

DRO.
129)

L'ENVIRONNEMENT LITTORAL EN L'AN 2000

QUELS ENJEUX POUR LA RECHERCHE ?

par

Jean BOURGOIN et Claude ALZIEU



 **IFREMER**

mars 1990

L'environnement littoral en l'an 2000 : Quels enjeux pour la recherche ?

RESUME

La mission de prospective confiée par Mr PAPON, Président Directeur Général d'IFREMER à Mr Jean BOURGOIN, Président de la Commission Environnement Littoral d'IFREMER et Mr Claude ALZIEU, Chef de département, IFREMER Centre de Nantes, avait pour objectif de : "recenser les grandes questions d'environnement littoral auxquelles la recherche aura à apporter des réponses à l'horizon de l'an 2000" et de dégager "les grandes orientations de recherche à privilégier" en prenant en considération "le développement des connaissances nécessaires à la protection du littoral, l'évaluation des impacts des aménagements, la surveillance de la qualité des écosystèmes littoraux et une appréciation des conséquences à long terme des activités anthropiques sur la qualité des eaux côtières".

Les auteurs ont retenu sept questions majeures couvrant les problèmes posés par les aménagements physiques, la pression urbaine et industrielle, l'exploitation des ressources vivantes et les effets à long terme des apports polluants. Ces sept questions sont :

1 - En vue d'appréhender les aspects **physiques** des perturbations anthropiques ou naturelles, comment améliorer la connaissance de la résultante des actions dynamiques de la marée et des courants dus au vent et à la houle sur la circulation hydrodynamique et le transport solide, au large et à la côte ?

2 - Quelles sont les conséquences à long terme de l'enrichissement des eaux côtières par les sels nutritifs et les matières organiques dégradables sur l'équilibre des écosystèmes littoraux ?

3 - Quel est l'impact sur le plateau continental, d'une part des dystrophies constatées en zone côtière, d'autre part de l'accroissement des apports anthropiques (autres que sels nutritifs) depuis un demi-siècle ?

4 - Existe-t-il dans l'environnement aquatique des substances anthropiques, à l'état de traces mais fortement réactives, capables d'induire des dérèglements cellulaires ou génétiques chez des espèces particulièrement sensibles ?

5 - Comment concilier la qualité des eaux littorales avec les nécessités économiques du développement de l'aquaculture de production, de la conchyliculture et de la protection des frayères ?

6 - Quelle est l'influence de la contamination bactérienne, virale et chimique (biotoxines) des produits marins sur la santé des consommateurs ?

7 - Comment formaliser les compétitions sociologiques et économiques sur l'espace littoral ?

Cette problématique conduit en outre à proposer deux orientations majeures :

- le **plateau continental** comme **zone d'intérêt scientifique** dans la mesure où il peut encore constituer une zone de référence,

- la participation aux études environnementales de disciplines actuellement peu ou pas concernées ; il s'agit de la **biologie moléculaire, de l'épidémiologie et de la socio économie.**

Les grandes disciplines thématiques de l'environnement ont été ensuite passées en revue d'abord pour établir l'état des connaissances et suggérer des orientations de recherche à privilégier pour répondre aux questions posées.

OCEANOGRAPHIE GENERALE

En hydrodynamique, le développement de modèles numériques apparaît comme la voie d'avenir permettant de prendre en compte dans leur ensemble les interactions complexes des processus océaniques. La désignation du plateau continental comme zone d'intérêt scientifique en l'an 2000 invite à un renforcement substantiel du recueil de données météo-océanographique pour l'établissement de modèles de circulation dans cette région océanique.

Contrairement à l'hydrodynamique, la **dynamique sédimentaire** doit réaliser un effort pour passer des lois empiriques du comportement sédimentaire à des lois théoriques qui permettraient, par exemple, une approche plus rationnelle des processus d'érosion côtière qui sont, dans certaines régions, à l'origine des graves préoccupations, ou encore des transports à très long terme sur le plateau continental. Les interactions sédimentaires, géochimiques, biologiques et microbiologiques doivent être étudiées en relation étroite avec les spécialistes directement concernés : hydrauliciens, chimistes, biologistes.

La **modélisation des écosystèmes** doit permettre la compréhension globale des propriétés de l'écosystème et par application de prévoir et quantifier les impacts des modifications de l'environnement, y compris sur la production biologique utilisée par l'homme. Les progrès dans ce domaine seront guidés par la banalisation du modèle mathématique, le développement de logiciels conviviaux très élaborés et la formation d'océanographes biologistes aux techniques modernes de modélisation des écosystèmes.

Qu'il s'agisse de transport ou de transformation chimiques ou biologiques, on portera un intérêt particulier au **cycles longs**.

LES POLLUANTS ET LEURS EFFETS

Les développements récents des techniques d'analyse de trace pour les métaux et micropolluants organiques permettent d'envisager une orientation de la **géochimie marine** vers l'étude des mécanismes qui conditionnent le devenir des polluants dans l'environnement : transport physique, transformations chimiques (complexation, oxydation, hydrolyse...) modifiant leur structure moléculaire, dégradation - métabolisation. L'intégration des connaissances acquises sur ces mécanismes doit aboutir à l'élaboration de modèles prédictifs de comportement des polluants déversés en milieu marin. S'agissant de l'évaluation des effets toxiques, il apparaît indispensable que l'**écotoxicologie marine** passe d'une vision des effets globaux à court terme sur les individus et les populations à une approche des effets à très long terme sur les mécanismes cellulaires. Dans cette perspective une implication plus importante de la **biologie moléculaire** est fortement recommandée en particulier pour l'étude des dérèglements insidieux que l'on peut actuellement constater chez certains individus ou population, ainsi que pour une meilleure compréhension des mécanismes de biotransformation des polluants.

Les problèmes que doit résoudre la **microbiologie** en zone littorale concernent essentiellement la consommation des coquillages ; le risque sanitaire lié à la baignade peut en effet être considéré comme relativement mineur. Les recherches réalisées ces dernières années ont montré que l'établissement de normes de consommabilité basées sur les germes test de contamination fécale n'étaient pas représentatives de la présence de bactéries pathogènes (salmonelles) ou de virus (hépatite) dans les eaux. Il apparaît nécessaire, d'une part de développer de nouvelles techniques d'identification des bactéries

pathogènes en faisant appel à la **biologie moléculaire**, d'autre part d'étudier les conditions de survie des microorganismes dans les milieux oligotrophes et théoriquement hostiles (halotolérance...).

Les **études épidémiologiques** qui visent à établir les corrélations entre les niveaux d'exposition chronique de l'homme à des toxiques et leurs effets à long terme sur la santé sont inexistantes en France en ce qui concerne la contamination des produits marins. Le développement de telles études apparaît indispensable pour établir ou valider des normes de consommation tenant compte de la contamination bactérienne, chimique et par les biotoxines.

Les opérations de **surveillance des pollutions** représenteront toujours à l'horizon de l'an 2000 une priorité en matière de protection de l'environnement. Il est probable que l'on disposera alors de modèles permettant de relier une mesure ponctuelle à une zone plus largement définie et représentative d'une région. En plus de l'instrumentation spécifique nécessaire aux opérations de suivi, deux orientations générales semblent devoir être envisagées : 1) le développement de la surveillance des apports, engagée en ce qui concerne les flux telluriques à la fin des années 80 ; elle devrait s'étendre aux apports atmosphériques qui apparaissent désormais comme une contribution importante à l'introduction de substances exogènes au milieu marin ; 2) la prise en compte du plateau continental dans son ensemble comme une zone d'échange dont les tendances d'évolutions doivent être déterminées.

Etant admis que la zone littorale demande un effort dans le domaine des **sciences sociales et économiques** sans commune mesure avec les réalisations actuelles dans ce domaine, deux thèmes d'orientation de recherche sont proposés : (1) le développement d'études comparatives des coûts et conséquences des stratégies de prévention et/ou de réparation des dommages causés par les actions anthropiques ; (2) le développement de recherches sur la valeur économique du patrimoine naturel. Ces deux thèmes répondent à une question unique : comment formaliser les compétitions sur l'espace littoral ? L'importance des enjeux en cause justifierait la création d'une Agence nationale des sciences de la mer.

Le rapport contient également quelques propositions d'ordre opérationnel ou politique comme : (1) la création d'un **Programme National d'Environnement Côtier** consacré à l'étude des modifications dont la zone littorale est l'objet ; (2) la création d'une **Agence Nationale de protection de l'Environnement** ayant une responsabilité globale (recherche, gestion et contrôle), une forte autonomie et des moyens financiers importants ; (3) une **information adaptée de l'opinion publique** sur les enjeux de l'environnement ; (4) le **développement du partenariat recherche-industrie** ; (5) une meilleure **intégration de l'effort français dans le cadre européen communautaire** (grands programmes de recherche, réseaux de surveillance, équipements) ; (6) un **développement de l'effort de formation**.

GLOSSAIRE

Biologie moléculaire :

Etude à l'échelle moléculaire des mécanismes biologiques.

Biotoxine :

Substance toxique produite par les organismes vivants.

Complexation :

Combinaison entre plusieurs molécules ou ions donnant des substances où les propriétés individuelles des ions et molécules ont disparu.

Dystrophie :

Altération des équilibres faunistiques des écosystèmes.

Ecotoxicologie :

Etude des effets des polluants sur les écosystèmes.

Germes-test :

Coliformes et streptocoques fécaux indicateurs de contamination bactérienne d'origine fécale.

Hydrolyse :

Décomposition chimique d'une substance par action de l'eau.

Métabolisation :

Transformation chimique et physico-chimique des aliments et substances ingérées par les organismes vivants.

Oligotrophe :

Milieu pauvre en éléments nutritifs.

AVANT - PROPOS

Dans une lettre du 17 juillet 1989 (référence IFREMER/DERO-D/PE/PDG/89 n° 446), Monsieur Pierre PAPON, Président Directeur Général de l'IFREMER, a confié à MM. Claude ALZIEU (Chef du département DERO/MR, Centre IFREMER de Nantes) et Jean BOURGOIN (Président de la Commission "Environnement littoral" d'IFREMER) une "mission prospective" avec, *"pour objectif, de recenser les grandes questions d'environnement littoral auxquelles la recherche aura à apporter des réponses à l'horizon de l'an 2000. A partir de cette problématique, les grandes orientations de recherche à privilégier seront dégagées. Elles prendront en considération le développement des connaissances nécessaires à :*

- la protection du littoral et des eaux littorales en vue de garantir les usages maritimes traditionnels et futurs ;

- l'évaluation des impacts des aménagements terrestres et maritimes ;

- la surveillance de la qualité des écosystèmes littoraux ;

- une appréciation des conséquences à long terme des activités anthropiques sur la qualité des eaux côtières ;

et définiront la contribution à attendre des grandes disciplines thématiques de l'environnement : physique côtière, microbiologie, écologie, écotoxicologie, géochimie des polluants, etc."

Conformément aux termes ci-dessus de la lettre de mission, le Rapport joint, intitulé **"L'environnement littoral en l'an 2000. Quels enjeux pour la recherche ?"** s'efforce de répondre aux grandes questions d'environnement littoral par des propositions d'orientations de la recherche.

Après une **Introduction** situant l'environnement littoral dans le cadre de l'environnement en général et dans une perspective européenne, il convenait de définir l'extension géographique du domaine étudié et de justifier le choix retenu. C'est l'objet du **chapitre II, "La zone littorale"** qui propose un programme national, le **"coastal change"**.

Viennent ensuite **"Les questions posées par l'environnement littoral en l'an 2000"**, **chapitre III**. Elles ne préjugent pas d'une connaissance fine des disciplines qui concernent chacune d'entre elles, mais se fondent sur une bonne information actualisée de l'état de l'art et la perception qu'en a le public cultivé. Par définition, ces questions sont peu nombreuses et toutes importantes. Leur formulation est faite dans un langage clair, de non spécialiste. Elles sont au nombre de sept.

Il n'est pas possible de répondre directement à ces questions par les orientations de recherche correspondantes. Le maillon intermédiaire entre les questions et les réponses est constitué par une présentation de l'état des connaissances des **"Grandes disciplines thématiques"**, **chapitre IV**. Cet inventaire permet d'identifier les lacunes et de procéder à leur regroupement judicieux entre disciplines

pour définir les "**Orientations de recherche**" chapitre V. On constate alors qu'à chaque grande question d'environnement correspondent plusieurs orientations de recherche, reposant elles-mêmes sur une ou plusieurs disciplines thématiques. Le libellé des orientations de recherche est laconique. Pour trouver leur contenu exact et leur contexte disciplinaire, on se reportera à leur indexation par disciplines thématiques, puis au chapitre IV dans lequel les faits importants et les recommandations figurent en **caractères gras**.

Il est peu probable que de grandes questions aient échappé à notre réflexion et à notre enquête. En tout cas, les recommandations faites pour des orientations de recherche paraissent devoir alimenter largement pour les dix années à venir l'activité nationale consacrée à l'environnement littoral.

Jean Bourgoïn
Service Hydrographique
et Océanographique
de la Marine

Claude Alzieu
IFREMER
Centre de Nantes

S O M M A I R E

Chapitre I – Introduction.....	9
Chapitre II – La zone littorale.....	13
Chapitre III – Les questions posées par l'environnement littoral en l'an 2 000.....	15
Chapitre IV – Les grandes disciplines thématiques.....	17
1 – L'hydrodynamique.....	17
2 – La sédimentologie.....	19
3 – La modélisation des écosystèmes.....	22
4 – La géochimie.....	24
5 – La microbiologie.....	25
6 – La biologie moléculaire et l'écotoxicologie marine.....	27
7 – La surveillance de la contamination et des effets.....	29
8 – L'épidémiologie.....	31
9 – L'aménagement du littoral.....	33
10 – Environnement – Sociologie – Economie.....	36
Chapitre V – Les orientations de recherche.....	41
Annexe 1 – La zone littorale – Enrichissement des zones côtières.....	43
Annexe 2 – L'instrumentation.....	46
Annexe 3 – Les programmes étrangers.....	49

CHAPITRE I

INTRODUCTION

L'Océan est à la fois un gigantesque réservoir de ressources renouvelables et non renouvelables, un espace de communication, un dépotoir difficile à contrôler, et une composante essentielle de l'équilibre climatique mondial. C'est dire l'intérêt majeur qu'il présente, compte tenu notamment de la raréfaction des ressources et de la nécessité de protéger notre environnement.

L'océanographie est passée, en moins de temps que deux générations, d'un stade descriptif à un stade explicatif, et même en partie à un stade prédictif. Elle est l'exemple parfait d'un domaine scientifique inter et pluridisciplinaire sans frontières franches entre les recherches fondamentale et appliquée. L'ampleur scientifique des problèmes à résoudre et leur extension géographique, requièrent une mise en commun des efforts à l'échelle internationale et la formation d'équipes pluridisciplinaires.

Les progrès attendus coûteront fort cher et il sera nécessaire de faire prendre conscience à l'opinion publique internationale de l'importance des enjeux et notamment de la nécessité d'une solidarité planétaire pour une exploitation raisonnable des océans ménageant l'avenir lointain de l'homme. Tous ceux qui s'occuperont du littoral seront aux premières loges pour ce combat.

Les aspects socio-économiques et culturels de l'environnement sont très difficiles à appréhender aujourd'hui et encore davantage si on les projette dans l'avenir. Dans nos "civilisations" modernes avancées, l'environnement est pris entre les deux pôles, industriel et culturel. La logique de profit maximum dans le minimum de temps du pôle industriel, correspondant à la formule "après moi, le déluge", le conduit à négliger l'environnement et à le remplacer le cas échéant par un mécénat fortement médiatisé. Le pôle culturel est caractérisé par l'idéologie laxiste dominante, qui rappelle quotidiennement à l'homme ses droits sans faire état de ses devoirs, favorise un individualisme forcené et un besoin effréné de consommation, qui sont à l'opposé d'un comportement environnemental responsable. Le tout est occulté par des opérations de solidarité spectacle, fortement médiatisées également. Face à ces deux pôles, ou plutôt coincés entre eux et ayant partie liée avec eux, l'Administration se limite à gérer une réglementation édictée pour limiter les appétits du pôle industriel, et incomplètement appliquée en vertu du pôle culturel. Il serait faux de croire que ces propos nous éloignent du littoral. En effet, l'environnement forme un tout. Il n'est crédible que considéré globalement, et surtout dans ses aspects quotidiens. Il est urgent de l'introduire, ou plutôt de le réintroduire dans les écoles maternelles et tout au long du cycle scolaire de formation du citoyen.

De fait, dans un contexte de démobilisation de l'opinion publique, à la suite d'une crise morale et économique, l'environnement, en France, a reculé dans la hiérarchie des priorités à la fois publiques et privées. Ces propos pessimistes, et cependant non exagérés dans bien des cas, n'engagent pas, – au moins complètement –, l'avenir car la situation est en train de changer. Il existe deux grands signes de ce changement. Il s'agit :

- d'une part, d'une perception scientifique des grands risques en environnement (nucléaires, chimiques, démographiques, gaz carbonique, ozone, etc) concomitante d'une perspective immédiate d'une amélioration spectaculaire des moyens d'observation de la Terre grâce aux satellites et aux moyens informatiques susceptibles de traiter les données recueillies ;

- d'autre part, des perspectives communautaires en matière d'environnement. L'Acte unique, adopté en décembre 1985, et complétant le Traité de Rome, fait de l'environnement un des objectifs explicites du Marché commun. Il prévoit notamment que : (a) "l'action de la Communauté en matière

d'environnement est fondée sur les principes de l'action préventive, de la correction, par priorité à la source, des atteintes de l'environnement, et du pollueur payeur ; (b) les exigences en matière de protection de l'environnement sont une composante des autres politiques de la Communauté ; (c) dans le cadre de leurs compétences respectives, la Communauté et les Etats membres coopèrent avec les pays tiers et les organisations internationales compétentes". Un chapitre spécifique à l'environnement est introduit dans le Traité de Rome qui autorise les instances communautaires à agir en dehors de toute référence au marché intérieur pour préserver, protéger et améliorer l'environnement, protéger la santé des personnes et utiliser de façon prudente et rationnelle les ressources naturelles. Sous la pression des pays de l'Europe du nord (RFA, Pays-Bas, Danemark, etc), il faut s'attendre à un renforcement des exigences en environnement et à une "sévérification" progressive des normes, concernant en priorité les "produits" et l'"agriculture". Dès à présent, l'Europe de l'environnement est une réalité importante, stimulée par des dommages graves (fuites de Seveso, pollution du Rhin, pluies acides, Tchernobyl), attestée par une réglementation importante et de grands programmes scientifiques et technologiques. Posé en termes économiques, le problème est de savoir si le surcoût des produits propres (biodégradables) et des procédés de fabrication non polluants n'est pas plus élevé que le coût des dommages écologiques (autrement dit le coût du "non environnement"). Bien qu'il soit difficile de définir et d'évaluer ce dernier coût, les experts s'accordent à le chiffrer pour les pays européens à 6 à 8 % du P.N.B. Dans la mesure où il est inacceptable de laisser se dégrader à long terme notre environnement, il devient raisonnable de songer à une concurrence par la qualité des produits et des procédés de fabrication vis-à-vis de l'environnement, ce qui suppose également une stratégie industrielle d'anticipation des risques.

Ces généralités concernent directement l'environnement littoral et les budgets qu'on devra lui consacrer. Selon le sain principe du pollueur payeur, il semble que l'on ait tout intérêt à traiter les pollutions le plus en amont possible.

Il faut préciser que l'environnement ne doit pas être considéré comme un état idéal de la nature que l'homme aurait systématiquement dégradé. On sait bien que l'homme est capable d'améliorer la nature en modelant le paysage tout en y facilitant ses activités et qu'il y a plus de bon sens à parquer les moules qu'à en faire la cueillette. L'environnement "naturel" n'est pas forcément optimal. Le problème de sa mise en valeur ou de son exploitation par l'homme est de bien quantifier ses capacités dynamiques d'absorption des changements dans une optique à très long terme.

D'ici à l'an 2000, la zone littorale définie provisoirement comme englobant le plateau continental, connaîtra des développements dans de nombreux domaines scientifiques débouchant sur une meilleure connaissance de l'environnement ou sur des aménagements et de nouvelles formes d'exploitation. Pêle-mêle, on peut citer : l'aménagement matériel du littoral (génie côtier) en comprenant les ouvrages de protection et ceux d'exploitation (émissaires, ouvrages offshore) ; des levés géomorphologiques complets du plateau continental ; une connaissance météo-océanographique du plateau continental, essentiellement basée sur des mesures de télédétection de longue durée, répondant à la fois aux besoins de la prédiction météo-marine et de la climatologie (statistique des états de mer, variations du niveau moyen) ; une meilleure gestion des ressources marines vivantes grâce à la modélisation des écosystèmes, la surveillance continue de la pollution basée sur les progrès en écotoxicologie ; une meilleure compréhension de la circulation des substances dans la mer entre les réservoirs de matières minérales et organiques (cycles et flux biogéochimiques) pour prévoir les changements naturels ou induits par l'homme ; l'aquaculture des micro et macro flores et faunes (y compris les élevages en pleine eau, l'étude des maladies et de leur traitement, etc) ; le développement des biotechnologies marines, avec les applications aux algues du génie génétique, la mise au point de produits pharmaceutiques d'origine marine, celle de vaccins pour les espèces aquacoles.

Sans entrer dans un détail qui n'a pas sa place dans un chapitre introductif, il est possible de faire déjà quelques recommandations très générales :

* **Le plateau continental et les eaux surjacentes**, objet de la présente enquête, forment un ensemble posant des problèmes scientifiques et techniques qui lui sont propres. Mais il est aussi un espace de transition entre le continent et l'océan qui oblige à le considérer comme une limite dans le programme international "Géosphère-Biosphère". Il est caractérisé, sur le plan scientifique, par un grand nombre d'études ponctuelles d'emprises géographiques limitées et discontinues. Il devient urgent (pour la zone littorale métropolitaine) d'en établir une représentation (dynamique quand cela est nécessaire) pour les paramètres principaux régissant l'environnement (météo-océanographie, circulation, bathymétrie et géomorphologie, sédimentologie, benthos, production primaire, physico-chimie, polluants, etc). Cette information de base, entretenue et disponible sur des supports informatiques (visualisation) servira à l'établissement d'une première génération de modèles sur les processus fondamentaux (hydrodynamique, production de matière, bioconcentration, sources et réservoirs de matière organique et polluants, etc).

* L'ouverture prochaine du Grand Marché et le démarrage de nombreux programmes communautaires, scientifiques et techniques, intéressant directement ou indirectement la zone littorale (MAST, EUROMAR, STEP, EPOCH) offrent des opportunités, par des collaborations à l'échelle européenne, de mettre en commun des connaissances de base et des outils informatiques pour les exploiter, ainsi que de développer un partenariat fondé sur la compétence et la pluridisciplinarité.

* Le lancement prochain de satellites d'environnement océanographique aura des conséquences sur la manière d'aborder scientifiquement les problèmes. D'une part, le flux croissant de données devra être maîtrisé par un stockage intelligent asservi aux exigences des "bases de modèles" des processus. D'autre part, on passera d'une vision ponctuelle de l'océan (séries chronologiques en quelques stations) à une observation synoptique à haute fréquence de répétition, c'est-à-dire permettant l'étude des propriétés dynamiques de systèmes complexes par la modélisation numérique. Il reste beaucoup à faire pour promouvoir cette vision dynamique de l'océan, traduite en "base de modèles" calibrés dont l'interconnexion entre disciplines butera encore un certain temps sur les différences parfois considérables des échelles de temps et d'espace des processus fondamentaux.

* La frontière océan-continent est une frontière géographique. C'est aussi, souvent, une frontière administrative, réglementaire et scientifique pour l'échange d'informations. L'océanographe du littoral est souvent dans une situation inconfortable : il étudie dans l'océan des phénomènes qui ont des origines continentales ; la "boîte noire" qui les contient est très complexe et bien fermée. Par ailleurs, le couplage scientifique entre les études sur les eaux douces et les eaux marines est faible alors que les processus fondamentaux en biologie particulièrement, sont souvent analogues. Pour les aspects réglementaires, la coupure entre ce qui se passe dans l'eau et à terre est encore plus nette. Il est urgent, dans l'intérêt général, de rendre l'information plus transparente et plus accessible, et de développer les collaborations scientifiques lorsque cela est utile (biologie et microbiologie, hydrodynamique et géochimie, par exemple).

* Le littoral, défini comme une bande terrestre et maritime où les interactions entre les activités qui s'y déploient sont très fortes, est un espace très limité et donc rare. Les usages de ce milieu, par une population de plus en plus nombreuse, sont souvent conflictuels. Dans ces conditions, le problème du choix de ces activités, de leur importance et de leur localisation optimale, est difficile si l'on veut préserver pour le long terme l'originalité et l'activité économique de la bande côtière. En particulier, le coût des dommages causés à l'environnement y est souvent difficile à évaluer (par exemple, le cas d'un dommage esthétique, souvent lié d'ailleurs à son premier bénéficiaire, le touriste, ou bien celui d'une vasière convertie en zone industrielle d'un port). Pour ce qui concerne directement l'océanographe du littoral, l'intérêt se porte en grande priorité sur une politique de "produits et de procédés propres" à l'échelle nationale et internationale. Même en supposant de grands progrès dans ce domaine (stations d'épuration pour les rejets ponctuels, amélioration "écologique" des rejets diffus, politique raisonnable pour les extractions et immersions) il restera une tâche importante, incombant aux océanographes, pour éclairer les décisions d'aménagement du littoral.

*faute de la
réviser
(en eau)
espace*

*l'océan
fa' local*

* Il devient nécessaire de promouvoir une politique très volontariste en matière d'environnement s'appuyant sur une approche globale des problèmes et bénéficiant de budgets importants. Parmi les thèmes de réflexion sur ce sujet, on peut citer : (1) une sensibilisation intelligente de l'opinion publique ; (2) la promotion d'un partenariat recherche-industrie visant à une information et une meilleure compréhension réciproques ; (3) le développement d'études sur le coût de la réparation des dommages environnementaux (avec comparaison à la source et en aval) ; (4) la création d'une Agence Nationale de protection de l'Environnement (type Etats-Unis) ayant une responsabilité globale, couvrant la recherche, la gestion et le contrôle.

CHAPITRE II

LA ZONE LITTORALE

Il n'existe pas de définition précise de la zone littorale. Nous proposons, avec la grande majorité des océanographes (*) d'englober dans cette expression le plateau et le talus continental ainsi que les eaux surjacentes. En effet, la zone littorale ainsi définie est une entité originale, siège d'interactions énergétiques fortes à ses frontières du large et de la côte, et de phénomènes spécifiques d'un grand intérêt propre et d'une grande importance dans un cadre global. Située à la charnière du continent et de l'océan, la zone littorale est à considérer aux quatre points de vue principaux suivants : (1) c'est au-dessus du plateau continental que se font le plus sentir les apports atmosphériques à l'océan ; (2) la connaissance des flux de matière et d'énergie à sa bordure du large est indispensable à la compréhension globale du système océanique tel qu'il est conçu dans le Programme "Géosphère - Biosphère" ; (3) la zone littorale est une zone à forte activité biologique doublée d'une forte activité humaine ; elle est soumise aux apports et aux pollutions, généralement anthropogéniques, provenant du continent ; (4) le talus continental est souvent une frontière biologique séparant des milieux (nature des fonds, flux terrestres, hydro et thermodynamisme) aux conditions de vie différentes.

D'un point de vue thématique, et sans revenir sur les présentations faites par ailleurs dans ce rapport, nous insisterons, à propos du plateau continental, sur les points suivants :

1°) Le rôle central de la modélisation mathématique en hydrodynamique pour aborder les problèmes d'environnement, où interviennent dans la majorité des cas la connaissance des mouvements des masses d'eau, de l'échelle de la turbulence (créée par le vent ou par le frottement au fond) à celle de la circulation résiduelle. Outil déjà très performant, le modèle doit encore être perfectionné pour répondre aux exigences d'étude de la zone littorale. Dans un domaine voisin, la houle appelle un effort important de recherche (houles aléatoires, superposition houle-courant ; ondes de tempête, déferlement), valorisé par des approches instrumentales nouvelles (radar à vagues, satellite). L'attention doit également être attirée sur l'effort instrumental (notamment en ce qui concerne la mesure fine du niveau moyen) et les moyens navals requis pour une océanographie qui va s'éloigner de la côte.

2°) Le grand retard de la sédimentologie dynamique comparée à l'hydrodynamique. Le passage des lois empiriques à des lois théoriques s'impose pour : (a) l'étude des processus fondamentaux (érosion, transport, dépôt) des sédiments cohésifs ou non, (b) la modélisation dynamique sédimentaire sous l'action combinée du courant, de la houle et du vent. De grands progrès dans la connaissance du devenir à long terme des sédiments du plateau continental sont nécessaires.

Certaines lignes directrices de recherche peuvent, d'ores et déjà, être dégagées pour les années qui viennent :

L'étude des flux de matières particulaires à l'océan et de leur devenir dans l'océan :

De grandes lacunes restent à combler, concernant aussi bien les aspects quantitatifs des flux continentaux vers les océans que les modalités de leur devenir dans l'océan : le comportement hydrodynamique des particules, le rôle des "pellets" du biota dans leur chute, leur stockage et leur expulsion jusqu'au domaine profond, les modifications et les échanges chimiques dans la transition

(*) La tradition des pays d'Europe est d'englober les plateaux continentaux et les mers régionales dans le champ de leurs études d'environnement littoral.

continent-océan. Concernant ce dernier point, la solubilisation d'un grand nombre de substances, métalliques et organiques, initialement sous forme particulaire, se produit dans ces zones de transition.

Le flux des nutriments (C, N, P, Si) et son devenir dans la zone littorale retiendront particulièrement l'attention. Il convient, par exemple :

- de confirmer les résultats provenant de l'analyse des sédiments qui montrent que seulement 1 à 1,5 % de l'azote et du phosphore (dissous + particulaire) apportés par les fleuves atteint l'océan profond ;

- d'étudier les conséquences des apports continentaux utilisés par la chaîne trophique dans la zone littorale et plus précisément celles de l'accroissement en azote et phosphore anthropogénique sur les phénomènes d'eutrophisation ; ce point est plus particulièrement développé dans l'Annexe 1.

L'étude des sédiments à l'interface eau-fond de la mer :

Le comportement hydrodynamique, comme les propriétés physiques de l'interface (morphologie, compacité, les relations avec le néphéloïde surjacent, les conditions de dépôt et de remise en suspension) sont mal connus. De même des études sur les échanges chimiques entre le sédiment et l'eau sont nécessaires pour élucider les bilans entrées/sorties dans divers types d'environnement dynamiques (vitesse de sédimentation et de remaniement), physico-chimiques (position de la limite redox par rapport au fond) et biologiques (bioturbation, microorganismes).

Enfin sous l'angle de la gestion de l'espace marin côtier quatre préoccupations déborderont le 2ème millénaire : (1) le maintien de la qualité des eaux en relation avec les activités humaines sur tout le bassin versant adjacent à la côte ; (2) le maintien de la valeur écologique des zones humides (marais et vasières). On sait que 50 % des vasières et marais littoraux ont disparu ou ont été gravement endommagés depuis 1945, alors que les biologistes estiment que près de 90 % de la richesse biologique marine du littoral s'élabore dans ces zones ; (3) la limitation de l'immersion des déchets et des nuisances occasionnées par l'extraction des granulats ; (4) la prévention et le contrôle de l'évolution du littoral, soit à la suite de perturbations d'origine anthropique, y compris les variations attendues du niveau moyen, soit sous l'influence de facteurs naturels.

Dans une perspective d'exploitation, la zone littorale pose aussi des problèmes d'environnement liés à la répartition des ressources de manière équilibrée entre les différents usagers : pêche, pétrole, extractions, etc. Il reste beaucoup à faire pour jeter les bases d'un droit du littoral (bande côtière et plateau continental) capable de gérer les ressources et de prévenir les abus et d'arbitrer à priori les cas de conflits potentiels.

L'ensemble des considérations ci-dessus est en faveur de la reconnaissance de la zone littorale comme l'objet d'un programme national, ayant une existence propre, éventuellement raccordé au programme international "Géosphère - Biosphère", à l'origine "Global change". Pour cette raison, nous proposons de le désigner sous l'appellation "Coastal Change"^(*), le mot "change" ayant la double signification de changement dans le temps mais aussi de changement dans l'espace de transition entre le continent et l'océan que constitue la zone littorale.

(*) Sous laquelle il a été présenté au Comité scientifique de l'IFREMER à la suggestion du Département "Environnement Littoral" d'IFREMER Brest.

CHAPITRE III

LES QUESTIONS POSEES PAR L'ENVIRONNEMENT LITTORAL EN L'AN 2 000

Prévoir les questions d'environnement littoral qui seront des priorités pour la recherche océanologique en l'an 2 000 relève d'une tâche hasardeuse, tant il est vrai que dans ce domaine, où nous n'avons pas (ou peu) trouvé d'étude prospective, l'**imprévisible** est la règle. Qui en effet aurait pu prévoir la mondialisation des problèmes environnementaux liés à l'utilisation du DDT, des PCB ou plus récemment des CFC, sans parler des accidents pétroliers qui au niveau national ont mobilisé des efforts de recherche, engendré de nouvelles structures (plan POLMAR, création du CEDRE) et donné naissance à l'industrie de la dépollution marine ?

Les sept questions que nous proposons ci-après prennent davantage en considération une **probabilité subjective d'émergence des problèmes**, dont on connaît aujourd'hui les prémices, qu'une vision novatrice du futur. Il est en effet permis de penser que le littoral restera une zone d'activité économique majeure soumise à des aménagements physiques (question 1) et à la pression d'intérêts socio-économiques parfois contradictoires (question 7). Il est vraisemblable que l'on se préoccupera des conséquences induites par le développement urbain et industriel du siècle écoulé et ses apports de toute nature au littoral (questions 2, 3, 4). Si les activités aquacoles aboutissent à concrétiser les espoirs de développement attendu depuis de nombreuses années, il est fort probable que la qualité de l'environnement puisse en être localement affecté (question 5) et dans certains cas la salubrité des produits livrés au consommateur mise en cause (question 6). Cette problématique conduit en outre à proposer deux orientations majeures :

- le **plateau continental comme zone d'intérêt scientifique** dans la mesure où il peut encore constituer une zone de référence,
- la participation aux études environnementales de disciplines actuellement peu ou pas concernées ; il s'agit de la **biologie moléculaire**, de l'**épidémiologie** et de la **socio économie**.

Les principales questions sont :

- 1 - En vue d'appréhender les aspects **physiques** des perturbations anthropiques ou naturelles, comment améliorer la connaissance de la résultante des actions dynamiques de la marée et des courants dus au vent et à la houle sur la circulation hydrodynamique et le transport solide, au large et à la côte ?
- 2 - Quelles sont les conséquences à long terme de l'enrichissement des eaux côtières par les sels nutritifs et les matières organiques dégradables sur l'équilibre des écosystèmes littoraux ?
- 3 - Quel est l'impact sur le plateau continental, d'une part des dystrophies constatées en zone côtière, d'autre part de l'accroissement des apports anthropiques depuis un demi-siècle ?
- 4 - Existe-t-il dans l'environnement aquatique des substances anthropiques, à l'état de traces mais fortement réactives, capables d'induire des dérèglements cellulaires ou génétiques chez des espèces particulièrement sensibles ?

5 – Comment concilier la qualité des eaux littorales avec les nécessités économiques du développement de l'aquaculture de production (a) et de la conchyliculture (b) ?

6 – Quelle est l'influence de la contamination bactérienne, virale et chimique (biotoxines) des produits marins sur la santé des consommateurs ?

7 – Comment formaliser les compétitions sociologiques et économiques sur l'espace littoral ?

CHAPITRE IV

LES GRANDES DISCIPLINES THEMATIQUES

1 - L'hydrodynamique

Les courants marins véhiculent les masses d'eau et leur contenu chimique ou biologique, naturel ou anthropique ; ils sont aussi la cause des mélanges qui s'opèrent au sein de la masse d'eau. Ils sont enfin à l'origine des efforts physiques exercés sur les fonds et les structures immobiles. Ils occupent donc une place de premier plan dans l'ensemble des paramètres d'environnement marin. Heureusement, l'hydrodynamique possède une confortable avance sur les autres disciplines dont dépend l'environnement marin et permet, grâce aux équations de Navier-Stokes, de décrire et prédire tous les mouvements marins ainsi que l'évolution des produits dissous dans la masse d'eau. La complexité de la résolution des équations de Navier-Stokes dans le cas général serait sans issue pratique si l'informatique ne venait au secours de l'océanographe hydrodynamicien. Le modèle numérique en hydrodynamique est le seul outil à pouvoir apporter une réponse adaptée à tous les cas. En anticipant quelque peu sur la suite de ce chapitre, on peut énumérer les principaux avantages du modèle numérique sur son concurrent classique, le modèle physique (*) : (1) une plus grande liberté dans le choix de l'emprise du modèle ; (2) une plus grande souplesse d'emploi pour tester la sensibilité aux variations des conditions naturelles et à celles imposées par l'homme ; (3) la possibilité, et à meilleur coût, de prendre en compte l'influence du vent, de la stratification, etc ; (4) la possibilité d'intégrer le modèle écologique au modèle de circulation. Pour toutes ces raisons, **les modèles numériques apparaissent comme la seule voie d'avenir permettant de prendre en compte dans leur ensemble les interactions complexes des processus océaniques. Il reste à en tirer les conséquences sur la formation et le recrutement de spécialistes en modèles numériques en hydrodynamique.**

La souplesse du modèle numérique permet de choisir la meilleure solution en coût-efficacité. Par exemple, on choisira volontiers le modèle courantologique unidimensionnel en milieu fluvial alors que le modèle bidimensionnel (horizontal), peu onéreux, apportera des résultats précis chaque fois que l'on peut moyenner le courant sur toute la profondeur. Les modèles tridimensionnels constituent le "haut de gamme" ; ils conviennent particulièrement aux cas dans lesquels on ne peut négliger les gradients de densité (sous l'effet de variations de température ou de salinité dans le profil vertical) et de vitesse dû au vent ou à l'écoulement d'eaux douces sur des eaux salées (estuaires). Dans ce cas, le modèle calculera aussi la composante verticale du courant, hors d'atteinte par la mesure directe.

Dans tous les cas le modèle calcule, en tout point et à tout instant, le courant, le niveau d'eau, et la concentration en substance dissoute sous les conditions suivantes : (1) connaître les profondeurs dans tout le domaine ; (2) connaître les flux d'eau et d'éléments dissous déversés dans le domaine d'emprise du modèle par les fleuves, les émissaires, etc ; (3) connaître à chaque instant les hauteurs d'eau et les concentrations sur le périmètre étudié. La dernière condition est difficile à réaliser sur la limite du modèle du côté du large. C'est la raison pour laquelle on recourt à la technique des modèles emboîtés dans laquelle le modèle de plus grande emprise utilise les données de marée disponibles au large et les modèles suivant la marée calculée dans le modèle précédent. On arrive ainsi à descendre jusqu'à l'échelle d'une baie ou d'un bassin portuaire.

(*) Il n'est pas question, pour autant, de nier l'intérêt des modèles physiques pour l'étude de processus fondamentaux grâce à des équipements spéciaux (soufflerie, "plaque tournante").

La marée dans l'océan profond, qui intègre les effets de la rotation de la terre (force de Coriolis), du relief sous-marin et de la stratification, exige des modèles tridimensionnels (à une vingtaine de couches) qui ne peuvent être traités que sur de grands ordinateurs (type CRAY 2). Les modèles océaniques apportent les conditions aux limites de ceux des plateaux continentaux, lesquels sont intermédiaires entre les modèles du large et les modèles côtiers. La circulation océanique sur les plateaux continentaux et jusqu'à la côte est variable et complexe (upwellings, fronts, stratification, méandres, tourbillons, effet forçant du vent et autres processus baroclines, etc). Elle constitue un maillon essentiel dans les processus d'échange avec l'océan profond et d'apports continentaux à l'océan. **La modélisation de la circulation sur le plateau continental**, à cause de la discontinuité de relief à sa limite du large et des interactions non linéaires des variables forçantes (marée, vent, houle) **n'a pas encore de réponse définitive**. Il existe, à l'heure actuelle, une lacune entre les modèles globaux (marée et courants généraux) et les modèles côtiers. **La perspective d'un programme du type "Coastal Change" invite à maîtriser des modèles de circulation pour l'ensemble du plateau continental (et du talus)**. Cet objectif suppose un **renforcement substantiel de recueil de données météo-océanographiques *in situ*** et synoptiques (satellites). Dans une optique plus restreinte, on constate que les modèles côtiers se contentent le plus souvent, pour la limite du large, d'introduire les données disponibles. Dans la pratique des modèles emboîtés, cette limite est repoussée suffisamment loin pour minimiser les effets d'une erreur sur les niveaux. **Il serait opportun d'engager une réflexion sur l'optimisation des limites et du recueil des données pour l'établissement de modèles de circulation sur le plateau continental.**

Le cas de petites échelles de temps et d'espace (quelques heures et quelques kilomètres), comme celui du champ proche d'un rejet, est actuellement très correctement représenté par la modélisation. La qualité du modèle sera étroitement fonction de celle du modèle de turbulence (équation de conservation du polluant) et d'évolution du polluant (thermique, chimique, bactériologique, etc). A côté du modèle lagrangien, le modèle physique, et même parfois analytique, pourra convenir.

Le cas des grandes échelles de temps et d'espace (quelques jours à plusieurs semaines ou plusieurs mois, de la dizaine à plusieurs centaines de kilomètres) est beaucoup plus délicat et nécessite quelques explications sur l'influence de la marée, du vent et des écarts de densité sur les courants.

La marée est heureusement une phénomène déterministe (une prédiction exacte est toutefois basée sur une série de mesures de longue durée), et barotrope, c'est-à-dire **affectant de manière uniforme toute la tranche d'eau** ; de plus, elle induit une forte turbulence qui tend à homogénéiser les profils verticaux de vitesse et de concentration. **Elle se prête donc bien à l'établissement de modèles bidimensionnels (en plan horizontal) dans les zones où les courants de marée sont dominants** (cas de la Manche par exemple). Le suivi d'une particule d'eau, de marée en marée, sur un nombre suffisant de cycles de marée (morte eau - vive eau) fait ressortir une trajectoire moyenne correspondant à la **circulation résiduelle lagrangienne**. Les dérives résiduelles sont en moyenne de deux ordres de grandeur plus faibles que les courants de marée ; elles exigent donc un maillage précis (recueil de données) et serré (grille de calcul). La circulation résiduelle de marée est d'un grand intérêt pour les études d'environnement. Elle fait apparaître, lorsque la marée est le phénomène dominant, les dérives générales des masses d'eau (écoulement de la Manche vers la Mer du Nord par exemple) et les zones de confinement (anneaux fermés de circulation).

Les courants dus au vent ont une répartition verticale non uniforme à cause de la force de Coriolis et du frottement sur le fond dans les mers peu profondes. Près du rivage, la composante de la vitesse d'entraînement des masses d'eau qui est annulée est à l'origine de mouvements verticaux et de courants de pente qui se superposent à la dérive initiale. Lors de forts coups de vent au large, il y a apparition d'un upwelling avec remontée des eaux froides en surface. La courantologie est donc caractérisée par un aspect tridimensionnel et aléatoire (à cause des "caprices" de la météorologie). C'est pourquoi **la circulation due au vent et le devenir correspondant des contaminants font appel à des modèles tridimensionnels** qui s'attachent spécialement à des situations type comme, par exemple, les vents

dominants. Il est à remarquer que les dérives dues au vent peuvent être de même ordre de grandeur que celles dues à la marée.

Un écart de salinité de 7‰ ou un écart de température de 25°C provoque un écart de densité relative de 0,5 % ; dans les deux cas apparaît une stratification accompagnée de courants verticaux. Par exemple, dans un estuaire, le gradient de salinité se traduit par une pression des eaux plus importante à l'aval qu'à l'amont et donc une circulation résiduelle vers l'aval en surface et vers l'amont au fond, dont la compensation est réglée par des courants verticaux. Les modèles bidimensionnels horizontaux, qui intègrent les courants sur la verticale, ne conviennent donc pas quand il y a stratification. **Dans les eaux côtières, où la stratification haline et/ou thermique est fréquente, le modèle tridimensionnel de circulation s'imposera de plus en plus à l'avenir, dans les cas où les courants de densité sont du même ordre de grandeur que les courants résiduels de marée.**

La dispersion d'un élément dissous conservatif est réglée facilement par la résolution de l'équation d'"advection-dispersion". Dans le cas général cependant, la complexité des processus hydrosédimentaires (particulaire, dissous) et géochimiques (dans le cas des métaux trace par exemple) ne permet pas d'établir une loi d'évolution du polluant sans études approfondies. A titre d'approximation, lorsqu'une dégradation, consommation ou disparition sont invoquées, on utilise souvent une loi de premier ordre pour la concentration, du type $\delta C/\delta t = kc$ qui, en dehors de tout processus d'"advection - dispersion", se traduit par une décroissance exponentielle en fonction du temps^(*).

En résumé, les modèles bidimensionnels lagrangiens de circulation sont peu coûteux et faciles d'emploi ; ils conviennent bien aux cas où la marée est le phénomène dominant. Dans les autres cas, et notamment en présence de stratification de densité ou de vent, le modèle tridimensionnel s'impose, malgré son coût plus élevé et les difficultés de sa mise en oeuvre.

La couverture systématique de la zone littorale en modèles côtiers de circulation et en modèles généraux apportera une aide précieuse à la gestion et une information essentielle sur le devenir à long terme des polluants. Les relations entre les formes dissoutes et particulaires de certains contaminants invitent à un rapprochement entre les équipes spécialisées dans les modèles hydrodynamiques et celles qui le sont en dynamique sédimentaire, notamment lorsqu'il s'agit du devenir à long terme.

2 - La sédimentologie (les processus de base et les modèles)

Les processus de base

La dynamique sédimentaire accuse un grand retard sur l'hydrodynamique. De grands progrès restent à accomplir pour passer des lois empiriques à des lois théoriques.

Cependant dans le domaine des sédiments non cohésifs le modèle réduit et les mesures en nature ont permis d'établir des lois empiriques, - satisfaisantes en première approximation pour l'ingénieur -, concernant la remise en suspension des sables, les mouvements dans le profil perpendiculaire à la côte, le transit littoral, et ce y compris sous l'action simultanée des courants et des houles et même en tenant compte du micro-relief du fond.

(*) Ainsi, ce type de loi est utilisé pour décrire la mortalité des bactéries. La loi de décroissance prend dans ce cas la forme $N = N_0 e^{-2,3t/T90}$ où N et N_0 sont les nombres résiduel et initial de germes par unité de volume d'eau, t le temps de séjour et $T90$ le temps nécessaire pour diviser par 10 le nombre initial de germes.

Les sédiments cohésifs (vases) sont abondants dans les estuaires et les zones abritées. Ils véhiculent volontiers les polluants et jouent donc un rôle important dans l'environnement littoral. Le comportement des matériaux cohésifs a fait l'objet d'importantes recherches : étude des phénomènes de floculation, des vitesses de chute, du tassement des dépôts, des propriétés rhéologiques et de leur variation au cours du temps, de l'action de la houle et des courants, des écoulements gravitaires par glissement, etc. Il reste cependant encore beaucoup à faire pour dégager des lois générales à partir des variables ad hoc caractérisant le matériau. On comprend facilement que **la complexité des actions hydrodynamiques turbulentes aussi bien que celle de la rhéologie des sédiments cohésifs**, – qui se comportent tantôt comme des fluides visqueux lorsqu'ils sont peu concentrés, tantôt de façon plus complexe (fluides non newtonien) lorsqu'ils sont concentrés –, **rend toute approche théorique des processus d'érosion encore très incertaine**. De plus, l'expérimentation, abordable en laboratoire, devient très délicate en nature. Or les études en laboratoire, faites le plus souvent sur des sédiments remaniés, ne sont pas entièrement fiables. Il faut envisager de les poursuivre sur des lits de vase réalistes, ou plutôt même de procéder à des expérimentations en "canal in situ", comme cela se pratique à l'étranger.

Les interactions sédimentaires, géochimiques, biologiques et microbiologiques sont insuffisamment connues. Les progrès dans ce domaine sont liés au rapprochement de sédimentologues, géomorphologues, hydrauliciens, chimistes et biologistes. Le champ des études à poursuivre est vaste. A titre d'exemples on peut citer : la bioturbation ; les modifications structurelles introduites par les bactéries, en rapport avec la dynamique sédimentaire ; la colonisation des fonds par les végétaux ; les échanges entre les compartiments dissous et particulaire par l'eau interstitielle ; les relations du fond (sédimentologie, géomorphologie, bathymétrie, courants) avec les populations benthiques.

L'action des houles de tempête sur les fonds est encore mal connue, notamment à sa limite du large. Il s'agit bien d'un processus mais **l'étude de ce problème doit englober celle de séries chronologiques de très longue durée ainsi que l'interprétation des radiochronologies des vasières du large**. Elle ne peut se concevoir qu'avec une instrumentation adaptée à la mesure des houles au large et de la dynamique sédimentaire.

L'action directe du vent sur les transports de sable, a fait l'objet de nombreuses études en France et à l'étranger, qui permettent de quantifier aujourd'hui, avec une précision raisonnable pour l'ingénieur, l'importance des transports éoliens.

Par contre, l'action indirecte du vent sur les sédiments cohésifs se trouvant sous une mince couche d'eau (cas fréquent en conchyliculture) est insuffisamment connue. Elle pose les problèmes de calcul du clapot en fonction du vent local, de la fluidification des vases par le clapot.

Les courants de turbidité sont un processus hydro-sédimentaire typique des talus continentaux. Leurs causes, liées à la géotechnique et à la mécanique des sols sous-consolidés, sont encore mal connues.

Les modèles de transport

*** Les modèles physiques**

Les modèles physiques ont probablement atteint le meilleur niveau de précision dont ils sont capables (aussi bien d'ailleurs en hydrodynamique qu'en dynamique sédimentaire). Parmi les perfectionnements dont ils ont profité ces dernières années, on peut citer : la représentation des houles aléatoires ainsi que des séquences enchaînées de tempête suivie de retour au calme ; le respect du rapport charriage/suspension pour les sédiments non cohésifs grâce à un spectre granulométrique approprié ; une représentation du comportement des sédiments cohésifs conforme qualitativement aux phénomènes

connus (floculation, tassement, rhéologie, reprise par les courants, etc) ; une amélioration du rendement des équipements grâce à l'automatisation des mesures et de leur traitement. Il demeure que le modèle physique de qualité relève de l'expérience et de la minutie des équipes qui le mettent en oeuvre et qu'ils sont exigeants en mesures en nature (y compris naturellement les longues séries chronologiques) des phénomènes représentés. Les adeptes des modèles numériques se montrent en outre critiques en se fondant sur l'impossibilité de respecter les règles de similitude à la fois pour le milieu liquide et pour le milieu solide. Par son côté spectaculaire, le modèle physique reste très apprécié des décideurs pour les petites échelles (site portuaire ou nucléaire par exemple).

* Les modèles mathématiques

Mis à part le fait noté plus haut de l'absence de lois théoriques complètes sur le comportement dynamique des sédiments cohésifs ou non, il est à remarquer que les modèles sédimentaires ont besoin d'une connaissance très fine de la circulation parce que les bilans érosion/dépôt sont très sensibles aux écarts de vitesse.

Les modèles les plus simples de transport de sable sont monocouches (ils ne tiennent donc pas compte des variations de densité et de vitesse sur la verticale dans la tranche d'eau) ; ils se chargent par contre des zones couvertes et découvertes par la marée. Ils ne font pas état non plus des effets du vent et de la houle. Le recours à la technique des éléments finis a permis d'introduire des maillages souples, très adaptés à la finesse souhaitable de représentation du relief sous-marin. **Les modèles bidimensionnels de transport de sable de l'avenir devront intégrer : (1) le calcul complet de la houle (réfraction, diffraction, réflexion), (2) des modèles de couche limite, sous l'action de la houle et/ou des courants, (3) une fonction de forme pour la répartition verticale des sédiments, (4) une granulométrie multiclassées du sédiment, (5) l'action des courants dus à la marée, à la houle, au vent.**

Les modèles de transport des sédiments cohésifs sont d'un grand intérêt pour l'environnement, compte tenu du rôle du matériel particulaire comme vecteur des polluants. Les modèles existants sont monocouches et ne prennent en compte que les courants de marée. **Les modèles de transport des sédiments cohésifs devront, à l'avenir, être tridimensionnels pour tenir compte du gradient de concentration des matières en suspension dans la tranche d'eau et des effets de stratification de densité. Ils devront, comme les modèles de transport de sable, intégrer les actions des courants dus à la marée, à la houle et au vent.**

Les recommandations ci-dessus pourraient être complétées par les suivantes :

1°) les progrès indispensables à une meilleure connaissance du comportement de la phase solide (dans la tranche d'eau et au fond) impliquent le rapprochement des hydrodynamiciens, sédimentologues, géologues, géomorphologues, mécaniciens des sols, géo et biochimistes, microbiologistes et informaticiens. La sélection à l'échelle européenne d'un ou plusieurs sites test, doté(s) de puissants moyens instrumentaux, serait la bienvenue ;

2°) de même que la circulation résiduelle hydrodynamique est fondamentale pour l'étude du devenir à long terme de la phase dissoute, de même, **la circulation résiduelle de la phase particulaire est d'une grande importance pour l'étude de l'accumulation des polluants et de leurs effets possibles sur la chaîne trophique.** Il s'agit dans ce dernier cas du très long terme.

3 - La modélisation des écosystèmes

La pression humaine sur le littoral s'est traduite par des pollutions et une surexploitation des ressources vivantes, qui ont entraîné d'importantes modifications des écosystèmes. L'exemple des estuaires est typique à cet égard : lieu de stockage et d'épuration pour les sédiments fluviaux et les polluants (en faible quantité) à l'origine, espace privilégié pour les frayères et les nourriceries, ils sont devenus après aménagement une source de polluants pour l'embouchure et les zones plus au large. **Il est temps de comprendre les conséquences de cette pression humaine sur le littoral, sur les écosystèmes, et d'apprendre à gérer de façon optimale les changements intervenus dans ce domaine.** En étroite relation avec les modèles représentant les phénomènes physiques, les modèles d'écosystèmes devraient aborder, dans un cadre pluridisciplinaire, l'ensemble hiérarchique des processus écologiques. La tâche est plus complexe que pour les eaux du grand large. Les changements observés dans les écosystèmes littoraux sont dominés par les flux entrant et sortant aux limites du domaine considéré. Il faut également tenir compte, naturellement, des structures verticales (fronts, thermo et haloclines) et quantifier les flux dans la colonne eau-sédiment (dégradation de la matière détritique, dissolution des carbonates et silicates, largage des sels nutritifs) pour élaborer des modèles. La modélisation d'écosystèmes apparaîtra de plus en plus comme une tâche essentielle à la gestion des ressources marines. En plus des difficultés spécifiques mentionnées ci-dessus, elle soulève des problèmes fondamentaux importants, tels que : la maîtrise des processus de production primaire ; les relations entre les systèmes benthique et pélagique ; les relations nutriments-circulation-processus biologiques, le rôle des micro-organismes dans les cycles biogéochimiques.

La complexité des phénomènes à représenter fait inéluctablement appel aujourd'hui au modèle : (1) pour comprendre leur dynamique ; (2) pour prévoir l'impact de modifications de l'environnement ; (3) pour optimiser la production biologique d'écosystèmes exploités :

La dynamique de systèmes complexes :

Le concept de réseau trophique intègre deux types de complexité : l'une est structurale et tient à la richesse chimique et biologique des écosystèmes, l'autre est dynamique et tient à la gamme étendue des échelles de temps des phénomènes à représenter et à leurs interactions non linéaires. On aboutit ainsi à des constructions qui dépassent rapidement la simple réflexion logique. **La compréhension globale des propriétés de l'écosystème ne peut alors s'appuyer que sur une formalisation mathématique.** Le modèle mathématique offre le grand avantage de clarifier le langage et les hypothèses de disciplines cloisonnées, de distinguer clairement les variables d'état, les variables forçantes, d'explicitier les interactions au sein des processus, de préciser le cadre physico-dynamique, de fixer les constantes numériques (paramètres) utilisées ainsi que les conditions aux limites.

Il mettra rapidement en évidence les lacunes de la connaissance (le taux de mortalité dans un maillon de la chaîne trophique, par exemple) **ou de l'observation** (les conditions aux limites, par exemple). **Il sera aussi un outil précieux de test d'hypothèses et de sensibilité** et donc d'une aide importante à la réflexion scientifique.

Prévoir l'impact de modifications de l'environnement :

Outil de recherche fondamentale très efficace, **le modèle est aussi le seul outil à pouvoir proposer des réponses quantitatives aux prévisions d'impact de modifications variées de l'environnement**, qu'il s'agisse de retour à une situation antérieure, ou d'aggravation d'une situation constatée, ou encore du changement d'une structure existante. On attachera dans tous les cas plus d'importance aux tendances qu'aux valeurs numériques issues du modèle.

Optimiser la production biologique d'écosystèmes exploités :

Le modèle mathématique est l'instrument de choix pour rechercher les valeurs des variables de contrôle du système qui maximisent une production biologique utilisable par l'homme. On connaît l'exemple de la théorie mathématique des pêches donnant le rendement par recrue d'un stock de poissons exploités en fonction de l'âge à la première capture et de l'effort de pêche. Un autre exemple est donné par le modèle en cours concernant le "Bassin de Marennes-Oléron" qui doit déterminer le stock d'huîtres en élevage qui assure la meilleure production ostréicole, eu égard aux caractéristiques hydrodynamiques du site et aux apports d'azote par la Charente.

La conviction de l'intérêt du modèle mathématique étant acquise, la question se pose de savoir "comment modéliser". Les propositions qui se dégagent de l'examen de la situation consistent : (1) à généraliser l'outil modèle mathématique ; (2) à développer des logiciels conviviaux ; (3) à modifier en conséquence la formation des océanographes.

Le modèle mathématique étant la seule voie pour aborder les problèmes des écosystèmes, il convient de le banaliser. Pour s'en convaincre, il suffirait souvent d'inverser la chronologie conventionnelle mesures puis modèle afin de percevoir dès le départ les données nécessaires à l'élaboration du modèle. Par ailleurs, la solution recherchée étant rarement accessible sous forme analytique, le passage par l'informatisation est pratiquement toujours obligatoire. Il est donc souhaitable de développer des logiciels très conviviaux et par conséquent très élaborés. **On peut concevoir aujourd'hui des outils interactifs de "modélisation assistée par ordinateur" (M.A.O.),** comme sont, par exemple, les logiciels STELLA et ELISE (développé par IFREMER). Il est intéressant d'attirer l'attention au passage sur l'influence qu'exerceront dorénavant les modèles sur les bases de données. Sauf à sacrifier une partie de l'information recueillie **les nouvelles bases de données devraient être conçues en fonction de leur exploitation par les modèles, ce qui amène à proposer l'idée d'une "base de modèles" plutôt qu'une base de données.** Enfin, il faut souligner l'insuffisance de la formation mathématique et informatique des jeunes océanographes biologistes en France. **Les biologistes marins d'aujourd'hui ont un besoin urgent de formation mathématique à l'ensemble des processus dynamiques dont les écosystèmes sont le siège.** Il convient à cet égard de remettre la statistique à sa juste place, celle d'un outil qui ignore les phénomènes sous-jacents.

Les développements ci-dessus n'auraient pas leur place aux Etats-Unis ou dans les pays maritimes de l'Europe du Nord, où les modèles d'écosystèmes sont d'un usage courant depuis plus de vingt ans. Mais en France, il existe un besoin urgent de formation et de recrutement d'océanographes biologistes rompus aux techniques modernes de la modélisation des écosystèmes.

En conclusion, **la modélisation apparaît comme la voie nécessaire pour progresser dans la compréhension de la dynamique des écosystèmes, dans la prévision de l'impact qu'ils subissent en cas de modification de l'environnement, dans l'optimisation de leur production biologique, s'il s'agit de systèmes exploités.** L'effort de modélisation pourrait être guidé par les orientations suivantes : (1) la banalisation de l'outil modèle mathématique ; (2) le développement de logiciels conviviaux très élaborés, qui réagiront sur la conception des bases de données, (3) **la formation et le recrutement d'océanographes biologistes rompus aux techniques modernes de modélisation d'écosystèmes.**

4 - La géochimie

C'est souvent à l'occasion des déversements accidentels et massifs de produits chimiques dans l'environnement que l'on se préoccupe de faire le bilan des connaissances sur leur comportement géochimique, c'est-à-dire leur devenir et leur répartition dans les différents compartiments de l'environnement. Force est de constater que pour nombre de substances nos connaissances en géochimie marine sont insuffisantes pour prédire les cinétiques d'évolution.

Cependant, au cours de la dernière décennie, de considérables progrès ont été réalisés par les géochimistes marins qui ont abouti entre autre :

- au développement de techniques analytiques de trace pour les métaux et micropolluants organiques,
- à des intercalibrations multiples sur de nombreux polluants dans différentes matrices : eau, sédiment, tissus animaux,
- à la mise en évidence de mécanismes d'échange des éléments métalliques et substances organiques entre phase dissoute et particulaire et entre le sédiment et la colonne d'eau.

Ces recherches, appuyées par d'autres disciplines telles que la microbiologie ou la biochimie, ont permis de considérables progrès dans la compréhension des cycles biogéochimiques de certains éléments (mercure, cadmium) ou substances organiques (organochlorés, PCB).

Quelques modèles ont été développés pour faciliter la compréhension des mécanismes qui agissent sur le comportement des toxiques dans l'environnement littoral. Toutefois, des outils plus spécifiques sont indispensables pour déterminer et prédire la persistance à long terme et les transformations physiques, chimiques et biologiques des toxiques, à la fois dans l'espace et le temps.

Les recherches qu'il apparaît nécessaire de développer en priorité concernent trois thèmes principaux :

1- **Mécanismes de transport physique** ; ils conditionnent la répartition des toxiques dans l'environnement littoral et à terme leur impact sur les écosystèmes,

2- **Mécanismes chimiques de transformation** ; les réactions de complexation, d'oxydation, d'hydrolyse et de photolyse modifient la structure moléculaire des polluants suivant des cinétiques qu'il conviendrait de préciser ; les facteurs environnementaux qui agissent sur ces cinétiques doivent être élucidés.

3- **Mécanismes biologiques de transformation** ; dégradation microbiologique et métabolisation doivent être étudiées plus en détail et en particulier jusqu'à la phase ultime de dégradation des molécules organiques ; les recherches peuvent par ailleurs avoir des applications dans le domaine des biotechnologies soit pour le traitement d'eaux usées soit pour le développement de nouveaux procédés de production de substances chimiques.

L'intégration de ces trois thèmes de recherche devrait avoir pour perspective l'élaboration de modèles de comportement des toxiques, prenant en compte la plupart des mécanismes qui régissent leur devenir dans l'environnement.

5 – La microbiologie

Les problèmes d'ordre microbiologique qui se posent en zone littorale concernent essentiellement la consommation des coquillages ; le risque sanitaire lié à la baignade pouvant être considéré comme relativement mineur. Face à ces problèmes, la politique nationale a toujours été de maintenir une qualité bactériologique des eaux conchylicoles par épuration poussée des rejets urbains, plutôt que de procéder à la décontamination des coquillages par séjour prolongé dans les eaux aseptisées.

Comment s'apprécie la pollution fécale ?

Elle se fait actuellement à l'aide de normes basées sur la présence plus ou moins importante de coliformes et streptocoques fécaux, appelés "germes tests de contamination fécale". Ces bactéries se trouvent en très grande quantité dans l'intestin de l'homme et des animaux à sang chaud. Leur présence dans les eaux ou les coquillages est signe d'une contamination généralement introduite par des rejets urbains ou d'élevages agricoles. L'appréciation du risque sanitaire repose sur l'hypothèse selon laquelle la présence des germes tests (non pathogènes pour l'homme) peut être indicatrice de la présence d'autres microorganismes, également d'origine fécale, mais réellement pathogènes. Ces derniers, peuvent être responsables, par exemple, de gastro-entérites, d'infections des voies respiratoires et urinaires, d'hépatites

L'établissement de normes de consommabilité des coquillages basées sur les germes tests s'appuie sur les connaissances empiriques que les bactériologistes ont acquises durant des années d'observations. En fait, il n'existe pas d'étude épidémiologique conséquente permettant de corrélérer un niveau de contamination à un risque pathologique pour le consommateur. De plus, les recherches réalisées au cours de ces quinze dernières années ont mis en évidence les limites de fiabilité de l'hypothèse de départ :

- les méthodes de dénombrement sur milieu de culture donnent des résultats souvent très différents d'un laboratoire à l'autre et contredits par des méthodes de biologie moléculaire (anticorps monoclonaux – sondes nucléiques) qui décèlent des microorganismes en état de dormance non révélés par les techniques de culture,

- il n'existe pas de réelle corrélation entre les coliformes fécaux et la présence de bactéries pathogènes (salmonelles) ou de virus (hépatite), qui peuvent être présents dans une eau déclarée salubre en regard des dénombrements de germes tests.

Néanmoins, tant en France qu'à l'étranger, les germes tests servent de base pour établir les normes de consommabilité des coquillages et cartographier les zones insalubres.

Perspectives en microbiologie du milieu littoral

Les microbiologistes pressés par l'urgence se sont d'abord intéressés aux aspects sanitaires mais l'intérêt doit désormais être porté sur l'écosystème microbien littoral dans son ensemble.

En ce qui concerne l'aspect sanitaire, le constat est réalisé : les bactéries pathogènes, en fait la majorité des espèces d'origine terrestre, sont susceptibles de survivre dans le milieu marin littoral dès

lors que celui-ci contient de la matière organique assimilable d'origine terrestre ou marine. Le sédiment particulièrement riche en matière organique est la niche bactérienne préférentielle. **Il est désormais nécessaire d'étudier les conditions de survie des micro-organismes dans les milieux oligotrophes et théoriquement hostiles** : halotolérance, conditions d'assimilation de la matière organique, tolérance aux rayonnements solaires, relations avec les organismes planctoniques et les algues Dans le cadre général de l'aquaculture, il est important de préciser les relations entre micro-organismes et organismes marins, coquillages, poissons, crustacés : conditions de contamination, implantations, élimination.

Les bactéries viables non cultivables représentent une population importante dont on connaît peu de chose. Il faut étudier la physiologie de ces bactéries, connaître leur activité métabolique pour évaluer correctement leurs potentialités : pathogénicité, capacité de biodégradation, bioconversion Le modèle est probablement universel et non pas exclusif du milieu marin. Les interactions entre bactéries de contamination pathogène ou non et bactéries autochtones : satellitisme, transfert génétique, coopération métabolique et catabolique, sont d'un intérêt primordial à l'heure où des bactéries manipulées génétiquement seront utilisées et donc présentes dans l'environnement.

Les bactéries autochtones doivent être l'objet d'études approfondies. Elles jouent un rôle essentiel dans la chaîne trophique et dans les processus de biodégradation. Ces propriétés pourraient être utilisées directement ou indirectement comme modèle dans la mise au point de procédés biotechnologiques : biodégradations, corrosions, bioconversions, productions. L'impact de la flore autochtone sur la capacité de production d'un site aquacole doit aussi attirer l'attention (compétition énergétique, pathogénie).

Ces études microbiologiques doivent être effectuées dans un cadre pluridisciplinaire. Les microbiologistes ressentent le besoin des concours des chimistes, biologistes, sédimentologues, physiciens, modélisateurs et des industriels.

En effet, les techniques utilisées en microbiologie marine ne sont pas exclusives de cette spécialité mais peuvent trouver des applications dans d'autres secteurs en particulier en agro-alimentaire. Dans ces conditions, les industriels s'intéresseront à la mise au point de bioréactifs et d'appareillage : automates, cytométrie, analyse d'images.... Il est essentiel de mettre au point et d'utiliser de nouvelles techniques : anticorps monoclonaux et procédés immunologiques, marqueurs métaboliques, marqueurs de structures.

La biologie moléculaire tient une place essentielle dans le développement de la microbiologie et présente des intérêts multiples ; l'utilisation des sondes DNA ou RNA ribosomal présente un intérêt analytique. Elle permettra de mettre en évidence non seulement telle ou telle espèce bactérienne mais aussi des activités précises : production d'enzymes ou de toxines par exemple. Elle sera particulièrement intéressante en virologie où les mises en évidence de virus sont longues et aléatoires.

L'étude des interactions bactériennes en particulier du transfert génétique, plasmides ADN recombinant passe par l'utilisation de cette technique.

Au-delà de l'analyse, la biologie moléculaire permettrait dans le cadre des biotechnologies d'étudier précisément les supports génétiques des processus présentant un intérêt, voire de les amplifier.

Il est nécessaire que les microbiologistes aillent au-delà de l'écologie classique, c'est-à-dire du constat. Les problèmes ne trouveront des solutions que par l'étude des phénomènes et des mécanismes qui régissent les relations microorganismes/milieu. Certains de ces phénomènes pourraient être l'objet d'applications technologiques.

6 – La biologie moléculaire et l'écotoxicologie marine

La biologie moléculaire, qui est l'étude à l'échelle moléculaire des mécanismes biologiques, a d'abord été développée dans le secteur de la recherche médicale pour élucider le fonctionnement cellulaire et ses dérèglements. Des découvertes aussi fondamentales que la structure en double hélice de l'ADN ou le déchiffrement du code génétique ont ouvert la voie à de formidables progrès qui se sont traduits, par exemple, par le développement du génie génétique. Par sa vision réductionniste des mécanismes vitaux, la biologie moléculaire est une science dont l'universalité s'applique à l'ensemble des êtres vivants, qu'ils appartiennent au règne végétal ou animal ou qu'ils vivent en milieu aquatique ou terrestre. Les connaissances acquises depuis une dizaine d'années ainsi que la mise au point de techniques instrumentales particulièrement performantes permettent d'envisager à court terme un bouleversement des concepts jusqu'alors développés en écotoxicologie et toxicologie marines.

A partir des années 1970 et sous l'impulsion des pollutions pétrolières par naufrage et des craintes liées aux rejets industriels, l'écotoxicologie marine s'était donné pour objectifs d'évaluer les effets des polluants à court et moyen terme ainsi que leur transmission dans les chaînes alimentaires (bioaccumulation). Longtemps considérées comme relevant du domaine appliqué, les recherches ont été essentiellement conduites par un petit nombre d'équipes dispersées et aux moyens limités. Ceci explique pourquoi ce n'est que récemment que le premier test spécifique au milieu marin a été normalisé par l'AFNOR (1984) et que le PIREN a proposé sa première ATP spécialisée dans cette discipline (1985). Depuis, des équipes de chimistes et biochimistes se sont regroupées pour étudier en laboratoire et *in situ* les mécanismes enzymatiques qui conduisent à la biotransformation des polluants, alors que d'autres abordaient les effets des polluants au niveau de multiples maillons trophiques reconstitués dans des microcosmes ou mésocosmes. La majorité de ces recherches sont intégrées au niveau international et des orientations nouvelles apparaissent au plan prédictif avec les modèles de corrélation entre propriétés physiques des molécules et les effets sur les organismes ("Quantitative Structure"- "Activity Relationship").

De l'implication de la biologie moléculaire dans l'évaluation des effets des polluants sur les organismes marins, on peut attendre :

1 – une meilleure connaissance des effets à très long terme de la contamination des eaux littorales, et par conséquent une appréciation prédictive des dérèglements insidieux que l'on peut actuellement constater chez certains individus ou populations – dans ce domaine trois thèmes paraissent devoir être privilégiés dans le futur :

- * étude des relations entre polluants exogènes présents dans l'environnement et substances oncogènes décelées dans les organismes vivants (initialisation des cancers),
- * étude de la variabilité génétique de la sensibilité des organismes aux polluants – ces recherches peuvent être complémentaires de celles développées en biotechnologie particulièrement en ce qui concerne la sélection d'espèces d'élevage résistantes aux maladies,
- * étude des mécanismes moléculaires de production de toxine, et de l'implication des facteurs de milieu dans le déterminisme d'induction de ces mêmes mécanismes.

2 – une meilleure compréhension des mécanismes de biotransformation des polluants qui aboutira à une approche dynamique du concept de bioaccumulation et d'activité toxique, la vision actuelle se limitant trop souvent à l'estimation d'un niveau de stockage de la substance sans prise en compte des cinétiques de métabolisation et de l'effet des métabolites.

3 – La généralisation de tests biochimiques faisant appel à l'immunochimie ("Enzyme Linked Immuno sorbent Assay"), à la recombinaison de l'ADN (Sondes nucléiques, "Polymerase Chain Reaction") et du développement d'automates facilitant la recherche des effets génétiques (mutagénèse) sur les organismes marins.

Ces recherches sont indispensables pour passer de la vision des effets globaux à court terme sur les individus et les populations à une approche des effets à long terme sur les mécanismes cellulaires. L'incidence des connaissances qui en seront déduites sont prévisibles à la fois sur le plan de la réglementation des substances chimiques et de la stratégie de surveillance des effets des polluants dans l'environnement.

Immunochimie : chimie utilisant les réactions anticorps – antigènes.

Mutagénèse : modification des séquences d'ADN ayant des implications métaboliques ou non.

Oncogènes : gène pouvant être intégré dans un génome hôte et capable de modifier le comportement normal des cellules hôtes (promotion des tumeurs).

P.C.R. : réaction d'amplification des gènes permettant de les détecter plus aisément.

Sondes nucléiques : séquence d'ADN permettant de localiser des gènes ou des séquences complémentaires dans des cellules ou des extraits cellulaires.

7 – La surveillance de la contamination et des effets

Les opérations de surveillance consistent à effectuer des mesures répétées selon une maille spatio-temporelle préalablement définie et dans le but de réaliser des séries chronologiques d'observations. La surveillance se différencie des opérations de contrôle qui visent à vérifier l'adéquation à des normes de qualité établies en fonction d'usages précis (baignade, consommation...).

Les programmes de surveillance de la qualité des eaux littorales ont d'abord été réalisés au niveau national puis coordonnés à l'échelle internationale, soit par des Agences spécialisées : COI, PNUE, soit par des structures intergouvernementales issues de Conventions régionales mises en place pour la lutte contre les pollutions marines : Conventions d'Oslo, de Paris, d'Helsinki, de Londres, protocole de Barcelone ... L'intégration internationale des réseaux de surveillance a contribué à :

- améliorer la qualité des mesures par un effort considérable d'intercalibration des méthodes et de validation des données, en vue d'assurer l'intercomparaison des résultats acquis par différents laboratoires,
- faciliter l'évaluation des niveaux de pollution sur une aire géographique ou un linéaire côtier le plus étendu possible, donnant une vision à l'échelle d'une mer (Baltique, Mer-du-Nord, Méditerranée) des zones particulièrement contaminées.

La concertation internationale a permis de clarifier les objectifs de la surveillance et de retenir pour chacun d'eux une stratégie d'échantillonnage et d'interprétation des données unanimement reconnues par la communauté scientifique.

C'est ainsi que les conventions d'Oslo et de Paris ont retenu cinq objectifs :

- 1 – Protection de la santé humaine ; les mesures réalisées permettent d'établir la consommabilité des poissons ou coquillages en regard de normes de consommation. Bien que ne relevant pas des conventions les réseaux de surveillance des dinoflagellés toxiques procèdent de cette même problématique.
- 2 – Etablissement des niveaux de présence des contaminants dans des zones peu ou pas échantillonnées ; on utilise généralement des organismes vivants comme témoin de la pollution des eaux par les substances bioaccumulables.
- 3 – Evaluation des tendances d'évolution de la contamination ; l'utilisation de tests statistiques permet de définir, à partir d'une série chronologique courte, si la contamination est croissante, stable ou décroissante ; de telles indications sont fort utiles, par exemple, pour anticiper les mesures (réglementaires ou techniques) qui permettent de maintenir les pollutions à un niveau jugé acceptable.
- 4 – Mesures des effets biologiques ; de façon à déterminer si la pollution existante est source de trouble ou non pour les organismes vivants.
- 5 – Vérification des résultats des mesures réglementaires pour réduire les apports polluants en milieu littoral.

Le Réseau National d'Observation (RNO) : son évolution

Créé en 1973 par le Ministère de l'Environnement et confié pour coordination au CNEXO, les objectifs du RNO visaient dans un premier temps à établir les niveaux de contamination des eaux littorales et à servir d'alerte auprès des Pouvoirs Publics pour signaler les zones particulièrement critiques.

De 1974 à 1978 la surveillance était presque exclusivement consacrée aux paramètres généraux de la qualité des eaux : oxygène dissous, sels nutritifs, richesse en chlorophylle et phéopigments. A partir de 1979 les polluants rémanents (PAH, organochlorés, métaux) ont été recherchés dans les mollusques, les poissons et les sédiments. Les résultats de contamination des mollusques ont rapidement mis en évidence des zones à teneurs anormalement élevées : cadmium dans l'estuaire de la Gironde, PCB en Baie de Seine, DDT plus élevé dans les zones au sud de la Loire ... L'exploitation statistique des données a permis d'établir certaines tendances d'évolution telles que l'accroissement des niveaux en sels nutritifs dans les eaux littorales, ou la décroissance de la contamination en mercure dans le Golfe de Fos suite à des mesures réglementaires de restriction des rejets.

La surveillance des effets biologiques, en cours d'étude de faisabilité, sera vraisemblablement intégrée au RNO à partir de 1991. Elle correspond au développement soit de tests biologiques (développement des embryons d'huîtres) soit de mesures d'activités enzymatiques en relation avec la biotransformation des polluants (EROD). Les premières campagnes réalisées ont d'ores et déjà permis de mettre en évidence des effets et d'observer des gradients, en fonction de la proximité des sources d'apports.

Perspectives d'évolution de la surveillance

Il est prévisible que les opérations de surveillance des pollutions représenteront toujours à l'horizon de l'an 2 000 l'une des priorités nationales et internationales en matière de protection de l'environnement. Toutefois l'accroissement des coûts de fonctionnement des mesures à la mer sera rapidement un frein pour le développement des activités telles qu'elles sont actuellement programmées. L'une des solutions envisageables consiste dans le développement de stations de mesures équipées de biosenseurs capable d'une large autonomie. Compte tenu des connaissances qui seront acquises à cette échéance sur le mouvement des masses d'eau, il est probable que nous disposions d'outils (modèles) permettant de relier une mesure ponctuelle à une zone plus largement définie, représentative d'une région.

Au-delà de l'instrumentation spécifique, support indispensable aux actions de suivi, deux orientations générales semblent au moins devoir être envisagées :

- le développement de la surveillance des apports, engagée en ce qui concerne les flux telluriques à la fin des années 80 ; elle devrait s'étendre aux apports atmosphériques qui apparaissent désormais comme une contribution importante à l'introduction de substances exogènes au milieu marin,
- la prise en compte du plateau continental dans son ensemble comme une zone d'échange dont les tendances d'évolutions doivent être déterminées.

8 – L'épidémiologie

Les études épidémiologiques visent à établir les corrélations entre les niveaux d'exposition chronique de l'homme à des substances toxiques et leurs effets à long terme sur la santé. Ces recherches sont indispensables à la fois pour valider les seuils d'exposition admissibles, généralement calculés à partir des résultats de l'expérimentation animale, et pour attirer l'attention sur des effets toxiques à long terme qui n'auraient pas été suggérés par l'expérimentation (synergies, éthologie, rôle des périodes de jeûne ...).

L'épidémiologie s'est tout d'abord intéressée aux populations à risque élevé, c'est-à-dire aux travailleurs manipulant des substances chimiques dans l'industrie ou aux utilisateurs professionnels de formulations renfermant des toxiques. Les effets de la qualité générale de l'environnement est une préoccupation récente qui a déjà permis de mettre en évidence la contribution significative de la pollution atmosphérique sur l'induction des cancers ou la morbidité néonatale en zone urbaine.

S'agissant de l'environnement littoral, les risques pour la santé publique sont liés d'une part à la contamination fécale des plages et des coquillages et d'autre part à la contamination chimique des produits marins dans leur ensemble (coquillages, poissons).

Epidémiologie microbiologique

Les rares études relatives aux baignades, réalisées surtout aux USA, laissent penser que le risque d'infection par ingestion de particules contaminées est faible, hormis dans les zones fortement polluées au voisinage des rejets urbains. Par contre, les risques externes liés au contact avec des sables contaminés ne semblent pas négligeables et seraient dans certains cas à l'origine de dermopathologies : mycose, dermatoses.... Toutefois ces risques sont difficilement appréciables car l'identification des microorganismes responsables est mal aisée.

Si la baignade ne semble pas constituer un risque insupportable pour la santé humaine, dans le contexte actuel de contamination des eaux, il n'en est pas de même de la consommation de coquillages. En effet, les huîtres et les moules en filtrant des quantités considérables d'eau pour s'alimenter retiennent de nombreux germes présents dans les eaux, même en faible quantité. La salubrité des coquillages, appréciée au travers des germes tests de contamination fécale, est mal évaluée en ce qui concerne la présence de certaines bactéries ou virus pathogènes (voir paragraphe 5 – Microbiologie). Des études épidémiologiques apparaissent indispensables pour déterminer le rôle de la consommation des coquillages crus dans la pathologie humaine bactérienne et virale d'origine hydrique. Elles peuvent contribuer à valider les normes, voire dépasser le concept de "germe test" qui d'ores et déjà n'est plus adapté à la protection de la santé publique.

Epidémiologie et contamination chimique

Parallèlement aux normes de salubrité bactérienne des coquillages se pose le problème des seuils de tolérance pour les biotoxines et micropolluants. Si les réseaux de surveillance permettent d'évaluer les niveaux de présence des biotoxines et des micropolluants, ils ne sont pas en mesure d'estimer si les situations rencontrées sont acceptables ou inacceptables vis-à-vis de la consommation humaine.

S'agissant des biotoxines, des gastro-entérites consécutives à la consommation de coquillages sont observées sur les côtes françaises depuis 1983. *Dinophysis sp.* est associé à ces intoxications et la toxine diarrhéique en cause (acide okadaïque) a été décelée dans des coquillages contaminés et des extraits phytoplanctoniques. Bien que ces phénomènes se généralisent à des degrés divers sur tous les continents,

peu de données existent sur la symptomatologie et le nombre des intoxications en relation avec le niveau de contamination des coquillages. Dans ce domaine une approche épidémiologique serait en mesure de définir les seuils acceptables en biotoxines ; la connaissance exacte de ces seuils est indispensable pour assurer la commercialisation des produits tout en garantissant la santé des consommateurs.

En ce qui concerne la contamination des produits marins par les micropolluants, aucune valeur normative n'a été introduite dans la réglementation française malgré les pressions induites par la réglementation communautaire. Toutefois des problèmes de santé publique ont été identifiés, au moins potentiellement. Ainsi la contamination en Cd des huîtres de Marennes-Oléron (1 à 2 mg/kg de poids humide) est préoccupante tant sur le plan santé publique que sur celui de la commercialisation de la production du premier centre ostréicole français. En effet, en dehors de la Gironde où les teneurs moyennes sont de l'ordre de 15 mg/kg les niveaux de contamination en Cd des huîtres sont généralement inférieurs à 0,4 mg/kg. Les normes de tolérance du Cd dans les produits de la mer, adoptées ou en discussion dans différents pays, varient entre 0,1 mg/kg humide (Suisse) et 2 mg/kg humide (USA). Les teneurs maximales à Marennes-Oléron se situent donc au niveau des normes les plus tolérantes. Il convient donc de vérifier que les consommateurs habituels d'huîtres de Marennes (ostréiculteurs) ne présentent pas une symptomatologie typique des effets du Cd (blocage rénal).

Conclusion

Les motivations pour la participation de l'épidémiologie à l'évaluation des conséquences de la contamination du littoral sur la santé publique existent. Le développement des études épidémiologiques appliquées à la consommation de produits marins à l'horizon de l'an 2 000 se justifie au moins par deux impératifs :

- la création ou la validation de normes de salubrité,
- le fait que les produits marins vont peu à peu perdre auprès des consommateurs leur image de "produits naturels" ayant une connotation d'innocuité sur la santé humaine, du fait de l'accroissement des phénomènes de phytoplancton toxique ou de la mise en évidence de plus en plus fréquente de germes pathogènes liés au développement des techniques microbiologiques.

Ceci étant, les corrélations entre la contamination des produits marins et la santé publique ne sont pas aisées à établir en raison des nombreux facteurs sociaux, économiques, etc... qui interviennent. Ainsi, l'étude engagée par l'Organisation Mondiale de la Santé sur les effets de la contamination en méthylmercure sur les populations méditerranéennes n'a pu être réellement conclusive : le méthylmercure et l'alcool ayant la même symptomatologie nerveuse. Néanmoins des données épidémiologiques, actuellement inexistantes au niveau national et peu fréquentes au niveau international, apparaissent indispensables pour décider des mesures et aménagements nécessaires pour assurer la protection des consommateurs.

9 - L'aménagement du littoral

En dehors de la présence de l'homme, les littoraux évoluent sous l'effet des principaux processus dynamiques suivants : (1) la marée, dont le courant de masse assure le transport du sable sur le fond pour des vitesses supérieures à 0,5 m/s et qui est à l'origine d'une partie de la circulation résiduelle des matières en suspension ; (2) la houle, dont l'action se fait sentir jusqu'à des profondeurs très supérieures à trois fois son amplitude et qui est le principal agent des mouvements des sédiments à la côte (transit littoral) et au large (remise en suspension) ; (3) les clapots, induits par les vents locaux et qui agissent sur les sédiments fins sous une faible lame d'eau ; (4) les vents, qui engendrent des courants superficiels et agissent sur les dunes ; (5) les courants fluviaux, qui sont l'agent de transport des matériaux terrestres ; (6) les lentes variations de niveau de la mer.

En présence de l'homme, le littoral est modifié par ses aménagements qui interagissent avec les agents dynamiques énumérés ci-dessus : on parle alors d'impact. Il n'est pas toujours facile, lorsqu'on observe l'évolution d'une portion de littoral, de distinguer ce qui résulte de l'action de l'homme d'une évolution naturelle. Les effets sur l'environnement d'un aménagement peuvent en effet se faire sentir à une grande distance. Les causes naturelles et anthropiques d'évolution du littoral peuvent d'ailleurs être croisées et c'est peut être le cas de l'érosion généralisée des côtes. On constate, en effet, que 60 % des plages du globe sont en érosion. Les causes en sont multiples, en particulier climatiques, mais souvent d'origine humaine : diminution des apports fluviaux à cause des barrages, extraction de granulats dans les fleuves et sur les plages, protection de portions de littoral par des épis, arasement des dunes lors d'urbanisations, pompage dans les nappes phréatiques.

Les aménagements et leur impact sur l'environnement

Le littoral français a connu depuis les années 50 une intensification d'activités de toutes sortes qui se sont traduites par de nombreux aménagements. Quelques données chiffrées sur le littoral métropolitain français aideront à se faire une idée de l'artificialisation de nos rivages. Le linéaire côtier comprend : 1 948 km de plages (35 %), 1 316 km de marais et vasières (24 %), 1 548 km de côtes rocheuses (28 %), 721 km de falaises (13 %), soit en tout 5 333 km (100 %). Dans ce périmètre, on compte 756 km d'estuaires et 582 km revenant aux îles. En 1982, 960 km étaient urbanisés de façon dense et 1 844 km urbanisés de façon peu dense.

En 1984, on comptait environ : 1 000 ouvrages transversaux, développant 50 km ; 500 ouvrages longitudinaux, développant 500 km ; et 300 ouvrages portuaires ou de débouchés en mer. La typologie fait ressortir les principaux usages suivants : (1) des ouvrages portuaires (commerce, pêche, plaisance) ; (2) des ouvrages de protection du littoral, longitudinaux et transversaux ; (3) des ouvrages balnéaires (plages artificielles, promenades de front de mer).

Les ouvrages peuvent être regroupés en quatre catégories, ayant chacune une incidence spécifique sur l'environnement : (1) les ouvrages transversaux à la ligne de rivage ou en épis (comprenant les endiguements de débouchés en mer), qui retiennent les sables en amont du transit littoral, mais accentuent corrélativement l'érosion en aval ; (2) les ouvrages longitudinaux terrestres (du type mur de haut de plage), qui entraînent une érosion en pied d'ouvrage par réflexion de la houle (ressac) et séparent artificiellement la plage de l'arrière plage ; (3) les ouvrages longitudinaux maritimes, qui piègent en partie le transit littoral ; (4) les plages artificielles, constituées à partir d'épis et de brise-lames, qui ont tendance à confiner la circulation et risquent, le cas échéant, de colmater des herbiers.

D'autres ouvrages et travaux, non directement liés au trait de côte, agissent sur le régime du littoral. Il s'agit : (1) des émissaires, qui induisent des pollutions variées (chimiques, nutriments en excès, microbiologiques, recouvrement des fonds) ; (2) des extractions de granulats, qui diminuent d'autant le stock sédimentaire littoral ; (3) des dragages et immersions de produits dragués, qui ont une incidence évidente sur l'environnement.

L'évolution du littoral et la conception des ouvrages de protection

Qu'il s'agisse de l'évolution du rivage ou de la conception des ouvrages le principal facteur d'environnement à considérer est la houle. Par ailleurs la houle, ou plutôt les prédictions météo-marines, intéressent de nombreux usagers (marins professionnels, pêcheurs, plaisanciers et autres professions directement en contact avec la mer). La connaissance de la houle et sa prédiction constituent donc un thème central en environnement littoral. **Un vaste domaine de recherches fondamentales et appliquées concernant la houle reste ouvert aujourd'hui : il s'agit principalement : (1) de l'intégration des modèles hydrodynamiques et météorologiques en vue d'une prédiction de l'état de la mer et/ou de la houle.** La télédétection, terrestre ou spatiale, appuyée sur des mesures en nature, doit permettre de nouveaux progrès sur des sujets aussi délicats que la formation des vagues et de la houle (transfert d'énergie, spectre directionnel et de fréquence) ; (2) **d'une meilleure connaissance des houles naturelles** (aléatoires) : spectre directionnel et regroupement des lames fortes, statistiques, fréquence et nature des houles de tempête ; les états de mer anormaux (solitons) ; (3) **des mécanismes de transport de sédiment et de l'évolution des plages sous l'action de la houle et des courants** ; (4) **des mécanismes du déferlement** ; (5) **des applications de la houle au génie côtier** : effets de la houle sur les structures fixes ou mobiles (brise-lames flottants) tels que le franchissement des ouvrages par la houle, les effets de réflexion de la houle, les efforts sur les carapaces, les cassures et les détériorations. D'une façon générale, l'intégration des ouvrages de protection dans l'environnement et l'absence d'effets nuisibles en dehors de la zone de protection devront faire à l'avenir l'objet d'efforts accrus. De même, les autres usages du littoral tels que les rejets, les extractions, les dépôts, appellent de nombreuses études spécifiques et l'établissement de réglementations qu'il faudra bien avoir le courage d'appliquer.

Les variations du niveau moyen de la mer

Les variations du niveau moyen de la mer à l'horizon de l'an 2 000 ne présentent aucun caractère menaçant. Des études sérieuses montrent que l'élévation du niveau de la mer depuis un siècle pourrait être de l'ordre de 15 cm et que d'ici un siècle elle pourrait être de l'ordre de 50 à 100 cm. Par comparaison avec le passé lointain, rappelons que sur la période des derniers 15 000 ans l'élévation du niveau de la mer a été de l'ordre du mètre par siècle et que pendant ces 15 000 ans le niveau n'a jamais dépassé de plus de 6 m le niveau actuel. Compte tenu des interférences entre les variations à long terme résultant du changement de climat, les variations eustatiques découlant de l'isostasie dans les zones anciennement englacées et les variations pluriannuelles de type El Niño, le suivi du niveau moyen de la mer exigera des mesures sophistiquées, mobilisant les moyens classiques du nivellement terrestre et de la marémétrie, mais aussi ceux de la géodésie spatiale et de l'altimétrie satellitaire. **Une veille précise et continue du niveau moyen de la mer, coordonnée à l'échelle internationale s'impose dorénavant.**

Complément sur le niveau moyen de la mer (d'après Robert Stewart)

On sait que les relations entre l'océan et le climat offrent deux aspects distincts selon l'échelle de temps à laquelle on se place ; il s'agit, d'une part, des changements séculaires, dus à l'effet de serre et, d'autre part des variations interannuelles (du type El Niño). Nous n'envisagerons dans la suite que l'effet de serre. Une chose est certaine, c'est l'accroissement depuis un siècle de la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (CO², méthane, fluorocarbones). Par contre, si le phénomène continue, les effets résultants ne sont pas clairement établis. Les meilleurs modèles prévoient d'ici au milieu du siècle prochain une élévation de la température moyenne de $3,5^{\circ} \pm 50\%$. Il faut remarquer que 95 % des millions d'années écoulées ont connu des températures plus basses qu'actuellement et que la différence de température entre la période actuelle et une période glaciaire est de l'ordre de 8°C.

On peut donc s'attendre à des changements climatiques importants en notant qu'ils auront des effets moins marqués sur les espèces terrestres (déjà habituées à des variations de températures importantes) que sur les espèces marines. Il est vraisemblable qu'une augmentation globale de la température sera accompagnée d'une augmentation du volume de l'océan superficiel. Là où la température

superficielle était déjà élevée, peu de changements sont à prévoir, parce que l'évaporation s'intensifiera. Là où la température superficielle était basse, l'accroissement de température modifiera peu la densité de l'eau. Les changements de niveau devraient surtout concerner les zones pour lesquelles la température superficielle est comprise entre 15° et 25° . Un océan plus chaud en moyenne entraînera une évaporation plus importante et donc une quantité plus grande de précipitations ; si elles se concentrent dans les hautes latitudes (transformation en glace) et les basses latitudes, on pourrait même envisager que le niveau de la mer baisse.

Introduction

Les milieux littoraux subissent de la part des différentes activités humaines, des pressions localement fortes. Le tiers de l'humanité vit en effet dans les zones littorales. Cette concentration n'est pas seulement démographique. Différentes activités industrielles tendent à s'y établir, tendance fortement marquée en ce qui concerne les activités estivales de loisirs. Les zones littorales et humides font l'objet d'aménagements importants et de dégradations parfois irréversibles. Les activités humaines situées plus à l'intérieur des terres utilisent aussi la mer comme réceptacle final de leurs résidus, drainés par les réseaux fluviaux. Tous ces déchets contribuent à modifier les milieux littoraux, nuisant à l'exploitation des ressources vivantes et aux activités de loisirs. Par ailleurs, la richesse biologique des milieux littoraux est en rapport avec les apports d'origine terrigène.

Les études socio-économiques à engager sur la conservation de la qualité des milieux littoraux doivent s'appuyer d'abord sur une vision globale des flux de polluants et autres nuisances et de leurs effets sur les ressources vivantes et les "aménités" ; il convient ensuite d'examiner les stratégies de conservation de la qualité du milieu et les axes possibles de recherche et d'action de correction.

Les flux de contamination et autres nuisances

Les flux de contaminants sont essentiellement constitués d'apports anthropiques, classés habituellement en trois grands groupes : industriels, urbains et agricoles.

Les apports industriels : les principaux polluants industriels sont constitués par les métaux, les hydrocarbures, les produits organiques et diverses substances de synthèse ;

Les apports urbains : les rejets urbains se composent de matières organiques, de sels nutritifs, de polluants chimiques et de microorganismes ;

Les rejets agricoles : les apports agricoles sont diffus et transportés par le réseau hydrographique. Ils consistent en matières organiques, en éléments nutritifs, en charge microbienne et en polluants chimiques. L'accroissement des teneurs en sels nutritifs (nitrates) dans les nappes phréatiques est la conséquence de l'utilisation intensive des engrais. Les exploitations "hors sol" de porcs et volailles produisent des volumes considérables de lisiers, lessivés lors des précipitations. Les pratiques culturales actuelles font appel à des insecticides (plus de 2 000 formulations chimiques) et herbicides dont les effets toxiques sur les organismes aquatiques sont loin d'être bien connus.

Les autres nuisances sont liées aux aménagements : extraction de granulats, récupération des zones humides à des fins industrielles ou d'urbanisation, dragages et immersion de produits de dragage. Elles sont généralement l'occasion de dégâts irréversibles .

Le fleuve est la voie de transport des polluants, dissous ou particuliers, vers la mer. Les matières en suspension sédimentent dans les estuaires et relarguent partiellement (désorption) les polluants fixés aux particules. Les polluants arrivant à la mer proviennent de l'ensemble du bassin versant.

Le transport atmosphérique est également un vecteur important des pollutions sous forme gazeuse.

La biodégradation, sous l'action du rayonnement UV (photolyse), de l'eau (hydrolyse) et des microorganismes, peut donner lieu à des produits plus nocifs que les produits d'origine. Les tissus animaux peuvent stocker les polluants par bioaccumulation (association avec des lipides, fixation sur des protéines spécifiques, insolubilisation par complexation avec des acides aminés ou des oligo-éléments).

Les effets des pollutions sur les écosystèmes

On peut tenter de prédire les effets des polluants soit par des tests physico-chimiques, soit par des bio-essais. Dans le premier cas, des protocoles de mesures physico-chimiques et toxicologiques (par exemple les lignes directrices de l'OCDE de 1981, le Recueil des normes françaises de 1984, la Directive 76-464 du Conseil des Communautés Européennes) permettent d'apprécier le danger potentiel pour la chaîne trophique. Dans le deuxième cas, des tests d'inhibition de croissance (algue unicellulaire ou bactéries) ou de génotoxicité (bactéries, cellules de mammifères) servent à évaluer les risques à long terme sur les espèces marines. De même, les tests sur les mammifères (souris) permettent d'évaluer les risques pour l'homme (toxicité subaiguë, carcinogénicité) de substances susceptibles de s'accumuler dans les espèces marines consommées.

L'enrichissement des milieux littoraux par les nutriments d'origine agricole et urbaine entraîne une augmentation de la production phytoplanctonique qui peut aboutir à des développements anormaux d'algues vertes (ulves) ou à des efflorescences phytoplanctoniques induisant anoxie ou intoxications d'organismes marins filtreurs ou même du consommateur humain. Les polluants sont aussi à l'origine de pathologies variées (maladies épidermiques, déformation du squelette, maladies internes et tumeurs) chez les poissons et les mollusques.

L'alimentation par filtration des mollusques d'élevage explique leur vulnérabilité particulière aux altérations du milieu et les dangers potentiels vis-à-vis des consommateurs humains. Trois types de contaminants peuvent altérer la qualité des mollusques : (1) les microorganismes pathogènes, (2), les micropolluants organiques et inorganiques, (3) les biotoxines. Les poissons et les crustacés sont surtout sensibles aux pollutions chimiques (exception faite des manifestations ciguatériques des poissons tropicaux).

(1) La qualité microbiologique du milieu marin du point de vue sanitaire dépend essentiellement des apports continentaux, car la plupart des germes pathogènes proviennent des mammifères à sang chaud. Faute de pouvoir identifier facilement ces germes pathogènes, on se contente de prévoir leur présence à partir du comptage des germes test.

(2) Les métaux, les hydrocarbures et diverses substances organiques de synthèses s'accumulent dans les tissus animaux dont ils peuvent rendre la consommation dangereuse pour l'homme. En voici quelques exemples : sous l'action des bactéries des sédiments, le mercure inorganique est solubilisé, puis transformé par biométhylation en mercure organique, biomagnifié à son tour dans la chaîne trophique ; contrairement au mercure, le cadmium ne donne pas de dérivé organométallique connu, mais s'accumule dans le foie du poisson et se fixe sur certaines protéines soufrées (métallothionéines) des mollusques ; les composés organochlorés (PCB, DDT), liposolubles, s'accumulent facilement dans la chair des poissons gras. Tous ces produits sont fortement toxiques, de même que certains hydrocarbures aromatiques qui sont suspectés d'effets mutagènes ou cancérogènes.

(3) Certaines espèces de dinoflagellés synthétisent des biotoxines, directement toxiques pour les organismes aquatiques (*Gyrodinium aureolum*) ou toxiques pour l'homme en tant que consommateur de coquillages (cas des toxines diarrhéiques et des neurotoxines paralysantes).

Les stratégies de conservation et/ou de restauration du milieu littoral

La conservation de la qualité des milieux littoraux a pour objectif de contenir les différentes sources de pollution à des niveaux qui ne nuisent, ni à la productivité des stocks halieutiques et cultivés, ni à l'utilisation de leurs produits, et qui soient compatibles avec les autres activités, notamment récréatives, dépendant de ces milieux. Pour pouvoir agir en connaissance de cause, on souhaiterait pouvoir, non seulement identifier les sources de pollution, mais également quantifier les flux de transfert, puis les effets sur les ressources vivantes, et en fin de compte sur la santé humaine. De tels bilans permettraient de

mettre en oeuvre des politiques de conservation de la qualité des eaux littorales, doublées de normes de rejet qui tiennent compte du volume total d'émissions, par types de produits et par secteurs géographiques. Les politiques d'aménagement pourraient alors refléter les différences géographiques dans l'activité industrielle ou agricole des régions concernées. Malheureusement, un tel niveau de connaissance est loin d'être atteint. On est passé de l'identification des sources de pollution à la description qualitative des processus mais la phase de modélisation, indispensable à la compréhension et à la quantification en est seulement à ses débuts. Les retards dans les connaissances ont favorisé des décisions "réactives" ou empiriques. Face à cette situation, deux voies se sont imposées pour progresser : (1) l'une a consisté à réglementer avant de tout connaître. Elle pare au plus pressé en édictant des normes qui pourront évoluer avec le progrès des connaissances. (2) L'autre voie a consisté à entreprendre des recherches pour combler des lacunes de connaissances. Elle est orientée vers le long terme :

(1) La réglementation

La notion d'"Objectif de Qualité des Eaux" (OQE) correspond à une approche par l'aval de la qualité des eaux. C'est elle qui a présidé à l'établissement des deux directives de la Commission des Communautés Européennes promulguées pour les eaux de baignade (Directive n° 76-160 du 8 décembre 1975) et les eaux conchylicoles (Directive n° 79-923 du 30 octobre 1979). Ces directives fixent des valeurs "impératives" ou "guides" pour les paramètres physico-chimiques et microbiologiques jugés critiques pour l'usage considéré.

La notion de Norme Uniforme d'Emission (NUE) correspond à une approche par l'amont de la qualité des eaux. Elle traduit la volonté du législateur de réduire à la source les émissions, en fixant des limites maximales allant jusqu'à l'interdiction de l'usage de tel produit (Convention de Paris, Protocole de Barcelone).

La notion de "Capacité d'acceptation du milieu", proposée par le "Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution" (GESAMP 1986) correspond à une approche du problème intermédiaire entre les deux conceptions précédentes.

Aucune de ces approches n'est entièrement satisfaisante mais elles ont servi très utilement de cadre général à une réflexion sur la pollution des eaux marines et ont contribué efficacement à leur limitation. Pour contestable qu'elle soit, la réglementation est indispensable. Elle doit s'appuyer sur les résultats de la recherche sur les effets de la pollution sur les écosystèmes et la santé humaine.

(2) Les axes de recherche

Avec les progrès dans l'appréciation des phénomènes et de leur acuité, de nouveaux axes de recherche mettant en jeu de nouvelles disciplines scientifiques sont en train d'émerger. Ils portent principalement sur : a) les effets des polluants sur les organismes (toxicologie) et les écosystèmes (écotoxicologie) perturbés (eaux colorées) ou non. **Un gros effet reste à faire pour l'amélioration des connaissances en toxicologie et écotoxicologie. les besoins les plus urgents dans ce domaine concernent l'appréciation à long terme des effets des polluants sur les écosystèmes littoraux.** A cet égard, la compréhension du déterminisme d'apparition d'une efflorescence phytoplanctonique toxique est moins importante que celle de la réduction de la reproduction due à des polluants, alors que l'opinion publique est d'un avis opposé. b) les études épidémiologiques, c'est-à-dire celles des causes d'apparition d'affectations morbides frappant une population et en relation avec la consommation de denrées d'origine marine ou la baignade. Là aussi, **un gros effort reste à accomplir pour l'amélioration des connaissances en épidémiologie.** Un seul exemple fixera les idées : quels sont exactement les effets néphrotoxiques ou cancérigènes (?) du cadmium absorbé en consommant des produits marins fortement contaminés ? c) les aspects sociologiques et économiques de l'environnement littoral : ce problème mérite un développement particulier, qui fait l'objet du paragraphe suivant.

Les aspects sociologiques et économiques de l'environnement littoral

Il faut partir d'un constat. La dégradation de la nature est rapide et universelle. Les causes en sont évidentes : le souci d'une **rentabilité immédiate** quels que soient les régimes politiques, d'une part, la méconnaissance des problèmes de protection de l'environnement, d'autre part. Ces deux raisons suffisent à expliquer que même lorsqu'il existe des recommandations scientifiques et des textes législatifs, ils ne soient pas appliqués.

Devant l'incapacité à aborder dans toute leur complexité les problèmes scientifiques et juridiques posés par l'environnement, – et à l'image d'un écosystème dégradé –, on a eu tendance à réduire les règles du jeu environnemental à quelques principes simples. C'est le cas des parcs et autres réserves naturelles qui divisent la nature en deux parties : l'une est un espace protégé, véritable sanctuaire, l'autre est un espace de production et de consommation, soumis au régime de la rentabilité immédiate et dominé par les technocrates. C'est aussi le cas du principe du "pollueur-payeur" pour les dommages d'origine anthropique, basé sur un robuste bon sens mais dont l'application peut être vicieuse. Un taux modéré est favorable au pollueur en l'incitant à continuer de polluer ; un taux élevé favorise les procédés et les produits "propres" mais il est contraire à la rentabilité immédiate et peut même entraîner la cessation d'activité avec des conséquences sociales négatives. Un exemple du "pollueur-payeur" bien connu est celui des Agences de Bassin en France, créées par une loi de décembre 1964, et qui obligent les usagers à prendre en compte les coûts externes imposés par leurs activités de prélèvement et de rejet aux autres usagers de la même ressource. Les Agences prélèvent donc des redevances sur les ménages et les entreprises, redevances sur les effluents industriels, et les rejets domestiques d'une part, sur l'eau prélevée et consommée d'autre part. Le produit des redevances sert à financer la construction et l'entretien d'ouvrages d'alimentation en eau et de stations d'épuration. Les principes généraux de fonctionnement des Agences de Bassin paraissent bons, mais leur application laisse à désirer. D'une part, sous la pression des industriels et des élus, les "gros" adhérents ont biaisé le principe "pollueur-payeur" en faisant supporter leurs coûts par les autres, d'où une dérive dans laquelle la redevance tend à devenir un impôt dont l'assiette est large et le taux faible. D'autre part, les Agences de Bassin interviennent peu dans la gestion des eaux souterraines alors qu'elles posent des problèmes de pollution préoccupants. Enfin, il ne semble pas que les budgets de gestion des eaux correspondent à l'ampleur des problèmes qu'elle pose aujourd'hui. Les gouvernements ont intérêt, dans une optique à court terme, à restreindre les dépenses de cette nature pour limiter l'inflation et les pertes d'emploi. Il n'échappera pas au lecteur que la politique des Agences de Bassin est d'une importance primordiale pour la qualité du milieu marin en zone littorale.

Dans le domaine agricole, qui est aussi en relation étroite avec la qualité des eaux littorales, en Europe comme aux Etats-Unis, les programmes d'aide à l'agriculture ont entraîné des répercussions négatives sur l'environnement en favorisant l'extension des surfaces cultivées (au détriment des zones humides), l'intensification des cultures grâce aux engrais et aux pesticides et celle des élevages industriels "hors sol". Les pollutions dans le domaine agricole sont généralement diffuses et donc difficiles à contrôler à la source. Il a fallu attendre les effets négatifs sur la qualité de la ressource en eau souterraine (nappe phréatique) pour assister à une récente prise de conscience d'effets analogues sur la qualité de l'eau littorale.

Les exemples des Agences de Bassin et de l'agriculture montrent bien l'incompatibilité de la rentabilité immédiate avec la protection de l'environnement pour le moyen terme. Qu'en est-il alors si l'on se préoccupe du long et du très long terme ? Deux types de difficulté font obstacle à la solution de problèmes globaux d'environnement tels que l'effet de serre, la diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone, les conséquences de la destruction de la forêt amazonienne, et pourquoi pas aussi l'accumulation de polluants sur les plateaux continentaux. D'une part, les problématiques scientifiques sont d'autant plus complexes que les phénomènes à prévoir sont globaux (par exemple, il est difficile de s'avancer sur les variations du niveau moyen à l'horizon du siècle prochain, et même sur le signe de cette variation). Et dans ces conditions, pourquoi, combien et qui faire payer ? D'autre part, la communauté nationale ou internationale sera plus prompte à supporter le coût écologique du moyen terme que celui du long et très

long terme. Toutefois, l'influence des médias, sous réserve d'objectivité, peut jouer un rôle positif essentiel vis-à-vis de l'opinion publique.

En fin de compte, mis à part les importants progrès scientifiques nécessaires à la compréhension de l'ensemble des phénomènes naturels en jeu dans l'espace littoral, **le grand problème est celui de l'harmonisation des impératifs écologiques et économiques dans une mise en valeur raisonnable de la planète.** Cette vision place l'homme au centre du débat, aussi bien pour sa survie dans le cas de dégradation extrêmes et irréversibles que **pour le juste partage entre les valeurs économique et humaniste de la nature.** A ce point de vue, il est intéressant de faire état des comptes du patrimoine naturel, qui s'appliquent à trois composantes : les éléments non renouvelables (combustibles fossiles, minerais métalliques ou non, etc.), les milieux physiques (sol, atmosphère, eaux continentales et marines), les organismes vivants (espèces animales et végétales, microorganismes). Les finalités de ces composantes sont également au nombre de trois : une finalité économique, aidant les décideurs à faire des choix alternatifs dans le cas de ressources rares ; une finalité écologique, permettant d'évaluer toutes les conséquences sur le milieu de ses perturbations du fait d'actions anthropiques ; une finalité socio-culturelle du type "qualité de la vie", qui intègre souvent des facteurs difficiles à traduire en valeur monétaire.

La façon d'aborder les problèmes d'environnement dans la zone littorale ne doit pas être différente de celle concernant l'environnement terrestre. Tout au plus pourrait-on souligner que la compétition des acteurs voulant se partager l'espace littoral et ses ressources y est plus vive qu'ailleurs et que les problèmes d'appropriation de l'espace maritime et de ses accès terrestres ainsi que celle des ressources y prend des proportions inquiétantes.

Etant admis que la zone littorale demande un effort dans le domaine des sciences sociales et économiques sans commune mesure avec ce qui a été consenti jusqu'ici, on pourrait proposer les deux thèmes suivants pour orienter les recherches : (1) le développement d'études comparatives des coûts et conséquences des stratégies de prévention et/ou de réparation des dommages causés par les actions anthropiques ; (2) le développement de recherches sur la valeur économique du patrimoine naturel. Ces deux thèmes répondent à une question unique : comment formaliser les compétitions sur l'espace littoral ?

L'ampleur des problèmes de sociologie et d'économie relevant du domaine maritime s'accommode mal de leur partage entre des organismes peu liés entre eux et des budgets étriés dont ils bénéficient. La recherche de solutions raisonnables à ces problèmes exige une attitude dynamique dans une structure ouverte à tous les partenaires ainsi qu'une "moralité civique" dépassant largement les horizons de la politique quotidienne. Il faut aussi des financements à la hauteur des enjeux. **Pourquoi ne pas étudier l'opportunité de la création d'une "Fondation nationale des sciences sociales de la mer", répondant aux critères ci-dessus et servant de référence dans ce domaine à la future Agence européenne pour l'environnement ?**

La complexité des tous ordres et l'ampleur croissante des problèmes d'environnement, ainsi que l'urgence d'y apporter des solutions efficaces, sont évidents. L'Environnement, demain, sera aussi important que la Défense, aujourd'hui. Il appelle une structure puissante, efficace, soucieuse de l'intérêt général à l'avenir et non pas au présent. Nous suggérons, à ce propos, d'étudier l'opportunité de création d'une Agence de Protection de l'Environnement.

CHAPITRE V

Les orientations de recherche

Questions d'environnement littoral en l'an 2 000

1 - En vue d'appréhender les aspects **physiques** des perturbations anthropiques ou naturelles, comment améliorer la connaissance de la résultante des actions dynamiques de la marée et des courants dus au vent et à la houle sur la circulation hydrodynamique et le transport solide, au large et à la côte ?

2 - Quelles sont les conséquences à long terme de l'enrichissement des eaux côtières par les sels nutritifs et les matières organiques dégradables sur l'équilibre des écosystèmes ?

3 - Quel est l'impact sur le plateau continental, d'une part des dystrophies constatées en zone côtière, d'autre part de l'accroissement des apports anthropiques, autres que sels nutritifs, depuis un demi-siècle ?

Orientations de recherche

- Développement de modèles hydrodynamiques lagrangiens orientés vers la circulation résiduelle à long terme.
- Développement de modèles de transport de sédiments non cohésifs (bidimensionnels) et cohésifs (tridimensionnels) intégrant le calcul complet des effets de la houle (réfraction, diffraction, réflexion), l'action des courants dus à la marée et au vent, une granulométrie multiclasse du sédiment, des gradients verticaux de concentration des sédiments et de densité.
- Développement d'études sur : (1) la génération et la propagation de la houle, (2) l'action du déferlement sur l'évolution des plages et sur les ouvrages.
- Mise en place d'une veille précise et continue du niveau moyen.

Disciplines concernées : Hydrodynamique ; Sédimentologie ; Aménagement du littoral.

- Etude du déterminisme des développements phytoplanctoniques en zone eutrophe.
- Modélisation du cycle du carbone, de l'azote et du phosphore dans les écosystèmes littoraux.
- Modélisation prédictive de l'évolution des biomasses.
- Etude du rôle du phytoplancton dans le devenir biogéochimique des polluants.
- Etude du rôle de la zone côtière dans la régulation du CO₂ atmosphérique.

Disciplines concernées : Biologie ; Géochimie ; Hydrodynamique ; Surveillance ; Modélisation.

- Etude des processus hydrodynamiques, physico-chimiques et biologiques spécifiques au plateau continental :
 - . développement de modèles lagrangiens 3 D de circulation résiduelle,
 - . recherche des lois d'évolution des polluants,
 - . interactions entre les facteurs sédimentaires, géochimiques et biologiques.

Disciplines concernées : Biologie ; Hydrodynamique ; Sédimentologie ; Géochimie ; Surveillance ; Modélisation.

Questions d'environnement littoral en l'an 2 000

4 - Existe-t-il dans l'environnement aquatique des substances anthropiques, à l'état de traces mais fortement réactives, capables d'induire des dérèglements cellulaires ou génétiques chez des espèces particulièrement sensibles ?

5 - Comment concilier le maintien de la qualité des eaux littorales avec les nécessités économiques du développement de l'aquaculture de production (a), de la conchyliculture (b) et la protection des frayères ?

6 - Quelle est l'influence de la contamination bactérienne, virale et chimique (biotoxines) des produits marins sur la santé des consommateurs ?

7 - Comment formaliser les compétitions sociologiques et économiques sur l'espace littoral ?

Orientations de recherche

- Etude des mécanismes d'action des polluants au niveau moléculaire et génétique : voies de métabolisation des toxiques, recherches sur les oncogènes, développement de tests de génotoxicité sur des espèces marines.
- Evaluation de la biodisponibilité de substances toxiques adsorbées sur les sédiments.
- Etudes de biodégradation finale des substances largement dispersées dans l'environnement (détergents, PAH, ...)

Disciplines concernées : Biochimie ; Génétique ; Géochimie, Microbiologie ; Surveillance des effets.

- (a) - Etude de l'impact des activités aquacoles en mer ouverte sur :
 - . l'enrichissement trophique des eaux littorales,
 - . l'oxygénation des fonds,
 - . les communautés microbiennes autochtones (effets des antibiotiques).
- (a) - Etude de l'influence du confinement sur la pathologie des espèces exploitées/sauvages
- (b) - Orientations répondant aux questions 2, 4 et 6.

Disciplines concernées : Géochimie, Microbiologie ; Ecotoxicologie ; Aménagement du littoral ; Modélisation.

- Développement des études épidémiologiques sur les risques bactériens viraux et chimiques.
- Etude des mécanismes de survie des bactéries et virus en milieu marin.
- Développement de méthodes génétiques de dénombrement des germes pathogènes.

Disciplines concernées : Epidémiologie ; Microbiologie ; Génétique.

- Etude du statut social, juridique et scientifique de l'environnement.
- Développement d'études comparatives des coûts et conséquences des stratégies de prévention et/ou de réparation des dommages d'origine anthropique.
- Recherche sur la valeur économique du patrimoine.

Disciplines concernées : Environnement ; Sociologie ; Economie.

ANNEXE 1

LA ZONE LITTORALE – ENRICHISSEMENT DES ZONES COTIERES

Le caractère eutrophe du milieu côtier est une conséquence des apports de matières nutritives, organique ou minérale, d'origine continentale. Les effets de cet enrichissement, naturel ou anthropique, induisent deux types d'événements : **fertilisation** et (ou) **eutrophisation**. L'une et l'autre constituent des préoccupations majeures de la gestion de l'espace côtier. Les effets positifs se traduisent par une augmentation de la productivité des eaux littorales qui conditionnent la production des ressources vivantes. A l'inverse, l'eutrophisation conduit à des événements défavorables pour le milieu, dont les plus visibles sont les **marées vertes** des côtes nord-Bretagne ou des lagunes (Venise), les **floraisons exceptionnelles** de phytoplancton de grande ampleur (*Chrysochromulina*) ou chroniques (*Gyrodinium*, *Dinophysis*) et les **anoxies** au niveau du fond (baie de Vilaine, German Bight, Kattegat).

L'inquiétude suscitée par les aspects négatifs de l'enrichissement s'est récemment traduite par une décision, prise par les ministres de l'environnement des pays riverains de la mer du Nord, de mettre en oeuvre, d'ici 1995, une politique destinée à réduire de 50 % les apports nutritifs à la mer (conférence interministérielle de Londres, 1987). Si la prise de conscience d'une probable transformation de l'écosystème côtier par les apports nutritifs est réelle, les liens unissant les causes et les effets commencent à peine à être appréhendés. Les relations "flux de nutriments → production → eutrophisation" sont gouvernés par un ensemble de processus physiques, chimiques et biologiques, dont les interactions sont mal connues.

L'impact des apports nutritifs sur l'équilibre écologique de la frange côtière constitue donc un axe de recherche interdisciplinaire dont les objectifs sont :

- comprendre l'évolution de l'écosystème côtier soumis aux enrichissements de matières nutritives (à court et à long terme),
- prédire les conséquences d'une augmentation ou d'une diminution des apports sur l'écosystème.

Cadrage thématique

Deux thèmes importants paraissent devoir guider la programmation des futures actions de recherche :

- approche simultanée des phénomènes de production et d'eutrophisation,
- étude du cycle de l'azote et du phosphore.

Le couple "production – eutrophisation" est indissociable dans la mesure où les processus impliqués sont fondamentalement les mêmes. Par ailleurs, la compréhension du passage de l'un ou l'autre (équilibre → déséquilibre) suppose d'étudier simultanément les deux situations. Il est donc souhaitable d'aborder plusieurs cas d'enrichissement, y compris le cas d'un site fortement enrichi sans eutrophisation.

Si l'étude des flux de matières dans les océans concerne prioritairement le cycle du carbone, les flux au sein des systèmes côtiers dépendent étroitement du cycle de l'azote. Dans la plupart des cas, l'azote apparaît comme le premier facteur limitant de la production primaire. Il est par ailleurs à la fois plus abondant et plus rapidement recyclé dans les eaux côtières que dans les eaux du large.

Les connaissances et les mécanismes essentiels à la compréhension du cycle de la matière dans les zones côtières sont schématisés dans la **figure 1**. Trois points fondamentaux peuvent être identifiés :

ENRICHISSEMENT DES ZONES COTIERES

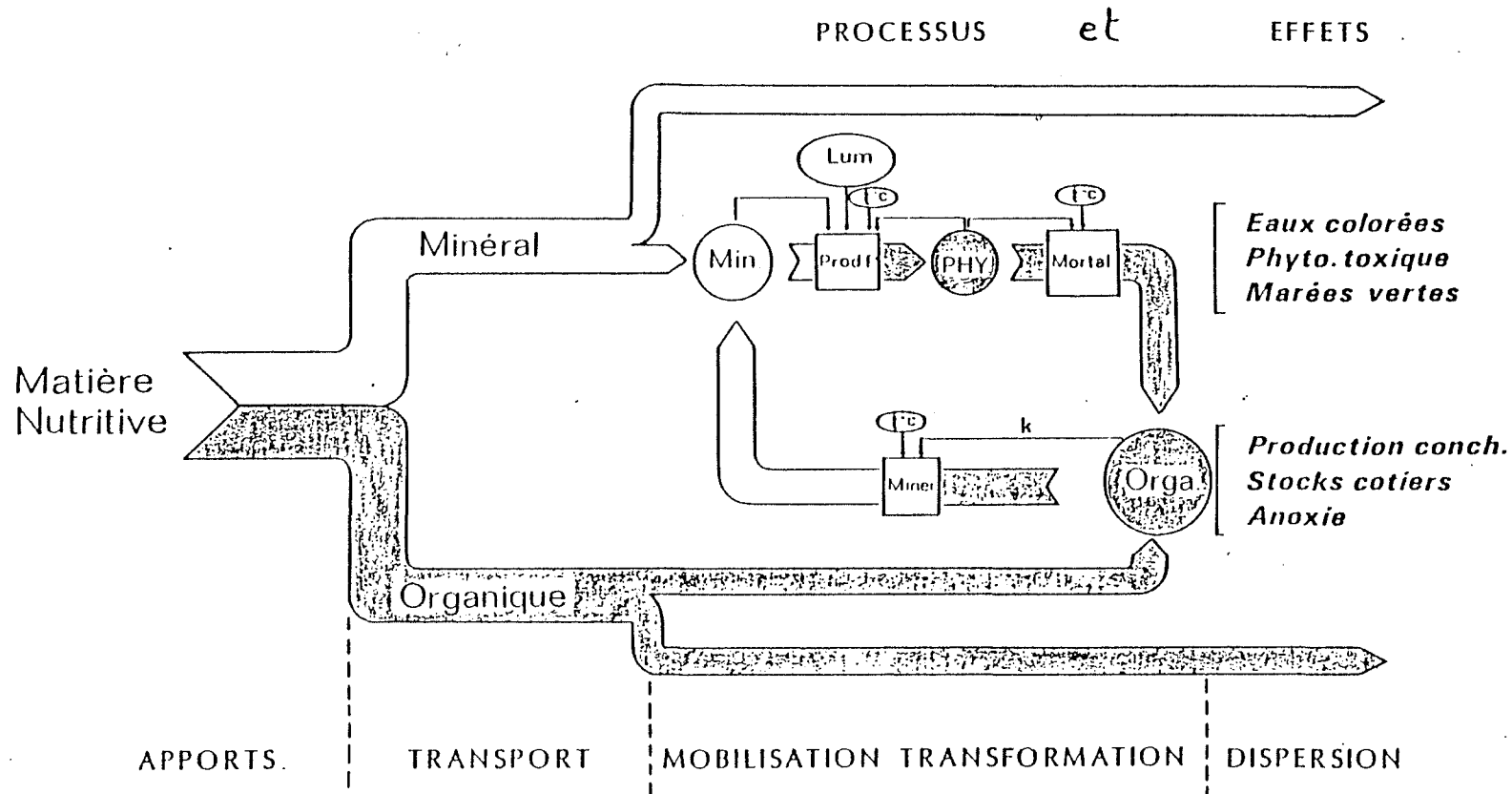


Figure 1

- le bilan des **apports**, en particulier l'estimation des flux nets à travers les données de flux bruts, impliquant la connaissance du comportement des nutriments en eau douce,

- les conditions hydrodynamiques contrôlant le **transport** des matières nutritives dissoutes et particulaires de la côte vers le large : circulation des masses d'eau, temps de résidence, sédimentation - resuspension,

- les **transformations** assurées par le **réseau trophique** à travers notamment les deux processus clés gouvernant le cycle biogéochimique de l'azote : production primaire et minéralisation.

Les effets de l'enrichissement sont la conséquence de l'interaction de ces trois grands mécanismes. La relation "apports importants - forte eutrophisation" est loin d'être vérifiée. L'utilisation des nutriments par le réseau trophique sera d'autant plus efficace que les échanges avec le large seront limités et que les facteurs climatiques, température et lumière, seront favorables. Cette complexité fait apparaître de nouveaux concepts tels que : charge maximale de nutriments, zones sensibles, périodes critiques

Cadre national et international

Plusieurs programmes nationaux, en cours de réalisation, abordent en partie ou en totalité la thématique "enrichissement des zones côtières" : Marennes-Oléron, Ulves, Baie de Vilaine, Euphorbe, Programme National efflorescences marines, Greco-Manche baie de Seine, Ecothau, Eumeli (partie eutrophe).

Il existe par ailleurs un courant scientifique international, bien soutenu en Europe, sur le créneau "nutriments - eutrophisation" coordonné par le CIEM et la Convention de Paris sur les rejets d'origine tellurique, à travers l'existence de groupes de travail permanents.

En amont, des programmes tels que "Impact de l'agriculture intensive sur l'environnement" et surtout "EROS 2000" développent une recherche importante au niveau des apports (fluviaux et atmosphériques).

La communauté scientifique concernée est donc largement pluriorganisme au niveau national (INSU, CNRS, IFREMER, INRA, CEMAGREF) et l'ouverture vers l'Europe est déjà bien ciblée.

Eléments de stratégie

La **modélisation** occupe une place centrale, dans la réalisation du projet, en tant que révélateur de l'état des connaissances, pilotage des moyens et **intégration** des processus. Cela suppose de recenser les modèles, ou sous-modèles, relevant de la problématique "enrichissement" et d'analyser leur capacité, ou incapacité, à répondre aux questions posées. Cette démarche doit permettre d'identifier les processus à étudier prioritairement et d'orienter les travaux d'expérimentation et d'observation.

Les apports novateurs du projet reposent à la fois sur la capacité d'établir des ponts entre les disciplines, et sur le développement d'une recherche sectorielle originale. On peut déjà évoquer certains thèmes qui feront nécessairement l'objet d'un investissement scientifique :

- les structures dynamiques en milieu côtier (fronts et confinement),
- la spéciation des différentes formes de l'azote et du phosphore,
- la consommation des nutriments par les différents compartiments autotrophes et la reminéralisation par les compartiments hétérotrophes.

A N N E X E 2

L'INSTRUMENTATION

Les progrès techniques dont bénéficiera l'instrumentation océanographique résulteront essentiellement des adaptations spécifiques des progrès généraux dans la technologie de la mesure. L'environnement littoral profitera des progrès en informatique et en transmission des données, des recherches faites sur les matériaux nouveaux (composites, fibres optiques, etc), des nouveaux procédés anti-corrosion. Il en résultera des progrès dans la modularité, la miniaturisation et la marinisation des instruments dont le fonctionnement sera programmé sur de longues périodes avec des cadences de mesure adaptées aux phénomènes à observer.

Mais une autre caractéristique de l'instrumentation sera un accroissement de la demande en instrumentation nouvelle à mesure que s'élargira le champ d'investigation des océanographes (physique, chimie, biologie) et s'amélioreront les performances (précision, paramètres nouveaux) des capteurs. En particulier, on peut prévoir un développement du besoin en biocapteurs. Des équipements modulaires feront face à des demandes intégrées, mais variables selon les besoins, des paramètres de base (température, conductivité, oxygène dissous, chlorophylle, granulométrie), tandis que se développeront de nouveaux équipements pour la mesure *in situ* de nouveaux paramètres (nutrients, métaux trace, identification du plancton).

Parmi les thèmes non exclusifs de l'environnement littoral, mais le concernant directement, on peut citer :

- la sédimentologie et la morphologie

Les propriétés des sédiments et les caractéristiques morphodynamiques des fonds sont des données essentielles pour la connaissance de l'environnement littoral. Les capteurs acoustiques, optiques et radioactifs, qui ne perturbent pas le milieu échantillonné, seront appréciés pour les mesurer.

L'amélioration de la connaissance des vases demandera un effort particulier. Différents capteurs (gammadensimètres) permettent de mesurer densité et concentration mais ne donnent pas accès aux propriétés mécaniques, qui dépendent, outre de la concentration, des caractéristiques granulométriques et minéralogiques des sédiments et de la nature des eaux interstitielles. Les sondes rhéologiques (type SRIO du LCHF), basées sur la mesure du couple nécessaire pour faire tourner à vitesse constante un rotor dans un dépôt de vase, ouvrent une voie de développement d'instruments de mesure adaptés aux sédiments cohésifs.

Le suivi de traceurs radioactifs (périodes variant de 3 à 75 jours selon le radionucléide choisi) donne de bons résultats pour la mesure des transports par charriage ou en suspension. Cette méthode est sans doute proche de ses limites de précision et d'application. Elle est chère et souffre de contraintes de sécurité, mais très efficace.

Les sonars latéraux remorqués donnent des images acoustiques du fond. Leurs enregistrements restituent une image des structures sédimentaire (géomorphologie) et permettent de reconnaître le passage d'un type de fond à un autre type de fond. De grands progrès restent à accomplir pour passer du qualitatif au quantitatif (microbathymétrie) et aboutir à une reconnaissance automatique de la nature des fonds. Un objectif spécifique de l'environnement littoral sera la mise au point d'un équipement de cartographie ultra précise des fonds, intégrant les capacités complémentaires des sonars latéraux et des sondeurs multifaisceaux.

- La télédétection

La télédétection ne doit pas être perçue comme remplaçant les méthodes conventionnelles d'observation du milieu marin, mais comme les complétant. A partir des satellites, il est possible de mesurer quatre propriétés fondamentales de l'océan : sa brillance, sa température, sa topographie et sa rugosité, la couleur de ses couches superficielles. De ces paramètres on déduit : la température de surface de la mer, la direction et la force du vent, la hauteur de la houle et son spectre, les courants de surface, la hauteur de la marée, la concentration en chlorophylle. **L'originalité de la télédétection spatiale est le caractère synoptique des mesures avec des réserves sur les pas d'espace et de temps les séparant. L'instrumentation spatiale a déjà atteint un haut degré de précision. Elle est susceptible de progrès significatifs dans le domaine des capteurs actifs hyperfréquence.**

En utilisant l'ionosphère comme réflecteur pour les ondes électromagnétiques de la gamme HF (6 à 30 MHz), le radar à rétrodiffusion ionosphérique permet d'illuminer la surface de la mer, avec une résolution moyenne de 20 x 30 km sur plusieurs millions de km², jusqu'à 3 500 km de distance (ex. radar de Valensole). Les différentes parties du spectre en fréquence de l'onde rétrodiffusée permettent d'extraire des paramètres tels que le vent, les vagues et les courants. Cette technique est complémentaire de celles employées en télédétection spatiale (radiométrie passive en hyperfréquence, altimétrie radar et diffusiométrie). Elle est bien adaptée à l'environnement littoral pour lequel elle doit aider à tester des modèles de propagation de houle et contribuer à l'établissement de statistiques.

- Les capteurs

L'océanologie littorale a des besoins spécifiques, principalement en matière de mesures de flux et de biomasse. Parmi les équipements dont le développement est souhaitable, sont à citer en priorité : le cytomètre de flux ; diverses sondes avec capteurs de lumière, d'oxygène, de pH, de sels nutritifs ; le courantomètre Doppler (turbulence) ; les analyseurs d'images ; les enceintes d'expérimentation (expériences de marquage) ; les chemostats, microcosmes ; les automates d'indices biochimiques.

En microbiologie, retiennent en priorité l'attention les techniques d'immunofluorescence, les sondes génétiques et les analyseurs d'images.

- La localisation

La localisation précise des capteurs est une information indispensable en environnement littoral. Les flotteurs ARGOS (précision ± 250 m dans 50 % des cas et 9 ± 2 mesures/jour avec deux satellites opérationnels) conviennent bien pour des observations de longue durée (> 20 jours) mais les observations près des côtes et pour des durées < 20 jours requièrent une précision beaucoup plus grande. Il existe de nombreux systèmes de localisation à courte portée précis mais leur mise en oeuvre est assez lourde et ne se prête pas toujours à la localisation simultanée de nombreux flotteurs. Le système en cours de développement à IFREMER apportera une solution au problème posé. Aucune avancée technologique spectaculaire n'est à attendre dans ce domaine bien connu ; par contre l'ouverture du marché face à une demande accrue développera la concurrence et abaissera les prix.

- La formation

Le développement d'une instrumentation électronique sophistiquée et notamment d'équipements automatiques d'acquisition et de traitement de données appellera un accroissement de formation de techniciens chargés des réparations et de la maintenance.

– La concurrence étrangère

Le programme EUROMAR, sous-ensemble du projet EUREKA est intéressant à consulter pour le problème qui nous préoccupe. Il concerne en effet des équipements de mesures océanographiques. La durée moyenne d'exécution des projets est d'environ quatre ans ; elle caractérise donc assez bien la première moitié de la décennie à venir. Il est remarquable que la majorité des projets intéressent directement l'environnement littoral et que leurs lignes directrices correspondent aux progrès attendus cités en début d'Annexe.

Le marché français de l'instrumentation océanographique est actuellement limité, avec le plus souvent l'Etat comme principal client. Les conditions vont changer avec l'ouverture du Marché commun et le développement inéluctable des programmes d'environnement. **A l'horizon de la fin de la décennie des années 90 on peut imaginer avec réalisme que le marché de l'instrumentation océanographique en environnement littoral, – et notamment sous la pression d'une réglementation plus exigeante –, deviendra rentable et concurrentiel. Il conviendra que l'industrie française s'y prépare en choisissant ses créneaux et en s'adaptant aux contraintes du Grand Marché.** On ne perdra pas de vue que le marché mondial de l'instrumentation océanologique, toutes disciplines et application confondues (recherche, secteurs pétrolier et portuaire, aménagement du littoral, défense, pêche et aquaculture) approche 5,5 milliards de francs dont 5 milliards vont à la pêche (équipements spécifiques, notamment de positionnement des engins de pêche). L'étroitesse du domaine d'application de l'instrumentation en environnement marin n'est qu'apparente car les qualités de fiabilité, de précision, d'automatisation requises et l'appel aux hautes technologies ouvrent des perspectives d'extension à des secteurs tels que la médecine, le spatial et la défense.

La bonne mise en oeuvre des équipements et instruments repose sur des moyens navals adaptés ainsi que sur des laboratoires ("stations marines") bien équipés (en moyens informatiques notamment). La proposition d'englober le plateau continental dans le domaine de l'océanographie littorale correspond à la disponibilité, au moins à temps partiel, de navires hauturiers.

ANNEXE 3

<p style="text-align: center;">LES PROGRAMMES ETRANGERS</p>

Nous nous limiterons dans cette présentation à un exposé succinct de ce qui est fait ou de ce qu'il est prévu de faire par la Commission des Communautés Européennes et l'"Environmental Protection Agency" (E. P. A.) aux Etats-Unis.

La Commission des Communautés Européennes

En s'appuyant sur l'inquiétude croissante du public concernant les menaces sur notre environnement, la Commission a pris position en faveur d'une contribution européenne majeure à l'étude du changement global du climat. Le bien fondé de la dimension européenne dans ce domaine est formellement reconnu par l'Acte Unique Européen, qui désigne la protection de l'environnement et l'amélioration de sa qualité comme de nouveaux objectifs à poursuivre par les Etats membres de la Communauté. La communauté est consciente que sa responsabilité dans l'établissement d'une réglementation doit s'appuyer sur des connaissances scientifiques éprouvées. Elle identifie dans les besoins de la recherche trois niveaux :

- 1 - Connaissance des phénomènes de base
 - . Mécanismes des climats,
 - . Physiologie des organismes sous stress environnementaux,
 - . Fonctionnement, stabilité et vulnérabilité des écosystèmes,
 - . Métabolisme et effets des substances xénobiotiques sur l'homme, les animaux et les plantes,
 - . Interaction entre l'atmosphère, le sol et l'eau.

- 2 - Détection et interprétation des changements de l'environnement
 - . Amélioration des méthodes d'analyse des composants des différentes matrices environnementales,
 - . Observation de la terre par télédétection,
 - . Elaboration de méthodes pour le stockage et le traitement de données sur l'environnement, incluant les modèles,
 - . Description et évaluation des symptômes indicatifs de lésions sur les organismes,
 - . Etudes épidémiologiques sur les populations humaines exposées à la pollution de l'environnement,

- 3 - Prévention des dommages environnementaux
 - . Réhabilitation des écosystèmes perturbés ou dégradés,
 - . Recherches sur les possibilités de prédire ou atténuer les conséquences des perturbations naturelles ou anthropiques.

S'agissant plus spécifiquement de l'environnement marin et de sa qualité, la Commission considère que le problème principal concerne l'**eutrophisation** et la **contamination** de mers régionales relativement fermées : Mer du Nord, Baltique, Méditerranée. Des besoins de recherches sont identifiés en ce qui concerne le comportement **géochimique** et les **effets biologiques** des contaminants déversés par les rivières et autres rejets. De plus, une attention particulière est attirée sur la **dynamique** des sels **nutritifs** en zone côtière et leur relation avec les **proliférations algales**. La Commission recommande fortement une coordination de la recherche européenne en environnement marin, spécialement dans les mers régionales et en liaison avec les programmes globaux d'approche de l'environnement (PIGB).

En ce qui concerne l'**océanographie**, la Commission propose un accroissement de la multidisciplinarité et la focalisation des recherches sur les phénomènes à grande échelle. Dans le domaine côtier, en raison des implications socio-économiques découlant de connaissances des phénomènes physiques, chimiques et biologiques, les recherches sur les interactions continent/océan et sur l'écologie côtière sont jugées d'une importance majeure. Les objectifs spécifiques à poursuivre dans le thème de l'interaction continent/océan pourraient être :

"-l'amélioration des modèles numériques de simulation de la circulation intraocéanique,

- l'encouragement à la coopération entre équipes de disciplines différentes (océanographie physique et chimique, dynamique physique et chimique), pour contribuer à l'élaboration d'outils conceptuels permettant d'expliquer certains phénomènes fondamentaux tels que le cycle de l'azote ou du carbone au niveau de l'interface océan/atmosphère,

- renforcement des moyens affectés aux recherches dans ce domaine en aidant à la formation et à l'insertion de nouveaux chercheurs dans les équipes existantes".

Paradoxalement, lorsque l'on examine les tendances de la politique de recherche et le développement dans les états membres, un seul pays, la Belgique, affiche une priorité dans le domaine de l'océanographie au titre de la lutte contre les pollutions marines.

Des programmes de recherche viennent confirmer ces orientations en politique scientifique. Il s'agit notamment des programmes STEP, EPOCH, MAST et EUROMAR.

*** Programme STEP (Science et technologie pour la protection de l'environnement).**

Parmi les 9 domaines de recherche, 4 intéressent partiellement l'environnement littoral. Il s'agit des thèmes : "qualité des eaux" (analyse et conversion des polluants, effets des polluants), "Protection des sols et des eaux souterraines" (protection contre les polluants minéraux et organiques, effets des pratiques agricoles et forestières), "Recherche sur les écosystèmes" (écosystèmes aquatiques et côtiers, y compris les zones humides), "Technologies de protection de l'environnement" (recherche sur les déchets, réduction des émissions, technologies propres).

*** Programme EPOCH (Programme européen en matière de climatologie et de risques naturels).**

Parmi les 4 domaines de recherche, 2 intéressent partiellement l'environnement littoral. Il s'agit des thèmes : "Climats anciens et modifications climatiques" (modélisation des extrêmes, comportement transitoire du climat européen), "Phénomènes et modèles climatiques" (détection, modélisation et prédiction des changements climatiques), cycle du carbone, processus à la surface de la Terre, circulation océanique et flux air-mer).

*** Le programme MAST**

Le programme MAST ("Marine Science and Technology") de la Communauté Economique Européenne (CEE) a pour but de "contribuer à l'établissement d'une base scientifique et technologique pour l'exploration, l'exploitation, la gestion et la protection des mers côtières et régionales européennes". Plus précisément, ses objectifs sont les suivants : (1) améliorer la connaissance, la gestion et la protection du milieu marin (particulièrement des eaux côtières et des mers régionales européennes, y compris l'Atlantique N.E. (2) encourager le développement de nouvelles technologies pour l'exploration, la protection et l'exploitation des ressources marines (à l'exception de la pêche et des hydrocarbures) ; (3) améliorer la coordination et la coopération entre les programmes nationaux de "R et D" des Etats membres dans le domaine de la mer ; (4) renforcer la compétitivité industrielle dans les secteurs concernés ; (5) encourager l'élaboration de normes et de spécifications communes en vue du Marché de 1992 ; (6) soutenir la participation de l'Europe aux programmes océanographiques mondiaux ; (7) faciliter la formation et l'échange de personnel.

*** Le projet EUROMAR**

Le projet EUROMAR est la composante maritime du programme EUREKA. Ses travaux s'appliquent à la protection, l'exploitation et la gestion de l'environnement marin et des ressources marines. Les projets EUROMAR sont transnationaux et doivent mettre en oeuvre des technologies de pointe. Ils couvrent le domaine suivant : les instruments et méthodes de télédétection ; le développement et l'application de modèles ; la saisie et la gestion des données ; la mise en place et la méthodologie des mésocosmes ; le développement de navires de recherche, systèmes de transport et matériel de bord ; les instruments de mesure des transports sédimentaires, et systèmes d'échantillonnage des sédiments ; le développement de détecteurs et instruments de mesure des paramètres physiques, chimiques et biologiques ; les instruments et modèles pour l'évaluation des apports atmosphériques. La France participe à 6 des 20 projets arrêtés ou en cours dans le programme EUROMAR.

L'U.S. Environmental Protection Agency (EPA)

L'EPA a pour responsabilité d'identifier, d'évaluer et de contrôler les polluants dans l'environnement. Ses principales attributions sont : la réduction de l'exposition du public aux polluants dangereux ; la protection des écosystèmes sensibles ; l'amélioration de la gestion de l'environnement. Les responsabilités de l'EPA couvrent les polluants des eaux douces, estuariennes, côtières et océaniques. Elle découlent de plusieurs lois :

. Le "Federal water pollution control Act".

Il est en charge : du suivi et de la restauration éventuelle de la qualité des eaux de surface et souterraines ; du développement des études estuariennes ; du traitement des déchets ; de la réglementation sur les polluants non conventionnels, c'est-à-dire les métaux lourds, PCB, pesticides, etc., dans les effluents ; de l'établissement des critères de qualité de l'eau ; de la prévention et du contrôle des déversements d'hydrocarbures et des décharges thermiques ; de la réglementation sur les prétraitements, les autorisations de décharges polluantes dans les eaux de surface ; de l'établissement des critères de décharge de polluants dans la mer territoriale, les eaux de la zone contiguë et l'océan ; de la réglementation sur les dragages et les zones de dépôts ; de la réglementation sur les dépôts des boues d'égout.

. Le "Federal insecticide, fungicide, and rodenticide Act".

Il est en charge : de l'enregistrement et de la classification des pesticides au regard des dangers pour la santé humaine et les effets sur l'environnement ; de la conduite des programmes de recherche sur le sujet.

. Le "Marine protection, research and sanctuarien Act".

Son rôle s'étend : à la réglementation sur les dépôts dans l'océan de matériaux quelconques ; à la désignation des sites de dépôt ; à l'établissement des critères des dépôts en mer.

. Le "Toxic substances control Act".

Il définit la réglementation sur les substances chimiques dangereuses et donne les informations sur la santé et l'implication des produits toxiques dans l'environnement.

L'EPA est caractérisée par l'étendue de ses attributions. En amont, elle dirige l'ensemble des recherches (faites au sein de ses propres laboratoires ou pilotées par elle à l'extérieur) en environnement ayant une répercussion sur la santé de l'homme ou la qualité de sa vie. Elle concourt ainsi à l'élaboration d'une réglementation qu'elle est chargée de faire appliquer aux échelons régionaux et locaux. En somme, elle a la maîtrise d'ouvrage de l'environnement.

Quatre laboratoires de l'EPA se partagent les études sur les interactions physico-chimiques, l'écologie benthique et les bioaccumulations, la culture d'organismes marins, la biochimie, la radio-chimie, l'histologie, la pathobiologie, la toxicologie aquatique, l'écologie microbienne et les biotechnologies. Deux

navires recueillent les données en mer et sur les grands lacs. Elle agit en concertation avec la "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA) et l'"U.S. Army Corps of Engineers".

Les thèmes de recherche exploratoire retenus actuellement par l'E.P.A. concernent : la sélection de l'habitat chez les invertébrés benthiques et la comparaison avec les communautés fixées près des dépôts ; les interactions entre le microbiote et les polluants dans les sédiments ; les taux de transformation microbienne et le devenir des hydrocarbures polycycliques aromatiques ; la dynamique des populations dans les nourriceries estuariennes.

PERSONNES CONTACTEES

M. AMIARD J. C.	C.N.R.S. Faculté de Pharmacie Nantes
Mme AMIARD-TRIQUET C.	" "
M. AMINOT A.	IFREMER DERO/EL Brest
M. BACCI E.	Université de Sienna (Italie)
M. BERTHOME J. P.	IFREMER CSRU Nantes
M. BERVAS J. Y.	IFREMER SDIT/ICA Brest
M. BEWERS M.	Bedford Institute Canada
M. BONNEFILLE	Laboratoire National d'Hydraulique Chatou
M. CAILLIAU E.	IFREMER DERO/D Paris
M. CHARDY P.	IFREMER DERO/EL Brest
M. CHAUSSEPIED M.	IFREMER DERO/EL Brest
M. COEFFE	Laboratoire National d'Hydraulique Chatou
M. CORMIER	Faculté de Médecine Rennes
M. COSSA D.	IFREMER DERO/MR Nantes
M. DESAUNAY Y.	IFREMER DRV/RH Nantes
M. DUPRE M.	S. E. Environnement/SRETIE Paris
M. EHLER	N O A A (USA)
M. JEANSON P.	S. E. Environnement/DPPR Paris
M. JOANNY M.	IFREMER DERO/EL Brest
M. JOUANNEAU	IGBA- CNRS Bordeaux
M. GALGANI F.	IFREMER DERO/MR Nantes
M. GAUDIN T.	MRT Centre de Prospection et d'Evaluation
M. GAUTHIER	IFREMER DREC Paris
M. GENTEN P.	IFREMER DERO/EL Brest
M. GROS P.	IFREMER DERO/EL Brest

M. HERAL M.	IFREMER DRV/RA La Tremblade
M. LASSUS P.	IFREMER DERO/MR Nantes
M. LATOUCHE C.	IGBA – CNRS Bordeaux
M. LAUBIER L.	IFREMER HCS Paris
Mme LE BAUT C.	IFREMER DERO/MR Nantes
M. LECLERC	M R T Paris
M. LE HIR	IFREMER DERO/EL Brest
M. MADELAIN F.	IFREMER DERO/PE Paris
M. MANOHA	Laboratoire National d'Hydraulique Chatou
M. MASSOUD Z.	CNRS/PIREN
M. MENESGUEN A.	IFREMER DERO/EL Brest
M. MERCERON M.	IFREMER DERO/EL Brest
M. MICHEL P.	IFREMER DERO/MR Nantes
M. MONBET Y.	IFREMER DERO/EL Brest
M. MOUSSEL	S. E. Environnement/DPPR Paris
M. POGGI R.	IFREMER/CSRU Nantes
Mme POMMEPUY M.	IFREMER DERO/EL Brest
M. PRUD'HOMME	Université de Bordeaux
M. ROMANA L.A.	IFREMER DERO/EM Toulon
M. RAVOUX G.	IFREMER/CSRU Nantes
M. SALOMON J.C.	IFREMER DERO/EL Brest
M. TISSEAU DES ECOTAIS	Mission Interm. MER
M. THEYS	S. E. Environnement (Cabinet) Paris
Melle VASSEUR P.	Université de Metz
M. WEBER J.	IFREMER DRV Paris