



les foraminifères benthiques comme bioindicateurs de pollution en milieu littoral

Projet P03 : Processus et transferts en milieu littoral

C. Bourdillon

**novembre 1994
R 38186**

BRGM
DIRECTION DE LA RECHERCHE
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département Infrastructure Géologique et Géophysique
Groupe Acquisition des données Géologiques
B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

Mots clés : Foraminifères benthiques-protazoaires-saumâtre à hypersalin-bioindicateur-pollution industrielle-pollution domestique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BOURDILLON C. (1994) - Les foraminifères benthiques comme bioindicateurs de pollution en milieu littoral. Rapport BRGM R 38186, 63 p., 15 fig., 1 tabl., 4 ann.

© BRGM, 1994, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

RÉSUMÉ

Les foraminifères benthiques sont des animaux unicellulaires à coquille calcaire ou agglutinée. Ils peuplent tous les milieux marins et saumâtres du monde entier.

Ce sont des organismes qui vivent sur ou dans le sédiment qui reçoit et absorbe les polluants, notamment dans les milieux littoraux, les estuaires, lagunes et zone marine côtière...

Ils sont constitués par des assemblages, spécifiques adaptés à chaque type d'environnement. Un marais saumâtre, une mangrove ou une plate-forme interne par exemple, abritent des associations différentes bien adaptées aux diverses variables du milieu (salinité, profondeur, teneur en oxygène, type de substrat etc...).

Si une des variables varie, les associations se modifient en fréquence et diversité. C'est parce que les foraminifères sont sensibles aux variations écologiques que ce sont des bioindicateurs utilisables pour détecter les principales perturbations que la pollution entraîne dans tous l'écosystème correspondant.

Les réponses sont différentes selon les types de pollution.

La pollution organique, en général d'origine domestique, lorsqu'elle est modérée ne dérange aucunement les foraminifères.

Lorsqu'elle est forte, elle favorise leurs conditions de vie par un apport optimum de matière organique ; la réponse des foraminifères est alors nettement positive (taille élevée, diversité supérieure,...).

Lorsqu'elle est trop élevée, le milieu s'appauvrit en oxygène, l'acidité augmente et la réponse s'inverse : diversité et taille baissent ; la composition spécifique change et devient similaire à celle des milieux déficitaires en oxygène. Des espèces opportunistes profitent de la situation.

Dans la phase ultime, l'acidité maximale dissout les tests calcaires.

La pollution par métaux lourds est celle qui perturbe le plus les foraminifères : modification d'espèces, de taille, de reproduction et apparition d'anomalies tératologiques.

Plusieurs équipes de recherche en Norvège, Angleterre, Israël, Canada et USA étudient les réponses des foraminifères à diverses pollutions (domestique, métaux lourds...).

En France, une équipe de recherche pluridisciplinaire fonctionnera dès 1995, sur le thème "micro-bioindicateurs".

Le BRGM participe à ces recherches dans le cadre du Projet P03 "Processus et transfert en milieu littoral".

Le but des recherches est une meilleure approche des limites d'utilisation de ce bioindicateur encore mal connu.

Pour être utilisable en routine, afin d'assurer une surveillance des zones dont l'équilibre écologique est précaire (à proximité d'industries, d'émissaires...), les réponses du bioindicateur foraminifère benthique doivent être calibrées et quantifiées avec précision.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	9
1. NOTION DE BIOINDICATEUR	10
1.1. La multiplication des polluants	10
1.2. Les limites des paramètres physico-chimiques	11
1.3. L'utilisation des variables biologiques	11
2. GÉNÉRALITÉS SUR LES FORAMINIFÈRES	12
2.1. Leur place dans le règne animal	12
2.2. Leur morphologie	12
2.3. Planctoniques et benthiques	14
2.4. Le mode de vie des foraminifères benthiques	16
2.4.1. Leur habitat : mode de relation avec le substrat	16
2.4.2. Modes alimentaires	17
2.4.3. Leurs prédateurs	17
2.4.4. Symbiotes, commensaux et parasites	18
2.4.5. Reproduction	19
2.5. Leurs découvreurs et utilisateurs	19
3. TECHNIQUES DE PRÉPARATION ET D'ANALYSE DES FORAMINI- FÈRES BENTHIQUES	21
3.1. Prélèvement des échantillons	21
3.2. Préparation de l'échantillon	21
3.3. Observation de l'échantillon	21

3.4. Analyse de l'échantillon	22
3.4.1. Analyses en routine.....	22
3.4.2. Analyses en recherche appliquée	22
3.4.3. Les indices et diagramme.....	23
4. LES FORAMINIFÈRES COMME BIOINDICATEURS.....	32
4.1. Critères de choix d'un bioindicateur	32
4.2. Avantages du choix des foraminifères benthiques	32
4.3. Des inconvénients.....	34
4.4. Historique.....	35
5. LA RÉPONSE DES FORAMINIFÈRES AUX PERTURBATIONS DU MILIEU	37
5.1. Différents types de réponse aux perturbations du milieu	38
5.2. Réponse au confinement	39
5.3. Réponse au déficit en oxygène	41
5.4. Réponse à la pollution domestique.....	43
5.4.1. D'origine domestique	43
5.4.2. D'origine naturelle	43
5.4.3. D'origine industrielle.....	45
5.5. Réponses à la pollution par métaux lourds.....	45
6. LA RECHERCHE APPLIQUÉE "FORAMINIFÈRES ET POLLUTION" AUJOURD'HUI... ET DEMAIN	52
6.1. Les équipes de recherche en place aujourd'hui	52
6.1.1. En Europe	52
6.1.2. En Israël.....	52
6.1.3. Au Canada	52
6.1.4. Aux U.S.A.	53
6.2. Le projet...au futur	53
6.3. Le projet en France, au B.R.G.M... aujourd'hui et demain	54
6.3.1. En France, aujourd'hui.....	54

6.3.2. En France, demain.....	54
6.3.3. Au B.R.G.M., aujourd'hui et demain.....	54

7. CONCLUSION.....	55
--------------------	----

BIBLIOGRAPHIE.....	56
--------------------	----

GLOSSAIRE

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chronologie des problèmes de qualité des eaux dans les pays industrialisés d'après M. MEYBECK et R. HELMER (1989) in C. LEVEQUE (1994).....	10
Figure 2 : Des foraminifères.....	12
Figure 3 : Le mollusque <i>Dentalium</i> , le principal prédateur-sélectionneur de foraminifères benthiques. Co : coquille, pe : pied, ca : captacules. Leur taille est relative ment petite, de quelques millimètres à quelques centimètres, selon les espèces.....	18
Figure 4 : Cycle du foraminifère <i>Iridia lucida</i> (Y. LE CALVEZ), cas le plus simple.....	20
Figure 5 : Dans le cadre d'une étude en recherche appliquée, l'analyse des foraminifères doit se faire pour chaque échantillon, parallèlement à l'étude des principaux paramètres du milieu.....	24
Figure 6 : Un modèle de mode opératoire utilisé dans le cadre de recherche appliquée sur le thème "foraminifère et pollution".....	25
Figure 7 : Abaque de MURRAY (1973) : graphique du nombre d'espèces et du nombre d'individus d'une association et lignes de même indice de diversité ("α diversity index").....	26
Figure 8 : Diagramme triangulaire avec report d'un échantillon choisi à titre d'exemple (6 % agglutinés, 14 % de porcelanés et 80 % hyalins).....	27
Figure 9 : Interprétation environnementale de l'abaque de diversité et du diagramme triangulaire de MURRAY pour les lagunes, les estuaires et le domaine de plate-forme.....	28

- Figure 10 : Exemple des environnements paraliques d'Afrique de l'Ouest d'après J.P. DEBENAY, 1990. Diagramme triangulaire obtenu par report des résultats pour chaque échantillon : trois zones de confinement sont ainsi rapidement mises en évidence.....30
- Figure 11 : Zonation horizontale et verticale des principaux milieux océaniques (d'après PÉRÈS, précis d'océanographie biologique, PUF ed., 1976, p. 10).....33
- Figure 12 : Principales variables environnementales contrôlant la répartition des foraminifères benthiques (d'après G.J. VAND DER ZWAAN in B.K. SEN-GUPTA, 1993).....37
- Figure 13 : Schéma de l'organisation géochimique et biologique du domaine paralique en fonction du confinement et du déficit hydrique pris comme seuls paramètres40
- Figure 14 : Indices de diversité et d'hétérogénéité pour les principaux milieux paraliques41
- Figure 15 : Incidence de divers types de pollution sur la taille des foraminifères en 4 sites des côtes d'Israël, mer Méditerranée (étude de V. YANKO, J. KRONFELD, et A. FLEXEL, 1994).....44

LISTE DES PLANCHES

- Planche 1 : Clichés du microscope électronique à balayage de foraminifères benthiques. Différentes formes et textures des tests..... 13
- Planche 2 : Grands foraminifères benthiques dans un habitat naturel, une flaque de marée hawaïenne. Le plus grand spécimen mesure 2,4 mm. Cliché de R. RÖTTGER. Ces foraminifères sont libres, et se déplacent très lentement dans les amas algaires. La couleur jaune est due à des diatomées symbiotiques, tandis que la couleur rouge d'une autre espèce (côté gauche) correspond à celle d'une algue rouge unicellulaire symbiotique..... 15
- Planche 3 : Exemples d'anomalies des tests de foraminifères soumis à la pollution par métaux lourds.....48
- Planche 4 : Exemples d'anomalies des tests du foraminifère *Ammonia* provenant d'un site pollué par les métaux lourds50

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Les inconvénients du bioindicateur diatomées d'après M. COSTE (1994) et comparaison avec le bioindicateur foraminifère.....34

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Des bioindicateurs à différents niveaux de complexité de l'édifice biologique. Extrait de M. Kalhanski et Y. Souchon, 1994.

Annexe 2 : Les biomarqueurs d'exposition. Extrait de G. Monod, 1994.

Annexe 3 : Le suivi de la qualité des eaux littorales par l'Ifremer. Extrait de la synthèse de C. Alzieu, Directeur Adjoint Environnement littoral (1994).

Annexe 4 : Aspects législatifs.

INTRODUCTION

Le littoral, les lagunes, les estuaires sont les zones les plus favorables à la vie : la productivité organique y est maximale. C'est dans ce domaine marin côtier et paraliqne, c'est-à-dire intermédiaire entre le milieu continental et le milieu océanique, que la plupart des espèces animales marines naissent et passent leur enfance.

La vie y est intense, mais elle est toujours en équilibre précaire à cause des nombreux risques de pollution qui peuvent l'atteindre, en provenance aussi bien du continent que de l'océan.

La vie économique liée à cette vie littorale est particulièrement importante avec la pêche, l'élevage de poissons et crustacés, la conchyliculture, l'exploitation des algues, du sel, le tourisme etc...

Il s'agit donc de protéger ce domaine menacé dans son ensemble. Il est impératif de préserver la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes.

La recherche appliquée menée pour identifier un ou plusieurs indicateurs capables de détecter les variations même discrètes des conditions du milieu, s'oriente vers l'utilisation des indicateurs biologiques.

Dans le cadre du projet de recherche P03, "Processus et transferts en milieu littoral", l'identification d'un bioindicateur fiable, permet une surveillance efficace de l'état de santé du domaine littoral, s'est avérée nécessaire.

Les recherches actuellement les plus prometteuses concernent un **animal unicellulaire, le foraminifère.**

Cette étude fait le point des travaux menés à ce jour sur la valeur de ce micro-organisme, comme indicateur des conditions de milieu et notamment de l'état de pollution dans ces zones sensibles, et des futures voies de recherche à développer en vue d'une utilisation en routine.

La présentation des résultats débutera par des généralités sur les bioindicateurs, puis sur les foraminifères, afin de situer le sujet dans les contextes scientifique, législatif et technique.

Les techniques de prélèvement et d'analyse des foraminifères seront détaillées car elles sont à la base du travail, et donc primordiales.

Les réponses des foraminifères benthiques à diverses modifications du milieu et à divers types de pollution sont analysées.

Après un rapide historique des travaux menés sur les foraminifères comme bioindicateurs, les grands axes des recherches actuellement poursuivies en Europe, en Israël, au Canada, au USA et au Japon seront présentés.

Certains aspects législatifs ou techniques du sujet sont détaillés dans plusieurs annexes auxquelles le lecteur pourra se référer. Une définition des termes suivis d'un astérisque est proposée dans le glossaire placé en fin de volume.

1. NOTION DE BIOINDICATEUR

1.1. LA MULTIPLICATION DES POLLUANTS

Le suivi du niveau de pollution a longtemps été exclusivement basé sur les mesures d'un choix de paramètres physico-chimiques.

Avec le temps les sources de pollution se sont multipliées (figure 1) et ont limité l'interprétation des analyses hydrologiques et géochimiques. Le développement important des polluants organiques complique sensiblement la compréhension des résultats et exige toujours de nouvelles analyses.

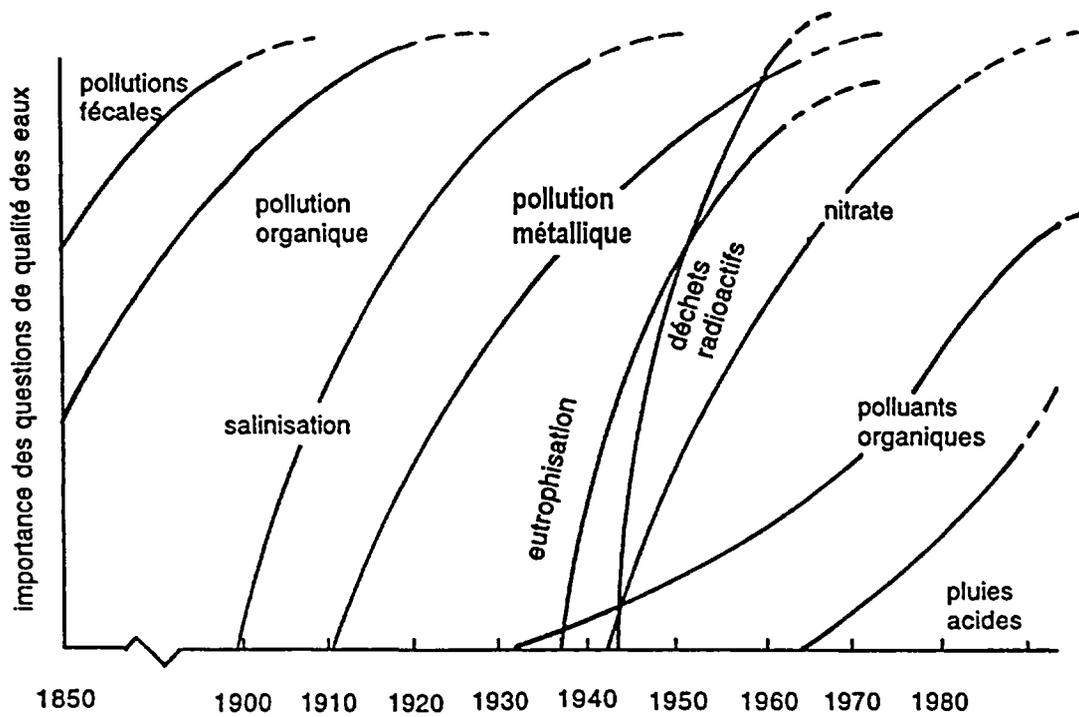


Fig. 1 - Chronologie des problèmes de qualité des eaux dans les pays industrialisés d'après M. MEYBECK et R. HELMER (1989) in C. LEVEQUE (1994)

1.2. LES LIMITES DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Si certaines de ces analyses sont précises, elles ne sont valables qu'au moment de la mesure, car le milieu littoral est très mouvant, en perpétuel mouvement, notamment à cause des marées.

De même un déversement de substance toxique ponctuel peut passer inaperçu au niveau de l'analyse, si le prélèvement n'a pas été effectué au moment de la pollution...et pourtant la communauté biologique réagit à cette substance.

C'est probablement aussi pour des raisons économiques, parce que les analyses chimiques nécessaires pour assurer un suivi complet de l'eau et du sédiment (piègeage des polluants), sont onéreuses, que depuis quelques années les variables biologiques sont utilisées en remplacement ou en complément des variables physico-chimiques.

1.3. L'UTILISATION DES VARIABLES BIOLOGIQUES

Ces variables biologiques, les bioindicateurs, ont été définies par P. BLANDIN (1986) comme "des organismes ou ensembles d'organismes qui -par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologiques, éthologiques ou écologiques- permettent, de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème ou d'un écosystème et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications naturelles ou provoquées".

Cette définition recouvre trois niveaux d'organisation du vivant : le niveau cellulaire et tissulaire, le niveau des organismes (échantillons d'une espèce) et, le niveau des peuplements qui constituent les communautés (M. KALHANSKI et Y. SOUCHON, 1994, annexe 1).

Les recherches sur les bioindicateurs ont débuté dans les années 70, essentiellement basées sur des produits de grande consommation humaine : poissons, crustacés, mollusques.

Le Ministère de l'Environnement met en place en 1974 le RNO, Réseau National d'Observation de la Qualité du Milieu marin (annexe n°3), dont le suivi est assuré par l'Ifremer.

Après la surveillance d'organismes animaux de fin de chaîne alimentaire, les chercheurs s'orientent vers les producteurs primaires : diatomées*, dinophycées*, bryophytes* et divers macrophytes* pour le milieu aquatique continental.

Pour le milieu marin, l'Ifremer met en place en 1984 le Réseau de suivi phytoplanctonique : REPHY destiné à détecter l'apparition des espèces toxiques et en 1988, le REMI, réseau national de surveillance microbiologique (annexe n°3). Parallèlement, les textes législatifs évoluent, et incitent les gestionnaires à protéger les écosystèmes aquatiques et les espèces qui les composent (annexe n°4).

C'est dans ce même contexte scientifique et législatif que débiteront les recherches sur un autre bioindicateur, les foraminifères...

Mais découvrons d'abord ce qu'est un foraminifère.

* les mots suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire placé en fin de volume.

2. GÉNÉRALITÉS SUR LES FORAMINIFÈRES

2.1. LEUR PLACE DANS LE RÈGNE ANIMAL

Les foraminifères sont des animaux unicellulaires ; ce sont donc des protistes animaux, des protozoaires*. Ils constituent un des groupes d'organismes parmi les plus simples du règne animal, le sous-embranchement des foraminifères, appartenant à l'embranchement des Granuloreticulosa.

2.2. LEUR MORPHOLOGIE

Les foraminifères sont composés d'une cellule protégée par une sorte de coquille, le test (figure 2 et planche 1).

La cellule composant la partie organique du foraminifère possède des pseudopodes, sortes d'expansions cytoplasmiques, qui servent à de nombreuses fonctions : locomotion, nutrition, construction des loges. Un foraminifère peut être très schématiquement comparé à une amibe entourée d'une coquille.

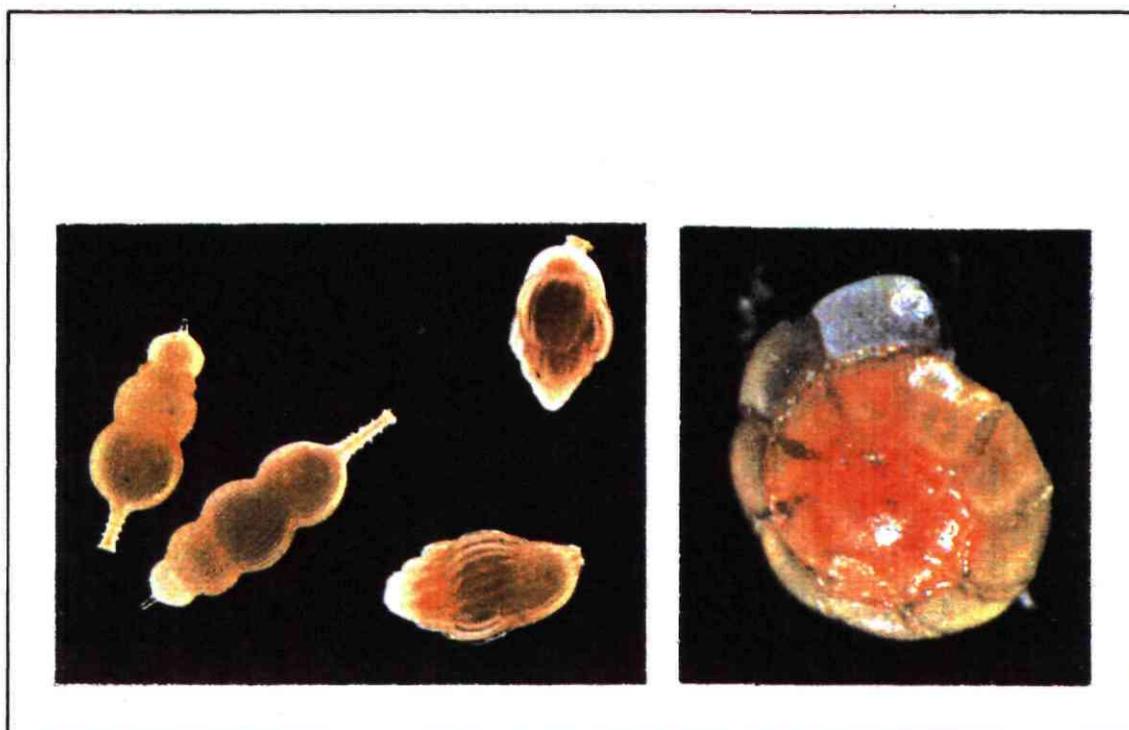
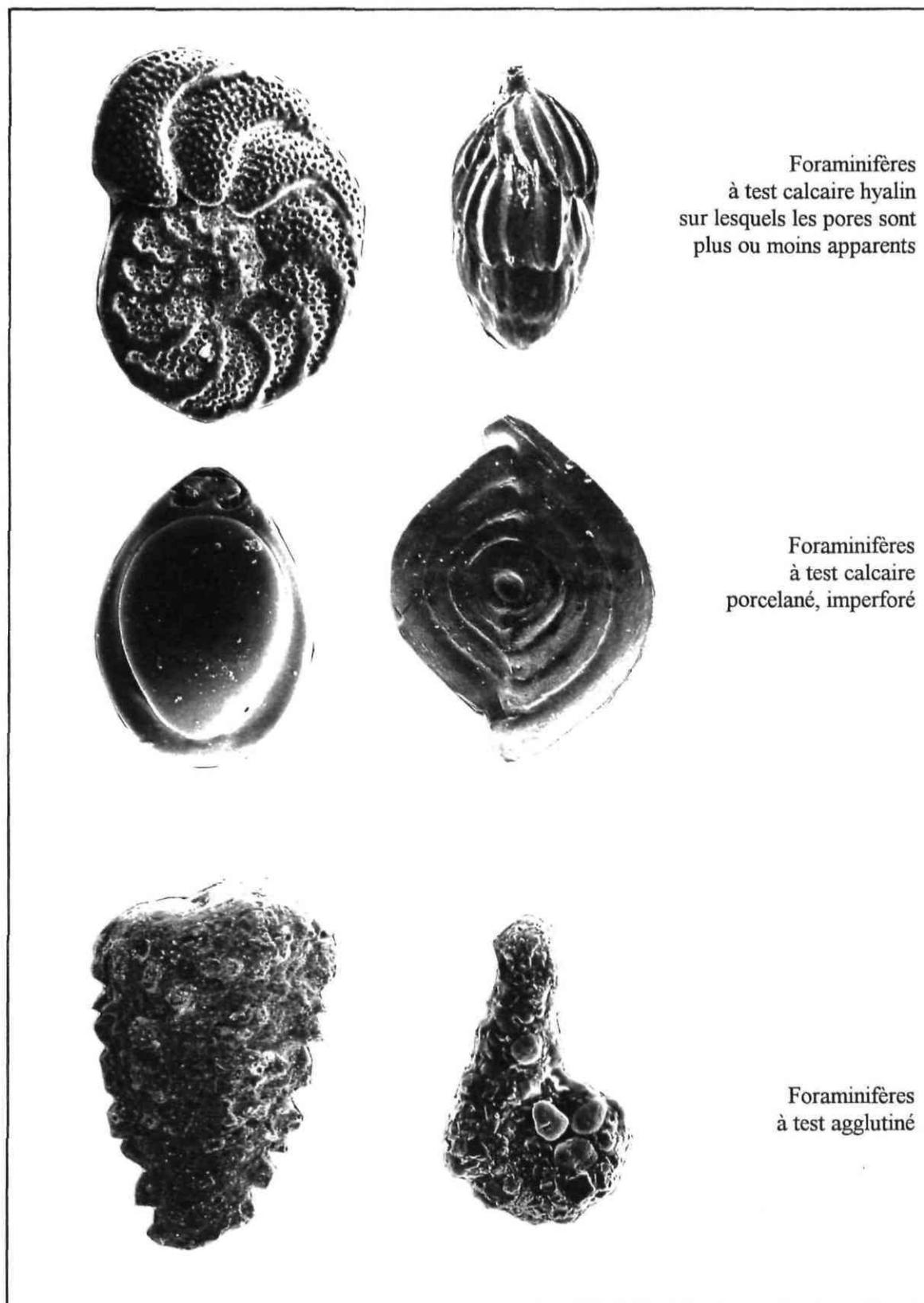


Fig. 2 : Des foraminifères.



**Planche 1 : Clichés du microscope électronique à balayage de foraminifères benthiques.
Différentes formes et textures des tests.**

Leur taille est comprise entre 0,05 et 1 mm, en moyenne.

Les plus grandes formes atteignent quelques millimètres, mais ce sont des cas qui restent exceptionnels, dans des conditions écologiques très favorables et pour certaines espèces seulement.

Ce test est diversement composé.

Il peut être constitué de grains prélevés dans l'environnement (grains de quartz, glauconie, petits tests de foraminifères morts, calcaires, spicules de spongiaires, coccolithes*) et soudés par un ciment organique plus ou moins minéralisé (silice ou calcaire), parfois improprement qualifié de chitineux dans la littérature. Il s'agit plutôt de ciment pseudo-chitineux. Ce type de foraminifère qui agglutine des particules étrangères et dit agglutinant ou agglutiné (ou encore arénacé) (planche 1).

D'autres foraminifères ont un test formé de calcaire sécrété par la cellule ; ce sont les foraminifères hyalins (planche 1 et 2), constitués de calcaire perforé de nombreux pores et les porcelanés, constitués de calcaire imperforé (planche 1).

Les tests ont des formes très variables (planche 1). Certains sont formés d'une seule loge ronde, tubulaire ou autre, d'autres d'une série de loges unisériées, ou bisériées ; d'autres sont constitués de loges enroulées, soit systématiquement dans un plan, soit de façon dissymétrique par enroulement trochoïde. La morphologie des tests peut être très simple ou complexe.

Les foraminifères ont une ou plusieurs ouvertures.

Les tests peuvent être lisses ou ornés de façon fort diverse avec costulations, ponctuations, épines, réticulations...

Comme pour tout être vivant, les genres et les espèces sont définis à partir de critères morphologiques hiérarchisés : texture du test (agglutiné, hyalin ou porcelané), agencement des loges, position des ouvertures, ornementation.

Certaines des caractéristiques morphologiques des foraminifères peuvent être considérées comme des adaptations à des conditions particulières du milieu et surtout de leur mode de vie.

2.3. PLANCTONIQUES ET BENTHIQUES

C'est ainsi que les foraminifères peuvent être subdivisés en deux groupes principaux à partir de leur mode de vie :

- les planctoniques*, qui ont des tests exclusivement calcaires, très perforés, constitués de loges globuleuses, percées d'une ou plusieurs larges ouvertures ;
- les benthiques*, dont le test est plus lourd, souvent plus massif et dont la texture est très variable (agglutiné, hyalin ou porcelané). L'ouverture est en général unique.



Planche 2 - Grands foraminifères benthiques dans un habitat naturel, une flaque de marée hawaïenne. Le plus grand spécimen mesure 2,4 mm.

Cliché de R. RÖTTGER.

Ces foraminifères sont libres, et se déplacent très lentement dans les amas algaires. La couleur jaune est due à des diatomées symbiotiques, tandis que la couleur rouge d'une autre espèce (côté gauche) correspond à celle d'une algue rouge unicellulaire symbiotique.

Les planctoniques vivent exclusivement en milieu marin franc, tandis que les benthiques peuplent tous les milieux aquatiques à condition que la salinité y soit comprise entre 4 ‰ et 55 ‰. Leur écologie est détaillée plus loin.

2.4. LE MODE DE VIE DES FORAMINIFÈRES BENTHIQUES

Pour identifier les éventuels services qu'un organisme peut rendre comme bioindicateur, il est primordial d'en connaître les principales exigences physiologiques, écologiques etc... au travers de son mode de vie.

Ainsi, les foraminifères benthiques ont des habitats diversifiés selon les espèces, se nourrissent, sont consommés, vivent en bon ou mauvais voisinage avec d'autres micro-organismes, se reproduisent etc...

Les différents points seront successivement abordés assez sommairement. Le lecteur intéressé peut se reporter aux nombreuses références bibliographiques concernant le sujet.

2.4.1. Leur habitat : mode de relation avec le substrat

Certains foraminifères sont libres (ou vagiles), d'autres sont fixés (ou sessiles). En fonction de leurs rapports avec le substrat, J.W. MURRAY (1991) préconise la classification :

- l'épifaune, c'est-à-dire vivant sur ou au-dessus du sédiment,
- la semi-épifaune, c'est-à-dire celle vivant parfois dessous et parfois au-dessus du sédiment,
- l'endofaune vivant dans le sédiment.

A chaque niveau, il existe des foraminifères libres, fixés ou alternativement libres ou fixés.

Les foraminifères benthiques libres se déplacent peu en rampant lentement à la surface du sédiment, le long des végétaux ou sur des supports animaux, tirés par leurs pseudopodes. Leur vitesse est très faible, 8 à 10 cm par heure au maximum.

Les foraminifères benthiques vivant sur les végétaux comme ceux représentés sur la photographie de la planche n°2 sont des grandes formes plus rares que les autres, mais plus facilement observables dans leur milieu de vie et donc facilement photographiables.

Les formes benthiques les plus utilisées comme bioindicateur sont beaucoup plus petites et vivent le plus souvent dans le sédiment, plus ou moins enfoncées ; il est donc impossible de les photographier aussi simplement en position de vie.

De plus, 40 % des foraminifères benthiques vivant dans le sédiment, pénètrent jusqu'à une profondeur de 4 à 5 cm, tandis que les autres, majoritaires, préfèrent peupler les 2 ou 3 cm superficiels (S. PHILIPPE-LOEILLET, 1983).

2.4.2. Modes alimentaires

Les foraminifères ont des modes alimentaires variés en fonction des environnements où ils vivent : dans la vase, fixé sur un bryozoaire par exemple ou enfouis dans le sable. J.W. MURRAY (1991) distingue :

- les herbivores qui se nourrissent d'algues (chlorophycées, dinophycées, diatomées, bactéries),
- les suspensivores qui piègent les particules en suspension, alors qu'ils sont fixés sur un substrat dur ou enfoncés partiellement dans le sédiment,
- les détritivores, qui sélectionnent détritits et bactéries ; ils vivent alors enfoncés de 1 ou 2 cm dans le sédiment, (A.G., GOODAY, 1988, 1993, 1990).
- les carnivores qui consomment des petits arthropodes (Copépodes), des mues de mollusques, de crustacés, et d'autres foraminifères,
- les omnivores, mode alimentaire de nombreux foraminifères (J.H. LIPPS 1983 ; J.J. LEE , 1980), qui alternent les modes alimentaires détaillées ci-dessus.

2.4.3. Leurs prédateurs

Les foraminifères sont consommés par d'autres animaux. Dans de nombreux environnements marins ce sont les principaux constituants de la biomasse de la microfaune, mais leur valeur en terme de ressource trophique est encore peu connue (A.V. ALTENBACH et al., 1989)..

M.A. BUZAS (1978, 1982), M.A. BUZAS et K.J. CARLE (1979), M.A. BUZAS et al. (1989), J.H. LIPPS (1983) ont étudié en détail ces prédateurs qui sont essentiellement :

- d'autres foraminifères,
- des nématodes,
- des gastéropodes,
- des mollusques scaphopodes (*Dentalium sp.*) (figure 3),
- des crustacés,
- des poissons.

Certains auteurs supposent que certains mollusques ingèrent les foraminifères pour en assimiler le calcaire et non dans un but alimentaire.

Les scaphopodes grands consommateurs de foraminifères, savent sélectionner certaines espèces exclusivement. Ils les capturent à l'aide de leurs captacules* (figure 3).

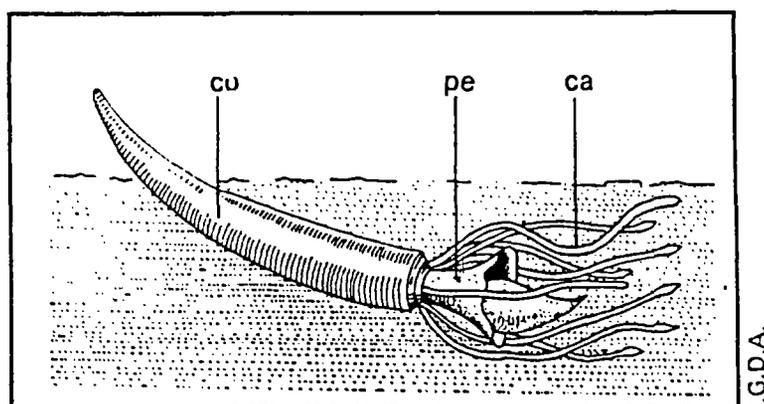


Fig. 3 - Le mollusque *Dentalium*, le principal prédateur-sélectionneur de foraminifères benthiques.
co : coquille, pe : pied, ca : captacules.
Leur taille est relativement petite, de quelques millimètres à quelques centimètres, selon les espèces.

A côté de ces vrais prédateurs, il faut citer toute une liste de consommateurs accidentels : vers, polychètes, chitons, nudibranches, bivalves, crustacés, crinoïdes, tuniciers et poissons.

2.4.4. Symbiotes, commensaux et parasites

Symbiose

La symbiose* décrit une association entre deux organismes différents et qui est favorable aux deux.

De nombreux foraminifères benthiques, surtout les grandes formes, abritent des algues symbiotiques. Chaque espèce de foraminifère a son type de symbiote : diatomées, dinophycées, chlorophycées, rhodophycées (S. LEUTENEGGER, 1984).

Commensalisme

Une des espèces profite et l'autre n'est pas affectée, c'est le commensalisme*.

Certains foraminifères sont fixés sur des bryozoaires, des éponges, des crustacés, des gastéropodes... L'avantage pour le foraminifère c'est d'être maintenu au-dessus du sédiment et de ne pas être enfoui, ou de profiter des recherches de nourriture de l'hôte.

Parasitisme

Certaines espèces de foraminifères peuvent devenir parasites* d'autres foraminifères. Mais les faits sont rares ou peu étudiés à ce jour.
Les amibes peuvent parasiter les foraminifères.

2.4.5. Reproduction

Tous les détails de la reproduction des foraminifères sont encore mal connus. Certaines espèces seulement ont fait l'objet d'études complètes.

La grande originalité des cycles de reproduction des foraminifères dits "haplodiplobiontiques*" est l'alternance de phases haploïdes soit à n chromosomes, et diploïdes, soit à $2n$ chromosomes (figure 4).

Les phases haploïde et diploïde alternent plus ou moins régulièrement et peuvent être d'importance inégale selon les conditions du milieu.

Certaines conditions du milieu peuvent empêcher certaines phases de reproduction, ralentir ou même bloquer toute reproduction (refroidissement, confinement, polluants etc...).

Quelques foraminifères benthiques notamment des formes à test calcaire porcelané peuvent se multiplier par scissiparité ; il semblerait que ce mode là soit accidentel ; lors de la fragmentation d'une partie du test, les fragments peuvent se régénèrent pour donner un individu complet. Cette reproduction par "bouturage n'est possible que si chaque morceau du test maternel possède un noyau" (M. NEUMANN, 1967).

2.5. LEURS DÉCOUVREURS ET UTILISATEURS

Les foraminifères ont une partie minéralisée, fossilisable leur test ; les plus anciennes formes de fossiles connues ont été découvertes dans des sédiments d'âge Cambrien*.
Depuis, ils n'ont cessé d'évoluer et de se diversifier.

C'est l'exploration pétrolière qui a promu ces organismes au rang des meilleurs marqueurs biostratigraphiques et paléocéologiques.

Ce groupe de micro-organismes, parce qu'il est riche en espèces et en individus qui évoluent rapidement (à l'échelle géologique), est devenu par son intense utilisation en micropaléontologie, l'apanage des géologues, et jusque dans l'actuel ; en effet, ce sont les géologues marins, les géologues du Quaternaire ou les océanographes qui en étudient les formes récentes.

Les recherches actuelles menées par les biologistes se placent surtout à une autre échelle, au niveau moléculaire.

Cette constatation permet d'expliquer pourquoi les recherches sur les foraminifères bioindicateurs paraissent se faire en marge de celles que mènent les hydrobiologistes sur d'autres organismes, notamment les algues ou les métazoaires*.

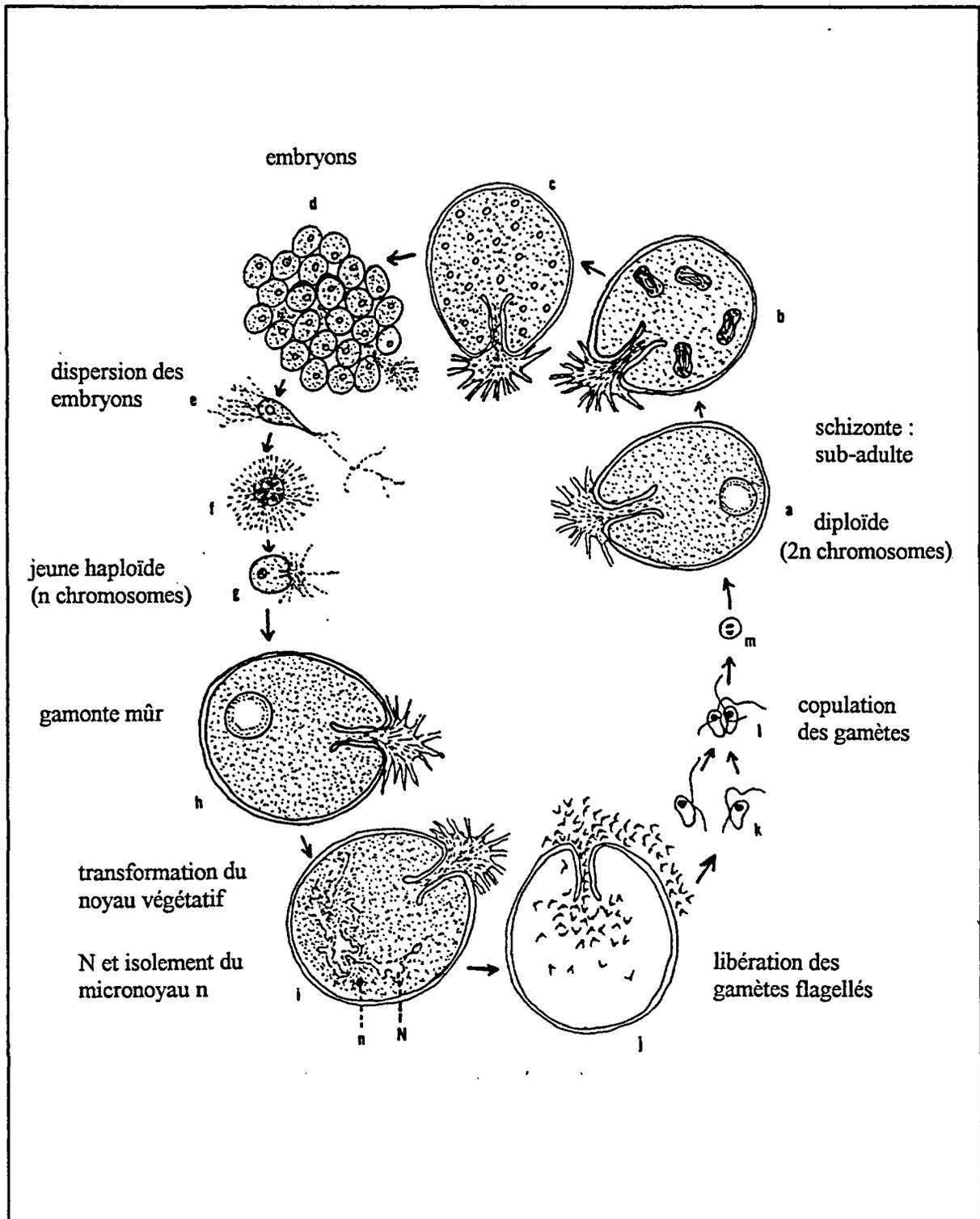


Fig. 4 - Cycle du foraminifère *Iridia lucida* (Y. LE CALVEZ), cas le plus simple.
a à f = schizonte ; g à m = gamonte

3. TECHNIQUES DE PRÉPARATION ET D'ANALYSE DES FORAMINIFÈRES BENTHIQUES

3.1. PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS

Les foraminifères benthiques vivent essentiellement sur ou dans le sédiment, auquel ils sont étroitement liés puisqu'il leur sert aussi bien de réserve en minéraux pour le test, que de refuge, ou de garde-manger.

C'est pourquoi la méthode d'obtention des foraminifères benthiques est très simple : il suffit de prélever environ 50 cm³ du sédiment superficiel du milieu concerné.

Ce prélèvement peut être manuel lorsque la hauteur d'eau le permet, ou bien être effectuée à l'aide de drague ou petit carottier en fonction de la bathymétrie.

S'il est prévu un délai supérieur à 48 heures, entre le prélèvement et l'étude, il est souhaitable de conserver l'échantillon en l'imbibant largement d'alcool ou de formol. Ce traitement très facile et rapide permet une bonne fixation de la matière organique dans son intégralité et notamment des protoplasmes* des foraminifères vivants à l'issue du prélèvement.

3.2. PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON

Ce prélèvement pourra être observé directement s'il est sableux. S'il est envasé, il sera préalablement lavé à l'eau pour éliminer toute la fraction argileuse ; le lavage se fera sur un tamis à maille de 50 ou 63 µm. Tous les constituants de taille supérieure à la maille 50 ou 63 µm, sont ainsi récupérés et constituent le "refus de tamis".

3.3. OBSERVATION DE L'ÉCHANTILLON

L'observation de l'échantillon se fait à l'aide d'un stéréomicroscope, couramment, mais improprement appelé "loupe binoculaire".

Les grossissements sont assez faibles, de 40 à 120, en moyenne, mais largement suffisants pour l'observation des foraminifères.

Le **macroscope** est un stéréomicroscope à plus faible grossissement, il offre une large surface de champ. Il est largement utilisé par les spécialistes des foraminifères.

Les foraminifères doivent dans la plupart des cas être colorés afin de faciliter ou permettre selon les cas, de différencier les individus vivants et morts.

Deux méthodes peuvent être utilisées :

- le traitement proposé par Y. LE CALVEZ et D. CESANA D. (1972), à la suite de l'invention de la technique par W.R. WALTON (1952), est basé sur l'utilisation du colorant rose Bengale ;
- l'autre méthode, au Noir Soudan B, est préconisée par D. WALKER et al. (1974)

3.4. ANALYSE DE L'ÉCHANTILLON

Les méthodes d'analyse de l'échantillon ne seront pas exactement les mêmes selon la finalité de l'étude.

3.4.1. Analyses en routine

Ce type d'analyse est très rapide puisqu'il s'agit de détecter la présence -ou l'absence- d'un foraminifère donné ou d'une association* caractéristique.

Par exemple la présence dans un échantillon des genres *Ammotium*, *Ammoastuta* et *Miliammina* permet de reconstituer directement les principales caractéristique du milieu d'origine du sédiment étudié : milieu saumâtre, paraliqve envasé, lagon ou estuaire, T°C de l'eau de 0 à 30° C.

Des analyses complémentaires de l'association complète, de la taille et des éventuelles anomalies des tests permettront d'affiner le diagnostic.

Le recherche "en routine" d'un type donné de bioindicateur est souvent suffisant.

Cette méthode est fréquemment utilisée pour la caractérisation des paléomilieus dans l'ancien, et jusque dans le Quaternaire terminal, ou elle a en plus une valeur stratigraphique, avec la mise en évidence des épisodes glaciaires et interglaciaires.

Ces analyses en "routine" pourraient être utilisées pour le suivi de la qualité -ou de la dégradation- d'un site soumis à une pollution, lorsque les foraminifères seront parfaitement calibrés ; c'est-à-dire, qu'à partir d'un indice de pollution, obtenu à l'issue d'observations des tests, il faudra pouvoir déceler rapidement, et quantifier la détérioration du milieu.

3.4.2. Analyses en recherche appliquée

Les analyses à mener dans le cadre d'un projet de recherche appliquée sur le thème "bioindicateurs" sont bien plus longues et complexes.

Il est dans ce cas impératif de procéder à un inventaire complet de tous les constituants de l'échantillon, soit :

- tous les composants minéraux du sédiment, par exemple pyrite, quartz, calcite etc... qui composent la lithophase ;
- tous les autres composants organiques qui constituent la biophase, végétaux et animaux, micro-organismes, métazoaires et restes divers ;

- une liste détaillée des foraminifères, avec comptages et applications des divers indices en vigueur, puis observation et description précise des caractéristiques pathologiques éventuelles des individus.

Cette analyse complète des constituants de l'échantillon s'intègre dans une étude plus globale qui doit également coprendre les descriptions et/ou les mesures (figure 5) :

- des paramètres physico-chimiques et hydrologiques,
- des paramètres de pollution, caractérisation des polluants, mesures de concentration,
- des paramètres sédimentologiques.

Plusieurs méthodologies existent. Une des plus fréquemment utilisées dans le cadre des études d'impact et dans les recherches "foraminifères et pollution" est schématisée sur la figure 6.

3.4.3. Les indices et diagrammes

Plusieurs indices et diagrammes sont actuellement utilisés pour caractériser les assemblages et les comparer :

- l'indice de diversité, et l'abaque de MURRAY,
- le diagramme triangulaire de MURRAY,
- l'indice de biodiversité ou hétérogénéité de SHANNON et WEAVER,
- l'indice de confinement de DEBENAY,

- L'indice de diversité spécifique

L'indice de diversité spécifique est le plus fréquemment utilisé et le plus ancien, puisque proposé par FISHER *et al.* (1943).

L'indice α dont les valeurs les plus basses correspondent aux environnements les plus défavorables est obtenu en appliquant la formule :

$$\alpha = \frac{n1}{x}$$

où x est une constante de valeur < 1 , $n' = N(1-x)$, N étant le nombre d'individus de l'échantillon.

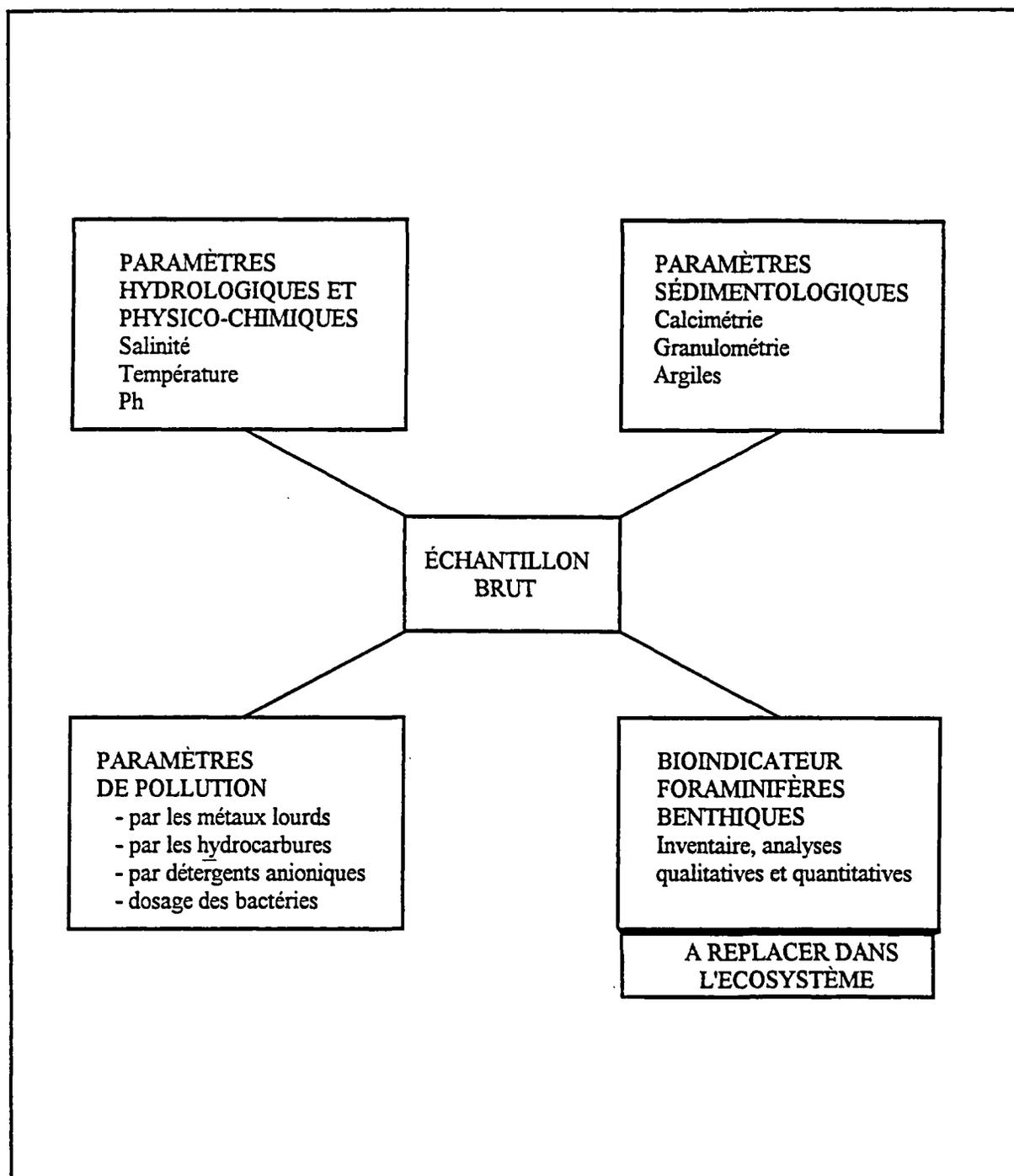


Fig. 5 - Dans le cadre d'une étude en recherche appliquée, l'analyse des foraminifères doit se faire pour chaque échantillon, parallèlement à l'étude des principaux paramètres du milieu.

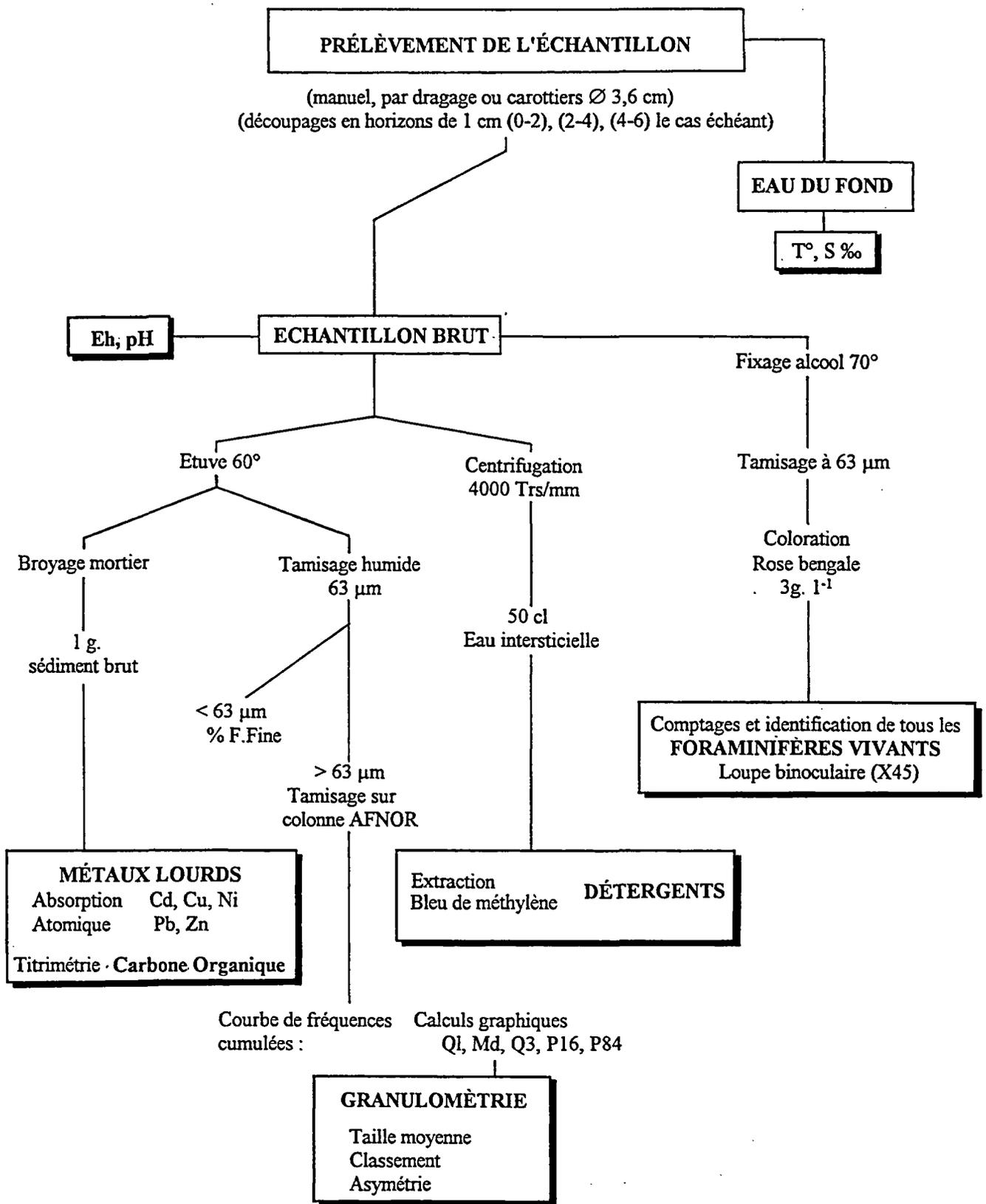


Fig. 6 - Un modèle de mode opératoire utilisé dans le cadre de recherche appliquée sur le thème "foraminifère et pollution".

L'avantage de l'indice α est que sa valeur peut être directement lue sur un graphique en reportant le nombre d'espèces par rapport au nombre d'individus contenus dans l'échantillon (J.W. MURRAY, 1973) (figure 7).

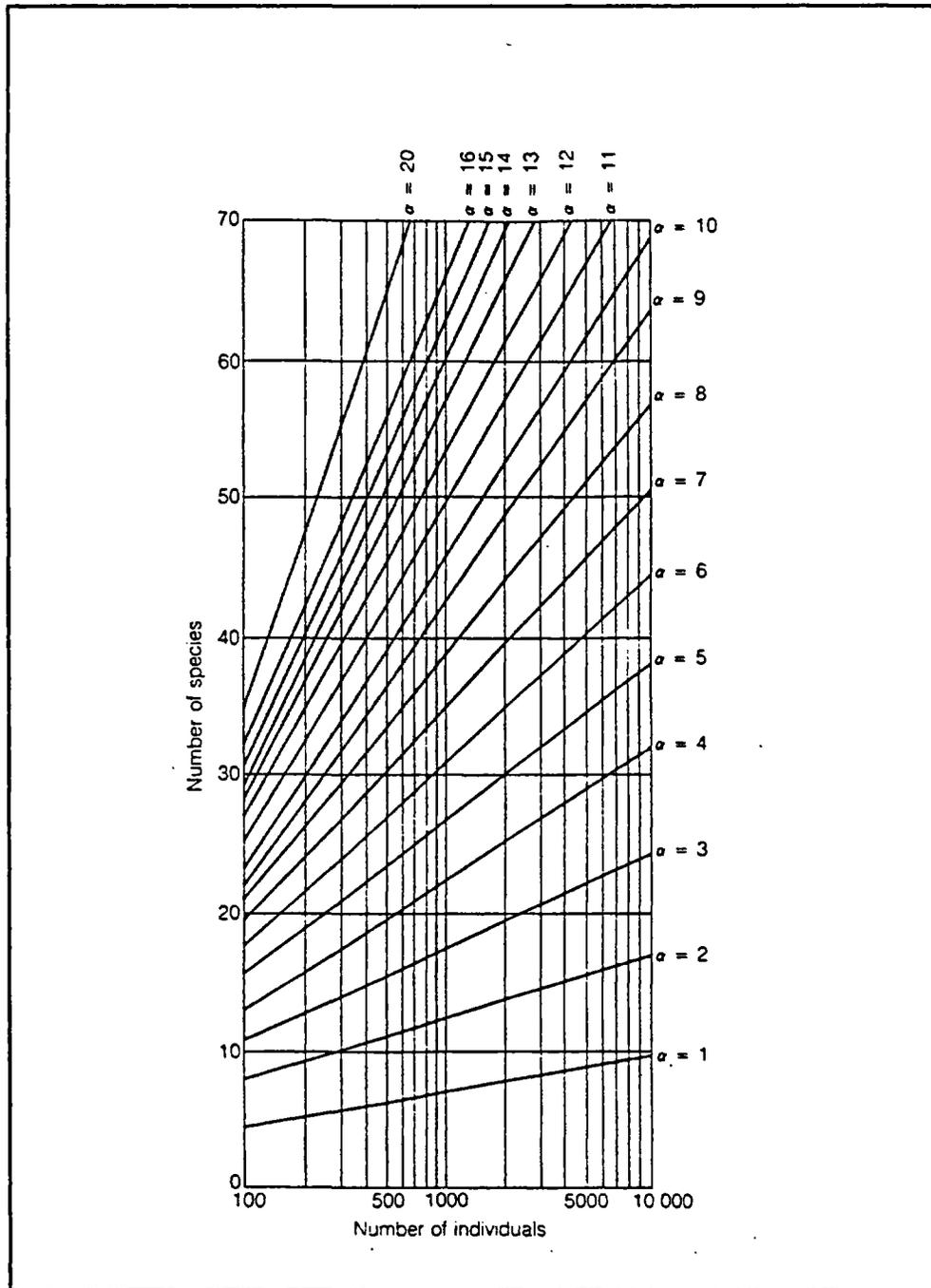


Fig. 7 - Abaque de MURRAY (1973) : graphique du nombre d'espèces et du nombre d'individus d'une association et lignes de même indice de diversité (" α diversity index").

- Le diagramme triangulaire de MURRAY

La classification actuelle des foraminifères (A.R. LOEBLICH et H. TAPPAN, 1984) distingue les sous-ordres en fonction de la texture des tests ; ainsi (voir le chapitre des généralités), très schématiquement, les foraminifères se répartissent en :

- agglutinés,
- porcelanés,
- hyalins.

Pour un échantillon donné, le report des pourcentages de chacun de ces trois groupes sur un diagramme triangulaire permet de visualiser un point (figure 8).

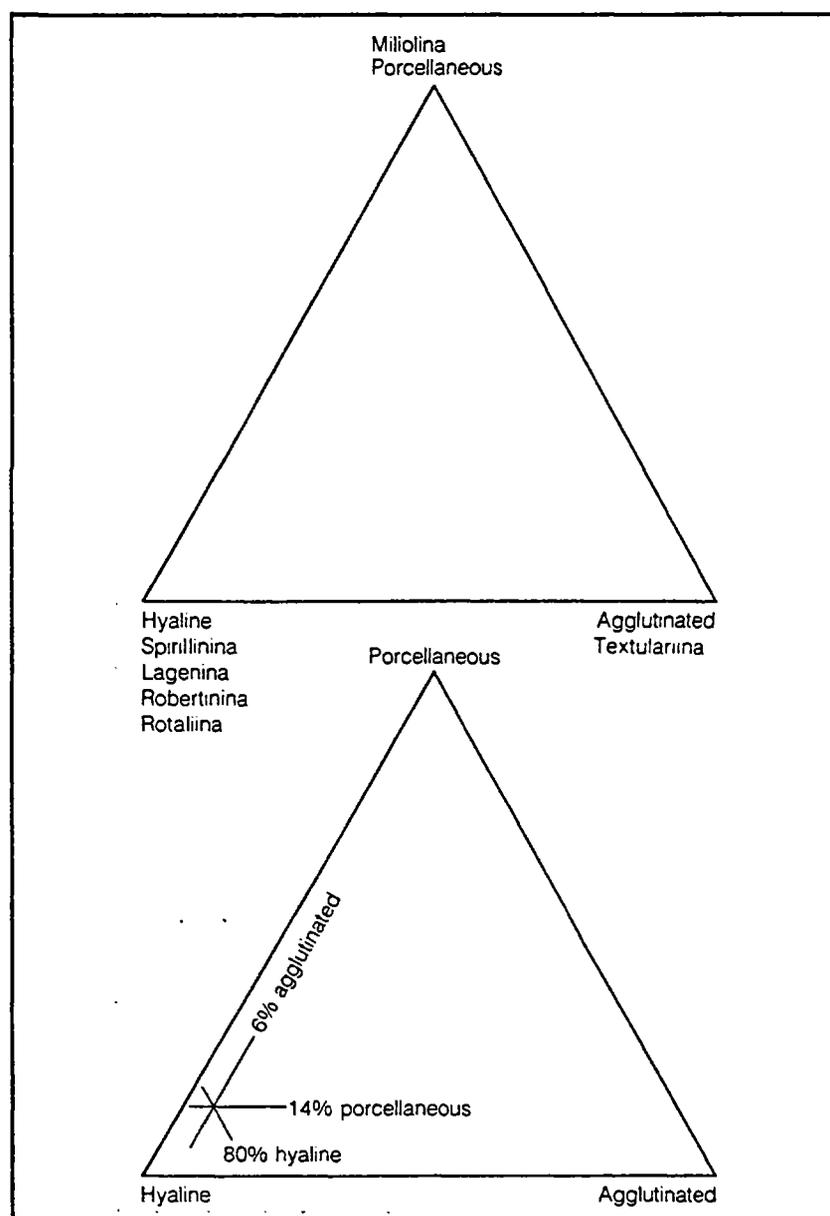


Fig. 8 - Diagramme triangulaire avec report d'un échantillon choisi à titre d'exemple (6 % agglutinés, 14 % de porcelanés et 80 % hyalins).

L'utilisation des diagrammes triangulaires jointe à la lecture du graphique des indices de diversité, permet une caractérisation directe du milieu de vie à partir de l'interprétation proposée par J.W. MURRAY (1971) (figure 9), pour les environnements paraliques et marins de plate-forme.

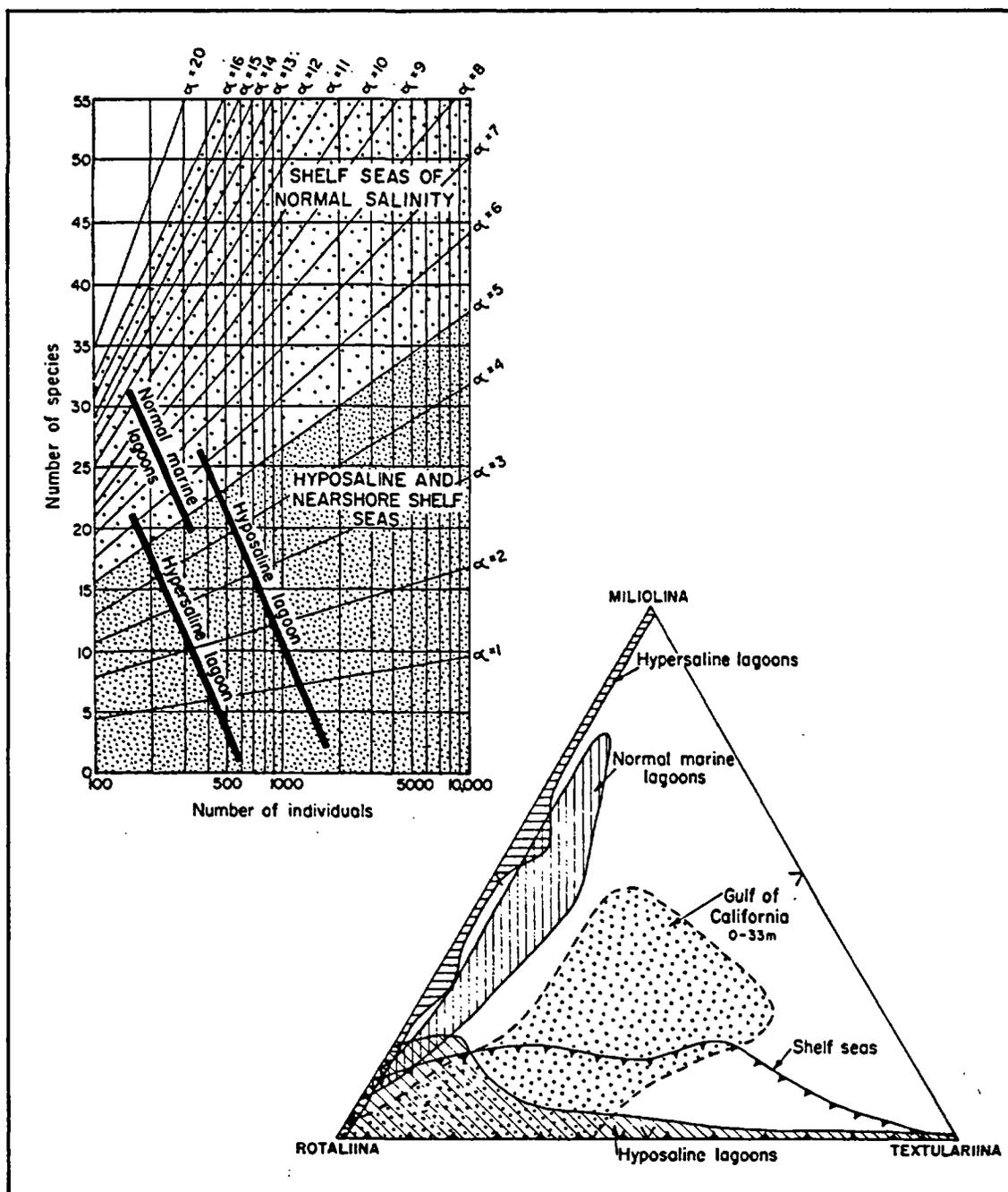


Fig. 9 - Interprétation environnementale de l'abaque de diversité et du diagramme triangulaire de MURRAY pour les lagunes, les estuaires et le domaine de plate-forme.

- L'indice de biodiversité ou indice d'hétérogénéité de SHANNON et WEAVER

C'est un indice établi à partir de modèles de distribution théorique ; c'est un outil pratique pour la mise en évidence des modifications des écosystèmes les plus importantes, qui dans le cas des foraminifères sont directement indiquées par la composition spécifique de l'association.

Cet indice prend en compte à la fois le nombre d'espèces et la répartition des individus en espèces, soit le nombre d'individus par espèce.

L'indice de SHANNON et WEAVER est obtenu à partir de la formule :

$$H' = \frac{\sum_{k=1}^s p_k \log_2 p_k}{k=1}$$

où p_k = proportion de l'espèce K

Log₂ = logarithme de base 2

H' est exprimé en bits (unité d'information)

S = Nombre d'espèces : p_k = proportion de l'espèce K.

$$\text{Régularité} = \frac{H_{\max}}{H'}$$

Dans le cas des foraminifères, cet indice doit être utilisé avec quelques réserves. En effet, cet indice fait l'objet de diverses critiques car cette évaluation de la biodiversité dépend trop de l'échantillonnage, notamment de la taille et de la densité des prélèvements.

- L'indice de confinement de DEBENAY ("stress index")

L'indice de confinement* I_c a été récemment proposé par J.P. DEBENAY (1990 et al., 1993). Il permet une détermination rapide des principales caractéristiques du milieu. L'indice s'établit à partir du comptage de 100 individus environ et de la répartition de 3 associations de foraminifères caractéristiques sur un diagramme triangulaire (figure 10).

Ce report, effectué pour chaque échantillon, permet de déterminer des aires de confinement croissant dont la lecture est aisée (figure 10).

L'indice de confinement I_c se calcule ainsi :

$$I_c = (C/B+C) - A(A+B+1)/2$$

où A, B et C sont les pourcentages des 3 associations 1, 2 et 3 reportées sur le diagramme triangulaire.

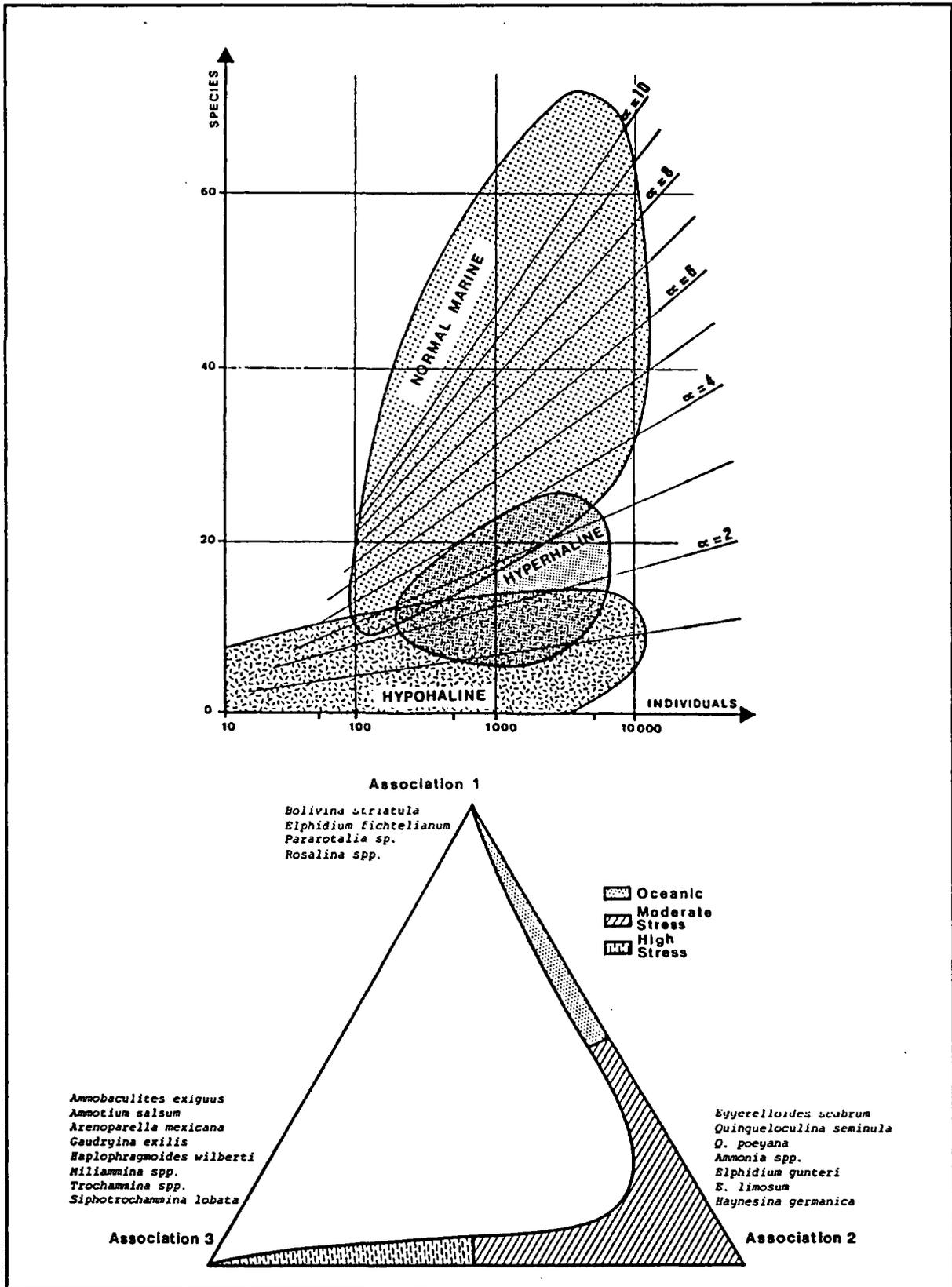


Fig. 10 - Exemple des environnements paraliques d'Afrique de l'Ouest d'après J.P. DEBENAY, 1990.

Diagramme triangulaire obtenu par report des résultats pour chaque échantillon : trois zones de confinement sont ainsi rapidement mises en évidence.

L'indice I_c est l'expression numérique de l'intensité du confinement, il permet d'évaluer le gradient de l'influence marine notamment dans les milieux paraliques.

L'index I_c varie de 0 dans les environnements marins à 1 dans les zones les plus internes.

Il est calculé pour chaque échantillon et les valeurs respectives peuvent être reportées sur différents graphiques comme par exemple un graphique représentant les valeurs de l'indice I_c (de 0 à 1) en fonction de l'éloignement à la mer (en km) ou bien les valeurs de l'indice I_c par rapport à l'indice de diversité α .

Ces deux types de graphique permettent de visualiser le gradient de l'influence marine et la zonation du confinement.

4 - LES FORAMINIFÈRES COMME BIOINDICATEURS

4.1. CRITÈRES DE CHOIX D'UN BIOINDICATEUR

Le choix du bioindicateur "foraminifère benthique" n'est pas l'effet du hasard, ou une lubie de scientifique qui défend aveuglément son sujet favori, comme certains se plairaient à l'imaginer.

Un bioindicateur doit être un marqueur :

- de manipulation aisée,
- nécessitant des analyses peu onéreuses,
- suffisamment sensible pour que les réactions aux variations de l'environnement soient enregistrées rapidement,
- fiable, c'est-à-dire que les réactions soient toujours les mêmes pour une perturbation donnée,
- peu ou pas mobile, pour qu'il puisse être considéré comme caractéristique du lieu précis donné ; c'est l'intérêt des organismes benthiques, par rapport aux planctoniques ou nectoniques*, qui se déplacent eux constamment, sur de grandes distances et verticalement et horizontalement, et de façon très variable, selon les saisons, les tempêtes, les marées et les rythmes nycthéméraux* (nuit-jour).

La répartition spatiale des planctoniques et nectoniques est régie par ces différents rythmes, mais aussi la composition de leurs assemblages, ce qui rend particulièrement complexe, voire impossible leur utilisation routinière comme bioindicateur. Car si le suivi de ces formes très mobiles est difficile en milieu marin, celui des polluants dispersés dans les diverses strates aquatiques ne l'est pas moins, ce qui rend le sujet parfois inextricable et les résultats inexploitable.

C'est pourquoi le choix d'un bioindicateur benthique est dans la plupart des cas d'utilisation plus facile et plus fiable.

4.2. AVANTAGES DU CHOIX DES FORAMINIFÈRES BENTHIQUES

- les foraminifères benthiques peuplent tous les environnements aquatiques dont la salinité est comprise entre 4 et 55 ‰, du domaine paraliq (zone de transition entre le domaine continental et le marin franc : lagunes, estuaires...) au domaine océanique, jusqu'aux faciès les plus profonds (figure 11).
[En domaine aquatique continental (eau douce), ils sont relayés par un groupe de protozoaires d'eau douce, les thécamoebiens, qui possèdent eux aussi un test],

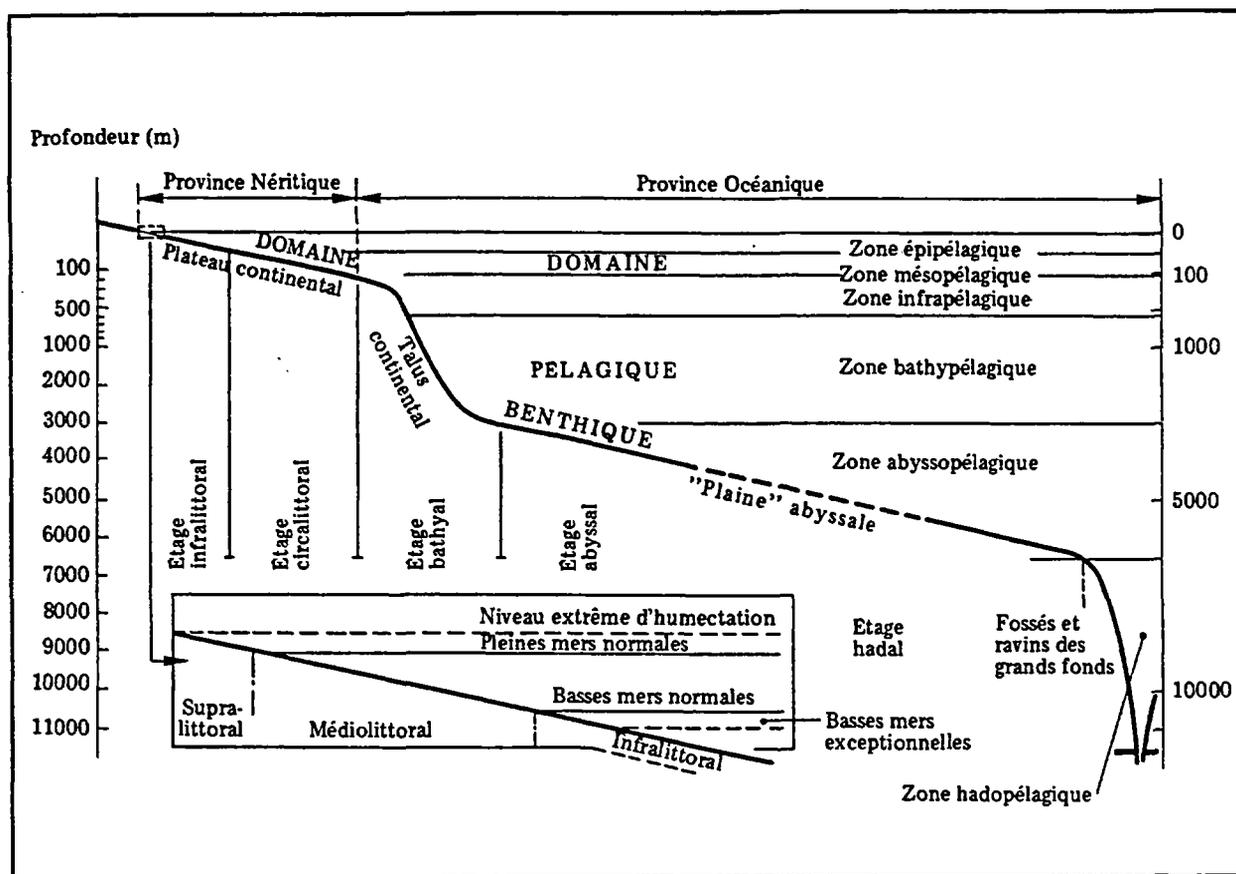


Fig. 11 - Zonation horizontale et verticale des principaux milieux océaniques (d'après PÉRÈS, précis d'océanographie biologique, PUF ed., 1976, p.10).

Les foraminifères benthiques peuplent tous ces milieux ; chaque biotope est caractérisé par des associations différentes du supralittoral à l'abyssal.

- ils vivent sur ou dans le sédiment qui reçoit et absorbe la plus grande proportion de polluants ; ils sont donc plus affectés que le plancton par les rejets de polluants,
- ils sont sensibles aux changements écologiques et composent des associations caractéristiques, aux conditions écologiques précises et connues (salinité, bathymétrie...),
- ils sont bien diversifiés et leur classification systématique bien connue sans ambiguïté (de 1 à 90 espèces maximum par échantillon),
- ils ont un cycle de reproduction court (1 à 3 mois en moyenne, 1 année au maximum) et se multiplient donc rapidement,
- la durée de croissance d'un test est courte, de 3 mois en moyenne et correspond donc à un enregistrement bien délimité dans le temps,

- ils sont assez petits par rapport aux autres taxons à coquille (ex. : huîtres, moules) et de manipulation pratique sous la loupe binoculaire, mais beaucoup plus grands que les autres micro-organismes étudiés nécessitant l'utilisation d'un bon microscope (ex. : diatomées, dinophycées),
- ils sont très fréquents dans les sédiments et l'analyse d'un seul prélèvement de 50 cm³ suffit largement pour l'étude statistique qui nécessite que 100 à 350 individus,
- le mode de prélèvement est facile et fiable : 50 cm³ de sédiment superficiel,
- la méthode d'analyse, du prélèvement au foraminifère, est peu onéreuse,
- ils possèdent une "coquille" qui enregistre les effets de la pollution et qui subsiste après la mort de l'animal ; même morts ils peuvent donc servir au suivi des modifications du milieu sur une longue période à partir de l'analyse de prélèvements réguliers le long d'une carotte ou d'un prélèvement par benne.

4.3. DES INCONVÉNIENTS

M. COSTE utilise les diatomées*, algues planctoniques, comme bioindicateurs, en milieu aquatique continental, et en montrant cependant les inconvénients qui peuvent limiter leur utilisation en routine.

Aucun des reproches pouvant être faits aux diatomées ne peut être porté aux foraminifères benthiques (tableau 1).

Diatomées bioindicateur en milieu d'eau douce	Foraminifères benthiques bioindicateurs en milieu saumâtre ou marin
Pouvoir intégrateur + faible que chez les invertébrés	Bon pouvoir intégrateur (invertébré)
Moins sensibles aux perturbations de l'habitat	Sensibles aux perturbations du milieu
Echantillonnage quantitatif peu aisé (hétérogénéité)	Echantillonnage quantitatif très facile
Difficulté d'utilisation des substrats artificiels	S'adaptent à tous substrats
Taille réduite nécessitant un bon microscope	Taille optimale, loupe binoculaire
Préparation et comptages fastidieux	Préparation très facile, comptages simples
Systématique parfois délicate - plus de formation	Systématique simple et bien connue
Nécessité d'une gestion informatisée (calcul d'indices)	Calculs d'indices d'usage simplifié et souvent superflus

Tableau 1 - Les inconvénients du bioindicateur diatomées d'après M. COSTE (1994) et comparaison avec le bioindicateur foraminifère

Quant aux avantages tels que diversité assez élevée, adaptation spécifique à tous les milieux, bonne sensibilité à divers types de pollution, facilité et rapidité d'échantillonnage, fréquence des individus dans les échantillons, ils sont tout à fait comparables.

Le seul inconvénient du bioindicateur foraminifère benthique, dans l'état actuel de nos connaissances, c'est qu'il est encore mal connu.

Les chercheurs qui s'y intéressent sont rares ; de plus, c'est un bioindicateur qui n'est pas médiatique comme les poissons, pas gastronomique comme les huîtres ou les crustacés, et dénué de toute valeur symbolique ; ainsi, il reste méconnu.

4.4. HISTORIQUE

Les premiers travaux concernant la réponse des foraminifères à diverses modifications du milieu liées à diverses sources de pollution plus ou moins bien identifiées, ont commencé dans les années 1960. J.C. WATKINS (1961) et O. BANDY et al. (1964, 1965), G.A. SEIGLIE (1968), "les précurseurs", se sont principalement intéressés aux foraminifères présents dans les zones d'épandage d'émissaire, c'est-à-dire à une pollution essentiellement domestique.

Ce n'est que dans les années 1970 que l'intérêt se déplace vers l'étude des modifications de la faune dans des zones soumises à la pollution provenant de l'industrie du papier (C.T. SCHAFER, 1973 ; C.T. SCHAFER et F.E. COLE, 1974 ; D.E. BUCKLEY et al., 1974) ou due à la chaleur, ou d'origine chimique (C.T. SCHAFER, 1970, 1973 ; D.E. BUCKLEY et al., 1974 ; G.A. SEIGLIE, 1975, M.G.A.P. SETTY, 1976).

Dans les années 1980, quelques travaux commencent à prendre en compte les variations morphologiques des foraminifères soumis à divers types de pollution dans les estuaires (M.G.A.P. SETTY et R. NIGAM, 1984 ; E. ALVE et J. NAGY, 1986, 1988 ; J. NAGY et E. ALVE, 1987 ; E. BOLTOVSKOY et al., 1991).

Les plus récentes publications, produites entre 1991 et 1994 concernent des exemples de pollution par métaux lourds. Les foraminifères y sont encore des bioindicateurs "qualitatifs" comme précédemment, mais la quantification et l'expérimentation en précisent la valeur (E. ALVE, 1991, V. YANKO et A. FLEXER, 1991, 1992, V. YANKO et al. 1992a, V. YANKO et O. KRAVCHUK, 1992, V. YANKO et J. KRONFELD, 1992, 1993, V. YANKO, J. KRONFELD et A. FLEXER, 1994).

Au cours de ce rapide inventaire des principaux travaux, il apparaît que les équipes qui dominent le mieux le sujet travaillent dans trois pays, le Canada, Israël et la Norvège, très sensibilisés aux questions de protection de l'environnement.

La recherche fondamentale et appliquée axée sur les problèmes de pollution y est particulièrement développée -et financée...

Parallèlement à ces recherches directement axées sur les problèmes de pollution, de nombreux chercheurs travaillent sur les foraminifères comme marqueurs de certaines variables écologiques : la salinité, le confinement, le pH et l'anoxie.

Ces travaux ont une importance majeure dans les progrès des recherches sur les foraminifères bioindicateurs. Il est en effet indispensable de connaître l'impact des variations naturelles du milieu sur un organisme, avant d'en interpréter les incidences d'origine industrielle.

Les travaux sur les thèmes "foraminifères et confinement", "foraminifères et anoxie" ont été et sont particulièrement indispensables à l'avancement de nos connaissances sur les réactions des foraminifères soumis à différentes pollutions.

Les répercussions du confinement ont intéressé aussi bien des spécialistes de l'ancien (biostratigraphes, pétroliers) amenés à interpréter des "paléoconfinements", et/ou les spécialistes de l'écologie actuelle (E. ALVE (1990) ; J.M. BERNHARD (1986, 1989, 1992) M.H. CARALP (1984, 1989) M.B. CITA et M. PODENZANI (1980) ; L. MOODLEY et C. HESS (1992) ; A. PUJOS-LAMY (1973) ; B.K. SEN GUPTA et M.L. MACHAIN-CASTILLO (1993) ; P.J. SJOERDSMA et J. VAN DER ZWANG (1992), H. THEEDE et al. (1969), V. YANKO et A. FLEXER (1992).

J.B. DEBENAY (1990, 1993), à partir de l'étude des foraminifères de milieux paraliques d'Afrique de l'Ouest, met au point un indice de confinement (voir chapitre 3). Il permet une quantification du confinement.

Quant à la remarquable synthèse de O. GUELORGET et J.P. PERTHUISOT (1983) sur le confinement en domaine paralique, elle est indispensable à la compréhension de ces environnements marginaux-littoraux à multiples facettes.

5. LA RÉPONSE DES FORAMINIFÈRES AUX PERTURBATIONS DU MILIEU

Les foraminifères benthiques sont des animaux dont chaque espèce a des exigences écologiques bien précises, particulières qui dépendent de toutes les variables du milieu (figure 12).

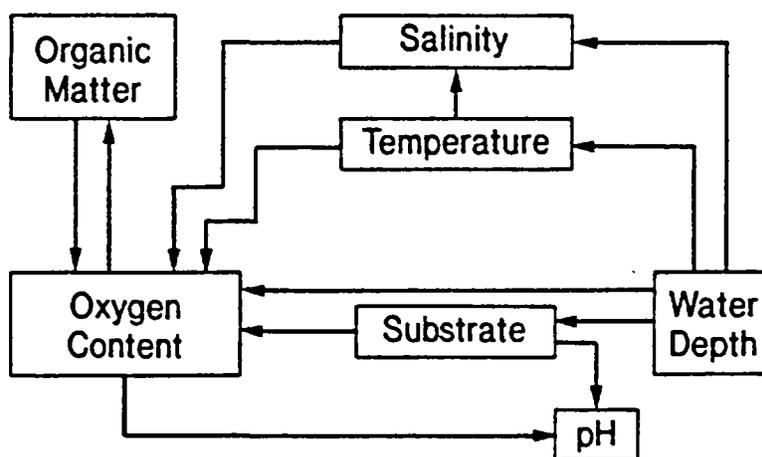


Fig. 12 - Principales variables environnementales contrôlant la répartition des foraminifères benthiques (d'après G.J. VAND DER ZWAAN in B.K. SEN-GUPTA, 1993).

C'est d'ailleurs aussi, pour cela que ce sont de bons fossiles en paléocéologie.

Les exigences écologiques sont discernables en général du niveau générique. J.W. MURRAY (1991) en propose une liste sommaire des principaux genres représentés en fonction du type d'environnement : marais saumâtre, lagune,...c'est-à-dire en fonction de la bathymétrie, de la salinité et de l'ensemble des autres variables de milieu.

Les modifications du milieu ont des causes et des conséquences multiples, souvent interdépendantes et difficiles à distinguer.

Plusieurs chercheurs ont expérimenté l'effet d'une perturbation bien déterminée sur les foraminifères dans un site dont les divers paramètres écologiques sont connus ; dans un deuxième temps, les réponses sont comparées avec celles des associations restées dans un milieu sain ; ayant les mêmes paramètres que les précédents, mais non soumis à des rejets polluants.

Ce type d'étude est particulièrement utile puisqu'il permet une approche assez précise de la valeur du bioindicateur.

Les modifications du milieu sont souvent complexes, mais pour ce type d'expérimentation il s'agit de pouvoir distinguer les réponses : réponse à une pollution par métaux lourds par exemple, ou réponse à un simple confinement...

Le plus souvent les perturbations du milieu sont multiples ; elles peuvent être directement liées à :

- une variation de la salinité (et de la température) du milieu, liée à une variation climatique, à la morphologie du site (estuaire) ou à une intervention humaine (modification de la zone littorale) ;
- une augmentation du confinement pouvant atteindre l'anoxie naturelle ou anthropique ;
- des sources diverses de pollutions, principalement d'origine :
 - . *domestique*, c'est-à-dire enrichissement en matières organique, en détergents anioniques, et en général certaines bactéries,
 - . *agricole*, par l'apport d'engrais et de pesticides,
 - . *industrie du papier*, par apport de matière organique et de certains métaux lourds, surtout du zinc,
 - . *industrie du charbon*, par apport de carbone,
 - . *industrie diverses* par rejet de divers métaux lourds, notamment :
 - * le cuivre (matériel électrique, métallurgie, industrie textile et photographique),
 - * le zinc (pharmacie, chimie, peinture, métallurgie, papier, galvanoplastie),
 - * le plomb (traitement du minerai, imprimerie, raffineries de pétrole, pigments pour les peintures, essence, ateliers de mécanique),
 - * le cadmium (métallurgie, alliages, engrais, fongicides et insecticides, matières plastiques [PVC], huile pour moteur),
 - * le nickel (peintures, caoutchouc, fongicides pour les peintures, pour la protection des textiles et du bois).

Les divers polluants et leurs effets pervers sur l'environnement font l'objet d'inventaires plus exhaustifs dans les ouvrages de synthèse de F. RAMADE (1981, 1992) et D. HEINRICH et M. HERGT (1990).

5.1. DIFFÉRENTS TYPES DE RÉPONSE AUX PERTURBATIONS DU MILIEU

Les réponses des foraminifères aux divers types de pollution sont donc essentiellement d'ordre spécifique, morphologique physiologique et biochimique.

Elles peuvent être hiérarchisées en fonction de l'augmentation de la pollution :

- 1) **Modifications de la composition des associations**, avec réduction du nombre d'espèces, parfois au profit de quelques opportunistes ou résistants, donc chute de la diversité,
- 2) **Modification de la taille**, en général forte diminution, pouvant aller jusqu'au nanisme et augmentation dans un seul cas précis,

3) Apparition d'anomalies tératologiques telles que :

- déformations anarchiques des tests,
- torsion des tests,
- loges supplémentaires,
- ouvertures supplémentaires ou aberrantes.

4) Pyritisation des spécimens vivants,

5) Arrêt de la reproduction sexuée.

Toutes ces réponses se situent à l'échelle de l'organisme lui-même ; elles correspondent à la traduction visible de perturbations de la physiologie et de la biochimie du foraminifère.

A ce jour, il semblerait qu'aucune étude exhaustive des modifications de la cellule elle-même, n'ait été entreprise, seules des hypothèses sont proposées pour expliquer certains troubles du métabolisme (V. YANKO et al., 1994).

5.2. RÉPONSE AU CONFINEMENT

Le terme confinement* est utilisé ici au sens de O. GUELORGET et J.P. PERTHUISOT (1983). Le confinement d'un milieu paraliq ue donné est la résultante de divers facteurs tels que la taille de la communication avec la mer, l'importance de la marée, la courantologie du bassin, les apports continentaux, etc.

Les modifications sur le benthos sont importantes en fonction de l'éloignement du rivage. Les principales caractéristiques sont proposées sur la figure 13.

Au niveau des foraminifères, les réponses sont multiples mais constantes pour toutes les régions du globe et concernent la diversité, la composition spécifique des associations;

Près de l'embouchure, la microfaune est diversifiée, à affinité marines, essentiellement à test calcaire près de l'embouchure ; elle passe à des formes appauvries dominées progressivement par les agglutinés, puis les foraminifères disparaissent au profit des thécamoebiens, protozoaires d'eau douce (J.W. MURRAY, D.B. SCOTT et al., 1980).

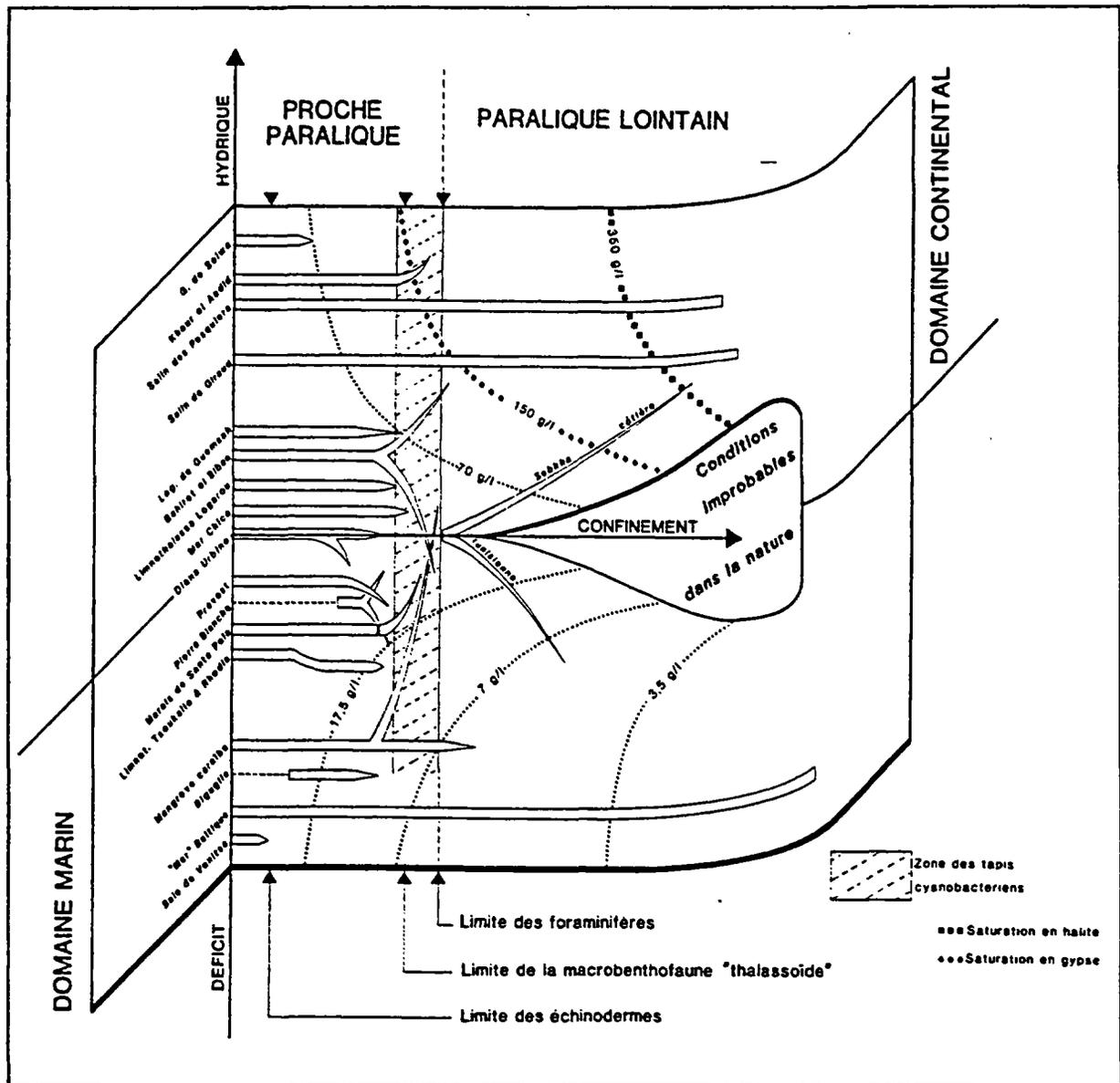


Fig. 13 - Schéma de l'organisation géochimique et biologique du domaine paralytique en fonction du confinement et du déficit hydrique pris comme seuls paramètres. D'après PERTHUISOT et GUELORGET, 1982, in PERTHUISOT et GUELORGET, 1983.

J.W. MURRAY (1991) propose un schéma résumant les valeurs des indices de diversité α et de l'indice d'hétérogénéité $H(S)$ dans les milieux paraliques et marins, pour comparaison (figure 14).

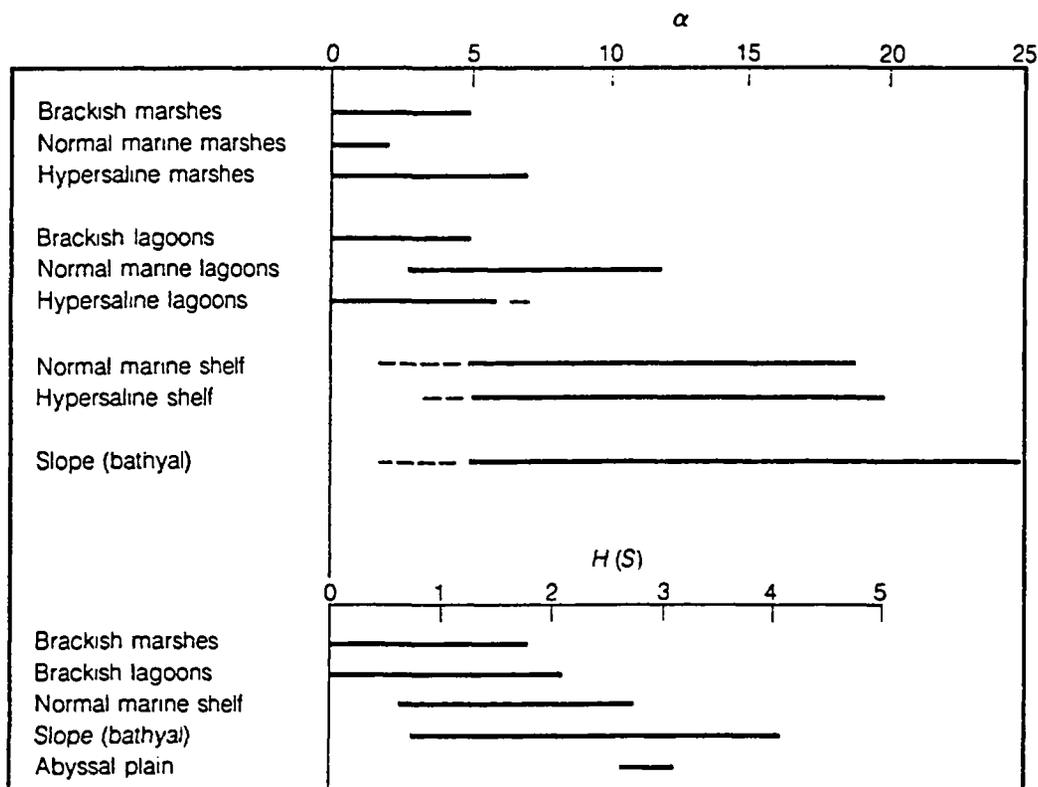


Fig. 14 - Indices de diversité et d'hétérogénéité pour les principaux paraliques.

J.P. DEBENAY (1990), en mettant au point l'indice de confinement (voir le chapitre 3.4.3), apporte un outil précieux pour la mesure du confinement dans les milieux paraliques.

5.3. RÉPONSE AU DÉFICIT EN OXYGÈNE

Les foraminifères utilisent l'oxygène de l'eau et celui piégé dans les pores du sédiment.

L'oxygène est pris par le foraminifère, puis transporté par diffusion à travers la cellule et utilisé par les mitochondries (organites cellulaires) pour produire de l'énergie par oxydation des molécules organiques provenant de la nourriture.

Les pores présents à la surface du test, semblent être le lieu d'échanges, avec absorption d'oxygène et rejet de gaz carbonique (B.K. SEN GUPTA, 1993).

Les amas de mitochondries observés au niveau des pores chez quelques foraminifères les mieux adaptés au manque d'oxygène, suggèrent une relation directe entre pores, mitochondries et absorption de l'oxygène.

La teneur en oxygène dissous permet de caractériser les environnements :

- aérobiques : de 8,0 à 2,0 ml/l O₂ ;
- dysaérobiques = 2,0 à 0,2 ml/l O₂ ;
- quasi anaérobique = 0,2 à 0,0 ml O₂ ;
- et anaérobique ou anoxique = 0,0 ml/l O₂.

La solubilité de l'oxygène varie positivement avec la salinité, et négativement avec la température.

Lorsque la teneur en oxygène tombe sous 3,0 ml/l O₂ la diversité diminue et les associations se modifient.

Elles sont composées surtout de formes hyalines dont les morphologies convergent toutes vers une adaptation au déficit en oxygène.

J.M. BERNHARD (1986) que de nombreuses formes particulièrement adaptées à l'anoxie sont allongées (ex. : le genre *Bolivina*) ou fuselées (ex. : le genre *Buliminella*). Ce type de morphologie pourrait être un moyen d'augmenter la surface d'échanges entre l'organisme et le milieu. Mais B.K. SEN GUPTA refute cet argument. Des interprétations similaires peuvent être proposées pour expliquer la fréquence des formes hyalines à gros pores, plus adaptées à favoriser les échanges et donc l'utilisation de l'oxygène.

Des résultats expérimentaux ont montré que certains foraminifères vivent parfaitement dans des milieux presque anoxiques, où les teneurs en oxygène sont de l'ordre de 0,1 ml/l.

Certains auteurs estiment qu'au delà ils disparaissent, d'autres qu'ils pourraient survivre.

Expérimentalement trois espèces de milieu littoral, très communes, ont survécu à plus de 24 heures d'anoxie totale (L. MOODLEY et C. HEISS, 1992, in B.K. SEN GUPTA, 1993).

Les formes caractéristiques des milieux appauvris en oxygène sont le plus souvent :

- petites,
- à parois fines, sans ornementation,
- à gros pores,
- eurytolérantes.

Certaines espèces développent sous hypoxie des écomorphotypes ou des écophénotypes spécialement adaptés.

Enfin ce sont les formes opportunistes qui subsistent quand les autres disparaissent avec, pour les milieux de plate-forme, des formes telles que *Bulimina*, *Valvulineria*, *Nonionella*, *Bolivina*, *Fursenkoina* ou *Buliminella* ; les associations y sont en général représentées par de nombreux individus (parfois ils pullulent) d'une même espèce.

De nombreux foraminifères benthiques ont besoin de très peu d'oxygène ; certains opportunistes supportent une quasi-anoxie si les autres conditions de milieu sont favorables. Mais dans les milieux hypoxiques très riches en matière organique, l'acidité élevée peut provoquer des dissolutions des tests partielles ou totales, ou la disparition totale des tests.

5.4. RÉPONSE A LA POLLUTION DOMESTIQUE

Les pollutions organiques peuvent avoir diverses origines. Elles ont principalement une origine domestique, surtout à proximité des grandes villes, mais elles peuvent également être naturelles ou provoquées par des rejets industriels (papier, charbon, hydrocarbures etc...).

5.4.1. D'origine domestique

Dans tous les cas la pollution domestique "normale" et exclusive n'a aucun effet négatif sur les foraminifères ; bien au contraire, il semble qu'ils soient particulièrement satisfaits de cette source de nourriture abondante.

S. PHILIPPE-LOEILLET (1983) remarque que les foraminifères vivant au débouché des émissaires de Marseille et Toulon, en Méditerranée occidentale sont particulièrement abondants et diversifiés.

La Méditerranée orientale, est particulièrement pauvre en nutriments (M.D. KROM et al., 1991), et V. YANKO et al. (1994) constatent sur un site d'Israël que les foraminifères considèrent ces sources de nourriture comme une aubaine.

L'étude comparative par rapport à un site de référence, considéré à l'abri de toute pollution permet de souligner l'importance des réponses positives des foraminifères (voir figure 15).

La diversité, les populations*, l'indice de Shannon y sont plus élevés.

Les tests ne présentent aucune anomalie morphologique, bien au contraire, ils sont bien développés et la reproduction se fait dans des conditions optimales.

Des observations équivalentes sont faites par d'autres auteurs et pour d'autres aires géographiques, partout dans le monde (E. BOLTOVSKOY et al., 1991 ; M.H. CARALP, 1984, 1989).

5.4.2. D'origine naturelle

V. YANKO et al. (1994) note que la taille et la diversité anormalement élevée d'un assemblage de foraminifères est un bon détecteur de pollution domestique, mais aussi de toute pollution organique naturelle. Elle signale la présence de tests anormalement gros et abondants dans les sédiments riches en matière organique et notamment dans des zones côtières infiltrées par du gaz naturel (V. YANKO et A. FLEXER, 1991).

Dans l'ancien, des constatations similaires ont également été faites, notamment dans les faciès protosapropéliques du Quaternaire terminal.

Cependant, si le milieu est trop riche en matière organique, le déficit en oxygène augmentant, alors les foraminifères ne peuvent plus tirer le meilleur parti de la nourriture disponible et la réponse devient négative ; c'est le cas des sapropels du Quaternaire terminal dans l'ancien, ou de certains émissaires en mer saturés (période touristique notamment), pour l'actuel. Dans ce cas, la variable qui détermine la répartition des foraminifères n'est plus la quantité de matière organique, mais la teneur en oxygène dissous dans l'eau et le sédiment, ou encore le pH du sédiment.

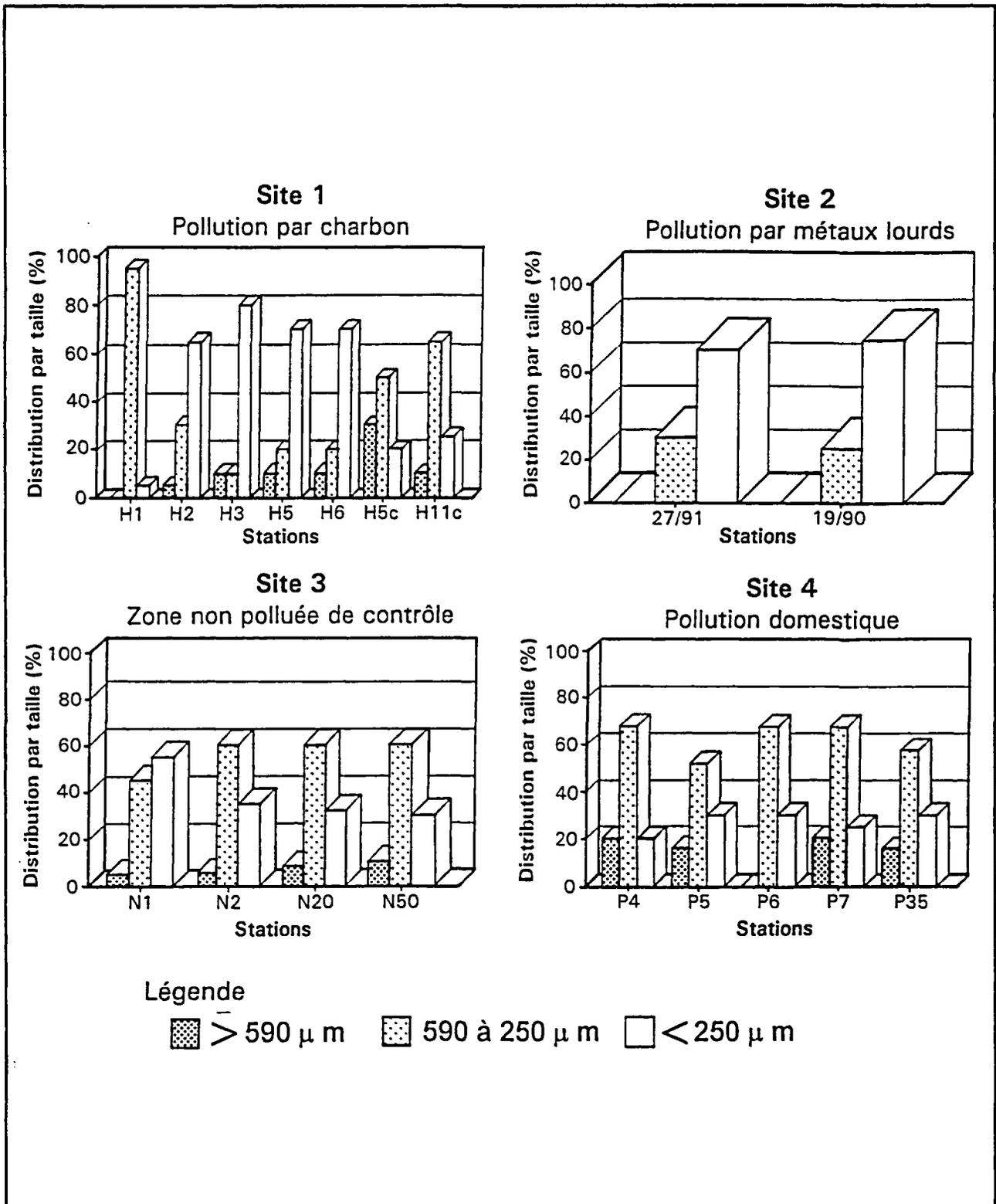


Fig. 15 - Incidence de divers types de pollution sur la taille des foraminifères en 4 sites des côtes d'Israël, mer Méditerranée (étude de V. YANKO, J. KRONFELD, et A. FLEXEL, 1994)

Les cas extrêmes de pollution organique naturelle provoquent les mêmes dégâts dans les associations de foraminifères benthiques que ceux décrits pour le cas des milieux hypoxiques, avec oxygène réduit, pH élevé.

5.4.3. D'origine industrielle

Les cas de pollution organique d'origine industrielle sont fréquents, en général liés à l'industrie du papier ou charbon, ou à proximité de sites d'exploitation d'hydrocarbures.

Cependant dans ces cas, il y a superposition de plusieurs sortes de pollution. Par exemple, pour l'industrie du papier, c'est du zinc qui est rejeté abondamment dans l'environnement, et qui apporte d'autres perturbations, celles liées aux métaux lourds (voir chapitre 5.5).

La pollution organique d'origine industrielle entraîne le plus souvent des perturbations importantes, les foraminifères y réagissent négativement, de façon plus ou moins marquée.

Dans un des sites étudiés en Israël (V. YANKO et al., 1994) la pollution exclusive par le charbon induit des variations dans les assemblages de benthiques (figure 15).

Les petites formes pullulent au détriment des grandes ; la diversité baisse, au profit de formes opportunistes.

Dans tous les autres cas, la pollution a des caractéristiques multiples, difficiles à distinguer les unes des autres, car les variables du milieu y sont toutes perturbées à la fois.

5.5. RÉPONSES A LA POLLUTION PAR MÉTAUX LOURDS

Les travaux sur les perturbations que les métaux lourds induisent dans les associations de foraminifères sont rares et récents.

C'est apparemment la forme de pollution qui perturbe le plus les foraminifères, souvent surimposée à d'autres anomalies du milieu (confinement, pH élevé, manque d'oxygène...).

Des études expérimentales débutent. Il apparaît par exemple que des teneurs de 10 à 20 ppb de cuivre provoquent le développement d'individus anormaux en 12 semaines (A.R. SHAFIRI et al., 1991).

Dans le site pollué de la baie de Haïfa, en Méditerranée orientale (Israël), V. YANKO et al. (1994) ont observé de profondes perturbations des associations de foraminifères avec des concentrations de 1,00 à 1,80 ppm de cadmium, 20 à 43 ppm de cuivre, 100 à 116 ppm de zinc, 30 à 36 ppm de plomb et 0,27 à 0,35 ppm de mercure.

Peu de travaux proposent à la fois des études détaillées des polluants (détermination précise et concentrations) et l'impact sur la microfaune. L'étude de V. YANKO et al. (1994) est une des rares à fournir des données chiffrées.

Sur la figure 15 l'incidence de cette pollution sur la diversité et la taille des foraminifères est flagrante.

Les grands individus disparaissent complètement, les "moyens" se font rares, ce sont les plus petits qui sont les plus fréquents ; c'est le schéma inverse d'une association normale.

Les perturbations ne se limitent pas à des questions de taille et de diversité ; l'atteinte du métabolisme est plus profonde que dans tous les autres types de pollution entraînant des déformations tératologiques, des troubles de la reproduction et la pyritisation des tests.

Les déformations tératologiques sont observables sur une partie de l'association totale, de 2 à 3 % pour le site d'Haïfa (V. YANKO et al., 1994) jusqu'à 6 % pour le site littoral de Sorfjord en Norvège (E. ALVE, 1991).

Les divers types d'anomalies sont observables sur les planches 3 et 4.

Ce sont essentiellement :

- des torsions anormales du test,
- un développement anarchique de loges, incomplètes ou supplémentaire,
- l'apparition de protubérances anormales,
- l'apparition d'ouvertures supplémentaires.

Les anomalies peuvent être légères ou extrêmes, et rendre alors le test difficilement déterminable spécifiquement.

Planche 3

Exemples d'anomalies des tests de foraminifères soumis à la pollution par métaux lourds.

Clichés 1 à 8 = spécimens d'*Eponides repandus* (FICHTEL et MOLL)

1 : Spécimen normal face dorsale

7 : Spécimen normal face ventrale

2, 3, 4, 8 : Spécimens incomplètement développés.

Clichés 9 et 10 : Spécimen de *Cycloforina villafranca* (LE CALVEZ)

9 : Spécimen normal

10 : Spécimen complètement déformé.

Cliché 11 : *Quinqueloculina* sp.

11 : Spécimen dont l'agencement des loges est complètement désorganisé et présentant deux ouvertures supplémentaires

Clichés 12 et 13 : Spécimen de *Triloculina earlandi* CUSHMAN

12 : Spécimen ayant une loge supplémentaire

13 : Spécimen normal.

Photographies extraites de V. YANKO et al. (1994). Légendes traduites et simplifiées d'après les mêmes auteurs.

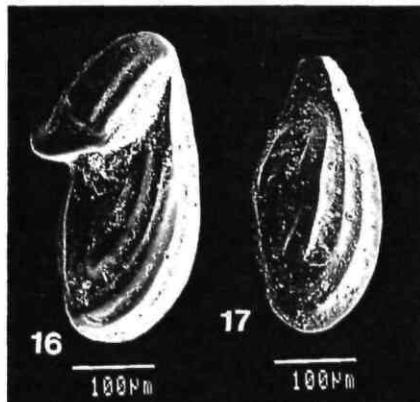
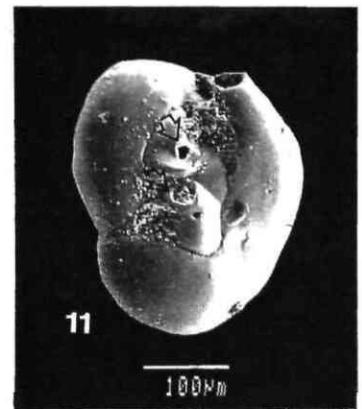
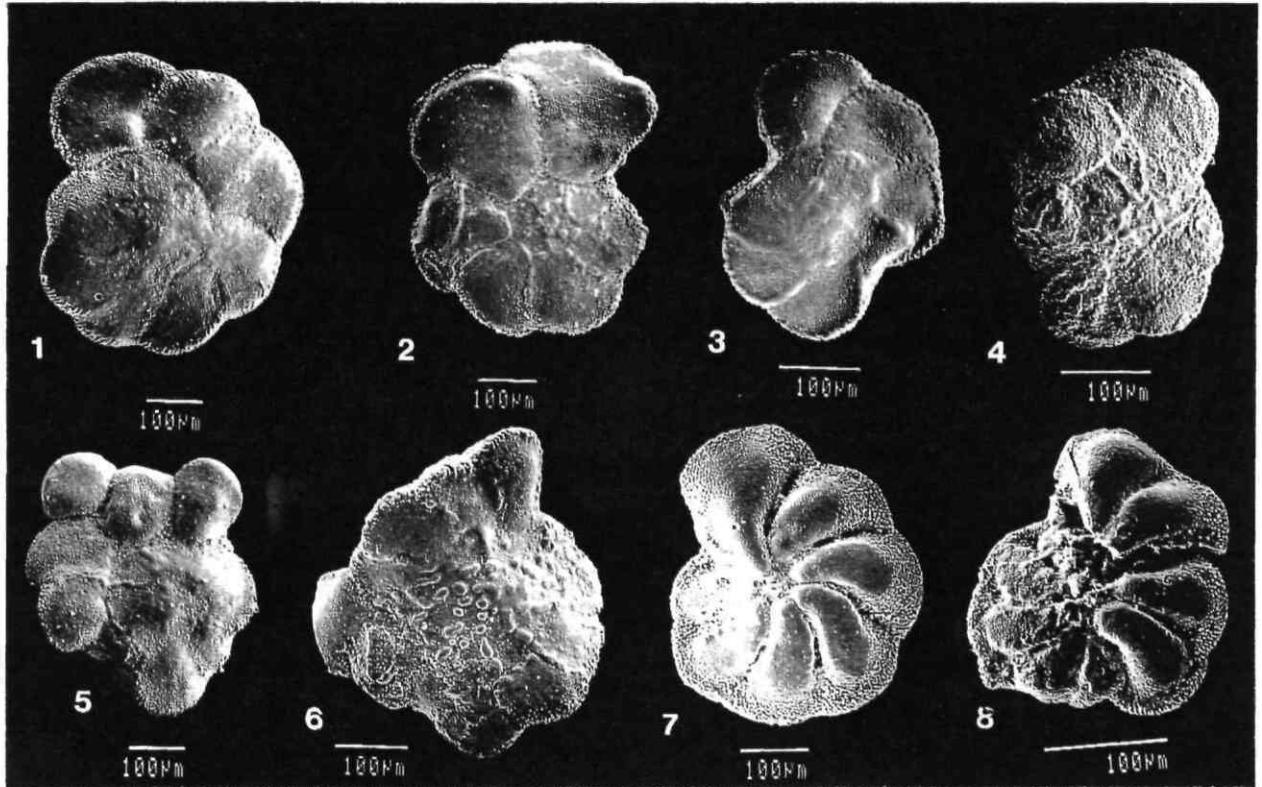


Planche 3

Planche 4

Exemples d'anomalies des tests de foraminifères *Ammonia* provenant d'un site pollué par les métaux lourds :

Clichés 1, 2, 3, et 13 : protubérances anormales
Clichés 3, 10a, 10b, 10c : loges supplémentaires
Clichés 4, 5, 6, 7, 12 : loges de forme aberrante
Cliché 11 : test mal développé, "avorté".

Planche photographique et texte traduit et simplifié d'après V. YANKO et al. (1994).

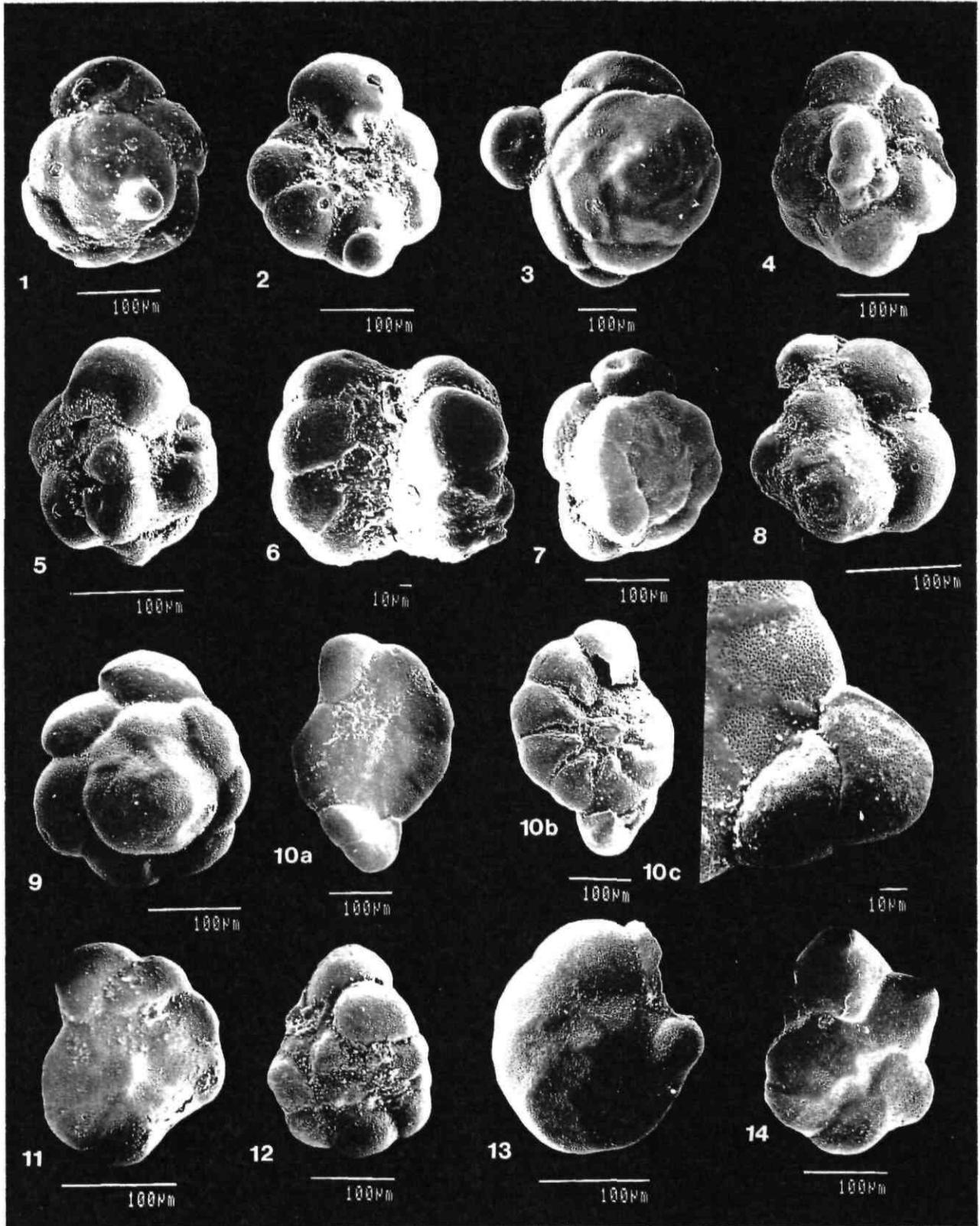


Planche 4

Les troubles de la reproduction sont très importants dans ces milieux pollués par métaux lourds. L'alternance des cycles est totalement perturbée.

Le mode de reproduction sexuée est complètement stoppé au profit du mode asexué. Des observations similaires sont également faites dans d'autres situations de stress (A.V. FURSSENKÓ, 1978 ; V. YANKO et al., 1994).

Actuellement, aucune étude expérimentale détaillée de l'incidence des métaux lourds sur le métabolisme des foraminifères n'a été effectuée.

La pyritisation des tests de nombreux tests vivants sont pyritisés dans les milieux pollués par métaux lourds. E.ALVE (1991) estime que cette pyritisation provient des bactéries présentes dans le test.

Les conditions de milieu à cause des hautes teneurs en métaux lourds, deviennent très difficiles pour le foraminifère, qui affaibli, laisse les bactéries développer et installer un microenvironnement réducteur à l'intérieur de leur test.

Cette interprétation est reprise par V. YANKO (1994).

La pollution par métaux lourds est enregistrée par les foraminifères benthiques, rapidement et diversement.

Mais une meilleure connaissance de ces phénomènes biologiques, bio et géochimiques est indispensable ; elle nécessite une méthodologie expérimentale rigoureuse afin d'étalonner avec précision les réponses aux diverses pollutions.

6. LA RECHERCHE APPLIQUÉE "FORAMINIFÈRES ET POLLUTION" AUJOURD'HUI...ET DEMAIN

6.1. LES ÉQUIPES DE RECHERCHE EN PLACE AUJOURD'HUI

Une liste des principales équipes de recherche concernées par le thème "foraminifères bioindicateurs" est proposée.

6.1.1. En Europe

En Norvège, à l'institut de Géologie de l'Université d'Oslo, E. ALVE, J. NAGY (bioindicateur de pollution).

En Grande-Bretagne, au Département de Géologie de l'Université de Exeter dans le Devon, J. MURRAY (écologie s.l. des foraminifères),

Au Département de Géologie de l'Université de Southampton, A.R. SHAFIRI, I.W. CROUDACE, R.L. AUSTIN.

Cette équipe travaille essentiellement sur l'impact de la pollution par métaux lourds dans les estuaires du Sud de l'Angleterre,

En France, au Département de Géologie de l'Université d'Angers création par J.P. DEBENAY en 1994 d'un groupe de recherche "microbioindicateurs de pollution" regroupant divers spécialistes de géologie, écologie, biologie, biochimie, géochimie, sédimentologie.

Participation de C. BOURDILLON à ce groupe pour 1995 dans le cadre du projet de recherche P03 "Processus et transfert en milieu littoral", pour le thème "foraminifères et polluants".

6.1.2. En Israël

A l'institut pour la Conservation de la Nature, de l'Université de Tel Aviv et au département de Géophysique et Sciences de la Planète, toujours à l'Université de Tel Aviv, V. YANKO, J. KRONFELD, A. FLEXER. Depuis 1990, ces chercheurs ont orienté leurs recherches sur les foraminifères bioindicateurs de pollution.

6.1.3. Au Canada

- Geological Survey of Canada, l'Institut d'Océanographie de Dartmouth,

- Centre de Géologie marine à Halifax,

- Département de la Pêche et des Océans de l'Institut d'Océanographie de Dartmouth, T. SCHAFER, J.N. SMITH, F.E. COLE.

6.1.4. Aux U.S.A.

- Au Département des Sciences de l'Environnement, Université de Virginie à Charlottesville, R.L. ELLISON.
Les travaux sont plus orientés ici vers l'écologie s.l. dans les milieux paraliques,
- Au Département de Géologie et de Géophysique Université de Louisiane à Baton Rouge, R.K. SEN GUPTA.

6.2. LE PROJET...AU FUTUR

Tous les travaux actuels -et publiés- mettent en évidence la sensibilité des foraminifères à diverses modifications du milieu : c'est le stade des constatations, des premières timides quantifications...

C'est un bioindicateur, c'est prouvé.

Il est simple à utiliser, économique, c'est certain.

Mais quelles sont ses limites ? Inconnues à ce jour.

La recherche appliquée dans ce domaine doit être développée car l'utilisation de ce bioindicateur est prometteuse.

Plusieurs pays ont entrepris des recherches dans ce domaine, mais en ordre dispersé, souvent déconnectées de l'ensemble des données de l'écosystème, et en dehors de toute connaissance précise du métabolisme des foraminifères.

Ces bioindicateurs vivent dans le sédiment, sur ou près de l'interface eau-sédiment, ou dans les premiers centimètres du sédiment qui absorbent les polluants.

Il paraît donc indispensable de développer simultanément les recherches sur ce qui se passe du point de vue géochimique et biochimique (incidences sur le microbenthos, piégeage, transferts et migrations de polluants) au niveau de cet interface, et cela à diverses profondeurs en domaine littoral s.l.

Ce n'est qu'à partir d'une recherche pluridisciplinaire sur un ou plusieurs sites communs (mêmes échantillons, méthodologie commune, corrélations systématiques de tous les résultats géologiques, biologiques, bio- et géochimiques) que le sujet évoluera rapidement.

A l'issue de ce type d'étude exhaustive, la valeur du bioindicateur foraminifère pour le suivi en routine sera alors connu. Une fois validé, il faudra l'étalonner puis le tester sur des sites de référence dûment sélectionnés.

Si les résultats confirment nos espérances, ce bioindicateur pourra être utilisé en routine.

6.3. LE PROJET EN FRANCE, AU B.R.G.M...AUJOURD'HUI ET DEMAIN

6.3.1. En France, aujourd'hui

C'est le Professeur DEBENAY, professeur à l'Université d'Angers, qui a mis au point un indice pour quantifier le confinement (1990, 1993).

Il a édité en 1994 une brochure publicitaire intitulée "Utilisation d'un micro-bio-indicateur de confinement et de pollution dans la zone de transition Continent-Océan", destiné aux collectivités locales et autres organismes susceptibles d'être intéressés.

Il a initié le groupe de recherche français "micro-bio-indicateurs" afin de poursuivre les travaux sur les foraminifères comme indicateur de confinement et pollution de manière efficace, en animant une équipe pluridisciplinaire qui permettra une approche active, précise et globale de la biodiversité et des écosystèmes concernés. Le projet débutera en mars 1995.

6.3.2. En France, demain

Les recherches en cours doivent être complétées par une série d'investigations, devant permettre la mise au point d'un indice de pollution, comparable dans sa conception et sa finalité à l'indice de confinement de DEBENAY.

Cet indice de surveillance établi à partir des foraminifères pourrait alors être utilisé en routine dans les sites sensibles, par étude de prélèvements réguliers de sédiment.

Les perturbations du milieu pourraient être décelées rapidement de façon fiable et économique.

En cas de réponse positive, des analyses complémentaires et plus complexes seraient alors entreprises.

La mise au point d'indices, de courbes d'étalonnage, de quantification des réponses du bioindicateur sera le but ultime des travaux du groupe de recherche "micro-bioindicateurs".

6.3.2. Au B.R.G.M, aujourd'hui et demain

En 1994, la Direction de la Recherche a souhaité un rapport sur l'état de la recherche sur le thème "foraminifères benthiques comme bioindicateurs de pollution en milieu littoral". Le voici.

Pour 1995, il est prévu une participation de C. BOURDILLON au groupe de recherche Microbioindicateurs, comme géologue tout d'abord et comme spécialiste des foraminifères bien sûr, avec une approche nouvelle, synthétique, permettant de faire le lien entre géologie-biologie-biochimie et géochimie.

7. CONCLUSION

Dans la chaîne alimentaire benthique, les foraminifères sont les animaux les plus simples.

Ils se nourrissent de producteurs primaires (algues), de bactéries et d'autres animaux microscopiques.

Benthiques, ils vivent sur ou dans le sédiment à l'interface ou près de l'interface eau/sédiment, ils sont donc très vite atteints par les polluants que le sédiment absorbe et réagissent précocement.

Ils peuvent donc prétendre au label de bioindicateur en milieu littoral s.l. (du paraliq au marin).

- **Lorsque le confinement varie...** dans les estuaires ou les lagunes, les foraminifères benthiques réagissent. L'analyse de la composition des assemblages et de la diversité permet le calcul d'un indice de confinement donc une comparaison aisée de divers sites pour une région donnée.

- **Lorsque le milieu s'appauvrit en oxygène** (tendance anoxique), les associations de foraminifères se modifient.

Certains genres disparaissent ; d'autres développent des écomorphotypes, enfin des genres opportunistes profitent de la situation... La tendance des formes est à la petitesse et à l'amincissement des tests, à l'agrandissement des portes et à une majorité d'opportunités.

Si le milieu anoxique est riche en matière organique les populations sont plus abondantes, mais la diversité reste faible.

- **Lorsque le milieu est très riche en matière organique** (pollution domestique).

En milieu perturbé par une pollution domestique (rejet d'émissaire par exemple), la réponse des foraminifères est nettement positive : ils apprécient. La diversité et la taille des individus augmente, et ils se multiplient plus que partout ailleurs. Ils marquent donc très bien les perturbations du milieu par enrichissement en matière organique.

- **Lorsque le milieu est trop riche en matière organique** (stades élevés d'eutrophisation), le milieu a tendance à l'anoxie, et le schéma s'inverse. La réponse devient négative avec baisse de la diversité, de la taille jusqu'au nanisme. Quelques espèces opportunistes (comme dans les milieux déficitaires en oxygène) subsistent, et dans les stades ultimes disparaissent.

- **Lorsque des métaux lourds sont déversés** (pollution industrielle) dans un environnement sain, les foraminifères réagissent rapidement (3 à 6 semaines environ) : la composition des associations se modifie, la diversité diminue, la taille des tests se réduit très fortement, et les anomalies tératologiques se multiplient. Le métabolisme est profondément perturbé.

Pour une utilisation en routine de ce bioindicateur, il faut poursuivre et surtout développer, amplifier toute recherche appliquée dans ce domaine, afin de parvenir à une hiérarchisation des réponses aux perturbations du milieu, à leur quantification à l'aide d'une méthodologie simple. L'indice de confinement (mis au point en France) est une première étape encourageante vers l'élaboration de l'indice de pollution.

BIBLIOGRAPHIE

ALTENBACH A.V. (1992) - Short term processes in benthic foraminifera. *Mar.Micropaleontol.*, v. 19, pp 119-129.

ALTENBACH A.V. and SARNTHEIN M. (1989) - Productivity record in benthic foraminifera. *In* BERGER W.H., SMETACEK V.S. and WEFER G. (Editors), *Productivity in the Oceans : Present and Past*. Wiley, Chichester, pp. 255-269.

ALVE E. (1990) - Variations in estuarine foraminiferal biofacies with diminishing oxygen conditions in Drammensfjord, SE Norway. *In* : HEMBLEBEN C., KAMINSKI M.A., KUHN W. and SCOTT D.B. (Editors), *Paleoecology, Biostratigraphy, Paleoceanography and Taxonomy of Agglutinated Foraminifera*. Kluwer, Dordrecht, pp. 661-694.

ALVE E. (1991a) - Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sorfjord, Western Norway : *Journal of Foraminiferal Research*, v.21, pp. 1-19.

ALVE E. (1991b) - Foraminifera, climatic change, and pollution : a study of Late Holocene sediments in Drammensfjord, Southeast Norway : *the Holocene*, v.1, n°3, pp. 243-261.

ALVE E. and NAGY J. (1986) - Estuarine foraminiferal distribution in Sundebucta, a branch of the Oslo Fjord, *Journal of Foraminiferal Research*, v. 6, pp. 261-284.

ALZIEU C. (1994) - Les réseaux d'alerte : l'expérience de l'Ifremer. Les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques. Séminaire national 2-3 Novembre 1994, Paris. Gip HydrOsystèmes, Ministère de l'Environnement, Aghtm association spécialistes de l'environnement, pp. 116-126.

BANDY O.L., INGLE J.C. and RESIG J.M. (1964a) - Foraminiferal trends, Laguna Beach outfall area, California : *Limnology and Oceanography*, v.9, pp. 112-123.

BANDY O.L., INGLE J.C. and RESIG J.M. (1964b) - Foraminifera : Los Angeles County outfall area, California : *Limnology and Oceanography*, v.9, pp. 124-137.

BANDY O.L., INGLE J.C. and RESIG J.M. (1965a) - Modifications of foraminiferal distributions by the Orange County outfall, California : *Marine Technology Society, Transactions*, 1965, pp. 54-76.

BANDY O.L., INGLE J.C. and RESIGN J.M. (1965b) -Foraminiferal trends, Hyperion outfall, California : *Limnology and Oceanography*, v. 10, pp. 314-332.

BANERJI R.K. (1989) - Foraminifera and discrimination of polluted environment along the Bombay Coast. Kalia, Prabha. *Micropaleontology of the Shelf Sequences of India : Indian Colloquium on Micropaleontology and Stratigraphy*, University of Delhi, Delhi, India, v.12, pp. 99-117.

BANERJI R.K. (1973) - Benthic foraminifera as an aid to recognize polluted environment : Indian Science Congress Association, Proceedings, 60 th Session, n°60, part 4, 116 p.

BERNHARD J.M. (1986) - Characteristic assemblages and morphologies of benthic foraminifera from anoxic, organic-rich deposits : Jurassic through Holocene. *J. Foraminiferal Res.*, v.16, pp. 207-215.

BERNHARD J.M. (1989) - The distribution of benthic foraminifera with respect ot oxygen concentration and organic carbon levels in shallow-water Antarctic sediments. *Limnol. Oceanogr.*, v. 34, pp. 1131-1141.

BERNHARD J.M. (1992) - Benthic foraminiferal distribution and biomass related to poor-water oxygen content. *Deep-Sea Research*, v. 39, pp. 585-605.

BHALLA S.N. and NIGAM R. (1986) - Recent foraminifera from polluted marine environment of Velsao Beach, South Goa, India : *Revue de Paleobiologie*, v. 5, pp. 43-46.

BIGNOT G. (1982) - Les microfossiles. Les différents groupes. *Exploitation paléobiologique et géologique*. Dunod. 212 p.

BILLETT D.M.S., LAMPITT R.S., RICE A.L. and MANTOURA R.F.C. (1983) - Seasonal sedimentation of phytoplankton to the deep-sea benthos. *Nature*, v. 302, pp. 520-522.

BLANDIN P. (1986) - Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. *Bull. Ecol.* vol. 17, n°4, pp. 215-307.

BOLTOVSKOY E. and WRIGHT R. (1976) - Recent foraminifera : Dr. W. Junk, The Hague, 515 p.

BOLTOVSKOY E., SCOTT D.B. and MEDIOLI F.S. (1991) - Morphological variations of benthic foraminiferal tests in response to changes in ecological parameters : a review : *Journal of Paleontology*, v. 65, pp. 175-185.

BUCKLEY D.E., OWENS E.H., SCHAFER C.T., VILKS G., CRANSTON R.E., RASHID M.A., WAGNER F.J.E. and WAKJER D.A. (1974) - Canso Strait and Chedabucto Bay : A multidisciplinary study of the impact of man on the marine environment : *Geological Survey of Canada, Paper 74-30*, n°1, pp. 133-160.

BUZAS M.A. (1978) - Foraminifera as prey for benthic deposit feeders : Results of predator exclusion experiments : *Journal of Marine Research*, v. 36, pp. 617-625.

BUZAS M.A. (1982) - Regulation of foraminiferal densities by predation in the Indian River, Florida : *Journal of Foraminiferal Research*, v. 12, pp. 66-71.

BUZAS M.A. and CARLE K.J. (1979) - Predators of foraminifera int he Indian River, Florida : *Journal of Foraminifera Research*, v. 9, pp. 336-340.

BUZAS M.A., COLLINS L.S., RICHARDSON S.L., SEVERIN K.P. (1989) - Experiments on predation, substrate preference, and colonization of benthic foraminifera at the shelf break off the Ft. Pierce Inlet, Florida. *Journal of Foraminiferal Research*, v.19, n°2, pp. 146-152.

CARALP M.H. (1984) - Impact de la matière organique dans des zones de forte productivité sur certains foraminifères benthiques. *Océanol. Acta*, v. 7, pp. 509-516.

CARALP M.H. (1989) - Abundance of *Bulimina exilis* and *Melonis barleanum* : relationship to the quality and quantity of organic matter. *Geo-Mar. Lett.*, v. 9, pp. 37-43.

CARALP M.H. (1989) - Size and morphology of the benthic foraminifera *Melonis barleanum* : Relationship with marine organic matter : *Journal of Foraminiferal Research*, v. 19, pp. 235-245.

CAVARI B., ROSHANSKI N. et COLWELL R.R. (1983) - Effect of pollution on microbial communities in the coastal waters of Israel : *Israel Oceanographic and Limnological Research, Haifa, Tiberias, Elat, Collected Reprints*, v. 9, pp. 125-128.

CITA M.B. et PODENZANI M. (1980) - Destructive effects of oxygen starvation and ash falls on benthic lifes : a pilot study. *Quaternary Research*, v. 13, pp. 230-241.

COSTE M. (1994) - Sur l'utilisation des diatomées dans le diagnostic biologique de la qualité des eaux courantes. Intérêt et limites des incidences *in* les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques. Texte des conférences Gip HydroSystèmes. Ministère de l'environnement. Association des Spécialistes de l'environnement, pp. 136-152.

DEBENAY J.P. (1990) - Recent foraminiferal assemblages and their distribution relative to environmental stress in the paralic environments of West Africa (Cape Timiris to Ebrie Lagoon). *Journal of Foraminiferal Research*, v. 20, n°3, pp. 267-282.

DEBENAY J.P. et PAGES J. (1987) - Les peuplements de Foraminifères et de Thécamoebiens de l'estuaire hyperhalin du fleuve Casamance (Sénégal). Leur évolution de février 1984 à novembre 1985 : *Revue d'Hydrobiologie tropicale, Paris*, v. 20, pp. 231-254.

DEBENAY J.P., PERTHUISOT J.P. et COLLEUIL B. (1993) - Expression numérique du confinement par les peuplements de foraminifères. Applications aux domaines paraliques d'Afrique de l'Ouest. *C.R. Acad., Sc., Paris*, t. 316, série II, v. 12, pp. 1823-1830.

DEPLEDGE M.H. (1994) - The national basis for the use of biomarkers as ecotoxicological tools *in* Fossi and Leonzio ed. *Nondestructive biomarkers in vertebrates*. Lewis Publishers.

ELLISON R.L., BROOME R. and OGILVIE R. (1986) - Foraminiferal response to trace metal contamination in the Patapsco river and Baltimore Harbor, Maryland : *Marine Pollution Bulletin*, v. 17, n°9, pp. 419-423.

FURSSSENKO A.V. (1978) - *Vvedenie Izuchenie Foraminifer (Introduction to Study of Foraminifera)* : Gudina V.I. (ed), Nauka, Novosibirsk, 242 p.

GOODAY A.J. (1988) - A response by benthic Foraminifera to the deposition of phytodetritus in the deep sea. *Nature*, v. 332, pp. 70-73.

GOODAY A.J. (1993) - Deep-sea benthic foraminiferal species which exploit phytodetritus : characteristic features and controls on distribution. *Mar. Micropaleontol.*, v. 22, pp. 187-205.

- GOODAY A.J. and LAMBSHEAD P.J.D. (1989) - The influence of seasonally deposited phytodetritus on benthic foraminiferal populations in the bathyal northeast Atlantic : the species response. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, v. 58, pp. 53-67.
- GOODAY A.J. and TURLEY C.M. (1990) - Responses by benthic organisms to inputs of organic material to the ocean floor : a review. *Philos. Trans. R. Soc., London*, A331, pp. 119-138.
- GOODAY A.J., LEVIN L.A., LINKE P. and HEEGER T. (1992) - The role of benthic foraminifera in deep-sea food webs and carbon cycling. *In* : G.T. ROWE and V. PARIENTE (Editors), *Deep-sea Food Chains and the Global Carbon Cycle*. Kluwer, Dordrecht, pp. 93-91.
- GUELORGET O. and PERTHUISOT J.P. (1983) - Le domaine paraliq. Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. *Travaux du laboratoire de Géologie : Presses de l'Ecole Normale Supérieure*, n°16, 136 p.
- HEINRICH D. et HERGT M. (1990) - Atlas de l'Ecologie. Encyclopédies d'aujourd'hui. La Pochothèque. Le livre de poche, p. 284.
- KALHANSKI M. et SOUCHON Y. (1994) - Quelles variables biologiques pour quels objectifs de gestion ? Séminaire national-variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques. *Gip HydrOystème*, Ministère de l'environnement. Association des Spécialistes de l'Environnement, pp. 49-101.
- KAMESWARA RAO K. and SATYANARAYANA RAO T.S. (1979) - Studies on pollution ecology of foraminifera of the Trivandrum Coast : *Indian Journal of Marine Science*, v. 8, n°1, pp. 31-35.
- KROM M.D., KRESS N., BRENNER S. and GORDON L.I. (1991) - Phosphorus limitation in primary productivity in the eastern Mediterranean sea : *Limnology and Oceanography*, v. 36, pp. 424-432.
- LE CALVEZ Y. et CESANA D. (1972) - Détection de l'état de vie chez les foraminifères. *Annales de Paléontologie (Invertébrés)*, tLVIII, fasc.2, pp. 9-134, 1pl.
- LEE J.J. (1980) - Nutrition and physiology of the foraminifera *in* LEVANDOWSKY M. et HUTNER S.H. eds, *Biochemistry and Physiology of Protozoa*, Second Edition, v. 3, pp. 43-66.
- LEUTENEGGER S. (1994) - Symbioses in benthic foraminiferida : specificity and host adaptations. *Journ. Foram. Research*, v. 14, n°1, pp. 16-35.
- LEVEQUE C. (1994a) - Etat de santé des écosystèmes aquatiques : l'intérêt des variables biologiques. Les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques. Séminaire national 2-3 novembre 1994. *Gip Hydrosystèmes*, Ministère de l'environnement, pp. 11-31.
- LEVEQUE C. (1994b) - Le concept de biodiversité : de nouveaux regards sur la nature. *Natures, Sciences, Sociétés*, vol.2, n°3, pp. 243-257.

LIPPS J.H. (1983) - Biotic interactions in benthic foraminifera. In Trevesz MJS, McCall PL (eds) *Biotic Interactions in Recent and Fossil Benthic Communities* Plenum Press, New York, pp.331-76.

LOEBLICH A.R. and TAPPAN H. (1988) - *Foraminiferal genera and their classification* : Van Nostrand Reinhold Company, New York, 2 vols., pp. 1-970, pls. 1-847.

MEYBECK M. and HELMER R. (1989) - The quality of rivers : from pristine stage to global pollution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 75, pp. 283-309.

MOODLEY L. and HESS C. (1992) - Tolerance of infaunal benthic foraminifera for low and high oxygen concentrations. *Biol. Bull.*, v. 183, pp. 94-98.

MULLER W.A. (1975) - Competition for food and other niche-related studies of three species of salt-marsh foraminifera. *Mar. Biol.*, v. 31, pp. 339-351.

MURRAY J.W. (1971b) - Living foraminiferids of tidal marshes : a review. *Journ. Foraminiferal, Research*, v. 1, n°4, pp. 153-161.

MURRAY J.W. (1973) - *Distribution and ecology of living benthic Foraminiferids* : Heinemann Educational Books Ltd., London, 274 p.

MURRAY J.W. (1991) - *Ecology and palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Longman Group, Harlow, Essex, 397 p.

NAGY J. et ALVE E. (1987) - Temporal changes in foraminiferal faunas and impact of pollution in Sandebukta, Oslo Fjord. *Marine micropaleontology*, v. 12, pp. 109-128.

NAVROT J., CHEN I. and KRONFELD J. (1973) - Effects of pollution on bacterial populations in the Qishon Rivers System, Israel, *In* : *Composition and influence of waste water outfall on rivers and sea sediments along the Mediterranean Coast of Israel*, Report, Part. 2, Faculty of Agriculture, Rehovot, pp. 1-18.

NEUMANN M. (1967) - *Manuel de micropaléontologie des foraminifères*. Gauthier-Villars, 297 p.

PHILIPPE-LOEILLET S. (1983) - Contribution à l'étude des foraminifères benthiques de zones soumises à la pollution urbaine (émissaires des villes de Marseille et Toulon-Ouest, rade-abri de Toulon. Thèse Doctorat 3ème cycle en Océanologie, Université Aix-Marseille II, 165 p., 5 annexes.

PUJOS-LAMY A. (1973) - *Bolivina subaenariensis* Cushman, indicateur d'un milieu confiné dans le Gouf de Cap-Breton. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 277 (D), pp. 2655-2658.

RAMADE F. (1981) - *Ecologie des ressources naturelles*. Collection *Ecologie appliquée et sciences de l'environnement*, N°4, Ed. Masson, 322 p.

RAMADE F. (1992) - *Précis d'écotoxicologie*. Collection *d'écologie* n°22, Masson, p. 300.

SCHAFFER C.T. (1970) - Studies of benthic foraminifera in Restigouche Estuary : Faunal distribution patterns near pollution sources. *Maritime Sediments*, v.6, pp. 121-134.

SCHAFFER C.T. (1973) - Distribution of foraminifera near pollution sources in Chaleur Bay : *Water, Air and Soil Pollution*, v.2, pp. 219-233.

SCHAFFER C.T. and COLE F.E. (1974) - Distribution of benthic foraminifera : Their use in delimiting local near shore environments. *Off-shore geology of Canada, Eastern Canada* : Geological Survey of Canada, Paper 74-30, v.1, pp. 103-108.

SCHAFFER C.T., WAGNER F.J.E. et FERGUSON C. (1975) - Occurrence of foraminifera, molluscs and ostracods adjacent to the industrialized shoreline of Canso Strait, Nova Scotia *Water, Air and Soil Pollution*, v.5, pp. 79-96.

SCOTT D.B. and MEDIOLI F.S. (1980) - Living vs. total foraminiferal populations : their relative usefulness in paleoecology : *Journal of Paleontology*, v. 54, pp. 814-831.

SEIGLIE G.A. (1968) - Foraminiferal assemblages as indicators of high organic carbon content in sediments and of polluted waters : *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v.52, pp. 2231-2241.

SEIGLIE G.A. (1971) - A preliminary note on the relationships between foraminifera and pollution in two Puerto Rican Bays. *Caribbean J. Sci.*, v.11, pp. 93-98.

SEIGLIE G.A. (1975) - Foraminifera of Guayanilla Bay and their use as environmental indicators : *Revista Espanola de Micropaleontologia*, v.7, n°3, pp. 453-487.

SEN GUPTA B.K. et MACHAIN-CASTILLO M.L. (1993) - Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine micropaleontology*, v. 20, pp. 183-201.

SEN GUPTA B.K., LEE R.F. and MAY M.S. (1981) - Upwelling and an unusual assemblage of benthic foraminifera on the northern Florida continental slope; *J. Paleontol.*, v. 55, pp. 853-857.

SETTY M.G.A.P. (1976) - The relative sensitivity of benthic foraminifera in the polluted marine environment of Cola Bay, Goa : *Proceedings of VI Indian Colloquium in Micropaleontology and Stratigraphy*, Banaras, pp. 225-234.

SETTY M.G.A.P. (1982) - Pollution effects monitoring with foraminifera as indices in the Thana Creek, Bombay Area : *Internal Journal of Environmental Studies*, v.18, pp. 205-209.

SETTY M.G.A.P. and NIGAM R. (1984) - Benthic foraminifera as pollution indices in the Marine Environment of the West Coast of India. *Riv. It. Paleont. Strat.*, v.9, n°3, pp. 421-436.

SHARIFI A.R., CROUDACE I.W. and AUSTIN R.L. (1991) - Benthic foraminifera as pollution indicators in Southampton Water, Southern England : *Journal of Micropaleontology*, v. 10, n°1, pp. 109-113.

SJOERDSMA P.G. et VAN DER ZWANG J. (1992) - Simulating the effect of changing organic flux and oxygen content on the distribution of benthic foraminifera. *Marine Micropaleontology* v. 19, pp. 163-180.

SLADECECK M.W. (1973) - System of water quality from the biological point of view. Arch. Hydrobiol., vol.7, pp. 1-218.

SMART C.W., KING S.C., GOODAY A.J., MURRAY J.W., THOMAS E. (1994) - A benthic foraminiferal proxy of pulsed organic matter paleofluxes. Marine micropaleontology, v. 23, pp. 89-99.

THEEDE H., PONAT A. and SCHLIEPER C. (1969) - Studies on the resistance of marine bottom invertebrates to oxygen-deficiency and hydrogen sulphide. Mar. Biol., v. 2, pp. 325-337.

TYSON R.V. and PEARSON T.H. (1991) - Modern and ancient continental shelf anoxia : an overview. In : R.V. Tyson and T.H. Pearson (Editors), Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia. Geol. Soc. London Spec. Publ., v. 58, pp. 1-24.

VENEC-PEYRE M.T. (1981) - Les foraminifères et la pollution. Etude de la microfaune de la Cale du Dourduff (Embouchure de la Rivière de Morlaix). Cahiers de Biologie Marine, v. 22, pp. 25-33.

VINDIMIAN E. et GARRIC J. (1993) - Bio-essais et bio-indicateurs de toxicité dans le milieu naturel. Etude Inter Agence n°17, Agence de l'Eau. Ministère de l'environnement, 55 p.

WALKER D., LINTON A.E. and SCHAFER C.T. (1974) - Sudan Black B : a superior stain to Rose Bengal for distinguishing living from no-living foraminifera : Journal of Foraminiferal Research, v. 4, pp. 205-215.

WALTON W.R. (1952) - Techniques for recognition of living foraminifera : Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research, v.3, n°2, pp. 56-60.

WALTON W.R. (1964) - Recent foraminiferal ecology and paleoecology : In J. Imbrie and N.D. NEWEL (eds.), Approaches to Paleoecology, pp. 151-237.

WATKINS J.G. (1961) - Foraminiferal ecology around the Orange County, California, ocean sewer outfall : Micropaleontology, v. 7, pp. 199-206.

YANKO V. and FLEXER A. (1991) - Benthic foraminiferal assemblages as indicators of pollution (on example of the north-western shelf of the Black Sea), Third Annual Symposium on the Mediterranean margin of Israel, Institute Oceanography and Limnology, Haïfa-Israel, 5 p.

YANKO V. and FLEXER A. (1992) - Microfauna as possible indicators of hydrocarbon seepages : A new method for oil-gas trap reconnaissance : Israel Geological Society, Annual Meeting, Ashkelon-Israel, pp. 169-170.

YANKO V. and KRAVCHUK O. (1992) - Morphology and anatomy of framboidal iron sulfides in foraminiferal tests and marine sediments : Israel Geological Society, Annual Meeting, Ashkelon-Israel, pp. 71-172.

YANKO V. and KRONFELD J. (1992) - Low and high magnesian calcitic tests of benthic foraminifera chemically mirror morphological deformations, IV International Conference on Paleoceanography, Kiel-Germany, 308 p.

YANKO V. and KRONFELD J. (1993) - Trace metal pollution affects the carbonate chemistry of benthic foraminiferal shell. Israel Society for Ecology and Environmental Quality Sciences, 24th Annual Meeting, June 21-22, Tel Aviv University.

YANKO V., FLEXER A., KRESS N., HORNING H. and KRONFELD J. (1992) - Benthic foraminifera as indicators of heavy metal pollution along Israel's eastern Mediterranean margin : French-Israeli Symposium on the continental margin of the Mediterranean Sea. Institute Oceanography and Limnology, Haifa-Israel, pp. 73-79.

YANKO V., KRONFELD J., FLEXER A. (1994) - Response of benthic foraminifera to various pollution sources : implication for pollution monitoring. Journal of Foraminiferal Research, v. 24, n°1, pp. 1-17.

GLOSSAIRE

Anoxie : (de oxygène) privation d'oxygène.

Association : ensemble des populations de toutes les espèces présente dans l'échantillon, exemple : l'association de foraminifères = tous les foraminifères présents dans l'échantillon.

Benthique (benth. : fond de mer) : adjectif qui qualifie un être vivant, fixé ou non, vivant sur les fonds aquatiques.

Benthos (benth. : fond de mer) : ensemble des organismes localisés sur le fond des mers ou des eaux douces, soit qu'ils y soient fixés, soit qu'ils se déplacent à sa surface ou s'enfoncent dans le substrat.

Biomasse : dans un endroit donné, masse d'êtres vivants par unité de surface ou parfois de volume.

Bryophyte : groupe de plantes chlorophylliennes communément appelées "mousses".

Cambrien (Cambria = nom latin du pays de Galles) : système le plus ancien de l'ère primaire.

Coccolithe (du grec kokkos : et lithos : pierre), nom masculin : plaque calcaire de Coccolithophoridés.

Coccolithophoridés (de coccolithe et du grec phoros : qui porte) : végétaux unicellulaires (protophytes), marins, pélagiques de petite taille (0,01 mm) entouré d'une enveloppe sphérique, la coccosphère, constituée par l'assemblage de plaques calcaires, les coccolithes. L'accumulation de coccolithes fossiles constituent des roches calcaires (par exemple la craie du Bassin de Paris).

Captacule : long filament, mince et visqueux, dilaté à son extrémité, mobile et extensible. Il est utilisé par les mollusques Scaphopodes, comme les *Dentalium*, pour capturer les micro-organismes.

Commensalisme (cum- : avec ; mensa- : table) : état des animaux qui vivent à côté d'autres êtres en profitant de leurs aliments où, en servant d'abri, ou de moyen de locomotion mais sans se nourrir, comme les parasites, de leur matière organique.

Confinement : ensemble des phénomènes physico-chimiques liés à la diminution de l'influence marine dans les milieux paraliques, intermédiaire entre le milieu marin franc et le milieu continental ; ces phénomènes ne sont pas encore parfaitement connus, mais ils induisent une modification profonde des écosystèmes (se reporter à O. GUELORGET et J.P. PERTHUISOT, 1983).

Diploïde (dipl- : double) : qualifie les noyaux et par extension les individus à 2n chromosomes, c'est-à-dire contenant un assortiment double de chromosomes (double dose), chaque chromosome s'y trouve à double exemplaire et le noyau est dit renfermer deux génomes s'opposant à ceux qui en ont un (haploïdie), trois (triploïdie) ou plus (polyploïdie).

Diatomée : algues unicellulaires, autotrophes, dont la cellule (50 à 40 µm en moyenne) est soutenue par un squelette extracytoplasmique en opale (silice), le frustule. Les diatomées vivent

isolées, ou groupées en piles ; certaines sont benthiques, d'autres planctoniques. Elles peuplent toutes les zones humides, en eaux douces et marines.

Dinophycée : algues pyrrophytes, unicellulaires morphologiquement et biologiquement variées, surtout connues par leurs formes planctoniques peuplant les milieux aquatiques marins et lagunaires. Quand les conditions leur sont favorables, elles se multiplient intensément, jusqu'à plusieurs millions d'individus par litre d'eau. Cette prolifération entraîne la coloration des eaux dites alors "eaux rouges" et les rendent toxiques.

Les Dinophycées sont un élément fondamental du plancton des eaux actuelles. Par leur importance numérique, elles viennent en second lieu, derrière les diatomées.

Les formes fossiles sont très utilisées en biostratigraphie (G. Bignot, 1982).

Eutrophique : riche en nutriments, en nourriture.

Eutrophisation : processus évolutif, naturel ou provoqué, rendant un écosystème de mieux en mieux pourvu en sels nutritifs (nitrates, phosphates) et donc de plus en plus riche en organismes vivants et en matières organiques.

Haplodiplobiontique : Qualifie les cycles pour lesquels les phases haploïde* et diploïde*, alternent et correspondent à des générations distinctes. Le cas classique est observé chez les Foraminifères.

Haploïde (hapl- : simple) : Qualifie après la réduction chromatique les noyaux à n chromosomes, c'est-à-dire contenant un stock chromosomique simple : chaque chromosome n'y existe qu'à un seul exemplaire et le noyau est dit ne renfermer alors qu'un seul génome par opposition aux deux génomes que contiennent les noyaux diploïdes des cellules ordinaires de la même espèce.

Qualifie aussi la cellule qui contient un tel noyau à n chromosomes.

Métazoaire (méta- : après, zo- : animal) : animal pluricellulaire dont les nombreuses cellules différenciées des tissus sont groupées en systèmes fonctionnels ou organes.

Macrophytes : grandes plantes visibles à l'oeil nu. Les macrophytes aquatiques incluent les algues, les bryophytes (mousses), les ptéridophytes (fougères) et les végétaux supérieurs. En milieu marin, ce sont exclusivement des algues et des phanérogames marines (ex. Posidonies). Les macrophytes sont très utilisées comme bioindicateur dans les cours d'eau.

Nyctéméral (nyct- : nuit ; hemer- : jour) : Désigne ce qui est associé à l'alternance du jour et de la nuit. Un rythme nyctéméral est un rythme fonctionnel suivant la variation de luminosité du jour et de la nuit (définition de l'Académie des Sciences).

Necton (nect- : nageant) : Se dit de la faune aquatique dont les éléments nageant activement peuvent accomplir de grandes migrations (ex. : Poissons et Cétacés). Le necton s'oppose souvent au plancton et forme avec le tripton, le plancton et le neutron l'ensemble dénommé "seston".

Protiste (protist- : le premier de tous) : Etre vivant unicellulaire, soit animal (Protozoaires), soit végétal (Protophytes).

Protozoaires (proto- = premier ; zo- : animal) : Protiste à affinités animales.

Pseudopodes (pseud- : faux ; pod- : pied) : Prolongements protoplasmiques très mobiles et rétractiles, digitiformes ou filiformes que certains protistes, comme l'amibe ou les foraminifères, ou certaines cellules comme les leucocytes, émettent, pour se mouvoir, se fixer aux corps étranger ou capturer leurs proies.

Planctonique : qui appartient aux plancton.

Plancton (planct- : errant) : ensemble des organismes aquatiques mono ou pluricellulaires, végétaux ou animaux qui se laissent aller en flottant au grè des courants, tels que bactéries, algues, protistes, méduses, tuniciers, larves de poissons, de crustacés et de mollusques.

Les animaux planctoniques qui se caractérisent par leur flottabilité et leur transparence ne sont pas complètement passifs ; ils sont mobiles par leurs cils, leurs fouets, la contraction de leur corps ou le battement de leurs appendices, mais ces légers battements ne leur permettent pas de résister aux courants qui les entraînent.

Parasitisme (para- : à côté de ; sit- : nourriture) : Vie d'un être vivant aux dépens d'un autre sans le tuer immédiatement. Les degrés de parasitisme sont très divers : parasitisme provisoire, parasitisme définitif. On distingue souvent les ectoparasites des endoparasites : les premiers vivent à la surface de leur hôte, alors que les seconds vivent, soit dans un tissu donné, soit dans le tube digestif, soit dans le sang, soit même à l'intérieur des cellules. Dans la plupart des cas, on observe un certain nombre de caractères morphologiques communs se traduisant par la perte de certains organes, de certaines fonctions et le développement exagéré de la fonction de reproduction. Très souvent, le parasite, au cours de son évolution, n'a pas qu'un seul hôte et certains cycles parasitaires acquièrent une très grande complexité.

Protoplasme : généralité de la matière vivante active d'une cellule (cytoplasme, noyau et organites).

Population : ensemble des individus d'une même espèce.

Scissiparité (Scis : coupes en deux ; par- : engendrer) : reproduction asexmée de certains êtres vivants par division.

Symbiose (sym- : avec, ensemble ; bio : vie) : Association durable, sinon constante, nécessaire et à bénéfices réciproques ; elle joint des espèces rigoureusement déterminées et à besoins complémentaires. Exemple classique de l'association Flagellés-Termite, dans laquelle les Flagellés tirent avantage des conditions optimales pour eux de la panse rectale des Termite qui, eux, ont un besoin absolu des Flagellés pour assimiler la cellulose.

Symbionte de Symbiote (sym- : avec ; bio- : vie ; ont- : être) : Etre qui vit en symbiose avec un autre.

ANNEXES

Ce rapport était terminé, en cours de dactylographie, lorsque s'est déroulé au Ministère de l'Environnement, à Paris (Novembre 1994), le séminaire " les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques", destiné à faire rencontrer, dialoguer les gestionnaires et les scientifiques présentés par des conférenciers invités.

Il m'a paru intéressant d'en intégrer les principales données qui font le point, en novembre 1994, sur tous les **bio-indicateurs connus -ou reconnus-** par les hydrobiologistes et écotoxicologues et les instances officielles.

Que ces extraits choisis servent à établir des liens entre géologues et biologistes et apportent un éclairage nouveau sur les micro-bioindicateurs.

ANNEXE 1

Des bioindicateurs à différents niveaux de complexité de l'édifice biologique. Extrait de M. Kalhanski et Y. Souchon, 1994

L'excellente synthèse de M. Khalanski et Y. Souchon, 1994, propose des éléments de réponse à la question "Quelles variables biologiques pour quels objectifs de gestion ?". Ces extraits permettent de souligner la diversité des variables.

"La définition extensive du terme "bioindicateurs", données par P. Blandin (1986), recouvre trois niveaux d'organisation du vivant : le niveau cellulaire et tissulaire, le niveau des organismes (échantillons d'une espèce) et le niveau des peuplements qui constituent les communautés.

Au niveau cellulaire et tissulaire, des biomarqueurs ont été identifiés. Des polluants toxiques présents dans l'eau, fixés sur les matières en suspension ou dans les sédiments, peuvent pénétrer dans les cellules des organismes exposés et modifier le fonctionnement cellulaire. Des modifications, de composition, de concentration ou d'activité de certaines substances -marqueurs biochimiques- peuvent alors être détectées par des dosages spécifiques. Les biomarqueurs sont donc des indicateurs d'exposition à des substances toxiques applicables à la fois au terrain et au laboratoire.

Les principales méthodes de détection de toxicité reposant sur des biomarqueurs ont été passées en revue par E. Vindimian et J. Garric (1993) :

- induction des mono-oxygénases liées au cytochrome P450 par des polluants organiques,
- induction de métallothionéines par des métaux,
- induction des enzymes de conjugaison de phase II,
- induction des enzymes de stress oxydatif,
- production de protéines de stress,
- inhibition de l'acétylcholinestérase,
- activité de l'ATPase Na/K dépendante,
- dysfonctionnement de la synthèse de l'hème et des porphyrines (hémoglobine),
- détection d'adduits à l'ADN (indice de génotoxicité).

Les bioessais sont pratiqués sur des organismes tests. Mis en oeuvre dans un contexte expérimental selon des procédures standardisées, les bioessais mesurent la réponse physiologique ou comportementale induite par un polluant toxique sur un échantillon d'organismes sélectionnés d'après leur sensibilité au toxique et la reproductibilité de leur réponse. Les grandeurs les plus couramment mesurées sur des échantillons d'organismes tests sont le taux de mortalité, la croissance, le taux de reproduction, l'activité respiratoire, la production de lumière par des bactéries, la mobilité chez des invertébrés et des poissons, le mouvement des valves ou l'activité de filtration chez les coquillages. Plusieurs de ces tests sont normalisés ou sont en voie de normalisation par l'AFNOR.

Certaines espèces présentent une grande capacité d'accumulation des substances toxiques ou potentiellement toxiques, elles sont de ce fait utilisées comme *indicateurs du niveau de contamination chimique* et radioactive des milieux aquatiques. Ces indicateurs peuvent servir à des évaluations de risque sanitaire dans la mesure où ils sont représentatifs du transfert de polluants toxiques vers l'homme par les chaînes alimentaires. Ils sont utilisés par les Agences de l'eau (dosages de métaux dans les mousses aquatiques), et par IFREMER (dosages de métaux et micro-polluants organiques dans les moules et les huîtres (*voir annexe 3*)).

Ces deux premières catégories d'indicateurs biologiques relèvent de l'*écotoxicologie* qui peut être définie comme "une discipline étudiant qualitativement et quantitativement les effets néfastes des polluants chimiques sur les écosystèmes, avec examen des impacts sur l'homme" ou, plus concisément comme "la toxicologie de l'environnement" (F. Ramade, 1992).

Au niveau des communautés, les *indicateurs biocénotiques* sont basés sur la structure des peuplements. Ils s'inscrivent dans un cadre conceptuel différent de celui de l'écotoxicologie dans la mesure où le système naturel est l'objet central de la connaissance pour l'hydrobiologie et l'écotoxicologie dans la mesure où le système naturel est l'objet central de la connaissance pour l'hydrobiologie et l'écologie des milieux aquatiques. La structure biologique est caractérisée par la richesse en espèces et par la proportion relative ou la présence de certains taxons.

En complément aux méthodes classiques de description et d'interprétation de la composition des peuplements (diversité taxonomique, diagrammes rang-fréquence), des indicateurs biocénotiques, permettant de diagnostiquer des pollutions ou des modifications de l'habitat physique, ont été mis à disposition des utilisateurs.

Dans les eaux continentales, la qualité est mesurée soit par l'absence de taxons représentatifs de la structure biocénotique soit par la présence d'espèces dont on connaît le profil écologique.

Les indicateurs biocénotiques sont des outils de diagnose, généralement peu spécifiques, ils présentent cependant l'avantage de refléter l'état de l'ensemble de l'édifice biologique.

Les *indices saprobiques*, s'appuyant sur la connaissance du profil écologique des bactéries, des algues, des protozoaires (M.W. Sladeczek, 1973) ; ils caractérisent le degré de pollution organique des eaux douces. Il s'agit sans doute du système d'évaluation biologique le plus ancien, toujours très utilisé en Europe de l'Est mais qui l'est de moins en moins en France.

Les indices diatomiques : une dizaine d'indices de qualité biologique ont été définis ; deux d'entre eux ont prouvé leur capacité à répondre aux pollutions organique, saline et à l'eutrophisation. "En France, les indices diatomiques sont utilisés en routine par des Agences de l'Eau dans le cadre du Réseau National de Bassin et par le CEMAGREF. Les indices de qualité biologique fondés sur la variété taxonomique des *macroinvertébrés benthiques* et la présence de taxons indicateurs (principalement des larves d'insectes), sont les plus couramment utilisés en France actuellement".

"Dans les milieux où le prélèvement direct des organismes est difficile, voire impossible (cours d'eaux profonds aux rives abruptes ou canalisés), le recours à des substrats artificiels immergés pendant quelques semaines permet l'étude de la faune qui a colonisé ces supports et éventuellement la détermination d'un indice de qualité biologique potentielle (IQBP).

Des indices ayant une signification trophique dans les lacs ont été définis sur les Oligochètes et sur les Mollusques. La grande diversité taxonomique des Oligochètes des sédiments fins permet d'envisager l'usage d'indices caractérisant d'autres types de pollutions comme la contamination des sédiments par les métaux lourds".

Pour ce qui concerne *les poissons*, la biomasse et la structure du peuplement (composition spécifique, fréquence relative des espèces) sont évaluées à partir d'inventaires souvent pratiqués par pêches électriques. En plus de la richesse spécifique, il est aussi admis que le rang d'abondance des principales espèces et/ou la présence ou l'absence d'espèces repères caractéristiques d'une station sont des informations pertinentes à prendre en compte. Les espèces

repères identifiées par J. Verneaux (1977) dans la biotypologie des eaux courantes constituent une référence pour le peuplement de poissons de nos cours d'eau.

L'indice d'intégrité biotique, développé aux Etats-Unis puis appliqué à des cours d'eau français est établi à partir de notes appliquées aux trois niveaux structurels de l'édifice biologique : individus, populations et peuplement. La grille de calcul de l'indice d'intégrité biotique comporte 11 variables notées 1, 3 ou 5 la note globale varie entre 11 (plus mauvaise qualité biologique) et 55. Cet indice est prometteur mais des études complémentaires sont nécessaires avant qu'il ne soit opérationnel. Une des difficultés rencontrées dans la mise en oeuvre de cette méthode réside dans la détermination, au niveau régional, des valeurs de référence qui donneront la note maximale correspondant à l'optimum.

Les plantes aquatiques constituent également un ensemble biologique sensible à la qualité de l'eau, aux caractéristiques hydrodynamiques et sédimentologiques. Plusieurs indices reposant sur la *composition du peuplement de macrophytes* ont été définis, ils sont corrélés aux niveau trophique ou à des pollutions chimiques, mais les incohérences constatées par leur mise en oeuvre sur le terrain justifient des recherches complémentaires qui sont actuellement poursuivies dans le cadre d'un GIS spécialisé.

Les *expérimentations sur mésocosmes*, écosystèmes simplifiés, représentent un intermédiaire entre les bioessais et les indicateurs écologiques. Ils permettent d'effectuer des expérimentations in situ bien adaptées à la quantification des processus de toxicité et de transfert biologique des polluants (F. Ramade, 1992).

Les bioindicateurs n'ont pas la même pertinence écologique, ni le même temps de réponse, ni la même spécificité, ni le même caractère prédictif. Selon Adams (1990), les bioindicateurs peuvent être classés selon leur pertinence toxicologique ou écologique et selon leur temps de réponse ; une représentation schématique de la distribution des trois catégories d'indicateurs, inspirée de cette typologie, est proposée sur la figure 1.

Sur le plan toxicologique, les biomarqueurs sont généralement excellents : leur détermination est rapide et ils sont spécifiques d'un type de polluants. Le fait que les modifications soient mesurées à un niveau sub-létal fait de ces indicateurs des systèmes d'alerte précoce. Ils sont également susceptibles d'une automatisation par le biais des biocapteurs. En revanche, ils sont insuffisants en tant que moyen prévisionnel d'impact.

Les bioessais, de par leur extrême diversité, occupent une position centrale sur les axes représentativité - temps de réponse. Bien qu'ils relèvent principalement du laboratoire, ils débouchent aussi sur le développement de biocapteurs installés sur le terrain.

Les indicateurs biocénotiques reposant sur la structure de l'édifice biologique ont une forte signification écologique mais sont généralement peu spécifiques d'un type d'impact. Ils sont cependant d'excellents instruments d'évaluation des conséquences des modifications physiques de l'habitat (morphologique, hydrodynamique, sédimentologique)".

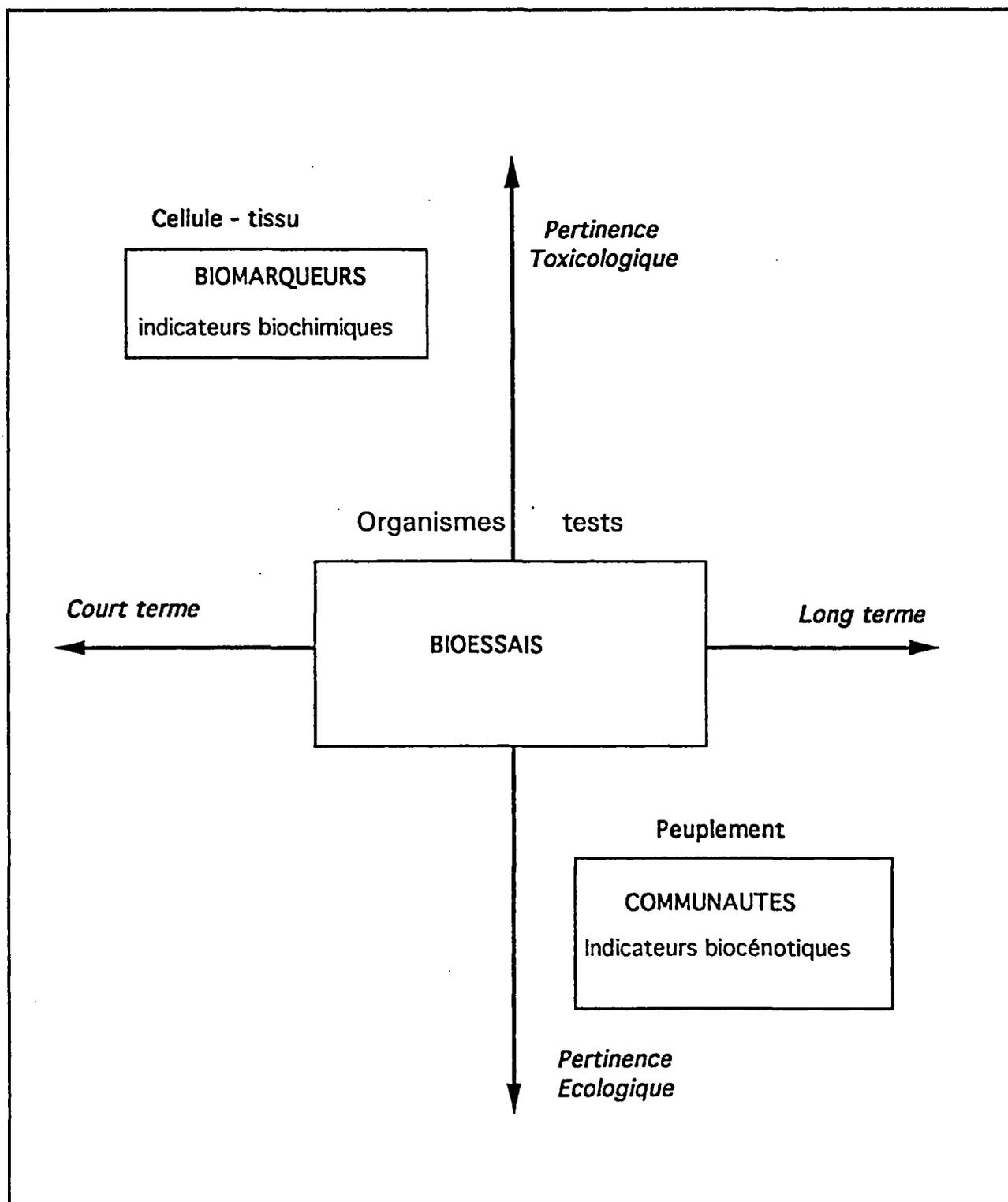


Fig. 1 : Position des trois grands types de bioindicateurs dans le plan représentativité-temps de réponse. Extrait de M. Kalhanski et Y. Souchon, 1994.

ANNEXE 2

Les biomarqueurs d'exposition Extrait de G. Monod, 1994

Le lecteur intéressé par ce nouveau thème de recherche en plein essor, très prometteur, pourra se référer aux travaux de M.H. Depledge (1994).

La synthèse proposée par G. Monod (1994) résume parfaitement les principales tendances de ces recherches nouvelles.

"La recherche des polluants chimiques dans les compartiments biotiques ou abiotiques du milieu aquatique rencontre des limites non négligeables (complexité des mélanges de polluants, faible persistance de nombreux polluants, difficulté d'interprétation toxicologique des niveaux de contamination rencontrés)".[...]

"Les biomarqueurs témoins d'une réponse des systèmes impliqués dans le maintien de l'homéostasie chimique des organismes peuvent être distingués de ceux témoins d'une modification de l'intégrité des fonctions physiologiques. Un bilan provisoire de l'utilisation de ces biomarqueurs ainsi que des perspectives d'emplois et de recherches sont dressées.

Biomarqueurs témoins de l'activation des systèmes impliqués dans le maintien de l'homéostasie chimique des organismes

La pénétration des polluants dans l'organisme génère des réponses visant à faciliter leur élimination et/ou à réaliser leur séquestration sous une forme non-biodisponible et/ou à éviter l'accumulation d'espèces chimiques toxiques et/ou à maintenir l'intégrité des systèmes moléculaire de l'organisme. Il s'agit dans la plupart des cas d'une synthèse accrue de protéines ayant soit des propriétés catalytiques (enzymes à cytochrome P450 et enzymes du stress oxydant), soit une affinité particulière pour certains polluants (métallothionéines), soit un rôle dans le maintien de la conformation de certains édifices moléculaires (protéines de stress).

Biomarqueurs relatifs à l'intégrité des fonctions physiologiques

Les perturbations des fonctions physiologiques trouvent leurs origines dans l'interaction des polluants avec les systèmes moléculaires qui caractérisent ces fonctions. L'accès à la mesure de l'intégrité (structure/fonctionnement) de ces systèmes permet de disposer de biomarqueurs. De nombreux travaux ont eu trait à la mesure de l'intégrité de l'ADN comme biomarqueur de l'exposition à des molécules génotoxiques. L'inhibition de l'acétylcholinestérase est un biomarqueur d'exposition à certaines molécules neurotoxiques. Des biomarqueurs relatifs aux capacités de croissance et de reproduction des individus ont été caractérisés. Des critères histo- et cytopathologiques peuvent également être utilisés.

Bilan provisoire et perspectives

Les biomarqueurs représentent des réponses biochimiques, histologiques, physiologiques, voire comportementales, spécifiques de la dégradation de la qualité chimique du milieu et situées à un stade précoce de la cascade d'événements pouvant déboucher sur des conséquences écotoxicologiques significatives.

La spécificité peut permettre de diagnostiquer les causes de la réponse et de suivre la restauration d'un milieu initialement pollué. La précocité plaide pour l'emploi de biomarqueurs dans des programmes de surveillance du milieu.

Ainsi l'utilisation de biomarqueurs pourrait être à l'avenir un des éléments clés d'un suivi intégré du devenir des organismes exposés aux polluants chimiques, ce en complément de l'approche physico-chimique (recherche des polluants) et de l'utilisation d'autres descripteurs biologiques relatifs à des niveaux d'organisation plus élevés (voir ce séminaire).

Pourtant une meilleure maîtrise des biomarqueurs connus reste en grande partie à acquérir en particulier dans la perspective de leur utilisation en routine dans le cadre de programmes de gestion. De plus, l'identification de nouveaux biomarqueurs est sans doute nécessaire pour affiner les informations susceptibles d'être recueillies. Enfin, un manque de connaissances important existe sur les valeurs prédictives des biomarqueurs (bas niveau d'organisation) vis-à-vis des conséquences ultérieures pour les niveaux d'organisation biologique élevés (populations,...). Il paraît donc nécessaire de concevoir des approches visant à révéler ces valeurs prédictives et les conditions dans lesquelles elles apparaissent.

ANNEXE 3

**Le suivi de la qualité des eaux littorales par l'Ifremer
Extrait de la synthèse de C. Alzieu,
Directeur Adjoint Environnement littoral (1994)**

Le réseau National d'Observation de la Qualité du Milieu Marin

Le RNO a été mis en place en 1974 par le Ministère de l'Environnement. L'objectif initial qui consistait à évaluer les niveaux et tendances des polluants et paramètres généraux de qualité a été progressivement complété par deux objectifs visant à protéger, l'un la santé humaine (consommateurs de produits marins), l'autre la vie des organismes marins (écosystèmes). Essentiellement assurée à ses débuts par des mesures dans la colonne d'eau, la surveillance a été successivement étendue en 1976 aux sédiments, en 1979 aux mollusques et poissons pris comme intégrateurs des contaminants rémanents, puis en 1987 à l'évaluation des effets biologiques (santé de l'écosystème).

Surveillance des paramètres généraux de qualité

Elle comporte la mesure de paramètres hydrobiologiques classiques (température, salinité, turbidité, sels nutritifs, oxygène dissous, chlorophylle et phéopigments) sur douze sites représentant des estuaires et des baies fermées. En Manche-Atlantique la surveillance est réalisée en période hivernale et estivale à partir de campagnes d'échantillonnages dans l'ensemble de la masse d'eau, alors qu'en Méditerranée ce sont des stations fixes qui sont échantillonnées mensuellement.

Surveillance des polluants

Cette surveillance porte en priorité sur la recherche de polluants organiques et inorganiques dans des échantillons de moules et d'huîtres prélevés trimestriellement en une centaine de points du littoral. Les polluants suivants sont systématiquement recherchés : mercure, plomb, cadmium, cuivre, zinc, PCB, DDT et ses produits de dégradation, HCH alpha et gamma, et jusqu'en 1992 les hydrocarbures polycycliques aromatiques totaux (PAH). Pour répondre aux obligations internationales dans le cadre des conventions d'Oslo et Paris, des analyses sont également réalisées dans les chairs de poissons prélevés en Baie-de-Seine et sur des sédiments. Pour ces derniers, utilisés comme enregistrement des contaminations passées, une campagne portant chaque année sur une façade différente permet de couvrir en cinq ans l'ensemble du littoral. En 1993, 40 échantillons ont été prélevés en Baie de Seine.

Surveillance des effets biologiques

Elle vise à évaluer l'état de santé de la flore et de la faune marine par la mesure de la réponse de ces organismes à des variations de la qualité du milieu. La réponse peut être mesurée à différents niveaux d'organisation biologique, allant de la cellule à la population, mais les techniques de mise en oeuvre sont encore très diversifiées. A un niveau européen, la surveillance des effets biologiques a été incorporée aux programmes de la North Sea Task Force pour ce qui concerne la macrofaune benthique, les tests sur le développement des larves d'huîtres, les poissons. Jusqu'en 1991, l'activité du RNO a consisté à mener à bien des études de faisabilité dans le domaine de bioindicateurs d'exposition, EROD (Ethoxyrésorufine - O - dééthylase), AChE (acétylcholinestérase), des tests larvaires et des suivis benthiques. A partir de 1992, deux sites

pilotes pour des mesures en routine d'EROD ont été implantés l'un en Baie de Seine, l'autre en Méditerranée. En 1990, le suivi benthique des "Pierres Noires" réalisé par la station biologique de Roscoff à l'époque de l'accident de l'Amoco-Cadiz a été repris par le RNO". [...]

Le réseau de suivi phytoplanctonique : REPHY

"La surveillance des phénomènes phytoplanctoniques toxiques est effectuée depuis 1984 par un réseau de suivi et d'alerte, mis en place par l'IFREMER à la suite des corrélations établies entre les présences du dinoflagellé *Dinophysis sp.* dans les eaux de certaines baies de Bretagne sud et les gastroentérites constatées chez les consommateurs des coquillages de ces régions.

Le réseau REPHY répond à un objectif général de collecte de données sur les populations phytoplanctoniques littorales, en vue d'acquérir des séries temporelles permettant d'étudier les phénomènes d'efflorescences et leur tendance d'évolution à long terme. Ses objectifs à court terme sont de détecter et suivre l'apparition d'espèces toxiques pour le cheptel et les consommateurs de coquillages et proposer à l'administration les mesures susceptibles d'en limiter au maximum les conséquences. Le réseau est constitué de 110 stations d'échantillonnage, comportant 37 points de suivi sur lesquels sont effectués des prélèvements systématiques toute l'année et 73 Points d'alerte qui s'ajoutent aux points de suivi en cas d'apparition d'une espèce toxique.

En régime de "suivi" chaque station est visitée une fois par mois de septembre à avril et deux fois par mois le restant de l'année. Des échantillons d'eau sont prélevés en surface et subsurface et les examens phytoplanctoniques sont réalisés au microscope inversé sur échantillon vivant ou fixé au Lugol. Le dénombrement de l'ensemble des espèces phytoplanctoniques présentes dans l'échantillon, c'est-à-dire toxiques ou non, est réalisé tous les deux mois. En situation d'alerte, déclenchée par la présence d'espèces toxiques dans les stations de suivi, des prélèvements d'eau et coquillages sont effectués selon une fréquence hebdomadaire. Dans les échantillons d'eau sont effectués les dénombrements des espèces toxiques ou potentiellement toxiques. La toxicité des coquillages est testée par bioessai communément appelé "test-souris". En cas de suspicion de toxines diarrhéiques (acide okadaïque) des extraits d'hépatopancréas sont injectés intrapéritonéalement à des souris et leur temps de survie mesuré. En cas de présence de toxine paralysante des tests similaires sont pratiqués après extraction des chairs en milieu acide, selon une méthode normalisée (AOAC).

Dans tous les cas où la toxicité est confirmée par le test souris, le préfet interdit par arrêté la commercialisation des coquillages du secteur incriminé. Selon le cas, la commercialisation d'une ou de toutes espèces peut être interdite. L'interdiction est levée lorsque successivement deux tests hebdomadaires se sont révélés négatifs, garantissant ainsi le consommateur contre des recrudescences momentanées du phénomène.

Le réseau national de surveillance microbiologique : REMI

Mis en place en 1988 le REMI a pour objectif de suivre l'évolution de la contamination bactériologique des eaux littorales par les germes indicateurs de contamination fécale, et de fournir des éléments d'information sur les causes de pollutions constatées : conditions météorologiques, mauvais fonctionnement des stations d'épuration d'eau usées etc.. Il a permis l'extension du contrôle sanitaire des eaux conchylicoles à l'ensemble des eaux littorales métropolitaines. Il est constitué par un ensemble de stations permanentes réparties de façon systématique d'après des critères de risques intégrant des informations sur la production

conchylicole et sur les sources de pollution. Sont ainsi couverts, 88 des 119 bassins hydrologiques du littoral par 345 stations, auxquelles viennent s'ajouter des stations d'alerte répondant à des problèmes locaux. Les stations permanentes sont échantillonnées selon une fréquence répondant à une stratégie régionale prenant en compte les résultats de 4 années de surveillance. De façon générale les zones à contamination constante (forte ou faible) sont échantillonnées trimestriellement, alors que celles soumises à de fortes fluctuations le sont mensuellement ou bi-mensuellement" [...].

ANNEXE 4

Aspects législatifs

Notre propos n'est pas une liste exhaustive et détaillée des diverses lois de protection des écosystèmes aquatique, mais une approche synthétique des principaux textes.

Au cours du colloque "les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques, 1994", des références à ces lois ont été fréquemment effectuées.

1) La loi sur l'eau, 3 janvier 1992

C. Levêque, Directeur du GIP Hydrosystèmes la résume ainsi :

"La loi sur l'eau du 3 janvier 1992, remplace celle du 16 décembre 1964. Le législateur, reste avant tout préoccupé par la gestion équilibrée de la ressource en eau (art. 2) car il a toujours comme premier souci de préserver cette ressource en quantité suffisante pour l'utilisation domestique, agricole et industrielle. Il affiche également des objectifs de qualité avec la volonté de la restaurer. Mais il affirme aussi en préambule que les usages de l'eau doivent prendre en compte la protection contre la pollution. La loi commence donc à considérer la gestion écologique intégrée qui donne la parole aux gestionnaires, aux utilisateurs, et à la rivière". (C. Levêque, 1994).

2) La directive Habitats ou directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992

La présentation de C. Lévêque précise :

"Au niveau européen, il faut mentionner la directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 (encore appelée directive Habitats) qui a pour objet, tel que défini dans son article 2, de "contribuer à assurer la biodiversité par la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et la flore sauvages sur le territoire européen des Etats membres où le trafic s'applique". Elle ajoute : "les mesures prises en vertu de la présente directive visent à assurer le maintien ou le rétablissement, dans un état de conservation favorable, des habitats naturels et des espèces de faune et de flore sauvages d'intérêt communautaire" en tenant compte "des exigences économiques, sociales et culturelles, ainsi que des particularités régionales et locales".

3) Proposition de directive du Conseil relative à la qualité écologique des eaux parut au Journal Officiel des Communautés européennes. Actes préparatoires 94/C222/06

Les extraits de la proposition fournis ci-dessous traitent plus particulièrement des bioindicateurs, de la préservation de la biodiversité et des écosystèmes ; ils correspondent aux annexes de la proposition.

Les alinéas signalés par le symbole  (un petit foraminifère), peuvent être directement appliqués au microbenthos (foraminifères benthiques), ou mieux les études menées dans ce rapport concernent précisément les alinéas signalés.

ANNEXE I

Qualité écologique de l'eau — Définitions pratiques

La qualité écologique de l'eau des écosystèmes aquatiques se détermine en fonction de l'état des éléments représentatifs énumérés ci-dessous présentant un intérêt pour l'écosystème considéré.

- ① 1. Oxygène dissous.
- ② 2. Concentrations de substances toxiques dangereuses dans l'eau, les sédiments et les biotes.
3. Taux de maladie des populations animales, notamment des poissons, et des populations végétales, dus à l'influence de l'homme.
- ③ 4. Diversité des communautés d'invertébrés (plancton et benthos) et des espèces/taxa clés normalement associées à l'état naturel de l'écosystème.
5. Diversité des communautés de végétaux aquatiques et notamment des espèces/taxa clés normalement associées à l'état naturel de l'écosystème et taux de croissance des macrophytes ou des algues dû à des nutriments dont le niveau élevé est imputable à l'homme.
6. Diversité des populations de poissons et des espèces/taxa clés normalement associés à l'état naturel de l'écosystème. Passage des poissons migrateurs, dans la mesure où il est affecté par les activités humaines.
7. Diversité de la communauté de vertébrés supérieurs (amphibiens, oiseaux et mammifères).
8. Structure et qualité des sédiments et capacité de ces derniers à assurer la subsistance de la communauté biologique dans l'écosystème.
- ④ 9. Rives et côtes, notamment leurs communautés biologiques et la beauté des sites.

ANNEXE II

Bonne qualité écologique de l'eau — Spécifications

Les États membres fixent, dans le respect du principe de précaution, les objectifs opérationnels à atteindre conformément à la présente directive, dans le cadre défini par les éléments représentatifs énumérés ci-dessous présentant un intérêt pour l'écosystème aquatique considéré.

- ① 1. L'oxygène dissous doit permettre la survie et la reproduction des animaux autochtones.
- ② 2. Les niveaux de concentration de substances toxiques ou dangereuses dans l'eau, les sédiments et les biotes ne doivent pas dépasser les niveaux d'innocuité établis, ni empêcher l'utilisation normale de l'eau.
3. Les populations animales, notamment les poissons, et les populations végétales ne doivent pas présenter un taux élevé de maladies dues à l'influence de l'homme.
- ③ 4. La diversité des communautés d'invertébrés (plancton et benthos) doit être comparable à celle de milieux aquatiques semblables pratiquement non perturbés par l'homme. Les espèces/taxa clés normalement associées à l'état naturel de l'écosystème doivent être présentes.

5. La diversité des communautés de plantes aquatiques doit être semblable à celle de milieux aquatiques comparables pratiquement non perturbés par l'homme. Les espèces/taxa clés normalement associées à l'état naturel de l'écosystème doivent être présentes. Le taux de croissance des macrophytes ou des algues ne doit pas être excessif en raison d'un niveau trop élevé de nutriments imputable à l'homme.
6. La diversité des populations de poissons doit être semblable à celle de milieux aquatiques comparables pratiquement non perturbés par l'homme. Les espèces/taxa clés normalement associées à l'état naturel de l'écosystème doivent être présentes. Aucun obstacle artificiel important ne doit entraver le passage des poissons migrateurs.
7. La diversité des communautés de vertébrés supérieurs (amphibiens, oiseaux et mammifères) doit être semblable à celle de milieux aquatiques comparables pratiquement non perturbés par l'homme. Les espèces/taxa clés normalement associées à l'état naturel de l'écosystème doivent être présentes.
8. La structure et la qualité des sédiments doivent être telles qu'elles permettent la présence des communautés biologiques typiques de la région.
9. L'état des rives et des côtes en dehors des zones urbaines doit refléter l'absence de toute influence sensible de l'activité humaine ou le souci de préserver la communauté biologique et la beauté du site.

ANNEXE III

Définition des meilleures pratiques environnementales (MPE)

1. Par «les meilleures pratiques environnementales», on entend la combinaison la plus appropriée de mesures destinées à prévenir la pollution diffuse, ou encore à assurer le fonctionnement écologiquement sûr d'équipements antipollution. Les meilleures pratiques environnementales comprennent aussi bien des mesures pratiques et un comportement respectueux de l'environnement, que les instruments mis en œuvre pour encourager l'adoption de mesures et l'évolution des comportements.

Lors de la détermination des activités dont l'exercice doit être conforme aux meilleures pratiques environnementales, il convient de tenir compte des éléments suivants:

- le principe de précaution,
- les risques écologiques liés à:
 - a) l'activité elle-même;
 - b) la production, l'utilisation et l'élimination définitive des produits utilisés dans le cadre de cette activité;
 - c) l'ampleur de cette activité,
- la possibilité de modifier les activités ou de les remplacer par des activités moins polluantes.

Les délais fixés pour se conformer aux MPE doivent tenir compte des effets sociaux et économiques pouvant résulter d'un rythme différent de mise en œuvre des MPE.

2. La définition de la meilleure pratique environnementale, par rapport à une source de pollution diffuse donnée, doit tenir compte, au moins, des éléments suivants.

2.1. Mesures

- Prévoir, à l'usage du public, des systèmes de collecte des déchets présentant un danger pour l'environnement,
- prévoir des systèmes de récupération, de recyclage et/ou d'élimination sûre des déchets qui en l'absence de tels systèmes présenteraient un danger pour l'environnement.

2.2. Comportement et instruments de promotion

- Établissement de codes de bonne conduite et de bonne pratique environnementale,
- information du public et éducation des consommateurs concernant les conséquences écologiques du choix des produits et de la conduite qu'ils adoptent,
- recours à des régimes d'autorisation ou de licences visant à interdire ou à limiter certaines pratiques,
- utilisation d'instruments économiques destinés à limiter les répercussions sur l'environnement de certaines activités ou de l'utilisation de certains produits.

ANNEXE IV

Les meilleures techniques disponibles (MTD)

Par «les meilleures techniques disponibles», on entend, pour tous procédés, activités et modes d'exploitation, le stade de développement le plus récent (état de l'art) démontrant l'aptitude pratique d'une technique donnée à prévenir, et lorsque cela se révèle impossible, à réduire les rejets dans l'environnement en général, sans préjuger d'une technologie ou d'une technique particulière.

Le terme «techniques» recouvre aussi bien les techniques employées que la manière dont une installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et désaffectée. Ces techniques doivent être industriellement réalisables dans le secteur concerné, tant du point de vue technique qu'économique.

Par «techniques disponibles», on entend les techniques mises au point à une échelle permettant de les appliquer dans le contexte industriel concerné, dans des conditions économiquement viables; il n'est pas nécessaire que ces techniques soient utilisées ou qu'elles aient été mises au point dans l'État membre intéressé, il suffit que l'utilisateur concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables.

Par «les meilleures» on entend les techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble compte tenu des avantages et des charges qui peuvent résulter de l'action ou de l'absence d'action.

Dans le choix des meilleures techniques disponibles, il convient de prendre particulièrement en considération les éléments suivants:

- l'utilisation de techniques produisant peu de déchets,
- le développement de la récupération et du recyclage des substances utilisées,
- les procédés, équipements ou modes d'exploitation comparables qui ont été expérimentés avec succès à une époque récente,
- les progrès techniques et l'évolution des connaissances scientifiques,
- la nature et le volume des rejets concernés,
- les délais de mise en œuvre des techniques,
- la consommation de matières premières (y compris l'eau) et d'énergie
et
- la nécessité de prévenir ou de réduire l'impact global des rejets sur l'environnement.

ANNEXE V

Paramètres à mesurer, méthodes d'échantillonnage, fréquence et lieux de prélèvement des échantillons

1. Chaque État membre organise sur le plan national la collecte et l'analyse des données nécessaires pour déterminer la qualité écologique des eaux et pour classer les écosystèmes aquatiques en fonction de leur qualité. Il adopte un système national qui englobe les paramètres à mesurer, les méthodes de mesure, les méthodes d'échantillonnage, ainsi que la fréquence et les lieux de prélèvement des échantillons les mieux

adaptés aux conditions régionales et à la nature des eaux analysées. Les paramètres retenus doivent comprendre, pour tous les éléments entrant dans la définition de la qualité écologique des eaux de surface donnée par la présente directive, les indicateurs les plus sensibles de la qualité écologique, ainsi que les paramètres nécessaires pour déterminer si les objectifs opérationnels fixés à l'article 5 sont atteints. Les méthodes de mesure peuvent inclure des méthodes de télédétection.

2. Les systèmes nationaux retenus doivent être portés à la connaissance de la communauté scientifique de chaque pays et offrir les meilleures garanties en ce qui concerne l'exactitude et la comparabilité des données. Dans chaque cas, des précisions sur les systèmes utilisés sont publiées. Toute modification ultérieure d'un système national doit apporter une amélioration de la qualité des données et les États membres concernés sont tenus de prouver la comparabilité des données collectées antérieurement ou postérieurement à cette modification.
3. Les États membres organisent sur le plan national l'interétalonnage entre les laboratoires prenant part à la collecte et à l'analyse des données en tenant compte des systèmes utilisés dans les États membres pratiquant les mêmes eaux.
4. Lors de l'élaboration du système national, les États membres établissent des cartes colorées suivant l'arc-en-ciel qui donnent une indication visuelle de la qualité écologique des eaux en fonction de l'écart qui les sépare d'une bonne qualité écologique. Ces cartes font partie du rapport prévu à l'article 14.

ANNEXE VI

Programmes intégrés

Les éléments suivants doivent figurer dans chaque programme intégré.

1. Les objectifs opérationnels définis conformément à l'article 5 ainsi que les mesures de réduction de la pollution et autres mesures estimées nécessaires. Le cas échéant, le programme concerné peut tenir compte des objectifs à long terme des programmes ultérieurs. Y figurent un calendrier des actions à réaliser et une estimation des résultats spécifiques escomptés.
2. Un plan des actions spécifiques à mettre en œuvre, dont notamment:
 - 2.1. les mesures requises pour se conformer à toutes obligations découlant de la législation communautaire pertinente, en particulier en matière de réduction de la pollution;
 - 2.2. lorsque cela se révèle nécessaire, l'application des meilleures techniques disponibles, définies par les États membres conformément aux dispositions de l'annexe IV, à toutes les sources ponctuelles de pollution, lorsque la substance polluante en question n'est pas régie par la législation communautaire;
 - 2.3. lorsque cela se révèle nécessaire, l'application des meilleures pratiques environnementales définies par les États membres conformément aux dispositions de l'annexe III, à toutes les sources de pollution diffuse, lorsque la substance polluante en question n'est pas régie par la législation communautaire;
 - 2.4. la limitation des prélèvements d'eau dans les eaux de surface en question et dans les aquifères auxquels elles sont reliées, à des proportions compatibles avec le maintien de l'eau à un niveau permettant d'atteindre les objectifs opérationnels fixés pour l'eau de surface concernée;
 - 2.5. toute autre opération destinée à améliorer l'environnement, y compris la gestion intégrée des ressources en eau de surface lorsque cela se révèle nécessaire pour leur permettre d'atteindre une bonne qualité écologique.
3. Les mesures complémentaires prises par les États membres dans les cas où les mesures prévues au paragraphe 2 précédent ne permettent pas de réduire suffisamment la pollution pour atteindre les objectifs opérationnels définis dans le programme intégré.
4. Les investissements financiers nécessaires, le nom des personnes physiques et des entreprises publiques ou privées chargées de l'exécution de mesures spécifiques, ainsi que le calendrier de la mise en œuvre.
5. Les dispositions législatives, réglementaires et administratives et tous les autres moyens devant être mis en œuvre pour la bonne exécution du programme intégré.
6. Tous les trois ans, un rapport d'évaluation des résultats du programme intégré en cours, qui est communiqué à la Commission.