

Mise en évidence de modèles éco-biologiques dans des zones soumises à perturbations par matières organiques

Modèles éco-biologiques
Benthos
Matière organique
Mer Méditerranée
Pollution

Ecobiological models
Benthos
Organic mater
Mediterranean Sea
Pollution

G. Bellan, D. Bellan-Santini, J. Picard
Centre National de la Recherche Scientifique, LA 41, Station marine d'Endoume, rue Batterie-des-Lions, 13007 Marseille, France.

Reçu le 28/1/80, révisé le 10/3/80, accepté le 15/3/80.

RÉSUMÉ

Quatre modalités de localisations topographiques des peuplements atteints par la pollution ont été reconnues sur les côtes provençales : 1° contact immédiat avec la source de pollution déterminant des « auréoles concentriques » de peuplements; 2° « fonds de décantation » situés plus ou moins loin de la source de pollution et alimentés par des actions hydrodynamiques locales; 3° agencement des peuplements en « éléments de mosaïques » là où les obstacles font écran à la circulation des eaux; 4° extension sur des surfaces considérables de peuplements dégradés lorsque le recyclage de la matière organique des sédiments est bloqué par l'intervention de substances chimiques adsorbées.

Oceanol. Acta, 1980, 3, 3, 383-390,

ABSTRACT

Ecobiological models and organic pollution disturbances along the coast of Provence (France)

Four types of topographic localisations of communities altered by organic pollution can be recognized along the Provencal coast of France : 1) close to the source of pollution, giving "concentric aureoles" of re-population; 2) "deposition areas" located somewhat farther away from the pollution source, supplied by local hydrodynamic effects; 3) "mosaic populations" where there are obstacles or screens to water circulation; 4) large areas of impoverished communities where recycling of the organic matter of the sediments is prevented by adsorbed chemical substances.

Oceanol. Acta, 1980, 3, 3, 383-390.

INTRODUCTION

L'étude dynamique des modifications affectant les peuplements benthiques de substrats meubles sous influence de la pollution par matières organiques dominantes, nous a permis de mettre en évidence quatre modalités différentes quant à la localisation topographique des peuplements subissant ce type de pollution. Ces modalités sont, de surcroît, largement influencées par les autres types d'actions de l'homme sur le milieu marin, et notamment par les modifications artificielles des paramètres physiques du milieu : hydrodynamisme, sédimentation, salinité, etc. Ces modalités, que nous considérons en fait comme de véritables modèles, bien

que ce terme soit souvent chargé d'une signification mathématique illusoire dans le cas présent, ont été précédemment mises en évidence (Bellan *et al.*, 1978). Toutefois, le cadre réduit qui avait été imposé à l'expression de nos réflexions nécessitait que la question soit reprise. Un certain nombre de points ont donc été explicités dans la présente contribution qui, de surcroît, a été illustrée de nouveaux exemples, fruit de nos recherches ou de celles de nos collaborateurs.

Pearson et Rosenberg (1978) ont présenté une revue exhaustive et comparative à l'échelle mondiale, des travaux réalisés sur l'action de « l'enrichissement » en matières organiques sur les peuplements benthiques,

dans laquelle une partie des données reprises ici ont été utilisées. Notre contribution se voudrait, plutôt, être une tentative plus globale de modélisation d'effets de la pollution par matières organiques. Nos exemples sont choisis sur les côtes de Provence, en Méditerranée, en souhaitant qu'ils puissent être généralisés à d'autres aires géographiques et à d'autres mers.

PREMIÈRE MODALITÉ

Au voisinage immédiat d'une forte source de pollution, la grande abondance et la permanence des apports polluants sont telles que les actions hydrodynamiques locales ne peuvent disperser la totalité des apports, et le processus naturel de cyclage de la matière organique est insuffisant à résorber l'excès de celle-ci, tandis que les polluants sont, soit stockés dans le sédiment par adsorption sur les particules les plus fines, soit dissous dans l'eau d'imbibition.

Les peuplements les plus pollués sont alors au contact même de la source de pollution.

Le collecteur d'égouts de la ville de Marseille qui débouche, au niveau de la mer, dans la calanque de Cortiou, située sur une côte inhabitée, à 8 km à l'écart de l'agglomération marseillaise, répond à ce schéma.

La côte, orientée Est-Ouest, est rocheuse, ouverte aux vents de secteur Est, mieux protégée des vents de Sud par les îles de l'Archipel de Riou, et abritée des vents Ouest et Nord-Ouest par le massif de Marseilleveyre. La côte subit les houles d'Est et du Sud; la mer de « Mistral » (vent du Nord-Ouest) agit peu dans le secteur même de Cortiou. Les courants portent, en général, d'Est en Ouest; ils peuvent être forts. Au pied du collecteur, les fonds atteignent -12 m et croissent régulièrement : -68 m à 1 800 m du rivage. Parallèlement à la côte, les fonds s'abaissent graduellement selon un axe NNW vers l'ESE, et passent de -25 à -61 m en l'espace de 1 mille, délimitant ainsi un vaste golfe sous-marin s'appuyant à l'Ouest sur le plateau des Chèvres (profondeur -12 m). Le collecteur débite par temps sec 3 à 4 m³/s d'eaux usées fortement chargées en matières organiques et en polluants divers industriels et ménagers (Caruelle, 1973; Auclair-Dessemon, 1973; Aillaud, 1976; Arfi, 1978). Durant la période 1965-1970, il y eut, en été, des dérivations sporadiques du petit fleuve côtier Huveaune.

État 1965-1966

La distribution des peuplements animaux présents dans les substrats meubles pollués, s'établit de manière parfaitement régulière en fonction de la charge polluante des eaux qui les drainent ou des matières qui y sédimentent, ainsi qu'Auclair-Dessemon (1973) l'a montré. La mise en évidence de trois aires concentriques régulières a été réalisée par Bellan (1967 a, b), qui a pu présenter un schéma d'organisation spatiale devenu classique (fig. 1).

• La zone I ou zone de pollution maximale

Cette zone est dépourvue de toute vie animale

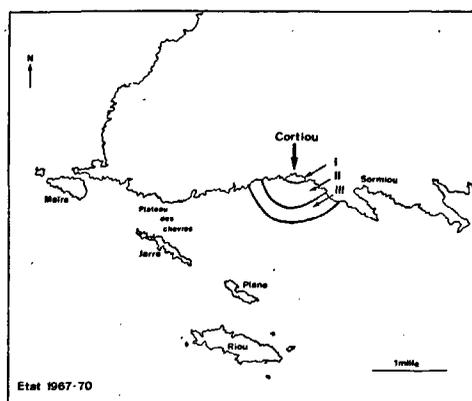


Figure 1

Distribution des zones de pollution maximale (I), polluée (II) et subnormale (III) au large de l'émissaire de Cortiou.

Distribution of maximal pollution (I), polluted (II) and subnormal (III) zones of the Cortiou sewer outfall.

macroscopique; il en va de même, parfois, pour le méiobenthos. La charge en polluant des eaux, elles-mêmes peu salées, et celle des sédiments, toujours hétérogènes et grossiers, apparaît relativement faible, mais l'ensemble des conditions abiotiques sont suffisamment rudes pour empêcher toute tentative d'installation d'espèces macrobenthiques. Cette zone s'étendait autour du débouché de l'égout, dans un rayon de 40 à 60 m, sur un plateau d'épandage situé entre 14 et 16 m de profondeur, au niveau duquel les houles se font encore notablement sentir et concourent, certainement, à empêcher le stockage des éléments pollués.

• La zone II ou zone polluée

On passe rapidement (une dizaine de mètres) de la zone I à la zone II dite zone polluée. Celle-ci est caractérisée par la présence d'un très faible nombre d'espèces, cinq à six au maximum, essentiellement de Polychètes, toutes hautement caractéristiques des sédiments riches en matières organiques et qui ont, dans ces conditions, la possibilité de se multiplier. Ces espèces, qui peuvent être qualifiées d'« opportunistes », se retrouvent, dans d'autres conditions, lorsque la matière organique autochtone ou allochtone s'accroît. Les deux espèces apparues les premières, les plus constantes et les plus abondantes, sont *Scolelepis fuliginosa* (*Malacoceros fuliginosus*) et *Capitella capitata*. On a pu récolter jusqu'à près de 100 000 individus par mètre carré. Elles peuvent représenter plus de 99,95 % du peuplement, et jamais moins de 60 %. Il y a un certain équilibre entre ces deux espèces, encore que *Scolelepis fuliginosa* tende à dominer dès que l'on s'éloigne du débouché de l'égout. A ces espèces « pilotes » s'adjoignent ensuite quelques autres Polychètes *Nereis succinea* (*Neanthes arenaceodentata*), *Andouinia tentaculata* et, localement, *Staurocephalus rudolphii* (*Dorvillea rudolphii*), un Cérianthe *Cerianthus sp.* voisin de *C. membranaceus*, le Crustacé Leptostracé *Nebalia bipes*, et de rares Mollusques. On pourrait distinguer, à l'intérieur de cette zone polluée, deux sous-zones : l'une, interne, caractérisée par la seule présence de *Scolelepis fuliginosa* et *Capitella capitata*, et l'autre, externe, « enrichie » par quelques espèces supplémentaires plus ou moins régulièrement représentées.

Bellan (1967 b) s'était refusé à envisager l'existence d'une structure biocoenotique organisée, compte tenu de la

présence d'espèces récoltées dans divers biotopes enrichis en matières organiques (y compris sur les substrats solides légèrement envasés), et plus encore de l'absence apparente de tout lien relationnel entre espèces, et du développement anarchique de leurs populations.

Cette zone polluée correspond, selon Auclair-Dessemon (1973), à la charge maximale de pollution, même s'il n'y a pas de distribution homogène sur toute son étendue. Dans les limites de cette zone, les sédiments sont caractérisés par des teneurs :

- en matières organiques, supérieures à 25 % et pouvant dépasser les 50 %;
- en extrait chloroformique (indicateur d'hydrocarbures), supérieurs à 2 %;
- en mercure, de l'ordre de 10 mg/kg de sédiment;
- en phosphates, supérieures à 100 mg/l d'eau d'imbibition, tandis que les teneurs en détergents anioniques dépassant 800 mg/l sont presque toutes rassemblées dans cette zone.

En 1965-1966, la zone polluée (zone II) formait une sorte de triangle dont la base s'appuyait à l'Est sur une petite crique à 700 m de l'égout et à l'Ouest sur une pointe à 750 m de l'égout, le sommet du cône se trouvant à 1 km, au droit du débouché.

• La zone III ou zone subnormale

La transition entre les zones II et III est presque aussi brutale que celle existant entre les zones I et II. La zone subnormale est caractérisée par un enrichissement spécifique notable, avec encore une assez nette dominance des Polychètes (tableau).

Tableau

	Nombre d'espèces	Pour cent	Nombre d'individus par m ²	Dominance moyenne globale
Polychètes	41	73,2	2723	86,53
Mollusques	12	21,4	313	9,95
Divers	3	5,4	111	3,53

Les quatre espèces les plus abondantes (les Polychètes *Hyalinoecia bilineata*, *Lumbrineris latreilli*, *Heteromastus filiformis* et le Mollusque *Thyasira flexuosa*) représentent 63 % des individus recueillis.

Les espèces de la zone précédente (zone II) ne sont représentées que par des individus isolés.

Aucune espèce de la zone subnormale n'est caractéristique de celle-ci. Les espèces ont en général une large répartition écologique, ou bien sont vasicoles (19 %), minucos, sabulicoles ou mixticoles, et exigent alors la présence de particules sédimentaires fines ou très fines (40 % des espèces). Toutefois, la présence d'espèces caractéristiques d'une biocoenose déterminée permet de réferer biocénotiquement les peuplements présents dans la zone subnormale à des communautés qui existeraient dans les stations concernées, notamment en fonction de la granulométrie, de l'hydrodynamisme et de la profondeur, si la pollution n'existait pas. Cependant, il faut insister tout spécialement sur le fait que ces peuplements se distinguent de l'état normal des

biocoenoses par deux faits essentiels, qui permettent de justifier de l'état *subnormal* de la zone :

- une réduction sensible du nombre des espèces caractéristiques des biocoenoses;
- la prolifération des espèces les moins sensibles à l'altération de l'ambiance ou indicatrices de tel ou tel facteur particulier (notamment édaphique) du milieu (il s'agit en général d'espèces à larges potentialités écologiques). C'est le cas, entre autres, pour le Pélécy-pode *Corbula gibba*.

Cette zone subnormale correspond à des valeurs intermédiaires de la charge polluante au niveau des sédiments : matières organiques 10 à 25 %, extrait chloroformique 0,20 à 10 %, phosphates 50 à 100 mg/l. Cette zone subnormale formait en 1965-1966, un secteur de couronne de 300 m de large à l'extrémité Est et de 600 m vers l'Ouest. Vers le Sud, le point le plus éloigné était situé à 1 350 m de l'émissaire.

Au-delà de cette zone subnormale, on retrouvait, par l'intermédiaire d'une zone de transition peu étendue, des peuplements que l'on pouvait considérer comme étant « d'eau pure ».

La séparation entre les zones I, II et III est très tranchée. L'existence de ces trois zones concentriques doit être considérée comme une donnée de base, de portée générale (Bellan, 1976 a).

Evolution spatio-temporelle des zones de pollution et notamment de la zone polluée

Les limites entre les trois zones apparaissent particulièrement nettes. Toutefois, on peut noter des évolutions, dans l'espace et dans le temps, au sein de ces zones et à leurs limites. La mise en évidence de ces évolutions permettra de comprendre le devenir ultérieur des zones décrites.

La zone I de pollution maximale ne peut guère évoluer, et le fait qu'on y rencontre très sporadiquement un individu ou deux d'une espèce de la zone II n'est pas une preuve *a contrario*.

La zone II dite polluée est soumise à de graves perturbations, provoquant des déséquilibres faunistiques importants avec des chutes spectaculaires de l'abondance des espèces.

Il nous paraît intéressant de résumer les observations effectuées de juillet 1970 à septembre 1971 par Romano (1973). Cet auteur a pu décrire un phénomène d'alternance de transgressions et de régressions entre la zone de pollution maximale et la zone polluée et, surtout, entre la zone polluée et la zone subnormale. Romano a montré que des éléments faunistiques de la zone subnormale pouvaient s'implanter temporairement, en hiver (février), dans la sous-zone externe de la zone polluée, pour disparaître ensuite très rapidement. A l'inverse, en été (juillet, août), les espèces de la zone polluée avaient tendance à se multiplier dans la zone subnormale, à sa limite interne. Il y avait une migration de la zonation, centrifuge en été et centripète en hiver. Le mouvement de balance n'était qu'apparent et il s'agissait en fait, d'une poussée de la zone polluée vers la zone

subnormale en liaison avec l'augmentation de la charge polluante (et plus probablement d'une modification qualitative de cette charge, à cette période).

En été, on a observé, au niveau de la sous-zone interne à *Scolecopsis fuliginosa* et *Capitella capitata*, des disparitions quasi totales des populations de ces deux espèces. Ces disparitions brutales sont à mettre en parallèle, soit avec le détournement au début de l'été du fleuve côtier Huveaune dans le collecteur, soit avec des périodes de grand calme et, partant, de faible renouvellement des eaux pouvant entraîner une anoxie au niveau du fond; l'élévation de température entraînant un phénomène de synergie avec les polluants (Stora, 1978; Bellan *et al.*, 1978). La réapparition des populations se fait probablement par apport de larves et se déroule en 2 mois pour *Capitella capitata* et en 4 mois pour *Scolecopsis fuliginosa*, ce qui correspond à la durée du cycle de développement de ces deux espèces. Si la chute est spectaculairement rapide, le recrutement de nouvelles populations est nettement plus progressif, mais l'effectif antérieur peut être considéré comme rétabli au début de l'hiver suivant. En effet, si le peuplement de la zone *polluée* réoccupait facilement, l'été, le secteur où était implanté celui de la zone *subnormale*, le phénomène inverse était moins aisé. L'état d'équilibre des peuplements de la zone *subnormale* apparaissait de plus en plus précaire, et favorisait l'extension de la zone *polluée* qui, en 1973, occupait l'emplacement de l'ensemble zone *polluée*-zone *subnormale* des années 1965-1966, la sous-zone interne recouvrant l'ancienne zone *polluée* dans sa totalité, alors que la sous-zone externe s'était développée sur l'emplacement de la zone *subnormale*.

On peut encore constater que, à l'intérieur de la zone *subnormale*, le Mollusque Pélécy-pode *Myrtea spinifera* devient de plus en plus abondant lorsque la pollution augmente, les plus fortes densités de cette espèce étant généralement observées au voisinage du contact avec la zone *polluée*.

On notera, d'autre part, qu'entre 1970 et 1976, la limite externe de la zone *subnormale* s'est trouvée repoussée très loin de la source de pollution, les fonds transférables à cette zone *subnormale* ayant alors occupé en quelques années la quasi-totalité du plateau continental entre Marseille et La Ciotat (Picard, 1976, 1978); mais il s'agit là d'un phénomène différent de ceux envisagés dans ce chapitre, et qui sera traité ultérieurement, à propos de la quatrième modalité.

Il convient encore d'insister sur le fait que, en cas de suppression de la source même des nuisances, les diverses zones de pollution se résorbent d'autant plus rapidement que les aires perturbées sont plus superficielles, donc davantage sujettes à un fort lessivage hydrodynamique. C'est ainsi qu'Emdadi (1979) a montré que le détournement, en fin de printemps, des eaux souillées du fleuve côtier Huveaune dans le collecteur de Marseille-Cortiou entraînait, en quelques semaines tout au plus, la disparition totale, devant l'embouchure même de l'Huveaune et à des profondeurs comprises entre 5 et 8 m, des populations denses des Polychètes *Capitella* et *Scolecopsis* caractérisant la zone *polluée*, et que ces populations denses de Polychètes se réinstallaient tout

aussi rapidement lorsque les eaux de l'Huveaune retrouvaient, à l'automne, leur écoulement naturel. En d'autres termes, on se trouve ici en présence d'un régime de type « oued » artificiellement créé, mais qui constitue un exemple précieux quant aux possibilités de pollution des fonds marins au débouché des fleuves côtiers à débit naturellement interrompu l'été.

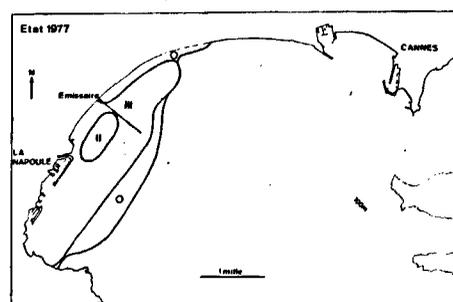
SECONDE MODALITÉ

Les apports de matières organiques sont entraînés par les actions hydrodynamiques locales; les peuplements les plus pollués correspondent alors à des « fonds de décantation » préexistants et situés plus ou moins loin de la source de pollution.

Il convient d'abord de préciser que l'on entend par « fond de décantation », des aires sous-marines où l'affaiblissement des actions hydrodynamiques permet une décantation plus importante qu'alentour des particules fines (argiles, etc.) ou légères (fibres rouies de Posidonies, débris végétaux et animaux divers, etc.); ces « fonds de décantation » ont souvent un contour arrondi lorsqu'ils occupent le centre d'une dépression ou d'un golfe sous-marin, ou un contour ovalaire allongé lorsqu'ils tapissent le fond d'un vallonement sous-marin. Par définition, ces « fonds de décantation » sont donc prédestinés à recevoir, et souvent à accumuler, des apports de matières organiques exogènes, que ces dernières soient issues des milieux naturels avoisinants ou qu'elles proviennent des activités humaines.

Le premier exemple que l'on peut prendre en considération est celui du golfe de la Napoule (Bellan, 1978). Une étude préalable à la mise en service, en juillet 1973, d'un émissaire sous-marin, avait permis de constater que les éléments polluants rejetés dans le golfe avaient tendance à y être retenus, ce qui entraînait une détérioration généralisée des peuplements, notamment au niveau d'un fond de décantation situé dans le nord-ouest du golfe et référable à la zone *subnormale*. 4 ans après la mise en service de l'émissaire, on a constaté une amélioration de la situation dans l'est du golfe, et une aggravation dans la partie ouest (fig. 2), notamment dans le fond de décantation occidental dont le peuplement a évolué vers un aspect typique de la zone *polluée* (zone II à *Capitella capitata* et *Scolecopsis fuliginosa*). Entre ce fond et le débouché de l'émissaire, subsistent des peuplements parfaitement représentatifs de la zone *subnormale* (zone III).

Figure 2
Distribution des zones *polluée* (II), *subnormale* (III) ou de contamination faible ou possible (O) dans le golfe de la Napoule.



Distribution of polluted (II), subnormal (III) and slightly or potentially contaminated (O) zones in the Bay of La Napoule.

Comme second exemple, on peut citer l'implantation, dans le sud-ouest de l'île Maïre près de Marseille, d'un fort noyau de pollution à l'intérieur d'un fond de décantation préexistant. Ce fond de décantation, riche en fibres de Posidonies, était essentiellement alimenté, en 1971, par des apports venus du Nord (rade de Marseille-Prado) lorsque soufflait le mistral (Picard, 1978). Depuis 1973, le secteur était déjà atteint par l'extension vers l'Ouest de la zone *subnormale* provenant des rejets de l'égout Marseille-Cortiou (fig. 3) : on a vu alors se

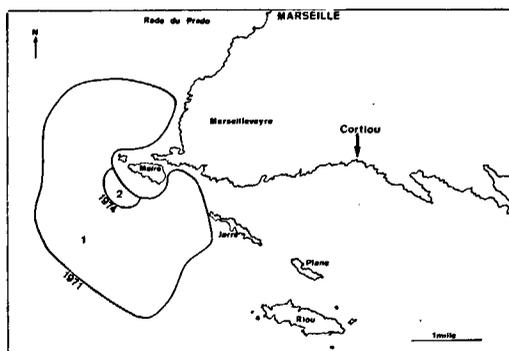


Figure 3

Fonds de décantation de l'île Maïre : 1° fond de décantation en 1971; 2° établissement d'un peuplement de la zone *polluée* (1976).

Maïre island deposition area : 1) *deposition area in 1971*; 2) *polluted zone settlement in 1976*.

développer, au sein même du fond de décantation à fibres de Posidonies, un noyau localisé constituant une « métastase » de la zone *polluée* (zone II), noyau déjà nettement individualisé en 1974. Le matériel sédimentaire comporte une fraction relativement grossière, du fait de l'existence préalable d'un dépôt de fibres de Posidonies et de la décantation de débris divers à partir d'un « radeau » de débris flottants qui se stabilise à la verticale de ce noyau pollué par régime de vent d'Est modéré : la dominance des Polychètes *Capitella capitata* et *Scolelepis fuliginosa* est alors remplacée par celle du Polychète *Audouinia tentaculata*, mieux adapté aux sédiments grossiers.

On peut encore signaler que, dans la partie occidentale du golfe de La Ciotat, un peuplement isolé référable à la zone *subnormale* est apparu en 1976 à partir d'un fond de décantation préexistant, et ceci dans un environnement totalement sain jusque-là (fig. 4); en 1979, cette « métastase » de pollution se trouve intégrée à l'intérieur du périmètre d'extension vers l'est des fonds perturbés par le complexe d'eaux polluées par les égouts de Marseille et de La Ciotat (cf. fig. 7).

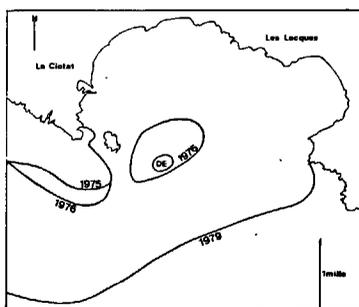


Figure 4

Évolution des limites de la zone *subnormale* entre 1975 et 1979 en baie de La Ciotat.

Evolution of subnormal zone limits between 1975 and 1979 in La Ciotat Bay.

TROISIÈME MODALITÉ

Les apports de matières organiques (et éventuellement de polluants, organiques ou non) provenant de sources faibles, mais multiples, peuvent voir leur dispersion entravée par l'existence d'obstacles artificiels, tels que môles et digues de protection des ensembles portuaires. Les peuplements les plus pollués se disposent alors en « éléments de mosaïques », là où des obstacles font écran à la circulation des eaux.

Ce phénomène semble être la règle dans les grands ports tels que ceux de Marseille (Bellan, 1967 b), Gênes (Bellan, 1976 b), ou Long Beach-Los Angeles, Californie (Reish, 1959). On retrouve dans ces grands ensembles portuaires, tels celui de Marseille (fig. 5), les différentes zones du

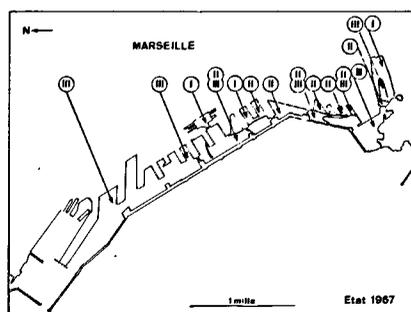


Figure 5

Distribution en mosaïque dans les ports de Marseille (1967). Zones de pollution maximale (I), polluée (II), *subnormale* (III).

« Mosaic » distribution in Marseille Harbour (1967): maximal pollution (I), polluted (II), subnormal (III) zones.

peuplement qui ont été décrites à propos de la première modalité. C'est ainsi qu'ont pu être mises en évidence une zone de *pollution maximale*, une zone *polluée* dont le peuplement est largement dominé par *Scolelepis fuliginosa* (57 % des individus recueillis) et *Capitella capitata*, auxquels s'ajoutent *Nereis caudata*, *Audouinia tentaculata* et *Staurocephalus rudolphii* (ces espèces représentant 95 % du peuplement), et une zone *subnormale* présentant un aspect à *Venerupis aureus* et *Corbula gibba* au-dessus de l'isobathe 15 m, et un aspect à *Thyasira flexuosa* en dessous de cet isobathe (ce qui rappelle le secteur de Cortiou où, selon les stations, *C. gibba* et *T. flexuosa* prenaient une importance décisive). La similitude entre ces différents peuplements est très grande et les espèces communes à deux peuplements regroupent à elles seules une fraction essentielle des individus présents : 89,55 % entre les peuplements portuaires situés de part et d'autre de l'isobathe 15 m; 79,92 % entre les peuplements de la zone *subnormale* de Cortiou et ceux du port de Marseille situés en dessous de l'isobathe 15 m, et 74,8 % entre ceux de Cortiou et ceux présents au-dessus de l'isobathe 15 m dans les ports.

Toutefois, à cette similitude structurelle s'oppose une dissemblance profonde au niveau de leur agencement. Cette dissemblance est d'ailleurs double.

Tout d'abord, et c'est ce qui caractérise de manière la plus accusée la distribution spatiale des peuplements dans les ports, ces derniers ne s'y répartissent pas en auréoles concentriques. Les peuplements, au sein des ensembles portuaires, se disposent en « éléments de mosaïques » correspondant à un bassin, à l'intervalle entre deux môles, ou à une zone protégée par une digue, par exemple, et ce en fonction de l'apport et du stockage de la charge polluante dans le sédiment de tel ou tel bassin ou chenal, chacun étant un cas particulier en fonction de la

pollution qui s'y déverse et de l'importance des obstacles s'opposant à la circulation des eaux et au « nettoyage » par les mouvements hydrodynamiques normaux. Alors que les zones I, II et III se succèdent régulièrement au large de Cortiou, on assiste, dans les ports, au passage brusque d'une zone à une autre : on passe ainsi, presque sans transition, de fonds azoïques (zone I) à des peuplements du type zone III : une simple digue a même longtemps séparé un petit bassin, azoïque, à l'extrémité Nord des ports, d'un herbier de Posidonies prospère.

La seconde dissemblance concernant l'agencement des peuplements dans les ports par comparaison à ce qui est observé en mer ouverte, tient aussi au fait que la disposition en « mosaïque » n'est pas simplement spatiale; elle se retrouve au sein des peuplements où l'on observe de fréquentes surimpositions d'éléments de la zone polluée à *Scolecipis fuliginosa*, *Capitella capitata* et *Nereis caudata* sur un peuplement référable à la zone subnormale à *Venerupis aureus* et *Corbula gibba* dominants. Au large de Cortiou de tels phénomènes ont été observés, mais ce fut toujours à échelle réduite : soit l'échelle de l'espace, les marges de transition étant très étroites par rapport aux surfaces où les deux types de peuplements étaient distinctement établis, soit à l'échelle du temps, les passages observés étant brefs (de l'ordre du mois, Romano, 1973). Il en va tout autrement dans les ports où les zones de mélange occupent des aires importantes (II-III), avec des superficies comparables à celles occupées par les peuplements distincts. De même, il semble que ces peuplements mixtes conservent leur pérennité au moins à l'échelle de l'année, et n'évoluent guère que quantitativement (en raison des fluctuations de recrutement des espèces présentes) et non qualitativement (les espèces dominantes étant constamment présentes).

Enfin, il n'est pas inutile de préciser que ces zones de mélange de peuplements II et III ne sont pas la simple juxtaposition de très petites aires de peuplements référables individuellement à la zone polluée et à la zone subnormale, mais d'un mélange effectif. Le fait que les prélèvements, exécutés à la benne « orange peel » (Reish, 1959), sur une surface ne dépassant pas 1/10 m², comportent à la fois des éléments faunistiques « référables » à chacune des zones, tend à le démontrer. Ainsi, pour cinq stations prises dans cette zone, on a observé respectivement 28,6, 40, 29,4, 22,2 et 33,3 % d'espèces « caractéristiques » de la zone polluée, le reste étant représentatif de la zone subnormale.

D'une manière générale, on peut dire que, dans les milieux portuaires, la zone subnormale est marquée par la présence simultanée, et souvent en abondance, des deux Mollusques Pélécytopodes *Venerupis aureus* (espèce caractéristique exclusive de la biocoenose des Sédiments Vaseux de Mode Calme), et *Corbula (Aloidis) gibba* (espèce indicatrice, lorsqu'elle prolifère, du recyclage de quantités modérées de matières organiques dans un sédiment non soumis à de fortes perturbations hydrodynamiques). Les deux exemples suivants illustrent quelques possibilités de variations spatiotemporelles de ces espèces.

Dans la Petite Rade de Toulon, isolée du large par un ensemble de digues, prédomine la zone subnormale avec,

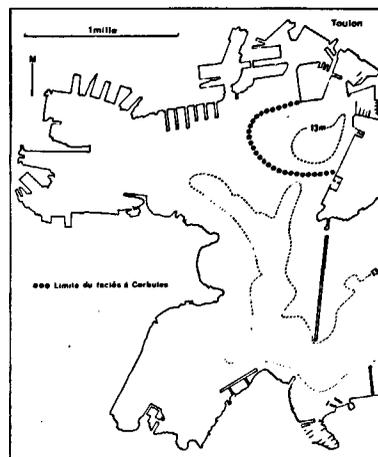


Figure 6
Extension des fonds à *Corbula gibba* dans le port de Toulon (d'après Bourcier et al., 1979).

Extension of *Corbula gibba* settlements in Toulon Harbour (from Bourcier et al., 1979).

entre autres espèces, *Venerupis aureus* et *Corbula gibba*. Une récente étude de Bourcier et al. (1979) attire l'attention sur une dépression en forme de cuvette située dans le nord-est de la Petite Rade (fig. 6). Du fait de sa profondeur supérieure à 13 m, le fond de cette dépression se trouve à l'écart du brassage de la surface du sédiment par les remous engendrés par les hélices des navires. Il s'y développe un véritable faciès à *Corbula gibba* dont la prolifération est, ici encore, liée à une certaine modalité de recyclage de la matière organique en l'absence de forte perturbation hydrodynamique. Ce faciès déborde sur la périphérie de la cuvette.

Par ailleurs, les recherches effectuées lors de la construction d'épis et lors de travaux de remblayage sur la plage du Prado de Marseille (Emdadi, 1979) ont permis d'observer, dans une zone superficielle comprise entre 5 et 8 m de profondeur, une forte installation estivale temporaire des Mollusques *Venerupis aureus* et *Corbula gibba*, du fait de la simultanéité d'action d'un certain nombre de facteurs : importants apports de terre de remblayage, affaiblissement estival de l'hydrodynamisme et diminution des apports de matières organiques due au détournement estival du petit fleuve côtier Huveaune dans le grand collecteur de Marseille-Cortiou. *V. aureus* et *C. gibba* s'installent et se développent en quelques semaines seulement et, lorsque les conditions nécessaires ne sont plus réunies, disparaissent également en quelques semaines à l'approche de l'hiver, pour céder la place au peuplement de zone polluée à *Capitella* et *Scolecipis* (cf. supra, première modalité). On se rend ainsi compte de la rapidité de réponse aux variations des facteurs du milieu de *V. aureus* et de *C. gibba* dans une zone qui correspond, en fait, à la réalisation localisée et momentanée d'une ambiance de type portuaire, ceci suffisant à expliquer que, dans les ports, il y ait coexistence permanente des populations de *Capitella* et *Scolecipis* avec celles de *Venerupis* et *Corbula*.

QUATRIÈME MODALITÉ

Lorsqu'il y a stockage dans les sédiments d'un excès de matières organiques dont le recyclage paraît bloqué par l'intervention de substances chimiques adsorbées par les argiles avant leur décantation ou par un abaissement de la salinité de l'eau surmontant les sédiments, et sans que ce stockage atteigne les niveaux de la zone II, les peuplements benthiques atteints par la pollution

occupent alors des surfaces parfois très étendues, qui correspondent à l'extension des masses d'eaux perturbées.

Cette quatrième modalité pourrait apparaître comme un aspect de la première, avec participation éventuelle de la seconde. Nous préférons la traiter comme un cas particulier, compte tenu des superficies considérables impliquées (plusieurs dizaines de kilomètres carrés dans le cas de Cortiou) ou de la multiplicité des causes mettant le processus en route (cas de l'Étang de Berre).

Il nous semble en outre que, dans des secteurs géographiques dont l'évolution serait moins bien connue que dans la région provençale, le phénomène peut passer inaperçu en tant que processus directement lié aux perturbations dues à la pollution, et être considéré comme une évolution « normale » des communautés.

Comme premier exemple, nous résumerons ici les perturbations dues au collecteur de Marseille-Cortiou (Bellan *et al.*, 1975; Picard, 1976) et intéressant une grande partie du plateau continental des parages de Marseille. Depuis sa mise en service en 1896 et jusqu'en 1970, l'influence de l'égout de Marseille-Cortiou ne dépassait pas une zone centrée sur le débouché de l'émissaire, d'environ 1,5 km de rayon (fig. 1). Depuis 1970, pour assainir la principale plage de Marseille, le petit fleuve Huveaune est détourné chaque été dans le collecteur de Marseille-Cortiou, les polluants chimiques industriels qu'il transporte se trouvant alors mélangés aux eaux usées essentiellement domestiques de l'agglomération marseillaise, le tout venant au contact des argiles en suspension dans l'eau de mer : on constate précisément qu'après 1970, il y a eu brusquement une extension accélérée et considérable de la zone *subnormale*. Cette progression de la limite externe de la zone *subnormale* (fig. 7, état en 1975) a été d'autant plus rapide qu'elle a atteint des fonds de décantation préexistants, ce qui a alors constitué des « saillants », et a été momentanément freinée au niveau de certaines pénétrations d'eaux du large sur le plateau continental, ce qui a alors constitué des « rentrants ». Des observations effectuées en 1976 et 1977 (Bellan *et al.*, 1978) ont permis de constater la résorption progressive de ces « rentrants ». Cette extension est actuellement (1979) très ralentie vers le large du fait du contact (et de la dilution qui s'ensuit) des eaux polluées néritiques avec les eaux du large de la circulation générale Est-Ouest du bassin nord-

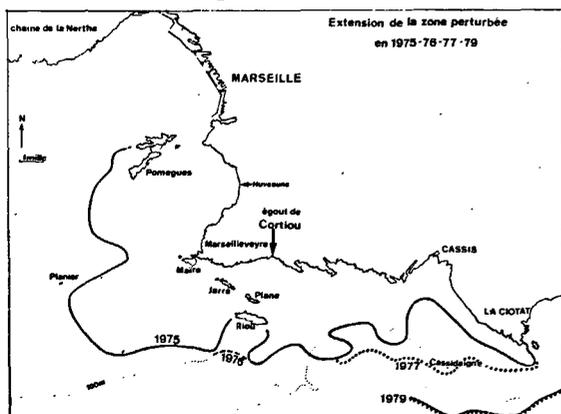


Figure 7
Extension de la zone perturbée au large de Cortiou (1975-1979).
Extension of the disturbed zone off Cortiou (1975-1979).

occidental de la Méditerranée; elle se poursuit à un rythme encore élevé vers l'Est au large du golfe de La Ciotat (*cf. supra*, seconde modalité), mais elle est très ralentie à l'ouest de Marseille par suite d'un affrontement avec des masses d'eaux se déplaçant d'Ouest en Est, et correspondant à un contre-courant induit par la circulation générale Est-Ouest.

Le second exemple concerne l'Étang de Berre, situé à une trentaine de kilomètre à l'ouest de Marseille, et d'une superficie de 15 500 ha, primitivement marin et soumis depuis mars 1966 à l'arrivée erratique d'eaux douces dont le volume annuel équivaut à quatre fois celui de l'étang. Les études de Febvre (1964), Bellan (1970), Bellan et Stora (1976) permettent d'appréhender l'évolution, complexe et catastrophique, des peuplements benthiques de l'étang, en liaison avec les bouleversements hydrologiques bien étudiés par Minas (1973). La mise en service en 1966 du canal de dérivation de la Durance a provoqué l'établissement vers - 5 m d'une halocline avec oxycline secondaire à caractère permanent, et une anoxie favorisée par l'isolement du milieu et par la sédimentation et la dégradation sur le fond d'une intense production organique primaire (Minas, 1973). Au niveau des peuplements benthiques, l'anoxie a provoqué la quasi-disparition de toute vie dans l'étang à l'exception (fig. 8) : 1° d'une étroite bande côtière où survit un peuplement euryhalin et eurytherme, le plus souvent dégradé; 2° d'un mélange de ce peuplement avec celui, dégradé, des sables vaseux de mode calme dans la partie sud-ouest la moins dessalée de l'étang « coin salé »; l'ensemble de ces peuplements est assimilable à ceux de la zone *subnormale*.

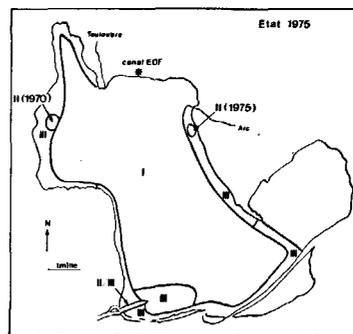


Figure 8
Extension des zones de peuplements dans l'Étang de Berre en 1975. II. Apparition sporadique de peuplements de la zone polluée (1970-1975). III. Zone *subnormale*.
Extension of settlements in Berre Lagoon in 1975. II. Sporadic appearance of polluted zone settlements (1970-1975). III. Subnormal zone.

Le processus qui a abouti, à la suite des rejets d'eaux douces, à cette véritable catastrophe écologique, peut se résumer ainsi : formation d'une halocline déclenchant une oxycline qui détermine l'anoxie en dessous de 5 m de profondeur par isolement de couches profondes; cette anoxie bloque totalement le recyclage de la matière organique (introduite dans l'étang ou s'y développant dans les niveaux superficiels) au niveau des sédiments, ce qui entretient l'anoxie, et entraîne la disparition de toute vie macrobenthique sur des aires considérables.

La pollution ou l'excès de matière organique dans l'étang ne saurait être considérée comme la cause essentielle de cet état de fait. On sait (Arnoux, comm. pers.), que c'est dans le sud-ouest de l'étang que coïncident, tout à la fois,

les peuplements les moins déséquilibrés et les plus grandes concentrations de polluants et de matières organiques dans les sédiments : mais les salinités y sont aussi les moins instables et l'oxygénation convenable (Bellan *et al.*, 1976).

Dans le chenal creusé au milieu du « coin salé », le stockage très important de la matière organique a provoqué la prolifération (par surimposition de même type que celle signalée dans les ports) d'espèces de la zone polluée, notamment *Capitella capitata*, au sein d'un peuplement de la zone *subnormale*. On a aussi assisté sporadiquement, en 1970 et 1975, à l'apparition de « taches » de *Capitella capitata* à l'écart de points d'arrivée de la pollution. Ce phénomène est tout à fait comparable à ce que nous avons décrit à propos de la deuxième modalité.

CONCLUSIONS

La notion fondamentale que l'on peut retirer des observations et réflexions précédentes, peut être résumée ainsi :

On retrouve, quelle que soit la modalité envisagée, mais en fonction de l'intensité de la pollution par matières organiques dominantes, au moins l'une des trois zones désormais classiques, à savoir :

I : zone azoïque quant au macropeuplement, ou zone de *pollution maximale*;

II : zone à forte pollution, dénommée zone *polluée*, dont le peuplement est dominé par une ou un petit nombre d'espèces de Polychètes;

III : zone *subnormale* où les structures biocoenotiques sont encore bien perceptibles, mais où le peuplement a déjà subi des modifications qualitatives et quantitatives.

Bien que la présente contribution se fonde essentiellement sur des exemples pris le long des côtes provençales, nous pouvons avancer que cette succession de zones, en fonction de l'intensité de ce type de pollution, et leur agencement particulier, selon les conditions locales, ont une valeur mondiale. Notre expérience, acquise dans d'autres secteurs géographiques, ainsi que la littérature scientifique, confirment abondamment ce point de vue.

On remarquera aussi qu'une même source importante de pollution par matières organiques peut engendrer des effets révéralbles simultanément à plusieurs des modalités que nous avons décrites. L'exemple le plus complet en est sans doute fourni par le grand collecteur d'égouts de la Ville de Marseille, débouchant, en mer, dans la calanque de Cortiou, qui est à l'origine d'exemples illustrant trois de ces modalités.

RÉFÉRENCES

Aillaud J. P., 1976. Contribution à l'étude de l'évolution des fonds au large de l'émissaire de Cortiou, *Thèse Doct.*, Fac. Pharm. Marseille, 65 p.

Arfi R., 1978. Plancton et pollution : effet d'un rejet urbain (grand émissaire de Marseille), *Thèse Doct. spécial. Océanogr.*, Univ. Aix-Marseille-II, 119 p.

Auclair-Dessemon D., 1973. Étude de la pollution des fonds marins dans le secteur de Cortiou, *Thèse Doct.*, Fac. Pharm. Marseille, 97 p.

Bellan G., 1967 a. Pollution et peuplements benthiques sur substrats meubles dans la région de Marseille. Première partie : Le secteur de Cortiou, *Rev. Int. Océanogr. Méd.*, 6, 7, 53-87.

Bellan G., 1967 b. Pollution et peuplements marins benthiques sur substrats meubles dans la région de Marseille. Deuxième partie : l'ensemble portuaire marseillais, *Rev. Int. Océanogr. Méd.*, 8, 51-95.

Bellan G., 1972. Effects of an artificial stream on marine communities, *Mar. Pollut. Bull.*, 3, 5, 74-77.

Bellan G., 1976 a. Action des facteurs de pollution sur les communautés benthiques, in : *La pollution des eaux marines*, edited by J. M. Perès, Gauthier-Villars, Paris, 1976, 141-158.

Bellan G., 1976 b. Recherches biologiques sur les grands ensembles portuaires : leurs enseignements, in : *Tav. Rod. Intern.* : « La biologia marina, per la difesa e per la produttività del mare », Livorno, 20-21 maggio 1974, 31-49.

Bellan G., 1978. Une tentative sérieuse de réduction de la pollution marine en Méditerranée : l'émissaire sous-marin de la ville de Cannes. Ses enseignements, *Tech. Eau*, 384, 9-24.

Bellan G., Kaim-Malka R., Picard J., 1975. Évolution récente des différentes auréoles de pollution marine des substrats meubles liées au grand collecteur de Marseille-Cortiou, *Bull. Ecol.*, 6, 2, 57-66.

Bellan G., Stora G., 1976. Effets et conséquences d'un apport artificiel d'eaux douces sur les peuplements benthiques d'un étang marin, *III^e Journées Etudes Pollution*, Split, CIESM, 147-152.

Bellan G., Bellan-Santini D., Picard J., 1978. Les modalités de répartition, en Méditerranée nord-occidentale, des peuplements benthiques soumis à la pollution par matières organiques dominantes, *IV^e Journées Etudes Pollution*, Antalya, CIESM, 351-358.

Bourcier M., Nodot C., Jedy de Grissac A., Tine J., 1979. Répartition des biocoenoses benthiques en fonction des substrats sédimentaires de la rade de Toulon (France), *Tethys*, 9, 2, 103-112.

Caruelle F., 1973. Pollution marine de surface par les détergents anioniques provenant des égouts de Marseille, *Thèse Doct.*, Fac. Pharm. Marseille, 87 p.

Emdadi M., 1979. Impact des récents travaux d'aménagements sur le macrobenthos des sables fins de la Baie du Prado, *Thèse Doct. spécial. Océanogr. biol.*, Univ. Aix-Marseille-II, 93 p.

Febvre J., 1968. Étude bionomique des substrats meubles de l'Étang de Berre, *Rec. Trav. St. Mar. Endoume-Marseille*, 44, 297-355.

Minas M., 1973. Sur la synthèse et la dégradation de la matière organique dans l'écosystème de l'Étang de Berre. Dynamique et bilans. Rapports avec le régime hydrologique, *Thèse Doct.*, État, Univ. Aix-Marseille, 528 p.

Pearson T. H., Rosenberg R., 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment, *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 16, 229-311.

Picard J., 1976. Accélération récente de l'extension, au niveau des fonds marins et du benthos de la zone d'épendage du collecteur de Marseille-Cortiou, *III^e Journées Etudes Pollution*, Split, CIESM, 199-205.

Picard J., 1978. Impacts sur le benthos marin de quelques grands types de nuisances liées à l'évolution des complexes urbains et industriels de la Provence occidentale, *Oceanis*, 4, 214-251.

Reish D. J., 1959. An ecological study of pollution in Los Angeles-Long Beach Harbors, California, *Occas. Pap. Allan Hancock Found*, 22, 1-119.

Romano J. C., 1973. Étude cyclique des peuplements marins de substrats meubles situés au débouché en mer du grand collecteur de Cortiou (Marseille), *Thèse Doct. spécial. Océanogr. biol.*, Univ. Aix-Marseille-II, 94 p.

Stora G., 1978. Évolution comparée de la sensibilité de deux Polychètes soumis à l'action de détergents en fonction d'une augmentation de la température, *Rev. Int. Océanogr. Méd.*, 51-52, 101-113.