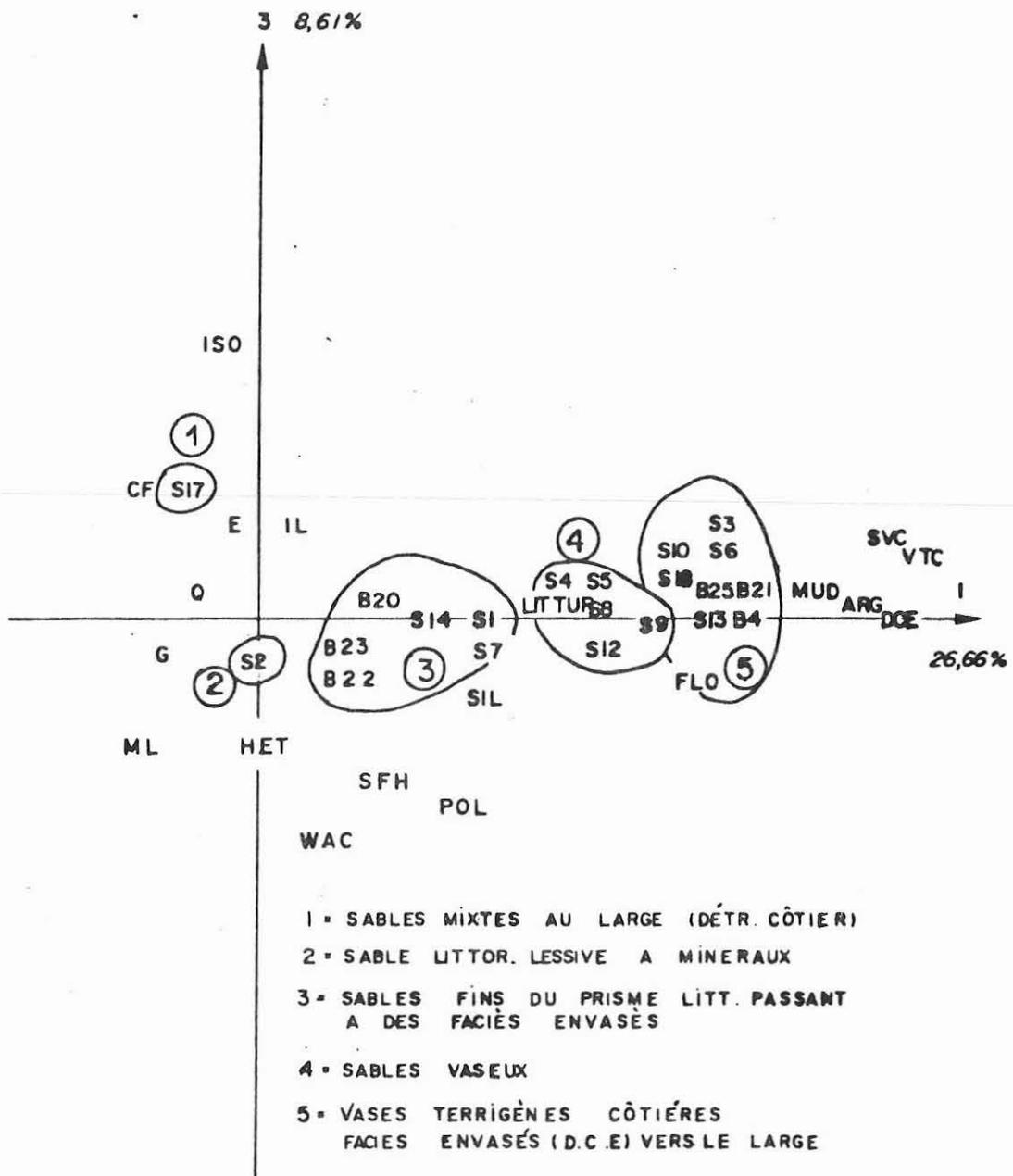
- degré de turbidité,
- influences littorales (apports rhodaniens).

5) Vases terrigènes côtières, vases à Turritelles, faciès envasés (D. C. E.) vers le large, en milieu nettement circalittoral (S3, S6, S10, S18, B25, B21, B24, S13).

Trois variables dominant, dans l'ordre :

- texture floatstone. Porosité nulle,

Fig-12 - SAINTES MARIES DE LA MER - BEAUDUC -

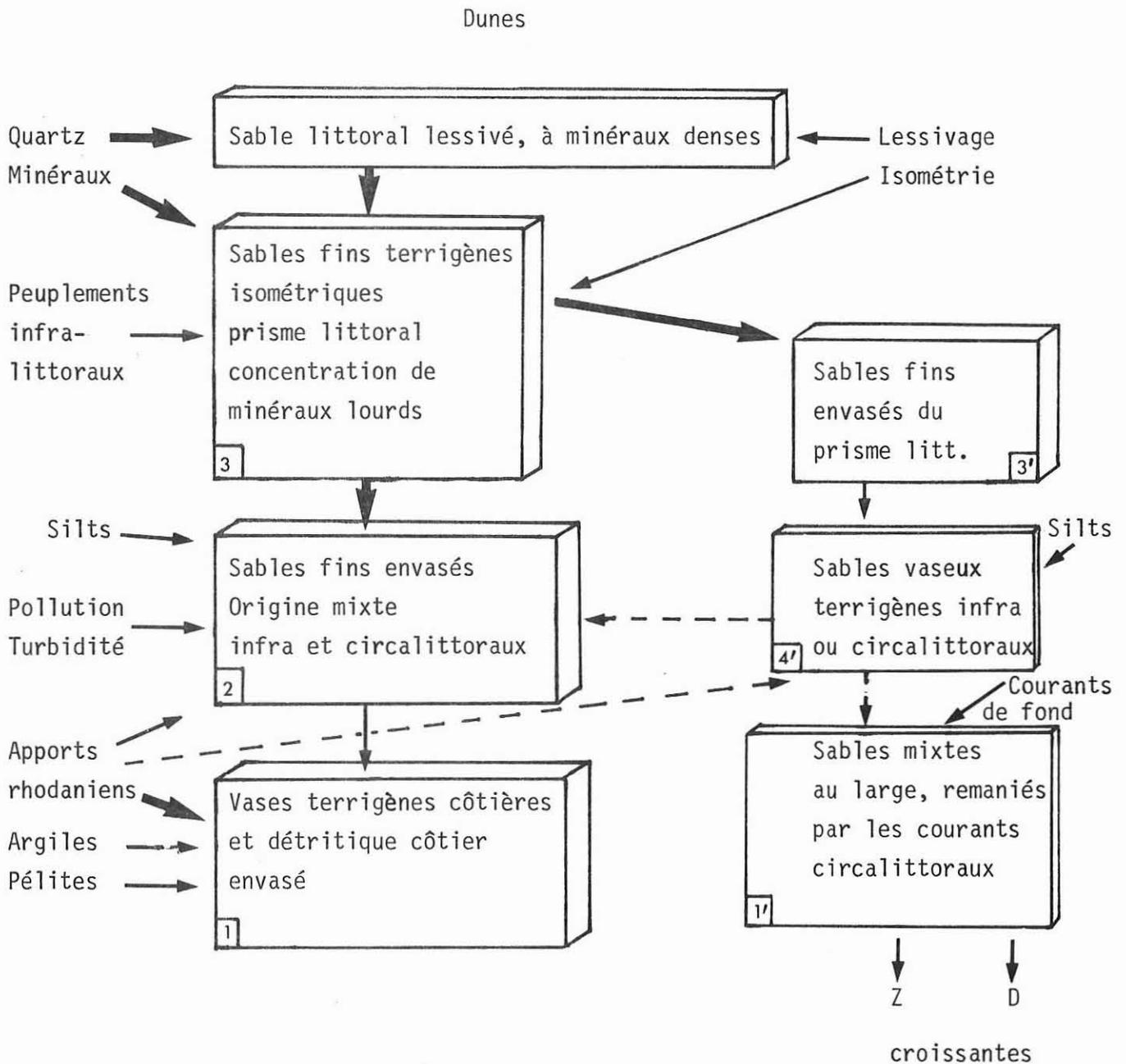


- texture mudstone. Porosité nulle.
- teneur en argile.

En tout, 15 variables ont été utilisées.

### Applications :

Il en résulte une série évolutive latérale relativement simple : zone à minéraux terrigènes grossiers, lessivés et triés, puis zones d'envasements progressifs liés aux flux turbides rhodaniens, à terrigènes fins, argiles et risques de pollution. Manifestation de courants de fond, vers le large amenant des remaniements localisés.



### III) UN HERBIER A POSIDONIES MENACE : RADES D'HYERES ET DE GIENS.

---

#### A) ANALYSE DES GROUPEMENTS ECHANTILLONS - VARIABLES :

---

##### 1°) Plan factoriel 1 - 2 : 45,43 % de la variance (fig. 13).

Trois types peuvent être définis :

1) Ensemble du détritique côtier et des sables et graviers liés au circalittoral supérieur : (G 34, G 36, H 54, H 55, H 56, H 57, H 58, H 44, et G 37). Ce groupe forme un nuage bissecteur délimité par l'axe 2 et le domaine négatif de l'axe 1.

Les variables proches ( $d\chi^2$ ) sont les suivantes : (7 variables)

- biotopes du circalittoral supérieur et notamment du détritique côtier,
- échinodermes,
- matériel hétérométrique,
- algues + foraminifères,
- teneurs importantes en graviers,
- influence de la profondeur (et non de la distance au rivage).

2) Sables biogènes de l'herbier à Posidonies : (G 39, G 40, H 51, G 38, H 47, G 33, et H 46). Ce groupe est "tiré" par l'axe 1. Les variables agissantes sont :

(8 variables)

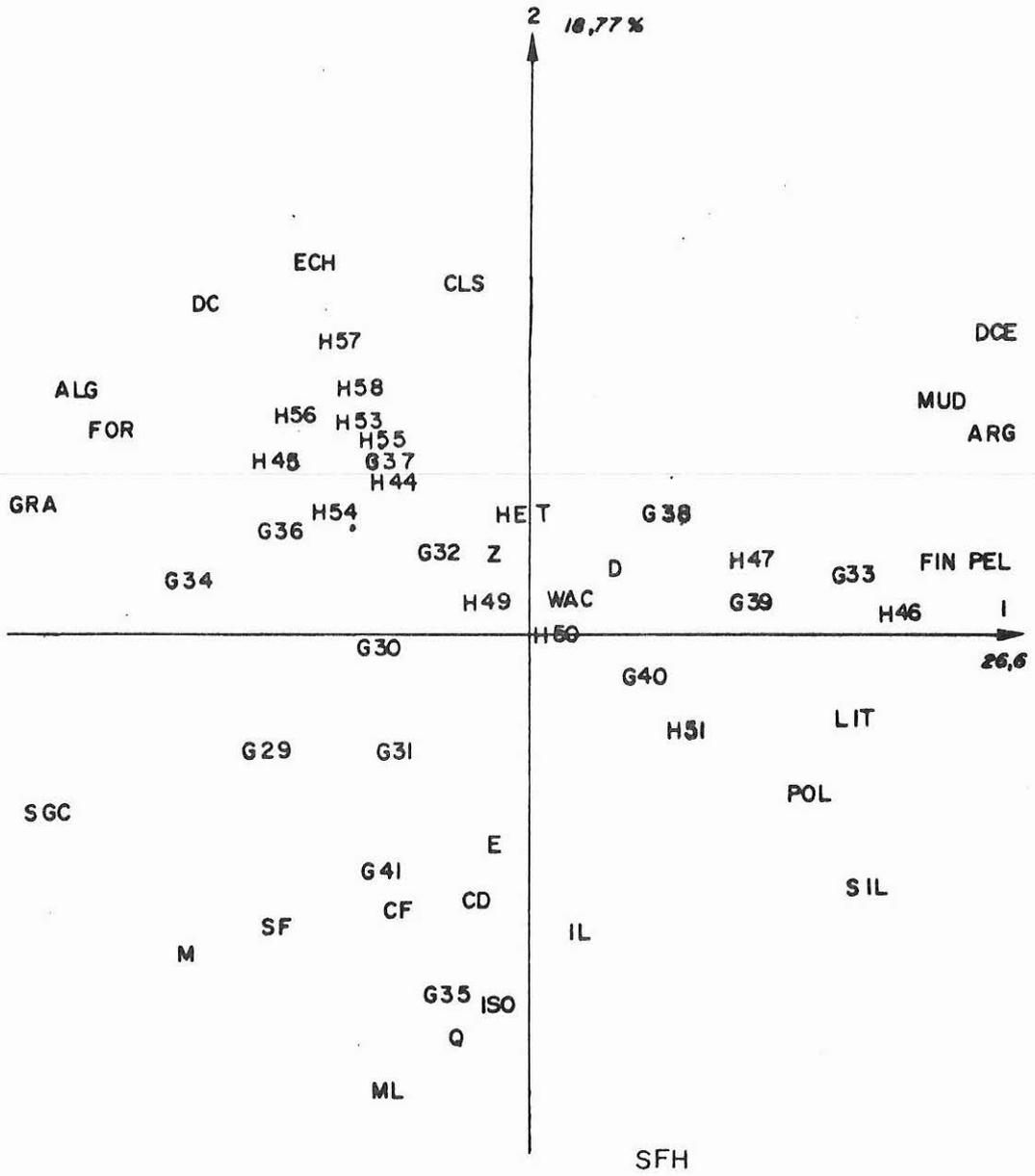
- teneurs en fraction fine et en pélites,
- influence lithologique du littoral (Giens),
- distance au rivage,
- texture wackestone : diminution de la porosité par colmatage,
- hétérométrie du matériau,
- influence de la profondeur,
- influence des pollutions.

3) Herbiers des passes, chenaux ou zones à forts courants : (G 29, G 31, G 41).

Variables efficaces ; (8 variables). Il s'agit de faciès plus fins et mieux triés.

- courants de fond,
- courants de dérive,
- degré d'agitation élevée,
- peuplements infralittoraux,
- matériau isométrique,

Fig .13 - HYERES - GIENS



- quartz détritique et minéraux lourds (influence du prisme littoral),
- sables fins.

Un plus grand nombre de variables (22) s'avère nécessaire pour définir ce modèle "Giens - Hyères" où l'axe 1 demeure partiellement lié aux terrigènes fins et aux graviers et l'axe 2, pour sa partie négative, est en relation avec les actions de levigation et les peuplements infralittoraux.

2° Plan factoriel 1 - 3 : 35, 27 % de la variance (fig. 14).

1) Deux échantillons isolés (G 29 et G 34), en situation bissectrice entre A1 négatif et A3, correspondent à des graviers de l'herbier et du circalittoral supérieur. Ils montrent une ébauche de classement, une texture grainstone très poreuse et une importante phase, de granulométrie supérieure à 2 mm (3 variables).

2) On observe un groupe important, complexe, rassemblant de nombreux échantillons correspondant à des sédiments biogènes hétérométriques : herbiers situés au large, faciès de transition et faciès du détritique côtier (fig. 14).

Ce "nuage" groupe la majorité des prélèvements. On y décèle la proximité décroissante des variables suivantes (8 variables) :

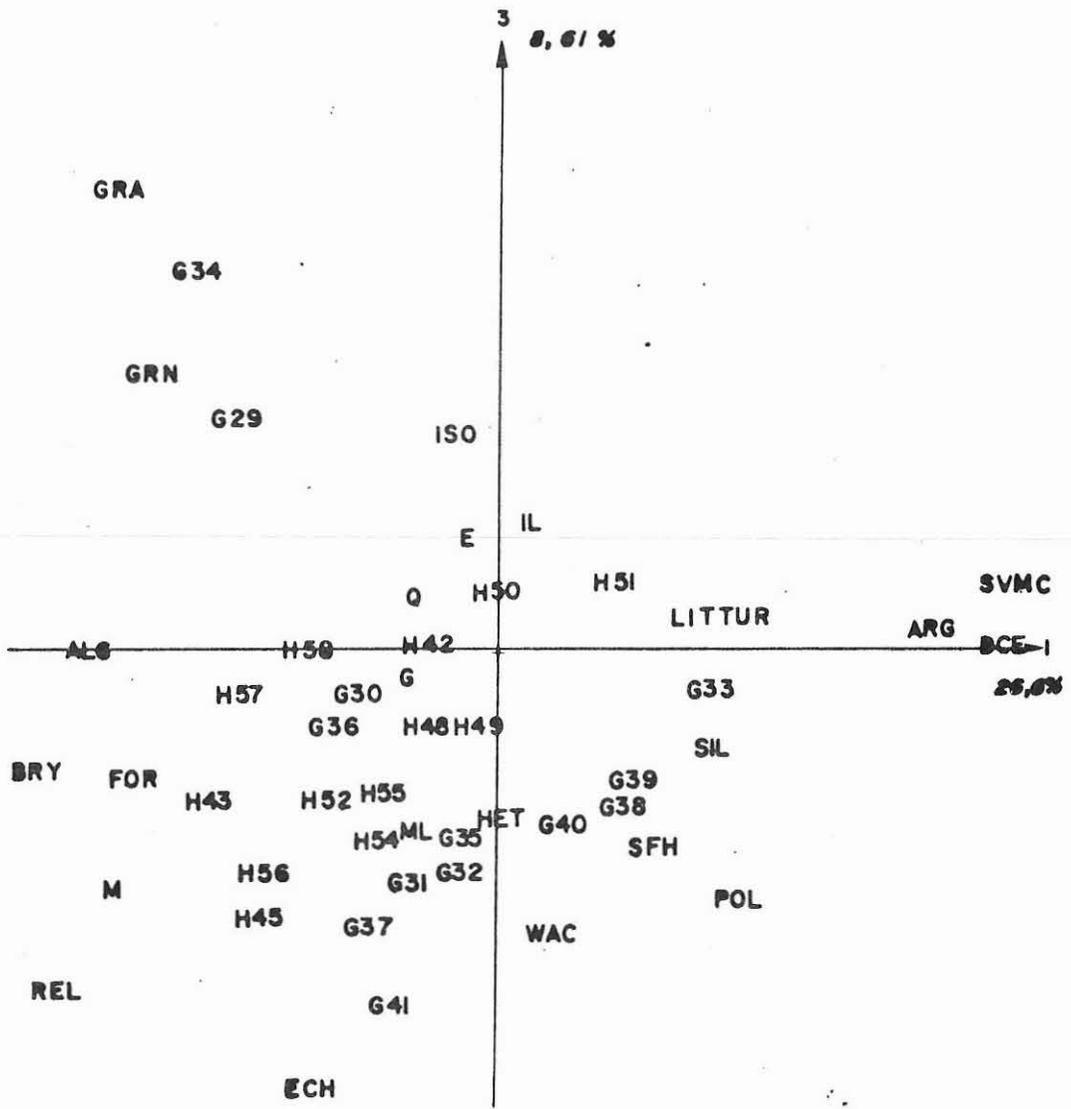
- minéraux denses (H 54, et G 35),
- matériau hétérométrique (G 35),
- Gastéropodes (H 42, G 30),
- Quartz (H 42),
- foraminifères (H 43),
- échinodermes (G 41),
- algues (H 57),
- micas (H 45 et H 56),

3) Alignement du golfe de Giens correspondant à un herbier altéré et au détritique côtier (G 33, G 38, G 39). 4 variables y sont notées en ordre décroissant :

- influence du prisme littoral et des sables fins des hauts niveaux (G 38),
- hétérométrie des matériaux (G 40),
- teneurs en silts (G 33),
- influence des pollutions pour tous les échantillons.

En utilisant une classification automatique, basée sur les distances du "Khi - 2", on distinguera, pour le plan factoriel 1 - 3, encore 2 groupes essentiels "consommant" seulement 11 variables mais dégageant évidemment une moins bonne information que pour l'essai précédent (axes 1 et 2). Il en résulte une

Fig.14 - HYERES - GIENS



définition beaucoup moins précise des catégories de sédiments et le groupe 2 n'apparaît point suffisamment détaillé. Pour les deux tentatives correspondant aux plans factoriels 1 - 2 et 1 - 3, on notera le chevauchement, d'un groupe à l'autre, des sédiments de l'herbier et du détritique côtier. En fait, les secteurs soumis à des courants sont parfois mieux individualisés, sans que cela puisse être ici généralisé.

### Applications :

En utilisant l'espace des 3 premiers axes factoriels groupant 54,04 % de la variance, on peut préciser la situation de cinq catégories de sédiments : D'où le modèle proposé pour les baies de Giens et Hyères.

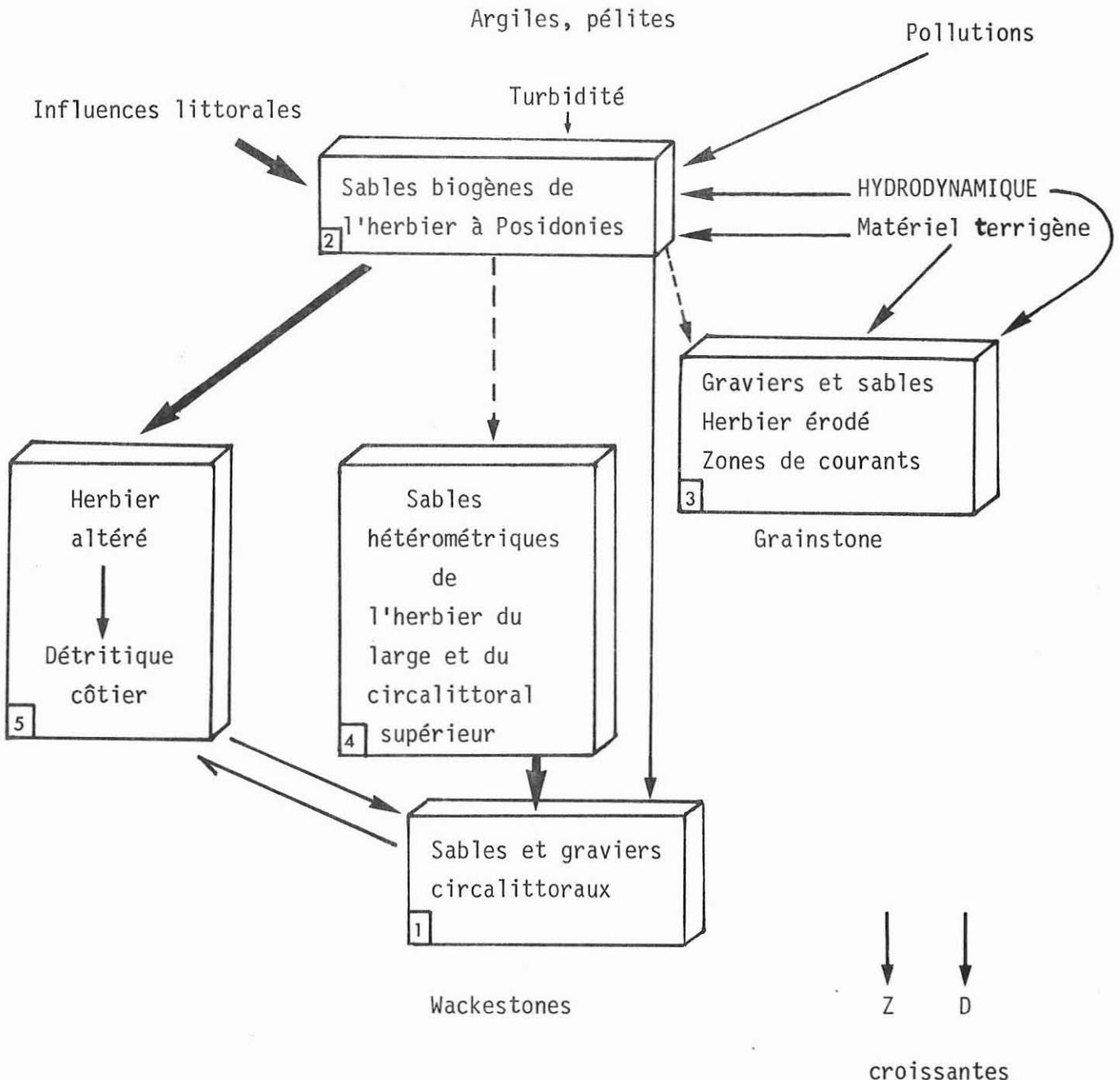
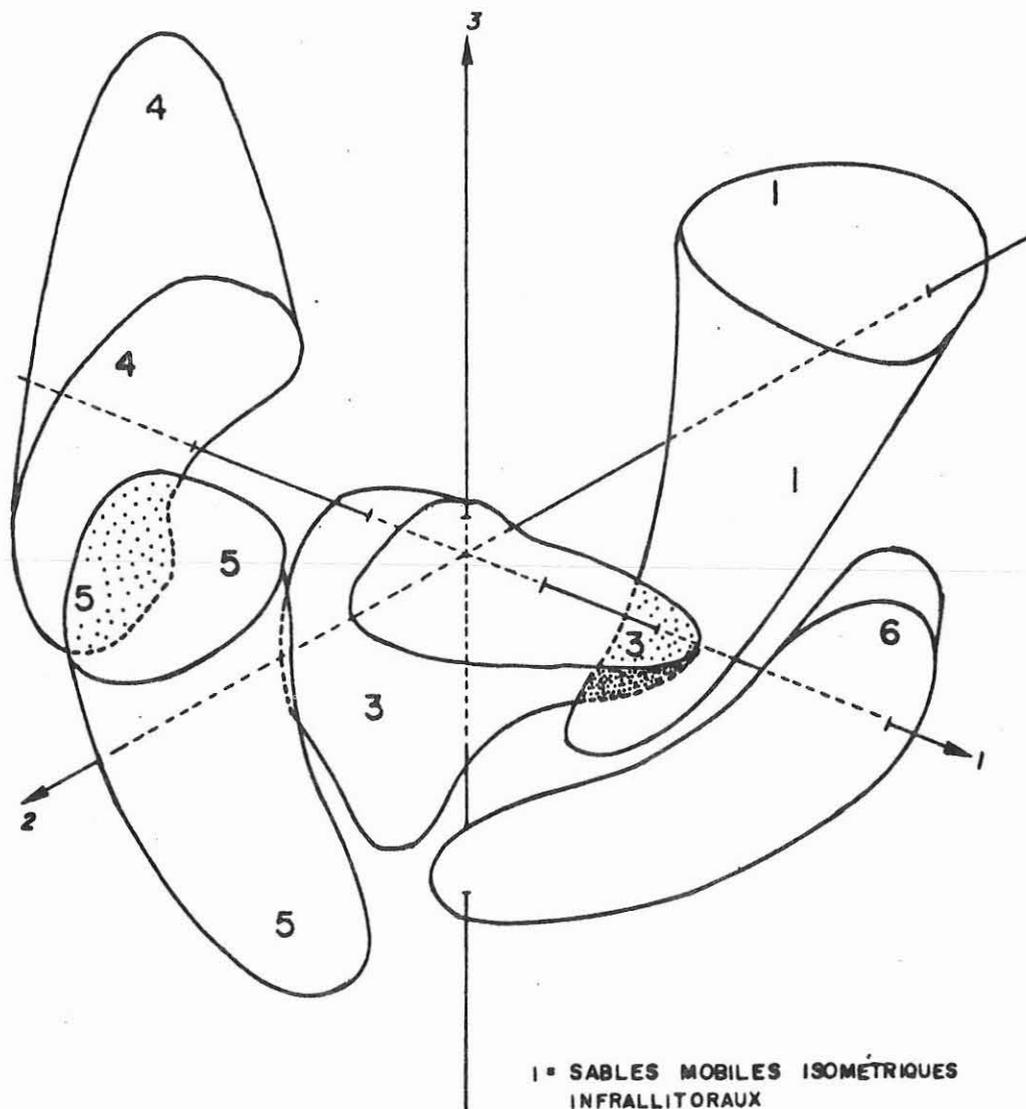


Fig. 15 - HYERES - GIENS , ESPACE AXES 1,2 et 3 -



- 1° SABLES MOBILES ISOMÉTRIQUES  
INFRALITTORAUX
- 3° SABLES BIODÉTRITIQUES INFRALITTORAUX  
HERBIERS A POSIDONIES
- 4° SABLES ET GRAVIERS  
CIRCALITTORAUX
- 5° SABLES POLYGÉNIQUES CIRCALITTORAUX
- 6° SABLES CIRCALITTORAUX ENVASÉS

Les liaisons fortes entre les nuages (flèches pleines), moyennes (flèche "linéaire"), faibles (flèches tiretées, puis pointillées) ou nulles (pas de flèche), expriment l'évolution d'une séquence latérale en fonction des variables. On notera ici, dans ce modèle, l'influence dominante d'un herbier, très menacé, et des pollutions s'ajoutant aux facteurs hydrodynamiques classiques.

#### IV - LA PRESQU'ILE DE SAINT TROPEZ : COTE ROCHEUSE METAMORPHIQUE.

##### 4.1. : Explication des axes factoriels (fig. 16).

##### 1°) Plan factoriel des axes 1 - 2 :

Les stations se répartissent en montrant une ébauche d'"effet Guttman", l'axe 1 exprimant un envasement tandis que l'axe 2 apparaît lié, partiellement, à une diminution de l'énergie (fig. 16). Quatre groupements sont distingués, à partir du large :

- 1) sédiments envasés les plus au large du circalittoral (D. C.),
- 2) sédiments circalittoraux : sables polygéniques du D. C.

Pour 1 et 2, les variables agissantes sont, par ordre d'importance :

- foraminifères,
- algues,
- action du courant général,
- biotopes du circalittoral sup.,
- échinodermes,
- sédiments reliques (sables quaternaires würmiens).

Soient 6 variables significatives.

3) important groupe correspondant aux graviers et sables remaniés par les courants de fond et les chenaux, lobes d'accrétion, etc... essentiellement en milieu circalittoral supérieur.

Six variables significatives, par ordre d'importance :

- sables grossiers,
- lamellibranches,
- sables moyens,
- courants de fond,
- profondeur,
- graviers.



4) groupe des sables fins du prisme littoral, et des sédiments de pentes et talus en milieux agités et riches en éléments terrigènes. Huit variables ordonnées :

- sables fins,
- concentrations de minéraux denses,
- très forte porosité (grainstone),
- teneurs en quartz,
- courants de fond,
- isométrie du matériau,
- teneurs en micas,
- courants de dérive.

19 variables rendent compte de ces 4 subdivisions.

2°) Plan factoriel des axes 1 - 3 (fig. 17).

On observe toujours une répartition avec une ébauche "d'effet Guttman" ; l'axe 3 exprimant des actions de lessivage et de classement hydrodynamique liés à une agitation croissante.

3 groupements :

1) sables et graviers remaniés par les courants de fond. Seulement 4 variables : sables grossiers, texture grainstone, isométrie et teneurs en graviers - granules (C 81, L 64, C 78, C 79, L 65, C 77, C 80, L 61, P 75).

2) sables polygéniques circalittoraux, liés au "détritique côtier" : L 69, L 67, T 89, L 66, L 68, T 87) : six variables : foraminifères, algues, échinodermes, sables fins, micas, peuplements du détritique côtier.

3) sables fins envasés, hétérométriques, de l'infralittoral ou du circalittoral supérieur (L 62, T 86, P 76, P 72). Ce groupe, qui n'apparaissait pas au plan précédent (1 - 2), paraît lié à cinq variables ordonnées :

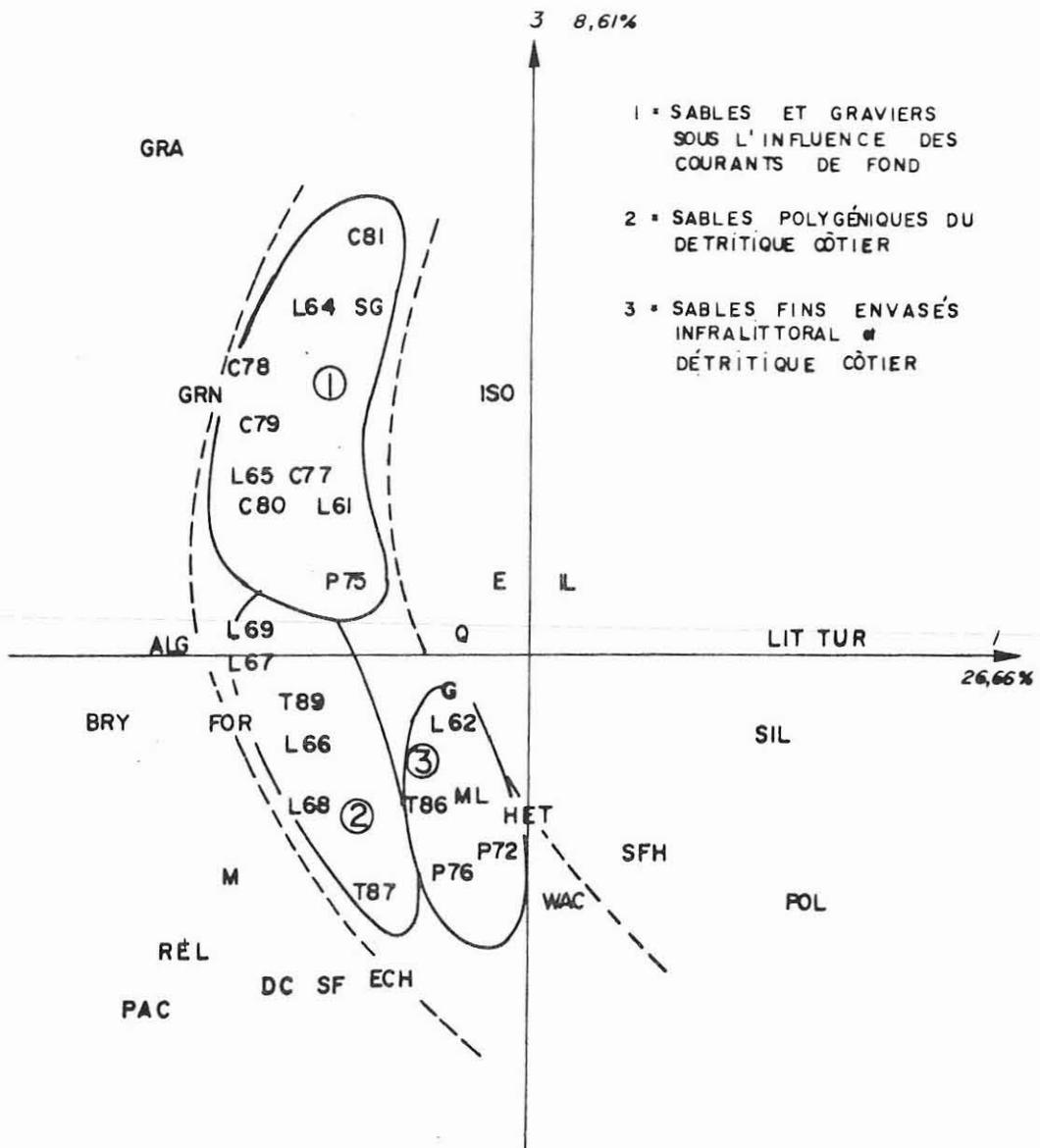
- concentrations en minéraux lourds,
- matériau hétérométrique,
- gastéropodes,
- teneurs en quartz,
- texture wackestone à très faible porosité,

15 variables sont utilisées.

4.2. : Applications et modèle proposé.

Il est possible de schématiser les positions relatives des nuages

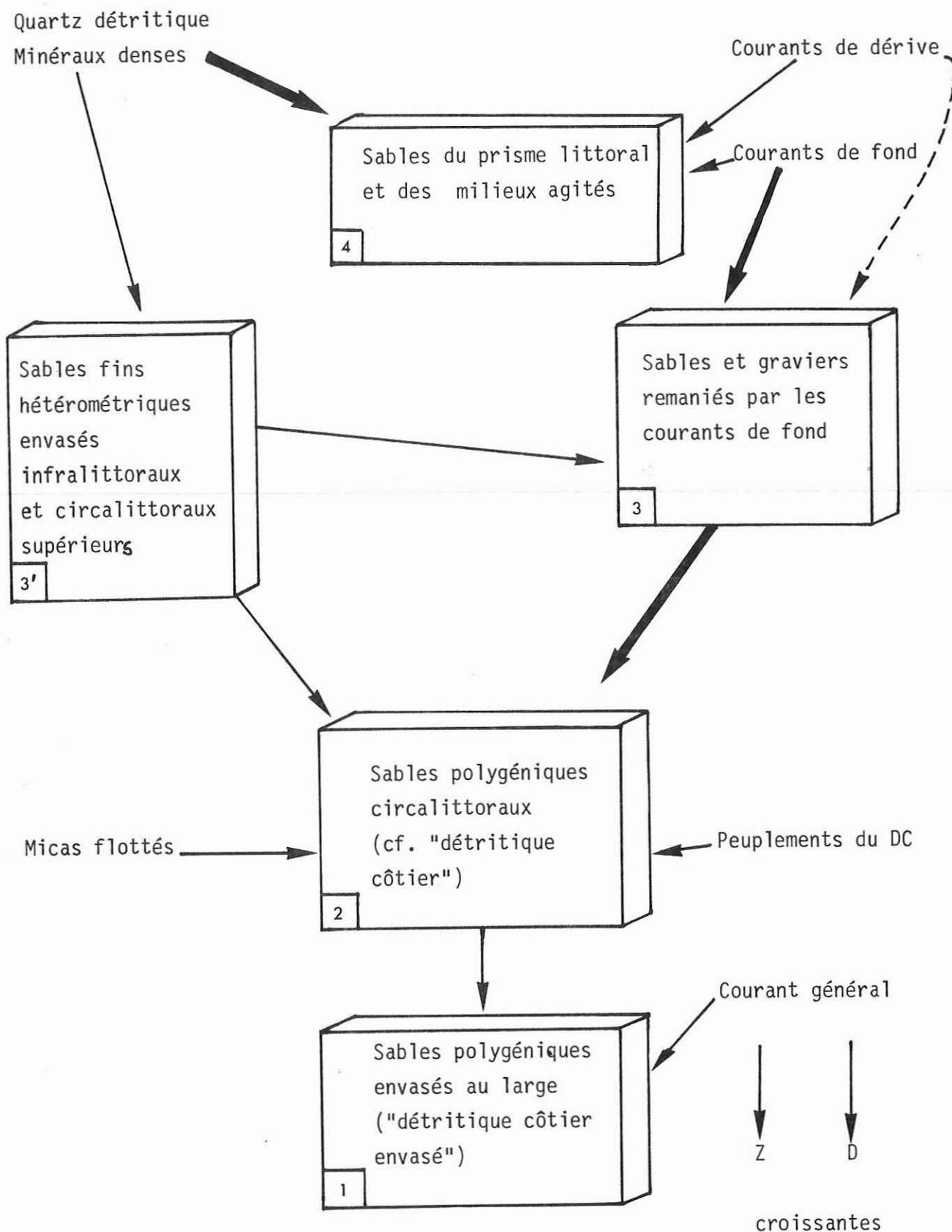
Fig. 17- PRESQU'ILE DE SAINT TROPEZ



et groupes d'échantillons vis à vis de la "palette" des variables efficaces. On aboutit à un modèle comportant cinq "boîtes" à liaisons fortes, moyennes, faibles ou nulles (que l'on transcrira par le graphisme des flèches : pleines, linéaires, pointillées ou absentes).

Le modèle de la presqu'île de Saint Tropez montre des différences essentielles avec Giens - Hyères :

- 1) absence de pollution grave,
- 2) situation relativement effacée des herbiers à Posidonies, probablement liée à un environnement hydrodynamique très agité,
- 3) importance des graviers et épandages bioclastiques du circalittoral supérieur,
- 4) influence, au large, du courant général (courant "ligure").



## CHAPITRE 5.

## ESSAI D'ETABLISSEMENT

D'UN MODELE GENERAL : LES SEDIMENTS

DE LA MARGE CONTINENTALE SUPERIEURE.

La démarche comprend les étapes suivantes :

- 1) Analyse et explication des axes factoriels,
- 2) Analyse des variables,
- 3) Analyse des échantillons,
- 4) Classification des faciès sédimentaires,
- 5) Hiérarchie des variables : variables spécifiques, ubiquistes, et applications,
- 6) Hiérarchie des échantillons : classification automatique des faciès sédimentaires.

I) ANALYSE ET EXPLICATION GENERALE DES AXES FACTORIELS.

Quatre axes ont été retenus, exprimant 57,92 % de l'information :

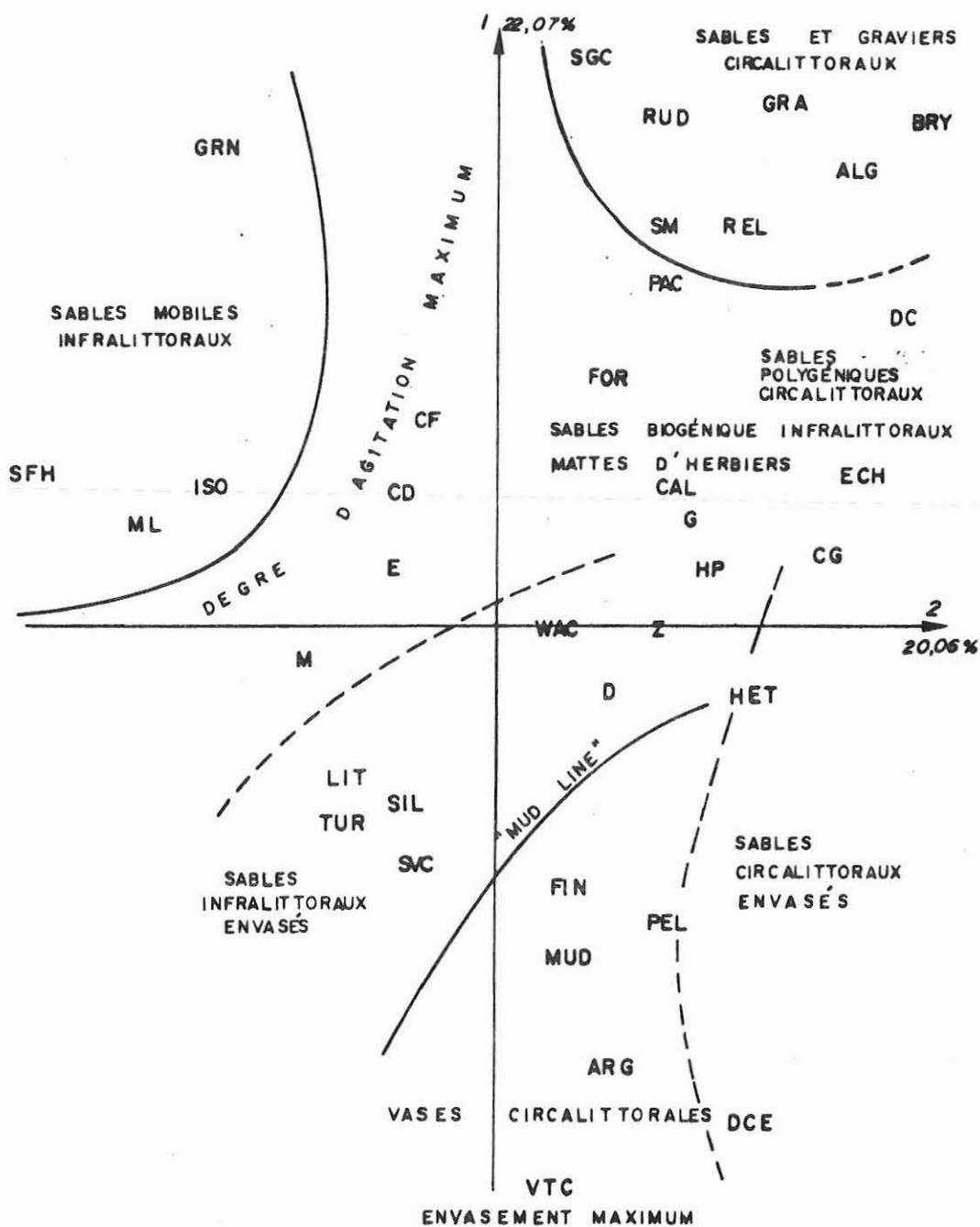
- . Axe 1 : 22,07 %,
- . Axe 2 : 20,06 %,
- . Axe 3 : 8,43 %,
- . Axe 4 : 7,36 %.

L'explication des axes comporte l'examen des coordonnées, corrélations (COR) et contributions relatives (CTR) décroissantes.

- . Axe 1 : 22,07 % (fig. 18).

VARIABLES	ECHANTILLONS	INTERPRETATION
.. Sable moyen	:G 29, G 36, H 43, H 45:	.. Influence des remaniements:
.. Sables et graviers re-	:H 48, H 57, L 64, L 65:	et des lessivages liés à :
espace: maniés par les cou-	:C 78, C 79, T 88.	: l'hydrodynamisme :
: + : rants de fond	:Herbiers profonds, :	:
:	:fonds lessivés et re-:	:
:	:maniés, Détritique cô-:	:
:	:tier.	:

Fig. 18 - SEDIMARGE TOTAL



VARIABLES	ECHANTILLONS	INTERPRETATION
:. Fraction fine	:S 3, S 6, S 10, S 11,	:. Influence du gradient
:. Pélites	:S 13, S 15, S 16, S 18,	: d'envasement
:espace: . Argiles	:B 21, B 24, B 25,	:
: - :. Turbidité	:F 18, F 19, F 21,	:
:	:Saintes Maries de la Mer:	:
:	:Beauduc, Fréjus, Facières :	:
:	:des VTC et du DCE, pas-	:
:	:sage aux SVMC	:
:	:	:

. Axe 2 : 20,06 % (fig. 18).

VARIABLES	ECHANTILLONS	INTERPRETATION
:. Débris biogènes hétérom.	:H 53, H 56, H 57, H 58, :T 83,	:. Influence des stocks bioclastiques liés aux
:espace: . Profondeur	:Mattes de l'herbier à	: peuplements benthiques
: + :. Algues	:Posidonies en équilibre	:
:. Teneurs en carbonates	:Détritique côtier	:
:. Distance à la côte	:	:
:. Sables fins hauts ni-veaux	:F 15, F 14, F 13, F 12, :F 1, F 22, L 70, P 76,	:. Milieux agités et les- sifs ; actions hydro-
:. Quartz	:S 2, G 35, L 62, F 24,	: dynamiques prépondéran-
:espace: . Minéraux lourds	:M 2, M 3, M 6, F 23,	: tes
: - :. Isométrie	:F 26,	:. Apport détritique
:. Texture grainstone	:Sables fins des hauts	:. Influence du courant
:. Influence du littoral	:niveaux, prisme littoral:	: général
:. Pollutions	:à minéraux	:
:. Degré d'agitation	:	:
:	:	:

. Axe 3 : 8,43 % (fig. 19 et 20).

VARIABLES	ECHANTILLONS	INTERPRETATION
.. Silts	:S 1, S 19, B 23, B 21,	.. Action des courants et
.. Sables vaseux de mode	:B 26, B 27, B 28, L 62,	: dépôts de sables plus
espace: calme	:C 77, C 81, T 88,	: ou moins colmatés dif-
+ .. Courants de dérive	:Sables vaseux de mode	: ficiles à interpréter
.. Courants de fond	:calme et sables et gra-	:
:	:viers remaniés (courants)	:
.. Texture packstone	:F 16, F 28, F 27, F 29,	.. Envasement généralisé
espace:.. Texture floatstone	:F 17,	: et occultation de la
- .. Micas	:Sables envasés du détri-	: porosité
.. Texture mudstone	:tique côtier ou du pris-	:
:	:me littoral	:
:	:Vases sableuses à Turi-	:
:	:telles	:
:	:	:

. Axe 4 : 7,36 %.

VARIABLES	ECHANTILLONS	INTERPRETATION
.. Peuplements du circa-	:G 36, G 37, H 43, H 54,	.. Sédimentation polygéné-
: littoral supérieur	:H 55, H 59, L 60, P 71,	: que et hétérogène du
espace:.. Influence de la pro-	:P 72, P 73, C 82, T 84,	: circa littoral
+ : fondeur	:T 87, F 18, F 19, F 21,	.. Interprétation diffici-
.. Influence du courant	:F 27, F 28, M 8, M 10,	: -le
: général	:Sédiments hétérométri-	:
.. Echinodermes	:ques du détritique cô-	:
.. Sédiments reliques	:tier	:
.. Texture floatstone	:H 51, F 16, S 14, B 26,	.. Sédimentation colmatée
.. Rudstone	:B 27, B 28, G 34, G 39,	: des sables terrigènes
espace:.. Texture wackestone	:H 46, H 47, L 64, T 88,	: ou biogènes de l'infra-
- .. Texture mudstone	:Sables vaseux de mode	: littoral et du circa-
.. Texture packstone	:calme et sables colmatés-	: littoral
:	:Sables bioclastiques col-	:
:	:matés des herbiers à	:
:	:Posidonies	:







### Applications.

Cette méthode d'analyse permet de préciser :

- 1) la situation et le degré d'évolution d'un front d'envasement (ex. des Saintes Maries de la Mer, Maguelonne, Fréjus).
  
- 2) les aires de dégradation maximale et de menaces potentielles sur les herbiers à Posidonies. Il est possible de séparer et d'exprimer quantitativement la part revenant aux seuls agents mécaniques (houles, vagues, courants) et celle attribuable aux colmatages et pollutions. L'analyse factorielle appliquée aux relevés de texture - porosités du sédiment et aux modalités d'actions hydrodynamiques permet, par la mesure des distances "Khi - 2", d'apprécier la hiérarchie relative des facteurs pour un site déterminé.

## 2) ANALYSE DES VARIABLES.

AXE:	AXE 1	AXE 2	AXE 3	AXE 4	Remarques				
VARIABLES	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	
Teneurs en:"fines"	0,880	0,163							Influence d'un gra-
Pélites	0,825	0,167							dient d'envasement
Argiles	0,823	0,187							et des phénomènes
S. moyens	0,428	0,065							de décantation.
Turbidité	0,351	0,015							Sédimentation terri-
V.T.C.	0,299	0,017							gène fine
Quartz			0,590	0,130					Influence de la sédi-
Minéraux			0,556	0,072					mentation terrigène
lourds									grossière (Quartz mi-
Profondeur			0,494	0,014					néraux denses) en
Carbonates			0,493	0,057					fonction de la pro-
Sables fins			0,474	0,139					fondeur.
S.F.H.N.			0,717	0,048					Influence de la sédi-
Débris bio-			0,540	0,099					mentation biogène
gènes									infra et circalitto-
Algues			0,407	0,042					rale en fonction des
Isométrie			0,401	0,023					peuplements
Grainstone			0,340	0,019					
Influences			0,334	0,050					
littorales									
Micas					0,369	0,199			Colmatage lié à une
Silts					0,273	0,135			sédimentation assez
Packstone					0,264	0,067			fine liée aux cou-
Courants					0,242	0,036			rants
de dérive									
Floatstone							0,649	0,298	Colmatage et occlu-
Rudstone							0,566	0,203	sion de la porosité
Wackestone							0,285	0,069	du sédiment
Mudstone							0,282	0,064	

## 3) ANALYSE DES ECHANTILLONS.

AXES:	AXE 1	AXE 2	AXE 3	AXE 4	Remarques				
:ECHANTILLONS:	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	COR	CTR	
B 24	:0,740	:0,041	:	:	:	:	:	:	:Vases terrigènes cō-
S 6	:0,750	:0,030	:	:	:	:	:	:	:tières et passage aux:
S 3	:0,664	:0,030	:	:	:	:	:	:	:S.V.M.C. à Fréjus,
B 21	:0,663	:0,043	:	:	:	:	:	:	:Beauduc, et Saintes
F 19	:0,623	:0,027	:	:	:	:	:	:	:Maries de la Mer
S 16	:0,647	:0,025	:	:	:	:	:	:	:Envasement général et:
S 18	:0,656	:0,024	:	:	:	:	:	:	:décantations
F 24	:	:	:0,747	:0,023	:	:	:	:	:Milieux très agités
F 12	:	:	:0,745	:0,024	:	:	:	:	:et lessivés par les
F 14	:	:	:0,678	:0,023	:	:	:	:	:vagues et les courants
F 23	:	:	:0,672	:0,022	:	:	:	:	:de dérive, riches en
F 1	:	:	:0,666	:0,021	:	:	:	:	:éléments détritiques
M 6	:	:	:0,635	:0,016	:	:	:	:	:isométriques.
S 2	:	:	:0,662	:0,019	:	:	:	:	:Prisme littoral et
L 70	:	:	:0,627	:0,027	:	:	:	:	:sables fins des hauts:
P 76	:	:	:0,622	:0,025	:	:	:	:	:niveaux infralittoral:
B 28	:	:	:	:	:0,347	:0,040	:	:	:Milieux envasés du
F 16	:	:	:	:	:0,329	:0,283	:0,623	:0,613	:détritique côtier
B 20	:	:	:	:	:0,369	:0,037	:	:	:(circalittoral) et
B 23	:	:	:	:	:0,321	:0,026	:	:	:des sables infra-
B 27	:	:	:	:	:0,315	:0,040	:	:	:littoraux
F 28	:	:	:	:	:0,280	:0,025	:	:	:
H 51	:	:	:	:	:	:	:0,237	:0,015	:Sédiment colmaté

#### 4) CLASSIFICATION DES FACIES SEDIMENTAIRES.

L'analyse de 46 variables pour 119 échantillons, répartis de Fréjus à Maguelonne, pour une profondeur comprise entre zéro et - 55 m, fait ressortir sept types de sédiments correspondant à des nuages, groupes ou alignements de points. Les liaisons variables - variables, variables - échantillons, échantillons entre eux, obtenues par l'analyse factorielle des correspondances, ont été par ailleurs confrontées avec les résultats des tests d'échantillonnage et l'analyse de la variance pour une ou deux voies.

Les groupements sont conditionnés par 3 niveaux de "clusters" hiérarchisés,

- à partir de la variance,
- par la technique du "saut moyen",
- par la distance du "Khi - 2", sur les graphes d'ordination.

1) Premier niveau : variables du 1er ordre, fondamentales, absolument nécessaires à l'individualisation d'un groupe ("grappe"). La distance est très faible : parfois même la variable demeure interne au nuage et articule sa structure.

2) Deuxième niveau : variables du 2ème ordre, presque toujours présentes et actives, mais à une distance supérieure vis à vis du groupe précédent.

3) Troisième niveau : variables du 3ème ordre, non indispensables et souvent non représentées. Mais l'analyse factorielle, le calcul des valeurs propres, corrélations et contributions relatives, montrent une influence certaine de ces dernières.

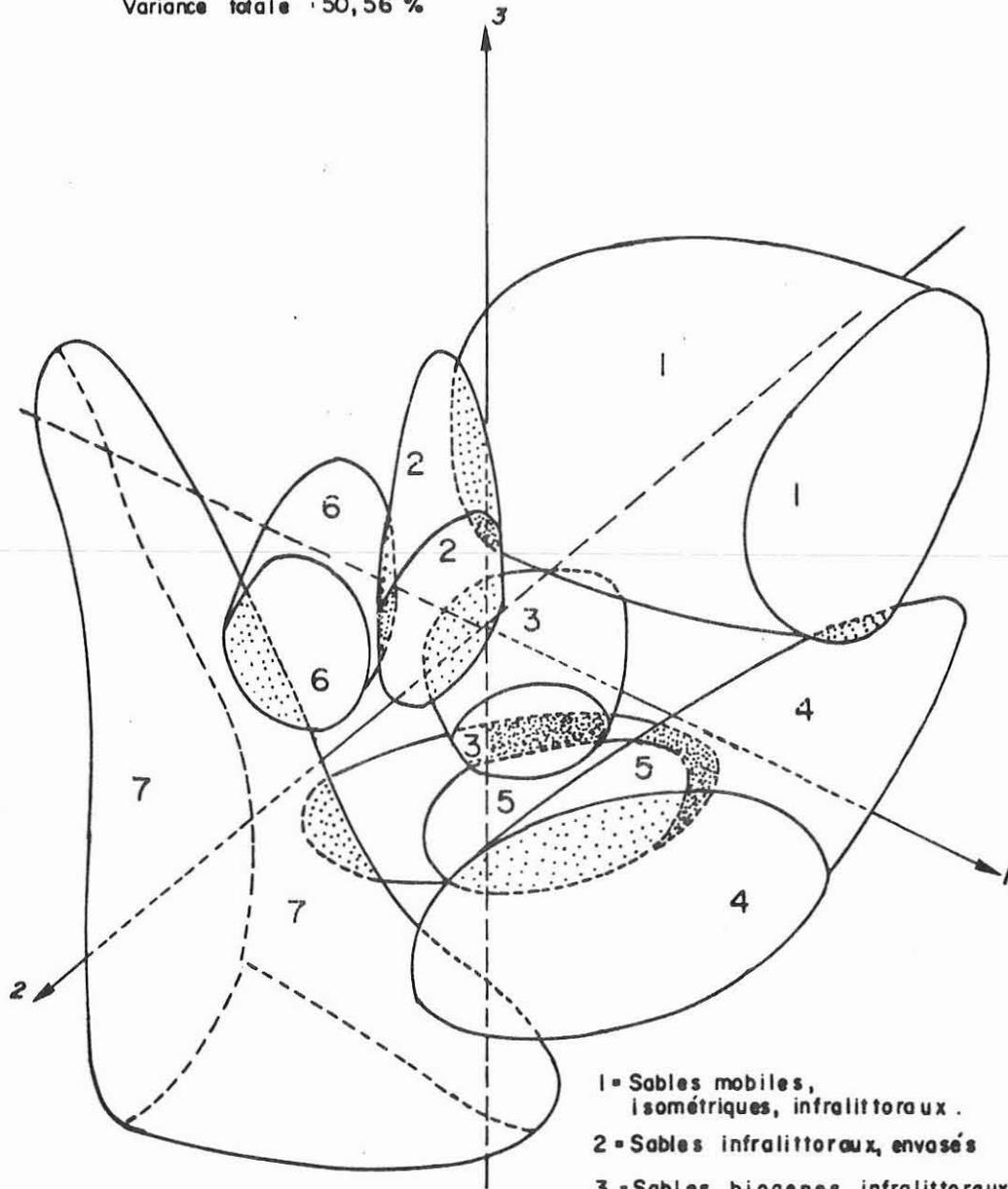
L'ordre de ces variables (facteurs) sera exposé dans le sens d'une contribution décroissante, pour chaque niveau considéré.

##### 1°) Sables mobiles isométriques infralittoraux (fig. 21).

Sables bien classés du prisme littoral, cordons sous-marins et S.F.H.N., brassés par les vagues, déferlements et courants de décharge. Le stock terrigène minéral domine et se trouve l'objet de déplacements latéraux parallèles au rivage (transferts) ou de cheminements vers le large (courants sagittaux).

- profondeur : de zéro à - 12 m ; parfois maxima à - 22 m.
- distance à la côte : de quelques m. à 2,5 km.

Fig. 21 - SEDIMARGE TOTAL - Espace des trois premiers axes  
 Variance totale : 50,56 %



- 1 = Sables mobiles, isométriques, infralittoraux.
- 2 = Sables infralittoraux, envasés
- 3 = Sables biogènes infralittoraux. Herbler à Posidonies

- 4 = Sables et graviers circalittoraux
- 5 = Sables polygéniques circalittoraux
- 6 = Sables circalittoraux envasés
- 7 = Vases circalittorales

- biocoenoses : sables fins des hauts niveaux, fonds à Pélécy-podes.
- Microfaune : souvent absente, remaniée, très usée. Foraminifères infralittoraux : Milioliidae, Elphidiidae.

\* Variables du 1er ordre.

... par ordre d'influence ("distance" minimale) par rapport au centre de gravité du nuage :

- . sables fins des hauts niveaux (biocoenoses),
- . matériau isométrique (lessivage poussé),
- . ensemble édaphique infralittoral,
- . texture grainstone (forte porosité),
- . concentrations en minéraux denses.

\* Variables du 2ème ordre.

... même remarque quant à l'ordonancement :

- . courants de dérive (impact des facteurs météorologiques),
- . courants de fond (courants de décharge),
- . niveau d'agitation élevé à très élevé,
- . apports en quartz détritique.

\* Variables du 3ème ordre.

- . profondeur (inféodée à la zone infralittorale),
- . influence lithologique du littoral (r. métamorphiques),
- . distance au rivage.

- faciès lithologique correspondant : grès isométriques.

- Applications.

- . porosité élevée, rétention forte des hydrocarbures,
- . portance à surveiller pour les fondations et ancrages, mouillages de blocs avec parfois des tassements de 1 m,
- . tenue mauvaise des tranchées : boulanges du sable,
- . extraction dangereuse pour la sécurité du littoral,
- . présence de transferts (pollutions éventuelles),
- . concentrations de minéraux denses (grenats, zircons, hématite, magnétite, titanomagnétite, disthène, pyroxènes, etc ...),

- . fonds de pêche (poissons "blancs", Tellines).

## 2°) Sables infralittoraux envasés (fig. 21).

Des arrivées de matières fines en suspension colmatent les sables infralittoraux et maints passages s'observent entre les sables vaseux et les vases sableuses. Ces envasements correspondent souvent aux fonds de baies, aux termes des transferts ou encore à la proximité du débouché des rivières.

- . profondeur : de zéro à - 24 m,
- . distance au rivage : de quelques mètres à 3 km,
- . biocoenoses des S.V.M.C., herbiers à Zostéracées, Caulerpes, Cymodocées,
- . microfaune : très riche, bien conservée, souvent liée aux herbiers à Cymodocées : Miliolles, Elphidium, Nonion, etc ...

### \* Variables du 1er ordre.

- . turbidité,
- . biocoenoses des sables vaseux de mode calme,
- . apports en silt,
- . influence lithologique du littoral.

### \* Variables du 2ème ordre.

- . dépôt des micas (flottation),
- . conditions édaphiques de l'étage infralittoral,
- . action des courants de dérive.

### \* Variables du 3ème ordre.

- . texture wackestone : occlusion de la porosité presque totale,
- . distance au rivage,
- . profondeur.

- faciès lithologique correspondant : grès marneux, grès micacé.

### - Applications.

- . zones souvent polluées,

- . relations avec des flux turbides, hydrocarbures, etc ...,
- . porosité faible mais rétention encore assez élevée des hydrocarbures en cas de sinistre. Rétention des métaux lourds,
- . portance variable, à surveiller, tassements, fluages,
- . éboulements de tranchées (cf. "sea line"),
- . colmatages des fonds en progression.

### 3°) Sables biogènes infralittoraux ; "mattes" de l'herbier à Posidonies.

Ce sont les sables coquilliers, souvent hétérométriques, des herbiers à Posidonies, fonds à Cymodocées, Caulerpes, etc ... Les phénomènes de "piégeage" dominant et, par la rétention du stock biogène, amènent un rapide exhaussement du fond jusqu'à un niveau critique d'érosion. On peut même y observer la formation de cycles "emboîtés" (Blanc, 1974, 1975 ; Blanc et Jeudy de Grissac, 1978) (fig. 21).

- . profondeur : de 1 à - 25 m, parfois, maxima à - 32 m,
- . distance à la côte : de quelques mètres à 4 km ou 5 km,
- . biocoenoses de l'herbier à Posidonies, zone euphotique,
- . riche microfaune, souvent sessile : Milioliidae, Elphidiidae, Nonionidae, Sorites, etc ...

#### \* Variables du 1er ordre.

- . teneur élevée en carbonate liée à la quasi totalité en composants biogéniques,
- . abondance des Gastéropodes (peuplements liés aux herbiers),
- . richesse en Foraminifères benthiques,
- . peuplements de l'herbier à Posidonies (relations avec les variations saisonnières, chute et transfert des frondes, etc ...).

#### \* Variables du 2ème ordre.

- . profondeur (réglant la pénétration de la lumière),
- . texture wackestone : le colmatage du sédiment diminue sa porosité qui peut cependant demeurer notable.

#### \* Variables du 3ème ordre.

- . distance au rivage,

. hétérométrie du matériau en relation avec les chutes et le dépôt sub- autochtone des débris et organismes.

- équivalence lithologique : calcarénites et rudites hétérométriques.

- Applications.

- . fonds de pêche à protéger en priorité, milieu très fragile,
- . portance moyenne à bonne,
- . porosité moyenne, parfois bonne. Importante rétention des hydrocarbures,
- . extraction dangereuse pour les peuplements et l'équilibre du profil littoral,
- . tranchées et excavations stables, malgré des profils verticaux, en l'absence d'affouillement par les courants de fond. Mais, on observe un mécanisme de "piégeage" et de pollution dans les dépressions.

4°) Sables et graviers circalittoraux (fig. 21).

Ce sont des éléments biogènes remaniés issus de l'érosion des fonds d'herbier ou des zones coralligènes. Ces graviers sont accompagnés par des peuplements alguaires encroûtants (Algues rouges, mélobésiées) et des granules d'origine terrigènes, actuels ou quaternaires. L'ensemble est souvent l'objet de remaniements par les courants de fond.

- profondeur : de - 25 à - 50 m,
- distance au rivage : variable, de 500 m à 2 ou 3 km. Zones de hauts fonds situées au large, passes entre les îles, etc ...,
- biocoenoses des sables et graviers remaniés par les courants de fond (S.G.C.F.),
- microfaune : suite des ensembles infralittoraux, espèces fossiles remaniées, Miliolae, Spiroloculina, Ophthalmodiidae, etc ...

\* Variables du 1er ordre.

- . teneur élevée en graviers et granules,
- . texture rudstone : porosité très élevée,
- . abondance des Algues (Méllobésiées),
- . biocoenoses des S.G.C.F.,
- . Bryozoaires,

. sédiments reliques du Quaternaire.

\* Variables du 2ème ordre.

- . texture packstone : porosité assez élevée,
- . biocoenoses du "détritique côtier",
- . Foraminifères.

\* Variables du 3ème ordre.

- . sables moyens,
- . texture grainstone : très bonne porosité,

- faciès lithologique équivalent : rudstone, rudites, biolithites, rhodolites.

- Applications.

- . graviers exploitables sauf contre indication biologique,
- . fonds de pêche,
- . courants de fond et remaniement des câbles et "sea-line".

Il faut prévoir un "ensouillage" soigné,

- . porosité bonne à très bonne,
- . portance généralement satisfaisante,
- . tranchées stables, sauf ravinements.

5°) Sables polygéniques circalittoraux.

Ils résultent de mélanges d'éléments terrigènes grossiers et fins et de matériaux d'origine biodétritique. Des stocks fossiles immergés lors de la dernière transgression peuvent s'y ajouter. Cet ensemble complexe nous introduit nettement parmi les assemblages biocoenotiques de l'étage circalittoral (fig. 21).

- . profondeur : de - 25 à - 30 m à - 90 m,
- . distance au rivage : de quelques centaines de m. au large (plusieurs km.),
- . biocoenoses du "détritique côtier",
- . microfaune riche : Milioliidae, Nonionidae, Textulariidae, Lagenidae et Globigerinidae (esp. pélagiques).

\* Variables du 1er ordre.

- . biocoenoses et assemblages du "détritique côtier" et des fonds "coralligènes" remaniés,
- . échinodermes (circalittoral),
- . bryozoaires (circalittoral).

\* Variables du 2ème ordre.

- . texture packstone à porosité moyenne ou assez bonne,
- . sédiments reliques d'âge quaternaire récent (Würm sup. à Holocène),
- . Foraminifères.

\* Variables du 3ème ordre.

- . influence du courant général (conditions du large),

- équivalences lithologiques : calcarénites, calcaires détritiques, grès hétérométriques.

- Applications.

- . sables exploitables compte tenu des contraintes (Blanc, 1975, 1975),
- . porosité convenable, ancrages sûrs,
- . tranchées stables ; teneurs en "fines" à contrôler,
- . risques de pollution par rétention et par piégeage,
- . zones possibles de "dumping" après une étude du site (biocoenoses, hydrologie et sédimentologie),
- . importantes superficies disponibles à faible distance du littoral et des agglomérations. Nécessité d'études d'impact.

6°) Sables circalittoraux envasés.

Il s'agit d'un envasement et colmatage du faciès précédent.

- profondeurs : de - 30 m à - 50 m,
- distance au rivage : variable, cf. faciès 5,
- biocoenoses du "détritique côtier envasé",
- foraminifères : cf. faciès 5 et espèces vasicoles en développement.

\* Variables du 1er ordre.

- . biocoenoses du "détritique côtier envasé",
- . matériaux hétérométriques,
- . pélites (en nette augmentation).

\* Variables du 2ème ordre.

- . texture mudstone ; porosité nulle à très faible,
- . teneurs en fraction fine (augmentation),
- . argile.

\* Variables du 3ème ordre.

- . distance au rivage,
- . profondeur,
- . relations avec les peuplements benthiques des V. T. C.,

- équivalences lithologiques : calcarénites marneuses, marnes à débris biogènes, marnes détritiques.

- Applications.

- . porosité nulle à faible,
- . accumulations sur le fond des hydrocarbures lourds,
- . portance variable,
- . risques locaux d'affaissement,
- . stabilité variable des talus et tranchées,
- . parfois, présence de smectites (précautions particulières),
- . pollution (pesticides, métaux lourds).

7°) Vases circalittorales (fig. 21).

Elles correspondent au "pôle" d'envasement maximum et ont tendance à s'étendre largement sur la marge continentale. Ce faciès est issu de la décantation de flux turbides liés aux fleuves (Rhône, Var) et aux apports torrentiels fins.

- profondeurs : de quelques mètres (delta du Rhône) à - 180 m,
- distances au rivage : variables en fonction du degré d'envasement

et de sa progression.

\* Variables du 1er ordre.

- . biocoenoses des "vases terrigènes côtières" (V. T. C.),
- . argiles,
- . texture mudstone, absence de porosité,
- . fraction fine (dominante),
- . pollution,
- . pélites (dominante).

\* Variables du 2ème ordre.

- . biocoenoses du "détritique côtier envasé",
- . biocoenoses des "sables vaseux de mode calme",
- . distance au rivage.

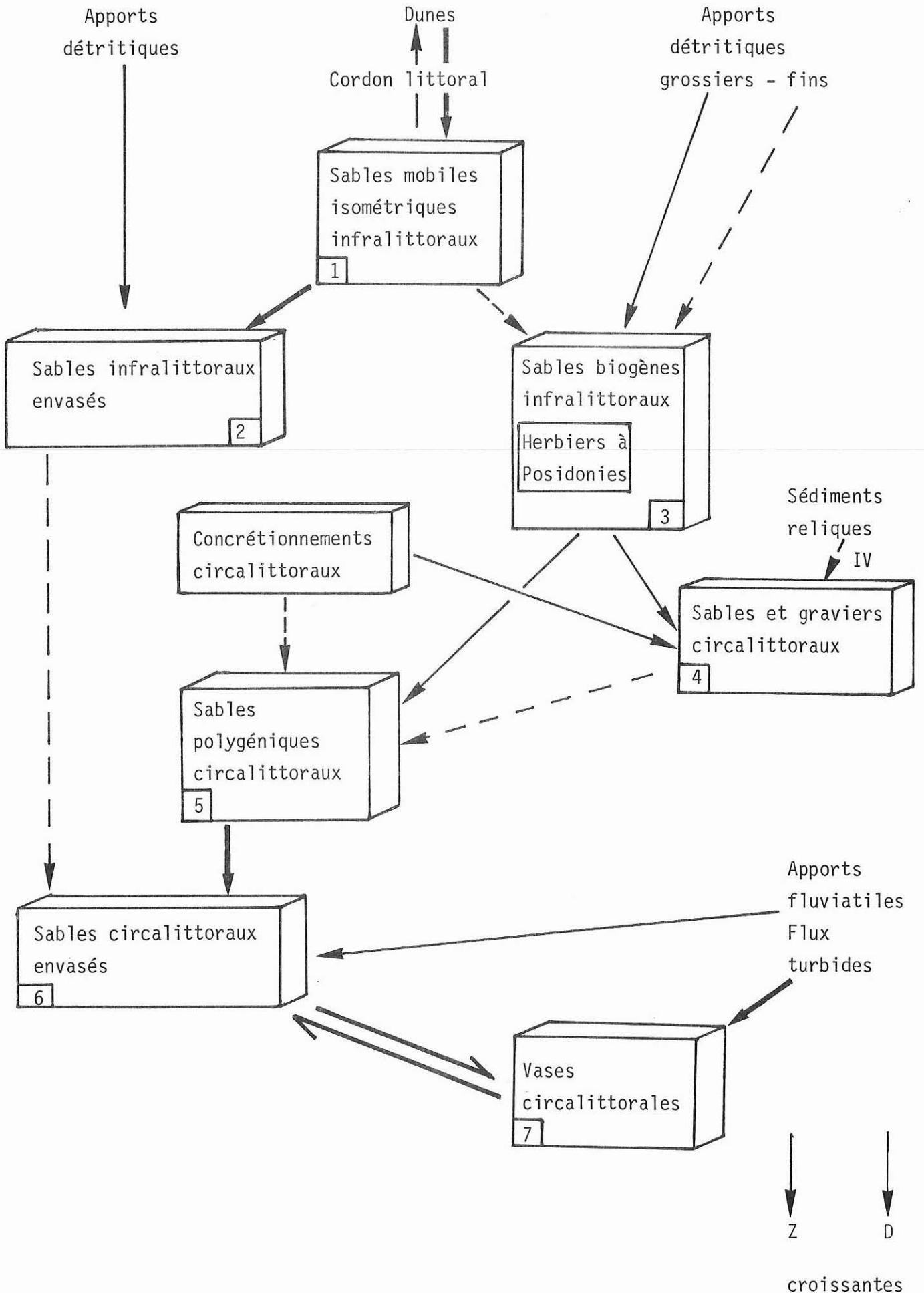
\* Variables du 3ème ordre.

- . profondeur,
- . texture wackestone,
- . silts (près des émissaires et des embouchures),

- équivalence lithologiques : micrites, pélites, marnes, argilites.

- Applications.

- . porosité nulle à très faible, couche néphéloïde,
- . réductions et formation de pyrite, hydrotroïlite,
- . portance faible à surveiller ; forte teneur en eau et, parfois, thixotropie ; affaissements très dangereux,
- . éboulements continus des tranchées, fouilles et chenaux dragués, instabilité des talus si les pentes sont élevées,
- . présence de smectites et risques de rétention de métaux lourds, détergents, hydrocarbures,
- . pollutions (émissaires, épandages pluviaux et fluviatiles),
- . zones possibles de "dumpings" non polluants,
- . grande superficie disponible,
- . extension éventuelle à surveiller.



## 5) HIERARCHIE DES VARIABLES.

On distinguera 3 types de variables (facteurs) :

- spécifiques à un type précis de faciès sédimentaires, choisies parmi les variables du 1er ordre,

- ubiquistes, quel que soit leur ordre, souvent présentes pour plusieurs types de faciès sédimentaires,

- liées entre elles par une corrélation forte ou liées à un axe factoriel par une corrélation et ou une contribution relative significative.

1°) Variables spécifiques : un seul type de milieu sédimentaire.

1.1. : Sables mobiles isométriques du prisme littoral.

Par ordre de distance croissante ...

- biocoenoses des sables fins de hauts niveaux,
- matériau isométrique (lessivage lié aux déferlements),
- texture grainstone,
- minéraux denses (concentrations).

Ces 4 facteurs spécifiques sont suffisants (1er ordre).

1.2. : Sables infralittoraux envasés : même ordre de distances décroissantes.

- turbidité élevée,
- biocoenoses des sables vaseux de mode calme,
- teneurs en silt élevées,
- influences de l'héritage littoral.

Ces 4 facteurs spécifiques (1er ordre) sont suffisants.

1.3. : Sables biogènes infralittoraux, mattes de l'herbier à Posidonies.

- teneurs élevées en carbonates,
- abondance de Gastéropodes,
- abondance de Foraminifères,
- biocoenoses de l'herbier à Posidonies.

Ces 4 facteurs spécifiques du 1er ordre suffisent.

1.4. : Sables et graviers circalittoraux.

- . teneurs élevées en graviers et granules,
  - . texture rudstone,
  - . algues dominantes (Rhodophycées),
  - . biocoenoses des sables et graviers sous l'influence des courants de fond.
- Quatre facteurs.

1.5 : Sables polygéniques circalittoraux.

- . biocoenoses du "détritique côtier",
- . abondance de débris d'échinodermes. 2 facteurs du 1er ordre,
- . facteur du 3ème ordre : influence du courant général.

1.6. : Sables circalittoraux envasés.

- . biocoenoses du "détritique côtier envasé",
  - . matériau hétérométrique (colmatage par les pélites),
- 2 facteurs du 1er ordre.

1.7. : Vases circalittorales.

- . biocoenoses du faciès des V. T. C.,
- . argiles,
- . texture mudstone dominante. 3 facteurs du 1er ordre.

22 facteurs spécifiques caractérisent les faciès décrits à la zone supérieure de la marge continentale, à partir des 46 variables choisies initialement.

2°) Variables ubiquistes : plusieurs types sédimentaires.

Citons, par ordre de fréquence :

- . distances à la côte,
- . profondeur,
- . texture wackestone,
- . courant de dérive,
- . sédiments reliques,
- . Bryozoaires,
- . fraction fine.

Il s'agit généralement de variables du 2ème ordre ou du 3ème ordre.

### 3°) Liaisons entre les variables : Analyse hiérarchique.

Une liaison significative et forte entre des facteurs, permet une économie notable de variables et une plus grande vitesse d'exécution dans les analyses des faciès sédimentaires de la marge continentale. Les variables à corrélations positives très élevées sont marquées par une distance du "Khi - 2" la plus faible possible.

#### 3.1. : Liaisons fortes.

##### 3.1.1. : Plan des axes factoriels 1 et 2.

. Argiles - biotopes du "détritique côtier" envasé - biotopes des V. T. C.,  
 . Influences du littoral - turbidité,  
 . Texture wackestone - profondeur - distance au rivage,  
 . Biotopes des "sables vaseux de mode calme" - teneurs en fraction fine - teneurs en pélites.

##### 3.1.2. : Plan des axes factoriels 1 et 3.

. distance à la côte - hétérométrie des matériaux - profondeur - Gastéropodes - Lamellibranches.

#### 3.2. : Liaisons significatives mais moyennes.

##### 3.2.1. : Plan des axes factoriels 1 et 2.

. Courants de fond - courants de dérive - niveau d'énergie,  
 . biotopes des "sables vaseux de mode calme" - teneurs en pélites,  
 - texture mudstone.

. teneurs en graviers - biotopes des S. G. C. F. - texture rudstone - Algues - sédiments reliques - Bryozoaires.

##### 3.2.2. : Plan des axes factoriels 1 et 3.

. texture gainstone - Algues - sable moyen - sédiment relique,

- . sables fins - minéraux lourds - Foraminifères,
- . biotopes infralittoraux - courants de dérive - courants de fond - sables grossiers.

### 3.2.3. : Plan des axes factoriels 2 et 3.

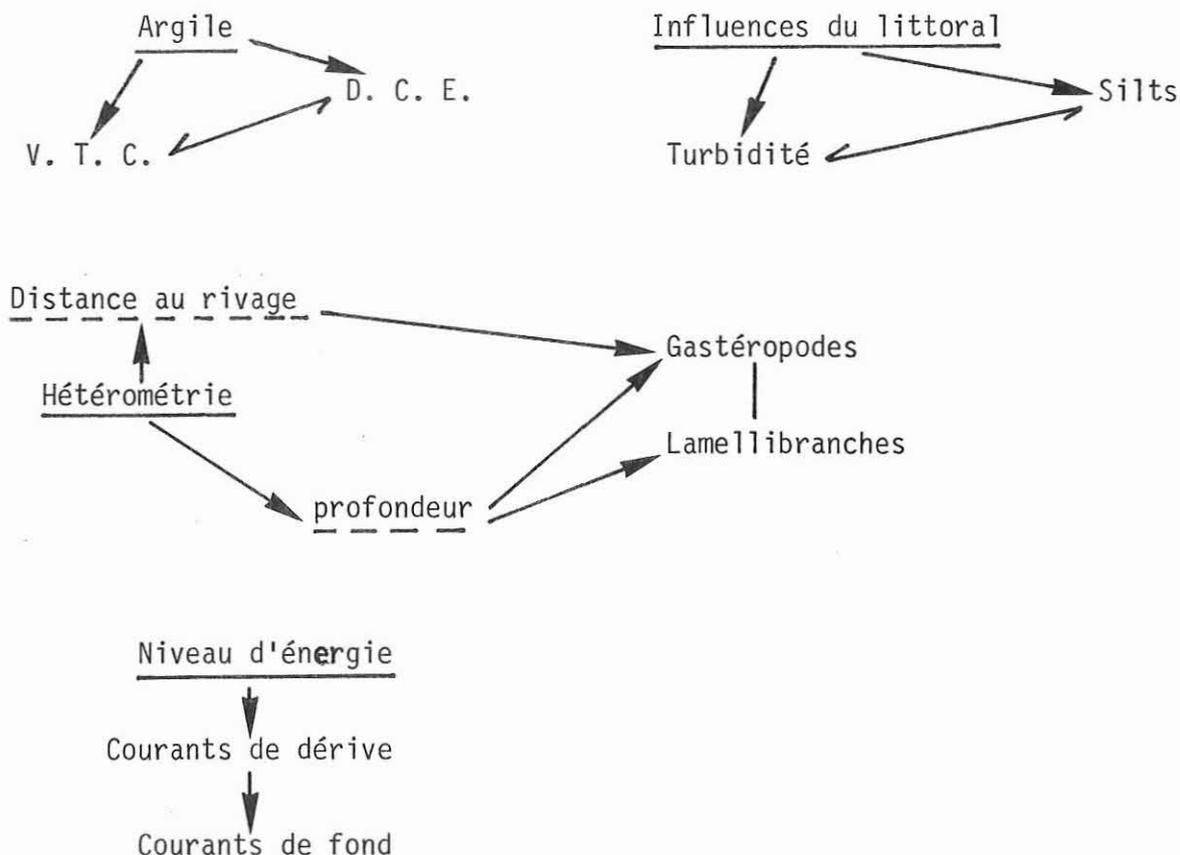
- . biotopes du "détritique côtier" - Echinodermes - courant général - Bryozoaires,
- . profondeur - sable moyen - Gastéropodes - Foraminifères.

### Applications.

Cinq variables apparaissent prioritaires pour la caractérisation des différents types de fonds :

- 1) teneurs en argile,
- 2) nature géologique du littoral (molasses, calcaires, r. métamorphiques, etc ...),
- 3) hétérométrie (ou isométrie) des matériaux,
- 4) influence de la pente moyenne des fonds,
- 5) niveau d'énergie hydrodynamique.

D'où le schéma :



Ainsi, à partir de 48 variables initiales, on a successivement sélectionné : 46 var., 22 var. et 5 variables. Ces dernières peuvent être utilisées comme "pôles" pour les investigations ultérieures dans des secteurs géographiques à régime comparable.

#### 6) HIERARCHIE DES ECHANTILLONS : CLASSIFICATION AUTOMATIQUE DES FACIES SEDIMENTAIRES.

- . Données d'entrée : 119 échantillons, 46 variables,
- . Programme HIERARCHIE (disque LAPM 01),
- . Dendrogramme établi sur variances interclasses et intraclasses.

3 groupes fondamentaux sont isolés par l'ordinateur. Ces grappes s'avèrent totalement indépendantes ("liaisons" à 0,010 et 0,090).

1) Groupe I : Sables mobiles infralittoraux (faciès 1), d'origine détritique, riches en minéraux denses, isométriques et lessivés.

La machine isole :

I.1 : sables de la Pointe de Beauduc (Camargue),

I.2 : sables de Fréjus et Maguelonne, Pointe de Saint Tropez,

I.3 : sables des chenaux, mêlés à des graviers mobiles, dans les zones à courants sagittaux et courants de décharge (Maguelonne, Fréjus, Pointe de Saint Tropez).

I1, I2, I3 sont corrélés à 0,655 malgré les différences lithologiques et courantologiques des littoraux.

2) Groupe II : Sables et graviers biogènes (groupant les faciès 3, 4 et 5, "lié" au groupe 1 à 0,090 (indépendance).

3 "clusters" sont isolés par la machine :

II.1. : Sables et graviers mobiles, faciès à Algues, "maërl", de l'infralittoral et du circalittoral supérieur, en relation avec les courants de fond et les chenaux d'érosion de l'herbier à Posidonies. (Giens, Cap Camarat, Cap Lardier, Pointe de Saint Tropez, liés entre eux par des corrélations très fortes : noeuds à 0,990 et 0,995).

II.1 groupera une partie des éléments du faciès 4 (sables et graviers mobiles circalittoraux).

II.2. : Sables polygéniques circalittoraux (faciès 5).

Il s'agit d'une très large grappe (noeud à 0,710) divisée en 2 clusters

à 0,750. On y trouve les faciès à peuplements du D C, du D C envasé voire des "marmites" envasées de l'herbier à Posidonies.

Ce faciès est général pour toute la zone étudiée. Des subdivisions plus fines exigeraient un plus grand nombre d'échantillons.

II.3. : Sables biogènes infralittoraux, faciès hétérométriques, sédiments des "mattes" de l'herbier à Posidonies.

Ce sont les faciès 3 et quelques variantes :

- sables infralittoraux liés aux roches sous-marines de Maguelonne (grès quaternaires), sables biogènes envasés de Maguelonne en milieu infralittoral (flux turbide du Lez).

- cas des herbiers profonds proches du type 5, herbiers envasés, etc ...

Le programme isole en "sous-grappes", corrélées à 0,965, 0,970, 0,990, les sites de Giens, Hyères, Maguelonne. On note aussi des mélanges anormaux, prélèvements marginaux (ou erreurs d'échantillonnages).

II.3 et II.2 sont liés à 0,965, ce qui souligne la liaison très robuste entre les faciès de l'herbier et du détritique côtier.

3) Groupe III : Faciès envasés : Progression du gradient d'envasement concernant les faciès 2, 6 et 7. Ce groupe n'a aucune liaison significative avec les deux autres (0,010).

3 sous-groupes sont isolés par la machine :

III.1. : Envasement maximum des vases circalittorales (faciès 7) et des sables polygéniques circalittoraux (une grappe compacte pour les sédiments du Golfe de Fréjus, à 0,995).

III.2. : Envasement infralittoral et circalittoral des golfes des Saintes Maries et Giens. Il s'agit de sables très rapidement colmatés.

Les groupes III.1 et III.2 sont liés à 0,790.

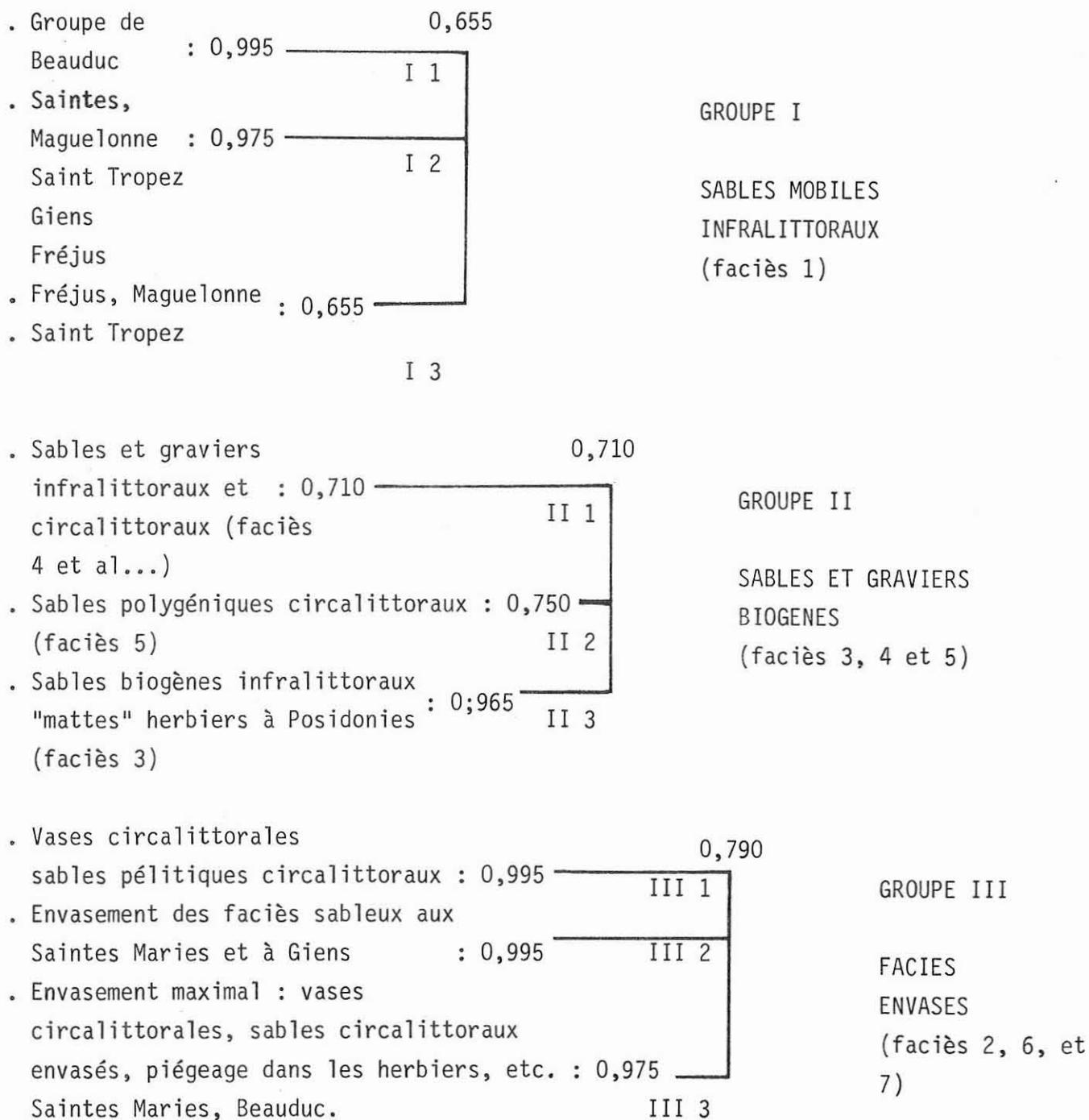
III.3. : Très fortement lié aux 2 groupes précédents (noeud à 0,975), ce sous-groupe exprime un fort envasement en milieu circalittoral sableux, à partir des sables mobiles du faciès 1 ou des sables polygéniques circalittoraux, et aussi des faciès de "piégeage" (et de pollution), dans les "mattes" de l'herbier à Posidonies (Hyères, Saintes Maries, vases au large de la Pointe de Beauduc).

En résumé.

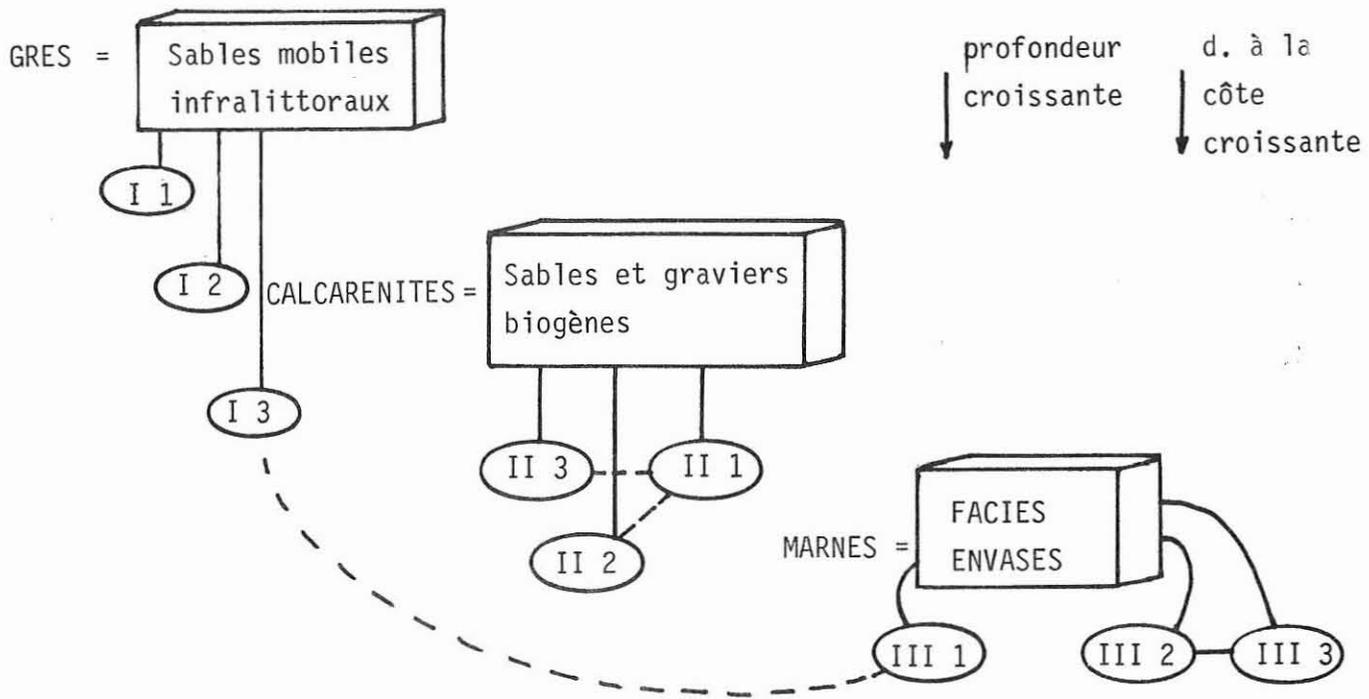
3 groupes très nets expriment, dans la classification automatique des sédiments, 3 types de situations :

- groupe I : sédimentation littorale détritique : sables (grès),
- groupe II : sédimentation biogène ou mixte : sables, graviers, (calcarénites, rhodolites),
- groupe III : sédimentation terrigène fine : sables vaseux, vases (marnes).

D'où le schéma :



Il en résulte le modèle hiérarchisé :



## CONCLUSIONS - APPLICATIONS

Les recherches entreprises par le programme "SEDIMARGE" font apparaître les résultats suivants :

1°) DIFFICULTEES D'UNE CLASSIFICATION DES SEDIMENTS DE LA MARGE CONTINENTALE SUPERIEURE.

1) Au départ, on soulignera les difficultés rencontrées dans l'établissement d'une classification et d'une terminologie appliquées aux faciès de la plate-forme continentale, pour un domaine bathymétrique allant de zéro à - 60 m. Ces dernières sont de deux ordres, à la fois sémantiques et pratiques. Elles correspondent à une inadaptation des faciès biocoenotiques définis par Pérès et Picard vis à vis des types de sédiments, cette dernière s'accompagnant d'ambiguïtés terminologiques ("coralligène", "détritique côtier", "vases terrigènes côtières").

La recherche des termes lithologiques équivalents dans les milieux anciens, notamment pour le cas des séquences terrigènes et carbonatées, complique encore le problème. Il devient alors nécessaire, en plus des variables habituelles (profondeur, distance à la côte, nature du peuplement benthique, etc ...), de traiter l'influence de la texture, porosité, ciment matriciel, classement, dépôts "reliques", marges bathymétriques et correspondances, souvent significatives, avec les débris d'organismes.

2) L'aménagement de la marge continentale, pour la partie supérieure, seule considérée ici, doit prendre en compte un certain nombre de variables complémentaires intercalables dans des fichiers ouverts :

- milieu hydrodynamique et niveau d'agitation,
- mode de cimentation,
- teneurs en carbonates et en argile,
- porosité,
- tenue mécanique,
- granulométrie (graviers, sables, silts, etc ...).

L'introduction de ces variables complémentaires débouche sur deux considérations pratiques essentielles :

- aptitude à la pollution du sédiment,
- destination potentielle d'un type de fond.

## 2°) RECHERCHE D'UNE METHODOLOGIE ET APPLICATIONS.

1) Ces propos liminaires font ressortir la nécessité d'une méthodologie adaptée à la variété des données : une multitude de facteurs agissent, conjointement ou non, à des niveaux différents. D'où la difficulté d'une taxonomie analogique classique des sédiments littoraux et "néritiques" et la nécessité d'une analyse multivariée. Ainsi, 46 variables qualitatives, quantitatives et semi-quantitatives ont été testées sur 119 échantillons prélevés sur 6 types de sites différents relativement bien connus et cartographiés. Il a été procédé, sur chaque site ou pour des groupes de sites, puis, pour l'ensemble de tous les échantillons, à une analyse de la variance, à une analyse factorielle des correspondances, puis à une analyse hiérarchique.

Les sites choisis sont, de l'Ouest vers l'Est : Maguelonne, baie des Saintes Maries de la Mer et de Beauduc, rades d'Hyères et de Giens, presque île de Saint Tropez, baie de Fréjus. Toutes ces zones correspondent à des milieux très différenciés et soumis à des altérations naturelles et anthropiques.

Partout, se manifestent, conjointement, quatre types d'évolution régissant la répartition et la nature des sédiments :

- 1) facteurs hydrodynamiques,
- 2) influence des prismes littoraux,
- 3) nature des peuplements actuels ou fossiles,
- 4) apports fluviatiles fins, normaux ou accidentels.

2) L'analyse de la variance à une voie permet de tester des hypothèses d'interrelations pour un certain nombre de sites (distributions) ou entre des sites différents.

L'analyse de la variance à deux voies permet de tester l'effet rangées (échantillons) - colonnes (variables).

Le test de Fisher - Snedecor a permis de rejeter des hypothèses non valides et des échantillonnages non représentatifs, au sein d'un ensemble de faciès. Malgré des variances élevées et un grand nombre de degrés de liberté, il a été possible d'exprimer quantitativement, en certains cas :

- l'influence (inégle) de la profondeur,
- les teneurs en graviers et sables grossiers exploitables,

- l'envasement lié aux pélites et argiles.

L'analyse de la variance peut permettre de contrôler la spécificité d'un ensemble sédimentaire vis à vis d'une extraction éventuelle, de dragages sous-marins ou des potentialités d'envasement, colmatages et pollutions.

D'où l'obtention de deux résultats pratiques :

- 1) ordre d'intérêt des exploitations, irrégularités,
- 2) expression quantitative d'un gradient d'envasement.

On notera l'homogénéité et la progression des colmatages liés aux apports rhodaniens et les perturbations en relation avec les "sables reliques" du quaternaire récent, l'influence du courant "ligure", etc ...

### 3°) ANALYSE DES MODELES NATURELS : RESULTATS PRATIQUES.

1) L'analyse factorielle appliquée à des modèles naturels tels que ceux de Maguelonne ou de Fréjus aboutit, par exemple, à la définition d'un faible nombre de variables significatives.

Il en résulte une économie de temps et de moyens dans le "suivi" d'une opération, pour un site donné :

1. Appréciation de la réserve potentielle des sables isométriques infralittoraux indispensable à la sécurité d'un rivage, là où les exploitations doivent être proscrites ou réglementées.

2. Réserve potentielle de sable et graviers circalittoraux.

3. Développement d'un front d'envasement.

4. Pollution "macroscopique" : transferts et aires d'accumulations.

Il en résulte la définition de séries sédimentaires à évolution latérale simple (Saintes Maries de la Mer) et la manifestation de courants de fond vers le large, déjà mis en évidence par d'autres méthodes basées sur les argiles, en des secteurs voisins (Chamley, 1971).

5. L'étude des secteurs d'Hyères et Giens permet de saisir quantitativement l'évolution sous-marine des sédiments en rapport avec la dégradation d'im-

portants herbiers à Posidonies.

Dans l'espace factoriel dégagant le maximum d'informations, on mesure la menace pesant sur un herbier à protéger impérativement, soumis aux pressions humaines liées à l'habitat littoral et à la dégradation mécanique par les facteurs hydrodynamiques classiques. Ces derniers s'avèrent spectaculaires au front de la presqu'île de Saint-Tropez. Ils s'y traduisent par :

- une absence de pollution notable,
- l'importance des graviers et sables bioclastiques étalés par les courants de fond (circalittoral supérieur),
- l'influence du courant général ("courant ligure").

6. Pour la baie de Fréjus, les analyses des "nuages" de points (observations / variables), mettent en évidence l'inter-relation systématique des courants de dérive dispersant les prismes détritiques littoraux, des courants sagittaux et des nodales de seiches, la concentration des minéraux denses par lévigation, l'apport sablo-silteux lié à la catastrophe de Malpasset (1959) et sa dispersion, un envasement inquiétant en progression, relatif aux apports du courant "ligure" et aux émissaires.

2) L'explication des axes factoriels, après un traitement global de toutes les données apporte des résultats nouveaux :

1. Détermination des aires de dégradation maximales et des menaces potentielles (et immédiates) sur les herbiers à Posidonies. Il est possible de séparer et d'exprimer quantitativement la part revenant aux seuls agents mécaniques (houles, vagues, courants) et celle attribuable aux colmatages et pollutions ... mettant ainsi un terme à quelques litiges ...

2. L'analyse factorielle appliquée aux relevés de texture - porosité du sédiment et aux modalités hydrodynamiques, permet, par la mesure des distances, d'apprécier la hiérarchie relative des facteurs pour un site déterminé (Hyères, Giens, Fréjus) ... et leur aptitude à la pollution par les hydrocarbures dans le cas de "marées noires" réelles ou simulées.

#### 4°) CLASSIFICATION DES FACIES SEDIMENTAIRES.

Une classification des faciès sédimentaires a été établie et comporte sept types de sédiments correspondant à des "nuages" ou groupements "échantillons - variables". Ces derniers sont conditionnés par trois niveaux de variables :

- 1) variables spécifiques fondamentales (1er ordre),
- 2) variables actives et présentes pour plusieurs groupements (2ème ordre), souvent assez discriminantes,
- 3) variables du 3ème ordre, facultatives et à faible contribution relative.

Nous distinguerons les types suivants et certaines variables du 1er ordre considérées comme spécifiques :

1. Sables mobiles isométriques infralittoraux : sables fins des hauts niveaux, texture grainstone, très forte porosité, minéraux denses, isométrie.

2. Sables infralittoraux envasés : forte turbidité, sables vaseux de mode calme, teneurs en silts, influence du littoral.

3. Sables biogènes infralittoraux (cf. "mattes" de l'herbier à Posidonies) : fortes teneurs en carbonates, abondance de Gastéropodes et Foraminifères, biotopes d'herbiers, haute porosité.

4. Sables et graviers circalittoraux : teneurs élevées en graviers et granules, texture rudstone, porosité très élevée, Algues abondantes, "reliques".

5. Sables polygéniques circalittoraux : abondance des Bryozoaires et Echinodermes, assemblages benthiques circalittoraux.

6. Sables circalittoraux envasés : biocoenoses circalittorales, matériaux hétérométriques, augmentation des pélites.

7. Vases circalittorales : biocoenoses circalittorales (V. T. C.), fortes teneurs en argile, texture mudstone, porosité primaire nulle, dominance des pélites, aptitude à la pollution.

#### 5°) RECHERCHE DES VARIABLES SPECIFIQUES.

La hiérarchie des variables spécifiques, ubiquistes ou aléatoires, montre trois types de liaisons définissant des "grappes" distinctes et significatives, régissant la classification des faciès : (on utilise la distance du "Khi - 2" ou une autre métrique) :

1. Liaisons fortes : concernant fréquemment des variables discriminantes :

- . Argiles  $\rightleftharpoons$  biotopes vasicoles du DCE et des VTC,
- . Influence du littoral  $\rightleftharpoons$  turbidité,
- . Texture wackestone  $\rightleftharpoons$  profondeur,  
 $\rightleftharpoons$  distance au rivage
- . Biotopes SVMC  $\rightleftharpoons$  fraction fine + pélites

2. Liaisons significatives mais moyennes :

- . Courants de fonds  $\rightleftharpoons$  courants de dérive,  
 $\rightleftharpoons$  niveau d'énergie
- . Biotopes SVMC  $\rightleftharpoons$  teneurs en pélites,  
 $\rightleftharpoons$  texture mudstone
- . Teneurs en graviers  $\rightleftharpoons$  biotopes SGCF  
 $\rightleftharpoons$  Sédiments "reliques"
- . Texture rudstone  $\rightleftharpoons$  Bryozoaires  
 $\rightleftharpoons$  Algues

Le résultat pratique est que, à partir des 46 variables initiales, on définit 5 variables prioritaires pour la caractérisation des différents types de fonds :

- 1) teneurs en argile,
- 2) nature géologique du littoral (calcaire, métamorphique ou alluvial),
- 3) hétérométrie ou isométrie des matériaux,
- 4) influence de la pente moyenne des fonds,
- 5) niveau d'énergie hydrodynamique.

Ces cinq variables prioritaires pourront être utilisées comme "pôles" (avec une métrique adéquate) lors d'investigations ultérieures en des sites à régimes comparables.

## 6°) CLASSIFICATION AUTOMATIQUE DES SEDIMENTS.

L'analyse hiérarchique des échantillons aboutit à une classification automatique des faciès sédimentaires de la marge continentale supérieure. On distingue trois groupes fondamentaux ("clusters") totalement indépendants :

### I. Sables mobiles infralittoraux et les sous-groupes :

- I.1. : Beauduc (Camargue),
- I.2. : Fréjus, Maguelonne, Pointe de Saint Tropez,
- I.3. : Sables des chenaux à courants sagittaux.

... il s'agit en fait du faciès 1 et les grappes des sous-groupes sont agglomérées à 0,655.

### II. Sables et graviers biogènes (faciès 3, 4 et 5) et les sous-groupes (noeuds à 0,965 et 0,750) :

- II.1. : Sables et graviers mobiles, à Algues, de type "maërl",
- II.2. : Sables polygéniques circalittoraux,
- II.3. : Sables biogènes infralittoraux.

### III. Faciès envasés (pélites, argiles), concernant les faciès 2, 6 et 7, se subdivisant en trois sous-groupes (noeuds à 0,790 et 0,975) :

- III.1. : Envasement circalittoral maximum (cas de Fréjus par ex.).
- III.2. : Envasement infralittoral et circalittoral de Giens et du golfe des Saintes Maries, circuits tourbillonnaires.

III.3. : Envasement et colmatage des fonds sableux infra et circalittoral : faciès de piégeage et de décantations.

En résumé, les trois groupes très nets "sortant" dans la classification automatique des échantillons correspondent, en fait, à trois types de situations :

1) Groupe I : sédimentation littorale détritique (sable, grès),

2) Groupe II : sédimentation biogène ou mixte : sables, graviers, calcarénites, rhodolites,

3) Groupe III : sédimentation terrigène fine : sables vaseux, vases, pélites, marnes.

#### 7°) LE MODELE SEDIMENTAIRE.

Le schéma final présenté exprime les relations entre les trois groupes et les sous-groupes de la classification automatique et les sept types sédimentaires définis par l'analyse d'inertie du modèle général.

Les rapports et différences font état d'une évolution centrée sur quatre sources de sédiments :

1) sables détritiques mobiles des prismes littoraux,

2) matériel biogène infralittoral des "mattes" et annexes de l'herbier à Posidonies,

3) concrétionnements circalittoraux, érosion mécanique et biologique des biolithites,

4) matériel fin d'origine fluviale (Rhône essentiellement).

La profondeur prise isolément, la distance à la côte et les peuplements benthiques proprement dits ont une influence variable, parfois relativement faible, sauf pour tout ce qui règle les modalités de l'érosion sous-marine et de l'apport en débris bioclastiques.

Sur le plan pratique, toute altération du système ouvert, et notamment toute modification concernant les quatre sources à l'origine du modèle (schéma), du fait des relations mises en évidence, aboutirait à une évolution souvent "irréversible".

Cette dernière tendra alors vers deux faciès unitaires, chacun réalisant un aboutissement temporaire, mais lourd en conséquences à l'échelle humaine :

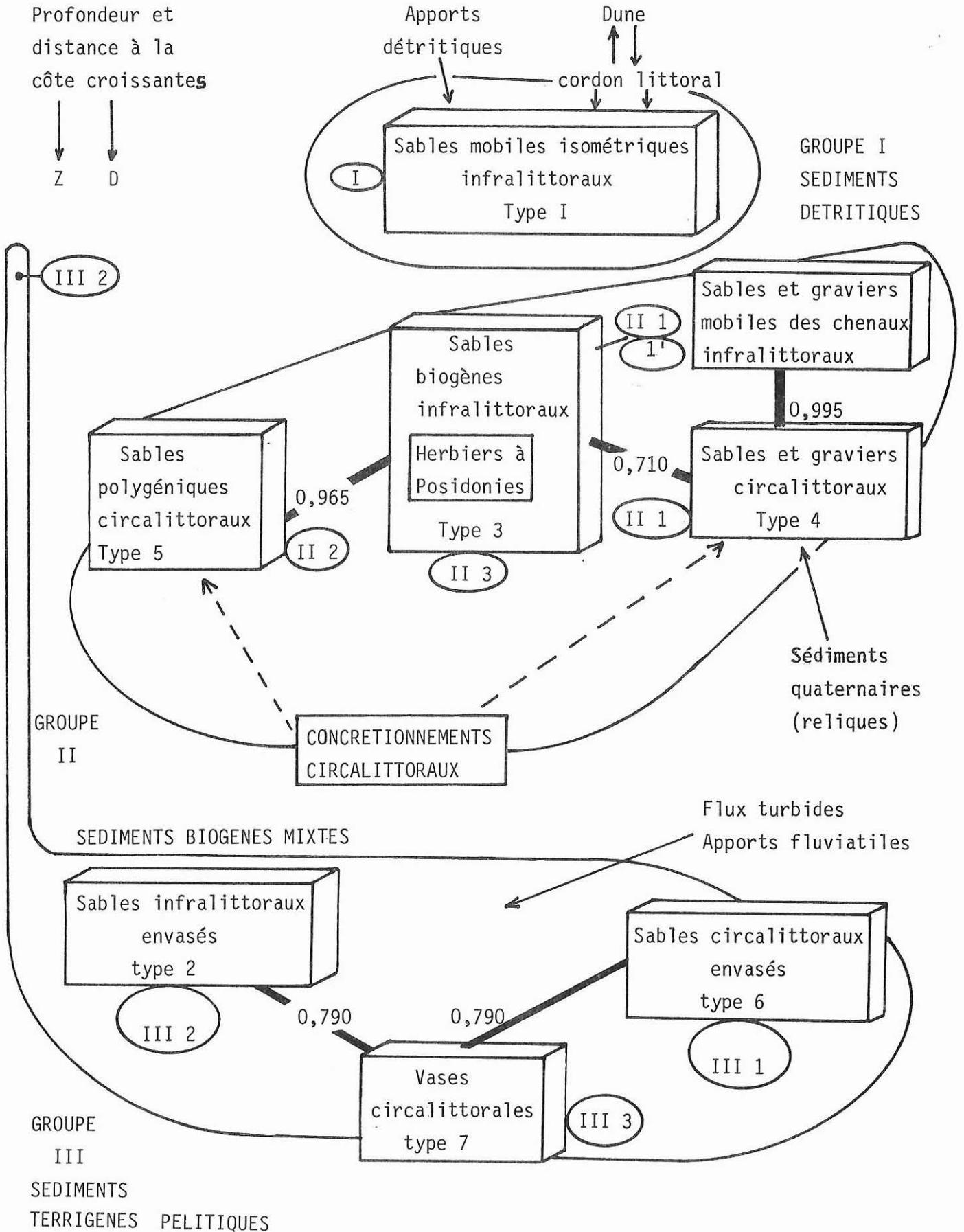
1) érosion littorale et infralittorale : sables polygéniques circalittoraux ; ces derniers seront secondairement envasés.

2) envasement et colmatage généralisé : extension des vasières infra et circalittorales avec accentuation des pollutions.

Il en résulte la nécessité d'une surveillance et protection accrues des quatre sources régissant le modèle sédimentaire fragile de la plate-forme continentale supérieure.

RELATIONS ANALYSE HIERARCHIQUE : 3 GROUPES

ET TYPES DE FACIES SEDIMENTAIRES



BIBLIOGRAPHIE

- ARNOUX A. et CHAMLEY H., 1974. Minéraux des argiles et détergents des eaux intersticielles dans les sédiments superficiels du golfe du Lion. C. R. Ac. Sc., Paris ; 278 : 999 - 1002.
- BELLAICHE G., 1970. Géologie sous-marine de la marge continentale au large du massif des Maures (Var, France) et de la plaine abyssale ligure. Rev. Géogr. Phys. et Géol. dyn. ; VII, 5 : 403 - 440.
- BELLAICHE G., 1972. Les dépôts quaternaires immergés du golfe de Fréjus (Var), France. The Mediterranean Sea, A natural sedimentary laboratory ; Dowden, Hutchinson and Ross Inc. :171 - 176.
- BLANC J. J., 1974. La sédimentation sur le précontinent de Provence et ses modalités. Comparaisons avec d'autres secteurs de la Méditerranée. Bull. B. R. G. M. ; IV, 3 : 133 - 164.
- BLANC J. J., 1975. Recherches de Sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection. C. N. E. X. O. ; 164 p.
- BLANC J. J., 1975. Recherches sur les gîtes de sables et d'agrégats sur la marge continentale de la Provence. B. S. G. F. ; 7ème sér., 27 ; 4 : 521 - 528.
- BLANC J. J., 1977. Recherches de Sédimentologie appliquée au littoral du delta du Rhône, de Fos au Grau du Roi. C. N. E. X. O. ; 75/1193 : 69 p.
- BLANC J. J., 1979. Protection des littoraux sableux. Méthodes d'études. L'exemple de la Camargue. C. N. E. X. O. ; 78/4104 : 56 p.
- BLANC J. J. et JEUDY DE GRISSAC A., 1978. Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à Posidonies du littoral de la Provence. C. N. E. X. O. ; 76/4043 et 77/4074 : 185 p.
- BLANC-VERNET L., 1969. Contribution à l'étude des Foraminifères de la Méditerranée. Relations entre la microfaune et le sédiment. Biocoenoses actuelles, Thanatocoenoses pliocènes et quaternaires. Thèse. Rec. Trav. Stat. Mar. Endoume ; 46 ; 64, 48 : 315 p.

- CHAMLEY H., 1969. Découverte d'une plage marine et d'éboulis rubéfiés d'âge quaternaire à l'Argentière (Maures, NW du Cap Bénat). Rec. Trav. Sta. Mar. Endoume ; 46 ; 62 : 261 - 267.
- CHAMLEY H., 1971. Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. Sc. Géolog. U. L. P. Strasbourg ; 35 ; 209 p.
- CHAMLEY H. et PICARD - TARBOURIECH F., 1970. L'héritage détritique des fleuves provençaux en milieu marin. Tethys, 2 (1) : 211 - 226.
- CLAIREFOND P., 1977. Le golfe des Saintes Maries de la Mer (Camargue). Etude sédimentologique, aménagements et protection. Thèse 3ème cycle ; Aix - Marseille II : 141 p. et annexes.
- FROGET C., 1974. Essai sur la géologie du précontinent de la Provence occidentale. Thèse ; Aix - Marseille II ; 219 p. et annexes.
- JEUDY DE GRISSAC A., 1975. Sédimentologie dynamique des rades d'Hyères et de Giens (Var). Problèmes d'aménagements. Thèse 3ème cycle ; Univ. de Provence ; 86 p. et annexes.
- MUSCHOTTI E., 1973. Contribution à l'étude sédimentologique du plateau continental entre La Ciotat et Toulon (Var). Thèse 3ème cycle ; Univ. de Provence, 58 p.
- NESTEROFF W., 1965. Recherches sur les sédiments marins actuels de la région d'Antibes. Ann. Inst. Océanogr. ; 43, 1 : 136 p.
- ORSOLINI P., 1978. Contribution à l'étude géomorphologique et sédimentologique des domaines côtiers de la presqu'île de Saint Tropez (Var). Définition des équilibres naturels. Thèse 3ème cycle ; Univ. de Provence, 97 p. et annexes.
- PERES J. et PICARD J., 1958. Manuel de Bionomie benthique de la Méditerranée. Rec. Trav. Stat. Mar. Endoume, 18, (11) et consulter la nouvelle édition de 1964.
- PERES J. 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. Evolution sous influences humaines des peuplements benthiques des parages de La Ciotat entre 1954 et 1972. Tethys, (7) ; 2 - 3 : 213 - 222.
- PICARD-TARBOURIECH F., 1969. Contribution à l'étude des minéraux lourds dans les sables littoraux de Toulon du Cap Lardier (Provence). Tethys, (1) : 539 - 560.
- RIVIERE A., 1955. Sur la radioactivité des sédiments actuels et récents de la côte méditerranéenne. Etude particulière du Golfe du Lion. Interprétation sédimentologique. B. S. G. F. ; 6ème ser. ; 5 : 495 - 508.
- RIVIERE A., 1977. Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations. Masson : 170 p.
- VERNIER E., 1972. Recherches sur la dynamique sédimentaire du Golfe de Fos. Thèse 3ème cycle, Aix - Marseille II, 72 p.

Droits réservés : Centre National pour l'Exploitation des Océans

G E O M E R

Laboratoire de Géologie Marine et Sédimentologie Appliquée

13288 Marseille cedex 2.