

# Changements à long terme dans une communauté benthique d'un golfe méditerranéen (golfe de Fos)

Changements à long terme  
Benthos  
Synécologie  
Analyse de parcimonie

Long-term changes  
Benthos  
Synecology  
Parsimonious analysis

Chantal SALEN-PICARD, Gérard BELLAN, Denise BELLAN-SANTINI,  
Denise ARLHAC et Robert MARQUET

Centre d'Océanologie de Marseille, UA CNRS 41, Station Marine d'Endoume,  
rue de la Batterie des Lions, 13007 Marseille, France.

Reçu révisé le 24/02/96, accepté le 29/02/96.

## RÉSUMÉ

L'évolution au cours des trente dernières années du peuplement de vase circalittorale (% de pélites >75 %) du golfe de Fos (côte française de Méditerranée) a été suivie en trois sites échelonnés le long d'une radiale NNW-SSE par 15, 35 et 70 m de profondeur. Les résultats mettent en évidence l'influence sur les communautés macrobenthiques des trois sites des travaux d'aménagement du port de Fos; notamment celle de la remise en suspension des sédiments pendant les dragages des darses et du chenal d'accès et celle du rejet en mer des matériaux dragués (plus de 100 millions de m<sup>3</sup> ont été dragués dont le quart environ a été rejeté en mer entre 30 et 60 m de profondeur). Le groupement des prélèvements effectués avant, pendant et après la fin des travaux (1963, de 1972 à 1979 et de 1984 à 1993) selon une ACP et selon une analyse de parcimonie, méthode dérivée de la phylogénie cladistique, de même que l'évolution au cours de cette période d'un certain nombre de descripteurs (diversité spécifique, fréquence des indicateurs biologiques) montrent que 1) à faible profondeur (15 m) et sur l'emplacement des rejets (35 m) la communauté a été profondément altérée, 2) après l'arrêt des travaux, non seulement le peuplement de ces deux sites reste très éloigné du peuplement d'origine, mais il ne s'y est pas instauré un nouvel équilibre, 3) plus profondément, même si l'influence des travaux s'est manifestée, il n'y a pas eu changement fondamental de la communauté, 4) des relations établies entre les fréquences d'un certain nombre d'espèces et les débits du Rhône mettent en évidence qu'aux changements occasionnés par des actions anthropiques se surimposent des variations liées à des phénomènes climatiques.

## ABSTRACT

Long-term changes in a benthic community of a Mediterranean gulf (Gulf of Fos).

Changes over a period of thirty years in a circalittoral mud community (% silt  $\geq 75$ ) in the Gulf of Fos (French, Mediterranean coast) have been followed at three sites spaced along a transect NNW-SSE at depths of 15, 35 and 70 m. The results clearly show how the macrobenthic community at the three sites has been influenced by the construction of the port of Fos, notably as a consequence of sediment suspension during the dredging of the docks and the access channel, but also due to the dumping at sea of dredged material (more than  $100 \times 10^6$  m<sup>3</sup> were dredged, about a quarter of which was dumped at sea, at depths of 30 to 60 m). The grouping of the samples taken before, during and after the development of the port (1963-1964, from 1972 to 1979 and 1984 to 1993), by principal component analysis (PCA) and by parsimonious analysis, a

method derived from cladistic phylogeny, together with the variations during this period of certain descriptive factors (species diversity, abundance of biological indicators), show that: 1) in shallow water (15 m) and on the dumping sites (35 m) the community changed considerably; 2) after the completion of the port development, the community at these two sites not only remained very different from the original community, but also failed to achieve a new equilibrium; 3) in deeper water, even when under the influence of the port construction, there was no fundamental change in the nature of the community; and 4) variations in the outflow of the Rhône river during this period cause changes linked to climatic events that act in addition to those resulting from human disturbance.

*Oceanologica Acta*, 1997, 20, 1, 299-310.

## INTRODUCTION

A la période de description et d'analyse des communautés marines benthiques a succédé, au cours des trente dernières années, parallèlement à l'industrialisation des pays riverains, une phase d'étude des perturbations subies par ces communautés sous l'effet d'actions anthropiques. L'intérêt de la faune benthique comme indicateur et comme intégrateur des variations environnementales n'est plus à démontrer (Dauvin, 1993), qu'il s'agisse d'un simple taxon ou de l'ensemble de la communauté. Les travaux relatifs aux variations dues à des changements climatiques sont plus récents (Glémarec, 1979; Gray et Christie, 1983; Ibanez *et al.*, 1993; Maddock et Swann, 1977; Southward, 1991). La mise en évidence de telles variations suppose un laps de temps suffisant pour qu'un phénomène puisse être perçu et un échantillonnage régulier pour que des relations directes cycliques puissent être démontrées entre phénomènes climatiques et populations benthiques.

Que les changements à long terme résultent de perturbations d'origine anthropique ou de variations climatiques, la référence à un état initial est nécessaire; une bonne connaissance des biotopes et de leur histoire est donc indispensable. C'est généralement le cas pour la côte française de la Méditerranée entre Toulon et le delta du Rhône grâce aux recherches de Pérès et Picard (1964) et de leurs nombreux collaborateurs. Pour la région de Marseille, les compositions qualitative et quantitative de la plupart des communautés benthiques de substrats meubles ont été répertoriées entre 1960 et 1970. Ces données ont servi de point de départ à toute une série de travaux consacrés aux perturbations subies par les peuplements: évolution des fonds au large du collecteur d'égouts de la ville de Marseille (Bellan, 1967; Bellan et Bourcier, 1990), conséquences de l'aménagement du complexe industrialoportuaire de Fos (Salen-Picard, 1981) pour ne citer que les perturbations les plus drastiques. Dans le cas du golfe de Fos, les données collectées en 1963 et 1964 par Picard (1965) et Fèvbre-Chevalier (1969) nous ont servi d'état de référence avant 1965, début d'importants travaux d'aménagement d'un port pétrolier accessible aux navires de fort tonnage. L'évolution de la communauté circalittorale des vases terrigènes côtières qui occupe les fonds du golfe au-dessous de 15 m de profondeur a été suivie pendant les travaux (Salen-Picard, 1981 et 1982); l'étude a été ensuite en partie reprise entre 1984 et 1986, puis en 1993.

## LE MILIEU ET SES MODIFICATIONS

### Le milieu

Le golfe de Fos (Fig. 1) est situé à proximité du débouché en mer du Grand Rhône. Son hydrologie et sa rhéologie sont sous l'influence prépondérante de l'arrivée en mer des eaux du fleuve et des divers régimes de vents affectant la région. On observe (Pauc, 1970) à l'embouchure un courant de sortie des eaux fluviales qui se scinde en deux branches. La branche occidentale, la plus importante, se dirige vers le sud puis vers le sud-ouest et rejoint la dérive liguro-provençale en direction du golfe du Lion. La branche orientale remonte au nord-est vers le centre du golfe de Fos. La nappe de dilution des eaux fluviales est en général peu étendue vers l'est où l'on observe en surface une limite nette entre eau diluée et eau de mer, à la longitude du golfe de Fos. Les eaux de cette nappe sont particulièrement chargées en matière en suspension d'origine minérale ou organique (Blanc et Leveau, 1971). Les courants de marées (Vernier, 1972) bien que faibles

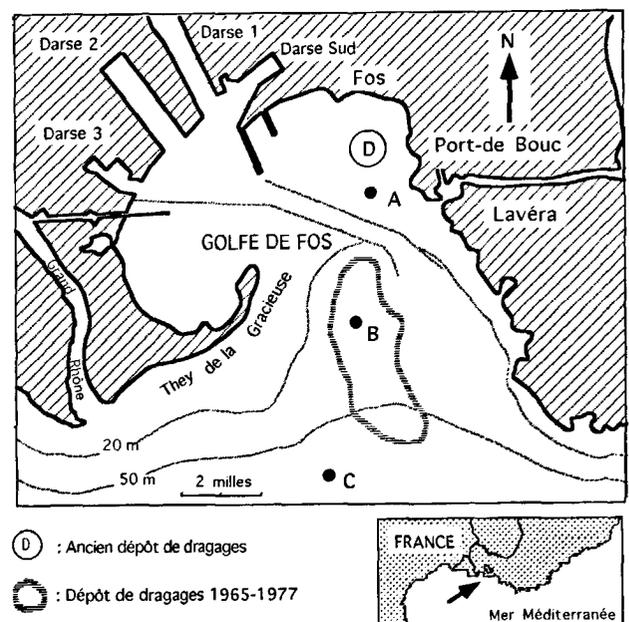


Figure 1

Situation du golfe de Fos et emplacement des stations de prélèvement.

*Location of Fos Gulf showing sampling sites.*

sont permanents et engendrent une circulation générale des eaux du golfe d'est en ouest avec un courant de sortie longeant le They de la Gracieuse. Les courants de vents sont intermittents; par vent de sud-est la circulation dans la région orientale du golfe présente une grande analogie avec la circulation sous l'influence des courants de marées; par vent de nord-ouest on observe une importante dérive des eaux superficielles vers le sud-est, compensée en profondeur par des contre-courants dirigés vers la côte.

Les sédiments du golfe de Fos ont une double origine détritique et organogène (Vernier, 1972). Les constituants organogènes sont surtout abondants le long des côtes rocheuses. La majeure partie des sédiments du golfe est constituée de minéraux issus du bassin versant du Rhône, l'association illite + chlorite étant typiquement rhodanienne, et apportés par saltation, roulement ou charriage contre le fond pour les plus grossiers, par suspension au sein des masses d'eau pour les plus fins (sablons, limons et argiles). Ces derniers occupent toute la zone centrale du golfe : vases pures (80 % d'éléments d'un diamètre  $\leq 63 \mu\text{m}$ ); lorsque les fonds remontent on passe aux environs de 15 m de profondeur à des sables très vaseux (40 à 60 % de fraction fine) puis à des sables vaseux et à des sables purs (Fig. 2a).

### Les modifications d'origine anthropique

#### Travaux d'aménagement sur le Rhône et ses affluents

Les travaux d'aménagement hydroélectrique et de régularisation des cours du Rhône et de ses principaux affluents, notamment de la Durance, ont entraîné une très nette diminution du débit moyen annuel et du débit maximal des crues. Entre 1957 et 1970 les débits extrêmes d'étiage et de crue sont passés respectivement de 800 et 8900  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  à 530 et 5745  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  (Pauc, 1970). Au plan sédimentologique ceci a entraîné une diminution globale des apports solides, une grande partie des matériaux charriés sédimentant au niveau des barrages; corrélativement, la vitesse moyenne de sédimentation à un mille environ au large de l'embouchure, d'environ 80  $\text{cm}.\text{a}^{-1}$  avant 1950, est passée à 23 puis à 10  $\text{cm}.\text{a}^{-1}$  après cette date (Pauc, 1970). Le golfe de Fos est en communication avec l'étang de Berre par l'intermédiaire du canal de Caronte. Depuis 1966 une partie des eaux de la Durance se déverse de manière erratique dans cet étang. Il s'ensuit, dans le golfe de Fos, une diminution de la salinité globale des eaux de surface. Comme dans le cas des eaux rhodaniennes cette diminution est peu sensible pour les fonds supérieurs à 10 m.

#### Construction du port pétrolier de Fos-sur-Mer

Les travaux d'aménagement du port pétrolier de Marseille-Fos ont conduit à la construction de digues, au creusement des darses Sud, 1, 2 et 3 et du chenal d'accès à ces darses (Fig. 1). Les matériaux issus des dragages des darses ont été déposés à terre, la majeure partie de ceux provenant du chenal, soit 25 à 28  $\times 10^6 \text{ m}^3$  de vases fluides, limons consolidés, calcaires à lumachelles et galets ont été rejetés

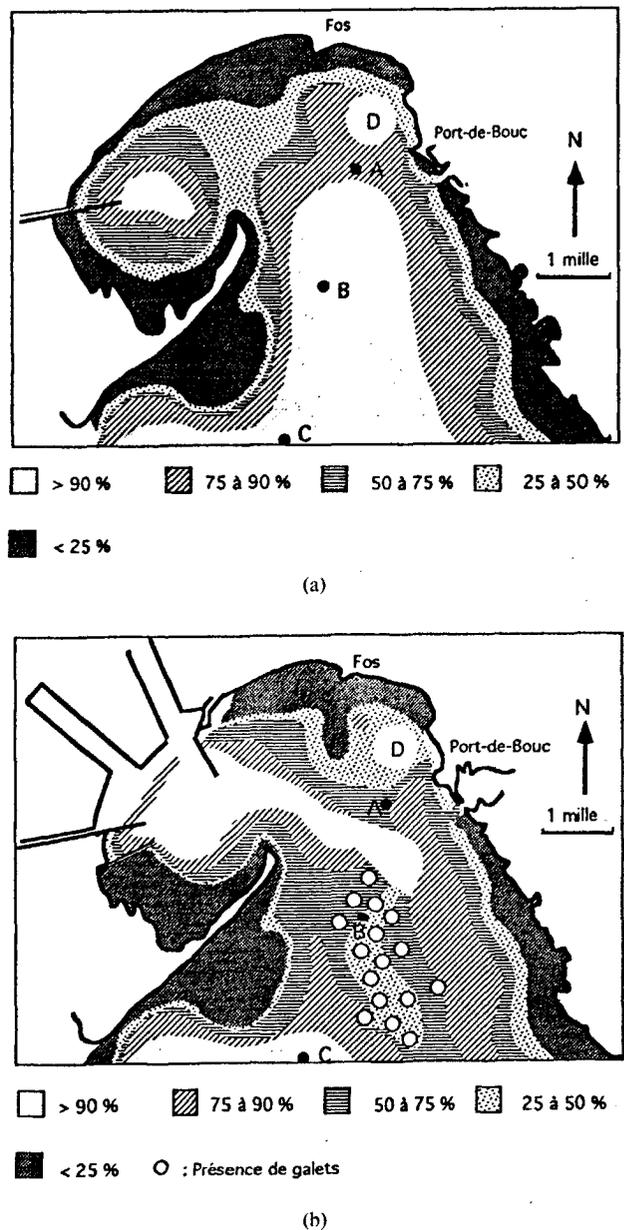


Figure 2

Proportion de fraction fine ( $\leq 63 \mu\text{m}$ ) dans les sédiments superficiels du golfe de Fos (d'après Roux et Vernier, 1975).

- a) 1964.  
b) 1971.

Silt content ( $\leq 63 \mu\text{m}$ ) in superficial sediments of Fos Gulf (from Roux et Vernier, 1975).

- a) 1964.  
b) 1971.

en mer entre 30 et 60 m de profondeur, sans interruption de 1965 à 1974. Une dernière phase de rejets en mer a été effectuée entre la fin de 1975 et le printemps 1977 avec le creusement d'un nouveau poste pétrolier et le dépôt d'un matériel argileux entre 40 et 50 m de profondeur. Outre la zone de dépôt qui couvre 11  $\text{km}^2$ , environ, les travaux ont eu pour conséquence un remaniement de l'ensemble des sédiments du golfe (Vernier, 1972; Roux et Vernier, 1975, 1977) et notamment une régression des faciès de vase terrigène côtière de la partie méridionale au profit de vases sableuses (Fig. 2b). Les dragages et surtout leur rejet

en mer ont eu pour conséquence une forte augmentation de la turbidité des eaux ; des mesures de turbidité effectuées pendant la période des travaux à 10 cm au-dessus du fond donnaient pour l'ensemble du golfe des valeurs moyennes de 15,5 à 27,7 mg.l<sup>-1</sup> ; en comparaison, Pauc (1970) donne des valeurs de l'ordre de 5 mg.l<sup>-1</sup> dans la nappe d'épandage des eaux du Rhône au large du They de la Gracieuse. Les conditions hydrodynamiques à l'intérieur du golfe ont été sensiblement modifiées par la réalisation des divers ouvrages (Vernier, 1972) ; pour les fonds situés au-dessous de 15 m on note une légère accélération des courants de sortie ; leur vitesse qui atteint 10 cm.s<sup>-1</sup> est suffisante pour déplacer les sédiments les plus fins mis en suspension par les dragages et les rejets.

#### *Autres perturbations d'origine anthropique*

L'implantation de complexes industriels (raffineries de pétrole, sidérurgie) venus s'ajouter aux installations plus anciennes de Port-de-Bouc-Lavéra est allée de pair avec l'aménagement portuaire. Les résultats de trois campagnes d'analyse chimique des sédiments du golfe réalisées en 1976, 1978 et 1979 (Arnoux *et al.*, 1980a) ont clairement mis en évidence l'influence du Rhône, de l'étang de Berre et des industries de la partie orientale sur l'enrichissement des fonds du golfe en carbone organique (teneurs comprises pour les fonds de vase, entre 1 et 1,5 %), hydrocarbures totaux (de 0,25 à 1,62 %), PCB (17 à 72 ng.g<sup>-1</sup> de sédiment sec) et en un certain nombre de métaux lourds (mercure, cuivre et plomb). Les auteurs remarquent pour la période 1976-1979 un taux régulièrement décroissant des hydrocarbures, une constance des PCB dont les concentrations restent assez élevées, une relative constance dans la plupart des métaux sauf une augmentation sensible du mercure et de l'arsenic. Les mesures effectuées en 1993 (Farnolle, 1993) sur les sites A, B et C n'indiquent pas d'évolution significative dans les concentrations de ces divers éléments.

#### **Les variations d'ordre climatique**

Bien que canalisé sur une grande partie de son cours, le Rhône a encore des crues parfois très importantes. Pour la période 1960-1993, les débits annuels moyens sont supérieurs à 2000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en 1963, 1970, 1977 et 1983. Des périodes déficitaires, avec débit moyen annuel inférieur à 1500 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, se sont produites entre 1971 et 1976, de même qu'entre 1989 et 1991.

### **CHANGEMENTS SUBIS PAR LE PEUPELEMENT**

#### **Méthodes d'études**

L'évolution du peuplement a été suivie en trois stations A, B et C (Fig. 1) échelonnées le long d'une radiale orientée sensiblement N-S respectivement par 15, 35 et 70 m de profondeur. Les stations ont été échantillonnées entre 1963 et 1993 à raison de six fois pour A (1964, 72, 75, 76, 79 et 93), huit fois pour B (64, 72, 75, 76, 77, 78, 79 et 93) et onze

fois pour C (63, 69, 72, 75, 76, 78, 79, 84, 85, 86 et 93). Tous les prélèvements ont été réalisés à la fin du printemps ou au début de l'été afin de limiter l'influence des variations saisonnières. Les animaux triés ont été déterminés jusqu'à l'espèce. Les prélèvements réalisés avant 1976 ont été effectués à la drague Charcot-Picard, ceux réalisés par la suite l'ont été à la benne Smith-Mc Intyre pour les stations A et C, à la drague pour la station B ; cette dernière est en effet située dans les rejets de dragages où la présence de galets empêcherait la fermeture des mâchoires de la benne. Quel que soit l'engin de prélèvement, à chaque fois un volume de 50 dm<sup>3</sup> de sédiment a été tamisé. L'évolution de la méthodologie entre les stations depuis les premiers prélèvements, notamment l'adoption d'une maille plus fine pour les tamisages (1 mm, limite inférieure fixée pour les individus adultes de la macrofaune, au lieu de 1,5 mm pour les prélèvements réalisés par Picard et Fèvre-Chevalier) nous a amenés à calculer pour chaque espèce un facteur de correction afin de pouvoir comparer les résultats. Des prélèvements réalisés pour la station C en période estivale (1984) à la benne Smith Mc Intyre ont été tamisés sur 1,5 et 1 mm. Le rapport moyen pour six coups de benne entre le nombre d'individus d'une espèce échantillonnés sur 1,5 mm et le nombre d'individus de cette même espèce récoltés sur l'ensemble des deux tamis nous a fourni le facteur de correction pour les effectifs antérieurs à 1976. Les résultats s'échelonnent entre 1 et 2,76 pour l'ensemble des espèces échantillonnées au cours de cette opération. La moyenne globale est de 1,76, plus faible que celle obtenue par Reish (1959) dans une comparaison semblable, mais l'influence du tamisage varie avec le biotope et ne peut être généralisée pour un phylum donné (Bachelet, 1984). Il restait cependant le problème des espèces de petite taille récoltées uniquement sur 1 mm, tels les polychètes Pilargidae, Paraonidae, et Cossuridae ; on ne peut conclure si leur présence actuelle est le résultat d'un développement de ces taxons ou la conséquence du changement de méthodologie. Nous avons tenu compte de ce fait dans l'interprétation des résultats. De plus, les fréquences relatives cumulées de ces espèces n'excédant jamais 5 %, nous considérons qu'elles n'interviennent que faiblement lors des analyses réalisées postérieurement.

Les descripteurs suivants ont été mesurés ou calculés pour chaque prélèvement : les fréquences absolues et relatives de chaque taxon, la diversité spécifique (Shannon-Weaver, 1948) et l'équitabilité (Piélou, 1966). Un certain nombre d'indicateurs biologiques ont été recherchés : notamment les espèces caractéristiques et sentinelles *sensu* Bellan (1991).

Pour décrire les relations entre les trois stations et leur évolution, on a réalisé une analyse en composantes principales (ACP). Il nous est, de plus, apparu intéressant d'effectuer une analyse de parcimonie. Cette méthode, dérivée de la phylogénie cladistique, est préconisée par divers auteurs (Lambshhead and Paterson, 1986, Legendre, 1989, Wanntorp *et al.*, 1990, Bellan-Santini *et al.*, 1994) pour étudier l'évolution des populations et communautés. Selon Bellan-Santini *et al.* (1994), elle permet de prendre en compte « les états successifs des contraintes qui ont entraîné l'état d'équilibre ou de non-équilibre et surtout l'histoire

de l'évolution au cours de l'analyse de séries temporelles de prélèvements». Nous renverrons à Bellan-Santini *et al.* (1994) pour la discussion théorique et la pratique de la mise en oeuvre de cette méthode ainsi que pour la terminologie proposée par ces auteurs. Un ensemble de 25 prélèvements (OTU's) regroupant 181 espèces (caractères) a été soumis à deux programmes d'analyse de parcimonie : PAUP 3.1.1 (Swofford, 1993) et McClade 3.01 (Maddison and Maddison, 1992). Ces logiciels ont fourni des résultats très proches, le programme McClade étant, en principe, retenu pour la représentation graphique des arbres parcimonieux. Il a, d'autre part, permis de comparer la distribution des caractères (espèces des peuplements étudiés) et de suivre pas à pas la constitution de chaque prélèvement. Les arbres ont été enracinés sur l'espace hypothétique, vide d'espèces comme le proposaient Bellan-Santini *et al.* (1994). Il s'agit donc d'un «out group» théorique que nous désignons comme ancêtre (anc).

Nous n'avons pas effectué de comparaison drague Charcot-Picard – benne Smith Mc Intyre; au plan qualitatif il ne nous paraît pas y avoir de différences importantes entre les deux engins; les fréquences absolues ont été rapportées à des volumes équivalents de sédiment. Les risques d'erreurs entraînées au cours des analyses par l'utilisation d'engins de prélèvements aux performances différentes ont été minimisés en utilisant pour l'ACP les fréquences relatives qui diminuent également le rôle des espèces peu abondantes sans les éliminer de façon subjective; l'utilisation de critères présence-absence et de cotations d'abondances dans les analyses de parcimonie permet, de même, de pondérer les variations dues à des méthodologies différentes.

## RÉSULTATS

### Résultats de l'analyse en composantes principales (Fig. 3a, b)

Les quatre premiers axes extraient 81,3 % de la variance totale (43,9 pour l'axe 1, 25 pour l'axe 2, 7,8 pour l'axe 3 et 4,6 pour l'axe 4). L'axe 1 discrimine les deux prélèvements les moins profonds effectués avant le début des travaux (A 64 et B 64) de l'ensemble des autres prélèvements; parmi ces derniers, les prélèvements A et B effectués entre 1975 et 1979 de même que le prélèvement C 79 sont ceux qui contribuent le plus à la position de cet axe. Leur sont associées l'espèce *Lumbrineris latreilli* et, dans une moindre mesure, *Thyasira croulinensis* et *T. flexuosa*. L'axe 2 sépare tous les prélèvements les plus profonds (station C), les plus fortes contributions étant dues aux prélèvements C 63, C 69 et C 93, effectués avant ou tout au début des travaux et après la fin de ces derniers. *Sternaspis scutata* et *Ninoe armoricana*, caractéristiques de la Vase Terrigène Côtière (Picard, 1965), sont les espèces les plus étroitement associées à l'ensemble des prélèvements de la station C. L'axe 3 est peu structurant, il oppose cependant, parmi les prélèvements de la station C, ceux où prédomine *Chaetozone setosa*: C 75 et C 86 (valeurs positives de l'axe) à C 63 et C 69 où prédomine *S. scutata* (valeurs négatives). Les prélèvements A 64 et B 64 contribuent fortement à la position de l'axe 4. *Nucula sulcata*, *Maldane*

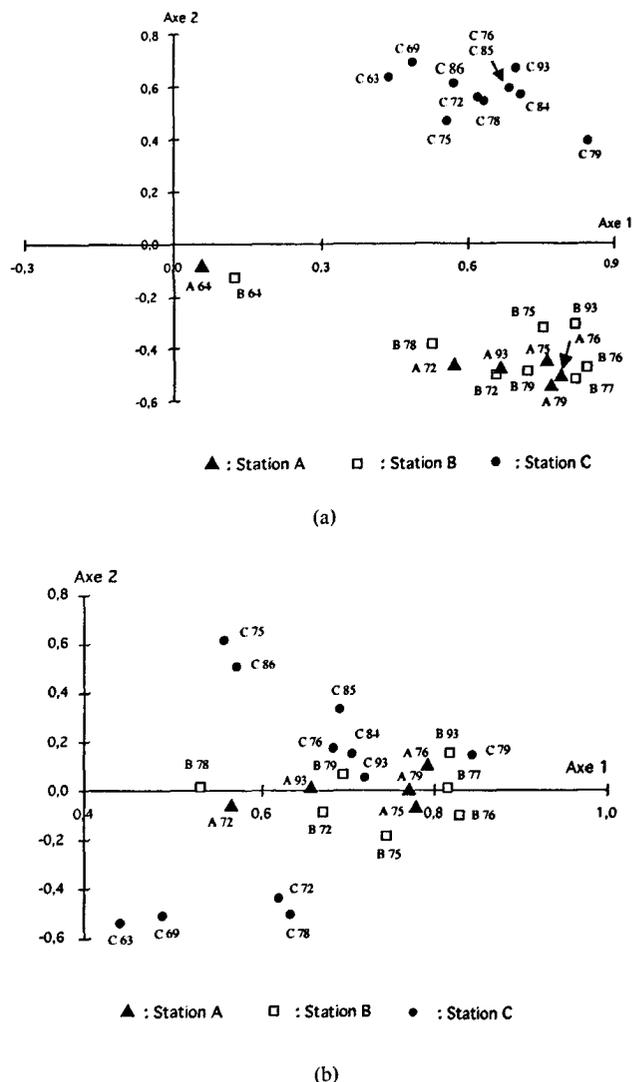


Figure 3

Analyse en Composantes Principales (ACP).

- a) Représentation des prélèvements dans le plan des facteurs 1 et 2.  
b) Représentation des prélèvements dans le plan des facteurs 1 et 3.  
Les prélèvements A 64 et B 64 n'ont pas été représentés.

Principal Component Analysis (CPA).

- a) Graphical representation of samples in the two first axes plan.  
b) Graphical representation of samples in the first and third axes.  
Samples A 64 and B 64 are not represented.

*glebifex*, *Mysella bidentata*, *Pseudoleiocardia fauveli* et *Nematoneis unicornis* sont les espèces les plus représentatives de cet ensemble.

### Analyse de Parcimonie : Étude qualitative globale

Elle ne prend en compte que la présence ou l'absence, codées 1-0, des caractères (espèces) dans les 26 OTU's (prélèvements). Dix arbres parcimonieux ont été retenus par l'analyse avec un Indice de cohérence (C.I.) égal à 0,333 et un Indice de rétention (R.I.) de 0,475. L'arbre de consensus (Fig. 4a) (C.I. : 0,54, R.I. : 0,78) met clairement en évidence l'existence dans un ensemble polytomique de trois groupes : un premier regroupement (Gr. 1) qui réunit les prélèvements de 1964 et 1972 des stations A et

B, un second groupe (Gr. 2) réunissant les prélèvements de 1977, 1978 et 1993 de la station B, un troisième groupe (Gr. 3) comprenant les prélèvements C 84, C 85 et C 86 et un ensemble non discriminé réunissant tous les autres prélèvements des stations A et B ainsi que ceux de la station C réalisés entre 1963 et 1979 et en 1993. A l'intérieur du groupe 1, A 64 et B 64 forment un petit groupe monosériel bien caractérisé par quatre syndérivées et, surtout par de nombreuses autodérivées (15 pour le prélèvement A 64 et 4 pour le prélèvement B 64). Les regroupements correspondants de 1972 sont réunis par une seule syndérivée (*Pomatoceros triqueter*, espèce présente sur substrats solides) et possèdent, chacun, quatre autodérivées. Le groupe 2 comprenant B 77, B 78 et B 93 est discriminé par la seule syndérivée, *Leda fragilis*. Le groupe 3 n'est pas significatif, les espèces qui le discriminent étant largement représentées dans d'autres prélèvements. L'ensemble des prélèvements est réuni par dix syndérivées partielles (Bellan-Santini *et al.*, 1995), à une (*Lumbrineris emmendibulata* = *L. impatiens*), deux (*Lumbrineris latreilli*, *Thyasira croulinensis*), trois (*Glycera rouxii*, *Tharyx heterochaeta*, *Thyasira flexuosa*) ou quatre (*Chaetozone setosa*, *Notomastus latericeus*, *Sternaspis scutata* et *Abra nitida*) absences. Ces syndérivées partielles présentent un certain nombre de caractéristiques qu'il paraît bon de mettre en évidence : elles sont, pour quatre d'entre elles, absentes des prélèvements effectués dans la station A, la moins profonde. Ce sont soit des espèces vasicoles, caractéristiques, pour certaines, de la Vase terrigène Côtière, ce qui tend à expliquer l'absence signalée ci-dessus, soit des espèces indicatrices de conditions de déséquilibre anthropique des communautés de la région marseillaise (Bellan, 1984; Salen-Picard, 1985, 1992). Ces dernières espèces (*Lumbrineris latreilli*, *Chaetozone setosa*, et *Thyasira flexuosa*) sont absentes des prélèvements effectués en 1963 et 1964 (A 64, B 64, C 63) ou en 1993 (A 93, C 93). Ces syndérivées partielles correspondent à de « fausses homoplasies » (Bellan-Santini *et al.*, 1995), c'est-à-dire à des espèces « exclues » d'un ou d'un petit nombre de prélèvements, au sein d'un groupe monosériel, soit parce que leurs populations sont trop dispersées, soit parce que les prélèvements sont au-dessous du « volume minimum ».

Compte tenu de l'isolement des prélèvements A 64 et B 64, il nous est apparu intéressant de réaliser une deuxième analyse qualitative en supprimant ces deux prélèvements.

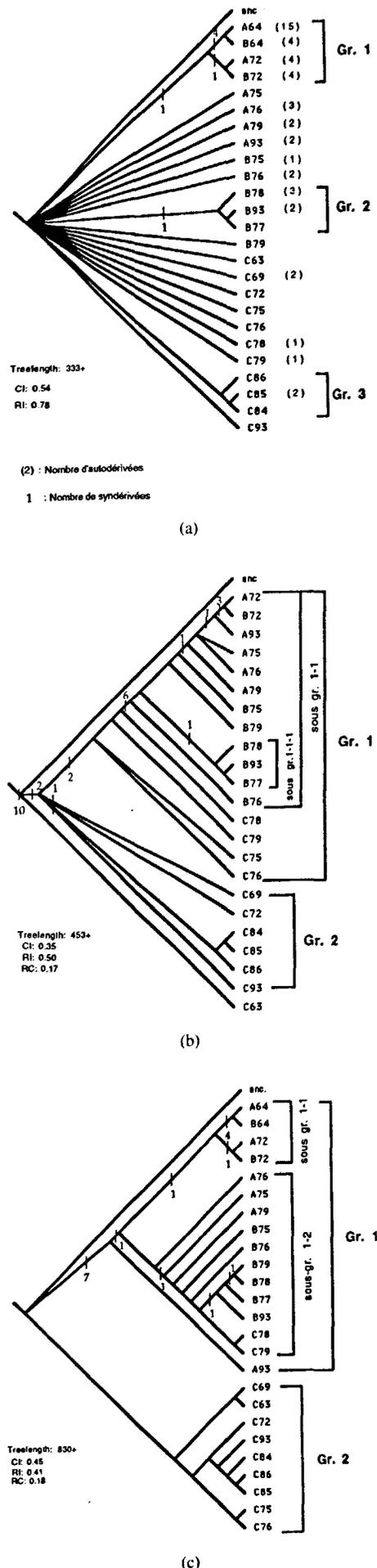
Figure 4

Analyses de parcimonie.

- a) Étude qualitative globale. Arbre de consensus; b) Étude qualitative « réduite » (sans les prélèvements A 64 et B 64). Arbre de consensus;
- c) Étude quantitative globale, Arbre parcimonieux; Étude quantitative « réduite » (sans les prélèvements A 64 et B 64), Arbre parcimonieux.

Parsimonious analysis.

- a) Global qualitative study. Consensus tree; b) Reduced qualitative study (without samples A 64 and B 64). Consensus tree;
- c) Global quantitative study, Parsimonious tree; Reduced quantitative study (without samples A 64 and B 64), Parsimonious tree.



*Analyse de Parcimonie : Étude qualitative « réduite »*

L'analyse réalisée fournit douze arbres parcimonieux dont l'Indice de cohérence est de 0,335 et l'Indice de rétention de 0,471. L'arbre de consensus (Fig. 4b) a un Indice de cohérence de 0,35 et un Indice de rétention 0,51. L'ensemble des prélèvements est réuni par dix syndérivées partielles, à une à quatre absences ; l'opération a cependant eu pour effet de faire disparaître la polytomie précédente. Deux groupes s'individualisent tandis que le prélèvement C 63 est isolé par l'absence de deux espèces : *Chaetozone setosa* et *Tharyx heterochaeta*. Le groupe 1 comprend tous les prélèvements de A et B effectués depuis 1972 et les prélèvements de la station C réalisés entre 1975 et 1979 ; il est créé par *Corbula gibba* et *Myrthea spinifera* espèces souvent abondantes dans les peuplements perturbés de la région provençale (Picard, 1965 ; Bellan, 1985) et considérées comme sentinelles des substrats meubles perturbés (Salen-Picard, 1992). Le groupe 2 réunit les prélèvements 69, 72, 84, 85, 86 et 93 de la station C ; il est discriminé par *Poecilochaetus serpens* ; cette espèce caractéristique de la Vase Terrigène Côtière n'a jamais été récoltée entre 1975 et 1979. A l'intérieur du groupe 1 six syndérivées complète (*Clymene oerstedii*) ou partielles (*Nephtys hombergi*, *Aponuphis brementi*, *Mediomastus* sp., *Pseudoleiocardia fauveli*, *Tellina distorta*) isolent l'ensemble des peuplements des stations A et B (sous-groupe (1-1)). Les prélèvements B77, 78 et 93 constituent, comme précédemment, un ensemble discriminé par *Leda fragilis* (sous-groupe 1-1-1), un deuxième ensemble réunit les prélèvements de la station A ainsi que B 72 ; il est discriminé par *Nassa pygmaea*, espèce exclusive de la Biocénose des Sables fins bien calibrés ; les prélèvements A72, B72 et A93 sont discriminés par *Sthenelais boa*, autre espèce exclusive de la Biocénose des Sables fins bien calibrés, et enfin, A72 et B72, bien individualisés par trois syndérivées *Pomatoceros triqueter*, *Serpula vermicularis*, *Polynices nitida*, deux d'entre elles étant associées aux substrats solides, et par respectivement trois et sept autodérivées.

L'importance du phénomène de polytomie observé au cours de l'analyse qualitative globale et les variations du nombre d'individus des différentes espèces, nous ont conduits à effectuer une nouvelle analyse de parcimonie faisant appel, non plus simplement au seul critère présence-absence des caractères, mais à leur expression quantitative.

*Analyse de Parcimonie : étude quantitative globale*

Les données quantitatives de chaque caractère (abondance des espèces dans le prélèvement considéré) ont été transformées en données semi-quantitatives sur une échelle 1-5, selon une progression géométrique. La figure 4c montre l'unique arbre de parcimonie dont l'Indice de cohérence C.I. est de 0,457, ce qui, compte tenu, du nombre de caractères pris en compte peut être considéré comme tout à fait satisfaisant, l'Indice de rétention (R.I.) est de 0,412. Deux groupes monosériés sont nettement mis en évidence. D'une part, l'ensemble des prélèvements A et B ainsi que C 78 et C 79 (groupe 1) et d'autre part l'ensemble des autres prélèvements de la station C (groupe 2). Le premier

groupe est discriminé par sept syndérivées partielles qui sont, soit des espèces qui ne tolèrent pas un taux d'envasement trop élevé (*Aponuphis brementi*, *Nephtys hombergi*, *Clymene oerstedii*, *Pseudoleiocardia fauveli*), soit des espèces souvent très abondantes dans divers peuplements perturbés des côtes provençales (*Mediomastus* sp., *Myrthea spinifera* et *Corbula gibba*), ces deux dernières n'étant qu'exceptionnellement récoltées à une profondeur supérieure à 70 m. L'ensemble du groupe, à l'exception de A 93, est discriminé par l'espèce *Tellina distorta*, considérée par Picard (1965) comme indicatrice de conditions d'instabilité du sédiment. Deux entités se détachent nettement dans ce premier groupe. Un ensemble monosérié, réplique de celui mis en évidence lors de l'étude qualitative globale, réunit les prélèvements A 64, B 64, A 72 et B 72 (sous-groupe 1-1) ; il est discriminé par *Polynices nitida*. Il faut insister sur le fait que la moitié des syndérivées et autodérivées ne sont représentées que par un seul individu et que seules deux autodérivées (*Protula tubularia* et *Polynices guillemini*) sont représentées par plus de dix individus dans un seul prélèvement. Ceci confirme la dispersion des individus d'espèces dont les populations sont réduites dans les milieux étudiés. Un autre ensemble regroupe tous les prélèvements de la station A réalisés entre 1975 et 1979, tous ceux de B réalisés à partir de 1975 ainsi que les prélèvements C78 et C79 (sous-groupe 1-2). A l'exception du prélèvement B 93, on remarquera qu'il s'agit de prélèvements effectués lors de la période la plus active des travaux dans le golfe de Fos. Il est discriminé par *Paralacydonia paradoxa* (absente de A 76) espèce ayant un comportement voisin de celui de *Lumbrineris latreilli* vis-à-vis des perturbations atteignant les communautés de substrats meubles (Bellan, 1967 et 1984 ; Salen-Picard 1985 et 1992). Le second groupe (Gr. 2) réunit l'ensemble des prélèvements réalisés à la station C, à l'exception déjà notée de C 78 et C 79. A ce regroupement ne correspond aucune syndérivée permettant d'expliquer l'existence d'un groupement monophylétique. Il ne repose que sur des « absences », notamment des espèces des communautés moins profondes ou des sentinelles de perturbations naturelles ou anthropiques. Les espèces qui participent le plus significativement à sa composition représentent des homoplasies que l'on rencontre dans la station B et, à moindre degré, A et qui sont des caractéristiques de la Vase Terrigène Côtière (*Leanira ylleni*, *Nereis longissima*, *Nephtys hystricis*, *Marphysa kinbergi*, *Laonice cirrata*, *Prionospio ehlersi*, *P. pinnata*, *Aricidea claudiae*, *Magelona alleni*, *Myriochele heeri*, *Sternaspis scutata*) ou des vasicoles strictes (*Goniada maculata*, *Nucula sulcata*).

La suppression des prélèvements A 64 et B 64 n'a pas apporté, dans le cas de l'analyse quantitative, d'information supplémentaire.

**Description des Communautés***La communauté d'origine*

En fonction des résultats des deux types d'analyses, on constate deux faits majeurs : 1) une nette affinité entre l'ensemble des prélèvements ; 2) il existait, tant au plan

qualitatif que quantitatif, des différences importantes entre les peuplements des stations A et B, et celui de la station C, comme le montre la position des prélèvements le long de l'axe 1 de l'ACP et l'isolement de A 64, A 72, B 64 et B 72 dans les diverses analyses de parcimonie. Les peuplements des trois stations ont été décrits comme appartenant à une même communauté ou biocénose de la Vase terrigène Côtière (Fèbvre-Chevalier, 1969). Cette appartenance était justifiée par la fréquence relative élevée des espèces à affinité vasicole (respectivement 70, 80 et près de 90 %, pour A, B et C) et la présence dans les trois stations d'un fond commun d'espèces considérées comme caractéristiques exclusives de la biocénose, espèces que l'on retrouve en tant que syndérivées partielles, c'est-à-dire fréquentes, mais non constantes et avec des représentations quantitatives variables. Sous son aspect typique décrit par Picard (1965) entre 40 et 80 m de profondeur au large du delta du Rhône et du golfe de Fos, il s'agissait d'un peuplement peu diversifié (indice de Shannon compris entre 4 et 4,5) si on le compare aux autres biotopes circalittoraux de la région marseillaise où prédominaient un petit nombre d'espèces dont les plus caractéristiques étaient *Sternaspis scutata*, *Thyasira croulinensis* et *Ninoe armoricana*. Le peuplement présentait des variations liées à la profondeur et à des particularités locales. (Fèbvre-Chevalier, 1969; Picard, 1971) : disparition ou raréfaction des espèces précédentes au fur et à mesure que la profondeur diminue, augmentation du nombre d'individus, de la diversité spécifique, diminution de la fréquence relative des annélides polychètes au profit des crustacés et des échinodermes, prolifération d'espèces vasicoles filtreuses ou dépositivores de surface en relation avec le ralentissement de la sédimentation dans le fond du golfe de Fos et contamination par des espèces des sables voisins. On passait d'une vase à *Sternaspis* (station C) à une vase à *Maldane glebifex*, *Amphiura chiajei* et *Pseudoleiocardia fauveli* entre 20 et 40 m de profondeur (station B) à une vase à *Nucula sulcata* et *Mysella bidentata* entre 15 et 20 m (station A).

#### Évolution de la communauté après 1964

Après 1964, de profonds changements sont intervenus aussi bien dans les compositions qualitative que quantitative du peuplement des stations A et B. Ces changements, perceptibles dès 1972 en ACP, ne sont mis en évidence qu'à partir de 1975 en analyse de parcimonie. Ils ont contribué à augmenter la ressemblance entre les trois sites d'où l'importante polytomie obtenue en analyse de parcimonie réalisée à partir des seules présence-absence des espèces. Le fait qu'à tous les prélèvements contribuant à la position de l'axe 1 de l'ACP soient associées les espèces sentinelles indicatrices d'instabilité *Lumbrineris latreilli* et *Thyasira flexuosa* nous amène à considérer que cet axe traduit les «stress» subis; ces stress atteignent un maximum aux stations A et B en 1975 et 1976 c'est-à-dire à la fin des grandes opérations de dragages et de rejets en mer; de même, l'analyse de parcimonie associée aux prélèvements réalisés de 1975 à 1979 *Corbula gibba*, *Myrthea spinifera*, *Paralacydonia paradoxa* toutes espèces

indicatrices de perturbations. Les stress ont été beaucoup moins importants en profondeur; l'analyse de parcimonie montre qu'il n'y a pas de différences importantes dans la composition qualitative des prélèvements réalisés avant (C 63) et pendant la période des travaux (C 69 à C 79). Des perturbations sont perceptibles au cours du prélèvement C 79, dans le cas de l'ACP, au cours de C 79 mais aussi de C 78, en analyse de parcimonie quantitative; ce dernier prélèvement n'a qu'une faible contribution sur l'axe 1; il en est de même de *Corbula gibba* espèce prédominante de ce prélèvement.

Au total quatorze espèces pouvant être considérées comme sentinelles de perturbations dans les substrats meubles ont été répertoriées dans ce travail. Seules trois d'entre elles : *L. latreilli*, *Corbula gibba* et *T. flexuosa* ont réellement proliféré au cours de la période considérée. La présence de *C. gibba* associée aux prélèvements A 79, B 78 et B 79 n'est expliquée par aucun des quatre axes demandés dans l'ACP. *C. gibba* est une espèce abondante au voisinage du débouché en mer de tous les effluents côtiers du littoral entre Marseille et Sète; elle est également devenue fréquente dans le golfe de Marseille avec l'extension des auréoles de pollution de l'émissaire urbain de Marseille Cortiou (Picard, 1976). La fréquence relative cumulée des espèces sentinelles dans la station C est progressivement revenue après la fin des travaux à une valeur voisine de celle de 1963 (Fig. 5); rappelons que c'est leur fréquence relative plus que leur seule présence qui aurait «un rôle d'alarme vis-à-vis des déséquilibres de l'environnement» (Bellan, 1991). Leur fréquence relative, bien que tendant à diminuer, est encore élevée (> 25 %) aux stations A et B. Non seulement le peuplement de ces deux stations reste très éloigné de l'état initial, mais il n'a pas atteint un nouvel état d'équilibre.

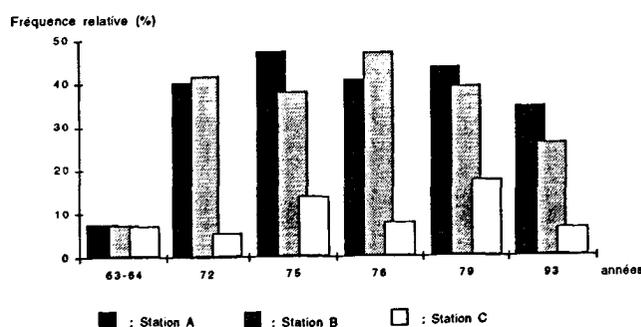


Figure 5

Variations de la fréquence relative des espèces sentinelles entre 1963-1964 et 1993.

Variations of sentinel species relative frequency from 1963-1964 to 1993.

Pendant la période 1963-1993 il existe une assez bonne corrélation entre le nombre d'individus récoltés et le débit moyen du Rhône au cours de l'année qui précède pour les stations A et B et le débit moyen au cours des deux années précédentes pour la station C (Fig. 6a); contrairement à A et B, peuplées essentiellement d'individus à cycle annuel,

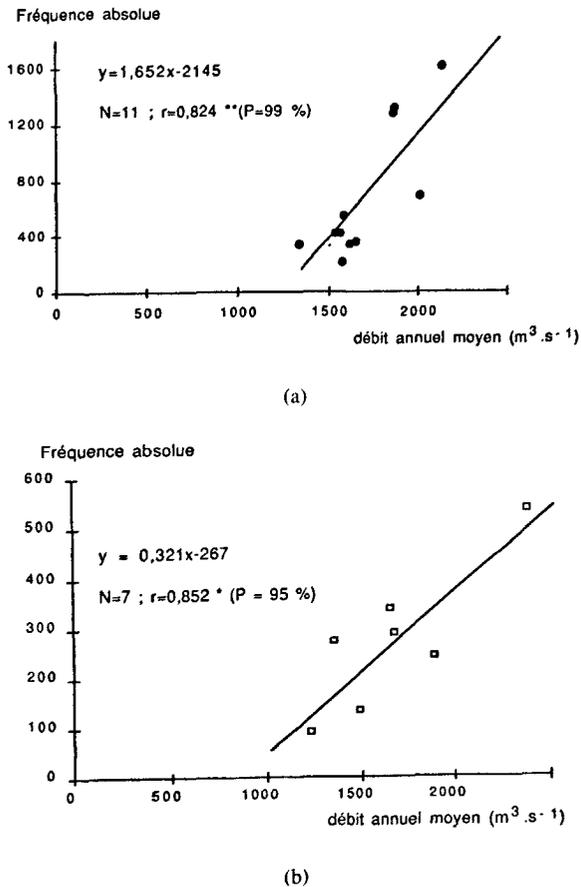


Figure 6

Relation entre la fréquence absolue (nombre d'individus récoltés par prélèvement de  $50 \text{ dm}^3$ ) et le débit du Rhône.

- a) Fréquence de l'ensemble de la macrofaune dans la station C en fonction du débit moyen au cours des deux années qui précèdent.  
 b) Fréquence de *Lumbrineris latreilli* dans la station B en fonction du débit moyen au cours de l'année précédente (sans le prélèvement de 1964).

Relation between number of specimens in  $50 \text{ dm}^3$  of sediment and the Rhône flow.

- a) Total macrofauna in station C vs mean Rhône flow during the two previous years.  
 b) *Lumbrineris latreilli* in station B vs mean Rhône flow during the previous year (without 1964 sampling).

certaines espèces de C, notamment *Sternaspis scutata*, ont un cycle bisannuel; la réponse aux crues du Rhône est étalée en fonction de la biologie des espèces. Au niveau spécifique, *Thyasira croulinensis*, espèce caractéristique de la biocénose, est assez bien corrélée avec le débit de l'année qui précède, de même que la fréquence absolue de *Lumbrineris latreilli* en A ou en B si l'on exclut les années précédant le début des travaux (Fig. 6b). Quant à *Corbula gibba*, toujours en excluant B 64, il paraît y avoir un débit seuil (environ  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) à sa prolifération.

En liaison avec la modification de la granulométrie, notamment la présence de galets dans la station B, située sur l'emplacement même des rejets de dragages, s'est développée une communauté associée aux petits substrats solides : polychètes serpulidés, bivalves du genre *Anomia*. Seule l'analyse de parcimonie a permis de l'individualiser; son développement n'a été qu'éphémère.

L'axe 2 de l'ACP est expliqué uniquement par les prélèvements de la station C à laquelle sont associées des espèces caractéristiques exclusives de la biocénose de la Vase Terrigène Côtière. Cet axe pourrait traduire, à partir des valeurs négatives vers les valeurs positives, le pourcentage de fraction fine du sédiment. La station C n'a pas connu de changement fondamental de son peuplement, comme le montre la proximité de C 63, C 69 et C 93 sur l'axe 2 et le regroupement en analyse de parcimonie quantitative, à l'exception de C78 et C 79, de l'ensemble des prélèvements de cette station; l'état 1978-1979 n'a été qu'un état transitoire.

Le nombre d'espèces récoltées pour un prélèvement de  $50 \text{ dm}^3$ , de même que la diversité et l'équitabilité, n'ont pas varié de façon significative au cours de la période considérée; le nombre d'individus a connu d'importantes fluctuations avec un maximum, quelle que soit la profondeur, au cours des années 1978 et 1979. Les annélides polychètes, toujours largement majoritaires en B et en C, le sont devenues en A après 1964.

## DISCUSSION

Le peuplement des deux stations internes au golfe a été profondément modifié après 1964. Les changements sont visibles plus précocement dans l'ACP (1972) qu'en analyse de parcimonie (1972). L'ACP privilégie en effet les espèces les plus abondantes tandis que l'analyse de parcimonie privilégie davantage la présence de l'espèce que sa fréquence. Le peuplement de la station la plus profonde n'a pas connu de modification aussi drastique que ceux de A et B, il montre néanmoins un gradient positif de C 63 vers C 79 le long de l'axe 1 de l'ACP. L'altération des communautés installées en A et B est la conséquence des bouleversements sédimentaires engendrés par les opérations de dragages et de rejets. La remise en suspension de quantités importantes de matériaux fins a provoqué notamment la destruction des faciès de bivalves exclusivement suspensivores (*Nucula sulcata*, *Mysella bidentata*) et leur remplacement par des faciès d'espèces telles celles du genre *Thyasira* à la fois suspensivores et dépositivores et plus mobiles à l'intérieur du sédiment (Salen-Picard, 1981). Par leur durée et leur caractère répétitif, les opérations de dragages et de largages ont contribué à l'instabilité des fonds. Les transformations majeures subies par la communauté sont attribuées davantage à ces processus de remise en suspension des sédiments qu'aux modifications de granulométrie qu'ils ont provoquées. Le développement d'une communauté inféodée aux petits substrats solides et aux sables déversés entre 30 et 60 m de profondeur n'a été que de courte durée; les galets ont été très rapidement ennoyés par la sédimentation argileuse et ne sont plus porteurs que de tubes vides de serpulidés. Depuis la fin des travaux (1978) un certain nombre d'indicateurs ont retrouvé ou tendent à retrouver des fréquences voisines de celles d'avant 1965: c'est le cas des *Thyasira*. Des taxons qui avaient complètement disparu pendant la période 1965-1979 se réinstallent tel *Pseudoleiocapitella fauveli*. La

fréquence de certaines espèces sentinelles dont l'installation et la prolifération ont coïncidé avec le début des travaux reste cependant très élevée (31,4 % pour *Lumbrineris latreilli* en A 93 et 19,6 % en B 93).

En ce qui concerne les sites A et B, un seuil a été franchi, le peuplement reste fondamentalement différent de ce qu'il était avant. Ce seuil, atteint quantitativement entre 1964 et 1972, ne l'a été qu'entre 1972 et 1975 sur le plan qualitatif; la prolifération d'un certain nombre d'espèces intervient avant l'altération profonde de la composition qualitative du peuplement.

Le maximum de stress correspond dans la station C aux années 1978 et 1979; les changements subis par le peuplement pourraient également être attribués aux travaux avec un effet « retard » occasionné par sa situation plus profonde. Comme en A et B la période 1965-1979 correspond à des proliférations d'espèces : proliférations « anormales » au cours des années 1978 et 1979 de *Thyasira croulinensis*, espèce caractéristique exclusive de la communauté, prolifération également au cours de ces deux années de *L. latreilli*. Les années 1978 et 1979 sont apparues au cours de ce travail comme deux années particulières : outre le regroupement de C 78 et C 79 dans l'analyse de parcimonie avec les stations les moins profondes, elles sont les seules à correspondre, dans le cas de ces dernières, à la prolifération de *Corbula gibba*. L'année qui les précède a été marquée par des apports rhodaniens considérables (débit moyen en 1977 égal à  $2388 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) succédant à plusieurs années déficitaires (débit moyen entre 1971 et 1976 =  $1366 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Arnoux *et al.* (1980b) ont montré l'importance de cet épisode sur le plan de la sédimentologie, de la géochimie et, tout spécialement, des apports polluants. Aux effets des travaux se sont donc surimposés des effets climatiques; la communauté a évolué sous l'action d'une synergie de facteurs anthropiques et climatiques. On peut objecter qu'il est abusif de parler d'actions naturelles pour un fleuve dont une grande partie du bassin versant et de celui de ses principaux affluents est artificialisée et que les crues agissent de façon indirecte sur la communauté par l'intermédiaire des nutriments qu'elles véhiculent; ces effets n'en révèlent pas moins de réels phénomènes climatiques. Les travaux, en détruisant l'équilibre préexistant, ont déclenché le processus d'altération de la communauté dans sa partie la plus littorale.

Un phénomène reste inexpliqué : celui de l'opposition le long de l'axe 3 de l'ACP entre prélèvements de la station C où prédomine *Sternaspis scutata* et ceux où prédomine *Chaetozone setosa*. Bellan (1985) considère cette dernière espèce comme indicatrice de perturbations; Dauvin (1993) signale des proliférations de cette espèce après la pollution par les hydrocarbures de l'*Amoco Cadiz*. Elle n'a fait son apparition dans le golfe de Fos qu'après 1965 et n'est devenue abondante qu'après 1975. Sa fréquence n'est pas corrélée avec les débits du Rhône. S'agit-il d'une espèce opportuniste dont l'extension serait à mettre en relation avec l'activité du port pétrolier ou son développement serait-il lié à d'autres facteurs? Certaines proliférations ou disparitions d'espèces pourraient être liées à des phénomènes climatiques de plus grande amplitude qu'il

n'est pas possible de mettre en évidence dans le cadre de cette étude. C'est notamment le cas de *Maldane glebifex* qui n'est plus récolté sur le site depuis 1969. Cette espèce est de plus en plus rarement échantillonnée dans les substrats meubles de la région.

Dans un travail antérieur, Salen-Picard (1983) avait proposé un schéma d'évolution parallèle des biocénoses de substrat meuble selon deux modalités : envasement naturel et pollution organique. L'exemple dont nous traitons se situe à la croisée de ces deux modalités : modifications sédimentaires et pollutions organiques et minérales. Un des termes de la comparaison de Salen-Picard concernait la structuration des communautés benthiques présentes au large du rejet en mer de l'émissaire de Marseille-Cortiou (Bellan, 1967; Bellan *et al.*, 1981). La similitude de situation entre l'évolution des peuplements du golfe de Fos et ceux de Marseille-Cortiou est importante à signaler : 1) les espèces structurantes, telles que nous les avons mises en évidence dans nos diverses analyses sont les mêmes : *Paralacydonia paradoxa*, *Lumbrineris latreilli*, *Chaetozone setosa*, *Myrthea spinifera*, *Corbula gibba*; 2) il y a accroissement du nombre d'individus de certaines espèces dès que la perturbation s'amorce, avant même que la structure qualitative du peuplement ne soit altérée; 3) on observe une monotonisation spatiale généralisée des peuplements par le biais de la prédominance quantitative d'un nombre restreint d'espèces qui monopolisent l'espace. Ceci correspond très précisément à ce que Bellan (1967) avait défini comme « zone subnormale ». On peut considérer que les peuplements présents dans les stations A et B depuis le début des années 1970 sont assimilables à ceux de cette zone subnormale et qu'un épisode particulier, observé en 1978 et 1979, dans la station C peut y être assimilé. Cette similitude est renforcée lorsqu'on rappelle que les teneurs en matières organiques observées à ces stations sont de l'ordre de 1 à 1,5 g (pour 100g) soit celles que Arnoux *et al.* (1980b) considéraient comme typiques de la zone subnormale.

Des comparaisons avec la littérature sont difficiles à établir; les opérations de « dumping » généralement décrites n'intéressent que des quantités de matériel beaucoup plus faibles que celles mises en jeu à Fos et les largages durent, tout au plus, quelques mois. Nous excluons de nos comparaisons les « dumpings » en mer, réalisés pour se débarrasser des rejets domestiques et qui se rattachent à ce que l'on a observé dans le site de Cortiou jusqu'en 1986. Ce genre de rejets conduit à l'établissement de types de communautés, reconnues à l'échelle mondiale, dénommées souvent, « transitional zone » (Reish, 1984) tout à fait assimilables à cette zone subnormale (Reish et Bellan, 1995). Anderson *et al.* (1993) comparent un site témoin et un site ayant reçu  $760\,000 \text{ m}^3$  de matériaux plus grossiers que le sédiment d'origine. Au cours de l'année qui a suivi des différences significatives dans le nombre d'individus, le nombre d'espèces et la diversité spécifique sont mises en évidence entre les deux sites; il s'est développé dans les rejets des espèces opportunistes mais il s'y est aussi installé des espèces de la communauté environnante; le peuplement est classé « zone de transition » selon une nomenclature comprenant trois catégories (central,

transitional and contaminated). Rosenberg (1977) décrivant les changements survenus après six mois de travaux et le largage de  $2 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de sédiment au centre d'un fjord suédois, conclut que l'augmentation de la quantité de particules en suspension joue un rôle majeur en bloquant, notamment, le recrutement de nombreux bivalves. Les disparitions d'individus et d'espèces sensibles sont, comme c'est le cas dans le golfe de Fos, compensées par des développements d'espèces plus tolérantes. La perturbation n'ayant été que de courte durée, la communauté a retrouvé dès l'année suivante son équilibre initial.

## CONCLUSION

La communauté des vases terrigènes côtières établie au-dessous de 15 m de profondeur à l'intérieur et au large du golfe de Fos était à l'origine sous l'influence prépondérante de l'arrivée en mer des eaux rhodaniennes. Cette influence diminuait avec la profondeur et le ralentissement de la vitesse de sédimentation.

Quinze ans de travaux de dragages et de rejets en mer y ont entraîné de profonds changements. Sur l'emplacement des rejets eux-mêmes (30 à 60 m de profondeur), les modifications de la granulométrie du substrat ont permis l'installation temporaire d'une communauté inféodée aux petits substrats solides. Les changements ont affecté l'ensemble de la communauté entre 15 et 60 m de profondeur; l'effet majeur est attribué à la charge de la colonne d'eau en particules en suspension pendant

toute la durée des opérations; il y eu destruction des faciès d'espèces suspensives probablement par arrêt du recrutement et leur remplacement par des espèces dépositives et prolifération d'espèces connues comme indicatrices d'instabilité dans d'autres peuplements de la région et même de l'océan mondial. Ces espèces se sont également installées en profondeur (au-dessous de 70 m) mais les actions climatiques y sont restées prépondérantes.

La synergie des actions climatiques et anthropiques a provoqué entre 15 et 60 m de profondeur l'altération de la communauté d'origine. Les deux méthodes d'analyse utilisées : méthode statistique classique (ACP) ou méthode dérivée de la phylogénie cladistique (analyse de parcimonie) se sont révélées complémentaires. Elles ont permis de mettre en évidence que le seuil d'altération est franchi plus précocement au plan quantitatif qu'au plan qualitatif.

## Remerciements

Ce travail a été en partie réalisé avec le soutien du Programme National d'Océanographie Côtière – Séries à Long Terme. Les Auteurs remercient vivement Mr. Levasseur de la Compagnie Nationale du Rhône pour la communication des débits du Rhône et J. Allcock, boursier ERASMUS U.E.A Norwich (G.B.) pour la traduction du résumé en anglais.

## RÉFÉRENCES

- Anderson J., D.J. Reish, R.B. Spies, M.E. Brady, E.W. Segelhorst (1993). Chapter 12. Human Impacts, 682-766. In: *Ecology of the Southern California Bight. A Synthesis and Interpretation.*, Dailey M.D., D.J. Reish, J.W. Anderson eds. University of California Press, Print., 926 p.
- Arnoux A., J.L. Monod, J. Tatossian, A. Blanc, F. Oppetit (1980a). La pollution chimique des fonds du golfe de Fos. *Ves Journées étud. Poll. marines, Cagliari, octobre 1980*, C.I.E.S.M., 447-458.
- Arnoux A., G. Bellan, A. Jorajuria-Olivari, J.L. Monod, J. Tatossian (1980b). Relations entre les peuplements benthiques et les caractéristiques granulométriques et chimiques des dépôts au large de l'émissaire de Marseille. *Ves Journées étud. Poll. marines, Cagliari, octobre 1980*, C.I.E.S.M., 791-796.
- Bachelet G. (1984). Le recrutement des populations annéliennes sur substrat meuble : aspects méthodologiques. *Oceanis* 10, 735-746.
- Bellan G. (1967). Pollution et peuplements benthiques sur substrats meubles dans la région de Marseille. Première partie. Le secteur de Cortiou. *Rev. Intern. Océanogr. méd.*, 6(7), 53-87. Deuxième partie : L'Ensemble portuaire marseillais. *Rev. Intern. Océanogr. méd.* 8, 51-95.
- Bellan G. (1984). Indicateurs et Indices biologiques dans le domaine marin. *Bull. Ecol.* 15, 13-20.
- Bellan G. (1985). Effects of pollution and man-made modifications on marine benthic communities in the mediterranean: A review. 163-194, in: *Mediterranean Marine Ecosystems*. M. Moraitou-Apostolopoulou and V. Kiortis ed. Plenum Publis. Corp., Print., London.
- Bellan G. (1991). Characteristic, indicative and sentinel species: from the conception to the utilization, 95-100, in *Terrestrial and aquatic ecosystems: Perturbation and Recovery*, Ravera ed. Ellis Horwood Ltd, Publish., 613 p.
- Bellan G., M. Bourcier (1990). Les enseignements d'une étude sur dix ans (1976-1986) des peuplements de substrats meubles au large d'un émissaire d'eaux usées d'une grande ville. *Cah. Biol. mar.* 31, 225-249.
- Bellan G., M. Bourcier, J. Picard, C. Salen-Picard, G. Stora (1981). Conséquences structurelles dues aux perturbations affectant les biocoöses benthiques méditerranéennes de substrat meuble. *Rapp. P.V. Comm. inter. mer Médit.* 29, 6, 215-221.
- Bellan-Santini D., P.M. Arnaud, G. Bellan (1995). Affinités entre peuplements benthiques méditerranéens avec et sans *Caulerpa taxifolia*. 2nd. *International Workshop on Caulerpa taxifolia*, Barcelone, 15-18 décembre 1994, GIS Posidonie publ., France (sous presse).
- Bellan-Santini D., J.-C. Dauvin, G. Bellan (1994). Analyse de données en écologie benthique : utilisation de la méthode de l'analyse de parcimonie. *Oceanologica Acta* 17, 3, 331-340.
- Blanc F., M. Leveau (1971). Plancton et eutrophie ; aire d'épandage rhodanienne et golfe de Fos (traitement mathématique des données). *Thèse Doct. Etat Univ. Aix-Marseille II*, 681 pp.
- Dauvin J.-C. (1999). Le benthos ; témoin des variations de l'environnement. *Oceanis* 19, 25-53.

- Farnolle P.** (1993). Recherche de sites d'immersion de produits de dragages dans le golfe de Fos. Rapport Port Autonome de Marseille, 90 p.
- Fèbvre-Chevalier C.** (1969). Etude bionomique des substrats meubles dragables du golfe de Fos. *Téthys* 1-2, 421-476.
- Glémarec M.** (1979). Les fluctuations temporelles des peuplements benthiques liées aux fluctuations climatiques. *Oceanologica Acta* 2, 3, 365-371.
- Gray J.S., H. Christie** (1983). Predicting long term changes in marine benthic communities. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 13, 87-94.
- Ibanez F., J.-C. Dauvin, M. Etienne** (1993). Comparaison des évolutions à long terme (1977-1990) de deux peuplements macrobenthiques de la baie de Morlaix (Manche occidentale). Relations avec les facteurs hydroclimatiques. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 169, 1, 81-214.
- Lambshhead P.J.D., G.L.J. Paterson** (1986). Ecological cladistics. An investigation of numerical cladistics as a method for analysing ecological data. *J. Nat. Hist.* 20, 895-909.
- Legendre P.** (1989). Quantitative methods and biogeographic analysis. In: *NATO advanced workshop. St Andrews, N.B., Canada, septembre 1989*, 25 p.
- Maddock L., C.L. Swann.** (1977). A statistical analysis of some trends in sea temperature and climate in the Plymouth area in the last 70 years. *J. mar. biol. Ass. U.K.* 57, 317-338.
- Maddison W.P., D.R. Maddison** (1992). Mc Clade version 3.0.1. A phylogenetic computer program distributed by the authors.
- Pauc H.** (1970). Contribution à l'étude dynamique et sédimentologique des suspensions solides au large de l'embouchure du Grand Rhône (Grau de Roustan). *Thèse Spécialité Géol. appl. Montpellier*, 126 p.
- Pérès J.-M., J. Picard** (1964). Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. *Rec. Trav. St. mar. Endoume* 31, 3-137.
- Picard C.** (1971). Les peuplements de vase au large du golfe de Fos. *Téthys* 3, 3, 569-618.
- Picard J.** (1965). Recherches qualitatives sur les biocénoses marines des substrats meubles dragables de la région marseillaise. *Rec. Trav. St. mar. Endoume* 36, 3-160.
- Picard J.** (1976). Accélération récente de l'extension, au niveau des fonds marins et du benthos, de la zone d'épandage du collecteur de Marseille-Cortiou. *IIIes Journées Etud. Pollutions, Split, C.I.E.S.M.*, 199-205.
- Piélou E.C.** (1966). The measure of diversity in different types of biological collections. *J. Theor. Biol.* 13, 131-144.
- Reish D.J.** (1959). A discussion of the importance of the screen size in washing quantitative marine bottom samples. *Ecology* 40, 307-309.
- Reish D.J.** (1984). Domestic Wastes, in *Marine Ecology* 5 (4), Otto Kinne ed. John Wiley and son Ltd, London, Print., 1736-1760.
- Reish D.J., G. Bellan** (1995). The long term effects of municipal discharges from outfall sewewers from urban areas on the marine Environment: a review, 701-743, in *Functioning and dynamics of natural and perturbed Ecosystems*. D. Bellan-Santini, G. Bonin, C. Emig, eds. Lavoisier Print., Paris, 819 p.
- Rosenberg R.** (1977). Effects of dredging operations on estuarine benthic macrofauna. *Mar. Poll. Bull.* 8, 5, 102-104.
- Roux M., E. Vernier** (1975). Évolution récente des fonds meubles de la partie occidentale du golfe de Fos. *C. R. Acad. Sci. Paris*, (sér. D), 280, 2097-2100.
- Roux M., E. Vernier** (1977). Répartition des minéraux argileux dans les sédiments du golfe de Fos. *Géol. méditerran.* 4, 365-370.
- Salen-Picard C.** (1981). Évolution d'un peuplement de Vase Terrigène Côtière soumis à des rejets de dragages dans le golfe de Fos. *Téthys* 10, 83-88.
- Salen-Picard C.** (1982). Contribution à l'étude dynamique de peuplements marins de substrats meubles : les peuplements macrobenthiques circalittoraux soumis à l'envasement dans la région provençale. *Thèse Doct. Etat, Univ. Aix-Marseille II*, 262 p.
- Salen-Picard C.** (1983). Schémas d'évolution d'une biocénose macrobenthique de substrat meuble. *C. R. Acad. Sc. Paris*, (sér. 3), 296, 587-590.
- Salen-Picard C.** (1985). Indicateurs biologiques et sédimentation en milieu circalittoral méditerranéen. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.* 29, 211-212.
- Salen-Picard C.** (1992). Envasement, évolution des peuplements benthiques et indicateurs biologiques en milieu circalittoral méditerranéen. In: « *Qualité du milieu marin – Indicateurs biologiques et physicochimiques* » Boudouresque C.F., M. Avon, C. Pergent-Martini, eds. GIS Posidonies publ., Fr., 175-187.
- Shannon C. E., N. Weaver** (1963). The mathematical theory of communication. *Urbana Univ. of Illinois Press*, 117 p.
- Southward A.J.** (1991). Forty years of changes in species composition and population density of barnacles on a rocky shore near Plymouth. *J. mar. biol. Ass. U.K.* 71, 459-513.
- Swofford D.L.** (1993). PAUP: phylogenetic analysis using parsimony, version 3.1.1. Computer program distributed by the Illinois Natural History Survey, Champaign, Illinois, USA.
- Vernier E.** (1972). Recherches sur la dynamique sédimentaire du golfe de Fos. *Thèse Doct. 3ème Cycle Univ. Aix-Marseille II*, 72 p.
- Wanntorp H.-E., D.R. Brooks, T. Nilsson, S. Nylin, F. Ronquist, S.C. Stearns, N. Wedell** (1990). Phylogenetic approaches in ecology. *Oikos* 57, 119-132.