



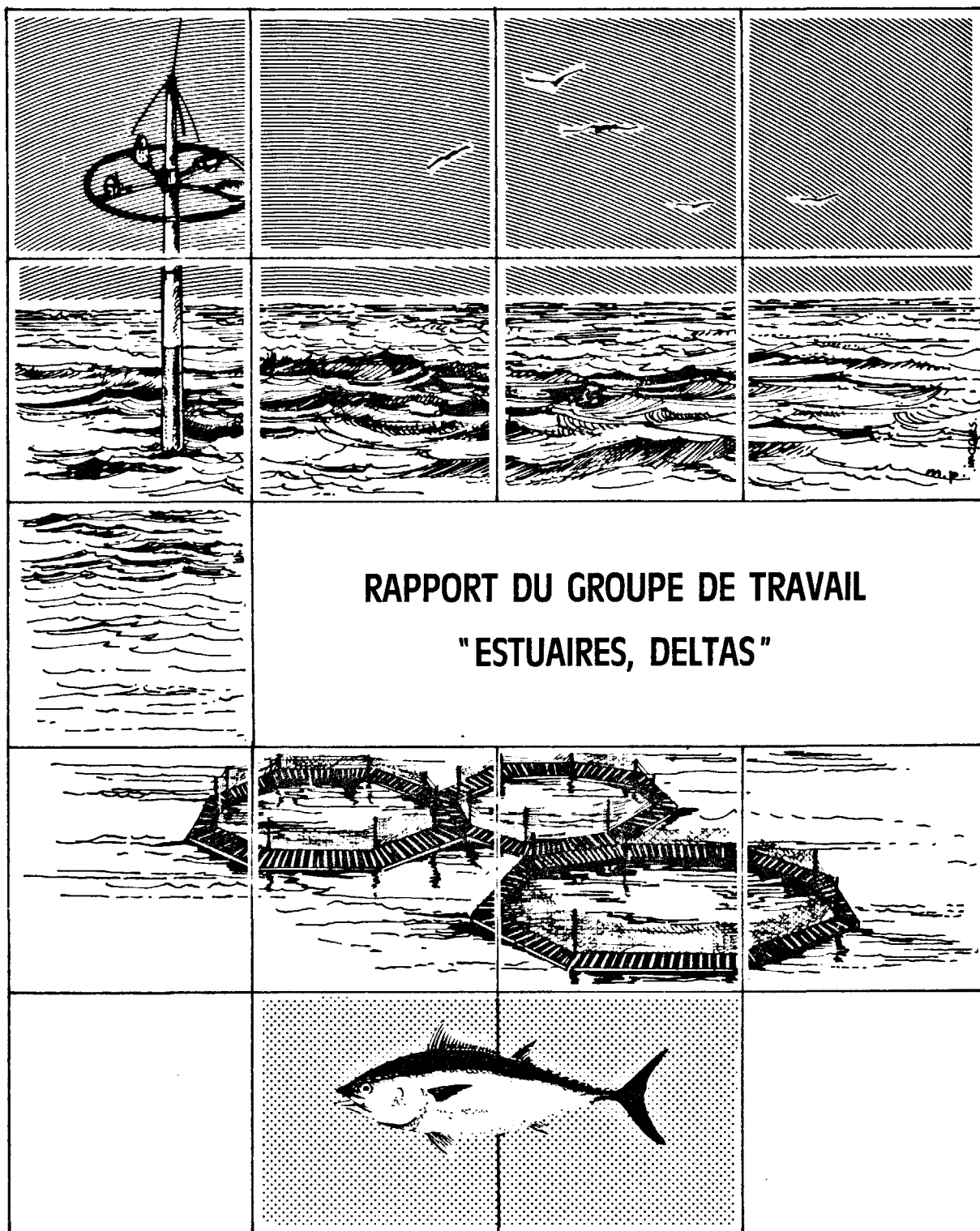
Publications du

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS

Découvrez plus de documents
accessibles gratuitement dans [Archimer](#)



Rapports scientifiques et techniques n° 34 - 1977



- Les Publications Scientifiques et Techniques du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) comportent les séries suivantes :

The Scientific and Technical Publications of Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) contain the following serials :

- Rapports Scientifiques et Techniques - ISSN 0339-2899. 1971
- Rapports Economiques et Juridiques - ISSN 0339-2910. 1973
- Recueil des Travaux du Centre Océanologique de Bretagne - ISSN 0336-3112. 1972
- Résultats des Campagnes à la Mer - ISSN 0339-2902. 1971
- Actes de Colloques - ISSN 0335-8259. 1971

- Les travaux publiés dans ces séries sont analysés par :

The works published in these serials are analysed by :

- Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts
- Bibliographie Géographique Internationale
- Biological Abstracts
- Bulletin Signalétique du C.N.R.S. - Informascience
- Chemical Abstracts
- Norois - Chronique Océanographique
- Hydrographische Bibliographie
- Oceanic Abstracts
- Oceanographic Abstracts and bibliography - Deep Sea Research
- Pollution Abstracts
- Underwater Information Bulletin
- Zoological Record

- Les demandes d'information et les commandes concernant toutes les publications scientifiques et techniques du CNEXO doivent être adressées à :

The inquiries and orders which concern the whole of CNEXO scientific and technical publications have to be mailed to :

SECTION DOCUMENTATION
CENTRE OcéANOLOGIQUE DE BRETAGNE
B.P. 337
29273 BREST CEDEX

Les publications envoyées en échange doivent être expédiées à cette même adresse.

The publications sent in exchange have to be forwarded to the same address.

**PUBLICATIONS DU
CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCÉANS
(CNEXO)**

Rapports Scientifiques et Techniques n° 34

**RAPPORT DU
GROUPE DE TRAVAIL
"ESTUAIRES, DELTAS"**

présidé par

L'Ingénieur Général de l'Armement BOURGOIN

BREST

TABLE DES MATIERES

	Pages
GENERALITES	
1. INTRODUCTION	1
2. CREATION ET OBJECTIF DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES, DELTAS"	2
2.1. CREATION DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES, DELTAS".	
2.2. OBJECTIF DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES, DELTAS".	
2.3. COMPOSITION ET METHODE DU GROUPE DE TRAVAIL. LES GROUPES THEMATIQUES	
3. RAPPEL SUR LES ESTUAIRES ET LES DELTAS.	4
3.1. DEFINITION ET CARACTERISTIQUES.	
3.2. HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE.	
3.3. MILIEU SOLIDE.	
3.4. PROPRIETES CHIMIQUES.	
3.5. MILIEU VIVANT.	
4. ENQUETE SUR LES RECHERCHES MENEES EN FRANCE SUR LES ESTUAIRES ET LES DELTAS.	6
THEME 1 : LA PRODUCTION PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE EN RELATION AVEC LES PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES.	
1. INTRODUCTION.	7
2. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SOUS-ECOSYSTEMES PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE.	08
2.1. BLOCS 1 et 2 : STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT.	
2.2. BLOC 3 : LES BACTERIES HETEROTROPHES.	
2.3. BLOCS 4 et 5 : LES SUBSTANCES NUTRITIVES MINERALES ET ORGANIQUES PARTICULAIRES ET DISSOUTES.	
2.4. BLOC 6 : LES MINERAUX.	
2.5. BLOC 7 : LES POLLUANTS.	
2.6. BLOC 8 : HYDROLOGIE, PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES, HYDRO-DYNAMIQUES.	

2.7. BLOC 9 : LE ZOOPLANCTON.

3. STRATEGIE DE PRELEVEMENT, 14

3.1. LES PHENOMENES A GRANDE ECHELLE.

3.2. LES PHENOMENES A PETITE ECHELLE.

4. TRAITEMENT MATHEMATIQUE DES DONNÉES ; MODÉLISATION, 15

THEME 2 : LA DYNAMIQUE DES ECOSYSTEMES A PARTIR DE L'ECHELON
SECONDAIRE ; ROLE SPECIFIQUE DES ESTUAIRES COMME ZONE
D'ENGRAISSEMENT ET DE TRANSITION ENTRE L'EAU DOUCE ET
L'EAU DE MER POUR LES ESPECES MIGRATOIRES.

1. INTRODUCTION 16

2. SCHEMA ANALYTIQUE 17

2.1. ANALYSE DE LA STRUCTURE.

2.2. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT.

2.3. ANALYSE DU COMPORTEMENT.

3. PROBLEMES PARTICULIERS AUX ESTUAIRES, 19

3.1. PRODUCTION ALGALE BENTHIQUE MACROPHYTIQUE ET MICROPHYTIQUE -
VEGETATION PHANEROGAMIQUE ET FERTILISATION.

3.2. LES ESTUAIRES, ZONE DE PASSAGE.

3.3. INTERET HALIEUTIQUE DES ESTUAIRES.

4. ELEMENTS DE STRATEGIE POUR LA REALISATION PRATIQUE D'UN
PROGRAMME, 21

4.1. PARAMETRES DE STRUCTURE.

4.2. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT.

THEME 3 : COMPORTEMENT DES POLLUANTS EN LIAISON AVEC LES SYSTEMES HYDROLOGIQUE, SEDIMENTOLOGIQUE ET BIOLOGIQUE - ASPECTS SANITAIRES ET MICROBIOLOGIQUE.

1. INTRODUCTION	25
2. RAPPEL SUR LA NATURE ET LA CLASSIFICATION DES POLLUANTS.	27
2.1. DEFINITION ET CLASSIFICATION DES POLLUTIONS.	
2.2. LOCALISATION DES SOURCES DE POLLUTION.	
3. COMPORTEMENT DES POLLUANTS DANS L'EMBOUCHURE.	29
3.1. LE MILIEU SOLIDE INERTE.	30
. POLLUANTS ASSOCIES A DES SUPPORTS PARTICULAIRES. (nature et destinée des particules, comportement de l'association particule-polluant)	
. AUTRES POLLUANTS (polluants organiques, détergents).	
3.2. LE MILIEU VIVANT.	34
. LE MILIEU VIVANT EN TANT QUE POLLUANT (germes pathogènes, développement anarchique des espèces phytoplanctoniques).	
. LE MILIEU VIVANT, FACTEUR DE CONCENTRATION OU DE DEGRADATION DES POLLUANTS.	
. LA POLLUTION THERMIQUE.	
4. CONCLUSIONS.	36

THEME 4 : MECANISMES ET MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES EN LIAISON AVEC L'HYDRODYNAMIQUE.

1. BILAN DES CONNAISSANCES , LACUNES A COMBLER,	39
1.1. HYDROLOGIE	
1.2. TRANSPORTS ET ACCUMULATION DES SEDIMENTS.	
1.2.1. TRANSPORT PAR CHARRIAGE.	
1.2.2. SEDIMENTS EN SUSPENSION.	
2. PROBLEMES LIES A L'AMENAGEMENT ET A L'UTILISATION DES EMBOUCHURES.	45
2.1. APPROFONDISSEMENT DES CHENAUX ET AUTRES MODIFICATIONS MORPHOLOGIQUES.	

2.2. PRELEVEMENTS D'EAU FLUVIALE.

2.3. CONTROLE DU DEBIT FLUVIAL PAR BARRAGES ET RETENUES.

CONCLUSIONS : LES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE ; RECOMMANDATIONS

1. LES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE.	49
1.1. PRODUCTION PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE.	49
1.1.1. <i>STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SOUS-ECOSYSTEMES PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE.</i>	
1.1.2. <i>LES BACTERIES HETEROTROPHES</i>	
1.1.3. <i>LES SUBSTANCES NUTRITIVES MINERALES ET ORGANIQUES PARTICULAIRES ET DISSOUTES.</i>	
1.1.4. <i>LES MINERAUX</i>	
1.1.5. <i>LES POLLUANTS</i>	
1.1.6. <i>HYDROLOGIE ; PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET HYDRODYNAMIQUES.</i>	
1.2. LA DYNAMIQUE DES ECOSYSTEMES A PARTIR DE L'ECHELON SECONDAIRE.	52
1.2.1. <i>ANALYSE DE LA STRUCTURE DE L'ECOSYSTEME</i>	
1.2.2. <i>ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DE L'ECOSYSTEME</i>	
1.2.3. <i>ANALYSE DU COMPORTEMENT DE L'ECOSYSTEME</i>	
1.2.4. <i>PROBLEMES PARTICULIERS AUX EMBOUCHURES.</i>	
1.3. LE COMPORTEMENT DES POLLUANTS.	53
1.3.1. <i>LE COMPORTEMENT DES POLLUANTS</i>	
1.3.2. <i>L'EXPORTATION DES POLLUANTS EN MER.</i>	
1.3.3. <i>EFFETS DES POLLUTIONS</i>	
1.4. LES MECANISMES ET MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES EN LIAISON AVEC L'HYDRODYNAMIQUE.	55
1.4.1. <i>BIBLIOGRAPHIE ANALYTIQUE ET ETUDE DOCUMENTAIRE DES ESTUAIRES FRANCAIS.</i>	
1.4.2. <i>ETUDE DOCUMENTAIRE DES INCIDENCES CONSTATEES DES AMENAGEMENTS SUR L'ENSEMBLE DES PHENOMENES HYDROLO- GIQUES ET SEDIMENTAIRES.</i>	
1.4.3. <i>ETUDE DES TRANSITS LATERAUX, DE LA DISPERSION ET DES MELANGES VERTICAUX D'EAU ET DE SUSPENSION, EN RELATION AVEC LES PHENOMENES DE STRATIFICATION VERTICALE ET LATERALE.</i>	
1.4.4. <i>ROLE DU "POINT NODAL" DE LA CIRCULATION RESIDUELLE DU FOND DANS LE RENOUVELLEMENT DES MASSES D'EAU ET DANS LE PIEGEAGE DES MATIERES EN SOLUTION ET EN SUSPENSION.</i>	

- 1.4.5. *BILANS GLOBAUX DU RENOUVELLEMENT ET DU TEMPS DE RESIDENCE DES EAUX DOUCES ET MARINES ET DES SEDIMENTS EN SUSPENSION.*
- 1.4.6. *MODALITES DE DISPERSION EN MER DE L'EAU FLUVIALE, DES SEDIMENTS EN SUSPENSION, DES NUTRIENTS ET DES POLLUANTS.*

2. RECOMMANDATIONS.

57

- 2.1. *URGENCE D'UNE RECHERCHE PLURIDISCIPLINAIRE GENERALISEE.*
- 2.2. *NECESSITE DE MISE EN PLACE D'UNE STRUCTURE DE COORDINATION.*
- 2.3. *METHODOLOGIE D'ETUDE.*
- 2.4. *INTERET DES MONOGRAPHIES PAR EMBOUCHURE.*
- 2.5. *INSTRUMENTATION.*
- 2.6. *COORDINATION AVEC LES PAYS ETRANGERS.*
- 2.7. *RACCORDEMENT AVEC LE RESEAU NATIONAL D'OBSERVATION DE LA QUALITE DU MILIEU MARIN.*
- 2.8. *ELARGISSEMENT DU PROGRAMME.*
- 2.9. *D.O.M. - T.O.M.*

ANNEXES

ANNEXE 1 - LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES-DELTAS"	63
ANNEXE 2 - LISTE DES MEMBRES DES GROUPES THEMATIQUES	64
ANNEXE 3 - RESULTATS DE L'ENQUETE SUR LES RECHERCHES MENEES EN FRANCE SUR LES ESTUAIRES ET LES DELTAS	67
ANNEXE 4 - LISTE D'ETUDES ET RECHERCHES A ENTREPRENDRE CONCERNANT LE THEME 4.	85

GLOSSAIRE

89

A B S T R A C T

The objective proposed by the Centre National pour l'Exploitation des Océans for the Estuary-Delta Working Group was to formulate and recommend a research program on estuaries and deltas, in order to obtain a working comprehension of the natural processes of these environments in relation to their use so as to define guidelines for their proper management.

Having initially recognized the complex, multidisciplinary nature of the research required, the group enlarged its initial scope and competence by creating 4 thematic groups :

Theme 1 : Primary and paraprimary production in relation to physical and chemical processes,

Theme 2 : Ecosystem dynamics from the secondary production level upward,

Theme 3 : The behaviour of pollutants in relation to hydrodynamic, sedimentological and biological processes ; sanitary and microbiological aspects.

Theme 4 : Sediment transport processes in relation to hydrodynamics.

The work of these thematic groups, which is the object of this report, has enabled the formulation of major research axes for the coming years and a certain number of recommendations. This report is completed by the results of an inquiry into the research organisations in these domains.

GENERALITES

1. INTRODUCTION

De tout temps, les estuaires et les deltas ont été des carrefours privilégiés des continents et des océans pour les activités humaines. Les usages dont ils sont l'objet peuvent être divisés en deux grandes classes : les usages extractifs et les usages non extractifs.

Parmi les usages extractifs on peut citer :

- *la pêche sous diverses formes* : de nombreuses espèces de poissons et de crustacés séjournent, pendant au moins une phase de leur développement, dans les estuaires qui jouent le rôle de véritables nurseries;
- *l'aquaculture* (poissons et coquillages), qui trouve dans les estuaires des facteurs spécifiques favorables : faible agitation, nourriture;
- *l'exploitation des agrégats* : sables, graviers, vase, maërl;
- *les dragages* destinés en principe à améliorer la navigabilité des chenaux;

Parmi les usages non extractifs, on peut citer :

- *la navigation* : les ports de toutes tailles ont toujours recherché l'abri des estuaires;
- *les loisirs*, qu'il s'agisse des activités de la plaisance, de la baignade ou du spectacle d'une réserve naturelle;
- *les rejets urbains et industriels* qui sont à la mesure de la densité des activités humaines;
- l'eau de mer considérée comme *réfrigérant* pour les centrales thermiques ou nucléaires.

A l'énumération non exhaustive de ces usages, on ne peut manquer d'être frappé par la compétition qui existe entre certains d'entre eux et par les conflits que pourrait engendrer leur libre exercice. Certes, les milieux estuariens et deltaïques ont été l'objet en France de nombreuses études depuis le siècle dernier, orientées en général, soit vers des finalités scientifiques particulières, soit vers des objectifs liés à la navigation. Il faut reconnaître cependant que l'approche spécifique de problèmes particuliers a laissé de côté les phénomènes les plus complexes concernant les processus physico-chimiques, biologiques et sédimentologiques. En fait, les estuaires et les deltas constituent un interface majeur et très complexe entre les continents et les océans pour les cycles géochimiques de matière dissoute et particulaire et pour les cycles biologiques. Il se trouve que la solution des problèmes, actuels et à venir, concernant les estuaires et les deltas, et notamment de ceux qui résultent de la pollution, implique une approche globale, ou tout au moins pluridisciplinaire, s'appuyant sur

des méthodes modernes de traitement de l'information. Il s'agit donc en fait d'un véritable tournant aussi bien dans les objectifs pratiques, limités dans le passé et désormais complexes et souvent contradictoires, que dans les études, spécifiques autrefois et intégrées aujourd'hui.

Conscients du rôle des estuaires dans des domaines socio-économiques variés, plusieurs pays ont déjà créé des associations et des groupes de travail dont l'importance s'avère chaque jour plus grande. Ainsi l'"Estuarine Research Federation" aux Etats-Unis, ou l'"Estuarine and Brackish Water Association" en Grande-Bretagne, font l'objet d'échanges fructueux. Sur le plan international, le "Scientific Committee on Oceanographic Research" (SCOR) a créé un groupe de travail intitulé "River Input to Ocean System" (RIOS).

En France, le Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) a également ressenti le besoin de faire le point de l'acquis et des études à entreprendre dans le domaine des estuaires et deltas. C'est ainsi qu'il a créé un groupe de travail ad hoc.

2. CREATION ET OBJECTIF DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES, DELTAS".*

2.1. CREATION DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES, DELTAS"

Le Groupe de travail "ESTUAIRES, DELTAS" a pris naissance le 21 Juin 1974 au sein du Comité Scientifique et Technique (CST) du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO), à la demande de la Direction des Programmes de cet organisme. Dans le cadre des activités de son Département 3 "Intervention de l'homme dans la mer et aménagement du littoral", le CNEXO souhaitait approfondir et élargir ses informations dans ce domaine afin d'élaborer un programme national.

Pour conserver au présent rapport un caractère précis sur le plan scientifique mais général quant à sa valeur, susceptible de lui assurer une large diffusion, on s'est affranchi de la description d'opérations type, dont la planification et la programmation relèvent de la Direction du CNEXO.

Il faut aussi reconnaître que, dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de dresser un catalogue d'opérations pluridisciplinaires d'une certaine valeur dans le temps. Le Groupe de travail est néanmoins conscient de l'importance majeure de projets pilotes intégrés (voir recommandations) et en a testé la faisabilité en préparant officieusement deux dossiers pour de telles opérations.

2.2. OBJECTIF DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES, DELTAS".

Conformément à sa vocation générale de promotion de la recherche en vue de la mise en valeur du domaine océanique, la mission confiée par le CNEXO au Groupe de travail était de formuler des recommandations et de définir un programme d'études et de recherches sur les estuaires et

* Bien qu'il soit apparu plus adéquat -selon une suggestion du Professeur J.M. PERES- d'employer l'expression "zones de dilution", l'usage s'est conservé dans le Groupe de travail d'utiliser celle, plus imagée, d'"ESTUAIRES, DELTAS".

les deltas, permettant de maîtriser la connaissance des phénomènes naturels et des usages les concernant, afin de dégager les contraintes imposées à leur bonne gestion.

2.3. COMPOSITION ET METHODE DU GROUPE DE TRAVAIL - LES GROUPES THEMATIQUES.

Dès sa création, il est apparu au Groupe de travail que les études à entreprendre pouvaient être présentées sous la forme de dualités variées qui montraient bien la diversité et la complexité des problèmes à résoudre :

- usages extractifs et non extractifs du milieu marin;
- milieu vivant et milieu inerte;
- milieu liquide et milieu solide;
- effets immédiats (directs) et à long terme (indirects).

Pour résoudre les problèmes pratiques posés par l'aménagement des estuaires et des deltas, il faut aborder, au niveau de la recherche, les relations complexes des liaisons entre les sciences "naturelles" et "exactes". Cette constatation a convaincu le Groupe, dès le début de ses travaux, de la nécessité d'une approche pluridisciplinaire dans beaucoup de cas et d'une orientation vers la découverte de méthodes globales de compréhension des processus spécifiques des estuaires et deltas.

Ainsi, le Groupe de travail "estuaires, deltas", constitué à l'origine de membres du CNEXO et de son Comité Scientifique et Technique (CST), ou de scientifiques appartenant aux organismes de rattachement des membres du CST, a évolué rapidement de façon, d'une part, à étendre sa compétence scientifique et, d'autre part, à introduire systématiquement l'esprit pluridisciplinaire dans ses travaux. Les quatre groupes thématiques suivants ont été créés :

THEME 1 - *La production primaire et paraprimaire en relation avec les processus physico-chimiques.*

THEME 2 - *La dynamique des écosystèmes à partir de l'échelon secondaire ; rôle spécifique des estuaires comme zone d'engraissement ou région de transition entre l'eau de mer et l'eau douce pour les espèces migratoires.*

THEME 3 - *Le comportement des polluants en liaison avec les systèmes hydrologique, sédimentaire et biologique. Aspects sanitaires et microbiologie.*

THEME 4 - *Les mécanismes et mouvements sédimentaires en liaison avec l'hydrodynamique.*

Il est apparu, à l'expérience de nos travaux, que l'ensemble des recherches à promouvoir était couvert, avec certains recouvrements, par les quatre thèmes ci-dessus. En se plaçant au terme aval du programme à définir et pour mieux en marquer la finalité, un THEME 5 a été formulé de la manière suivante : *"aménagement et mise en valeur des estuaires et deltas; incidences socio-économiques"*. Compte tenu du caractère souvent inadéquat à la gestion de la connaissance scientifique actuelle des estuaires et deltas, malgré leur fréquentation ancienne, le groupe a décidé de ne pas englober le thème 5 dans son mandat. Les quatre premiers thèmes de réflexion se sont révélés suffisamment homogènes, autonomes et complémentaires, pour en conserver la présentation et la structure dans le rapport final.

L'Annexe 1 donne la liste des membres du Groupe de travail "ESTUAIRES, DELTAS".

L'Annexe 2 donne la liste des membres des Groupes Thématiques 1, 2, 3, 4. On a marqué d'un astérisque les membres du Groupe de Travail.

3. RAPPEL SUR LES ESTUAIRES ET LES DELTAS.

3.1. DEFINITION ET CARACTERISTIQUES.

Les estuaires et les deltas constituent l'ensemble des interfaces entre les fleuves et les océans. Possédant à la fois des caractéristiques fluviales et océaniques, ils ont cependant des propriétés spécifiques se manifestant principalement sous les formes d'une hydrologie (zone de dilution) et d'une hydrodynamique particulières et de propriétés sédimentologiques et géochimiques originales. Ces propriétés physiques et chimiques confèrent aux estuaires et deltas une fonction biologique (flore et faune) se traduisant par des écosystèmes également originaux.

L'estuaire, ou le delta, fait partie d'une ensemble englobant le bassin versant dans lequel les eaux douces charrient les sels minéraux ("nutrients") et les polluants et une zone océanique. Dans le cadre des objectifs du Groupe de travail, il n'est pas nécessaire d'assigner des frontières précises en amont (marée saline ou dynamique) comme en aval, mais il est souhaitable plutôt de ne pas ignorer les causes (en amont et en aval) et les effets (en aval) liés à ce qui se passe dans le système estuarien ou deltaïque proprement dit.

Malgré le titre du Groupe de travail, qui implique une séparation en deux environnements distincts : estuaires et deltas, sur le plan dynamique, ces milieux ne sont que les deux extrêmes d'un système continu. Sur le plan morphologique, ces deux environnements se distinguent facilement : un delta est une avancée de la côte liée à des accumulations fluviales qui gagnent sur la mer, tandis qu'un estuaire est une zone de retrait de la côte où la mer se mélange à l'eau fluviale. Par contre, les mécanismes hydrodynamiques qui sont l'élément moteur de tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques, sont fondamentalement les mêmes dans les deux et ne diffèrent que par leur intensité et l'existence de masses d'eau oscillantes dans les estuaires proprement dits. *Le fait essentiel de ces milieux est d'être des zones de mélange d'eau douce fluviale et d'eau salée marine.* De la nature, la géométrie et l'intensité des gradients de mélange entre ces deux environnements aqueux, en liaison avec les apports sédimentaires, dépendra le type "estuarien" ou "deltaïque" de l'embouchure. D'une façon schématique, un delta correspond à un environnement où l'élément fluvial domine, soit par son débit ou par la faible dynamique océanique (la marée). Un estuaire est une zone où l'élément marin a tendance à dominer l'élément fluvial, généralement à cause d'une marée relativement importante.

Les variations saisonnières de l'écoulement fluvial, représentées par le débit liquide instantané, fait qu'une embouchure fluviale peut être tantôt du type "deltaïque", tantôt du type "estuarien". En France, il n'existe pratiquement pas d'embouchure où ceci se produit, car il n'existe pas de zones où la marée soit modérée. En effet, sur la côte Méditerranéenne la marée est pratiquement inexistante (< 50 cm), et les fleuves ont une tendance "deltaïque"

marquée par une relative absence de mélange entre l'eau douce et l'eau salée se traduisant par des gradients et des stratifications de salinité très marqués. Sur la côte Atlantique, par contre, l'amplitude des marées est élevée (> 3 M), ce qui amplifie les phénomènes de mélange eau douce-eau salée, créant un environnement "estuarien" marqué par des gradients de salinité plus faible. Ainsi, les embouchures des rivières françaises sont bi-polarisées avec deux groupes nettement distincts : l'Atlantique et la Méditerranée.

Cette bi-polarisation est la raison pour laquelle les scientifiques français ont toujours eu tendance à classer les embouchures fluviales en deux catégories distinctes : estuaires et deltas. Dans les pays où les phénomènes de marée existent à toutes les échelles, par exemple aux U.S.A., la tendance est plutôt de considérer les deux comme exprimant le même type de phénomène, mais seulement à différentes intensités. Cette tendance se reflète dans la définition des estuaires de Pritchard : *"un estuaire est un plan d'eau ouvert à l'océan d'un côté, et à une rivière de l'autre et où il se produit une dilution mesurable de l'eau de mer par l'eau douce"*. Cette définition s'applique à n'importe quelle embouchure, deltaïque ou estuarienne.

Considérant la similarité essentielle des phénomènes hydrodynamiques affectant les deltas et les estuaires, le Groupe de travail a décidé de les traiter ensemble et de les englober sous l'appellation *d'embouchure fluviale*. Toutefois, compte tenu des oscillations des masses d'eau et des sédiments en suspension caractérisant les estuaires, sensu stricto, et en raison des conséquences que ces mouvements peuvent avoir sur certains mécanismes (échange chimique entre autres et sédiments notamment), il sera nécessaire, à ce niveau, de prendre en compte les particularités de chaque embouchure fluviale.

3.2. HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE.

Les estuaires et les deltas partagent la caractéristique essentielle d'être des zones de dilution de l'eau douce dans l'eau de mer. La différence de densité eau douce-eau de mer influence directement l'écoulement. Les facteurs principaux à prendre en compte pour l'étudier sont le débit d'eau douce, l'importance de la marée, la géométrie et la nature des fonds, tandis que la force du vent et la force de Coriolis peuvent avoir des effets accessoires, encore mal connus et peut être non négligeables. Dans le cas des estuaires, les faibles marnages sont généralement accompagnés d'un écoulement stratifié, composé d'un coin d'eau douce surmontant un coin salé ; les marnages importants sont généralement associés à un mélange turbulent des eaux correspondant à une densité homogène sur un profil vertical et variant d'aval en amont.

3.3. MILIEU SOLIDE.

La prédominance des courants de flot au fond dans les embouchures engendre un transport de sable vers l'amont tandis que le courant fluvial exerce une action opposée vers l'aval. Il en résulte une convergence des apports par charriage marin et fluvial. En ce qui concerne les sédiments en suspension, la convergence des courants résiduels de fond dans

la partie amont de l'intrusion saline, "point nodal", engendre un piégeage et une concentration des particules fines appelées *bouchon vaseux*. Le cycle des variations des coefficients de marée (morte eau et vive eau) et des variations saisonnières de débit fluvial est responsable d'échanges des particules fines entre le "bouchon vaseux" en pleine eau et la couche "crème" sur le fond ainsi que des migrations oscillatoires aval → amont des matériaux fins.

Un autre phénomène, encore mal connu, paraît avoir une grande importance : c'est celui des transports solides se traduisant par la "migration" des bancs et des chenaux en l'absence d'une intervention humaine.

3.4. PROPRIETES CHIMIQUES.

Le matériel particulaire ou dissous peut être envisagé sous l'angle de sa destinée chimique, lors de sa dérive ou de sa sédimentation dans le système estuarien ou deltaïque. Les propriétés chimiques des embouchures varient largement en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques, de leur charge solide (fixe et mobile) et des apports de polluants. Schématiquement, on peut distinguer les composants chimiques conservatifs (ou non réactifs), dont la concentration est affectée par les processus physiques de mélange, et les composants chimiques non conservatifs (ou réactifs), dont le comportement est influencé en outre par la composition des matériels, dissous et particulaire, et par le temps de résidence dans le système estuarien ou deltaïque. Il faut insister, d'une part, sur le rôle des particules en suspension, vecteurs préférentiels de nombreuses pollutions, et d'autre part, sur l'implication du milieu vivant dans la chaîne des réactions chimiques.

3.5. MILIEU VIVANT.

La diversité de la flore et de la faune dans les embouchures est conditionnée par la variabilité physico-chimique du milieu liquide, la diversité des fonds et par la compétition entre les espèces. Le résultat est un nombre d'espèces réduit. Néanmoins, les espèces d'embouchure représentent une biomasse importante et ont une productivité élevée. Par ailleurs, malgré leur nombre réduit, les espèces d'embouchure forment des écosystèmes complexes.

4. ENQUETE SUR LES RECHERCHES MENEES EN FRANCE SUR LES ESTUAIRES ET LES DELTAS.

En marge de son objectif principal qui était de proposer un programme national de recherches sur les estuaires et les deltas, le Groupe de travail a voulu établir un bilan de l'effort français consenti à ce domaine et en présenter les résultats. C'est l'objet de l'annexe 3.

THEME 1

LA PRODUCTION PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE
EN RELATION AVEC LES PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES.

1. INTRODUCTION *

Il est sans doute utile de rappeler, dès l'abord, l'importance des estuaires et deltas en ce qui concerne le bilan de production de matière vivante dans les océans et les mers.

L'étude du fonctionnement des sous-écosystèmes, primaire et paraprimaire, premiers maillons de la chaîne de la vie, revêt donc une importance capitale; tout particulièrement dans les régions estuariennes, en raison des conditions eutrophes y régnant et qui sont très favorables au développement exubérant des populations microplanctoniques. Cette abondante synthèse de matière vivante s'ajoute à la forte charge détritique organique, caractéristique de ces zones diluées, pour constituer une réserve énergétique favorable au fonctionnement des chaînes secondaires, puis tertiaires, de l'éco-système : zones de pontes de nombreuses espèces pélagiques, aires de pêcheries et de conchyliculture.

Le tableau ci-dessus est, certes, optimiste, car il convient de ne pas oublier que dans les régions côtières, estuariennes et deltaïques, s'établissent des complexes industriels dont l'activité engendre des sous-produits (pollutions diverses : thermique, chimique ... etc) qui, rejetés dans le milieu, peuvent provoquer des altérations véritablement tératologiques dans le fonctionnement de l'écosystème, altérations défavorables à l'environnement et aux activités humaines mêmes dont elles sont la conséquence.

■ Les productions algales benthiques, macrophytique et microphytique, ainsi que la végétation phanérogamique qui sont, au même titre que le phytoplancton, des producteurs primaires et font donc partie intégrante du thème 1, seront néanmoins traitées au sein du thème 2 dans un paragraphe (3.3) relatif aux problèmes particuliers aux estuaires.

2. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SOUS-ECOSYSTEMES PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE.

L'organigramme ci-joint résume, en termes de paramètres à analyser, la structure et le fonctionnement du sous-écosystème primaire : blocs 1 et 2. Les blocs périphériques concernent les interrelations avec, d'une part, les autres sous-écosystèmes, et, d'autre part, les facteurs écologiques.

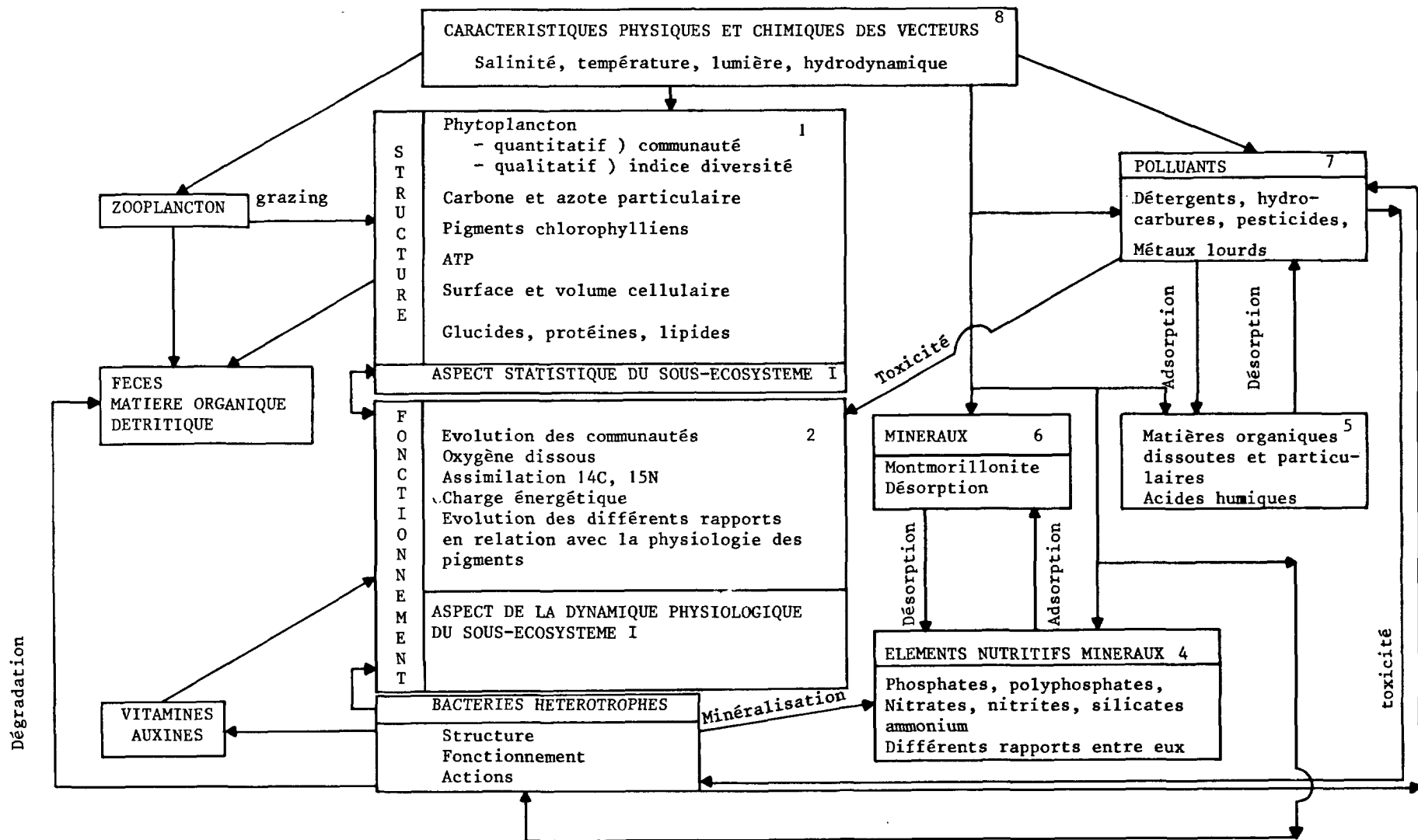
2.1. BLOCS 1 et 2 : STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT.

Ces blocs illustrent en partie la structure et le fonctionnement du sous-écosystème primaire. L'image instantanée de la structure de l'écosystème, c'est-à-dire sa description statique, est fournie par l'étude quantitative et qualitative des populations phytoplanctoniques. Le degré de maturation, ou d'organisation, peut être obtenu par des calculs d'indices de diversité : ainsi, l'indice de SHANNON qui mesure le degré de complexification ou de désordre (analogie avec l'entropie en thermodynamique). Ces indices sont non seulement de bons indicateurs du fonctionnement normal de l'écosystème, mais ils peuvent aussi aider à chiffrer, dans une certaine mesure, son "état de santé". Outre qu'ils sont plus faciles à intégrer dans un modèle mathématique que des notions de relations quantitatives interspécifiques, ils peuvent être utilisés par des non spécialistes comme "valeurs témoins" de l'état de perturbation de l'écosystème. Mais il est évident qu'ils devront être comparés et testés sur le terrain, quant à leurs valeurs indicatrices.

Malgré leur intérêt indéniable en ce qui concerne la description synthétique du degré d'organisation du sous-écosystème, ces indices ne sauraient suffire à sa description structurale et l'étude des communautés d'espèces s'avère indispensable. Il est donc nécessaire d'examiner la possibilité d'établir des "communautés spécifiques", dont le spectre plus ou moins fluctuant sera lié aux conditions physiques et chimiques caractérisant les eaux estuariennes et deltaïques dans leur évolution spatiale et temporelle.

L'analyse des paramètres globaux d'évaluation de la biomasse doit, par ailleurs, être envisagée au moyen de mesures de carbone et d'azote particuliers. Bien que la matière organique figurée, présente dans les eaux, puisse être estimée globalement de cette manière, il est utile de compléter les connaissances sur sa fraction planctonique par la mesure des principaux constituants biochimiques des algues ; protéines et glucides. La faible concentration en lipides, ainsi que leur résistance à toute action microbienne ne permettent pas de relier ce paramètre aux variations du plancton. Sans être spécifique, la mesure des teneurs en protéines et glucides du matériel particulaire renseigne sur la richesse et sur l'état de développement de la production primaire.

La mesure de l'A.T.P. (Adénosine triphosphate) et des formes associées ADP et AMP est à recommander particulièrement. Ces adénylates sont de bons indicateurs de la physiologie de masse du phytoplancton, car ils représentent un mode de stockage et de restitution de



l'énergie grâce à la présence dans leur molécule de liaisons dites "riches en énergie". On peut, grâce à ces trois substances, élaborer un indice synthétique : la charge énergétique :

$$CE = \frac{ATP + \frac{1}{2} ADP}{ATP+ADP+AMP}$$

qui pourrait caractériser l'état d'adaptation de l'écosystème primaire à certains "stress" écologiques. L'ATP répond, d'autre part, à la préoccupation de trouver un métabolite caractéristique de la matière organique vivante et absent de la fraction organique inerte, l'ATP étant en effet très rapidement dégradé après la mort des cellules.

Le dosage des pigments photosynthétiques chlorophylle a, b, c, caroténoïdes et phaeophytines, est également très intéressant : d'une part, parce que ces pigments sont d'assez bons indicateurs globaux de biomasse, et, d'autre part, parce qu'ils permettent d'établir des rapports indicateurs de la physiologie des populations photoautotrophes. Le rapport $\frac{D0430 \text{ nm}}{D0663 \text{ nm}}$ d'un extrait acétonique de pigments (ID. pigm. de MARGALEF) traduit l'importance des caroténoïdes par rapport à la chlorophylle a ; il permet d'évaluer le degré de "sénescence" d'une population phytoplanctonique.

On peut encore citer le rapport Chlor."Accessoires"/Chlor.a; celui-ci varie du fait d'une dégradation accélérée de la chlorophylle a dans les cellules lysées par rapport à la relative stabilité des chlorophylles b et c. Le rapport pourrait fournir un indice intéressant de la proportion de détritus dans les populations phytoplanctoniques.

Le rapport Chl.a/phaeophytine représente également un indice de l'état de dégradation d'une communauté phytoplanctonique.

Les vitesses et les cinétiques d'assimilation du carbone et de l'azote (^{14}C et ^{15}N) par les phytoplanctontes sont un excellent moyen d'appréciation de l'état physiologique du sous-écosystème primaire. Les études de production relative, ramenées à l'unité cellulaire, ne devront pas être négligées pour autant. Les approches biométriques (surfaces et volumes cellulaires) peuvent se révéler précieuses comme moyens de correction de la biomasse ainsi que pour l'établissement d'un modèle de dynamique des espèces phytoplanctoniques qui effectuent des poussées "explosives".

2.2. BLOC 3. LES BACTERIES HETEROTROPHES.

Le rôle des bactéries hétérotrophes dans les processus de biodégradation de la matière vivante est très important. Elles permettent la régénération des éléments nutritifs, et produisent des substances de croissance (vitamine B 12), indispensables au développement des cellules photoautotrophes. Les bactéries peuvent également avoir une action négative, tant sur les sous-écosystèmes primaire et paraprimaire (substances antibactérienne, anti-algues) qu'aux niveaux secondaire et tertiaire (dégagement H_2S , CH_4).

Le schéma d'étude suivant, subdivisé en trois parties, est en conséquence proposé :

structure, fonctionnement et action des populations microbiennes.

a) Etude de la structure -

On doit envisager, tout d'abord, l'aspect quantitatif correspondant à une étude réalisée au niveau des sédiments et dans les eaux de la microflore totale (bactéries aérobies et anaérobies) et des bactériocénoses spécifiques. On fera ensuite une estimation de la biomasse par le dosage d'acide diaminopimélique, constituant cellulaire spécifiquement bactérien. Enfin, on recherchera la formule bactérienne (communautés) de certaines niches écologiques et on suivra son évolution.

Il conviendrait, par ailleurs, d'aboutir à une caractérisation spatiotemporelle des principaux groupes bactériens par l'étude du taux d'assimilation du CO_2 complétée par le dénombrement de ces groupes.

b) Fonctionnement -

On recherchera les potentialités physiologiques des composantes des populations bactériennes (eaux et sédiments) et leur évolution en fonction des conditions ambiantes.

Dans ce cadre, les recherches porteront sur la détermination des proportions entre bactéries aérobies et anaérobies, mésophiles et thermophiles, sténohalines et halophiles, en fonction des concentrations en oxygène, de la température et de la salinité. Elles seront fonction évidemment des problèmes spécifiques liés à chacun des estuaires étudiés (sulfato-réducteurs, méthanogènes, entérobactéries).

On peut également, au moyen de cultures d'enrichissement, songer à étudier les modifications et l'évolution des populations bactériennes en fonction des paramètres ci-dessus et rechercher ensuite les taux de croissance et de la reproduction de la biomasse bactérienne.

Il semble bon également de poursuivre l'étude du fonctionnement de sous-écosystème bactérien de façon expérimentale. Dans ce sens, l'utilisation d'enceintes dialysantes permettrait d'obtenir des écosystèmes expérimentaux in situ contrôlés.

c) Action bactérienne -

Comme la plupart des cellules vivantes, les bactéries émettent des substances qui peuvent être, soit favorisantes, soit inhibitrices. Ainsi la vitamine B_{12} est profitable, parfois indispensable, au développement de certaines espèces de diatomées. Elles produisent par contre d'autres substances, dites "antibactériennes" ou "antialgues", ainsi que de l'hydrogène sulfure ou du méthane qui peuvent, selon leur concentration, avoir des répercussions catastrophiques : inhibition du pouvoir autoépurateur de certaines bactéries, action défavorable sur la production primaire, disparition de la faune dans les aires anoxiques riches en SH_2 et CH_4 . On cherchera donc à déceler l'émission de telles substances soit par analyse directe (SH_2 , CH_4) soit par la méthode des bio-essais.

On essaiera de mesurer l'activité minéralisatrice des bactéries à partir de la dégradation de la matière organique et d'en connaître l'impact sur la production primaire. Il nous paraît souhaitable de concentrer les efforts sur un seul cycle, celui de l'azote par exemple : ammonification, nitrification, dénitrification.

La mesure de la production bactérienne hétérotrophe (production paraprimaire) doit être également envisagée, par mesure de l'assimilation du glucose H^3 ou des acides aminés chauds en fonction de l'évolution des conditions ambiantes ($T^\circ C$, $S^\circ/_{\infty}$, $[C_2]$, $[MO]$, pesticides), en raison du rôle nutritiel, aujourd'hui indiscuté, que jouent les agrégats particuliers et leur microflore épiphyte vis-à-vis de certaines espèces de l'échelon secondaire.

Enfin, il conviendrait d'étudier l'action épuratrice de la bactériocénose autochtone, étude qui sera fonction du type de pollution de l'estuaire choisi : prédominance des hydrocarbures, des détergents, des composés aromatiques, ...etc. Inversement, on recherchera l'action des polluants sur la composition et l'activité de la microflore.

2.3. BLOC 4 et 5 : LES SUBSTANCES NUTRITIVES MINÉRALES ET ORGANIQUES PARTICULAIRES ET DISSOUTES.

L'étude des variations quantitatives des constituants de la réserve nutritive minérale est très importante : phosphore total, phosphates, nitrates, nitrites et ammonium, et rapports entre ces sels. Les variations de ces rapports peuvent, dans une certaine mesure, donner une image de la physiologie de masse du sous-écosystème. Par exemple, des différences dans l'assimilation de l'azote et du phosphore amènent des déséquilibres du rapport N/P, caractéristiques de certaines conditions écologiques particulières. De plus, la teneur de la matière organique en ces différents éléments (C, H, N, P, O) étant à peu près constante, il est possible d'estimer les potentialités synthétiques théoriques du milieu si l'on connaît les vitesses d'assimilation (envisageable pour l'azote et le phosphore). On peut ainsi mettre en évidence les éléments limitant le développement.

Il est également important d'attirer l'attention sur le rôle que peuvent jouer les substances humiques dans les estuaires et deltas. Le pouvoir complexant des acides humiques et fulviques vis-à-vis des ions minéraux (Cu et Zn notamment) retentit directement sur le développement planctonique en fournissant aux algues, outre des substances azotées, un apport constant en oligo-éléments minéraux. Le pouvoir complexant des acides humiques intervient également au niveau des pollutions par les métaux lourds. Une étude de la stabilité des complexes humiques dans les deltas et estuaires apparaît donc comme très intéressante.

2. 4. BLOC 6 : LES MINÉRAUX

Parmi les corps minéraux transportés dans les estuaires et les deltas, les minéraux des argiles sont les plus susceptibles d'apporter des éléments utiles aux développements biologiques. Les éléments organiques ou minéraux sont souvent adsorbés sur les argiles, soit en bordure des feuillets, soit en position interfoliaire; ils sont plus facilement largables dans le premier cas, mais généralement aussi moins abondants. Les éléments nutritifs peuvent également être piégés au sein d'amas organo-minéraux et sont alors souvent moins disponibles, d'autant qu'une mise en agrégats peut intervenir de surcroît dans les estuaires eux-mêmes.

Les minéraux argileux à expansion variable, comme la montmorillonite et certains édifices interstratifiés, sont ceux dont la capacité d'échange est la plus élevée, et dont les possibilités d'adsorption et de désorption sont donc les plus marquées. Il serait souhaitable d'engager les expérimentations dans des milieux estuariens et deltaïques caractérisés par des proportions notables de ces minéraux. Il serait utile, par ailleurs, de comparer la nature des cations adsorbés par les minéraux depuis les eaux douces jusqu'aux eaux marines, et de considérer le rôle des cations fortement adsorbés (Ca, K..) susceptibles de contrarier les échanges.

2.5. BLOC 7 : LES POLLUANTS.

En raison de leur influence directe ou indirecte en tant qu'agents inhibiteurs ou favorisants du développement phytoplanctonique, le dosage d'un certain nombre de polluants s'avère indispensable dans le cadre de l'étude du sous-écosystème primaire.

Ainsi, des recherches récentes ont été réalisées sur les hydrocarbures. Elles portent sur les effets de divers type de fuels (brut, n° 2, n° 6) sur la photosynthèse des communautés phytoplanctoniques naturelles. Ces recherches ont montré que les hydrocarbures peuvent inhiber ou stimuler la photosynthèse et que le degré d'inhibition dépend du type de fuel et de sa concentration. Il semble donc souhaitable de rechercher par des analyses qualitatives et quantitatives la teneur et les types d'hydrocarbures présents à la surface et au sein des masses d'eau.

Une étude des détergents et polyphosphates semble également utile, les fleuves étant les principaux récepteurs des émissaires urbains et industriels dont les eaux sont en général riches en agents tensio-actifs. Ceux-ci provoquent certaines nuisances en agissant sur l'oxydation des matières organiques en solution et le transfert d'oxygène. Ils ont en général une action retardatrice ou inhibitrice d'oxydation, ce qui peut freiner les processus d'auto-épuration des fleuves dans lesquels ils sont rejetés. Ils peuvent présenter une certaine toxicité pour la flore nitrifiante en empêchant les transformations $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_2$ et $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3$. Or, les nitrates sont indispensables au développement du phytoplancton. En outre, les adjuvants contenus dans les détergents et tout particulièrement les polyphosphates sont assimilables après hydrolyse et peuvent provoquer une eutrophisation excessive du milieu, avec déclenchement de "blooms" paucispécifiques.

Les herbicides, pesticides, PCB (organo chlorés ou autres), issus des eaux de drainage, sont plus ou moins solubles ; ils apparaissent dans les fleuves le plus souvent à des doses sublétales. Il est intéressant d'en connaître le cheminement dans les chaînes alimentaires.

Les métaux lourds, souvent à l'état de traces dans les eaux, sont parfois assimilés et concentrés par les phytoplanctontes et peuvent devenir toxiques pour les organismes des échelons secondaire et tertiaire. Une étude qualitative et quantitative des traces métalliques dans les eaux et dans le phytoplancton doit être entreprise afin de rechercher les valeurs des

facteurs d'accumulation. Une étude systématique d'un grand nombre de métaux peut être envisagée lors des premières missions dans chacun des estuaires considérés, étude analytique qui devra ensuite être modulée en fonction des teneurs des polluants trouvés.

2.6. BLOC 8 : HYDROLOGIE ; PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE ; HYDRODYNAMIQUE.

Dans les estuaires et deltas, zones d'affrontement entre masses d'eaux douces et salées, où la turbulence et la diffusion sont intenses, le problème de la survie des espèces phytoplanctoniques, dulçaquicoles et marines, se pose, bien que leurs potentialités d'adaptation aux modifications hydrologiques soient, en général, grandes surtout pour les secondes. Cette potentialité adaptative (osmorégulation) est fonction de la vitesse de mélange des eaux.

Ainsi, l'étude des paramètres physico-chimiques et de l'hydrodynamique semble-t-elle essentielle, car elle est véritablement à la base de toute étude concernant les sous-écosystèmes paraprimaire, primaire et secondaire. En effet, dans les estuaires, les fluctuations spatiotemporelles des températures, salinité, concentration en oxygène, pH, et turbidité provoquent un "stress" physiologique important qui se traduit par une profonde modification du métabolisme du microplancton marin ou dulçaquicole.

En dehors de ces fluctuations rapides existent des évolutions plus lentes, à l'échelle des saisons, qui ont des répercussions sur la physiologie du phytoplancton. Ainsi, l'élévation naturelle ou artificielle (eaux de refroidissement d'une usine par exemple) de la température, peut provoquer une augmentation du rythme de division cellulaire qui se traduit, dans ces régions en général eutrophes, par la présence de fortes concentrations cellulaires et, corrélativement, d'organismes filtreurs (bivalves sessiles, ascidies, etc).

On pourrait passer en revue l'ensemble des paramètres cités ci-dessus et montrer que, dans certaines marges (de T° , de $S^{\circ}/\text{‰}$, de pH, etc), ils ont un effet bénéfique. On a pu montrer par exemple que le développement maximum du phytoplancton "marin" s'obtenait pour des salinités comprises entre 10 et 22 $^{\circ}/\text{‰}$, (tout au moins pour les espèces néritiques). La turbidité, par contre, est nuisible au bon fonctionnement des organismes photoautotrophes par modification quantitative et qualitative de l'énergie lumineuse disponible. Aussi, ne serait-ce que pour ces raisons, il paraît indispensable d'entreprendre une étude hydrologique et hydrodynamique détaillée pour chaque estuaire.

Au niveau de l'estuaire, il est important de connaître :

- l'étendue du coin salé et ses fluctuations spatiotemporelles en fonction de la force et de la direction des vents, de l'intensité des marées et du débit du fleuve;
- l'intensité du mélange au niveau de l'interface eau douce- eau de mer (diffusion et turbulence) ;
- le gradient thermohalin vertical et horizontal ;
- la vitesse des courants de surface et de fond.

En mer :

- l'étendue de la nappe de dilution, sa vitesse de déplacement ;
- la fréquence des ondes internes ;
- la direction et la vitesse de déplacement des eaux de mer sous-jacentes à la nappe de dilution.

2.7. BLOC 9 : LE ZOOPLANKTON

Il agit d'une manière importante sur les chaînons primaire et paraprimaire par le "grazing" et sur la réserve nutritive : enrichissement par les excréments. Nous n'insisterons pas sur ce sous-écosystème qui fait l'objet des préoccupations du thème 2.

3. STRATEGIE DE PRELEVEMENT

La stratégie de prélèvement peut être envisagée suivant plusieurs options méthodologiques. On doit principalement distinguer l'étude des phénomènes écologiques à grande échelle de ceux à petite échelle.

3.1. LES PHENOMENES A GRANDE ECHELLE.

Les phénomènes à grande échelle s'accommoderaient d'une stratégie de prélèvements largement répartis dans le temps et l'espace : réseau de stations dont la maille et la forme pourront être éventuellement étudiées statistiquement pour respecter certaines contraintes d'échantillonnage et minimiser ainsi les risques d'erreur. Ce réseau pourra être fait en surface et à différentes profondeurs aux quatre saisons de l'année par exemple.

3.2. LES PHENOMENES A PETITE ECHELLE.

Il ne faut pas oublier que c'est à petite échelle que se situent les principaux problèmes écologiques et biologiques : recyclage des sels minéraux, reproduction des organismes, compétitions, prédation, etc... Il faudrait donc définir une stratégie d'échantillonnage intégrant d'une manière étroite la variable temps : série chronologique réalisée en un point convenablement choisi ; puis série chronologique intégrant le temps et l'espace (par exemple étude de surface le long de l'estuaire, les prélèvements étant faits à intervalles réguliers). Il semble encore préférable de suivre une masse d'eau le long de son trajet jusqu'à la mer et d'échantillonner à intervalles de temps réguliers. Cette stratégie, malgré les difficultés d'ordre pratique indéniables qu'elle présente, semble être la plus attrayante en ce qui concerne l'étude du fonctionnement de l'écosystème ; son aspect spatiotemporel peut bien entendu être envisagé à trois dimensions, mais devient rapidement peu réaliste quant au coût des opérations.

4. TRAITEMENT MATHEMATIQUE DES DONNEES ; MODELISATION.

On ne saurait assez insister sur l'importance qu'on devra donner à l'outil mathématique, tant au niveau de la planification des expériences pour dégager la stratégie de prélèvement optimale, qu'au niveau du traitement a posteriori des données. Des méthodes heuristiques et objectives comme les diverses techniques multivariées, les analyses ayant trait à l'étude des processus stochastiques (analyse spectrale à deux ou plusieurs dimensions) devront être utilisées.

Au niveau de la modélisation, des modèles mathématiques classiques aux équations différentielles à deux ou trois dimensions (modèle idéal mais complexe) peuvent être envisagés. Si ces modèles semblent raisonnablement concevables en ce qui concerne l'hydrodynamique, les paramètres du modèle, dans le cas de la biologie, semblent beaucoup plus difficiles à estimer, bien qu'on ait déjà tenté de simuler de tels modèles. Ainsi, en ce qui concerne la photosynthèse relative en fonction de l'intensité lumineuse, d'après des cinétiques établies par les travaux de STEELE (1965) et RYTHER (1965), on se fonde sur la décroissance exponentielle de la lumière en fonction de la profondeur. L'action conjointe de la température et de la lumière sur la photosynthèse a été étudiée par JORGENSEN et STEEMAN-NIELSEN (1965) qui ont proposé un modèle relativement simple, qui postulait tout de même l'indépendance d'action de ces deux paramètres. Les modèles de simulation de l'action des sels minéraux sur l'intensité de la photosynthèse ont été probablement les plus nombreux au cours de ces dernières années : THOMAS et DODSON (1968), MACISSAC et DUGDALE (1969), EPPLEY et al. (1969) ; tous utilisent la cinétique de MICHAELIS-MENTEN dont on a, semble-t-il, abusé dans trop de modèles.

En ce qui concerne, donc, l'hydrodynamique et les paramètres physiologiques globaux, on peut imaginer l'élaboration de modèles mathématiques prédictifs qui, s'ils restent très approximatifs, n'en constitueraient pas moins une étape très intéressante dans la préparation de modèles plus performants.

Il faut donc essayer d'élaborer et d'étudier la dynamique évolutive de nouveaux paramètres synthétiques, caractérisant la physiologie de masse de l'écosystème, ces paramètres étant plus facilement intégrables dans un modèle.

Mais le problème est tout autre, en ce qui concerne les rapports entre espèces ou communautés d'espèces constituant l'écosystème. On ne peut alors sortir des modèles conceptuels classiques qui, malgré l'inconvénient de ne pouvoir être testés par l'introduction de données nouvelles comme pour les modèles mathématiques, ne sont tout de même pas dénués d'intérêt pratique. Ils offrent, en effet, à l'utilisateur une trame de références, qui lui permet, par des comparaisons, de juger des états de déséquilibre de l'écosystème.

THEME 2

LA DYNAMIQUE DES ECOSYSTEMES A PARTIR DE L'ECHELON SECONDAIRE ;
 ROLE SPECIFIQUE DES ESTUAIRES COMME ZONE D'ENGRAISSEMENT ET DE TRANSITION
 ENTRE L'EAU DOUCE ET L'EAU DE MER POUR LES ESPECES MIGRATOIRES.

1. INTRODUCTION.

La place, prépondérante dans le bilan économique maritime, que les estuaires et deltas occupent, à la jonction des milieux marins et limniques, est due à leurs hauts niveaux de production, à leur importante contribution en tant que zone de pêche et de conchyliculture et à leur rôle écologique de réservoir de larves et de juvéniles. Pour ces raisons, la connaissance et la compréhension des processus biologiques animaux est indispensable pour toute tentative de gestion de ces zones.

L'ensemble des travaux réalisables dans l'état actuel des connaissances en écologie marine, ainsi que ceux qu'il est nécessaire de susciter, sont schématisés dans ce chapitre.

Il s'agit bien évidemment d'un programme idéal, dont la mise en oeuvre exhaustive nécessiterait une conjugaison très coûteuse de moyens logistiques, techniques, et de compétences. Nous chercherons ensuite à fixer les critères de choix permettant de déboucher sur un programme pratique. Ceci conduit à retenir la nécessité d'une classification des phénomènes. On accordera alors la priorité à des opérations à but spécifique, mais à large potentialité, c'est-à-dire susceptibles d'application aux plus grands nombres de sites. Il n'existe pas actuellement de classification écologique satisfaisante des écosystèmes littoraux d'estuaire et de delta. Cette absence traduit le retard pris dans l'étude des phénomènes biologiques par rapport à l'étude des phénomènes physico-chimiques. Elle correspond à l'éparpillement des efforts et des travaux réalisés. Il semble, par exemple, que les travaux synécologiques demeurent très succincts et que les études auto-écologiques leur ont été préférées jusqu'ici. De même, du point de vue géographique, la région Atlantique a été négligée par rapport aux côtes

de la Manche ou de la Méditerranée. Il apparaît donc nécessaire de réaliser une compilation et une synthèse des résultats acquis, de manière à mettre en évidence les lacunes scientifiques et géographiques à combler. Cette synthèse servira également de support à la définition d'une classification des types écologiques de systèmes.

Dans l'immédiat, nous adopterons un schéma d'organisation commun à l'ensemble du domaine marin.

Le sous-écosystème animal peut être figuré par une série de blocs présentant entre eux des relations de transfert d'énergie (nutrition - excrétion - apparition de larves et de juvéniles). La définition des blocs est basée sur la zone spatiale de distribution des organismes, pleine eau (pélagos) ou fond (benthos), et sur leur taille.

Le but d'un schéma aussi général est de fixer les problèmes à aborder : structure des populations de l'écosystème et quantification du fonctionnement, c'est-à-dire des relations de ces populations avec les paramètres de l'environnement et entre elles. Il permet de fixer les idées des non-spécialistes. Enfin, ce schéma met en évidence l'étroite dépendance du domaine biologique vis-à-vis des divers groupes thématiques pour toute tentative de compréhension de la dynamique de l'écosystème.

2. SCHÉMA ANALYTIQUE.

2.1. ANALYSE DE LA STRUCTURE.

Le premier point est l'inventaire faunistique qualitatif et quantitatif des populations présentes. Cet inventaire doit être réalisé au niveau spécifique avant d'envisager une simplification des numérations, en adoptant des catégories systématiques plus vastes, genres ou familles. L'étude de la structure démographique : nombre de juvéniles de mâles et de femelles, ainsi que la biométrie des individus, complètent cette première analyse. Elle doit tendre vers une définition des populations animales présentes, de leurs fluctuations et de la succession des communautés au cours du cycle annuel. Cette description des populations permettra de définir les inter-réactions et les compétitions entre espèces. Elle servira de base à la définition d'espèces ou de groupes d'espèces clefs, utilisés pour la surveillance de l'écosystème, suivant que ces individus sont représentatifs du comportement du reste de la population ou des événements qui se succèdent dans le cycle saisonnier. Les mesures de la biomasse (poids sec, poids frais ou poids de protéine, suivant que l'on s'adresse à des organismes benthiques ou pélagiques) peuvent être utilisés conjointement à la numération faunistique comme indice de la stabilité, de la maturité de l'écosystème et comme une estimation de sa production.

La composition chimique des organismes, notamment en substances de réserve tels que lipides ou acides gras, pourrait apporter une information non négligeable. Il paraît cependant plus important de mettre l'accent sur l'analyse des diverses substances polluantes : métaux lourds, pesticides, herbicides, hydrocarbures, matières organiques, etc. A partir de ces

dosages, deux types de problèmes peuvent être abordés : l'accumulation aux travers des différents niveaux de la chaîne alimentaire et l'action directe sur les organismes.

2.2. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT.

La répétition des mesures de structure dans le temps permet une première interprétation des conditions de fonctionnement du système. L'analyse des fluctuations, enregistrées au niveau des populations, doit être réalisée en fonction des facteurs écologiques, physiques et chimiques, et biologiques, préoccupations des trois autres thèmes. Le traitement de ces données, par corrélations ou analyses multivariées, permet de dégager des relations de causalité. Cependant, la fertilité de cette approche statistique est nécessairement limitée par le nombre de variables que l'on sait actuellement mesurer. Une seconde approche plus directe peut être utilisée simultanément pour quantifier les processus biologiques de fonctionnement d'un écosystème.

Les relations entre les différents blocs définis par l'étude faunistique peuvent se traduire en termes énergétiques ou physiologiques. La respiration peut être considérée comme une estimation de la quantité d'énergie requise pour le maintien et le développement des différents niveaux de production. La nutrition traduit les transferts d'énergie entre niveaux. L'excrétion, sous ses diverses formes, correspond également à une remise en circulation d'énergie. La mesure des deux premiers taux, respiration et nutrition, apparaît indispensable, contrairement à l'excrétion qui peut être appréciée de manière indirecte à partir des paramètres de structure et des paramètres écologiques, tels que les sels nutritifs NH_4 , NO_3 , NO_2 et la matière organique présents en pleine eau et dans le sédiment. Dans cette optique de l'analyse du fonctionnement, une part doit être réservée à l'expérimentation. Par ce biais, on pourra quantifier les seuils d'équilibre et l'amplitude des réponses aux variations des conditions de milieu, c'est-à-dire les possibilités d'adaptation ou, à la limite, les "stress" qui en résultent. Il faut inclure, dans ces conditions de milieu, les paramètres écologiques, qui varient de manière naturelle régulière (la salinité par exemple) ou accidentelle (prolifération de certaines catégories animales ou végétales et de leurs métabolites), ainsi que les paramètres physiques ou chimiques modifiés par l'environnement humain.

2.3. ANALYSE DU COMPORTEMENT.

Cette étude quantitative du fonctionnement du système doit être complétée par une étude qualitative. En effet, les animaux présentent un degré plus ou moins élevé d'organisation, donc des comportements particuliers ne permettant pas de traduire par des lois simples les interactions entre le milieu et les individus. Dans ce domaine de l'éthologie, il convient de préciser pour les différentes communautés le régime alimentaire, les migrations horizontales et verticales, les cycles à courtes et longues périodes (diurnes, tidaux, annuels) et les phénomènes de concentration.

Le régime alimentaire peut être caractérisé, outre les résultats déjà acquis pour

un grand nombre d'organismes, par l'examen des pièces buccales, et des contenus du tube digestif. Dans le cas plus complexe de petits organismes ou d'individus omnivores susceptibles d'adaptation à un large spectre de nourriture, il peut être fait appel à l'analyse des équipements enzymatiques digestifs.

Migrations, concentrations et cycles peuvent être appréhendés par une répétition spatio-temporelle des captures d'individus.

3. PROBLEMES PARTICULIERS AUX ESTUAIRES.

Milieux frontières entre le continent et l'océan, les estuaires présentent en ce qui concerne l'organisation et le fonctionnement de l'écosystème un certain nombre de particularités. Si les études à entreprendre procèdent largement des notions développées précédemment, il est cependant nécessaire de dresser un inventaire succinct de ces aspects spécifiques.

3.1. PRODUCTION ALGALE BENTHIQUE MACROPHYTIQUE ET MICROPHYTIQUE - VEGETATION PHANEROGAMIQUE ET FERTILISATION.

Les estuaires apparaissent souvent comme des baies ou des golfes marins abrités, lieux privilégiés d'accumulation, surtout vers les hauts niveaux, de matériel biologique marin. Ils sont aussi le lieu d'une production algale benthique macrophytique sur toutes les portions rocheuses et caillouteuses, ainsi qu'une production microphytique benthique (diatomées, chrysophycées, cyanophycées, etc) sur toutes les vasières et fonds meubles qui découvrent et qui sont, sous film d'eau, le lieu d'une production primaire extraordinairement intense, souvent très supérieure à celle des végétations algales et phanérogamiques avoisinantes bien visibles. Il est bon de rappeler ici qu'une vasière nue est souvent plus productrice qu'une forêt ou une prairie, et qu'elle peut, comme un marécage exubérant, produire jusqu'à 30 t. de matière organique sèche à l'hectare et par an !

Dans une rivière et, à fortiori, dans un estuaire, il serait très souvent erroné de croire que, comme en mer, la production primaire locale est à la base du fonctionnement de l'écosystème. Une rivière se comporte comme un organisme de capture et d'accumulation progressive de la production primaire, à la fois terrestre (bassin versant et berges) et aquatique (cours supérieurs), de telle sorte que l'essentiel de la fertilité estuarienne est de nature exogène, fondé sur les détritiques végétaux ou animaux qui abritent une riche florule de microorganismes. La fertilité estuarienne se manifeste généralement très loin en aval de l'estuaire proprement dit.

Les communautés végétales de phanérogames de l'étage intertidal et l'étage supralittoral ont une production importante, et, à la suite de la décomposition des parties mortes, jouent un rôle important dans l'économie générale de l'estuaire.

L'évaluation de cet apport comprend trois volets principaux :

- reconnaissance et définition des communautés végétales présentes (cartographie) avec distinction des diverses catégories (herbiers, hautes-slikkes et shorres, roselières saumâtres) ;
- étude de la croissance et de la production saisonnière des espèces principales, avec évaluation de la teneur saisonnière en ions ;
- étude expérimentale in situ de la vitesse de décomposition du matériel végétal sous l'action des microorganismes ; variation de la composition de cette "litière" au cours du temps et en fonction des paramètres physico-chimiques ; étude de la dégradation d'un point de vue mécanique (taille des particules libérées au cours de l'évolution de la litière) ;
- étude des processus de sédimentation des matériaux ; étude des phénomènes de concentration, de réaction aux substances polluantes, d'autoépuration.

3.2. LES ESTUAIRES ZONE DE PASSAGE.

Un certain nombre de poissons amphibiotiques transitent à travers les estuaires au cours de leur cycle biologique : poissons anadromes, dont la reproduction a lieu en eau douce, et poissons catadromes, dont la reproduction a lieu en mer (les Salmonidés migrateurs, les esturgeons, les anguilles, les aloses, ... etc). L'évolution de la pollution dans les zones d'estuaire, point de passage obligé dans la réalisation du cycle biologique de ces espèces, constitue une entrave plus ou moins grave à cette migration.

Pour toutes les espèces signalées, l'estuaire est avant tout une zone fréquentée au cours de deux périodes bien déterminées de la vie, au stade juvénile et au stade adulte. Parmi les problèmes qui se posent à ce niveau, il faut souligner l'importance des phénomènes d'osmorégulation, avec leurs aspects purement physico-chimiques et les incidences de divers polluants sur le fonctionnement normal des systèmes internes à l'organisme.

La reconnaissance des rivières d'avalaison chez les Salmonidés migrateurs (phénomène du "homing") peut être perturbée totalement par des polluants d'ordre chimique. Les phénomènes bien connus de synergie viennent aggraver ce problème.

Le séjour en zone d'estuaire pose également divers problèmes pour les animaux amphibiotiques : tout d'abord les aspects nutritifs, particulièrement importants chez les animaux juvéniles ; puis les aspects pathologiques, liés aux quantités importantes de germes pathogènes ; les phénomènes de compétition interspécifique et de prédation entre les espèces vivant constamment en zone d'estuaire et celles qui y transitent au cours de leur vie sont particulièrement mal connus quantitativement ; enfin, les phénomènes de comportement des poissons amphibiotiques durant la traversée de l'estuaire sont encore insuffisamment élucidés.

Au niveau de l'exploitation, il semble que certaines espèces, normalement migratrices (saumons, esturgeons), puissent abandonner leur comportement normal et former des popula-

tions semi-sédentaires qui ne s'éloignent guère des points de libération. Cette possibilité d'exploitation conduit évidemment à bien connaître la capacité nutritive du milieu vis-à-vis de ces organismes carnivores.

3.3. INTERET HALIEUTIQUE DES ESTUAIRES.

Les grandes lignes de l'étude de la pêche d'un secteur côtier et notamment d'une zone d'estuaire doivent comporter :

- l'inventaire des espèces exploitées ;
- l'examen de l'abondance de ces espèces dans le temps et dans l'espace, à travers les données de la pêche elle-même ;
- l'étude de la composition des populations des espèces exploitées d'un point de vue démographique (dynamique des populations).

Une attention particulière doit être accordée à la part prise par les géniteurs (frayères éventuelles) et par les formes juvéniles de nombreuses espèces de poissons marins à l'état adulte, qui passent une partie de leur vie, dans les estuaires et les zones saumâtres, dans de véritables nurseries. L'étude du régime alimentaire des espèces concernées, vis-à-vis des ressources de l'écosystème, au niveau de la production secondaire, est essentielle de ce point de vue (exemple de nurseries à trop forte densité, et corrélativement à mortalité élevée et faible croissance individuelle).

- l'impact des activités de pêche sur l'écosystème. Il est important de connaître dans quelle mesure la pêche est susceptible de modifier ce système, en effectuant par exemple un prélèvement trop important sur les consommateurs herbivores et détritivores.

- la description de l'activité halieutique elle-même : technique de pêche, production économique, aspect socio-économique, étude prospective. Cet aspect de la recherche rejoint les préoccupations du thème 5.

Il faut enfin souligner l'intérêt de l'étude des bivalves filtreurs, dans le cas où il existe une conchyliculture développée en zone d'estuaire. Parmi les problèmes scientifiques liés à cette activité, il paraît important de tenter de relier la production secondaire de ces espèces, au cours du temps, à la ressource primaire et paraprimaire dont elles dépendent de manière directe. On sait dès maintenant qu'il existe sur ce point de très fortes variations de production au niveau des bivalves élevés, mais on connaît mal les raisons de ces écarts.

4. ELEMENTS DE STRATEGIE POUR LA REALISATION PRATIQUE D'UN PROGRAMME.

4.1. PARAMETRES DE STRUCTURE.

La priorité doit être accordée aux paramètres de structures, c'est-à-dire à la

définition d'un état de référence des systèmes d'estuaire. La difficulté consiste à séparer lors de l'interprétation les fluctuations naturelles des populations de celles résultant de modifications du milieu par action de l'homme. Il s'agit de définir les gradients de variabilité autour des seuils d'équilibre acceptables par le milieu. Il apparaît possible de réaliser une étude de structure complète sur un site, pas ou peu pollué, qui servira de référence. Ce site doit comporter des situations générales qui pourront être extrapolées à l'ensemble des autres cas, ainsi qu'une certaine ampleur des phénomènes. La variabilité des populations introduite par les pollutions peut être caractérisée sur d'autres sites présentant des cas particuliers de telles ou telles pollutions.

En ce qui concerne la végétation phanérogame, la stratégie d'échantillonnage et les moyens seront spécifiques pour tenir compte de ses caractéristiques particulières.

Echelle d'échantillonnage :

Le domaine prospecté couvre une grande diversité. L'échelle temporelle doit être envisagée à court terme, suivant que l'on s'adresse aux organismes à temps de développement rapide du zooplancton et du mélobenthos ou à long terme pour les animaux à durée de vie de plusieurs années du macrobenthos et du necton. Outre ce niveau zoologique de diversification, il faut tenir compte d'une échelle de variations propres aux problèmes : ainsi les rythmes nyctéméraux migratoires ou physiologiques doivent être étudiés sur quelques jours tandis que le rythme saisonnier nécessite une étude annuelle.

Il faut, de la même manière, distinguer plusieurs échelles spatiales de distribution. La variabilité est plus grande pour le zooplancton et le necton libres en pleine eau que pour le benthos lié à un substrat plus ou moins fixe. L'échantillonnage devra donc être répété dans le cas des organismes pélagiques pour apprécier la variabilité de la distribution.

On dégage ainsi un premier schéma d'échantillonnage : séries de prélèvements pélagiques et benthiques répétées périodiquement au cours du cycle annuel avec une maille spatio-temporelle beaucoup plus lâche pour les prélèvements benthiques.

Enfin, il ne faut pas figer cette stratégie de prélèvement mais adopter une démarche du type essai-erreur. Le choix à faire, notamment pour le zooplancton, entre le nombre de points de stations dans l'espace et le nombre de répétition ne peut qu'être fixé arbitrairement au départ. Seules les premières mesures permettront de hiérarchiser la variabilité spatiale et la variabilité temporelle. Il est probable que cette hiérarchie sera également soumise à un cycle plus ou moins annuel. Il faut donc insister sur la nécessité de réaliser l'analyse et le prédépouillement des échantillons prélevés, le plus rapidement possible, afin que ces résultats puissent servir de critères de redéfinition de l'échantillonnage.

4.2. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT.

Dans cette seconde optique les difficultés proviennent de la diversité des organis-

mes peuplant le système. Bien que les mécanismes biologiques se traduisent globalement de la même manière, plusieurs échelles de variabilité sont à considérer. Au niveau de l'individu, il existe une hétérogénéité pour une même catégorie systématique et au niveau des différentes espèces une grande diversité d'amplitude des taux physiologiques et du "turn-over". Les populations enfin ne peuvent pas être assimilées à la somme des individus qui les composent.

Traditionnellement, on utilise en écologie les catégories systématiques (espèces, genres ...) comme définition de groupes d'individus à même comportement. On reconnaît maintenant les limites de cette définition anatomique a priori de groupes éthologiques ou physiologiques. Malgré ses inconvénients, cette optique est pour le moment la seule utilisable couramment.

Elle doit être utilisée au départ des travaux. Cependant, il est nécessaire de susciter les études qui permettront d'avoir une approche plus directe des processus par une meilleure définition des différents échelons ou maillons du système.

Ces deux modes d'approche doivent être mis en oeuvre simultanément. Dans le premier mode, le nombre d'espèces présentes est trop important pour réaliser toutes les mesures prévues. Deux critères de choix peuvent être retenus : l'importance dans la biomasse totale ou le nombre d'individus de la population et l'intérêt économique. Bien entendu, il serait plus logique d'utiliser les espèces clefs qui ont un rôle particulier dans l'équilibre du système ou une valeur d'espèce indicatrice des phénomènes. Cependant, ces informations ne seront disponibles que lorsque la synthèse des travaux antérieurs et l'étude de structures des populations auront été réalisées en partie.

On peut cependant citer quelques groupes qui sont, d'ores et déjà, bien connus pour leur importance dans les écosystèmes. Pour le benthos, les Annélides et les Crustacés représentent généralement une part importante de la population ; il en est de même des Bivalves dont certains présentent en outre un intérêt économique (coquilles, huîtres, moules). En ce qui concerne le zooplancton, le méroplancton (larves) constitue souvent la part dominante des individus présents. En outre, leur importance est justifiée par la nécessité de leur bonne croissance pour conserver l'équilibre faunistique. Là aussi, l'intérêt économique est réel. Ce sont donc des représentants de ces groupes qui devraient être utilisés pour les mesures de fonctionnement et les expérimentations physiologiques.

Dans le second mode d'approche, il est nécessaire de susciter des recherches pour doter l'écologie de nouveaux outils de description. Il manque en écologie des techniques de mesures correspondant aux problèmes abordés. Il serait nécessaire de disposer de paramètres quantifiant le comportement d'une population et d'une communauté. La seule actuellement utilisée est la biomasse. Dans cet ordre d'idée, on pourrait avoir recours à des mesures biochimiques pour caractériser l'état énergétique ou l'état physiologique d'un groupe d'individus. On peut citer, à titre d'exemple, l'estimation de la nutrition d'une population d'invertébrés marins par le dosage des activités enzymatiques digestives, ou la mesure de l'activité physiologique du méiobenthos par analyse de la consommation d'oxygène dissous

dans un volume isolé. Il ne s'agit cependant là que de tentatives isolées. Un effort généralisé dans cette optique permettrait certainement de gros progrès de l'écologie.

THEME 3

COMPORTEMENT DES POLLUANTS EN LIAISON AVEC LES SYSTEMES

HYDROLOGIQUE SEDIMENTOLOGIQUE ET BIOLOGIE

—

ASPECTS SANITAIRES ET MICROBIOLOGIE

1. INTRODUCTION

Les premières contaminations des milieux naturels par des pollutions remontent sensiblement à l'apparition de l'homme sur la Terre.

Dès l'Antiquité, l'histoire des maladies et des intoxications alimentaires fait état de manifestations cliniques attribuées à des empoisonnements.

Cependant, les premières études scientifiques de ces phénomènes ne sont entreprises qu'à la fin du XIX^{ème} siècle. Elles concernent alors presque essentiellement les pollutions bactériologiques et notamment les infections et intoxications transmises par les coquillages. L'identification des agents infectieux responsables date de 1880 - 1885, période à partir de laquelle différents travaux démontrèrent la mauvaise qualité bactériologique des huîtres pêchées en Angleterre, en Italie, en France et aux Etats-Unis (CAMERON, 1880 - CONN, 1894 - LAVIS, 1895 - CHANTEMESSE, 1896).

Mises à part quelques observations sur la distribution de l'oxygène dissous dans les estuaires anglais (1908, 1911), les études relatives aux pollutions sont encore plus récentes et n'ont pratiquement débuté qu'à la fin de la première Guerre Mondiale pour la raison essentielle que l'introduction massive de la plupart de ces polluants n'a vraiment commencé,

de manière généralisée, qu'entre 1920 et 1950. C'est ainsi que le plomb, l'un des polluants les plus largement répandu (4,9 millions de T jusqu'en 1975), fut utilisé pour la première fois comme additif dans les carburants automobiles en 1923. Quant aux radio-éléments, leur diffusion date des premières explosions atomiques en 1945. De même, l'utilisation massive des insecticides, des détergents et des fertilisants, remonte également à moins de 30 ans.

Dans le milieu marin, une autre cause du caractère très récent des études consacrées aux pollutions réside dans l'opinion trop longtemps admise que, compte tenu de l'étendue des océans, les phénomènes de dilution devaient suffire à assurer l'inocuité des pollutions déversées en mer. A peu près à la même époque que le Torrey Canyon s'échouait sur les côtes Sud-Ouest de l'Angleterre (1967), une série d'observations sensibilisa la communauté scientifique à la gravité et à la diversité de certaines atteintes ainsi qu'à la complexité des mécanismes entrant en jeu dans la diffusion et la répartition des polluants. C'est ainsi que les phénomènes de concentration par les mollusques des radio-éléments, déversés en mer à très faible concentration par les usines atomiques, furent tout d'abord démontrés (U.S. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE MONOGRAPHS, 1957, 1959, POLIKARPOV, 1966). Par la suite, la découverte de quantités importantes de DDT (800 ppm) dans la graisse de phoque permit de saisir les mécanismes de concentration de ce polluant le long des chaînes alimentaires (BUTLER, 1968). Des mécanismes identiques, à travers les chaînes trophiques marines, furent découverts pour le mercure, responsable de la redoutable maladie de MINAMATA dont les premières manifestations, d'abord inexplicables, apparurent vers 1953. Au niveau bactérien, le pouvoir d'autoépuration du milieu marin, admis par divers auteurs, est apparu par la suite d'efficacité limitée (BRISOU).

Ainsi, l'acquis de la période 1950 à 1970 réside principalement dans le fait que la distribution des polluants dans le milieu marin n'obéit pas à un simple phénomène de dilution d'un stock limité dans une masse infinie. Si ce processus joue dans une certaine mesure, et plus particulièrement pour certains type de polluants, d'autres mécanismes antagonistes viennent, à l'inverse, concentrer ces polluants, voire en modifier la forme, faisant passer par exemple d'une forme non assimilable par la vie (mercure, métal) à une forme directement assimilable, fortement toxique (composés de type méthyl-mercure). Durant la période 1950 à 1970, ces mécanismes antagonistes furent principalement étudiés au niveau des chaînes trophiques et montrèrent clairement les risques encourus.

Partant de là, il apparut à l'évidence que les zones présentant des échanges limités avec les océans, estuaires, fjords, baies, mers semi-fermées, étaient à plus forte raison, les plus menacées. Diverses études montrèrent combien, dans de tels cas, les phénomènes peuvent être rapides : les eaux de la Mer Baltique, encore normalement oxygénées sur toute la tranche d'eau en 1960, contiennent partout, dès 1970, de l'hydrogène sulfuré en dessous de 75 m de profondeur, en relation avec les mécanismes d'eutrophisation, bien connus dans les Grands Lacs américains.

Il est inutile d'insister ici sur le caractère particulièrement critique des estuaires, sites éminemment vulnérables du fait de la conjonction d'un très grand nombre de facteurs : occupation industrielle et humaine intensive, limitation des échanges avec l'océan, rôle particulier à l'égard de la vie (nursérie pour de nombreuses espèces vivant très près de

leur seuil de tolérance). C'est donc là que les manifestations les plus alarmantes des pollutions sont observées. Dès 1960, la vie apparaît gravement menacée dans les grands estuaires nord-européens, tels ceux du RHIN et de la SEINE. A la faveur des études alors entreprises, il apparaît que la mobilisation et la répartition des polluants métalliques sont étroitement en relation avec les matières fines en suspension, dans lesquelles des teneurs de 3 900 ppm de Zn, 850 Pb et 18 de Hg ont pu être mesurées (DE GROOT, 1964-1972). Des observations semblables sont effectuées aux Etats-Unis, non seulement pour les métaux lourds, mais aussi pour les pesticides (CHESTER RIVER STUDY, 1972). Pour les bactéries elles-mêmes, il est bien connu que les particules solides constituent des supports préférentiels.

Le rôle essentiel des composés à forte capacité d'adsorption (argiles, matières organiques) apparaît alors bien établi et ceci d'autant plus que les propriétés de ces composés sont susceptibles d'évoluer en fonction des caractéristiques physico-chimiques des milieux liquides dans lesquels ils se trouvent placés (DE GROOT, 1972). Par conséquent, il apparaît alors que l'étude de la distribution des polluants doit nécessairement porter simultanément sur les phases dissoutes et particulières susceptibles d'échanges continuels.

Ainsi, après la découverte, durant la période 1945-1960, du rôle des chaînes trophiques à l'égard des mécanismes d'enrichissement successifs, la période actuelle à partir de 1960 peut être considérée comme celle de la découverte du rôle de la matière inerte comme support et agent de diffusion, voire de concentration, de divers polluants.

En conclusion, si l'on peut donc considérer qu'à l'heure actuelle les mécanismes généraux de distribution des polluants sont relativement bien connus, il convient maintenant d'approfondir les connaissances et de préciser les mécanismes internes intervenant essentiellement à deux niveaux :

- le niveau biologique
- le niveau sédimentologique.

2. RAPPEL SUR LA NATURE ET LA CLASSIFICATION DES POLLUANTS.

2.1. DEFINITION ET CLASSIFICATION DES POLLUTIONS.

L'ONU définit de la manière suivante le terme pollution marine :

"Introduction par l'homme dans le milieu marin, y compris les estuaires, directement ou indirectement, de substances ou d'énergie, pouvant entraîner des effets délétères tels que : dommages aux ressources biologiques, danger pour la santé humaine, entrave aux activités maritimes, y compris la pêche, diminution de la qualité des eaux de mer du point de vue de son utilisation et réduction des possibilités offertes dans le domaine des loisirs".

Cette définition suffisamment générale donne une très bonne idée sur l'étendue et la diversité des questions soulevées par les pollutions.

De très nombreuses classifications des pollutions ont été proposées. Sans entrer ici dans le détail des inventaires relatifs à la nature et à l'origine des divers polluants, il convient toutefois de rappeler que l'on distingue généralement de manière très classique les pollutions suivantes :

1. pollution thermique
2. pollution par germes pathogènes
3. pollutions radioactives
4. pollutions chimiques
5. pollutions organiques.

Le NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1966) propose une classification un peu plus détaillée :

- . eaux usées domestiques et autres effluents consommateurs d'oxygène.
- . agents infectieux.
- . "nutriments" chimiques pour les végétaux aquatiques.
- . composés organiques tels que insecticides, pesticides, détergents.
- . autres substances chimiques et minérales provenant de l'industrie, des exploitations minières et agricoles.
- . sédiments provenant de l'érosion.
- . substances radioactives.
- . chaleur des usines électriques et industrielles.

On voit que dans cette classification, ainsi que cela est suggéré par la définition de l'ONU, les sédiments remaniés sont considérés comme pollution. Cette option n'est pas généralisable. Divers auteurs, dont certains membres du Groupe de travail "ESTUAIRES, DELTAS", ne retiennent comme pollution que les seuls apports de vases contaminées par diverses substances.

Toutefois, eu égard aux conséquences de la remise en suspension de matériaux fins sur l'environnement (diminution de l'éclairement, de l'oxygène dissous notamment), il paraît souhaitable de retenir cette modification au même titre que les autres.

2.2. LOCALISATION DES SOURCES DE POLLUTION.

Dans le cadre d'un système fluvial, les sources de pollution peuvent être localisées :

- a) sur une quelconque portion du bassin versant.
- b) au voisinage immédiat de l'embouchure ou dans l'embouchure même, avec plusieurs possibilités : rejet direct dans l'embouchure, remise en suspension par dragages, érosion des berges.
- c) dans le domaine marin littoral voisin de l'embouchure.

Cette distinction est importante en ce sens que :

- les formes sous lesquelles les polluants parviennent à l'embouchure,
- l'abondance et la périodicité suivant laquelle elles y parviennent,

souvent liées à l'origine géographique, constituent des paramètres essentiels de la gestion des embouchures.

Le rôle exercé par le bassin versant est indéniable : des caractéristiques géologiques et pédologiques, de l'utilisation des sols, de la climatologie et de l'hydrologie fluviale dépendent, à l'aval, la composition des phases particulières et dissoutes et leur évolution saisonnière. D'autre part, les éléments traces métalliques sont, à l'état naturel, toujours associés aux apports fluviatiles et il convient d'en saisir avec précision l'abondance avant de pouvoir apprécier la proportion de ces mêmes éléments artificiellement introduits par pollution (métaux lourds). La pollution de l'air dans le bassin versant a également une influence sur l'hydrologie des précipitations.

Les observations ne pouvant être généralisées à l'ensemble du bassin versant seront limitées à l'extrême avancée de la marée dynamique dans l'embouchure. On recommandera ici la réalisation d'un suivi dont la périodicité sera guidée par le régime saisonnier du fleuve. Les mesures comporteront un large éventail de paramètres et concerneront simultanément les phases liquides et solides. On rappellera à cet égard le rôle particulier des matières en suspension comme support et vecteur des polluants et l'on s'attachera tout spécialement à définir avec précision les caractéristiques minéralogiques et chimiques de ces matières (présence de composés à forte capacité d'adsorption : matière organique, argiles de type smectite, capacité d'échange).

En ce qui concerne les sources situées dans l'embouchure elle-même, diverses études (DE GROOT, MARTIN) incitent à consentir un effort particulier sur les zones à faible salinité où l'évolution spatio-temporelle des formes et de l'abondance des polluants peut être extrêmement rapide. D'autre part, certaines zones souvent négligées ou mal connues (slikkles, schorres, interface eau-sédiment) feront l'objet d'un échantillonnage de densité accrue.

Enfin, le domaine marin littoral voisin de l'embouchure mériterait de faire l'objet d'une surveillance toute particulière notamment dans le cas de mer à marée : du fait de la pénétration du coin salé dans l'estuaire, les risques de contamination d'origine marine sont évidents. Faute d'être prises en compte, de telles sources sont susceptibles d'entacher d'erreurs l'ensemble des études réalisées. Les données relatives au fonctionnement hydrologique et sédimentologique de l'estuaire apporteront de précieux renseignements en vue du choix de la localisation et de la fréquence des observations.

3. COMPORTEMENT DES POLLUANTS DANS L'EMBOUCHURE.

Ainsi que nous l'avons vu précédemment, le comportement de la plupart des polluants, mis à part le cas particulier de la pollution thermique dans les embouchures, est lié à 3 facteurs :

- . le facteur matières en suspension inertes
- . le facteur biologique
- . le facteur hydrologique.

Le rôle de ces facteurs ainsi que les observations et recherches que justifie chacun d'eux seront envisagés successivement.

3.1. LE MILIEU SOLIDE INERTE.

Le rôle capital des particules en suspension dans la mobilisation des polluants n'est plus à démontrer : métaux lourds, organo-chlorés, détergents, bactéries sont principalement amenés au domaine marin sous forme adsorbée. Les processus d'eutrophisation eux-mêmes sont fréquemment déclenchés par des apports massifs de matières organiques particulaires. A l'inverse, du fait de leur nature physique ou de leurs caractéristiques chimiques, certains polluants ne présentent pas de relations préférentielles avec la phase particulaire (hydrocarbures, certains éléments métalliques, etc).

a) POLLUANTS ASSOCIES A DES SUPPORTS PARTICULAIRES.

Ces polluants sont apportés dans l'estuaire sous formes adsorbées. Bien que les connaissances sur la nature exacte des liaisons polluants ↔ particules restent encore à développer, il apparaît que les composés à forte capacité d'adsorption jouent un rôle préférentiel. Durant le cheminement des particules dans l'estuaire, certains polluants sont totalement ou partiellement désorbés, passant alors en solution ou sous une forme libre plus facilement assimilable par l'échelon biologique.

D'autres polluants restent généralement sous forme adsorbée. C'est souvent le cas, notamment, du microbisme "fixé" ou "véhiculé" par les particules inertes inorganiques ou organiques mortes et vivantes. Ces particules constituent de véritables réserves de bactéries, de virus et de parasites. A leur niveau, les survies sont considérablement prolongées et s'établissent des cycles de transmission des polluants microbiens et de leur entretien.

Au total, les mécanismes d'adsorption - désorption et de fixation revêtent une importance capitale à l'égard de la distribution des polluants et il convient d'envisager successivement :

- *la nature des particules à l'entrée dans le système.* On s'attachera tout particulièrement à reconnaître de manière précise l'abondance globale de la phase particulaire et, à l'intérieur de celle-ci, la nature et la quantité des composés à capacité d'adsorption élevée : argiles - en particulier smectites - composés organiques divers. On envisagera l'interaction possible des colloïdes argileux et organiques : "coating effect" des molécules humiques autour des colloïdes argileux. On considèrera également la concurrence possible entre l'argile plus abondante et les matières organiques plus réactives. D'autres composés peuvent également jouer un rôle de support : hydroxydes de fer ou de manganèse, éventuellement carbonates. Le rôle possible des composés amorphes (allophanes, silice) mériterait d'être envisagé.

D'une manière plus globale, la capacité d'échange des phases particulières entrant dans le système doit faire l'objet de mesures systématiques.

Enfin, une meilleure connaissance sur la constitution physique et chimique des flocons complèterait utilement les connaissances relatives aux particules.

- *la destinée sédimentologique des supports.* Si l'on considère, en premier lieu, les supports comme non réactifs et dans le cas d'association support-polluant stable (exemple du scandium solidement fixé sur les argiles et couramment utilisé de ce fait sous sa forme radioactive comme traceur artificiel pour les suspensions), le devenir du polluant relève essentiellement de mécanismes hydrologiques et sédimentologiques. De ce fait, de très nombreux paramètres sont à considérer : degré de stratification, présence de coin salé, structure verticale des vitesses, volume d'eau et de stock particulaire, coefficient de diffusion horizontale et verticale, tensions de frottements sur le fond et les berges, remises en suspension ou dépôt, relations entre bouchons vaseux, crème de vase et sédiments.

Si les connaissances actuelles permettent de cerner globalement les déplacements d'un stock particulaire, elles ne permettent pas de prévoir les transits à l'échelle particulaire. De ce point de vue, on insistera sur l'intérêt des études par traçage radioactif de vase, telle celle réalisée récemment en Gironde.

- *comportement de l'association particule-polluant.* Les matières en suspension et sédiments se comportent-ils comme un "puits" permanent à l'égard des polluants ou agissent-ils comme supports temporaires susceptibles dans certaines conditions de restituer ces polluants dans le système ?

Il s'agit ici d'une question extrêmement importante, puisque, de l'évolution de cette association dépendent en définitive les modalités de la diffusion et la nocivité des polluants. Les facteurs entrant en jeu à ce niveau sont extrêmement variés et, en dépit du nombre très important d'études déjà réalisées ou actuellement en cours sur ce sujet, les connaissances à acquérir restent considérables.

1er FACTEUR - Le premier des facteurs à envisager est celui de la nature même du polluant : organique, inorganique, anionique, cationique, gazeux, métallique, etc. Les études récentes (MOORE et SILVER, 1975) montrent que dans un milieu naturel il existe, pour un composé donné (phosphore), dans des conditions données, un "coefficient de partition" entre le milieu liquide et solide. Ce concept de "coefficient de partition" mériterait d'être généralisé et justifierait des recherches relatives aux principaux types de polluants.

Les connaissances actuelles à ce sujet sont relativement avancées en ce qui concerne les métaux lourds, soit à la faveur d'expériences réalisées en laboratoire (KHARKAR et al., 1968), soit à partir d'observations en nature (DE GROOT). Beaucoup d'inconnues demeurent, par contre, en ce qui concerne les polluants organiques et les nutriments. Enfin, les phénomènes

nes de "concurrence" entre polluants pour l'occupation des sites d'adsorption constituent un vaste champ de recherches à entreprendre.

2ème FACTEUR - Nature et évolution des supports et, par voie de conséquence, nature des associations particules-polluants. Au fur et à mesure de leur cheminement dans l'estuaire, les stocks de particules subissent une évolution d'ordre physique ou chimique entraînant à la fois des modifications des liaisons et des capacités d'adsorption. C'est ainsi qu'au niveau des composés organiques, on assiste, d'amont en aval, à des variations des rapports C/N et acides humiques/fulviques, du rapport isotopique δ^{13} et de la teneur en groupements fonctionnels.

En ce qui concerne la fraction minérale, les mécanismes de ségrégation ou de transformation sont responsables, notamment dans le cas de mer à marée, d'une notable évolution des phases argileuses dont la teneur en minéraux gonflants à forte capacité d'adsorption (smectites, interstratifiés) subit des variations spatiales importantes telles celles décrites par GALENNE en LOIRE.

D'une manière générale, on peut estimer que, si l'ensemble de ces manifestations est aujourd'hui unanimement reconnu par la communauté scientifique, leurs conséquences au niveau de la diffusion des polluants sont trop souvent négligées.

On recommandera donc, lors de toute étude d'environnement, la réalisation d'un suivi systématique de la nature et de l'évolution de la phase particulaire. Parallèlement, il convient d'encourager les études de type fondamental consacrées à la nature et à la stabilité des liaisons entre polluants et substances minérales organiques et organo-minérales.

3ème FACTEUR - Evolution des conditions physico-chimiques et chimiques : Salinité, pH, Eh, température, oxygène dissous. L'importante évolution des conditions physico-chimiques le long d'un estuaire est un facteur majeur à l'égard du comportement de l'association particule-polluant.

Les phénomènes de désorption, apparemment liés à l'accroissement de la salinité, sont les mieux connus (EMS, GIRONDE) mais les mécanismes eux-mêmes restent à préciser. Des essais d'interprétation (MARTIN), faisant intervenir l'inversion du signe du potentiel électrocinétique des matières solides en fonction de l'accroissement de salinité, ont été proposés. Les complexes organiques semblent également jouer un rôle considérable dans ces processus.

Les données relatives à l'influence du degré d'oxygénation du milieu restent insuffisantes. Au niveau des composés organiques, ce paramètre joue cependant un rôle très appréciable sur leur évolution, rôle qu'il conviendrait de préciser.

L'influence de la température revêt également une importance toute particulière, ce facteur étant par ailleurs une pollution de plus en plus fréquente dans les systèmes estuariens. D'une façon générale, tous les mécanismes énumérés dépendent de la température. La

plupart des réactions chimiques se trouvent activées par l'élévation de température et la seule variation de ce paramètre peut entraîner des modifications de nombreuses caractéristiques chimiques du milieu et donc de leurs conséquences. Parmi celles-ci les plus préoccupantes pourraient être une accélération des processus de désorption des éléments métalliques. Par la suite, elle pourrait favoriser la formation de composés organo-métalliques, composés dont le méthyl-mercure constitue un exemple particulièrement redoutable. Enfin, l'élévation de température, en abaissant le taux d'oxygène dissous, favorise l'établissement de conditions réductrices dont les conséquences sont particulièrement sensibles à l'échelon biologique (voir ci-dessous).

On soulignera, en conclusion, le caractère interdépendant de tous les facteurs susceptibles d'intervenir sur le comportement des liaisons particules-polluants. D'autre part, il convient d'insister sur le fait que la plupart des liaisons et de leur évolution dépendent pour beaucoup du temps de contact entre particules et eau. L'estuaire se présentant comme une zone où le polluant séjourne plus longtemps, où il y a des stockages et des recyclages, le facteur temps contrôle les échanges. En définitive, le régime sédimentologique de l'estuaire, et en particulier le temps de séjour des particules en suspension, prennent toute leur importance. A cet égard, on insistera sur l'importance de ce facteur dans les estuaires de mer à marée, caractérisés par des déplacements oscillants extrêmement prolongés. Non seulement l'allongement du temps de séjour en suspension des phases solides favorise les échanges susceptibles de se produire entre eau et matières en suspension, mais en outre, il facilite l'évolution des matières supports elle-même. C'est la raison pour laquelle les estuaires à crème de vase, dont la caractéristique essentielle est celle des échanges continuels et prolongés entre les matériaux de la crème de vase et ceux du bouchon vaseux, constituent certainement les types d'embouchure à réactivité maximale.

Il importe donc de donner aux études relatives aux pollutions une très solide assise sédimentologique.

b) AUTRES POLLUANTS.

Il s'agit de pollutions ne présentant pas de liaison spécifique avec les matières solides, mais dont les manifestations sont, soit provoquées, soit favorisées, soit modifiées par les apports sédimentaires. Il s'agit également de polluants susceptibles de modifier le comportement hydrodynamique des matières particulières.

Dans la première catégorie se rangent les pollutions organiques responsables des processus d'eutrophisation conduisant à l'anoxie. Ces mécanismes sont bien connus dans l'ensemble et il pourrait paraître superflu d'envisager à ce sujet des recherches particulières. Toutefois, compte tenu de l'accroissement prévisible de la pollution thermique en estuaire, les risques d'eutrophisation vont se trouver aggravés du fait de l'abaissement du taux d'O₂ dissous avec la température. On soulignera donc ici l'importance qu'il convient de donner au contrôle des teneurs en matières organiques, véhiculées par les estuaires.

Dans une seconde catégorie, il faut citer le rôle encore mal connu des détergents qui, agissant comme agents tensio-actifs, sont susceptibles de modifier la charge électrique des particules sédimentaires et d'entraîner des déviations au niveau de la floculation et de la vitesse de chute. Ces phénomènes pourraient être responsables du déplacement des aires de sédimentation en divers estuaires et notamment en LOIRE.

Il paraîtrait donc judicieux de développer des études visant à préciser l'action de ces agents tensio-actifs.

3.2. LE MILIEU VIVANT.

Du point de vue du comportement des polluants, le milieu vivant intervient de deux manières :

- en tant que polluant par lui-même,
- en tant que facteur de concentration ou de dégradation des polluants.

a) LE MILIEU VIVANT EN TANT QUE POLLUANT.

Dans cette catégorie entrent en premier lieu les germes pathogènes, dont la fréquence est actuellement croissante dans toutes les zones littorales et estuariennes, où ils sont déversés par les rivières et les collecteurs d'égouts. La contamination suit fidèlement l'accroissement de la densité et de l'activité humaine.

Pour survivre, ces germes ont besoin d'un substrat énergétique et l'on constate (BRISOU, 1970) que leur distribution est gouvernée par la teneur en matière organique et par ses qualités. Les matières en suspension en estuaire, généralement flocons organo-minéraux, constituent de ce fait de véritables réserves de bactéries, virus et parasites.

Certaines observations ont pu inciter quelques auteurs à penser que ces organismes seraient détruits par le milieu marin, par suite des phénomènes d'autoépuration. Tout le monde s'accorde actuellement à reconnaître que ces mécanismes sont extrêmement limités et en tous les cas inefficaces au niveau des estuaires et des zones fortement polluées. Par ailleurs, la pollution thermique peut également y provoquer des développements bactériens anormaux, accroissant ainsi les risques liés aux germes pathogènes.

On est donc conduit à recommander tout spécialement un contrôle sanitaire comportant des prospections systématiques et régulières portant sur les phytocénoses et les zoocénoses. En raison du caractère fixé de ces organismes, cette surveillance exige l'examen systématique, non seulement des eaux, comme cela se fait en routine, mais aussi et surtout :

- du plancton, dont il importe de suivre les variations diurnes, nocturnes et saisonnières,
- des sédiments, des sables (marées hautes et marées basses),
- des germes recueillis par la méthode des gazes immergés et tractés à l'arrière d'un bateau.

Sur le plan de la connaissance épidémiologique, on notera l'intérêt qu'il y aurait à reprendre entièrement, et sur des bases statistiques, les enquêtes relatives à la transmission des germes à l'homme. Trop d'enquêtes, en effet, se trouvent entachées d'erreurs pour n'avoir pas tenu compte des temps d'incubation : si les affectations microbiennes se déclarent en général 15 jours à 3 semaines après le contact infectant, les viroses ne se manifestent bien souvent qu'à la fin du premier mois, voire 60 à 90 jours après (hépatites).

Dans une deuxième catégorie, entre le développement anarchique des espèces phytoplanctoniques qui, avec des densités pouvant atteindre plusieurs dizaines de millions de cellules par litre, réalisent une véritable autopollution (PERES, 1974).

Cette explosion biologique est liée aux apports d'azote et de phosphore minéraux véhiculés par les fleuves et provenant soit de l'utilisation des fertilisants sur les bassins versants, soit de la dégradation du matériel organique. Elle est généralement accélérée par la pollution thermique ainsi que par la présence de molécules organiques dissoutes (urée, amine, acides aminés, glucides), qui peuvent être utilisés comme source de carbone par diverses algues planctoniques. Elle est également accélérée par le ralentissement du cours des fleuves, les barrages de basse chute et le non entretien des berges.

Dans de telles conditions, le fond des estuaires reçoit des quantités importantes de matériel organique dont la dégradation entraîne une importante consommation d'oxygène. L'estuaire comporte alors :

- une couche superficielle d'épaisseur variable plus ou moins oxygénée,
- une couche profonde, anoxique, d'où toute vie autre que microbienne est bannie.

L'épaisseur de ces deux couches, leur permanence ou leur disparition, dépendent évidemment des caractéristiques hydrologiques de l'estuaire et du fleuve.

Si de très nombreuses études ont permis d'aboutir à une bonne connaissance générale de ces phénomènes, il reste toutefois des inconnues sur les mécanismes exacts du déclenchement de la prolifération des algues. Il apparaît que l'un des facteurs importants est le rapport $\frac{N}{P}$. Il semble également que des facteurs de croissance (vitamine B₁₂) interviennent. Il se pourrait aussi qu'un réchauffement anormal constitue un élément de déclenchement des phénomènes d'eutrophisation (PERES, 1974).

Eu égard à l'accroissement des risques de pollutions thermiques, il paraît donc souhaitable que des études visant à préciser ces mécanismes soient retenues.

b) LE MILIEU VIVANT FACTEUR DE CONCENTRATION OU DE DEGRADATION DES POLLUANTS.

Les mécanismes de concentrations aux divers niveaux des chaînes trophiques ont

été très bien étudiés pour certains polluants (quelques métaux par exemple), cependant les connaissances concernent surtout les espèces biologiques consommées par l'homme (par exemple concentration du cuivre et des polychlorophényles par les bivalves). Dans l'ensemble, des lacunes importantes demeurent et s'aggravent même, si l'on tient compte de la diversification de plus en plus poussée des polluants libérés dans les milieux naturels.

Il conviendrait d'étudier en détail l'incidence des formes sous lesquelles les polluants sont disponibles pour le milieu vivant. En fonction du mode de nutrition des espèces, un polluant introduit sous forme adsorbée sur des particules, ou sous forme dissoute, ne sera pas assimilé de la même manière et, en définitive, les facteurs de concentration d'origine biologique seront différents. L'appréciation même de la notion de facteur de concentration mérite d'être réenvisagée : dans le cas des espèces se nourrissant de matières en suspensions, le facteur de concentration ne peut pas être calculé en fonction des teneurs dans l'eau, comme cela est trop souvent le cas.

Les mécanismes de biodégradation des divers types de polluants souvent invoqués à propos du "rééquilibrage" des milieux et des phénomènes d'autoépuration restent encore insuffisamment connus. En ce qui concerne les hydrocarbures par exemple, de nombreux processus de biodégradation ont été décrits (ZOBELL, 1950 - LEPETIT - BARTHELEMY, 1968). Cependant, ces actions biologiques se manifestent différemment, selon l'état physique et la composition chimique des polluants. De même, l'influence néfaste des émulsifiants utilisés pour disperser les hydrocarbures n'a pas été suffisamment étudiée.

Les mêmes remarques peuvent être faites au sujet des pesticides et des détergents. Pour ces derniers, la commercialisation de produits, dits "biodégradables", ne résoud pas tous les problèmes : le comportement de ces produits, testé en laboratoire, doit faire l'objet d'études dans les milieux naturels.

Enfin, la pollution thermique, et les pollutions chimiques qui lui sont associées, provoquent une destruction massive de matière vivante dont les produits de décomposition peuvent jouer un rôle important sur la mobilisation des autres polluants. La formation d'organo-métalliques et d'organochlorés devra faire l'objet d'une surveillance toute particulière.

4. CONCLUSIONS.

Pour importantes que soient les connaissances déjà acquises sur le comportement des polluants dans les milieux naturels, l'établissement des modèles de gestion écologique reste actuellement irréalisable dans le cas des systèmes complexes et, notamment, celui des systèmes estuariens. On ne perdra pas de vue que toute étude de pollution en estuaire ou delta doit être guidée par des modèles hydrodynamique et sédimentaire. Entreprises il y a quelques décennies seulement, les études ont un caractère nécessairement spécialisé ; il importe maintenant de donner aux recherches des orientations plus générales en faisant intervenir des équipes polyvalentes, associant des disciplines variées.

Face à cette nécessité et compte tenu de l'étendue et de la diversité des problèmes restant à résoudre, on veillera cependant à ne pas disperser les efforts sur un nombre important d'objectifs. Des priorités doivent être dégagées et, parmi celles-ci, on retiendra plus particulièrement :

1. L'étude des domaines estuariens actuellement les moins connus : zones à faible salinité, slikkes, schorres, interfaces eau-sédiment.
2. L'étude détaillée du rôle des phases particulières : abondance, nature, évolution, comportement en fonction des conditions de milieu. Dans un premier temps, ce rôle pourrait être envisagé au niveau d'un nombre réduit de polluants types, choisis par exemple parmi les groupes suivants : pesticides, herbicides, métaux lourds, germes pathogènes.
3. Etude de l'influence du milieu vivant sur la concentration et la dégradation de quelques polluants, hydrocarbures et détergents notamment.
4. Etude de certains risques particuliers de synergie : en relation avec la mise en oeuvre du programme énergétique national, la pollution thermique va subir dans la prochaine décennie un accroissement important et notamment dans certains sites estuariens. Le facteur thermique ayant des conséquences sur la plupart des mécanismes touchant aux pollutions, il conviendrait qu'un effort de recherche particulier soit consenti à cet égard.

THEME 4

MECANISMES ET MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES
EN LIAISON AVEC L'HYDRO-DYNAMIQUE.

L'exposé concernant le thème 4 suit un cheminement légèrement différent de celui des autres thèmes. Il existe, en effet, sur l'hydro-dynamique, la dynamique sédimentaire et les relations entre elles dans les embouchures, une somme de connaissances relativement plus importante que dans le cas des trois autres thèmes. Il est normal, dans ces conditions, de s'appuyer sur un rappel de ces connaissances pour relever à l'occasion les lacunes et définir les recherches à effectuer. Il en résulte que le bilan historique et l'inventaire des lacunes de connaissance sont présentés ensemble. Par ailleurs, il a paru possible dans le cas du thème 4 de définir avec précision un certain nombre de recherches, dont la liste figure à l'*annexe 4*. Enfin, la partie consacrée à l'aménagement et à l'utilisation des embouchures n'envisage que les problèmes relevant du thème 4, à l'exclusion des trois autres thèmes qui sont cependant indirectement impliqués.

1. BILAN DES CONNAISSANCES ; LACUNES A COMBLER -

L'étude scientifique des phénomènes hydrologiques et sédimentologiques des embouchures fluviales a débuté, d'une façon systématique, vers la fin du 19ème siècle en liaison avec les travaux d'aménagement des chenaux d'accès aux grands ports d'Europe et des Etats-Unis. Au début du 20ème siècle, les principes généraux concernant les mécanismes d'embouchure ont pu être dégagés. C'est ainsi que, dans les années 1930-1935, le phénomène de "bouchon vaseux" a été découvert quasi simultanément, en France par GLANGEAUD et en Angleterre par ALEXANDER, SOUTHGATE et BASSINDALE.

Le phénomène fondamental, traduisant l'hydrologie des embouchures, à savoir les mouvements résiduels de l'eau *, liés à l'existence de gradients verticaux de salinité, a été mis en évidence dans les années 40 et 50, surtout par KEULEGAN, SIMMONS et PRITCHARD, aux U.S.A. Depuis ces travaux fondamentaux, de nombreuses études ont permis de préciser la nature générale des processus responsables du transport et de l'accumulation des sédiments dans le milieu estuarien, en relation avec les phénomènes hydrodynamiques.

1.1. HYDROLOGIE.

Les mouvements de l'eau dans les embouchures sont régis par des phénomènes advectifs et diffusifs, liés à l'intensité du débit fluvial et à la marée, dont l'interaction crée des mélanges entre l'eau douce et l'eau salée.

De l'intensité de ces mélanges, dépend l'intensité des mouvements résiduels et le caractère "estuarien" ou "deltaïque" de l'embouchure. De nombreuses études, dans plusieurs embouchures dans le monde, ont mis en évidence les liens existant entre le rapport : débit fluvial/prisme de marée, et la géométrie et l'intensité de la stratification verticale des mouvements résiduels de l'eau. D'une façon générale, ce phénomène est relativement bien connu en deux dimensions, et a été plusieurs fois reproduit et étudié en canal expérimental et en maquette hydraulique.

Plusieurs classifications d'embouchures ont été proposées (PRITCHARD, HANSEN et RATTRAY) basées sur l'intensité de ces écoulements résiduels, ainsi que sur le rapport débit fluvial/prisme de marée. Une des classifications (PRITCHARD) prévoit l'effet de la morphologie (rapport largeur/profondeur) sur l'hydrologie. Cette liaison a été mise en évidence lors de travaux d'approfondissement des chenaux d'embouchure par l'augmentation des gradients verticaux de la salinité. Par contre, aucune étude comparative de plusieurs embouchures, ayant à peu près le même rapport débit fluvial/prisme de marée, mais de différentes morphologies, n'a été faite.

L'existence, en deux dimensions d'une zone de convergence de la composante horizontale des courants résiduels près du fond ("point nodal") est maintenant bien connue, de même

* On peut définir le mouvement résiduel de l'eau comme résultant du mouvement global filtré des ondes à courte période de la marée.

que son évolution en fonction des différentes conditions hydrologiques saisonnières. Les travaux de IPPEN et HARLEMAN ont montré l'importance fondamentale de cette zone pour l'accumulation des sédiments en suspension. Plus récemment, les travaux de CONOMOS et PETERSON, dans la Baie de San Francisco, ont indiqué que le plancton était aussi influencé par ce même phénomène.

Si les phénomènes hydrologiques généraux, et à grande échelle, sont assez bien connus en deux dimensions, il n'en est pas de même pour les mécanismes fondamentaux de ces phénomènes, les processus d'advection et de diffusion. Les travaux théoriques de PRITCHARD, HANSEN, BOWDEN, etc, dans les années 1950 et 1960, ont montré la nécessité de l'existence, pour des raisons de continuité, d'un "upwelling" consistant en un entrainement vers la surface et l'aval des eaux du fond dans l'intrusion saline. Deux chercheurs seulement, PRITCHARD et NICHOLS, ont tenté d'évaluer ce flux vertical. Aucune étude n'a été faite sur les variations longitudinales de ces mélanges verticaux, ni sur leur évolution en fonction des modifications hydrologiques saisonnières.

Les phénomènes de dispersion et de diffusion ont été l'objet de quelques études, notamment pour les eaux de surface. Ces études ont montré l'existence de plusieurs mécanismes qui se conjuguent pour disperser des masses d'eau : la turbulence et les gradients de vitesse. Le phénomène d'échelle, entre la taille de la masse d'eau se dispersant et la taille de l'embouchure, semble être primordial, mais les modalités de l'évolution des phénomènes de dispersion en fonction du temps et des échelles relatives restent à préciser.

Les phénomènes hydrodynamiques latéraux ne sont pratiquement pas connus. Depuis les années 1940 et 1950, on sait que pratiquement toutes les embouchures montrent un gradient latéral de salinité. Ce gradient latéral semble être dû à l'effet de la force de Coriolis, qui provoque une accumulation des eaux plus douces le long de la rive droite et des eaux plus salées le long de la rive gauche de l'embouchure, ce schéma est inversé dans l'hémisphère sud.

L'existence de mouvements transversaux à grande échelle a été démontrée dans deux études récentes. L'une en Gironde par traçage et l'autre en Angleterre par la continuité des flux de sel. Ces études ont montré que ces mouvements pouvaient atteindre une ampleur considérable et s'effectuaient par advection (mouvement de masse) et non pas par diffusion. Actuellement, rien n'est connu de la relation entre ces mouvements et les variations hydrologiques : débit fluvial, marnage, etc.

L'évolution saisonnière des gradients de densité et de la circulation résiduelle en fonction des variations du débit fluvial est relativement bien connue. Par contre, dans les embouchures soumises à une amplitude de marée importante (le cas de la façade Atlantique française), il semblerait que des variations du marnage (cycle des mortes eaux-vives eaux) puissent provoquer des changements de stratification et de mélange. Ces variations qui reflèteraient l'évolution du rapport débit fluvial/prisme de marée, au cours du cycle des coefficients, restent à préciser.

L'analyse de la répartition des salinités a pu permettre à plusieurs chercheurs d'évaluer approximativement le temps de renouvellement des eaux douces dans l'embouchure. Néanmoins

le manque de connaissance des phénomènes diffusifs et advectifs verticaux rend très difficile l'évaluation du taux de renouvellement des eaux contenues dans l'embouchure. L'hydrologie générale des courants résiduels indique que les embouchures sont des zones de "stockage", où les taux de renouvellement sont liés au débit fluvial, mais il reste encore à préciser les ordres de grandeur et leur variation dans le temps et l'espace avec davantage de précision.

En conclusion, si les grandes lignes de l'hydrodynamique des embouchures sont connues en deux dimensions, les connaissances sont extrêmement limitées dans les domaines suivants :

1. mélanges verticaux entre les couches d'écoulements résiduels.
2. coefficients de dispersion ; leur évolution sur un profil vertical, et en fonction des paramètres hydrologiques.
3. transferts latéraux.
4. évolution des phénomènes hydrologiques en fonction du coefficient de marée.
5. taux de renouvellement des eaux fluviales et marines, variation de ce taux dans l'embouchure, et en fonction des conditions hydrologiques.

1.2. TRANSPORTS ET ACCUMULATION DES SEDIMENTS.

1.2.1. TRANSPORT PAR CHARRIAGE.

Si les mécanismes du transport par charriage commencent à être cernés (lois empiriques, travaux en canal, traçages, etc.) il n'en est pas de même des phénomènes de charriage à grande échelle dans les embouchures. Au contraire des phénomènes hydrodynamiques, on sait actuellement très peu de choses sur les modalités du charriage des sables dans les estuaires et de sa liaison avec les marées et le débit fluvial, ainsi que des changements visibles à grande échelle : évolution et migration des bancs. Peu de données existent sur le volume des apports de sable fluvial dans les estuaires. De récentes études en Loire et Gironde semblent indiquer que ces apports seraient de l'ordre de 15 à 40 % des apports de sédiments en suspension. Ces chiffres proviennent, non pas de mesures directes, qui sont extrêmement difficiles à réaliser et à extrapoler dans le temps, mais de l'étude de la granulométrie des sédiments ainsi que de l'évolution des fonds.

La prédominance des courants de flot au fond dans la partie aval des embouchures, ainsi que la dérive littorale, souvent orientée vers l'amont, engendrent un transport de sable marin vers l'amont, provoquant une zone de convergence des apports fluviaux et des apports marins. Ceci semble être confirmé par la morphologie des grains constituant les sables. Des études par traceur radioactif, ainsi que l'analyse de la morphologie des bancs sableux dans les embouchures à marées, suggèrent l'existence d'une cinématique très complexe des transports. Certaines zones sommitales des bancs sont le site d'un charriage résultant vers l'amont, tandis que les zones latérales semblent être soumises à un transport résultant vers l'aval. Ces réseaux de transport, apparemment opposés, peuvent donner lieu à des transports "cellulaires", avec un recyclage du sédiment transporté, alternativement dans un sens puis

dans l'autre, ou sur une boucle plus ou moins fermée. Néanmoins, il semble se produire un mouvement à terme vers l'aval qui s'effectue par le biais d'un allongement des bancs sableux vers l'aval, ou par une migration du banc entier. Ces phénomènes ont été mis en évidence dans plusieurs embouchures par MIGNIOT, à la suite de l'analyse de nombreuses cartes bathymétriques établies sur une grande période.

Les mécanismes de cheminement des sédiments en charriage sont liés aux conditions hydrologiques et, notamment, à la variation de l'asymétrie de l'onde de marée due aux courants résiduels et à la morphologie de l'embouchure. Les mouvements semblent s'effectuer par à-coups, liés à des phénomènes saisonniers (débit fluvial) et mensuels (cycle des marnages). A l'heure actuelle, nos connaissances des variations dans le temps et l'espace des courants près du fond, résultant des évolutions hydrologiques, sont trop fragmentaires pour permettre l'application des formules de débit de charriage et la connaissance des bilans des transits reste encore extrêmement qualitative.

Une asymétrie de l'onde de marée, créée au fur et à mesure de sa propagation vers l'amont, est responsable, par l'asymétrie des courants qu'elle provoque, d'un blocage des fractions granulométriques grossières à l'amont, créant ainsi un "filtre granulométrique" pour les apports fluviaux. Ce n'est que dans les embouchures, où le rapport débit fluvial/prisme de marée est extrêmement élevé (embouchures deltaïques), que l'intrusion saline et, en conséquence, le "point nodal" peuvent être évacués hors de l'embouchure et que les fleuves pourront apporter des sédiments en charriage à l'océan.

En résumé, les grandes lacunes de nos connaissances dans le transport par charriage sont les suivantes :

1. Bilans généraux des apports provenant des fleuves et de la mer, importance relative des sables dans le colmatage des embouchures estuariennes et la progradation des deltas.
2. Rôle des mécanismes saisonniers et mensuels (cycle des amplitudes de marées) dans le transit des sédiments en charriage dans les chenaux ; bilans des débits de charriage - corrélation avec la morphologie des formes matérialisant le transport (dunes et bancs).
3. Dynamique des transits et notamment les relations entre les chenaux et les bancs ; évolution des transits en fonction du débit fluvial et des coefficients de marée.

1.2.2. SEDIMENTS EN SUSPENSION.

Depuis la découverte du phénomène de bouchon vaseux par GLANGEAUD dans la Gironde, les connaissances des phénomènes de transport en suspension ont progressé rapidement, en même temps que l'amélioration des connaissances de l'hydrodynamique des embouchures. Les problèmes liés à la sédimentation des vases dans les chenaux maritimes ont motivé depuis quelques années de nombreuses études, à la fois sur les mécanismes de transport en suspension et sur les grandes lignes de leurs évolutions dans les embouchures. Ces études ont été effectuées en nature (prélèvement hydro-sédimentaires, traçages, examen de l'évolution des fonds, etc.) et en laboratoire (canal et maquettes). Actuellement, on connaît relativement mieux les phénomènes de suspension dans les embouchures que ceux liés au charriage.

La facilité relative du dosage des apports de sédiments en suspension par les fleuves (mesures de concentration), ainsi que la corrélation entre le débit fluvial et la teneur de sédiments en suspension facilitent le calcul des apports annuels provenant des fleuves. Ceux-ci varient de quelques dizaines de milliers de tonnes par an pour les petits fleuves, jusqu'à plusieurs millions de tonnes par an pour les grands fleuves, (Gironde : 2 à 2,5 millions de tonnes par an ; Rhône : 2 à 3 millions de tonnes ; Loire : 1 à 1,5 millions de tonnes).

Dans les embouchures du type deltaïque, c'est-à-dire avec un rapport débit fluvial/prisme de marée élevé, la majeure partie des apports fluviaux en suspension est évacuée en mer. Dans les embouchures à caractère estuarien, les phénomènes sont beaucoup plus complexes. Pendant de nombreuses années, on pensait (surtout les chercheurs anglo-saxons) que la presque totalité des apports fluviaux se sédimentaient dans l'embouchure. De récents travaux, notamment en France, ont montré que, dans les estuaires à forte alimentation en suspension (comme cela est souvent le cas en France) et marqués par des grandes variations de débit fluvial et de marnage, un certain pourcentage des apports fluviaux est évacué en mer. A l'heure actuelle, aucun bilan précis entre les apports fluviaux, la sédimentation dans l'estuaire et l'évacuation en mer n'a été effectué. Certaines études récentes ont montré, qu'à l'aide d'une étude comparative de l'évolution des fonds sur plusieurs décennies et des flux résiduels de sédiments en suspension hors de l'embouchure, pour différentes conditions de marée et de débit fluvial, il sera possible d'effectuer des bilans globaux estimés.

Le problème concernant l'origine des apports en suspension pour certains estuaires reste à préciser. En effet, si dans la majorité des grandes embouchures françaises, l'alimentation est quasi totalement fluviale, un certain nombre d'embouchures (Vilaine, Orne) semble être alimentées par des sédiments provenant de la mer. Sur les côtes de la Guyane Française, les embouchures (Cayenne, Mahury) sont alimentées par les suspensions provenant de l'Amazone et transportées le long de la côte vers le Nord Ouest, par le courant de Guyane.

Le phénomène essentiel qui régit le transit et l'accumulation des sédiments en suspension est la convergence des courants résiduels de fond dans la partie amont de l'intrusion saline. Ce phénomène engendre un piégeage et une concentration des sédiments en suspension : le bouchon vaseux. Cette concentration est d'autant plus marquée que la vitesse de chute des sédiments est supérieure à la vitesse de mélange verticale des eaux de la couche de fond vers la couche de surface. Contrairement aux opinions qui prévalaient, il y a quelques décennies, la floculation n'apparaît pas tant comme le mécanisme responsable du bouchon vaseux, que comme un mécanisme amplificateur de celui-ci, par l'augmentation de la vitesse de chute qu'elle entraîne. Néanmoins, le passage de l'eau douce à l'eau salée provoque d'importants changements des propriétés chimiques des sédiments argileux, qui se traduisent par une variation du potentiel d'adsorption des sédiments. Le bouchon vaseux a été mis en évidence dans de très nombreuses embouchures de par le monde. En France, il a été étudié dans la Somme, la Seine, l'Elorn, l'Aulne, le Blavet, la Vilaine, la Loire, la Gironde, le Rhône. Dans les embouchures à faibles apports de sédiments en suspension et à faible marnage, le bouchon vaseux est un phénomène temporaire, se formant en périodes de crues et d'apports de sédiments, puis

se dissipant par décantation des sédiments. Dans les embouchures de la côte Atlantique française, les forts courants de marées créent un phénomène de gonflement et de dissipation du bouchon vaseux sur un cycle semi-diurne, avec décantation aux étales et alimentation par érosion du fond lors des périodes de courant établi. Dans ces embouchures estuariennes, le bouchon vaseux est un phénomène continu, modulé par les coefficients de marée et de débit fluvial. Le cycle des coefficients de marées joue un rôle important, car il engendre un cycle d'érosion et de sédimentation s'effectuant entre les vives eaux et les mortes eaux. Dans les embouchures très turbides, s'accumulent au fond des chenaux en mortes eaux, des lentilles d'eau extrêmement chargées de sédiments en suspension (la "crème de vase"). Ces lentilles sont immobiles pendant plusieurs cycles de marées et donnent lieu à d'importants dépôts de vase dans les chenaux. Ces formations de crème de vase sont déclenchées par l'existence d'une "lentille immobile" de l'eau du fond au début du jusant. Ce phénomène, découvert par BERTHOIS dans la Loire, a été constaté dans plusieurs embouchures estuariennes.

Les études de plusieurs embouchures dans le monde ont établi la structure longitudinale du bouchon vaseux, ainsi que sa migration vers l'amont en période d'étiage, et vers l'aval en période de crues.

Des coupes transversales, établies dans des embouchures estuariennes relativement larges, ont montré que les phénomènes de suspension n'étaient pas homogènes sur toute la largeur de l'embouchure et que certains chenaux concentraient et transportaient davantage de sédiments en suspension. Une récente étude par traceur a montré que, dans l'estuaire de la Gironde, il y avait un important déplacement latéral des sédiments en suspension de la rive Sud à la rive Nord, et que ce déplacement faisait probablement partie d'un cheminement latéral général des masses d'eau dans la partie aval de l'estuaire. De plus, cette étude a montré que les coefficients de dispersion des sédiments en suspension étaient très faibles ($< 1 \text{ m}^2/\text{sec}$) au cours d'une marée. De même, les mélanges verticaux semblaient peu élevés. Hormis ces constatations ponctuelles et fragmentaires, ces phénomènes essentiels de transport latéraux n'ont jamais été étudiés.

L'existence de cartes bathymétriques, datant pour les grandes embouchures européennes du 17^{ème} siècle, a permis d'étudier la distribution et le volume des sédiments vaseux qui se sont déposés. Avant que l'intervention de l'homme ne se soit manifestée par des dragages de chenaux, l'accumulation des sédiments fins se répartissait régulièrement dans les estuaires, de part et d'autre des zones de localisation du bouchon vaseux, en période de crue et d'étiage. L'approfondissement des chenaux de navigation, et les dragages qu'ils ont nécessité à partir de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, a parfois totalement bouleversé la répartition et les volumes de sédiments accumulés dans les estuaires. Ainsi, en Gironde, on note un basculement de la sédimentation du chenal Sud au chenal Nord et une migration vers l'aval de la zone de sédimentation maximum depuis 1856. Il semblerait aussi que l'intervention humaine amplifie le volume des sédiments en suspension qui sont apportés à la mer.

Un certain nombre d'études en canal, effectuées en France et aux Etats-Unis, ont permis de mesurer les conditions hydrauliques (vitesses critiques) pour l'érosion des sédiments argileux, en relation avec leur propriété physique (tassement). Quelques études ont essayé de

préciser les conditions de dépôt des sédiments en suspension, mais ce phénomène est plus complexe que les mécanismes d'érosion et, actuellement, si les conditions qualitatives nécessaires au dépôt des vases sont connues (vitesses critiques), il n'est pas possible à l'heure actuelle de prédire quantitativement la sédimentation qui s'effectuera pour des conditions hydrodynamiques données, sauf en l'absence de courant.

En résumé, si l'on arrive à effectuer une schématisation globale des phénomènes en deux dimensions, les mouvements latéraux ainsi que l'ampleur des mécanismes fondamentaux (mélanges, diffusion, bilans globaux) nous échappent totalement. De même que le taux de renouvellement des suspensions et leur temps de séjour dans le bouchon vaseux sont, à l'heure actuelle, inconnus. Les lacunes à combler dans ces domaines sont donc :

- 1) L'ampleur et la variabilité, dans le temps et sur la verticale, des phénomènes de dispersion (diffusion) et de mélanges verticaux.
- 2) L'ampleur des phénomènes d'érosion et de sédimentation s'effectuant sur un cycle de vives eaux à mortes eaux ; étude des phénomènes de transport différentiel amont ou aval s'effectuant par les variations d'asymétrie dans le temps des courants de marées au fond au cours de ce même cycle ; lois régissant la sédimentation des suspensions.
- 3) L'ampleur et mécanismes de transport latéraux ; relation avec le coefficient de marée, le débit fluvial et la morphologie de l'embouchure.
- 4) Les bilans globaux : apports fluviaux, sédimentation et rejets en mer ; influence de l'homme et de ses aménagements sur l'intensité et la répartition des phénomènes de sédimentation à court et à long terme et évaluation des taux de renouvellement et des temps de séjour.
- 5) Mécanismes de dispersion des sédiments en suspension en mer ; rôle de la houle, du vent, des courants et de la stratification saline.
- 6) Mécanismes et évolution des phénomènes chimiques liés à la transition des argiles en suspension de l'eau douce à l'eau salée : floculation et propriétés adsorptives.

2. PROBLEMES LIES A L'AMENAGEMENT ET A L'UTILISATION DES EMBOUCHURES.

De tout temps, les embouchures des fleuves ont été des sites de prédilection pour l'implantation d'un bon nombre d'activités humaines, basées sur les échanges au moyen des transports maritimes, fluviaux et terrestres. Depuis la révolution industrielle, la majeure partie des grandes concentrations industrielles ont été implantées dans des zones à proximité de grands ports fluviaux ou maritimes. Hambourg, Rotterdam, Londres, Bilbao, Liverpool, Lisbonne en donnent de bons exemples en Europe.

En France, sur les 8 principales zones de concentration industrielles (en excluant la région parisienne), 5 sont des zones portuaires sur la façade maritime et 4 sont sur des embouchures : Le Havre, Nantes, Saint-Nazaire, Bordeaux-Le Verdon, Fos. En plus de ces centres importants, un grand nombre des ports et zones industrielles secondaires sont situés sur des estuaires : Bayonne, Rochefort, Lorient, Brest, Ouistreham.

L'exploitation industrielle des embouchures provoque des conflits avec les autres activités qui y sont aussi implantées : tourisme et pêche, y compris la conchyliculture. Leurs causes sont liées, en grande partie, à la dégradation directe de la qualité du milieu par les pollutions urbaines et industrielles, ainsi qu'aux changements des processus naturels occasionnés par les travaux d'aménagement. Parmi ces modifications du milieu naturel liées à l'activité humaine, on peut citer les phénomènes suivants :

2.1. APPROFONDISSEMENT DES CHENAUx ET AUTRES MODIFICATIONS MORPHOLOGIQUES.

- . Augmentation de l'intrusion saline, avec amplification des gradients verticaux de densité et renforcement de la circulation résiduelle vers l'amont au fond. Ceci peut avoir pour effet le piégeage de polluants et de sédiments en suspension, ainsi que la migration de la faune sténohaline vers l'amont (exemples : Loire, Savannah, Tamise).

- . Augmentation de la turbidité des eaux par remise en suspension des sédiments vaseux et effet de piégeage mentionné ci-dessus ; conséquences sur la faune, oxygène dissous, remise en circulation de polluants.

- . Changements des zones de sédimentation et amplification de l'intensité de celle-ci. Les remises en suspension par dragage peuvent augmenter le transfert latéral des sédiments en suspension (Gironde) et faire migrer vers l'aval la zone d'accumulation des sédiments vaseux ; ainsi qu'augmenter les apports de sédiments en suspension (y compris nutriments biologiques et polluants) en mer.

- . Variations des modalités de la propagation de l'onde marée : l'approfondissement des chenaux augmente la vitesse de propagation de l'onde marée et réduit la dissymétrie de la vitesse différentielle de propagation des ondes de flot et de jusant ; ce phénomène s'accompagne d'un changement dans les répartitions des vitesses de flot et de jusant, peut entraîner des incidences sur le transport des sédiments et provoquer une amplification du marnage.

2.2. PRELEVEMENTS D'EAU FLUVIALE.

Le prélèvement d'eau fluviale entraîne une série de conséquences :

- . augmentation de l'intrusion saline (Loire), avec effets induits décrits ci-dessus ;
- . décroissance de la stratification verticale, augmentation des mélanges verticaux ;
- . migration du point nodal vers l'amont, avec déplacement concomitant du bouchon vaseux et de la zone de sédimentation des suspensions (Loire) ;
- . augmentation du temps de renouvellement des eaux douces dans l'estuaire.

2.3. CONTROLE DU DEBIT FLUVIAL PAR BARRAGES ET RETENUES.

Ce type d'aménagement a pour conséquences :

- . la réduction des périodes d'évacuation et de renouvellement des eaux ;
- . la diminution des apports de sédiments et de nutriments biologiques.

La liste des phénomènes de répercussion des aménagements qui ont été énumérés n'est pas exhaustive, et ne représente que les incidences hydrologiques et sédimentologiques. Il est clair qu'une modification, même d'apparence minime, du milieu naturel, et surtout des phénomènes hydrodynamiques et sédimentologiques, peut induire une cascade d'effets sur la dynamique générale, la qualité des eaux et les écosystèmes. Si l'on veut évaluer les incidences d'un aménagement sur le milieu et, par voie de conséquence sur les autres activités de la zone, il convient d'étudier l'ensemble de ces enchainements naturels. La compréhension des modifications entraînées par tel aménagement relève directement des connaissances générales (acquises ou à acquérir) propres au thème 4 ; indirectement, les conséquences sur l'environnement sont liées aux trois autres thèmes.

CONCLUSIONS

LES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE ; RECOMMANDATIONS

1. LES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE.

Les principaux axes de recherche, tels qu'ils apparaissent à la suite des travaux en cours du Groupe de travail "ESTUAIRES, DELTAS", sont les suivants :

1.1. LA PRODUCTION PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE ET LES RELATIONS AVEC LES PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES.

1.1.1. *STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SOUS ECOSYSTEMES PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE.*

a) l'image instantanée de la structure de l'écosystème primaire est donnée, d'une part, par des calculs d'indices de diversité (indice de SHANNON), révélateurs de la maturation et de l'état de santé et, d'autre part, par l'étude des communautés d'espèces pour essayer de dégager des "communautés spécifiques", associées aux conditions physiques et chimiques du milieu.

b) La mesure du carbone et de l'azote particuliers renseigne sur l'évaluation globale de la biomasse. Des mesures spécifiques concernant la fraction planctonique sont à prévoir : protéines et glucides. Elles renseigneront sur la richesse et l'état de développement de la production primaire.

c) La mesure de l'ATP (Adénosine triphosphate) et des formes associées ADP et AMP donne de bonnes indications (par l'intermédiaire de l'indice de charge énergétique) sur l'adaptation de l'écosystème primaire aux "stress" écologiques. En outre, l'ATP est un métabolite caractéristique de la matière organique vivante (absent dans la fraction organique inerte).

d) Le dosage des pigments photosynthétiques chloryphylliens apporte des informations sur la biomasse, la physiologie des populations photoautotrophes, l'état de sénescence de la population phytoplanctonique.

e) Les vitesses et les cinétiques d'assimilation du carbone et de l'azote (^{14}C et ^{15}N) par le phytoplancton permettent d'apprécier l'état physiologique du sous-écosystème primaire. Les mesures biométriques (surfaces et volumes cellulaires) sont indispensables pour modéliser les poussées explosives.

1.1.2. LES BACTERIES HETEROTROPHES.

Le rôle des bactéries hétérotrophes est très important : processus de biodégradation, régénération des éléments nutritifs, production des substances de croissance indispensable au développement des cellules photoautotrophes, action négative sur les sous-écosystèmes primaire et paraprimaire (substances antibactériennes, antialgues) et les niveaux secondaire et tertiaire.

a) Etude de la structure.

L'aspect quantitatif sera abordé par une étude, dans l'eau et les sédiments, de la microflore totale (bactéries aérobies et anaérobies) et des microflores spécifiques. Le dosage de l'acide diaminopimélique permettra d'estimer la biomasse. On peut également envisager de rechercher et de suivre l'évolution de la formule bactérienne de niches écologiques.

b) Fonctionnement.

Les recherches porteront sur les potentialités physiologiques des composantes des populations bactériennes (eau et sédiment) et leur évolution en fonction des conditions ambiantes. A cet effet, et en fonction des systèmes étudiés (sulfato-réducteurs, méthanogènes, enterobactéries), il convient de mesurer les proportions entre bactéries aérobies et anaérobies, mésophiles et thermophiles, sténohalines et halophiles, en fonction des concentrations en oxygène, de la température et de la salinité.

Il est souhaitable, de plus, d'étudier des écosystèmes expérimentaux in situ en utilisant des enceintes dialysantes.

c) Action bactérienne.

Les bactéries émettent des substances favorisantes (vitamine B₁₂...) et des substances inhibitrices, dites "antibactériennes" ou "antialgues" (hydrogène sulfuré, méthane). Ces phénomènes doivent être étudiés soit par analyse directe, soit par bio-essais.

Il est également important d'étudier l'activité minéralisatrice des bactéries, en se limitant d'abord au cycle de l'azote (ammonification, nitrification, dénitrification).

Il convient aussi d'étudier l'action épuratrice de la microflore autochtone (en fonction du type de pollution) et de chercher réciproquement l'action des polluants sur la composition de l'activité de la microflore.

1.1.3. LES SUBSTANCES NUTRITIVES MINERALES ET ORGANIQUES PARTICULAIRES ET DISSOUTES.

Les variations quantitatives et les rapports des sels nutritifs minéraux (phosphore

total, phosphates, nitrates, nitrites et ammonium) donnent une image de la physiologie de masse du sous-écosystème. Par ailleurs, sachant que la teneur de la matière organique en ces différents éléments (C, H, N, P, O) est à peu près constante et en faisant des hypothèses sur les vitesses d'assimilation, on peut estimer les potentialités synthétiques du milieu et déceler éventuellement les éléments limitant le développement.

Il faut aussi attirer l'attention sur le pouvoir complexant des acides humiques et fulviques vis-à-vis des ions minéraux, qui retentit sur le développement planctonique en fournissant aux algues substances azotées et oligo-éléments minéraux.

1.1.4. LES MINÉRAUX.

Le problème le plus important est celui de l'étude de l'adsorption et de la désorption des minéraux argileux à expansion variable (montmorillonite..).

Il serait intéressant, par ailleurs, de comparer la nature des cations adsorbés par les minéraux depuis les eaux douces jusqu'aux eaux marines et de préciser le rôle des cations fortement adsorbés (Ca, K...) vis-à-vis des capacités d'échange.

1.1.5. LES POLLUANTS.

Les polluants sont des agents inhibiteurs ou favorisant le développement phytoplanctonique. Parmi les études à développer, on peut citer :

- . Les effets des divers types d'hydrocarbures (en fonction de la concentration) sur la photosynthèse des communautés phytoplanctoniques ;
- . Les effets des détergents (agents tensio-actifs) et polyphosphates : action retardatrice ou inhibitrice d'oxydation des matières organiques en solution freinant l'autoépuration pour les premiers ; eutrophisation excessive du milieu avec déclenchement de "blooms" pour les seconds ;
- . Les effets des herbicides et pesticides, PCB (organo chlorés ou autres).
- . L'assimilation des métaux lourds par le phytoplancton en vue d'aborder ses effets sur les échelons secondaire et tertiaire.

1.1.6. HYDROLOGIE ; PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES, HYDRODYNAMIQUE.

L'adaptation des espèces phytoplanctoniques dulçaquicoles et marines aux modifications hydrologiques dans les zones d'affrontement entre masses d'eau douces et salées que constituent les estuaires et deltas pose un problème important. L'étude de l'influence des paramètres physico-chimiques et de l'hydrodynamique sur les sous-écosystèmes primaire et paraprimaire, et à différentes échelles de temps (marée, cycle morte eau - vive eau, saisonnier), est à entreprendre avec les précautions requises dans le choix des mailles d'espace et de temps des prélèvements.

1.2. LA DYNAMIQUE DES ECOSYSTEMES A PARTIR DE L'ECHELON SECONDAIRE : ROLE SPECIFIQUE DES ESTUAIRES COMME ZONES D'ENGRAISSEMENT OU REGION DE TRANSITION ENTRE L'EAU DOUCE ET L'EAU DE MER POUR LES ESPECES MIGRATOIRES.

1.2.1. ANALYSE DE LA STRUCTURE DE L'ECOSYSTEME.

Avant d'envisager une simplification des numérations pour des catégories systématiques, il faut procéder à l'inventaire faunistique, qualitatif et quantitatif, des populations présentes, complété par l'étude de la structure démographique et de la biométrie des individus, ainsi que par des mesures de la biomasse. Cet ensemble de mesures doit permettre : de définir les interactions entre espèces ; de servir de base à la reconnaissance d'espèces clefs ; d'estimer la stabilité, la maturité et la production de l'écosystème.

Il est également nécessaire d'aborder les problèmes de l'action directe des polluants (métaux lourds, pesticides, herbicides, hydrocarbures, matières organiques, etc) sur les organismes et leur accumulation au travers des différents niveaux de la chaîne alimentaire.

1.2.2. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DE L'ECOSYSTEME.

L'analyse du fonctionnement de l'écosystème doit être entreprise selon deux voies complémentaires :

- a) par la répétition des mesures de structure et leur traitement mathématique en fonction des facteurs écologiques, physico-chimiques et biologiques, afin de dégager des relations de causalité.
- b) par l'appréciation directe des facteurs énergétiques et physiologiques : la respiration (comme estimation de la quantité d'énergie requise pour le maintien des différents niveaux de production) ; la nutrition (traduisant les transferts d'énergie entre niveaux) ; l'excrétion (à apprécier de manière directe).

Pour quantifier les seuils d'équilibre et l'amplitude des réponses aux variations des conditions de milieu, une part doit être réservée à l'expérimentation.

1.2.3. ANALYSE DU COMPORTEMENT DE L'ECOSYSTEME.

L'analyse quantitative doit être complétée par une analyse qualitative du régime alimentaire, des migrations horizontales et verticales, des cycles à courtes et longues périodes et des phénomènes de concentration, afin de déterminer quels sont les comportements et le degré d'organisation des différentes communautés.

1.2.4. PROBLEMES PARTICULIERS AUX EMBOUCHURES.

Les particularités concernant l'organisation et le fonctionnement de l'écosystème estuarien, situé dans un milieu frontrière entre le continent et l'océan, doivent faire l'objet d'études spécifiques.

a) production algale - végétation phanérogamique et fertilisation.

Les communautés végétales d'algues et de phanérogames de l'étage intertidal et de l'étage supralittoral jouent un rôle important dans l'économie générale de l'estuaire. Pour mieux le comprendre, il faut : reconnaître et définir ces communautés végétales ; étudier la croissance et la production saisonnière des espèces principales ; étudier la vitesse de décomposition du matériel végétal sous l'action des microorganismes.

b) les estuaires, zone de passage.

Parmi les problèmes à étudier, on peut citer :

- . les phénomènes d'osmorégulation (aspects physico-chimiques et incidences des polluants sur le fonctionnement des systèmes internes à l'organisme) chez les poissons amphibiotiques transitant à travers les estuaires au cours de leur cycle biologique ;
- . les aspects nutritifs et pathologiques, les phénomènes de compétition interspécifique et de comportement des animaux amphibiotiques ;
- . la capacité nutritive du milieu vis-à-vis d'espèces semi-sédentaires.

c) intérêt halieutique.

Des études doivent être engagées ou poursuivies sur les points suivants :

- . la description de l'activité halieutique et de sa prospective (espèces exploitées et leur variabilité ; dynamique des populations).
- . part prise par les géniteurs et par les formes juvéniles et étude des régimes alimentaires vis-à-vis des ressources de la production secondaire ;
- . l'impact des activités de pêche sur l'écosystème ;
- . l'étude des bivalves filtreurs (relation entre la production secondaire de ces espèces au cours du temps et les ressources, primaire et parprimaire, dont elles dépendent).

1.3. COMPORTEMENT DES POLLUANTS EN LIAISON AVEC LES SYSTEMES HYDROLOGIQUES, SEDIMENTOLOGIQUES ET BIOLOGIQUES.

1.3.1. LE COMPORTEMENT DES POLLUANTS.

a) comportement dans le milieu inerte.

Deux cas sont à envisager selon que le polluant est associé ou non à des supports particulaires.

Dans le premier cas (principalement celui des éléments métalliques, des insecticides, des herbicides, et des détergents), les mécanismes d'adsorption, désorption revêtent une importance capitale à l'égard de la distribution des polluants et il convient de faire porter l'effort sur les études suivantes :

- . la nature, la destinée sédimentologique, la destinée biologique (ingestion par la faune) des particules support ;
- . le comportement chimique de l'association particule-polluant en fonction de l'évolution des conditions physico-chimiques et chimiques du milieu (salinité, PH, Eh, Température, O_2 , dissous, nutriments ...) du polluant considéré, de l'évolution propre des particules supports (évolution des phases argileuses et des composés organiques d'amont en aval, variations du rapport acides humiques/acides fulviques, formation ou disparition de complexes organo-métalliques...). Ces études mettront en évidence, l'importance réelle de la notion de temps de séjour des particules en suspension dans le système estuarien ou deltaïque ;
- . les "microbismes" véhiculés par les particules ;

Dans le deuxième cas (polluant non associé à des supports particulaires) qui concerne notamment les hydrocarbures, les matières organiques responsables des processus d'eutrophisation, les détergents tensio-actifs, les éléments métalliques peu ou pas adsorbés par les matières solides (Cr^{6+} , Mo^{6+} , ...), les éléments radioactifs, les pollutions thermiques, un certain nombre de problèmes spécifiques sont à résoudre.

b) comportement dans le milieu vivant.

Outre les études proposées au § 1.1.5. ci-dessus, les études suivantes sont proposées:

- . le milieu vivant en tant que facteur de concentration et de diffusion des polluants : sélectivité de la matière vivante à l'égard des divers polluants ; concentrations successives le long des chaînes alimentaires ; phénomènes de biodégradation ; comportement spécifique en fonction de la salinité ; rôle des micro-organismes à l'interface eau-sédiment,
- . le milieu vivant en tant que polluant par lui-même : germes pathogènes, effets de la température, liaison avec les véhicules planctonique et particulaire ; le développement anarchique des espèces phytoplanctoniques, etc.

1.3.2. L'EVACUATION DES POLLUANTS EN MER.

L'objectif à atteindre est de connaître et donc de prévoir l'évolution qualitative et quantitative des polluants charriés vers le large dans le milieu liquide ou sous forme particulaire.

1.3.3. EFFETS DES POLLUTIONS.

Les effets des pollutions sont variés et complexes. On retiendra comme particulièrement importantes les études des conséquences sur :

- . les organismes vivants: toxicité en fonction de la salinité ; action à moyen et long terme de doses subléthales ou faibles ; effets des formes solubles et particulières en relation avec les modes de nutrition ; étude des phénomènes de synergie et d'antagonisme ; temps de concentration aux niveaux successifs des chaînes trophiques ; seuils de toxicité spécifiquement estuariens.

- . les processus de transmission des germes pathogènes à l'homme.

1.4. LES MECANISMES ET MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES EN LIAISON AVEC L'HYDRODYNAMIQUE.

1.4.1. BIBLIOGRAPHIE ANALYTIQUE ET ETUDE DOCUMENTAIRE DES ESTUAIRES FRANCAIS.

Un préalable à toute étude et programme de recherche consiste en l'établissement d'une bibliographie complète du sujet afin d'avoir l'idée, la plus claire possible, de l'état des connaissances dans le domaine, ainsi qu'une vue d'ensemble de la typologie des embouchures françaises. De plus, cette synthèse permettrait des analyses de corrélation entre les paramètres globaux : bassin versant, débit fluvial, débit solide, intrusion saline, marnage, etc., et peut-être de déduire des lois et relations empiriques.

1.4.2. ETUDE DOCUMENTAIRE DES INCIDENCES CONSTATEES DES AMENAGEMENTS SUR L'ENSEMBLE DES PHENOMENES HYDROLOGIQUES ET SEDIMENTAIRES.

Cette étude consiste en l'analyse des cartes bathymétriques établies depuis le 17ème siècle dans les grandes embouchures françaises représentatives de différentes intensités d'aménagement :

Seine et Rhône	très aménagées
Loire	moyennement aménagée
Gironde	faiblement aménagée

L'analyse et la synthèse de l'évolution morphologique des fonds sédimentaires permettraient de comparer, pour chacune des embouchures, l'intensité et la répartition des phénomènes sédimentologiques naturels (avant l'intervention de l'homme et de ses aménagements au 19ème siècle), et l'effet à long terme de l'action humaine. Pour chaque embouchure, un bilan globale pourra être établi entre les apports fluviaux, la sédimentation, et l'évacuation en mer ; éventuellement, l'action des aménagements sur ces bilans pourra être évaluée.

Il sera peut-être nécessaire, pour certaines embouchures, de compléter les informations disponibles pour des prélèvements de sédiments et des carottages, pour délimiter

les types de sédiments s'accumulant dans les zones à sédimentation.

Par ailleurs, cette étude permettra de préciser la nature et l'étendue de la réaction, à court et à long terme, des fonds de l'estuaire à un aménagement particulier (digue, épis, dragage, terre-plein, etc) ; et peut-être de mettre en évidence le cycle évolutif géologique des embouchures. Il semble exister une gamme d'évolution, par comblement sédimentaire, d'une embouchure estuarienne peu évoluée (type Chesapeake), aux estuaires "matures" (Loire, Gironde, Seine), et aux deltas (Rhône). Il conviendrait de tester cette hypothèse.

1.4.3. ETUDE DES TRANSITS LATéraux, DE LA DISPERSION (DIFFUSION) ET DES MELANGES VERTICAUX D'EAU ET DE SUSPENSIONS, EN RELATION AVEC LES PHENOMENES DE STRATIFICATION VERTICALE ET LATéRALE.

Ces études sont complexes et nécessitent le recours aux traceurs et des mesures hydro-sédimentaires "classiques". Ces travaux devraient aboutir à des lois empiriques et des ordres de grandeur des phénomènes d'advection, de dilution et de mélanges qui sont à la base des mécanismes hydrodynamiques des embouchures. Des études comparatives des embouchures "bidimensionnelles" (embouchures à un seul chenal, type estuaire breton et embouchures deltaïques : Rhône) et "tridimensionnelles" (estuaires de plaine côtière, à deux chenaux) et ceci pour différentes conditions hydrologiques (vives eaux, mortes eaux, crues, étiage) permettront d'établir les relations de fonctionnement entre les chenaux.

1.4.4. ROLE DU "POINT NODAL" DE LA CIRCULATION RESIDUELLE DU FOND DANS LE RENOUVELLEMENT DES MASSES D'EAU, ET DANS LE PIEGEAGE DES MATIERES EN SOLUTION ET EN SUSPENSION.

Il existe une série de problèmes à étudier :

Relations entre le phénomène de "bouchon vaseux" et la distribution du plancton ; possibilités d'existence de "bouchon planctonique", "bouchons de nutriments et polluants", relations avec le débit fluvial et les marées ; phénomènes de reprises sur le fond et de sédimentation.

1.4.5. BILANS GLOBAUX DU RENOUVELLEMENT ET DU TEMPS DE RESIDENCE DES EAUX DOUCES ET MARINES ET DES SEDIMENTS EN SUSPENSION.

L'établissement des ordres de grandeur extrêmes (étiage et crue, mortes eaux et vives eaux) en relation avec les variations hydrologiques (débit fluvial, marées) et la morphologie (embouchures bi ou tri-dimensionnelles) présente un grand intérêt pour l'interprétation des phénomènes de pollution. Ces bilans peuvent s'établir par des mesures hydrologiques (courants et salinité) ainsi que par des traçages.

1.4.6. MODALITES DE LA DISPERSION EN MER DE L'EAU FLUVIALE, DES SEDIMENTS EN SUSPENSION, DES NUTRIENTS ET DES POLLUANTS.

Les phénomènes suivants encore très mal connus doivent être observés et interprétés :

- Les mécanismes d'évacuation de l'embouchure : crues et vives eaux seraient tout d'abord examinés (relation débit sortant de l'embouchure et débit fluvial et marnage).
- Les mécanismes de dispersion : dilution verticale et latérale, advection, rôle de la thermocline, etc.
- Géométrie de la dispersion en relation avec la stratification des eaux et les phénomènes advectifs : vent, marées, courants côtiers, etc.
- Devenir des suspensions : dépôt sur le plateau continental et recyclage sur le littoral (lagunes ou autres embouchures).

Ces études nécessitent la mise en oeuvre de campagnes hydro-sédimentaires (en y associant des études chimiques et biologiques, examen de la répartition du plancton dans le panache d'embouchure), couplées à des moyens d'étude par télédétection (satellite ou avion). Entre les campagnes, un suivi systématique et saisonnier devrait être établi, pour effectuer un "monitoring" des phénomènes et les relier aux variations de débit fluvial et du coefficient de marée.

2. RECOMMANDATIONS.

En dehors d'un programme de recherches thématiques ou spécifiques, il est possible de formuler un certain nombre de recommandations de valeur plus ou moins générale, qui aideront à mieux en comprendre l'esprit :

2.1. URGENCE D'UNE RECHERCHE PLURIDISCIPLINAIRE GENERALISEE.

Les embouchures sont le siège d'activités intenses et nombreuses, souvent concurrentes. Les développements prévus et les incidences sur l'environnement nécessitent un effort accéléré d'études et de recherches dans le contexte plus général de l'aménagement du littoral. Sans exclure des problèmes spécifiques et des études analytiques, il faut reconnaître que la solution des problèmes posés exige, dans la majorité des cas, un travail d'équipes pluridisciplinaires, aussi bien pour le recueil des données que pour leur traitement.

En conséquence, il faut promouvoir, avec une certaine urgence, dans le sens d'un effort continu et d'ouverture, une recherche générale des processus océanographiques d'embouchure, comblant les grandes lacunes, en s'efforçant d'éviter les divisions disciplinaires ou géographiques.

Il faut aussi se persuader que seul le démarrage de quelques projets pilote

permettra de progresser rapidement et de poser les problèmes les plus importants.

2.2. *NECESSITE DE MISE EN PLACE D'UNE STRUCTURE DE COORDINATION.*

Pour résoudre un problème donné, dans des cadres géographiques différents, comme pour rechercher la solution d'un problème pluridisciplinaire, il est indispensable de faciliter l'échange d'informations et d'aménager des structures de coordination. Cet aspect des choses revêt une importance particulière dans le cas des embouchures. Compte tenu des caractères spécialisés et souvent géographiques, des laboratoires de recherche français, une action déterminée de coordination, typique des attributions du CNEXO, paraît nécessaire à la mise en oeuvre du programme "ESTUAIRES-DELTAS". Elle devrait correspondre à la création d'une structure souple et dynamique, permettant : de procéder à un appel d'offre à l'occasion d'un projet ; d'assurer l'exploitation complète et rapide des études ; de diffuser les résultats ; d'organiser les liaisons d'échange de savoir faire, d'équipements et d'informations entre tous les coopérants.

2.3. *METHODOLOGIE D'ETUDE.*

La réponse du milieu estuarien ou deltaïque à une intervention de l'homme se manifeste sous la forme d'un enchaînement complexe de réactions, dont les maillons sont des processus physiques, chimiques et biologiques, souvent fort mal connus. Chaque processus peut être interprété au moyen d'un modèle numérique ou physique permettant d'en effectuer la prédiction à partir de la connaissance de la valeur initiale et des variations des paramètres concernés. La notion de modèle peut être généralisée au cas de phénomènes faisant intervenir plusieurs processus. Et l'on peut même concevoir des modèles, qualifiés de modèles de gestion, qui permettraient de faire de la prédiction de l'environnement pour des interventions imaginaires de l'homme dans le milieu marin. Les modèles de processus ne sont au fond que l'expression de lois dans un contexte spatiotemporel déterminé. Dans le cas d'un phénomène complexe associant des processus plus ou moins bien connus, la notion de modèle empirique, basé sur des données naturelles corrélées, pourrait, dans une certaine mesure, permettre de faire de la prédiction. Dans les deux cas, la notion d'essai-erreur permet d'améliorer la formulation de la loi ou son approximation empirique.

Les considérations qui précèdent attirent l'attention sur deux points très importants :

- . d'une part, le couplage existant entre l'échantillonnage spatiotemporel des données en nature et le modèle destiné à les interpréter. Ce système est bouclé et itératif. Il doit conduire à une précision croissante des prédictions ;
- . d'autre part, le rôle de premier plan que sont appelés à jouer les ingénieurs mathématiciens, spécialistes des techniques numériques et des modèles, comme agents de coordination entre les disciplines et responsables de la planification des mesures sur le terrain.

2.4. INTERET DES MONOGRAPHIES PAR EMBOUCHURE.

On a souligné, à l'occasion de l'exposé du thème 4, l'intérêt de monographies complètes par embouchure. Les principales raisons en sont les suivantes :

- l'évolution historique et l'état actuel de la situation constituent un ensemble de repères indispensables dans la présentation de l'évolution probable d'une intervention nouvelle de l'homme dans le milieu marin ;
- la connaissance historique de l'évolution d'un phénomène constitue en soi un sujet de réflexion pour la découverte des lois naturelles ;
- le choix de tel système, estuarien ou deltaïque, pour tester un processus dépendra de ses caractéristiques vis-à-vis du processus à étudier ;
- il apparaîtra sans doute souhaitable d'établir des modèles globaux empiriques (évoqués plus haut), par embouchure, pour lesquels on utilisera un ensemble varié d'informations.

2.5. INSTRUMENTATION.

Les principaux objectifs en instrumentation concernent : la possibilité de comparer des résultats entre eux ; la création d'instruments spécifiques ; l'amélioration de couple rendement-qualité des mesures ; l'amélioration des méthodes de dépouillement, d'analyse et de traitement numérique.

Il s'agit donc, d'une part, de normaliser des capteurs et des méthodes de prélèvements ainsi que de créer des capteurs spécifiques et d'autre part, de perfectionner la "stratégie" d'échantillonnage et les méthodes de traitement des mesures. Il faudra également développer les méthodes d'intercomparaison des instruments existants. Il faut aussi englober, dans ces objectifs, les appareils de laboratoires destinés aux analyses.

2.6. COORDINATION AVEC LES PAYS ETRANGERS .

La plupart des pays développés sont confrontés à des problèmes analogues pour maîtriser la gestion de leurs embouchures. Outre la veille scientifique indispensable, et le suivi des mesures prises à l'étranger pour prévenir ou prévoir les pollutions, il est recommandable d'entreprendre des programmes pluridisciplinaires d'intérêt partagé avec des pays étrangers.

2.7. RACCORDEMENT AVEC LE RESEAU NATIONAL D'OBSERVATION DE QUALITE DU MILIEU MARIN.

Tantôt pour le compléter, tantôt pour bénéficier de ses résultats, le programme "ESTUAIRES-DELTAS" devra être raccordé au Réseau national d'observation de qualité du milieu marin.

2.8. ELARGISSEMENT DU PROGRAMME.

Le Groupe de travail recommande de ne pas se limiter aux problèmes spécifiques des milieux confinés à salure variable mais d'englober au contraire, dans le programme, les problèmes "amont et aval" en relation avec les aspects spécifiques.

2.9. D.O.M. - T.O.M.

Le Groupe de travail considère que les embouchures des départements et territoires d'Outre-Mer font partie intégrante du domaine géographique d'intérêt national.

ANNEXES

ANNEXE 1

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL "ESTUAIRES-DELTAS"

- | | |
|--|--|
| MM. ALLEN
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337
29273 BREST | MM. LAUBIER
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST |
| BLANC François
Hydrobiologie Marine
70, route Léon Lachamp
13288 MARSEILLE CEDEX | LE GUELLEC (Programmes d'intérêt général)
Commissariat à l'Energie Atomique
29 à 33, rue de la Fédération
75015 PARIS |
| BONNEFILLE
EDF - Direction des Etudes et Recherches
6, quai Watier
78400 CHATOU | LE LOURD
Centre National pour l'Exploitation des
Océans
39, avenue d'Iéna
75016 PARIS |
| BOUCHER
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 - PLOUZANE
29273 BREST | LEVEAU
Hydrobiologie Marine
70, route Léon Lachamp
13288 MARSEILLE CEDEX 2 |
| BOURGOIN
Etablissement Principal du Service
Hydrographie et Océanographique de la
Marine
Route du Bergot
29283 BREST CEDEX | MIGNIOT
Laboratoire Central d'Hydraulique de France
Chef du Service de Sédimentologie
10, rue Eugène Renault
94700 MAISONS ALFORT |
| COANTIC
Institut de Mécanique Statistique
de la Turbulence
12, avenue du Général Leclerc
13003 MARSEILLE | PERES
Professeur à l'Université d'AIX MARSEILLE II
Station Marine d'Endoume
Rue Batterie des Lions
13007 MARSEILLE |
| CUNGE
SOGREAH
47, avenue Marie Reynoard
38100 GRENOBLE | SAUZAY (Département Radioéléments)
Commissariat à l'Energie Atomique
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
B.P. N° 2
91190 GIF SUR YVETTE |
| DUPORT
Président du Conseil de la Recherche
Océanologique
Société ALSTHOM
Technique des Fluides
B.P. 75 - Centre de Tri
38041 GRENOBLE CEDEX | TOUSSAINT
Centre National pour l'Exploitation des
Océans
39, avenue d'Iéna
75016 PARIS |
| LATOUCHE
Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine
Université de Bordeaux I
351 cours de la Libération
33405 TALENCE | VIGNEAUX
Institut Géologique du Bassin Aquitaine
Université de Bordeaux I
351 cours de la Libération
33405 TALENCE |

ANNEXE 2

LISTE DES MEMBRES DES GROUPES THEMATIQUES

GROUPE 1

Animateurs

* M. François BLANC
Hydrobiologie Marine
70, route Léon Lachamp
13288 MARSEILLE CEDEX 2

* M. LEVEAU
Hydrobiologie Marine
70, route Léon Lachamp
13288 MARSEILLE CEDEX 2

Membres

M. GOULEAU
Laboratoire de Géologie Marine
Faculté de Sciences
38, boulevard Michelet
44000 NANTES

M. MARTIN
Groupe de Géologie Nucléaire
Laboratoire de Géologie
Ecole Normale Supérieure
46, rue d'Ulm
75230 PARIS CEDEX 05

M. LE FLOCH
Université de Bretagne Occidentale
Avenue Victor Le Gorgeu
29200 BREST

Membres (suite)

M. MONBET
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

Mlle CHAMROUX
Station Biologique de Roscoff
29211 ROSCOFF

M. DAUMAS
Station Marine d'Endoume
Rue Batterie des Lions
13007 MARSEILLE

M. A. BIANCHI
Service de Microbiologie -
Université de Provence
Centre Saint Charles
3, place Victor Hugo
13331 MARSEILLE CEDEX

M. PREISSMANN
SOGREAH
47, avenue Marie Reynoard
38100 GRENOBLE

GROUPE 2

Animateurs

* M. LAUBIER
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

* M. BOUCHER
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

Membres

* M. BONNEFILLE
EDF - Direction des Etudes
et Recherches
6, quai Watier
78400 CHATOU

Membres (suite)

M. BOUCHET
Institut Universitaire de Biologie
Marine de Bordeaux 1
2, rue du Professeur Jolyet
33120 ARCACHON

M. CHASSE
Université de Bretagne Occidentale
Avenue Victor Le Gorgeu
29200 BREST

M. CREPON
Laboratoire d'Océanographie Physique
43-45 rue Cuvier
75321 PARIS CEDEX 05

* Les membres marqués d'un astérisque font également partie du Groupe de travail "ESTUAIRES-DELTA"

M. HARACHE
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

M. KURC
Institut Scientifique et Technique
des Pêches Maritimes
B.P. 1049
44037 NANTES CEDEX

M. VERNEAUX
Faculté des Sciences
Chef du Laboratoire de Biologie
des Eaux (CERA FER)
Place Leclerc
25000 BESANCON

M. LAUREC
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

M. LEVASSEUR
Université de RENNES
6, Square de Varsovie
35000 RENNES

GROUPE 3

Animateurs

* M. LATOÛCHE
Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine
Université de Bordeaux I
351 Cours de la Libération
33405 TALENCE

Membres

* M. ALLEN
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

M. ARNOUX
Professeur de la Faculté de Médecine
et de Pharmacie de Marseille
Boulevard Jean Moulin
13005 MARSEILLE

M. BOUCHER
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

M. BOUGAULT
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 PLOUZANE
29273 BREST

M. BRISOU
Directeur du Laboratoire de la
Faculté de Médecine et de Pharmacie
15, rue Sainte Opportune
86000 POITIERS

M. CHAMLEY
Station Marine d'Endoume
Rue Batterie des Lions
13007 MARSEILLE

Membres (suite)

M. GADEL
Centre de Sédimentologie Marine
Centre Universitaire
66025 PERPIGNAN

M. GROVEL
IUT HEINLEX
44600 SAINT NAZAIRE

M. KHALANSKY
EDF
6, quai Watier
78400 CHATOU

* M. LE LOURD
Centre National pour l'Exploitation des
Océans
39, avenue d'Iéna
75016 PARIS

M. MARTIN
Groupe de Géologie nucléaire
Laboratoire de Géologie
Ecole Normale Supérieure
46, rue d'Ulm
75230 PARIS CEDEX 05

M. OTTMANN
Faculté des Sciences
38 Boulevard Michelet
44000 NANTES

M. SALOMON
Laboratoire Océanographie Physique
Université de Bretagne Occidentale
Avenue Victor le Gorgeu
29200 BREST

GROUPE 4

Animateurs

- * M. ALLEN
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337
29273 BREST
- * M. CUNGE
SOGREAH
47, avenue Marie Reynoard
38100 GRENOBLE

Membres

- M. BERTHOIS
6, rue de Viarmes
35000 RENNES
- M. Jean BLANC
Station Marine d'Endoume
Rue Batterie des Lions
13007 MARSEILLE
- * M. BONNEFILLE
EDF - Direction des Etudes
et Recherches
6, quai Watier
78400 CHATOU
- M. CABIOCH
Sous-Directeur
Station Biologique de Roscoff
29211 ROSCOFF
- M. COURTOIS
Commissariat à l'Energie Atomique
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
B.P. N° 2
91190 GIF SUR YVETTE
- M. KLINGEBIEL
Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine
Université de Bordeaux I
351 Cours de la Libération
33405 TALENCE

Membres (suite)

- M. LAFOND
Université de Paris Sud
Laboratoire de Sédimentologie et de
Géodynamique externe
B.P. 479
91405 ORSAY
- * M. LATOUCHE
Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine
Université de Bordeaux I
351, cours de la Libération
33405 TALENCE
- M. LEFEVRE
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337
29273 BREST
- M. LE FLOCH
Université de Bretagne Occidentale
Avenue Victor le Gorgeu
29200 BREST
- * M. MIGNIOT
Laboratoire Central d'Hydraulique de
France
Chef du Service de Sédimentologie
10, rue Eugène Renault
94700 MAISONS ALFORT
- M. OTTMANN
Professeur à la Faculté des Sciences
38, boulevard Michelet
44000 NANTES
- M. SALOMON
Laboratoire Océanographie Physique
Université de Bretagne Occidentale
Avenue Victor le Gorgeu
29200 BREST
- * M. SAUZAY
Commissariat à l'Energie Atomique
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
BP n° 2
91190 GIF SUR YVETTE

A N N E X E 3

RESULTATS DE L'ENQUETE SUR LES RECHERCHES MENEES EN FRANCE SUR LES ESTUAIRES ET LES DELTAS

I - INTRODUCTION

Pour effectuer une enquête sur les recherches faites en FRANCE sur les estuaires et les deltas, le Groupe de travail s'est associé à Monsieur Jean Marie MARTIN, du Groupe de Géologie Nucléaire (laboratoire de Géologie Dynamique, Université de PARIS VI, 4, place Jussieu - 75230 PARIS CEDEX 05), qui avait un projet analogue, dans le cadre de ses activités au sein de l'Union des Océanographes de France. Un questionnaire a été mis au point (voir Appendice) et diffusé auprès de 400 personnalités scientifiques ou organismes susceptibles d'être concernés par les problèmes estuariens ou deltaïques. Le dépouillement du questionnaire s'est fait sous la responsabilité de Monsieur Jean Marie MARTIN, sur contrat CNEXO.

Les principaux résultats de cette enquête figurent dans les paragraphes qui suivent .

II - NATURE ET CLASSEMENT DES PROJETS

Les réponses obtenues concernent 56 projets, six d'entre eux portant sur deux ou plusieurs estuaires. Neuf études ont trait à des régions situées hors de la France métropolitaine, et quatre projets possèdent un caractère général.

Tout d'abord, les projets sont classés par régions, dans le tableau joint ; parmi celles-ci figurent les principaux estuaires, sur lesquels plusieurs travaux sont en cours, tandis que les estuaires peu étudiés s'y trouvent regroupés. Dans la seconde colonne, les thèmes de recherche sont mentionnés, à l'aide de mots-clés. Dans les colonnes suivantes figurent des renseignements concernant la nature des travaux ainsi que l'organisme responsable.

La *figure 1* représente le nombre de projets par région, sans tenir compte de leur poids relatif. La majorité d'entre eux concerne l'estuaire de la Loire, celui de la Gironde et le delta du Rhône, zones portuaires fortement industrialisées ; ce résultat semble donc logique. Toutefois, il est surprenant que l'estuaire de la Seine, région très fortement industrialisée et polluée, au débouché de la principale voie de navigation intérieure, qui possède deux ports de commerce et un port de pêche, soit l'objet de trois études seulement.

Sur la *figure 2*, les projets sont ensuite classés par grandes disciplines à partir

des mots-clés attribués précédemment. Chimie, géologie, hydrodynamique sont d'importance sensiblement égale, les travaux en biologie étant légèrement moins nombreux. Les projets liés à l'anémagement et à l'économie sont les moins nombreux, mais ont des retombées dans d'autres domaines. Certains projets, communs à deux disciplines, sont représentés par le chevauchement des figurés ; les principales interactions se produisent entre hydrodynamique et géologie, d'une part, hydrodynamique et chimie d'autre part.

Enfin, sur la *figure 3*, les différents projets considérés sont répartis en fonction des divers organismes responsables. L'Education Nationale (Université + C.N.R.S.) est à l'origine de plus de la moitié de ceux-ci ; mais il s'agit le plus souvent, et ce sera précisé plus loin, de thèses de 3ème cycle qui sont des projets à court terme. La *figure 4*, qui représente la durée des projets, montre effectivement que la plupart de ceux-ci ont une durée approximative de deux ans. Ceci est en accord avec les *figures 5 et 6* qui représentent respectivement la formation du chef de projet (D. Sc. professeurs le plus souvent) et celle des coopérants au projets, où figure une forte proportion de D.E.A.

III - MOYENS EN PERSONNEL.

Une façon d'obtenir des indications sur l'importance réelle d'un projet consiste à estimer le nombre de personnes par année travaillant à celui-ci. Ce paramètre tient compte du nombre de personnes, du pourcentage de temps consacré par elles au projet, enfin de la durée du projet. Sur la *figure 7*, le nombre de personnes par an, réparties par régions, confirme l'importance des régions fortement industrialisées.

La répartition du nombre de personnes par an et par disciplines (*figure 8*) ne montre que peu de variations, à l'exception des études biologiques, qui demandent souvent davantage de temps.

Enfin, la répartition du nombre de personnes par an et par organismes (*figure 9*) montre la nette prédominance de l'Education Nationale. Rappelons qu'il s'agit le plus souvent de la préparation de thèse de 3ème cycle, occupant une personne à plein temps pendant deux ou trois ans, pour effectuer les prélèvements, la préparation des échantillons et le travail technique, l'interprétation des résultats, la rédaction, etc... ce qui tend à augmenter quelque peu l'importance de cette colonne. Par contre, la faible proportion de personnes par an en ce qui concerne E.D.F. contraste avec l'importance réelle des projets ; en réalité, il semblerait que les stagiaires et une partie du personnel technique n'aient pu être pris en compte.

IV - FINANCEMENT DES PROJETS -

Un autre moyen d'aborder l'importance des projets consiste à évaluer le financement de ceux-ci. Malheureusement, 30 % des réponses obtenues sont très évasives à cet égard.

L'estimation du financement annuel par régions (*figure 10*) reste cependant corrélable aux paramètres précédents (nombre de projets et nombre de personnes par an) et confirme l'importance des régions fortement industrialisées (Gironde d'abord, Loire et Rhône ensuite) à l'exception de la Seine ; la faible part d'études consacrées à cette dernière apparaît encore mieux ici.

L'estimation du financement annuel par disciplines (*figure 11*) confirme l'importance des études hydrodynamiques, liées aux aménagements. Par contre, l'importance relativement faible de la chimie surprend, compte tenu de l'accroissement constant du taux de pollution des régions estuariennes, lié aux aménagements portuaires, aux rejets industriels et au réchauffement des eaux.

Enfin, le financement des études biologiques contraste avec le nombre de personnes par an, mais il s'agit souvent de projets à plus longue échéance.

La *figure 12* montre la répartition du financement annuel par organisme. Il s'agit en fait non pas de l'argent fourni, mais de l'argent dépensé par ces organismes, c'est-à-dire que les contrats sont inclus. En pointillé figure le nombre de projets par organisme ; pour ce diagramme, seuls ont été retenus les travaux dont le financement est connu. Il apparaît ainsi, en ce qui concerne C.E.A., E.D.F., O.R.S.T.O.M., que nous sommes en présence de quelques gros projets, alors que l'Education Nationale travaille plutôt sur un grand nombre de projets peu importants : il s'agit des thèses de 3ème cycle citées plus haut, sur lesquelles une personne seule, généralement non rémunérée, travaille pendant environ deux ans, avec peu de moyens.

V - MOYENS MATERIELS.

La majorité des réponses obtenues est trop imprécise en ce qui concerne les moyens matériels pour que ce critère puisse être utilisé.

Toutefois, la lecture des questionnaires permet de mettre en évidence les faits suivants :

- . la durée d'utilisation des moyens flottants semble généralement inférieure à 1 mois par an. Les moyens utilisés sont en majorité de petits bateaux, de longueur inférieure à 15 m, presque toujours empruntés sur place.
- . Environ la moitié des études fait appel à l'informatique. Toutefois, son importance réelle dans la réalisation des projets ne peut être estimée.
- . Peu de personnes ont donné des renseignements concernant l'instrumentation acquise ou utilisée pour les projets. Cette question couvre un domaine aux limites imprécises et il était peut être difficile d'y répondre en quelques mots.

VI - CONCLUSIONS.

En dépit du caractère incomplet de l'enquête menée sur les études concernant les estuaires et deltas en France (56 réponses sur 400 envois ^{*}) et des réponses souvent fragmentaires au questionnaire, il est possible de dégager un certain nombre de conclusions.

. Selon les critères du nombre de projets en cours, du nombre de personnes par an, et de l'importance du financement annuel, la majeure partie de l'effort métropolitain porte sur les zones suivantes : estuaire de la Gironde, delta du Rhône, estuaire de la Loire, embouchures du Languedoc-Roussillon.

La faible importance des études concernant l'embouchure de la Seine est remarquable compte tenu des fortes industrialisation et pollution de cette zone.

. Répartis par grands secteurs disciplinaires, le nombre des projets en chimie, géologie, hydrodynamique est comparable tandis que les travaux en biologie sont légèrement moins nombreux.

Les recouvrements disciplinaires au sein d'un même projet apparaissent comme significatifs entre l'hydrodynamique d'une part, la géologie et la chimie d'autre part.

Le potentiel humain est à peu près également réparti entre les diverses disciplines à l'exception de la biologie qui occupe davantage de chercheurs.

Les financements par discipline attirent l'attention, d'une part, sur l'importance des recherches hydrodynamiques en liaison avec les aménagements et, d'autre part, sur la faiblesse des secteurs biologie et chimie.

. Parmi les organismes pilotant des projets (Education Nationale, CEA, EDF, ORSTOM, Ministère de l'Intérieur, Ports autonomes, secteur privé), l'Education Nationale (Université + CNRS) est à l'origine de plus de la moitié d'entre eux et elle domine également pour l'effectif consacré aux recherches en estuaires et deltas.

Les projets les plus fréquents durent moins de deux ans. Ils se font dans le cadre d'un Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) dirigé par un Chef de projet Docteur es Sciences.

Des organismes tels que le C.E.A., l'E.D.F., l'O.R.S.T.O.M. ont des projets peu nombreux mais comportant des financements importants.

^{*} Ce faible pourcentage ne doit pas faire illusion car on s'est attaché à avoir la réponse de la quasi totalité des organismes réellement concernés par le sujet "estuaires-deltas".

TABLEAU DES PROJETS CLASSES PAR REGION

Lieu d'étude	Thème	Projet	Organisme	Laboratoire
Baie de Canche	Biologie	Formations végétales, productivité primaire, phytogéochimie	Université Sciences, Lille	Cytogénétique et Ecologie
Somme	Sédimentologie	Sédiments sableux actuels	Université Paris Sud, Orsay	Océanographie
	"	Cordons littoraux anciens	"	"
	"	Interactions bio-sédimentaires	Université Haute Normandie, M ^t S ^t Aignan	Géologie Marine
Seine	Hydrodynamique	Transfert des radioéléments dans l'estuaire	C.E.A. C.E.N. Fontenay	Service Etudes et Recherches sur l'Environnement
	Radioéléments	Evolution sédimentologique et biostratigraphique (pollens) à l'Holocène	Université Haute Normandie M ^t S ^t Aignan	Géologie Marine
	Sédimentologie	Modèles mathématiques de propagation de la marée et des transferts sableux	Université Bretagne occid. Brest	Océanographie physique
Basse Normandie	Pollution Radioéléments	Etude des pollutions de sédiments par les radionucléides et les polluants métalliques stables	C.E.A. La Hague	Radioécologie Marine
Mont S ^t Michel Rance	Traceurs	Mouvements de sédiments dans la baie du Mont Saint-Michel	Université Paris-Sud, Orsay	Océanographie
	Sédimentologie	Transfert des radioéléments dans l'estuaire de la Rance	C.E.A. C.E.N. Fontenay	Service Etudes et Recherches sur l'Environnement
Nord-Bretagne	Hydrodynamique			
	Radioéléments			
Nord-Bretagne	Sédimentologie	Etude des rias et baies de la région de Morlaix	C.N.E.X.O.	Centre Océanologique de Bretagne (Géol.) (Thèse G. Auffret)
	Eléments nutritifs	Phénomènes d'eutrophisation : évolution des sels nutritifs en relation avec les paramètres biologiques	C.N.R.S.	Centre d'Etudes d'Océanographie et de Biologie Marine de Roscoff
Nord-Bretagne	Production primaire			

Rade de Brest	Sédimentologie Benthos	Etude des rias et baies de la région de Brest Bionomie benthique des estuaires de l'Aulne et de l'Elorn	C.N.E.X.O.	Centre Océanologique de Bretagne (Géologie) (Thèse G. Auffret) Institut océanographique Paris
Sud Bretagne	Biologie Aménagement Biologie	Etude écologique de la Laïta Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer, Golfe du Morbihan Bilan écologique estrans meubles	Collège de France Direction Equipement Université de Rennes	Biologie Marine 'Concarneau' Chambre de Commerce et d'Industrie du Morbihan Station Biologique Bailleron, Vannes
Loire	Bactériologie Dynamique Géochimie Sédimentologie Géochimie Géochimie Géotechnique Sédimentologie Modèles Sédimentologie Dynamique Environnement Biologie Modèles Dynamique	Répartition des bactéries (Estuaire externe) Etude de la pénétration maximale de la salinité en vue du captage d'eaux industrielles) Fixation et désorption de Hg, Pb, Cd sur les sédiments en suspension Pellicule superficielle des vasières Evolution des propriétés physiques et chimiques dans le passage continent - océan Modèles mathématiques de propagation de la marée et des transferts sableux Modes de mise en place, de déplacement et de remaniement des sédiments Etude écologique intégrée de l'estuaire de la Loire Environnement estuarien : échauffement et apparition des brouillards	Université de Nantes " " " " Université Bretagne Occid. Université de Nantes O.R.E.A.M. des Pays de la Loire Nantes Direction Etudes Recherches, E.D.F. Chatou	Géologie Marine Laboratoire Départemental Hygiène Géologie Marine Géologie Marine Toxicologie Géologie Marine " Océanographie physique IGARUN Département Océanographie Département Environnement Aquatique et Atmosphérique

Charente	Géochimie Eléments nutritifs	Etude de la pollution dans l'estuaire de la Charente	E.N.S. Paris	Géologie
	Géochimie Oligoéléments	Comportement de Si, Al, Fe, Mn et des oligoéléments associés en milieu estuarien	E.N.S. Paris	Géologie
Gironde	Productivité primaire Micro-Méiofaune	Ecologie de l'estuaire de la Gironde	Université Bordeaux 1	Institut Universitaire de Biologie Marine.Arcachon
	Géochimie Oligoéléments	Comportement de Si, Al, Fe, Mn et des oligoéléments associés en milieu estuarien.	E.N.S. Paris	Géologie
	Sédimentologie Traceurs	Etude des transferts sédimentaires en Gironde.	C.E.A. Saclay	Groupe Traceurs
	Modèles Dynamique	Environnement estuarien : échauffement et apparition des brouillards	Direction Etude Recherches, E.D.F. Chatou	Département Environnement Aquatique et Atmosphérique
	Courantologie Marées	Etude de l'interface eau douce - eau salée en Gironde	Université de Bretagne Occid. Brest	Océanographie Physique
	Hydrodynamique Modèles	Reproduction de la suspension des vases sur le modèle d'ensemble de l'estuaire de la Gironde	Labo. national Hydraulique, EDF Chatou	Division Hydraulique Maritime
	Aménagement Environnement	Etude de l'aménagement de l'estuaire de la Gironde	Port autonome Bordeaux	Aménagement de l'estuaire
Golfe du Lion	Ichtyologie Parasitologie Dynamique	Bilan des peuplements de poissons et de leurs parasites au niveau des embouchures des fleuves du Languedoc - Roussillon	Université Languedoc Montpellier	Zoologie 1
	Sédimentologie	Deltas internes des lagunes languedociennes	Université Paris Sud, Orsay	Océanographie
	Géochimie	Sédimentation des suspensions	Centre univ. Perpignan	Centre de Recherches de Sédimentologie Marine
	Hydrodynamique Sédimentologie	Sédimentation de la frange margino-littorale et des fonds marins adjacents	"	"

Rhône	Biochimie	Etude de la pollution par le Hg sur la vallée du Rhône, du lac Léman au delta	C.E.A. Pierrelatte	Section de protection contre les radiations Pierrelatte
	Ichtyologie Parasitologie Dynamique	Bilan des peuplements de poissons et de leurs parasites au niveau des embouchures	Université Languedoc Montpellier	Zoologie I
	Ecologie Invertébrés	Etude des invertébrés comme indicateurs de la qualité des eaux.	Université de Provence Marseille	Biologie Générale et Ecologie
	Pollution Biologie	Impact de l'eutrophie et de la pollution chimique sur le fonctionnement de l'écosystème. Delta du Rhône	Centre univ. de Luminy, Marseille	Hydrobiologie Marine
	Bactériologie	Evolution de la structure des populations bactériennes lors du mélange des eaux dans la zone deltaïque	Univ. Provence St Charles Marseille	Microbiologie
	Géochimie	Sédimentation des suspensions	Centre Univ. Perpignan	Centre de Recherches de Sédimentologie Marine
	Sédimentologie Dynamique	Le littoral de Basse Camargue : modifications de la ligne de rivage, transferts de sédiments zones de colmatage. Défense des côtes.	Centre Univ. de Luminy, Marseille	Géologie Marine et Sédimentologie appliquée
	Sédimentologie	Critères de caractérisation des corps sableux	Chambre syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du gaz Naturel, Paris	
Etang de Berre	Hydrochimie Eléments nutritifs Productivité primaire	Production de la matière organique, régénération des éléments nutritifs, contrôle des mécanismes d'eutrophisation	Université Aix - Marseille	Station Marine d'Endoume Marseille
Var	Sédimentologie Géotechnique	Phénomènes deltaïques. Comparaisons	Université Paris Sud. Orsay	Océanographie

	Hydrodynamique Sédimentologie	Etudes à caractère général	Labo. National Hydraulique, EDF Chatou	Division Hydraulique Maritime.
	Aménagement Ecologie Radioéléments	Choix des sites de centrales nucléaires : conséquences sur l'environnement et les populations	C.E.A. Cadarache	Radioécologie continentale
	Environnement Hydrologie Traceurs	Etude du pouvoir autoépurateur des cours d'eau et estuaires	C.E.A. Grenoble	Centre d'Etudes Nucléaires
	Météorologie Hydrodynamique	Travaux de surveillance	Météorologie Nationale Boulogne - Billancourt	
	Hydrodynamique Sédimentologie	Problèmes d'envasement : Dynamique des sédiments, décantation, consolidation des dépôts	Laboratoire Central d'Hydraulique de France Maisons-Alfort	
Lagune de Venise	Hydrodynamique	Etude du régime de la lagune. Incidence sur les phénomènes de trans- port.	C.N.R. Venise	
Nil	Sédimentologie Hydrodynamique	Fonctionnement du delta; stratigraphie de l'Holocène, Néotectonique. Structure du cône. Modèle deltaïque et variations récentes	Université Paris Sud. Orsay	Océanographie
	Sédimentologie Géochimie	Modalités de transport, taux de sédimen- tation, transformations minéralogiques et chimiques	Université Paris 6	Sédimentologie et Géologie des Bassins sédimentaires
Baie d'Alger	Géochimie	Sédimentation des suspensions	Centre Univ. Perpignan	Centre de Recherches de Sédimentologie Marine

Côte d'Ivoire	Economie Pollution Environnement	Lagune Ebrié. Etudes concertées : conséquences des pollutions sur l'écologie Etude de la pêche	O.R.S.T.O.M.	Centre de Recherches océanographiques ABidjan (Côte d'Ivoire)
Madagascar	Biologie Economie Environnement	Etude écologique des baies de la côte NW	O.R.S.T.O.M.	Centre de Nosy-Be (Madagascar)
Amazone	Géochimie Suspensions	Sédimentation des suspensions	Centre Univ. Perpignan	Centre de Recherches de Sédimentologie Marine
Orénoque	Hydrodynamique Sédimentologie Oligoéléments	Origine des vases et dynamique	E.N.S. Paris	Géologie
Guyane	Courantologie Hydrochimie	Dynamique des eaux, des sels et des sédiments en suspension dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague	O.R.S.T.O.M.	Service hydrologique Cayenne
Saint-Laurent	Hydrodynamique	Relation conductivité électrique-densité	Université Paris 6	Océanographie Physique

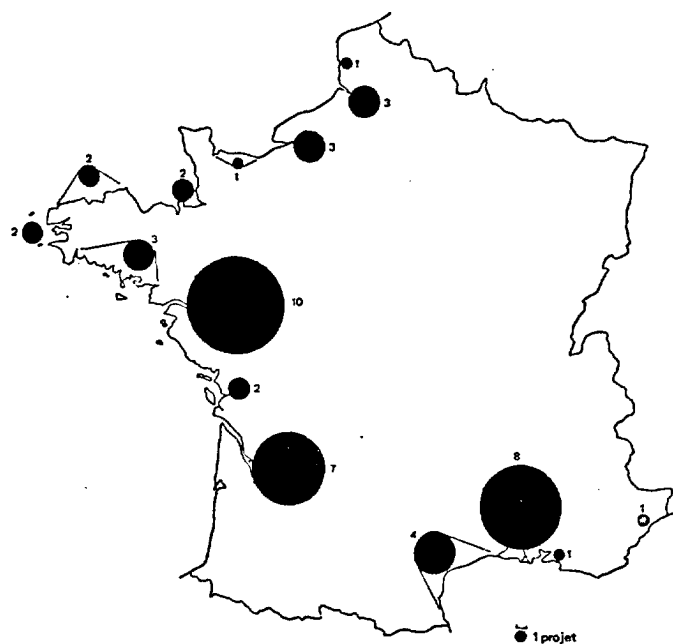


Fig.1. Nombre de projets par régions.

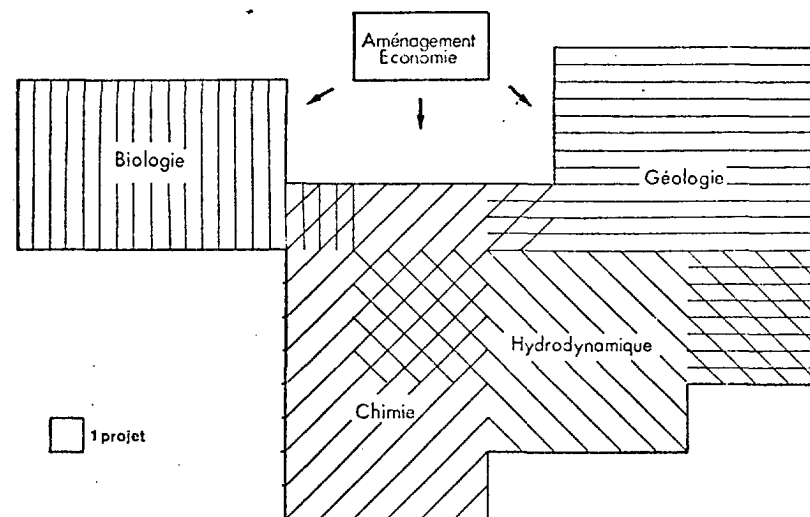


Fig.2. Nombre de projets par disciplines.

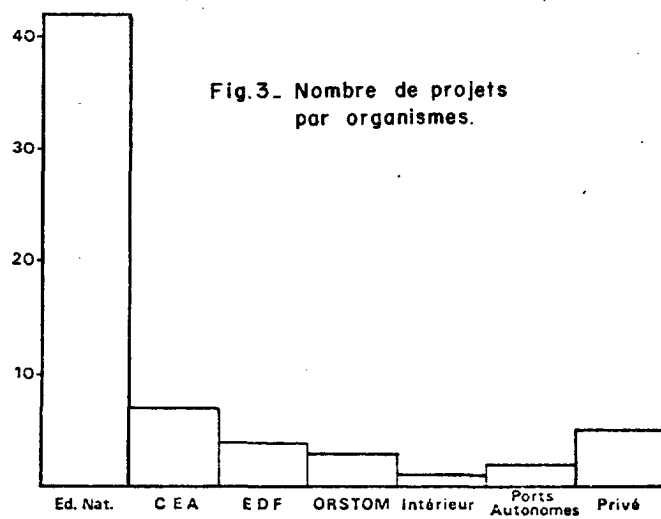


Fig.3. Nombre de projets par organismes.

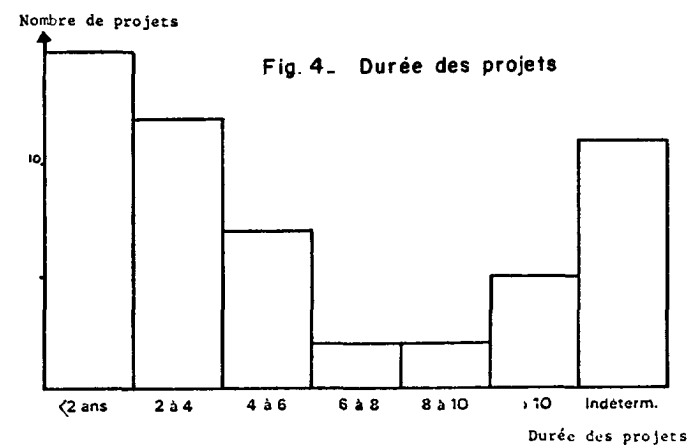
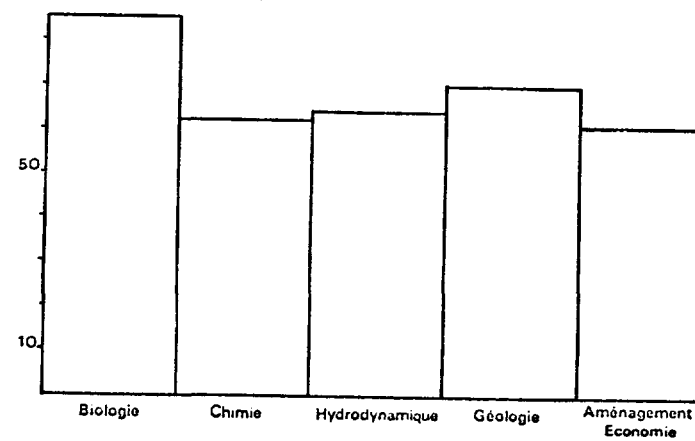
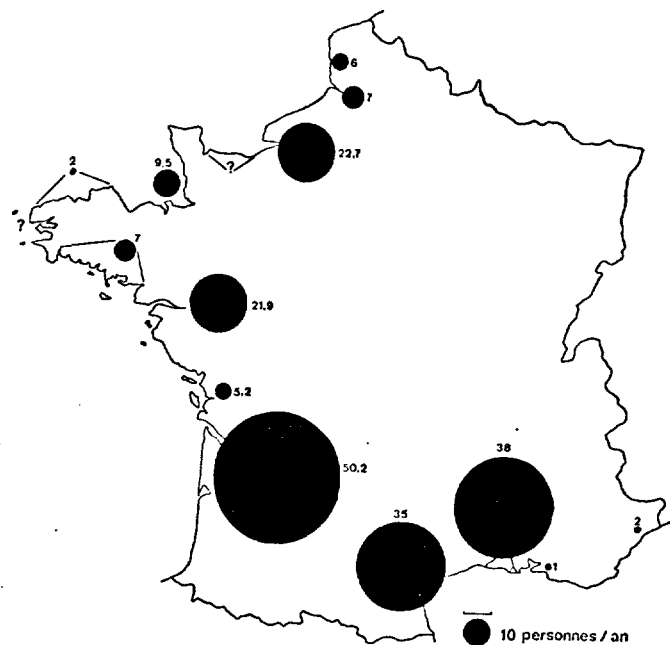
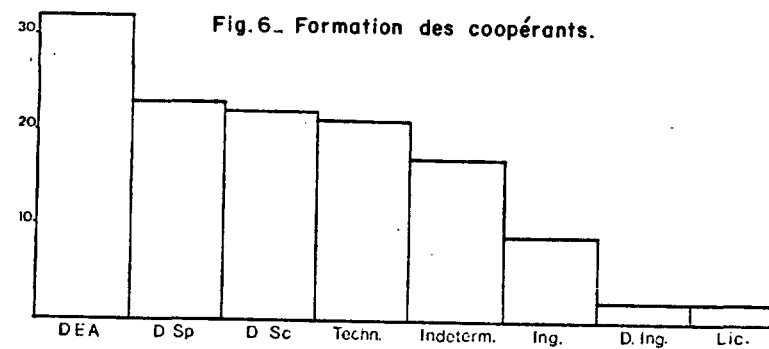
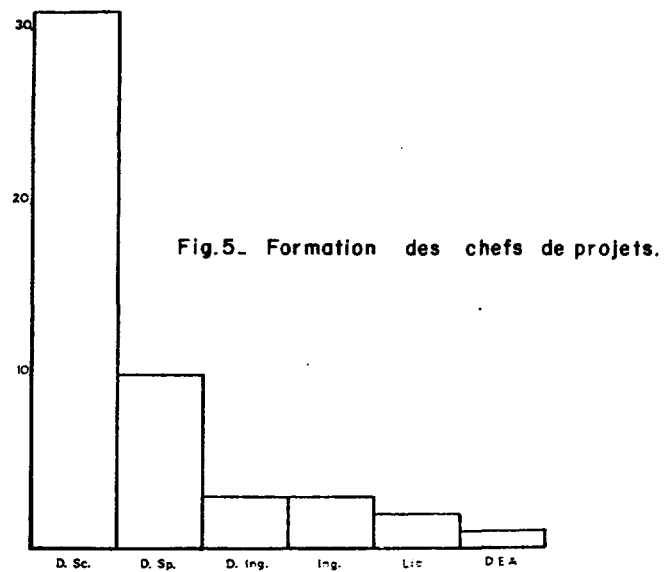


Fig.4. Durée des projets



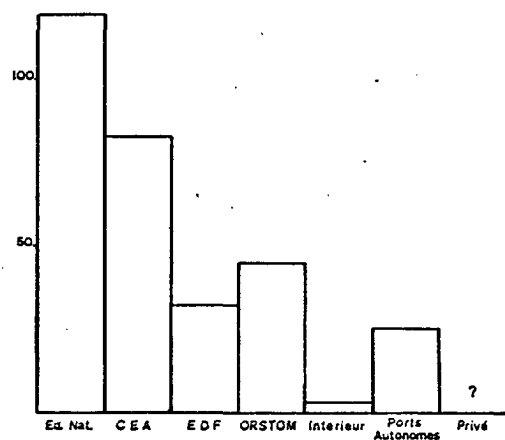


Fig.9_ Nombre de personnes/an par organismes

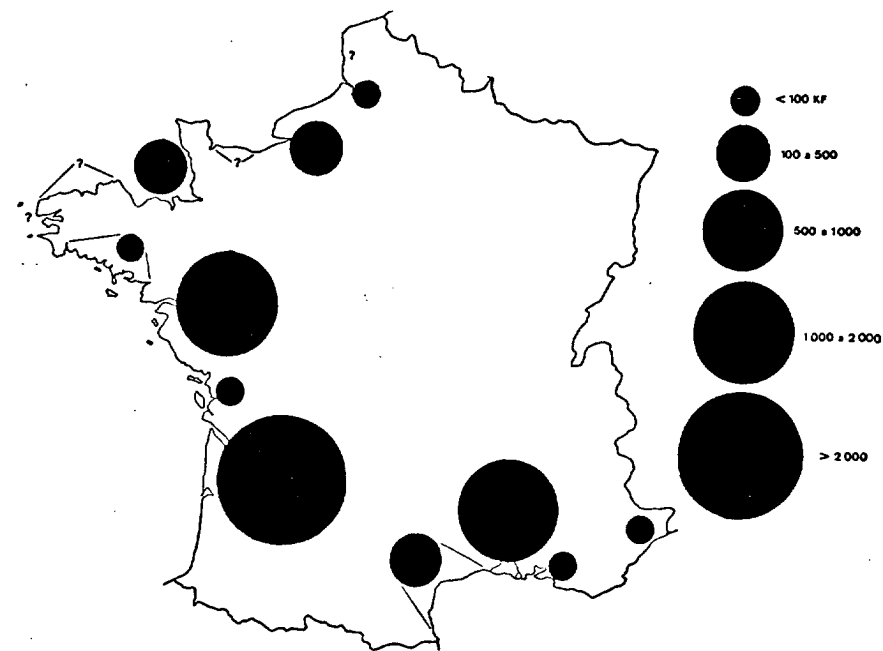


Fig.10_ Financement par régions (annuel).

Fig.11_ Financement par disciplines (annuel)

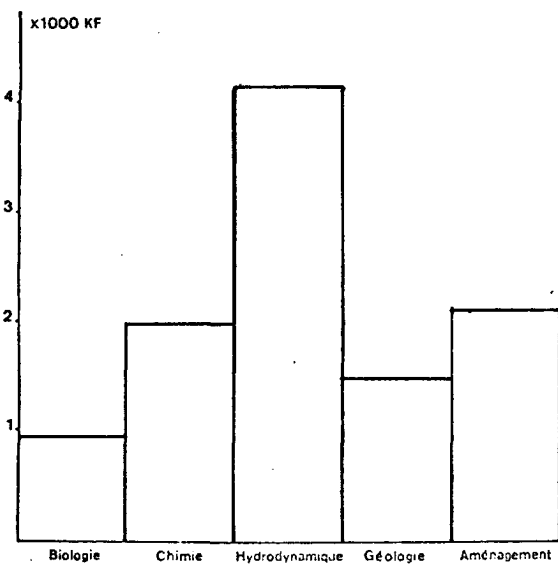
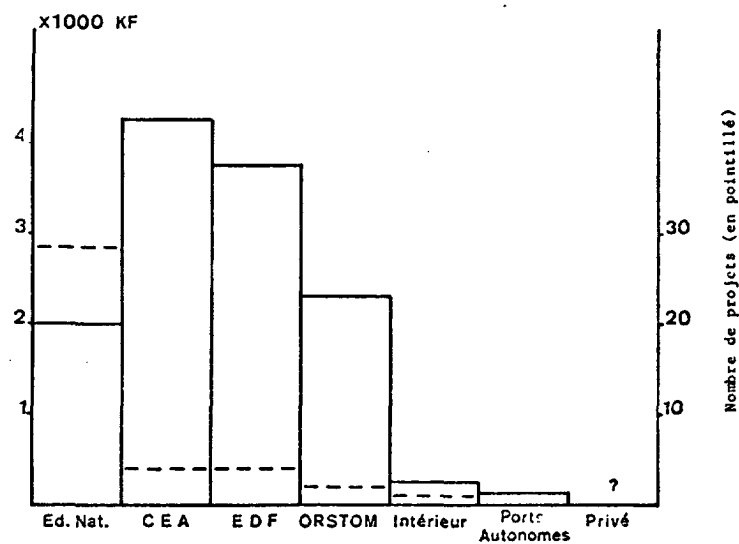


Fig.12_ Argent dépensé par organismes.



QUESTIONNAIRE "ESTUAIRES-DELTAS"

A RENVoyer A M. J.M. MARTIN - GROUPE DE GEOLOGIE NUCLEAIRE
LABORATOIRE DE GEOLOGIE - ECOLE NORMALE SUPERIEURE

46, RUE D'ULM - PARIS 5ème

1. ORGANISME

- 1.1. - Dénomination et adresse de l'organisme :
- 1.2. - Ministère ou organisme de rattachement :
- 1.3. - Nom du directeur :

2. CHEF DE PROJET OU D'ETUDE

- 2.1. - Nom et prénom :
- 2.2. - Références de formation de niveau le plus élevé :
- 2.3. - Grade :
- 2.4. - Fonction dans l'organisme :
- 2.5. - Profil scientifique ou technique :
- 2.6. - Mots-clés permettant de définir vos activités (maximum 3) :
- 2.7. - Organisme payeur :

3. LE PROJET OU L'ETUDE

- 3.1. - titre du projet ou de l'étude :
- 3.2. - date de début et durée prévue de l'étude :
- 3.3. - objectif (s) et intérêt du projet ou de l'étude :
- 3.4. - éventuellement, sa localisation géographique :
- 3.5. - personne ou organisme à l'origine du projet ou de l'étude :

4. LES COOPERANTS DU PROJET OU DE L'ETUDE

- 4.1. Nom et prénom :
- 4.2. Organisme et adresse :
- 4.3. Références de formation de niveau le plus élevé :
- 4.4. Grade :
- 4.5. Profil, scientifique ou technique :
- 4.6. Définition de la partie de projet ou d'étude traitée :
- 4.7. Pourcentage d'activité consacré au projet ou à l'étude :
- 4.8. Liste de vos publications concernant le projet ou l'étude :

5. MOYENS MIS A LA DISPOSITION DU PROJET OU DE L'ETUDE

5.1. - Liste des personnes et grades :

5.2. - Recours à l'informatique OUI NON

5.3. - Instrumentation spécifique :

- . acquise pour le projet
- . utilisée à l'occasion du projet

5.4. - Description sommaire des moyens flottants utilisés (tonnage, longueur)

5.5. - Temps d'utilisation des moyens flottants :

6. <u>FINANCEMENT DU PROJET OU DE L'ETUDE</u>	Organisme assurant le financement	Evaluation du financement KF
6.1. - Personnel 6.2. - Matériel scientifique ou autre 6.3. - Informatique 6.4. - Moyens flottants		

LISTE NON LIMITATIVE DES MOTS-CLES

BIOLOGIE

Algologie
 Aquaculture
 Bactériologie
 Benthos
 Comportement
 Bioacoustique
 Biogéographie
 Biologie des invertébrés
 Botanique
 Dynamique des systèmes
 Ecologie
 Ichtyologie
 Malacologie
 Microfaune
 Parasitologie
 Physiologie
 Productivité primaire
 Productivité secondaire
 Pêche
 Virologie

CHIMIE

Biochimie
 Chimie analytique
 Chimie minérale
 Chimie organique
 Eléments nutritifs
 Géochimie
 Hydrochimie
 Hydrocarbures
 Oligoéléments
 Pesticides
 Radioéléments
 ...

GEOLOGIE-GEOPHYSIQUE

Cartographie
 Géochronologie
 Géomorphologie
 Minéralogie
 Paléotempérature
 Prospection
 Sédimentologie
 Sismique
 Traceurs radioactifs
 ...

HYDRODYNAMIQUE

Courantologie
 Houle
 Marée
 Modèles
 ...

PLURIDISCIPLINAIRE

Environnement
 Economie
 Enseignement
 Gestion
 Planification
 ...

DIVERS

Instrumentation
 Informatique
 Législation
 Navigation
 Télédétection
 ...

A N N E X E 4

LISTE D'ETUDES ET RECHERCHES A ENTREPRENDRE CONCERNANT LE THEME 4.

On a séparé en sous ensembles distincts les problèmes :

- . d'hydrodynamique classique aux écoulements stratifiés ou non, prenant en compte les déplacements réels des particules sous l'effet de la marée, du débit fluvial, de la houle ;
- . concernant les mouvements résiduels, c'est-à-dire de période assez longue pour que la marée puisse être considérée comme une fluctuation turbulente ;
- . de recherches fondamentales des lois physiques, basées sur des observations en laboratoire et en nature.

1. RECHERCHES RELEVANT DE L'HYDRODYNAMIQUE CLASSIQUE.

1.1. ECOULEMENT HOMOGENES.

- 1.1.1. Comparaison des programmes de calcul de propagation de la marée à une dimension (longueur) et deux dimensions (longueur, largeur). Recherche d'économie dans le calcul (couple rapidité de calcul - précision). Application à l'implantation optimale d'un réseau de marégraphe. Propagation de crue.
- 1.1.2. Influence de la houle en se limitant aux aspects spécifiques concernant les estuaires et les deltas (influence des courants de marée sur la houle ; action de la houle dans le transport littoral en zone deltaïque, action de la houle dans l'équilibre érosion-sédimentation des vasières estuariennes, etc).

1.2. ECOULEMENT STRATIFIES.

- 1.2.1. Etablissement d'un modèle de calcul de l'écoulement non stationnaire stratifié (avec interface franche) en deux dimensions (longueur, profondeur) dans une embouchure. Etude paramétrique de l'importance du coefficient de frottement sur l'interface. Examen des conditions aux limites à l'aide du modèle mathématique ou physique.
- 1.2.2. Définition des limites de validité du modèle à deux dimensions (121) : influences de la force de Coriolis (sur la plaque tournante de l'IMG de Grenoble), du vent, de la topographie de l'embouchure.
- 1.2.3. Etude des conditions de stabilité de l'interface ainsi que de la diffusion à travers l'interface.
- 1.2.4. Etude à deux dimensions (longueur, profondeur) d'un écoulement en présence de stratification due à la turbidité (déplacement de la crème de vase). Etudes para-

métriques des lois sédimentologiques (débit de mise en suspension à partir du fond; mélange par turbulence dans les zones à forte discontinuité de turbidité).

- 1.2.5. Etude des circulations transversales de sédiment (en nature, et sur la plaque tournante) au voisinage du point neutre (point de changement de signe, des courants moyens près du fond). Recherche de l'influence de la force de Coriolis.
- 1.2.6. Etude des variations des profils verticaux des vitesses dues à l'influence du vent (en nature, et modèle physique).
- 1.2.7. Etude en deux dimensions horizontales (longueur, largeur) de la répartition des vitesses, sur la verticale ainsi que des diffusivités, en présence de vent, dans le cas d'un écoulement homogène, puis stratifié. Influence de la force de Coriolis.
- 1.2.8. Introduction des résultats des études 126 et 127 dans les modèles de propagation de marée.
- 1.2.9. Etude des échanges de la quantité de mouvement sur une verticale dans un écoulement stratifié (en vue d'étudier la circulation des polluants, de l'oxygène ou des particules fines).
- 1.2.10. Etude des échanges à travers la surface libre (oxygène, température).

1.3. ECOULEMENTS PARTIELLEMENT MELANGES.

- 1.3.1. Etablissement d'un modèle bidimensionnel (longueur, profondeur) d'écoulement mélangé (gradient horizontal de densité) à partir de l'observation des profils de vitesse.
- 1.3.2. Etude, à partir des résultats de 131, d'un modèle de propagation de l'intrusion saline, bidimensionnelle (longueur, profondeur) et tridimensionnel (longueur, largeur, profondeur).
- 1.3.2. Etude, dans le cas de l'écoulement mélangé et à partir du profil des vitesses, de la valeur du cisaillement, en vue de la détermination du charriage. Comparaison avec le cas des fluides homogènes.
- 1.3.4. Etude de la circulation transversale des sédiments au voisinage du point neutre. Influence de la force de Coriolis.
- 1.3.5. En s'appuyant sur les résultats de 133 et 134, établissement d'un bilan de transport des particules.
- 1.3.6. Etude de la relation entre le vent et le cisaillement en surface en vue de l'établissement de modèles de propagation à deux dimensions en plan.
- 1.3.7. Etude des coefficients de diffusion turbulente (surtout latérale) à utiliser dans les modèles pour le cas des profils de vitesse en milieu non homogène.
- 1.3.8. Examen de la possibilité d'appliquer les modèles de panaches turbides d'eau douce aux rejets urbains ou thermiques.

2. ECOULEMENT RESIDUELS.

2.1. MILIEU LIQUIDE ET ECHANGES AIR-MER.

- 2.1.1. Etude de la circulation tridimensionnelle résiduelle (longueur, largeur, profondeur), s'appuyant sur les profils de vitesse, dans le cas d'un écoulement partiellement mélangé.
- 2.1.2. Etude d'un modèle de convection et de diffusion des matières solubles ou dégradables dans le cas d'un écoulement bien mélangé.
- 2.1.3. Examen de la possibilité de suivre le déplacement de masses d'eau "marquées" au moyen de modèles bidimensionnels (longueur, profondeur).
- 2.1.4. Application de l'étude 213 au mouvement planctonique (en introduisant le mouvement propre du plancton).
- 2.1.5. Etude bibliographique critique des échanges thermiques eau-air. Etude en nature.

2.2. MILIEU SOLIDE.

- 2.2.1. Etudier le profil vertical de concentration en particules, pour un écoulement uniforme partiellement mélangé, en tenant compte de l'influence d'un gradient de densité dans le sens vertical sur la diffusivité ; en déduire des méthodes de calcul du charriage et de la suspension.
- 2.2.2. Etablissement d'un modèle mathématique unidimensionnel en écoulement transitoire (s'appuyant sur les résultats des études 133 et 221) simulant le mouvement des sables dans le cas d'un écoulement partiellement mélangé - comparaison avec le modèle physique et les résultats en nature. Reconnaissance des limites du modèle unidimensionnel.
- 2.2.3. Etude du transport et sélection différentielle des minéraux en suspension et sur le fond.

3. PROPRIETES DES SEDIMENTS COHESIFS.

- 3.0.1. Rôle des matières amorphes (allophanes) dans les transports et conséquences sur les propriétés physico-chimiques des sédiments (dépôt et fixation de la vase) ;
- 3.0.2. Propriétés physico-mécaniques des vases selon leur mode de dépôt - Résistance à l'érosion - Possibilité de remise en suspension par les courants et la houle.
- 3.0.3. Etude des problèmes liés à l'émersion des vasières (modifications physico chimiques et résistance à la remise en suspension des vases ; influence des variations phréatiques sur les vasières émergées ; problème des sous pressions pour la remise en suspension, etc).
- 3.0.4. Etude du suivi (érosion, transport, sédimentation) des minéraux argileux.

G L O S S A I R E

- ANOXIE : Absence d'oxygène. L'anoxie résulte d'une consommation chimique ou biologique de l'oxygène.
- ANNELIDES : Embranchement comprenant les vers annelés.
- AUTOECOLOGIE : Ecologie d'une espèce vivante, envisagée sous l'angle des facteurs individuels, par opposition à synécologie.
- AVALAISON : Descente des poissons de l'amont vers l'aval au cours de leur migration.
- EPIPHYTE : Se dit des organismes végétaux ou animaux qui croissent sur des végétaux, mais sans puiser leur nourriture dans ces derniers.
- ETHOLOGIE : Etude des mœurs des animaux et de leurs divers aspects.
- EUTROPHIE : Terme habituellement utilisé en écologie pour désigner des masses d'eau particulièrement riches en sels minéraux nutritifs (nitrates et phosphates essentiellement).
- FULVIQUE : Terme désignant les produits de dégradation des matières végétales (acides fulviques).
- MACROBENTHOS : Catégorie de benthos comprenant les organismes dont la taille adulte dépasse 2 mm.
- MEIOBENTHOS : Catégorie de benthos comprenant les organismes dont la taille adulte est inférieure à 2 mm.
- MESOPHILE : Qui s'accommode d'une température moyenne.
- METABOLITE : Substance chimique qui intervient dans le métabolisme.
- MICROBISME : Présence dans un organisme de microbes susceptibles de déclencher une maladie si les circonstances deviennent favorables (Nota : ce terme ne paraît pas français).
- NECTON : Ensemble des êtres marins qui nagent dans l'océan.
- NURSERIE : Zone marine littorale de croissance des jeunes poissons et invertébrés.
- NUTRIENT : Composés essentiels organiques et inorganiques nécessaires au développement des organismes autotrophes.
- NYCTHEMERAL : Qui suit les variations de luminosité du jour et de la nuit.
- OSMOREGULATION : Régulation ionique à travers une paroi vivante osmotique.
- PAUCISPECIFIQUE : Communauté composée d'un petit nombre d'espèces, souvent représentées par de nombreux individus.
- PHOTOAUTOTROPHE : Qui peut, avec le concours de l'énergie lumineuse, avoir une nutrition minérale.

PHYTOCOENOSE	: Associations végétales.
PHYTOPLANCTONTE	: Partie du plancton constituée par des végétaux unicellulaires.
PRIMAIRE ET PARAPRIMAIRE	: Qualifie la production autotrophe, la production primaire concernant les végétaux et la production paraprimaire, les bactéries.
ROSELIERE	: Qualifie l'endroit où poussent beaucoup de roseaux.
SCHORRE	: Partie d'un wadden située au-dessus des pleines mers moyennes, couverte en abondance d'halophytes.
SLIKKE	: Partie inférieure vaseuse de l'estran.
STENOHALIN	: Qui ne peut vivre que dans un milieu salé de concentration bien définie.
SYNECOLOGIE	: Etude de l'ensemble des facteurs physico-chimiques et biologiques d'une communauté, et de leurs interactions.
SYNERGIE	: Se dit du concours d'action dans l'accomplissement d'une fonction. En écologie, désigne l'action associée de différents facteurs écologiques.
TERATOLOGIQUE	: Qui présente une anomalie monstrueuse.
ZOOCENOSE	: Associations animales.