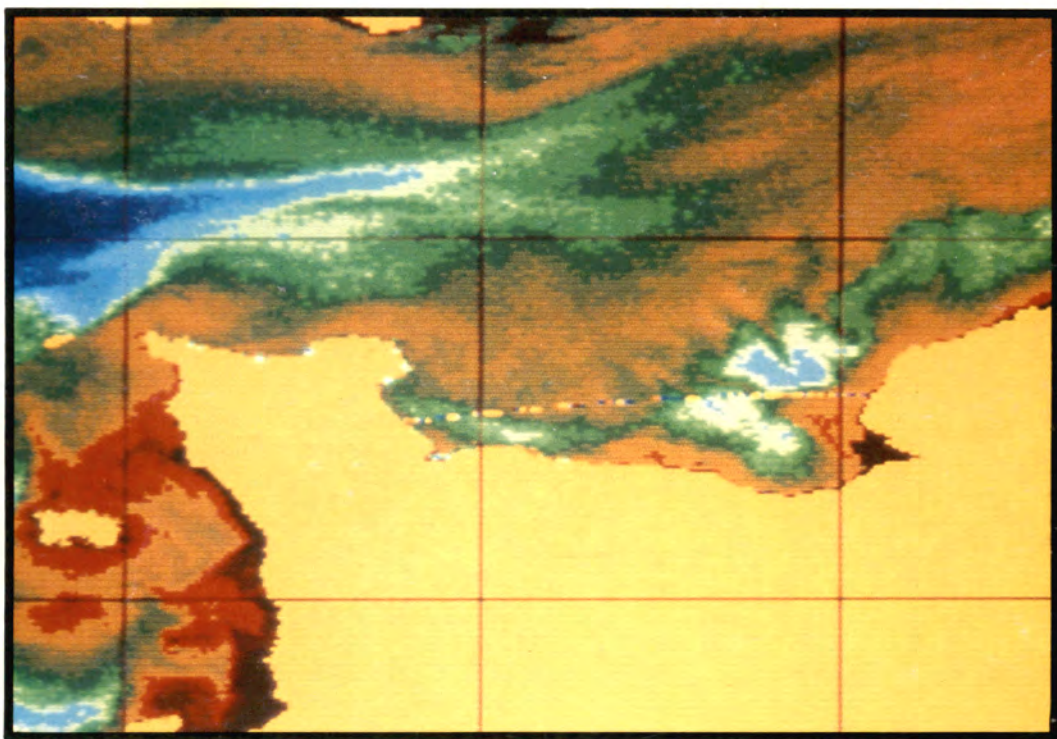




# LA BAIE DE SEINE

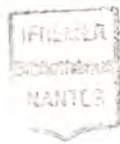
*GROUPE DE RECHERCHES COORDONNÉES "MANCHE"*  
(GRECO MANCHE)



*Actes de Colloques n° 4 1986*



CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



2004

# LA BAIE DE SEINE

*GROUPE DE RECHERCHES COORDONNÉES "MANCHE"*  
(GRECO MANCHE)

COLLOQUE NATIONAL DU CNRS

UNIVERSITÉ de CAEN 24-26 avril 1985

*Actes de Colloques n° 4 1986*





*Service de la Documentation  
et des Publications (S.D.P.)*  
**IFREMER - Centre de Brest**  
**B.P. 337 - 29273 BREST CEDEX**  
**Tél. : 98.22.40.13 - Télex : 940 627 F**

ISSN 0761-3962

© Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, 1986



Le colloque

**"BAIE DE SEINE"**

s'est tenu du 24 au 26 avril 1985

à

L'UNIVERSITE DE CAEN

Il a été organisé par

LE GROUPE DE RECHERCHES COORDONNEES "MANCHE" (GRECO-MANCHE)

avec l'appui du

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)**

DEPARTEMENT TERRE, OCEAN, ATMOSPHERE, ESPACE (TOAE)

PROGRAMME INTERDISCIPLINAIRE DE RECHERCHES EN ENVIRONNEMENT (PIREN)

PROGRAMME INTERDISCIPLINAIRE DE RECHERCHES OCEANOGRAPHIQUES (PIROCEAN)

de

**L'INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER**

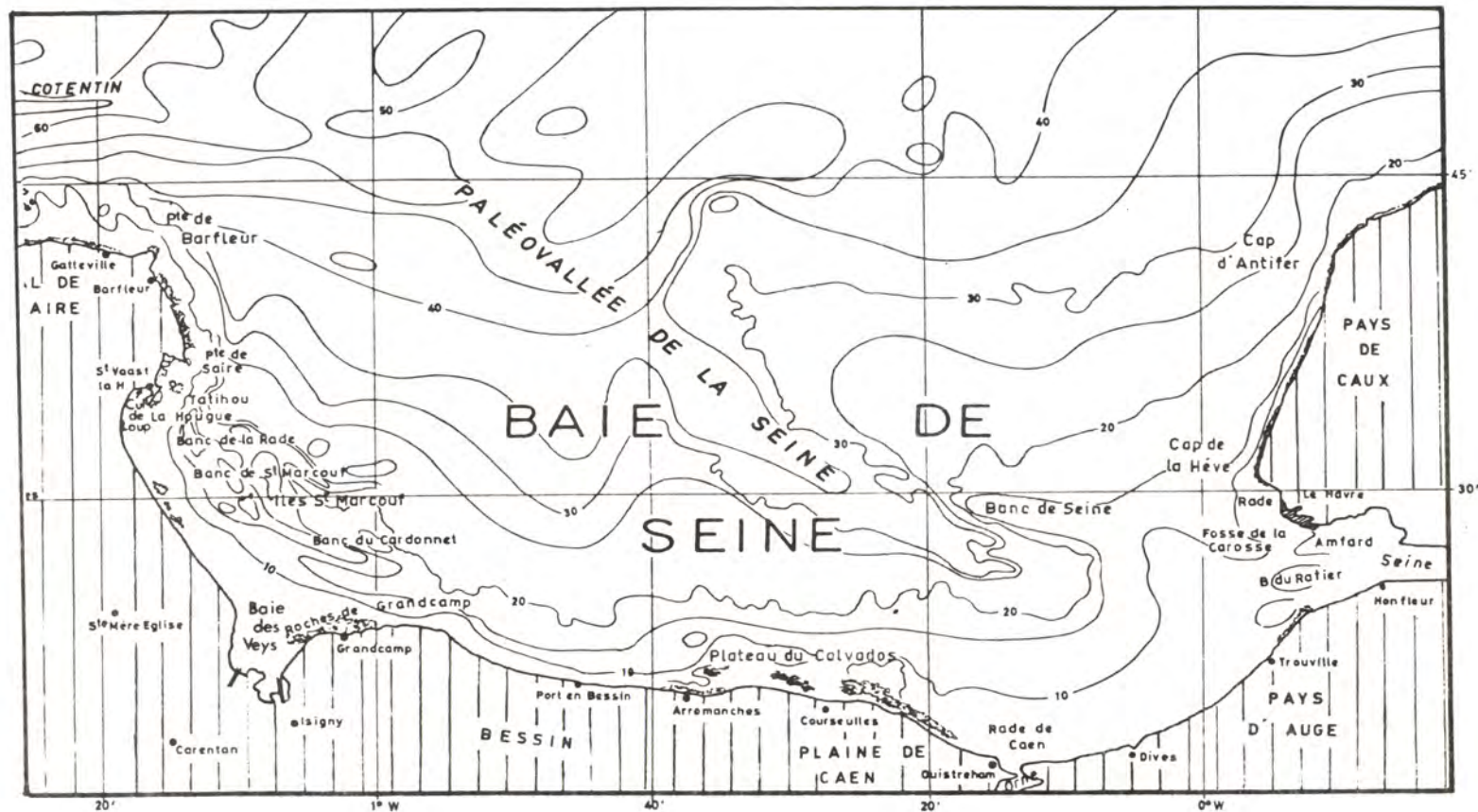
du

**MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT**

et de

**L'UNIVERSITE DE CAEN**

Les organisateurs rendent hommage à Madame J. Genet, présidente de l'Université de Caen et aux personnels des services et des laboratoires qui ont apporté leur concours à l'accueil du colloque. Ils remercient Monsieur F. Lefèvre, délégué régional du C.N.R.S., Mademoiselle C. Lalou, Messieurs G. Bellan, R. Chesselet, C. Latouche et J.L. Mauvais, présidents de séances, Monsieur C. Champion de la rédaction d'"Ouest-France", animateur de la table ronde, les participants des directions concernées du C.N.R.S., de l'IFREMER et du Ministère de l'Environnement, les nombreux représentants des institutions et services administratifs de Basse-Normandie et de Haute-Normandie et ceux des ports autonomes du Havre et de Rouen.



LA BAIE DE SEINE



## INTRODUCTION

La Manche s'offre à la recherche comme un modèle exemplaire de mer à très fort régime de marée. Les mers "mégatidales" affectées par des marées du même ordre sont peu nombreuses à l'échelle planétaire. L'intensité du régime hydrodynamique induit par la marée a des conséquences capitales sur la nature, la distribution et la dynamique des sédiments et des suspensions, le cheminement et la transformation des espèces chimiques. Elle conditionne la structure, la répartition, la dynamique, le fonctionnement et la production des peuplements dans un système caractérisé par l'intensité du transport advectif et la dispersion des ressources trophiques et des larves, l'absence de stratification estivale, etc. Les phénomènes les plus généraux, notamment les transferts d'énergie et de matière, s'y déroulent ainsi selon des modalités particulières, qui s'écartent des modèles décrits des mers épicontinentales de moindre hydrodynamisme, le plus largement distribuées et par conséquent le plus généralement étudiées.

Mais la Manche n'est pas seulement intéressante en tant que modèle de mer mégatidale. Elle appartient à l'un des plus vastes plateaux continentaux, incluant des mers de régimes hydrodynamiques variés, depuis les zones de faible énergie de la mer Celtique, de la majeure partie de la mer du Nord et de la Baltique, jusqu'aux fortes énergies dynamiques qui affectent l'Iroise, la Manche, l'entrée de la mer du Nord et de la mer d'Irlande. Dans cet ensemble, elle constitue globalement une zone de transit d'eaux atlantiques vers la mer du Nord à travers le Pas-de-Calais. Elle recueille des apports côtiers, parmi lesquels ceux de la Seine sont les plus importants.

### La Seine, son estuaire et la Baie de Seine :

Le bassin versant de la Seine draine un territoire de près de 75.000 km<sup>2</sup>, supportant environ 40% des activités économiques de la France, 30% de sa population et réunissant 20% de ses superficies agricoles. Le fleuve véhicule ainsi des agents polluants de toutes sortes, vers une mer à particularités accusées. Avec un débit moyen de 380 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à l'embouchure, la Seine est un des principaux tributaires des mers du nord-ouest de l'Europe. Son débit, du même ordre de grandeur que celui de la Meuse, n'atteint cependant que la moitié de celui de la Loire ou de la Gironde, le cinquième de celui du Rhin, alors que la mer réceptrice est affectée d'un marnage d'environ 7 m en vive-eau moyenne, contre environ 5 m devant la Loire, 4 m devant la Gironde et 2 m seulement à l'embouchure de la Meuse et du Rhin.

L'estuaire de la Seine est en voie de comblement, sous l'effet d'une dynamique sédimentaire naturelle, accélérée par l'endiguement du chenal de navigation. Il en résulte une simplification structurale, une intensification de la circulation de marée, une migration vers l'aval de l'intrusion saline et du bouchon vaseux et une réduction du temps de résidence des eaux douces. On atteint en définitive un modèle d'estuaire restreint, dominé par la marée, fonctionnant de moins en moins comme un piège à sédiments et à polluants. Les phénomènes qui se déroulent dans la Baie de Seine prennent de ce fait un relief particulier.

La Baie de Seine forme un quadrilatère largement ouvert au nord sur le canal de la Manche; la profondeur n'y dépasse guère une trentaine de mètres. La



vitesse des courants de marée, faible dans la baie orientale, croît au nord-est sur la zone plus active du nord du Pays de Caux, et surtout au nord-ouest, vers le détroit du Cotentin, où elle dépasse 3 noeuds en vive-eau moyenne. A ces gradients d'intensité hydrodynamique sont associées des séquences sédimentaires, qui conduisent graduellement, depuis les dépôts fins confinés en fond de baie, jusqu'aux fonds caillouteux du nord-ouest de la baie et du nord du Pays de Caux. La nature et la distribution des peuplements benthiques sont sous la dépendance de ces séquences hydrodynamiques et sédimentaires. Ainsi, les peuplements de sédiments fins à *Abra alba*, maillon important dans l'économie générale des mers côtières, cantonnés, en Baie de Seine orientale, au voisinage même de l'estuaire de la Seine, se trouvent placés sous l'influence immédiate des apports polluants.

Les sources de pollution sont multiples: aux apports du bassin fluvial, les plus importants, s'ajoutent en effet des rejets industriels directs dans l'estuaire et des relargages par les dépôts de dragages. Les processus géochimiques habituels du domaine estuarien subissent ici la forte influence d'un régime hydrosédimentaire largement dépendant du régime mégatidal. Dans le cas des métaux par exemple, on est en présence d'un modèle à deux sources d'éléments dissous évacuables vers le large: le pôle fluviatile et le bouchon vaseux. Enfin, l'interaction entre les apports fluviaux et les rejets directs dans l'estuaire joue un rôle important, notamment dans le comportement du Fer.

En définitive, la Baie de Seine apparaît comme un objet de recherche particulièrement intéressant, de par sa géométrie et sa morphologie régulières, facilitant l'analyse des phénomènes interactifs complexes qui se déroulent dans les espaces côtiers. L'étude pluridisciplinaire de son fonctionnement présente à la fois un intérêt fondamental (exemplarité, simplicité structurale favorable à la modélisation et un intérêt finalisé (devenir et impact des polluants).

#### Le programme Baie de Seine et le Colloque :

Partant d'un acquis structural antérieur déjà important sur l'ensemble de la région marine, notamment en hydrographie, sédimentologie, peuplements benthiques, et d'une synthèse sur l'estuaire de la Seine, au terme d'un programme mené de 1977 à 1980 dans le cadre du SAUM (Recherches coordonnées par la Mission d'Etudes de la Basse-Seine et la Mission d'Aménagement de la Basse-Normandie, avec l'assistance scientifique du CNEXO), il paraissait possible, en 1981, de faire progresser la connaissance d'un certain nombre de phénomènes et de mécanismes fondamentaux intervenant dans le fonctionnement de la Baie de Seine, sous ses aspects hydrodynamiques, sédimentaires, chimiques et biologiques, ou encore de mettre au point des outils méthodologiques pour la détection des effets des polluants. Un programme pluridisciplinaire, conduit par le Groupe de Recherches Coordonnées "Manche" du C.N.R.S. (GRECO "Manche") et associant des chercheurs de plus de vingt laboratoires appartenant au C.N.R.S., aux Universités, au C.N.E.X.O. et au C.E.A. fut alors lancé; il prit son plein développement à partir de 1982 (Cabioch, 1983). Il a été soutenu par le C.N.R.S. (Département TOAE, PIREN, PIROCEAN), le C.N.E.X.O. et le Ministère de l'Environnement.

Le champ des recherches n'a nullement prétendu être exhaustif; d'ailleurs il n'aurait pu l'être, la matière est trop vaste. On s'est efforcé, par le jeu de compétences complémentaires, de faire progresser des axes essentiels dans les différents domaines d'investigation, en entretenant des liaisons suffisantes entre les équipes pour éclairer l'action et améliorer l'interprétation des résultats.

Trois ans après le déploiement du programme de recherche, le moment était venu d'en examiner le bilan. Le colloque a ainsi été, en premier lieu, un instrument de la concertation pluridisciplinaire entreprise plusieurs années



auparavant au sein du GRECO et une étape essentielle dans l'élaboration de la synthèse des résultats acquis sur le fonctionnement de la Baie de Seine. Mais limiter son rôle à un débat interne au GRECO eut été très insuffisant; le deuxième objectif était d'insérer l'analyse des résultats dans une plus ample discussion. Un élargissement international a été recherché, en faisant appel à des conférenciers, invités à s'exprimer sur des thèmes analogues, dans chacune des grandes disciplines. Il était également essentiel de confronter les résultats acquis par le GRECO dans le domaine du fonctionnement océanographique avec les recherches effectuées en Baie de Seine par d'autres organismes et d'étendre le champ de la discussion depuis l'océanographie jusqu'au domaine socio-économique. Ce fut le rôle dévolu aux communications sur invitation et à la table ronde finale.

Ainsi, la thématique du colloque s'est inscrite dans une triple perspective :

- le système Baie de Seine : aboutir par la convergence des différentes disciplines à dresser un schéma de fonctionnement de la baie et de son insertion dans la Manche, cohérent avec l'état d'avancement des connaissances et faisant la part des acquis, des hypothèses et des lacunes.
- Les progrès scientifiques généraux dans la connaissance du fonctionnement des mers côtières résultant du programme Baie de Seine.
- Les enseignements et recommandations en matière d'environnement et d'aménagement.

Le présent volume réunit les communications présentées lors du colloque par les participants au programme du GRECO et par les conférenciers invités, éventuellement revues et complétées par leurs auteurs. Il s'y ajoute d'une part, des articles de synthèse rédigés après le colloque par les responsables des différents thèmes, d'autre part, des résumés des discussions en séance, d'après les notes remises aux organisateurs par les différents intervenants. Les articles de synthèse peuvent comprendre des connaissances nouvelles par rapport à ce qui avait été présenté lors du colloque; c'est le cas dans le thème "Chimie des eaux et des sédiments", où la synthèse est concentrée sur la chimie et la géochimie des métaux et des terres rares, les questions concernant les autres aspects de la chimie de l'environnement étant reportées dans le résumé des discussions.

Achèvement d'une étape dans les recherches côtières en Manche, le Colloque "Baie de Seine" ouvre aussi d'autres perspectives. De nombreuses connaissances auront été acquises sur l'interface estuaire/eaux côtières sur un cas exemplaire, en régime mégatidal, mais beaucoup reste à faire pour mieux comprendre les phénomènes qui se déroulent plus à l'extérieur, entre les eaux côtières et le flux d'origine atlantique qui défile dans la Manche, phénomènes essentiels dans l'interaction mer-continent, tant pour les transferts chimiques et particuliers à l'échelle du plateau continental, que pour le fonctionnement des écosystèmes pélagiques et benthiques. Le cadre plus large de la Manche orientale s'y prête, pour des raisons du même ordre que celles qui avaient fait choisir la Baie de Seine pour l'étape précédente, avec l'avantage aussi de conserver avec ce site un chantier de recherche dont l'intérêt n'est pas épuisé.

Louis CABIOCH  
Responsable du GRECO "Manche".

## RÉSUMÉ

Les eaux de la Seine sont polluées par des effluents industriels, urbains et agricoles: son bassin fluvial supporte en effet 20% des surfaces cultivées, 30% de la population et 40% des activités économiques de la France. Aux apports du fleuve s'ajoutent dans l'estuaire des rejets industriels directs. Enfin, divers polluants sont introduits en Baie de Seine par des dépôts de dragages portuaires, accumulés en mer à proximité de l'estuaire. L'ensemble de ces apports anthropiques aboutit dans une mer à fortes marées.

Une étude pluridisciplinaire de l'estuaire de la Seine et de la Baie de Seine a permis de mettre en évidence les principaux phénomènes physiques et sédimentologiques gouvernés par ce régime de marée et leurs conséquences en matière de dynamique des polluants et de fonctionnement d'un témoin biologique: les peuplements benthiques soumis à l'influence immédiate de l'estuaire.

La Baie de Seine est une des régions de France les plus aménagées et donc une des régions où les conflits sont les plus aigus entre les nécessités du développement industriel, de l'urbanisme, de la pêche et du tourisme. La connaissance scientifique du fonctionnement de l'estuaire et de la baie fournit un état de référence du site au début des années 1980 et apporte un certain nombre de réponses en matière d'importance relative des perturbations d'origine anthropique, compte tenu des particularités du régime de marée.

## ABSTRACT

The waters of the River Seine are polluted by urban, industrial and agricultural effluents: overall the River's catchment area accounts for 20% of the cultivated areas, 30% of the population, and 40% of the economic activities of France. In addition direct industrial waste inputs are emptied into the estuary. Finally, various pollutants are introduced into the "Baie de Seine" by deposits from harbour dredging activities near the estuary. Together these various anthropogenic inputs emerge into a strongly tidal region.

A multidisciplinary study of the estuary of the Seine and of the "Baie de Seine" has demonstrated the principal physical and sedimentological phenomena governed by this tidal regime and their consequences in terms of pollutant dynamics and on the benthic populations, directly subject to the estuary influences.

The "Baie de Seine" is one of the most exploited regions in France, and consequently an area where there are sharp conflicts of interest between the needs of industrial development, town-planning, fisheries and tourism. The recent scientific study of the functioning of the estuary and the "Baie de Seine" provides a base line reference at the beginning of the 80's, permits a certain number of answers in terms of the importance relative to perturbations of anthropogenic origin, taking into account the peculiarities of the tidal regime.



## THEME I. DYNAMIQUE DES EAUX

|                                                                                                                                                                 |                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----|
| <i>La circulation des eaux en Baie de Seine</i>                                                                                                                 | CHABERT D'HIERES G. | 15 |
| 1 - LE HIR P. et l'YAVANC J. Observations de courant en Baie de Seine                                                                                           |                     | 25 |
| 2 - SALOMON J.C. Courantologie calculée en Baie de Seine                                                                                                        |                     | 35 |
| 3 - LE PROVOST C., FORNERINO M. et VILLARET C. Sur l'hydrodynamique de la baie de Seine. Résultats d'observations et de modélisations                           |                     | 43 |
| 4 - THOUVENIN B. et SALOMON J.C. Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion                                                                         |                     | 49 |
| 5 - BROCHE P., SALOMON J.C., DE MAISTRE J.C. et DEVENON J.L. Courantométrie en Baie de Seine : comparaison d'une modélisation numérique et de mesures par radar |                     | 57 |
| 6 - LE HIR P., SALOMON J.C., LE PROVOST C., CHABERT D'HIERES G. et MAUVAIS J.L. Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine                          |                     | 63 |
| *7 - DJENIDI S., NIHOUL J.C.J. et RONDAY F. Modèles mathématiques de courants résiduels sur le plateau continental nord européen                                |                     | 73 |
| <i>Synthèse des discussions</i>                                                                                                                                 | CHABERT D'HIERES G. | 85 |

## THEME II. DYNAMIQUE DES SUSPENSIONS ET DES DEPOTS

|                                                                                                                                                                                               |               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----|
| <i>Dynamique des suspensions et des dépôts en Baie de Seine : une synthèse des résultats</i>                                                                                                  | LARSONNEUR C. | 93  |
| 8 - AUFFRET J.P. et d'OZOUVILLE L. Cartographie du prisme sédimentaire holocène en Baie de Seine orientale, par sismique réflexion à haute définition                                         |               | 109 |
| 9 - AVOINE J. Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine                                                                                                                     |               | 117 |
| 10 - AVOINE J. et CREVEL L. Influence des apports fluviaux en Baie de Seine                                                                                                                   |               | 125 |
| 11 - LAFITE R., DUPONT J.P. et LAMBOY M. Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en Baie de Seine                                                                                    |               | 135 |
| 12 - DUPONT J.P., LAFITE R. et LAMBOY M. Contribution de l'étude des suspensions à la compréhension des mécanismes hydrosédimentaires estuariens et littoraux en Manche centrale et orientale |               | 145 |

\* Communications de personnalités extérieures au GRECO "Manche". Les titres mentionnés en italique correspondent aux communications des conférenciers étrangers.

|                                                                                                                                                                              |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 13 - DUPONT J.P. et LAFITE R. Importance et rôle du matériel organique vivant et inerte dans les suspensions de la Baie de Seine.                                            | 155               |
| 14 - BRUN-COTTAN J.C. et BEN BRAHIM M. Particules en suspension dans la Baie de Seine : concentration et sédimentation instantanée en période d'étiage                       | 163               |
| 15 - THOMAS Y.F. Etude des transports de matières en suspension en Manche par emploi de l'imagerie CZCS                                                                      | 173               |
| 16 - AVOINE J., DUBRULLE L. et LARSONNEUR C. La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la Baie de Seine - conséquences sur l'environnement                             | 183               |
| 17 - CREVEL L. La dynamique sédimentaire en Baie de Seine nord-orientale, fluctuations et évolution de la couverture meuble                                                  | 193               |
| 18 - AUFFRET J.P. et d'OZOUVILLE L. Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine            | 201               |
| 19 - AVOINE J., CAILLOT A., HOSLIN R., LARSONNEUR C., MASSIAS J. et QUESNEY M. Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en Baie de Seine | 211               |
| *20 - COLLINS M. <i>Sediment and water movement in coastal embayments</i>                                                                                                    | 219               |
| Synthèse des discussions                                                                                                                                                     | LARSONNEUR C. 239 |

### THEME III. CHIMIE DES EAUX ET DES SEDIMENTS

*Comportement chimique et géochimique des éléments à l'état de traces dans l'estuaire de la Seine : une synthèse des résultats*

GUEGUENIAT P.

|                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 21 - AUFFRET J.P., GUEGUENIAT P., LEPY M.C., PATRY J.P. et SAUR H. Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983                                                                                    | 247 |
| 22 - AMINOT A., LE GUELLEC A.M. et MAUVAIS J.L. Le fluorure en Baie de Seine                                                                                                                                                                                     | 273 |
| 23 - AMINOT A., KEROUËL R. et MAUVAIS J.L. Les éléments nutritifs en Baie de Seine                                                                                                                                                                               | 283 |
| *24 - GALLET P. Mise en évidence des profils d'évolution pluri-annuelle associés aux séries de mesures de paramètres hydrobiologiques effectuées dans l'estuaire de la Seine dans le cadre du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin        | 289 |
| 25 - GUEGUENIAT P., BOUST D., HEMON G., PHILIPPOT J.C., LAGARDE G. et HEITZ C. Distribution de 40 éléments à l'état de traces dans les suspensions de la Seine. Utilisation du lanthane pour étudier les processus sédimentaires dans l'estuaire et dans la baie | 297 |
| 26 - FISCHER J.C., WARTEL M., GUEGUENIAT P. et GANDON R. Pouvoir complexant des eaux de l'estuaire de la Seine                                                                                                                                                   | 303 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                  | 315 |



|                                                                                                                                                                                        |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 27 - FISCHER J.C. et WARTEL M. Evolution des la complexation des métaux : Ca, Mg, Cd, Pb et Cu dans l'estuaire de la Seine                                                             | 321               |
| 28 - GANDON R., GUEGUENIAT P., FISCHER J.C. et WARTEL M. Etude de la distribution des formes solubles minérales et organiques du fer, du zinc et du cuivre dans l'estuaire de la Seine | 327               |
| 29 - GUEGUENIAT P., BOUST D., GANDON R., HEMON G., PHILIPPOT J.C., SANCHEZ J.P., MARIN P. et PIERI J. Etude du comportement géochimique du fer dans l'estuaire de la Seine             | 337               |
| *30 - LUOMA S.N. Biological availability of sediment-bound trace metals                                                                                                                | 347               |
| Synthèse des discussions                                                                                                                                                               | GUEGUENIAT P. 363 |

#### THEME IV. MILIEU VIVANT

|                                                                                                                                                                                                                                                    |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| La Baie de Seine : peuplements et espèces benthiques en régime perturbé                                                                                                                                                                            | CABIOCH L. et RETIERE C. 371 |
| 31 - CHASSARD-BOUCHAUD C., NOEL P., HUBERT M. et HALLEGOT P. Intérêt de la microscopie analytique pour l'étude d'impact de métaux traces et de terres rares sur le milieu vivant, application à l'étude d'une zone polluée: la Baie de Seine       | 383                          |
| 32 - SYLVESTRE C., BATREL Y. et LE GAL Y. La détection des effets sublétaux des pollutions : utilisation <i>in situ</i> d'un indice biochimique, la charge énergétique                                                                             | 391                          |
| 33 - MERLIN J.C., NOEL P., LAFAGE-SZYDLOWSKI N., PETIT-COSSI G. et WALLART F. Dosage des caroténoides de la macrofaune benthique par spectrométrie Raman de résonance - comparaison avec les dosages par spectrométrie d'absorption visible        | 397                          |
| 34 - NOEL P., MERLIN J.C., LAFAGE-SZYDLOWSKI N., HUBERT M. et CHASSARD-BOUCHAUD C. Les variations quantitatives des caroténoides de la macrofaune benthique en Baie de Seine ont-elles des relations avec la pollution ou l'écologie des espèces ? | 403                          |
| 35 - GENTIL F., IRLINGER J.P., ELKAIM B. et PRONIEWSKI F. Premières données sur la dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés à <i>Abra alba</i> de la Baie de Seine orientale                                                 | 409                          |
| *36 - LOCKWOOD A.P.M. Southampton water and the Solent : biological effects of the multi-use of an estuarine system                                                                                                                                | 421                          |
| Synthèse des discussions                                                                                                                                                                                                                           | RETIERE C. 431               |

#### THEME V. LA BAIE DE SEINE: UTILISATION - ENVIRONNEMENT

|                                                                                                                    |                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Les aménagements dans l'estuaire de la Seine                                                                       | MAUVAIS J.L. 435 |
| *37 - RAMBAUD B. et HAUVILLE S. Evolution des moyens d'investigation hydrosédimentaire dans l'estuaire de la Seine | 443              |
| *38 - DESPREZ M. et DUPONT J.P. Impact biosédimentologique d'aménagements portuaires en estuaire de Seine          | 449              |

|                                                                                                                     |                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| *39 - PRONIEWSKI F. Influence sur les peuplements estuariens des rejets industriels et aménagements portuaires      | 459              |
| *40 - CHAUVIN P., FREGER G. et GUYADER J. Synthèse des connaissances sur les effets du dépôt de dragage d'Octeville | 465              |
| *41 - ABARNOU A. et SIMON S. Contamination de l'estuaire et de la Baie de Seine par les P.C.B. - bilan des études   | 471              |
| *42 - PAULMIER G. et JOLY J.P. Les phénomènes d'eaux colorées en Baie de Seine                                      | 477              |
| *43 - DUVAL P. Impact du milieu sur les nourriceries de poissons plats de la Baie de Seine                          | 485              |
| <i>Synthèse des discussions</i>                                                                                     | MAUVAIS J.L. 489 |

ANNEXE : Le Programme d'action du Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI) en Basse Seine

501

POSTERS : RESUMES

505

LISTE DES PARTICIPANTS

529

**THEME 1**



***DYNAMIQUE DES EAUX***



*La circulation des eaux en Baie de Seine*

CHABERT D'HIERES G.

- 1 - LE HIR P. et l'YAVANC J. Observations de courant en Baie de Seine
- 2 - SALOMON J.C. Courantologie calculée en Baie de Seine
- 3 - LE PROVOST C., FORNERINO M. et VILLARET C. Sur l'hydrodynamique de la baie de Seine. Résultats d'observations et de modélisations
- 4 - THOUVENIN B. et SALOMON J.C. Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion
- 5 - BROCHE P., SALOMON J.C., DE MAISTRE J.C. et DEVENON J.L. Courantométrie en Baie de Seine : comparaison d'une modélisation numérique et de mesures par radar
- 6 - LE HIR P., SALOMON J.C., LE PROVOST C., CHABERT D'HIERES G. et MAUVAIS J.L. Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine
- \*7 - DJENIDI S., NIHOUL J.C.J. et RONDAY F. Modèles mathématiques de courants résiduels sur le plateau continental nord européen

*Synthèse des discussions*

CHABERT D'HIERES G.

## LA CIRCULATION DES EAUX EN BAIE DE SEINE

CHABERT D'HIERES G. \*

Durant ces dernières années, les dynamiciens de l'Université de Bretagne Occidentale (U.B.O.), du Centre Océanographique de Bretagne (C.O.B.), de l'Institut de Mécanique de Grenoble (I.M.G.), aidés du Laboratoire de Sonda-ge Electromagnétique de l'Environnement Terrestre de l'Université de Toulon (L.S.E.E.T.) ont coordonné leurs efforts, et mis en commun leurs moyens pour rechercher des résultats cohérents sur les mouvements des masses d'eau en Baie de Seine. L'axe principal de ces recherches a été la mesure et le calcul des courants instantanés dans tout le domaine avec la prise en compte pré-cise de leurs variations spatiales et temporelles de façon à améliorer bien entendu la connaissance de ces courants eux-mêmes, mais surtout de détermi-ner le devenir, s'il y en a un, des masses d'eau à plus ou moins long terme.

On aurait bien voulu nous voir donner un champ régulier et permanent de dé-placements des masses d'eau. Malheureusement, le problème est plus complexe; leurs mouvements sont soumis à un ensemble de causes perturbatrices aléatoi-res qui peuvent masquer les tendances que nous avons voulu établir. La dis-persion turbulente de ces écoulements vient compliquer considérablement ce problème.

L'intérêt porté aux mouvements des masses d'eau en Baie de Seine ne date pas de la constitution du GRECO Manche. En 1980, les lois de variations de niveau dues à la marée astronomique étaient supposées connues; les courants l'étaient moins, et les dérives à long terme étaient pratiquement ignorées. Il serait trop long de faire le point des connaissances hydrodynamiques de la baie de Seine avant la constitution du GRECO. Mais on ne peut passer sous silence la grande activité du Service Hydrodynamique et Océanographique de la Marine (S.H.O.M.), de l'Université de Bretagne occidentale (U.B.O.), du Laboratoire National d'Hydraulique (L.N.H.), de la Société Grenobloise d'Etudes et d'Ap-plications Hydrauliques (S.O.G.R.E.A.H.), du Laboratoire Central d'Hydrauli-que de France (L.C.H.F.), des Services des Ponts et Chaussées, des Directions Départementales de l'Equipement, des Cellules antipollutions, des Commissions de Contrôles et de tous les organismes s'intéressant à l'hydrodynamique, à la sédimentologie, à la géochimie, à la biologie, qui se sont regroupés sous l'étiquette de GRECO. L'IFREMER a apporté une aide déterminante à cette opé-ration; que tous ses collaborateurs soient ici remerciés.

La synthèse des résultats obtenus au cours du programme Baie de Seine est résumée dans la communication de P. Le Hir, J.C. Salomon, C. Le Provost, G. Chabert d'Hières et J.L. Mauvais, rédigée par P. Le Hir, et on se contentera donc ici de commenter ou de préciser les notions qui en ont été dégagées.

Nous nous sommes limités à l'étude de la baie de Seine à l'exclusion de celle de l'estuaire. On doit insister sur les diverses connexions qu'il y a eu en-tre les équipes de recherches :

- détermination des objectifs des mesures et des paramètres à respecter lors de leur exécution;
- dépouillement des mesures faites par le C.O.B., par les équipes de Grenoble;

\* Institut de Mécanique de Grenoble, B.P. 68, 38402 Saint Martin d'Hères.



- utilisation par le C.O.B. des modèles numériques établis par l'U.B.O.
- Interprétation en commun des résultats des modèles à partir des mesures *in situ*;
- exploitation des mesures de courants différentiels entre le fond et la surface pour critiquer les résultats des modèles tridimensionnels;
- utilisation des résultats d'une équipe pour établir les conditions aux limites des modèles des autres. Citons par exemple les données du modèle physique de la Manche construit sur la plaque tournante de Grenoble, utilisées pour avoir les dénivellations instantanées le long de la limite Barfleur-Antifer. (cf. dans ce volume Poster P.1).

Les mesures *in situ* des courants dans la masse décrites dans la communication de P. Le Hir et J. L'Yavanc ont fourni des résultats remarquables. Les travaux d'analyse de C. Le Provost montrent que leurs résultats sont exploitables. Ils ont permis de faire une bonne prédiction des courants de marée et le champ des vitesses moyennes obtenues est cohérent.

Les mesures au radar exécutées par P. Broche *et al.* ont le grand avantage de donner les courants de surface et des champs instantanés avec une bonne résolution spatiale et temporelle. Elles ont l'inconvénient de demander un dépouillement complexe et de donner la composante radiale et tangentielle en des points différents du plan, ce qui impose des interpolations supplémentaires pour avoir le vecteur vitesse en chaque point du plan à chaque instant. Ce sont des mesures de surface; leur comparaison avec les résultats des modèles montre que le procédé est valable et encourage le montage de nouvelles expériences.

L'ensemble de ces mesures a permis de confirmer les résultats obtenus sur le modèle réduit de la Manche construit sur la plaque tournante de Grenoble (Chabert d'Hières et Le Provost, 1979). Elles ont également permis de contrôler les modèles numériques conçus par C. Le Provost et J.C. Salomon, dont les conditions aux limites ont été précisées par les résultats du modèle physique.

On a donc là des outils capables de donner des solutions précises des courants de marée en Baie de Seine.

# 1. CARACTERISTIQUES DES DEPLACEMENTS DES MASSES D'EAU A MOYEN ET LONG TERME.

Le calcul et la prédiction des dérives de masses d'eau à une échelle des temps supérieure à la marée est un problème du second ordre. Elles sont petites par rapport au courant de marée et du même ordre de grandeur que l'amplitude de ses instabilités. Leur détermination reste donc un problème difficile.

Comment tout d'abord caractériser ces déplacements de masse d'eau ? On appelle courant résiduel, le courant qui subsiste lorsque l'on retranche des courants mesurés, le courant engendré par la marée astronomique et radiationnelle, c'est-à-dire la marée dont l'image peut être une superposition de composantes sinusoïdales. On extrait donc, des signaux mesurés, toutes les composantes dont les fréquences sont issues du spectre de marée; le reste est le courant résiduel. Il est composé des courants permanents provoqués par la marée elle-même, par l'intermédiaire des phénomènes non linéaires dus à l'inertie (petits fonds) et aux frottements. Il est aussi composé des courants dus au vent local, des courants parcourant toute la Manche, des courants dus aux variations du niveau moyen le long de la limite ouverte de la baie de Seine: chacune de ces dernières causes motrices provoque un champ de courant bien particulier et chacun de ces champs, pris isolément a une forte interaction avec la marée. Aucun ne peut donc être étudié indépendamment de la marée, mais chacun d'eux peut être étudié indépendamment des autres, car on peut supposer qu'ils n'ont pas d'interaction entre eux.

Les modèles ont jusqu'à présent négligé l'action générale des conditions



météorologiques. Ils n'en ont donné que des réponses particulières; ainsi, le modèle tridimensionnel de B. Thouvenin et J.C. Salomon utilisé par P. Le Hir s'est limité à des vents locaux. Il est donc difficile d'en extraire des résultats statistiques valables. Il donne toutefois une précieuse indication sur l'ordre de grandeur des courants superficiels et montre la grande complexité des champs de courants, lesquels présentent notamment une distribution au fond très différente de celle de surface. Ce modèle mériterait d'être appliqué avec plus de précision à des situations météorologiques réelles.

Par contre, les modèles qui ont calculé les champs résiduels dûs aux autres causes (marées, distribution du niveau moyen le long de la limite ouverte, avec bien entendu la meilleure distribution du frottement, de l'effet des côtes et des fonds) donnent des résultats dignes de confiance.

On doit insister sur deux difficultés de natures différentes: l'une, liée à la définition des courants moyens, et l'autre à l'application des conditions aux limites.

### 1.1. Définition des courants de dérive

En matière de courant moyen, les notions peuvent être très variées, suivant la façon dont on prend les moyennes et la durée sur laquelle elles portent.

Tout d'abord, il faut bien voir qu'en général on parle de courant intégré sur toute la hauteur de l'eau, c'est-à-dire qu'à chaque instant, on définit la vitesse moyenne au point  $(x, y)$  comme étant la valeur

$$\frac{1}{h} \int_0^h V(x, y, z, t) dz$$

ou le débit par unité de surface

$$q = \int_0^{h+\zeta} V(x, y, z, t) dz$$

$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$ 

$h = \text{profondeur moyenne}$   
 $\zeta = \text{dénivellation de marée}$

On peut déduire de ce débit une vitesse intégrée sur la hauteur, en le divisant par la hauteur totale à chaque instant.

Nous utiliserons aussi dans certains cas la notion de courant de fond et de courant de surface. Il s'agit des mêmes notions que précédemment, mais intégrées sur des hauteurs de quelques mètres seulement à partir du fond ou de la surface, sans que cette notion n'ait reçu pour l'instant de définition plus précise.

Les courants qui en résultent sont noyés dans le va-et-vient continu des courants de marée qui oscillent suivant la superposition de mouvements sinusoïdaux de périodes différentes. Il en résulte une modulation journalière, semi-mensuelle, saisonnière et des variations aléatoires dues aux tempêtes, aux crues exceptionnelles des fleuves et à la turbulence.

Le choix de l'échelle des temps pour exécuter les moyennes est donc délicat. On peut la prendre d'un ordre de grandeur égal au temps de résidence des masses d'eau dans la baie. Cette définition, prise dans la communication de Le Hir, Salomon *et al.* (ce colloque) n'est pas parfaite, mais elle conduit à une durée de l'ordre de un à deux mois, c'est-à-dire deux à quatre cycles semi-mensuels de marée.

Les mesures de ces vitesses en un point  $(x, y)$  conduisent au champ eulérien de vitesse moyenne et il convient ici de montrer la notion qui le sépare du champ lagrangien des vitesses qui animent le déplacement à long terme de flotteurs et donc des masses d'eau.

L'écoulement instantané n'est pas uniforme en plan: la trajectoire d'une colonne d'eau que l'on suppose rester verticale ne peut être confondue ni avec

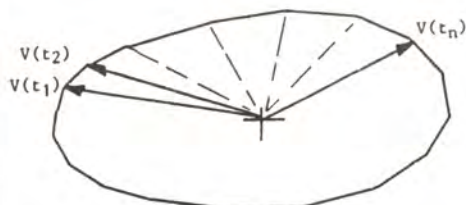


Fig. 1a.- rose de courant

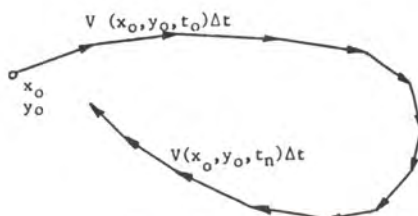


Fig. 1b.- : trajectoire eulérienne  
hodographe intégré  
"progressive vector  
diagram".

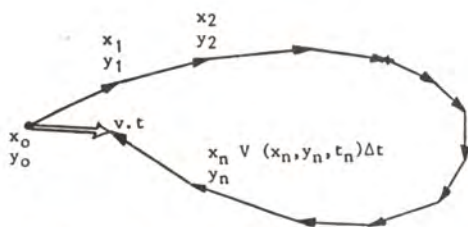


Fig. 1c.- trajectoire approchée  
(lagrangienne)

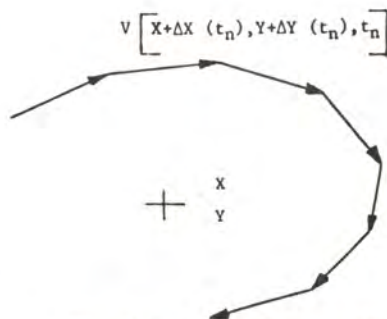


Fig. 1d.- trajectoire approchée  
en variables de Miche  
(lagrangienne).

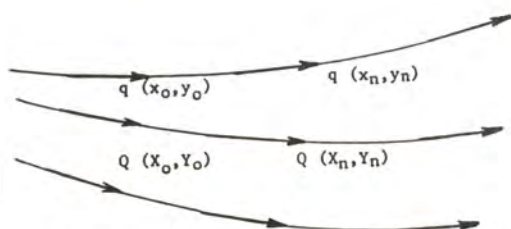


Fig. 1e.- Débit en variables d'Euler et de Miche

Figure 1.- Diverses images représentatives du déplacement des masses d'eau



les lignes de courant du champ eulérien précédent, ni avec les trajectoires intégrées à partir des vitesses mesurées ou calculées en un point.

Revenons sur ces notions: en un point fixe  $(x_0, y_0)$ , on peut mesurer successivement les vitesses instantanées  $V(x_0, y_0, t_n)$ ; à chaque instant, on peut donc tracer en  $(x_0, y_0)$  les valeurs  $V(t_1)$ ,  $V(t_2)$ ,  $V(t_n)$ . Le lieu des extrémités de ces vecteurs décrit l'hodographe au point  $(x_0, y_0)$  et si le mouvement est périodique, cette courbe est fermée et s'appelle "rose de courant" (fig. 1a). Si maintenant du même point  $(x_0, y_0)$  (fig. 1b) on trace bout à bout les vecteurs  $V(x_0, y_0, t_1) \Delta t$ ,  $V(x_0, y_0, t_2) \Delta t$ ,  $V(x_0, y_0, t_n) \Delta t$  etc..., on obtient au bout d'une période ou d'une pseudo-période une trajectoire eulérienne ou hodographe intégré ou un "progressive vector diagram"; notion souvent employée par les océanographes.

En fait, à cause de la non uniformité des vitesses, cette trajectoire est encore très différente de celle d'un flotteur ou d'une particule d'eau individualisée. On trouve en effet un résultat très différent (fig. 1c), si on porte bout à bout les vecteurs  $V(x_0, y_0, t_0) \Delta T$ ,  $V(x_1, y_1, t_1) \Delta t$  etc...  $V(x_n, y_n, t_n) \Delta t$ ;  $t_n$  étant l'instant où la particule passe au point  $(x_n, y_n)$ . On décrit ainsi une trajectoire beaucoup plus proche de la trajectoire réelle. Il ne subsiste que les erreurs dues à la discrétisation du calcul d'intégration. Ces trajectoires sont dites lagrangiennes. Le parcours exécuté par le flotteur au bout d'une ou plusieurs périodes ou pseudo-périodes de marée, permet de définir ainsi la vitesse ( $v$ ) lagrangienne en divisant l'espace parcouru par le temps. Il est à noter que le déplacement au cours d'un temps donné  $T$  est fonction de l'instant initial  $t_p$ ; c'est ainsi que J.C. Salomon (ce colloque) a illustré le fait, qu'en vive eau par exemple, les vitesses lagrangiennes ne sont pas les mêmes si on les calcule en partant du début du flot ou du début du jusant.

Ceci peut se voir de façon plus évidente en faisant appel à la notion de coordonnées moyennes de particules introduites par Miche (1944) pour décrire les mouvements orbitaux de houle. Chaque particule (fig. 1d) gravite en effet au cours d'une période de marée autour d'une position moyenne dont on appellera les coordonnées  $(X, Y)$  et si on applique le déplacement lagrangien défini précédemment à une particule fictive placée en  $(X, Y)$ , on obtient, en variables de Miche, un courant de particules indépendant de l'instant initial de lâcher. Ce champ de courant permet de définir en chaque point  $(X, Y)$  un débit moyen de particules  $Q(X, Y)$  (fig. 1e). Ce champ de courant moyen de particules, s'il est régulier, doit être, à cause de l'incompressibilité et de la continuité du fluide, aux erreurs de calcul près, égal au champ de débit  $q(x, y)$  eulérien défini plus haut.

## 1.2. Conditions à la limite

La deuxième difficulté réside dans la prise en compte exacte des conditions aux limites ouvertes.

Les techniques employées actuellement ont bien fait leur preuve et ont montré de nombreuses fois que la connaissance, à chaque instant, des dénivellations le long de la limite, permet de bien calculer les champs instantanés de courant de marée. Il en va tout autrement semble-t-il pour les courants résiduels. Il suffit en effet, par exemple, d'une faible erreur sur le déphasage des dénivellations entre les deux points voisins de la limite, pour imposer un débit moyen entrant ou sortant au voisinage de ces points. Il en est de même pour une erreur sur la distribution du niveau moyen de la marée le long de la limite. Or, ces courants résiduels légèrement erronés introduits à la limite peuvent influencer sur le champ de courant résiduel à l'intérieur du domaine.



On peut montrer cette même difficulté d'une autre façon : le calcul ne prend en compte, le long de la limite ouverte, que des dénivellations. On voit par ailleurs que dans le domaine, celles-ci sont chargées de composantes harmoniques; et la ligne Barfleur-Antifer passe dans le voisinage des points nodaux des amphidromies que constituent ces composantes ( $M_4$  ou  $M_6$ ). A cet endroit, l'amplitude de ces composantes est faible, une faible erreur sur leur amplitude va entraîner une erreur plus importante relativement à la marée  $M_2$ , sur la valeur de ces composantes à l'intérieur du domaine, ainsi que celle des ondes d'interaction. Les courants moyens peuvent être affectés par ces erreurs.

Il faut d'ailleurs se souvenir que l'intensité de ces courants résiduels est du même ordre de grandeur que celle des erreurs que l'on constate dans la mesure des champs de courants instantanés (2 à 5 cm/s). Il faut donc que la distribution des roses de courants données par les modèles soient très représentatives des courants naturels pour que les résultats sur les courants résiduels soient exacts. On voit donc par là qu'il n'est pas étonnant de constater des écarts importants entre les résultats de modèles d'auteurs différents. Et les résultats d'un modèle local ne peuvent être adaptés que s'ils sont confirmés par ceux d'un modèle de plus grande emprise évitant ces difficultés de limites.

Quoi qu'il en soit, l'ensemble des modèles et des mesures a donné les grandes caractéristiques de courants résiduels en Baie de Seine.

## 2. RESULTATS : CIRCULATIONS EN BAIE DE SEINE

### 2.1. Description générale et succincte des marées dans la baie de Seine :

Le marnage croît de 25% lorsque l'on se déplace d'ouest en est depuis Barfleur jusqu'au Havre. La marée se charge d'harmoniques: les composantes  $M_4$  et  $M_6$  croissent d'ouest en est plus vite que l'amplitude de la marée elle-même. Par contre, l'intensité maximale des courants diminue d'ouest en est. Elle varie très vite de 1,8 m/s à 0,8 m/s lorsqu'on s'éloigne de Barfleur, puis graduellement de 0,8 à 0,5 m/s lorsqu'on va du milieu à l'est de la baie. Vers l'est le courant de flot l'emporte sur le courant de jusant, mais il dure moins longtemps.

Nous rappelons maintenant les principaux résultats obtenus après la confrontation de l'ensemble des recherches.

### 2.2. Résultats généraux :

Les mesures nature donnent des résultats cohérents capables de déboucher sur une prédiction valable des courants à chaque instant omettant les effets météorologiques, les gradients de densité et les détails des indentures de la côte.

Les modèles bidimensionnels représentent très convenablement, à la précision des mesures près, les champs instantanés des courants de marée. Ils permettent donc une très bonne interpolation entre les mesures précédentes.

Les modèles tridimensionnels montrent des divergences intéressantes entre les courants de fond, dans la masse et en surface. Les champs de vitesse dûs au vent donnent des indications précieuses sur les ordres de grandeur des courants qui en résultent. On a pu voir que le temps de résidence moyen correspondant au courant résiduel est de quelques semaines à quelques mois. Par contre, des situations de vent particulières le réduisent à quelques jours. Les eaux de la baie de Seine orientale seraient ainsi balayées par



une tempête. Mais ces eaux peuvent revenir après. L'influence réelle des conditions météorologiques sur le temps de résidence reste à étudier. Les champs de vitesse dus à la circulation haline sont parfaitement conformes à la notion qu'on pouvait s'en faire *a priori*. Mais les calculs numériques ont permis de les reproduire et les mesures nature ont permis de les connaître en quelques points.

### 2.3. Circulations :

Quant au schéma de circulation moyenne, un certain nombre de traits généraux sont dégagés (fig. 6) de la communication de Le Hir, Salomon *et al.*).

Une grande circulation anticyclonique bidimensionnelle déplace les masses d'eau dans une zone de 60 km de diamètre environ centrée à 30 km à l'est de Barfleur. Elle fait entrer les masses d'eau vers le tiers ou le milieu de la ligne Barfleur-Antifer et les fait ressortir près de Barfleur. Il est même probable que les eaux de cette partie de la baie soient recyclées plusieurs fois. Cette circulation semble établie puisque répondant à un effet vraisemblable de la pointe de Barfleur sur les frottements latéraux, les modèles à grande échelle physiques et numériques, le modèle de la baie de Seine, les mesures eulériennes *in situ* et les photos satellites, la font ressortir. Seuls la dimension et l'intensité de ce tourbillon sont imprécis et animent encore quelques discussions parmi les hydrodynamiciens.

Le tourbillon anticyclonique de Barfleur repousse la circulation générale en Manche vers le nord, de telle sorte que la part principale des eaux ayant baigné la côte nord du Cotentin se dirige vers le nord-est.

Il existe des entrées et des sorties près d'Antifer. Le modèle de la baie de Seine a montré à cet endroit également un tourbillon anticyclonique. Mais des mesures sur le modèle physique ont montré une composante sud-nord du déplacement des masses d'eau le long de la côte, repoussant un peu plus à l'ouest ce tourbillon anticyclonique. Les modèles à grande emprise montrent dans cette zone un courant quasi uniforme nord-sud. Mais la maille est trop grande pour permettre de déceler une structure aussi restreinte. Il peut y avoir le long de la limite Barfleur-Antifer un défaut du modèle de la baie de Seine qui nous interdit d'affirmer la place exacte de ce tourbillon anticyclonique : il nous semble qu'il peut se situer un peu plus au large, laissant la place à une échappée vers le nord des masses d'eau collées à la côte du Pays de Caux. Ce dernier courant côtier serait en bon accord avec les observations des sédimentologues et des biologistes. Dupont *et al.* trouvent que, au nord de la zone de dépôts de dragage d'Octeville, les matières organiques en suspension viennent du nord. Il peut s'agir là d'un phénomène dû à la dispersion. Thomas, par contre, à l'aide d'images satellitaires, montre que, par temps calme et en période de crue, les eaux turbides de la Seine longent la côte vers le nord, puis le nord-est. Les vents sud et sud-ouest viennent renforcer en surface ce courant côtier. Mais il n'est pas évident qu'il en soit de même au fond.

Des circulations anticycloniques peu intenses existent près de la côte du Calvados, au nord de Caen, d'Arromanches et de Grandcamp. Elles engendrent un courant côtier moyen dirigé vers l'ouest. On en trouve une explication dans le texte de Salomon. Il en résulte des veines de courant sud-nord évidemment extrêmement importantes pour les problèmes de décontamination de la côte. Le modèle physique a aussi montré des courants portant vers le nord à partir de cette même côte suivant des veines bien délimitées. Mais il serait souhaitable de préciser ce phénomène par des études spécialisées et si possible par des mesures nature, car le phénomène de pompage d'Ekman s'oppose à ce schéma.

#### 2.4. Remarques sur l'effet de dispersion côtière :

A ce point, nous devons rappeler l'action extrêmement importante que peut avoir la dispersion turbulente sur la migration le long de la côte des éléments marqués, et noter que la migration des particules d'eau marquées, celles des particules dissoutes et le charriage sont des grandeurs différentes dont l'interdépendance n'est pas déterminée a priori.

A titre d'exemple, une source de contaminant placée à la côte, en présence d'un courant alternatif de marée superposé à un courant côtier dirigé vers l'ouest, marquera les sédiments à l'est par simple phénomène de dispersion. Et ceci peut être très important près de la côte car c'est à cet endroit que les gradients de vitesse sont les plus forts, c'est-à-dire que les masses d'eau voisines à un instant donné se séparent le plus. C'est là aussi que l'agitation turbulente et la houle peuvent remettre en suspension le plus de particules, et les disperser à cause des gradients cités précédemment.

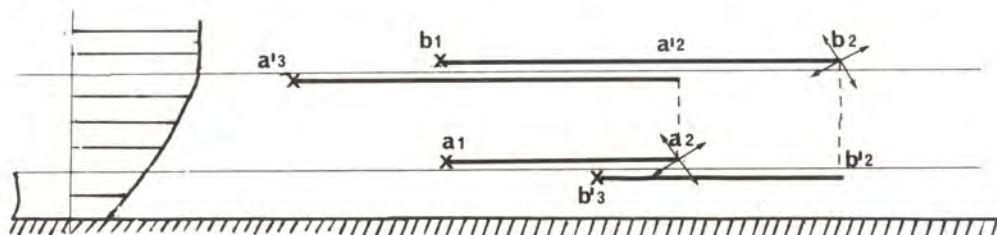


Fig. 2.- Schéma de dispersion côtière.

La figure 2 montre comment les particules a et b se déplaçant au cours d'une demi-excursion de marée se dispersent avec des possibilités d'échange de trajectoire; certains de leurs éléments peuvent ainsi venir en a'2 et b'2, et se retrouver après la demi-excursion suivante en a'3 et b'3, avec un écart très grand par rapport à l'écart initial. On peut expliquer par là une migration rapide des éléments le long d'une côte et même un déplacement du marqueur en sens inverse du courant lorsque la côte est irrégulière à l'échelle des excursions des particules dues à la marée.

Il faut rajouter que les particules fines fixent relativement plus les substances que les grosses. Elles sont tenues en suspension dans des zones plus éloignées. Par conséquent, le transport moyen et dispersif de certains éléments peut se trouver accru à une certaine distance de la côte. C'est là peut-être l'explication de la concentration d'activités dans la zone des 13 mètres de fond signalée par Le Gal et décrite dans le texte de Crevel. Ce phénomène peut même affecter le courant côtier du Calvados trouvé par Salomon. Il avait été observé sur le modèle physique et certaines données physico-chimiques le montrent aussi.

#### 2.5. Circulation haline :

Une circulation haline différentielle entre le fond et la surface, provoquée par la salure des eaux de la Seine existe à l'ouvert de l'estuaire de la Seine. Quelques mesures et de nombreuses études sur modèles, montrent ce phénomène. La direction de cet écoulement peut être fortement influencée par la rotation terrestre. Il serait souhaitable d'entreprendre des études détaillées des flux respectifs de ces courants en fonction du débit de la Seine et des courants de marée.



## 2.6. Incertitudes :

La dérive vers l'est des masses d'eau le long de la limite Barfleur-Antifer n'est montrée directement par aucune mesure *in situ*. Elle fait partie de la dérive générale des masses d'eau en Manche. Il nous semble toutefois que les courants donnés sur la fig. 6 de Le Hir, Salomon *et al.* sont trop forts et sont le résultat d'un effet de limite du modèle de la baie de Seine.

Les eaux de la Seine, ayant tendance à rester en surface, sortent principalement par le nord, mais la totalité du flux n'est pas collée à la côte. Une mesure de courant eulérienne montre une forte évansion des masses d'eau au nord d'Ouistreham, sur la ligne Barfleur-Antifer. Enfin des mesures de salinités montrent aussi qu'à certaines époques, des masses d'eau de la Seine vont vers l'ouest. Le champ de dérives résiduelles est donc à réétudier avec des modèles plus fins et de plus grande emprise pour déterminer les flux dans la région d'Antifer. Des modèles tridimensionnels locaux sont à mettre en oeuvre en de nombreuses circonstances.

## 3.- CONCLUSION

La recherche du déplacement des masses d'eau à l'échelle de quelques semaines ou mois a fait des progrès considérables vers une solution complexe mais cohérente. Les études méritent d'être poursuivies afin de mieux déterminer le devenir des eaux de la Seine, les zones d'entrée dans la baie, les courants côtiers et leur recirculation au large.

De nouvelles mesures *in situ*, et notamment des suivis de flotteurs lagrangiens, sont souhaitables. Mais là de nombreuses expériences seront probablement nécessaires. L'analyse de leur trajectoire compliquera sans doute la réponse au problème des courants résiduels. Ils seront tributaires des courants de marée de circulation haline et du vent, mais aussi de la dispersion turbulente. Il faudra prendre en considération les effets de la durée et des débits des crues de la Seine, mais aussi tenir compte des années sèches et des années humides puisque les débits moyens peuvent varier de 400 à 600 m<sup>3</sup>/s. On a pu déplorer, lors de ce travail, l'absence de la mesure détaillée de l'impact de la houle. On prépare la correction de cette lacune, mais il faudra prendre en compte la forte interaction de la houle et du courant, et de sa résultante sur le fond, qui est sans doute nettement orientée. On a cherché des schémas de circulation moyenne, mais il faut toujours avoir présent à l'esprit que, vis-à-vis de certaines disciplines, les transports en situation exceptionnelle sont souvent prépondérants. Les sédimentologues le savent bien. Les modèles météorologiques sont donc à développer.

On pourrait en définitive séparer la baie de Seine en deux zones :

- l'une où les phénomènes à long terme l'emportent, c'est la partie ouest et le centre, où l'on trouvera les courants intéressant le transport de marqueurs dissous,

- l'autre constituée par les zones côtières et par la partie est de la baie, où les accidents météorologiques, les houles venant du large et les crues de la Seine, l'emportent. Là, un travail d'analyse quantitative reste à faire.

---

Chabert d'Hières G. & Le Provost C., (1979). - Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. *Ann. Hydrog.*, vol. 6, Fasc. 3, pp. 5-36.

Miche M. (1944). - Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. *Ann. Ponts et Chauss.*, 114<sup>e</sup> année, pp. 25-61.

## OBSERVATIONS DE COURANT EN BAIE DE SEINE.

LE HIR P. \*, L'YAVANC J. \*.

### 1. INTRODUCTION

Les mesures de courant demeurent un outil d'investigation indispensable pour l'étude courantologique d'un secteur donné : non seulement elles constituent une vérification, voire un moyen de réglage de modèles mathématique ou physique, mais surtout elles permettent une évaluation des différentes composantes de vitesse et de leur variabilité temporelle ou spatiale (dans les trois dimensions).

Pour la Baie de Seine, d'anciennes mesures de courant en surface fournissaient une information assez complète de l'évolution du courant au cours de la marée (SHOM, 1974). Cependant ces données ne rendaient pas compte d'un éventuel gradient vertical et les informations près du fond - si utiles au sédimentologue ou au benthologue - faisaient défaut. De plus, les mesures disponibles étaient de trop courte durée pour permettre une évaluation des courants moyens susceptibles d'entraîner les masses d'eau pendant des temps assez longs.

Pour combler ces lacunes, il a été décidé de procéder à des mesures de courant de longue durée dont l'analyse, jointe à l'utilisation de modèles numériques devait conduire à la présentation schématique de la circulation instantanée et résiduelle qui anime la baie de Seine.

### 2. LES CAMPAGNES DE MESURE

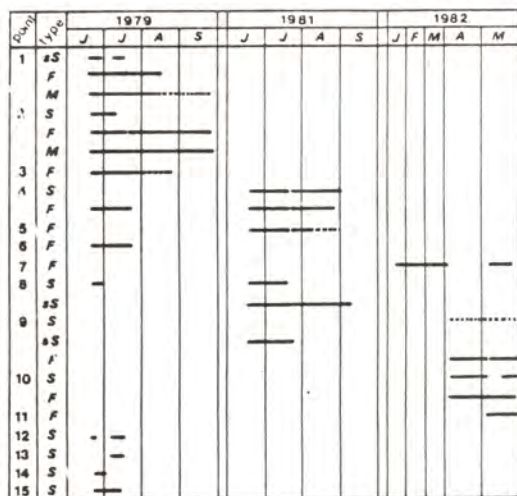
De 1979 à 1982, 3 campagnes de mesures courantométriques ont été organisées (figure 1a). La première a fait l'objet d'une collaboration entre le Centre National pour l'Exploitation des Océans, le Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine et l'Université de Bretagne Occidentale.

Toutes les mesures furent réalisées en des points fixes (mesures eulériennes) à l'aide de courantomètres mouillés. Trois sortes de mouillages ont été mis en oeuvre (figure 1b et L'Yavanc et Kerdreux, 1983) :

- des mouillages de surface comportant un appareil suspendu à une structure flottante reliée de manière simple à une bouée de marquage ; les courantomètres électromécaniques utilisés étaient du type Mécaboliér (pour 1979) ou V.A.C.M. Suber (pour 1979, 1981 et 1982), ces derniers offrant l'avantage d'enregistrer des moyennes vectorielles et d'être moins sensibles à l'agitation de surface,
- des mouillages subsurface comportant un courantomètre suspendu à un flotteur relié au fond,

\* Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer - B.P. 337 - 29273 BREST CEDEX.

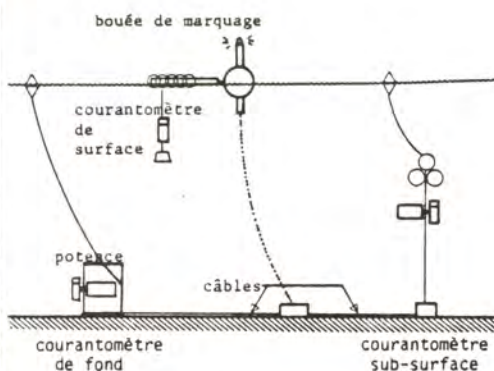




TYPES DE MOUILLAGES  
 S surface  
 SS sub-surface  
 F fond  
 M marégraphe

Les positions des points sont indiquées sur la figure 3

a) DATES DES MOUILLAGES



b) SCHEMAS DE MOUILLAGES

Fig. 1 : Présentation des campagnes de mesures

- des mouillages de fond pour lesquels l'appareil, solidaire d'une structure posée sur le fond, garde une position fixe, ce qui améliore la qualité des mesures.

Pour les mouillages fond et subsurface, des courantomètres à rotor Aanderaa ont été employés.

Le choix des durées de mesures résulte d'un compromis entre les possibilités logistiques (bateaux, plongeurs) et la nécessité d'entretien des appareils (à cause du fouling), sachant que si l'on s'intéresse aux circulations moyennes, un enregistrement n'est jamais trop long. La période retenue, un mois en moyenne, permettait en outre de faire une analyse harmonique fine des mesures (cf. § 3). La durée totale de chaque campagne était de 3 mois environ, et à deux exceptions près, il n'y a pas eu de mesure en automne ou en hiver.

#### Remarques sur la présentation des mesures

Dans leur grande majorité les mesures ont été corrigées en fonction d'un étalonnage récent des appareils, en direction et en intensité. L'expérience montre que ces corrections modifient peu les résultats et qu'en particulier les valeurs résiduelles (cf. § 4) y sont peu sensibles, sans doute en raison d'une "compensation" partielle des erreurs pendant le flot et le jusant.

Il est important de rappeler la grande variabilité que présentent les enregistrements de courant, comme l'illustre la figure 2 ci-contre. En particulier on observe que même des vents faibles (< 10 noeuds) sont susceptibles de modifier notablement le courant de surface.

Les mesures de fond étant réalisées à 1.5 m du fond en général, il serait

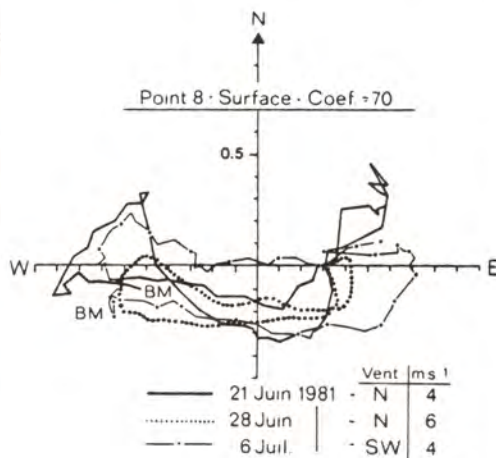


Fig. 2. Hodographes de vitesses au pt. 8

nécessaire de les corriger d'un facteur voisin de 1,4 avant toute comparaison avec les mesures de mi-profondeur ou de surface, si l'on suppose que le profil de vitesse suit une loi logarithmique classique avec longueur de rugosité de 1 cm.

### 3. LE COURANT DE MAREE

Compte tenu de l'ouverture de la baie de Seine sur la Manche, l'onde de marée constitue un phénomène majeur et est marquée par une déformation progressive de l'Ouest vers l'Est engendrée par la topographie locale.

#### 3.1. Vue synoptique des courants de marée

Les hodographes des vitesses présentés sur la figure 3 ont été sélectionnés en

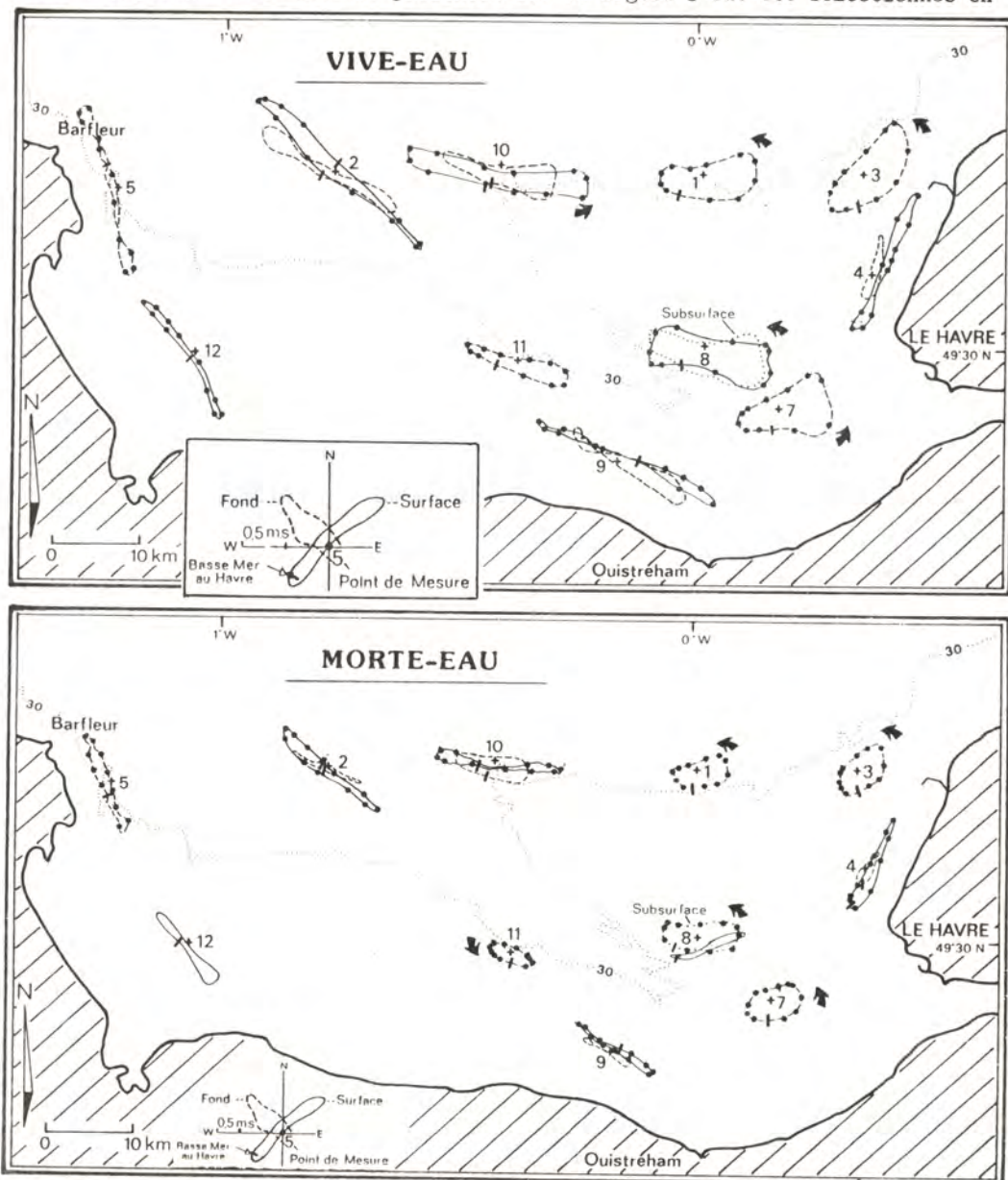


Fig. 3. Roses de courants en Baie de Seine (un point pour chaque valeur horaire).



fonction de conditions météorologiques calmes, et par conséquent illustrent le courant de marée pour une morte-eau moyenne (coef. 45) et une vive eau moyenne (coef. 95). On observe des courants alternatifs à l'Ouest, d'amplitude  $1,4 \text{ m.s}^{-1}$  en vive eau, qui diminuent légèrement lorsque l'on approche le côté Est (de l'ordre de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ). Simultanément, une dissymétrie entre le flot et le jusant apparaît et s'amplifie pour atteindre un rapport 1,3 devant l'estuaire de la Seine ; corrélativement le flot dure alors moins longtemps. De plus, le courant devient giratoire, en particulier durant le flot (Ce phénomène est dû au voisinage de l'estuaire de la Seine : en début de flot les courants convergent vers l'embouchure de la rivière pour remplir l'estuaire ; par la suite le courant est dévié vers le nord-est (courant de Verhaule) jusqu'à la fin du flot). En morte-eau les ellipses de courant sont similaires avec des vitesses environ deux fois plus faibles.

Les excursions des particules d'eau au cours d'une marée, déduites de ces mesures sont de l'ordre de 16 km au Nord de la baie (pt. 10) et diminuent vers le Sud-Est (11 km au pt. 8).

### 3.2. Prédiction des courants de marée

La durée relativement longue des enregistrements de courant a permis d'en faire une analyse harmonique afin d'évaluer les amplitudes et phases des différentes composantes de marée. Une méthode d'analyse comportant des replis d'ondes secondaires sur des ondes porteuses de fréquences voisines a été spécialement mise au point pour des enregistrements de 30 jours minimum (Bertherat, Carcel et le Provost, 1981). Il devient alors possible de prédire le courant de marée avec une bonne précision, comme le montre la figure 4.

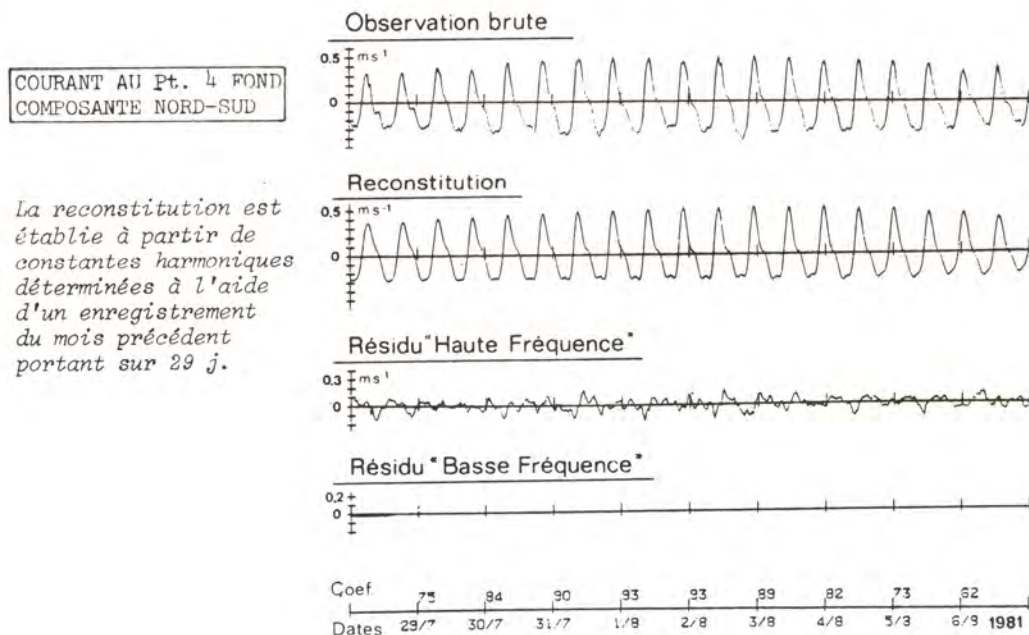


Fig. 4 : Comparaison entre courant prédit et courant mesuré (d'après LE PROVOST et RABATEL, 1984)

#### 4. VITESSES RESIDUELLES

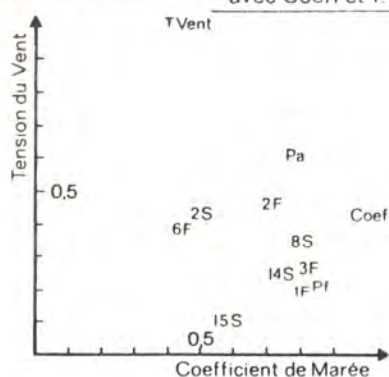
La notion de circulation résiduelle est précisée dans un autre article du présent recueil. En ce qui concerne les mesures de courant eulériennes, on s'est intéressé aux vitesses résultant d'un filtrage des fréquences inférieures à 1 jour. Pour cela les enregistrements de courant ont été lissés à l'aide d'un filtre numérique mis au point par Demerliac (1973) pour la détermination du niveau moyen : il est spécialement conçu pour éliminer les composantes de marée jusqu'aux périodes diurnes.

##### 4.1. Analyse en composantes principales (A.C.P.)

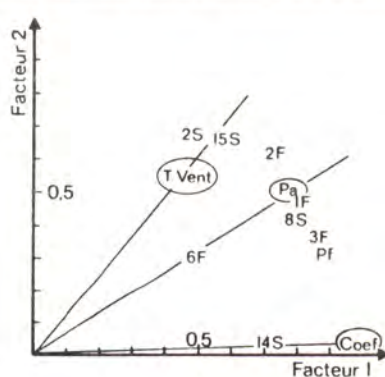
Pour essayer de dégager certaines tendances des courants résiduels un certain nombre d'A.C.P. complexes ont été réalisées. Les données sont réparties selon une matrice variable/stations où les variables sont des vecteurs représentant les courants résiduels (i.e. filtrés), la météorologie (vent et pression atmosphérique) et la marée (par le coefficient) et où les stations sont des instants de mesure. La technique consiste à calculer la matrice hermitienne des corrélations empiriques entre les variables vectorielles ( $A_{ij} = \sum u_i^* \cdot u_j / (\sqrt{\sum u_i^* \cdot u_i} \cdot \sqrt{\sum u_j^* \cdot u_j})$ ), les sommes étant effectuées sur toutes les stations), à la diagonaliser pour en extraire des vecteurs propres rangés par valeurs propres décroissantes et à calculer les coordonnées des variables sur les axes factoriels définis par ces vecteurs propres. Ce calcul a été réalisé à l'aide d'un programme d'analyse multispectrale (Laurec, 1979).

La figure 5 présente un exemple de résultats obtenus pour une série de variables assez nombreuses mais malheureusement trop courtes pour que les interprétations

a) Modules des Coefficients de Corrélation avec Coeff et T.Vent



b) ACP Modules des Saturations complexes



c) ACP Saturations complexes des Variables

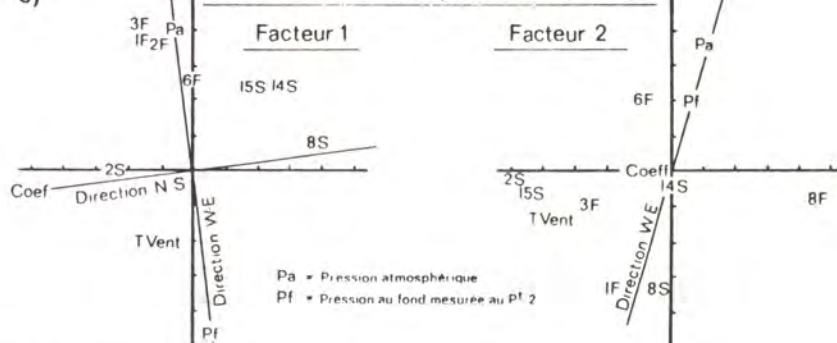


Fig. 5 : Analyse de corrélation - mesures du 24-6 au 3-7-1979



qui suivent puissent être "garanties" (le filtrage réduit l'échantillonnage à 1 jour environ).

On observe dans le plan factoriel 1-2, (Fig. 5b), un étalement des variables entre les paramètres coefficient de marée-pression atmosphérique-tension du vent. Pourtant il n'y a aucune structure évidente des corrélations entre ces variables et le coefficient du vent (fig. 5a) sans doute parce que le vent et la marée ne sont pas indépendants (pour la série considérée). Au contraire l'A.C.P. montre que le courant de surface aux points 2 et 15 sont "près" du vent - ce qui est naturel - alors que le point 14 suit mieux le coefficient de marée. Le courant de fond en 2 semble quant à lui "influencé" par le vent et la pression près du fond, elle même corrélée au coefficient de marée. Ce sont là des manifestations de phénomènes résiduels induits par la marée qui sont décrits plus loin. Pour d'autres séries, l'A.C.P. indique aussi un effet de la marée sur le courant au point 10.

L'examen des projections des variables (saturation) sur les axes factoriels (avec parties réelle et imaginaire) est intéressant car il indique les angles formés par les variations des vecteurs-variables relativement à un facteur donné. L'orientation des axes de représentation de ces saturations complexes, quelconque a priori, a pu être déterminée grâce à l'orientation arbitraire des variables scalaires selon des directions géographiques privilégiées : ainsi le coefficient de marée a été choisi comme une variable orientée Est-Ouest tandis que la pression atmosphérique était "dirigée" Nord-Sud. On voit alors qu'en ce qui concerne le courant résiduel au point 8 surface, les variations relatives à l'axe 1, caractéristique de la marée puisque le module de la saturation du coefficient est grand, sont dirigées Nord-Sud tandis que les variations relatives à l'axe 2, caractéristique de la météorologie, sont orientées Est-Ouest. La remarque inverse pourrait être faite pour le courant de fond au point 2.

Les A.C.P. permettent donc de mettre en évidence les influences de certains phénomènes sur la circulation résiduelle et d'orienter ces influences. De plus elles permettent parfois de sectoriser le champ des variables (mais dans le cas ci-dessus, la séparation entre points situés à l'Est ou à l'Ouest de la baie, que l'on peut observer sur le plan factoriel (1,2), semble fortuite).

#### 4.2. Description schématique de la circulation résiduelle

La figure 6 présente une carte des vitesses résiduelles moyennes pour l'ensemble des mesures. On note des différences souvent importantes entre les valeurs au fond et en surface : il s'agit alors d'effets résiduels induits par le vent ou les gradients de densité. On peut découper la baie de Seine en deux moitiés au fonctionnement bien individualisé :

##### a) la baie de Seine Occidentale

Les vitesses de surface et de fond n'y sont pas très différentes. Tous les enregistrements mettent en évidence un tourbillon anticyclonique centré au Nord/Nord-Ouest du point de mesure n° 2. La nature de ce tourbillon sera précisée au § 4-3.

##### b) La baie de Seine Orientale

Marquée par l'estuaire de la Seine, cette région a une structure hydrologique plus complexe : les gradients horizontaux de densité y sont importants et entraînent un courant inversé en surface et en profondeur, dirigé au fond vers les zones moins denses (Salomon, 1985 ; Le Hir et al, 1985). Compte tenu de la disposition concentrique des isopycnes en baie de Seine orientale, les courants de densité doivent donc avoir une allure convergente au fond et divergente en surface. Cette configuration, que l'on peut rapprocher d'une situation estuarienne, est confirmée par les mesures au fond (cf. figure 3). Les vitesses sont comprises entre 2 et 5 cm/s, sauf au point 7, où elles atteignent 7 cm/s (cf. fig. 8b) : c'est le point le plus près de l'estuaire où les gradients sont plus élevés ;

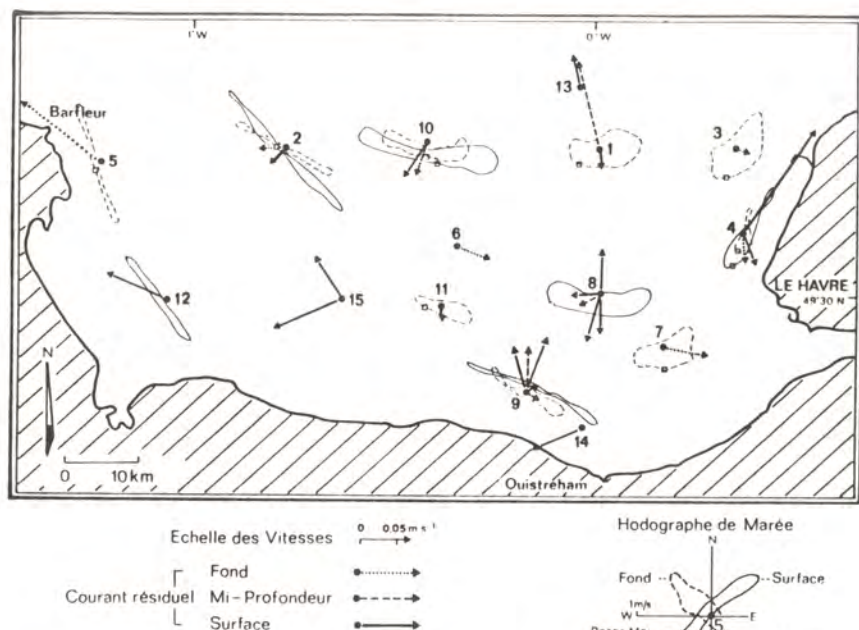


Fig. 6 : Courants moyens mesurés en Baie de Seine.

c'est aussi la seule mesure d'hiver où le débit fluvial est plus grand. En surface la situation est moins claire : le vent y est plus sensible qu'en baie de Seine occidentale en raison de l'exposition du secteur aux vents dominants, mais aussi des accélérations locales dues à la topographie du fond (Le Hir et al, 1985).

#### 4.3. Le tourbillon résiduel de Barfleur

En raison de la quasi stationnarité du champ de courant en baie de Seine occidentales vitesses résiduelles de marée en morte-eau et en vive-eau ont pu être déterminées. La figure 7 met en évidence un tourbillon résiduel de marée lié à la presqu'île du Cotentin qui se présente comme un épi perpendiculaire à la circulation alternative de la marée en Manche. De tels tourbillons ont souvent été observés (Zimmerman, 1981) : ils proviennent d'un excès de vorticité créée par le frottement latéral pendant la période de flot où le secteur considéré est à l'abri. Selon la figure 7, le tourbillon serait centré au nord du point 2 : son rayon serait environ 30 km et la vorticité de l'ordre de  $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  en vive eau. En morte-eau, le tourbillon semble plus grand avec une vorticité beaucoup plus faible. Ce tourbillon résiduel de marée est comparable à celui de la presqu' le de Portland, en Manche lui aussi (Pingree, 1978).

#### 4.4. Effet du vent

Un examen rapide des évolutions simultanées du vent et du courant résiduel fait ressortir d'importantes variations de courant

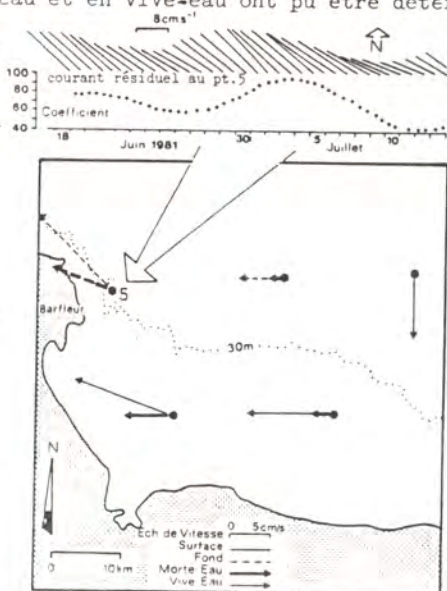


Fig 7 Tourbillon résiduel à Barfleur



induites par le vent, souvent bien supérieures aux résiduelles moyennes, même au fond (cf. Figure 8 ; Le Hir et l'Yavanc, 1984). Cependant, chaque vitesse résiduelle "instantanée" dépend non seulement de l'"histoire" du vent dans la baie, dont les effets sont principalement non linéaires, mais aussi, par les conditions à la limite, de la réponse du système Manche/mer du Nord au "forcing" météorologique. Il est donc impossible d'identifier une simple relation vent-courant à partir de mesures ponctuelles : ces dernières permettent surtout une vérification et une quantification de quelques configurations mises en évidence par modèles numériques (Le Hir et al, 1985).

## 5. CONCLUSION

Les mesures de courant de longue durée ont fait progresser la connaissance de la courantologie en baie de Seine sur les points suivants :

- identification des vitesses près du fond en des secteurs clé pour la sédimentologie,
- mise en évidence ou confirmation de processus résiduels et des courants induits (en distinguant la surface et le fond) : tourbillons résiduels de marée, courants de densité, effets météorologiques.

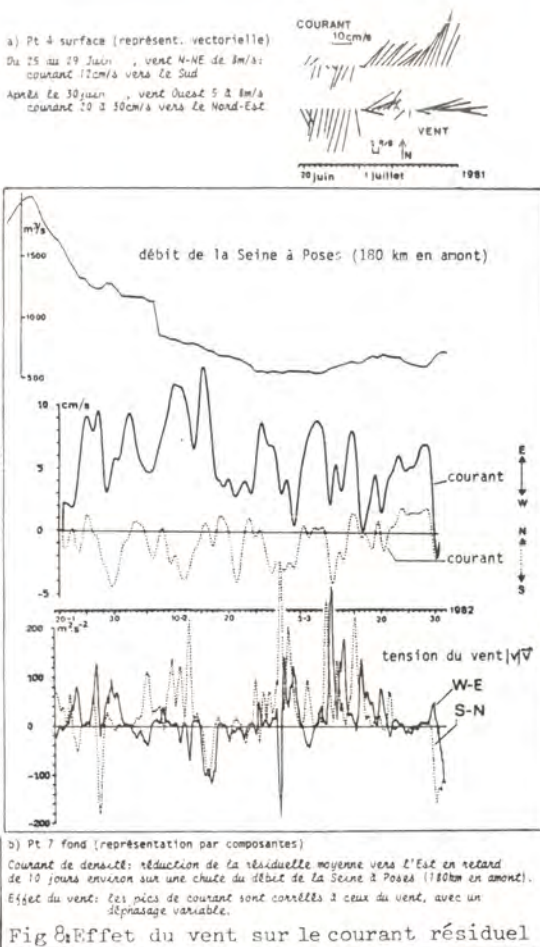
Mais les informations recueillies sont souvent trop éparpillées pour fournir une vision synthétique de la courantologie, surtout en termes de résiduelle. Les modèles mathématiques sont un complément indispensable pour la compréhension des phénomènes. En particulier, pour traiter le problème du devenir des masses d'eau, il est nécessaire de connaître les trajectoires et d'estimer la circulation résiduelle lagrangienne, ce qu'on ne peut faire à partir d'observations en points fixes.

Par ailleurs, les mesures ont donné lieu à l'élaboration et la validation d'une méthode d'analyse harmonique permettant de prédire correctement le courant de marée. Enfin une méthode d'analyse en composantes principales de variables vectorielles a été mise au point et appliquée aux courants en zone littorale pour mettre en évidence l'influence de la marée et des paramètres météorologiques.

Bertherat L., Carcel R. & Le Provost C. (1981.- Analyse de courants et de niveaux en Baie de Seine (campagne 1979). Rapport Inst. Mécanique Grenoble. B.P. 68. 38402 St-Martin d'Hères.

Demerliac (1973).- Calcul du niveau moyen journalier de la mer. Rapport du Service hydrographique de la Marine.

Laurec A. (1979).- Analyse des données et modèles prévisionnels en écologie marine. Thèse Doct. Etat, Univ. Aix-Marseille II, 405 p.



- Le Hir P. & L'Yavanc J. (1984).- Etude des circulations moyennes en Baie de Seine à partir de mesures de longue durée. Société Hydrotechnique de France. Compte rendu XVIIIe Journées de l'Hydraulique. Marseille Sept. 84.
- Le Hir P., Salomon J.C., Le Provost C., Chabert d'Hières G. & Mauvais J.L. (1985).- Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine. Ce volume, N°6.
- Le Provost C. & Rabatel A. (1984).- Analyse des courants en Baie de Seine (Campagne 1981). Rapport Inst. Mécanique Grenoble. B.P. 68 - 38402 St-Martin d'Hères.
- L'Yavanc J. & Kerdreux M. (1983).- Réalisation de mouillages côtiers pour mesures de courant. Rapport CNEXO - ELGMM.
- Pingree R.D. (1978).- The formation of the shambles and other banks by tidal stirring of the seas. J. Mar. Biol. Ass. U.K. 58, 211-226.
- Salomon J.C. (1985).- Courantologie calculée en Baie de Seine. Ce volume, N° 2.
- S.H.O.M. (1974).- Courants de marée et hauteurs d'eau de Fécamp à Cherbourg. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. Doc. n° 556.
- Zimmerman (1981).- Dynamics, diffusion and geomorphological significance of tidal residual eddies. Nature. Vol. 290, 16 april 1981.

Note - Les données météorologiques utilisées pour la comparaison entre vent et courant ont été aimablement fournies par le Service de Climatologie Marine de la Direction de la Météorologie.



*SALOMON J.C.\**

## 1. Introduction

Le mouvement des particules d'eau, dans l'océan ou dans les mers littorales, peut être considéré comme résultant de la superposition de composantes élémentaires qui correspondent chacune à des mécanismes dynamiques distincts. Parmi celles-ci, la marée est un élément important.

En Baie de Seine, et plus généralement dans la Manche, les courants de marée, de l'ordre de 2 noeuds, constituent le signal dominant.

Malheureusement, les équations de l'hydrodynamique montrent que ces mouvements élémentaires sont couplés entre eux plus fortement en zone côtière que dans l'océan profond. Cette caractéristique est due à l'intensité des courants, à leurs gradients spatiaux, ainsi qu'à l'amplitude des dénivellations parfois comparable à la hauteur d'eau totale. Ceci complique fortement l'analyse des phénomènes : dans un tel secteur on ne peut étudier de processus dynamique sans le relier à la marée.

Mais la marée n'est pas seulement le phénomène alternatif, de moyenne nulle, qu'elle paraît être de prime abord. Elle induit elle-même une courantologie à long terme que l'on dénomme résiduelle de marée. Elle est généralement très faible par rapport au courant instantané, et donc difficile à mesurer par les moyens classiques peu adaptés à cet objectif. Elle est pourtant d'un très grand intérêt pour qui s'intéresse au déplacement des masses d'eau et de leur contenu en substances dissoutes polluantes ou non, aux organismes vivants, ainsi qu'à certains aspects de la sédimentologie.

On aura recours ici, à la technique du modèle mathématique qui fournit à très peu de frais, une couverture quasi continue de la région à étudier, et permet la transition entre la présentation eulérienne, et son équivalent lagrangien.

On sait que dans un tel secteur macrotidal les courants importants assurent une relative homogénéité verticale des masses d'eau et on a pu vérifier que les gradients horizontaux de température et de salinité influent assez peu sur les profils verticaux de vitesse (Thouvenin et al., 1984 ; Salomon et al., 1981). On se propose donc d'étudier ici par modèle mathématique bidimensionnel le champ de courants moyens sur la profondeur et de distinguer ensuite d'une façon qualitative la structure verticale des courants résiduels, par l'effet des variations de densité.

## 2. Le modèle numérique

Le modèle résoud les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Après intégration sur la verticale, et en supposant la densité constante,

---

\* Laboratoire d'Océanographie Physique, Université de Bretagne Occidentale, 29283 Brest Cedex.

il vient :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V + 2 \Omega \wedge V = -g \nabla \zeta - \frac{k V |V|}{\zeta - h_0} + \varepsilon \nabla^2 V$$

et

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\zeta - h_0) V = 0$$

$V$  est le vecteur vitesse,  $\Omega$  la vitesse angulaire de rotation terrestre,  $\zeta$  la cote de la surface et  $h_0$  la cote du fond,  $k$  est un coefficient de frottement de fond,  $\varepsilon$  est le coefficient de dispersion horizontale de la quantité de mouvement.

La technique de résolution en différences finies fait appel à un schéma de type Implicite en Directions Alternées, abondamment utilisé pour ce type de problème. Les détails du modèle ont été publiés par ailleurs (Salomon et al., 1981).

La morphologie de la Baie est décrite par environ 1000 mailles carrées de 2 km de côté. Le modèle reproduit donc des structures spatiales de dimension au moins égale à 10 km. L'estuaire intérieur de la Seine est représenté jusqu'à Poses, par un modèle à 1 dimension.

Les conditions aux limites ouvertes sont, à l'amont le débit fluvial, et sur la frontière marine une condition de niveau extraite des résultats de la plaque tournante de Grenoble (Chabert d'Hières et al., 1978).

La marée  $y$  est prédite pour toute situation passée ou future, par une méthode harmonique selon la formule :

$$\zeta(x,y,t) = \sum_i \gamma_i A_i(x,y) \cos(\omega_i t + (V_0 + u)_i - G_i(x,y))$$

$\omega$  est la pulsation de l'onde d'ordre  $i$ ,  $A$  et  $G$  en sont l'amplitude et la phase,  $\gamma$  est le facteur de correction nodale et  $(V_0 + u)$  la phase initiale de l'astre perturbateur. 29 ondes ont été utilisées depuis  $O_1$ , jusqu'à  $2MK_6$ . Le niveau moyen a été supposé horizontal, de sorte que le modèle ne reproduit pas la circulation moyenne induite par des phénomènes extérieurs à la Baie.

### 3. Résultats

#### 3.1. Courants instantanés

La figure 1 présente, sous la forme synthétique de courbes polaires, les vecteurs vitesse en marée de vive-eau (coefficient 95) et de débit fluvial moyen.

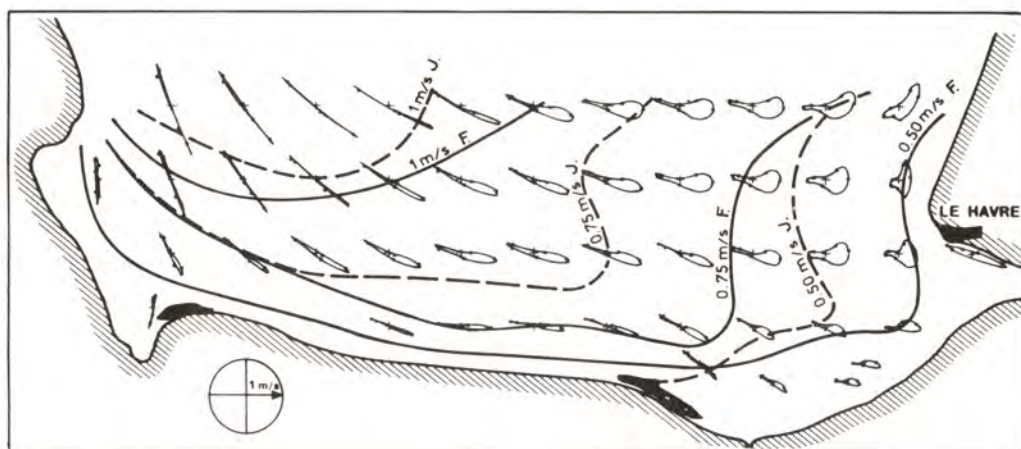


Fig.1.- Les courants de marée en Baie de Seine(vive eau moyenne). Les lignes isotaches correspondent au maximum de la vitesse.



On observe la déformation régulière des hodographes, essentiellement linéaires dans la région de Barfleur, puis présentant progressivement un dédoublement de la direction du flot lorsque l'on se déplace vers l'Est, et montrant 3 maxima à proximité de l'estuaire.

L'intensité du courant décroît d'Ouest en Est, depuis deux noeuds, jusqu'à un noeud, environ.

Il est important de noter que, à l'exception du voisinage immédiat de la côte du Calvados, et de la région de Barfleur, le courant dominant est le courant de flot. Cette particularité, jointe à la durée inégale des renverses de flot et de jusant donne à la marée dans la Baie un caractère que l'on rencontre habituellement en estuaire.

L'examen de champs de courants instantanés (tel que présenté sur la fig. 2) permet de mieux comprendre la circulation. On notera, par exemple, la divergence, au large du Havre de la composante de flot qui provoque le remplissage de l'estuaire (courant d'Est, intense seulement en début de flot) et la composante Nord du courant, dénommée Courant de Verhaule, qui correspond au mouvement général dans la Manche, à cet instant.

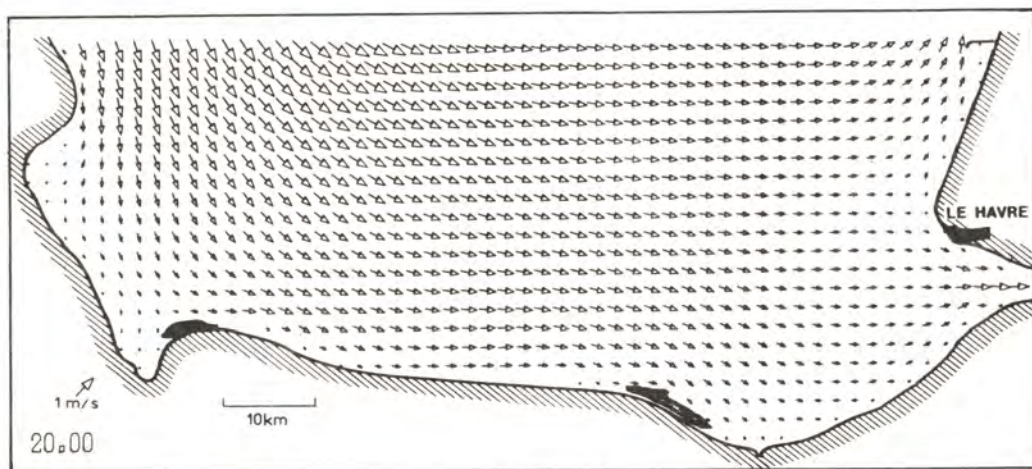


Fig. 2.- Exemple de champ de courants de flot lors de la pleine mer du Havre (vive-eau moyenne).

Cette représentation eulérienne, habituelle et commode, correspond assez mal au mouvement des particules liquides. Celles-ci se déplacent dans ces champs de vitesse en décrivant des trajectoires qui peuvent les entraîner assez loin de leur point de départ. A la condition de disposer d'une discrétisation de l'espace (c'est-à-dire la taille de la maille) petite par rapport à la dimension des trajectoires, ces champs de courants permettent de calculer les paramètres lagrangiens.

### 3.2. Trajectoires

Les déplacements de particules fictives qui se déplacent dans le domaine en respectant les champs de courants eulériens fournissent deux indications : l'excursion de marée et la résiduelle lagrangienne.

3.2.1. Excursions : La figure 3 regroupe les résultats obtenus dans toute la Baie pour la même marée de vive-eau. On notera le déplacement important (près de 20 km) et pratiquement linéaire dans la région de Barfleur, sa réduction près des côtes, et la rotation progressive qui se manifeste dans la partie Est de la Baie, où l'excursion n'est plus que de 6 à 8 km.

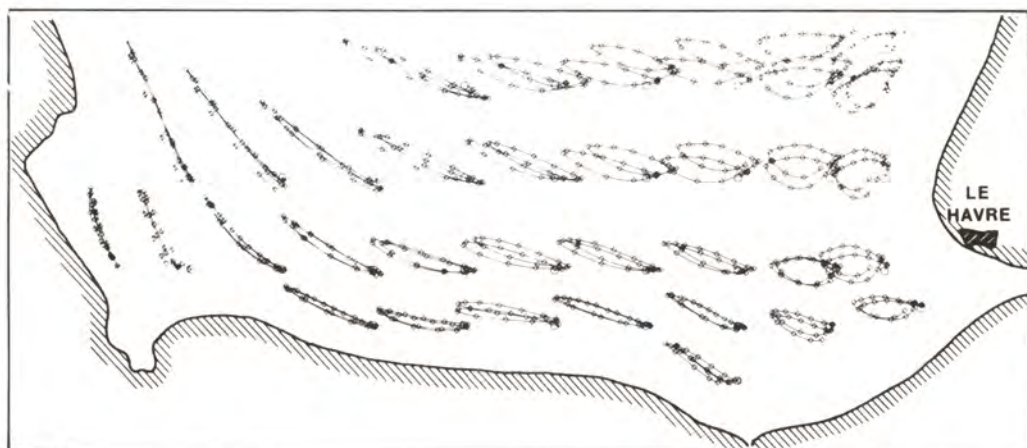


Fig. 3 : Trajectoires de particules fictives (Vive-Eau moyenne)

3.2.2. Résiduelles langrangiennes : On nomme ainsi la distance séparant le point de départ et le point d'arrivée d'une particule  $\alpha$ , après son déplacement durant une marée. En divisant ce trajet résiduel par la période de la marée, on obtient la vitesse résiduelle lagrangienne  $V_{ar}$  :

$$V_{ar} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} V_{\alpha}(t) dt$$

Ce paramètre est le seul qui soit réellement significatif en terme de déplacement des masses d'eau. On le préférera à la notion de résiduelle d'Euler qui n'a pas de réalité physique, et qui dans le cas particulier de la Baie de Seine, se révèle parfois très différent.

Un tel champ de courant (résiduel de Lagrange) est présenté figure 4 pour la même situation de Vive-Eau.

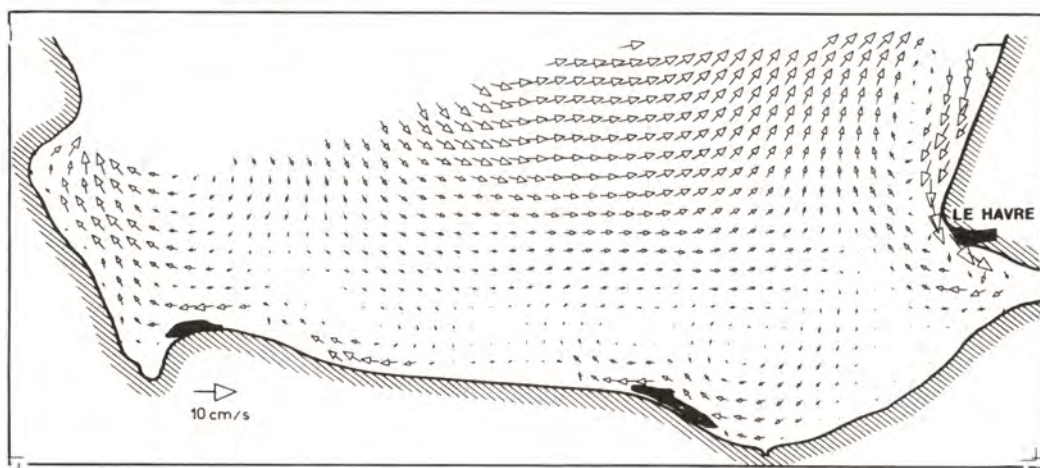


Fig. 4 : Courants résiduels de Lagrange (V.E. moyenne - Départ à la P.M. du Havre).



On remarquera la dérive générale des masses d'eau vers l'Est, particulièrement nette dans la partie Nord de la Baie, où elle atteint 6 à 7 cm/s, et l'existence de plusieurs tourbillons anticycloniques.

Le premier tourbillon, dénommé "tourbillon de Barfleur", correspond à une sortie des eaux sur une distance de 15 à 20 km de la côte. Les eaux de la Manche pénètrent plus à l'Est, sur 30 km environ, c'est-à-dire jusqu'au centre de la Baie. Une grande partie de ces eaux ressort dans la moitié Est, à l'exception du voisinage d'Antifer où un courant côtier entraîne une dérive vers le Sud, en direction du cap de la Hève et de l'estuaire.

Près de la côte du Calvados un contre-courant provoque un cheminement résiduel vers l'Ouest que la théorie permet d'interpréter comme un effet des petites profondeurs : la tendance à la conservation du rotationnel de la masse d'eau, et surtout la combinaison du frottement plus important à la côte et de la prédominance du flot tendent à provoquer une rotation anticyclonique, que l'on observe.

Les irrégularités des fonds et de la ligne de côte, telles que la pointe de la "Percée", ou les "Essarts" (près de Luc-sur-Mer), créent des circulations résiduelles perpendiculaires à la côte, associées à ce contre-courant elles forment des tourbillons. Ceci est d'une grande importance pour le temps d'évacuation vers le large d'éventuels rejets dans ces régions. L'ordre de grandeur moyen de ces courants est de 3 cm/s.

Cette description schématique est à moduler en fonction de deux paramètres dont il n'a pas été tenu compte plus haut :

- La succession de marées d'amplitude inégale modifie ces résultats sur une période de deux semaines. Plusieurs simulations ont été effectuées par le modèle, qui montrent que l'amplitude des vitesses change, mais que le schéma d'ensemble reste globalement semblable.

- L'instant de départ des particules au cours de la marée (paramètre  $t_0$  de la formule précédente). Des particules issues du même point géographique, mais à des moments différents décrivent des trajectoires inégales et subissent un déplacement résiduel différent. Le champ de courant résiduel lagrangien n'est pas unique.

Ce facteur auquel on prête trop peu d'attention est illustré figure 5, pour une marée totalement sinusoïdale (réduite à  $M_2$ )

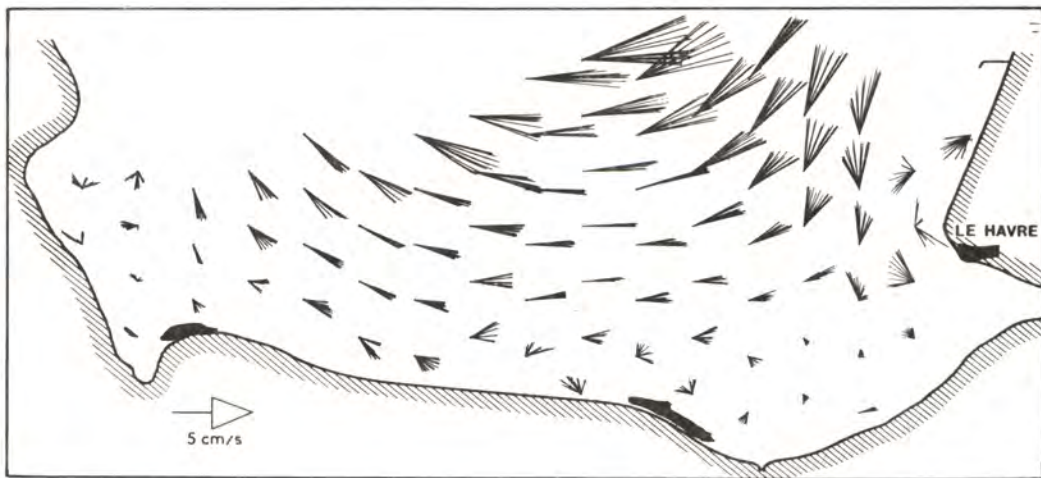


Fig. 5 : Courants résiduels de Lagrange représentés heure par heure (marée  $M_2$ ).

On observe, par exemple, qu'aux environs du Havre, une particule peut avoir un déplacement résiduel dirigé soit vers le Nord, soit vers le Sud en direction de l'estuaire.

Dans la baie, à l'extérieur de l'estuaire, le début fluvial modifiera peu cette composante de la circulation résiduelle due à la marée, mais son influence se fera sentir par la composante quasi-géostrophique étudiée au paragraphe 4.3.

#### 4. Vers un schéma de circulation résiduelle

Il a été signalé plus haut que, pour ce qui est de la vitesse résiduelle, le modèle ne fournirait qu'une réponse incomplète puisqu'il ne prenait en compte ni l'effet du vent, ni celui des gradients de densité, ni la pente du niveau moyen de la mer sur la limite extérieure.

On peut tout de même prolonger les résultats des calculs et parvenir à un schéma de circulation plus complet que celui qui est présenté figure 4, en superposant, au moins qualitativement, les circulations partielles dues aux termes qui ont été négligés dans les équations de départ.

##### 4.1. L'effet du vent

On sait que certains événements météorologiques intenses (coups de vent) ont durant quelques heures ou quelques jours un effet considérable sur le déplacement des masses d'eau.

Mais le mouvement global doit s'apprécier à une échelle de temps qui soit en accord avec la longueur des trajets parcourus dans la Baie et la vitesse de ce déplacement. Pour une dimension caractéristique de 80 à 100 km, et une vitesse de l'ordre de 4 cm/s, conforme à ce qui a été dit plus haut, on déduit que le temps de résidence moyen dans la Baie doit être de 3 à 4 semaines. A cette échelle il est probable que la résultante des impulsions liées au vent qui ont un caractère irrégulier et, pour partie aléatoire, se trouve fortement diminuée. Ce point est abordé dans une autre communication (Le Hir et al., même ouvrage).

##### 4.2. La pente du niveau moyen

Des modèles de circulation à l'échelle de la Manche indiquent une dépression locale du niveau moyen à proximité de Barfleur. Cela entraîne certainement une amplification du tourbillon de Barfleur par rapport à la réponse donnée par le modèle, et une légère diminution de la dérive vers l'Est.

##### 4.3. Les gradients horizontaux de densité

Les gradients de densité, essentiellement liés à la dessalure des eaux à proximité de l'estuaire sont à l'origine d'une circulation résiduelle que l'on peut estimer de manière analytique.

En se situant dans un repère horizontal tel que l'axe Oy soit dirigé le long des isohalines, et l'axe Ox vers l'estuaire, on peut écrire les équations de l'hydrodynamique sous la forme simplifiée :

$$N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -fv + g \frac{(\zeta - z)}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

$$N \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = fu$$

u et v sont ici les composantes de la vitesse selon Ox et Oy, N est le coefficient de viscosité turbulente verticale et f est le facteur de Coriolis.

Heaps (1972), puis Heathershaw et al. (1980), ont repris la solution obtenue par Nomitsu (1933), pour interpréter la structure verticale des courants observés dans la Baie de Liverpool, et celle de Swansea. Cette solution est complexe et ne respecte pas la condition de vitesse nulle au contact du fond.

On a résolu ici un système légèrement plus simplifié qui a l'avantage de respecter cette condition à la limite. En évaluant les ordres de grandeur de chacun des termes de la première équation, on constate que la force de Coriolis dans la direction Ox est faible par rapport aux termes de pression et de cisaillement verticaux. On écrira donc le système précédent, sans retenir la force de Coriolis dans la direction Ox.



Ce système est relativement simple à résoudre. Il vient :

$$u = \frac{1}{48} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{H^3}{N} (8 \eta^3 - 9 \eta^2 + 1)$$

$$v = \frac{f}{320} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{H^5}{N^2} \left( \frac{8}{3} \eta^5 - 5 \eta^4 + \frac{10}{3} \eta^2 - 1 \right)$$

$$\text{où } \eta = 1 - \frac{z}{H}$$

Ces fonctions sont présentées graphiquement figure 6, pour les valeurs suivantes des paramètres :

$$H = 20 \text{ m} \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} = 2.10^{-4}$$

$$N = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

On constate la formation d'une spirale de type Ekman, très proche de la solution obtenue par Heaps :

Le courant de surface est dirigé quelques 60 degrés à gauche des isopycnes, avec une amplitude de 4 cm/s. Il tourne ensuite vers la droite, est dirigé le long de ces isopycnes, un peu au-dessus de la mi-profondeur, puis presque perpendiculaire à elles à partir de 4 m au-dessus du fond. La vitesse est à cet endroit de 2 cm/s.

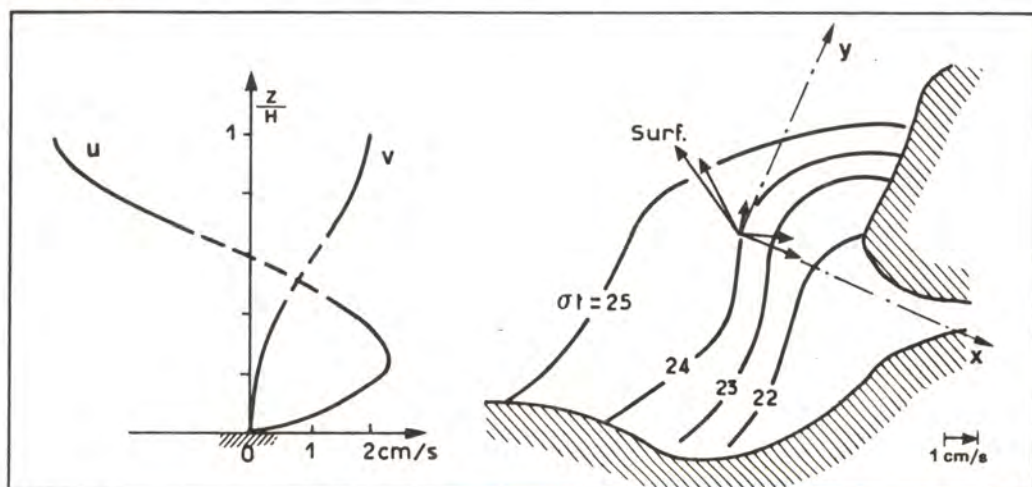


Fig. 6 : Courant résiduel de densité : structure verticale et positionnement géographique.

Ces indications théoriques simples permettent de moduler les résultats du modèle à proximité de l'estuaire comme suit :

- La veine de courant résiduel dirigé vers le Sud, le long du littoral d'Octeville est intensifiée près du fond, et fortement diminuée en surface.
- La sortie des eaux de la Seine vers le Nord Ouest est renforcée.
- La pénétration des eaux du large dans la partie Est de la Baie est accrue près du fond, et diminuée en surface.

La figure 7 rassemble ces indications.

Compte tenu des paramètres qui modifient ce schéma : coefficient de la marée, débit fluvial et facteurs météorologiques, l'intensité des courants n'a pas été notée. On considère qu'une vitesse de 5 cm/s constitue souvent une valeur relativement élevée.

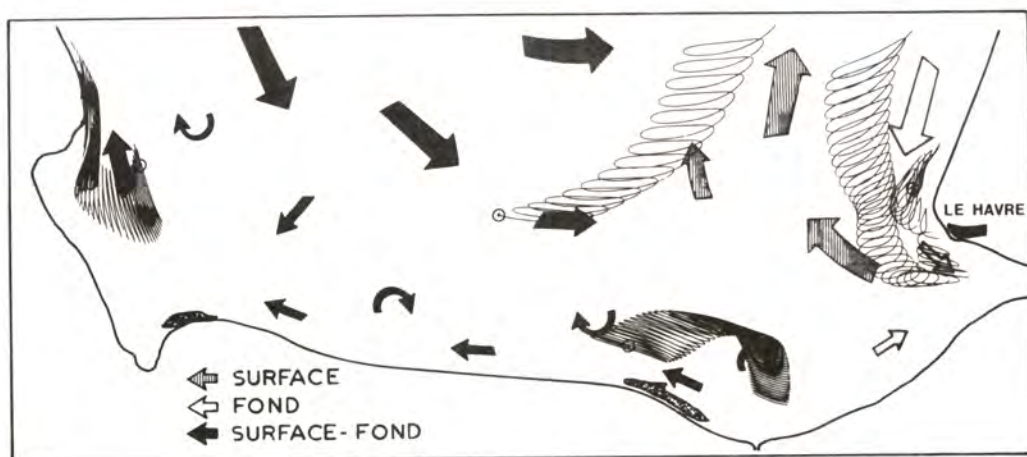


Fig. 7 : Schéma de circulation résiduelle.

### 5. Conclusion

Le modèle mathématique bidimensionnel a permis de mieux connaître la courantomologie de marée dans la Baie. Il est aussi un outil de prédiction qui pourra à l'avenir être utilisé pour tirer un meilleur profit des observations faites en mer et préparer une meilleure stratégie de mesure. Cette procédure a déjà été employée lors de la dernière campagne à la mer du Greco Manche, au printemps 1984.

L'examen des résultats nous a conduit à faire un certain nombre de remarques sur la distribution des courants instantanés et résiduels, l'existence de contre-courants et de tourbillons.

On a écarté la présentation eulérienne, parfois source d'erreurs d'interprétation, et mis l'accent sur la circulation lagrangienne, en notant la multiplicité de ces champs de courant.

Le schéma de circulation résiduelle obtenu en complétant les résultats du modèle par des considérations théoriques est un apport important de ce travail à la connaissance du fonctionnement de l'écosystème de la Baie de Seine. On constatera (Le Hir et al., même ouvrage) qu'il semble correspondre aux indications fournies par les courantomographes et la télédétection.

Anonyme (1978).- Baie de Seine, Campagne Thalia Mai 1978. Rapport interne COB/DELGMM.

Chabert d'Hières G. & Le Provost C. (1978).- Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. *Annales Hydro.*, 46, 3 : 5-35.

Heaps N.S. (1972).- Estimation of density currents in the Liverpool bay area of the Irish Sea. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 30 : 415-432.

Heathershaw A.S. & Hamond F.D.C. (1980).- Tidal currents and residual circulation in the Swansea bay area of the Bristol channel. In : *Industrialised embayments and their environmental problems*. Pergamon Press, 123-156.

Officer C.B. (1976).- *Physical oceanography of estuaries and associated coastal waters*. John Wiley.

Salomon J.C. & Le Hir P. (1981).- Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation numérique des phénomènes physiques. Univ. de Bretagne Occidentale, 286 p.

Thouvenin B. & Salomon J.C. (1984).- Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion en zone côtière à marée. *Océanologica Acta*, Vol. 7, n° 4:417-429.



SUR L'HYDRODYNAMIQUE DE LA BAIE DE SEINE. RESULTATS D'OBSERVATIONS ET DE  
MODELISATIONS.

LE PROVOST C. \*, FORNERINO M. \*\*, VILLARET C. \*.

L'hydrodynamique de la baie de la Seine ne peut être étudiée de façon isolée par rapport au reste de la Manche, et même de la totalité du plateau continental européen. Les oscillations de marées résultent d'un forçage venant de l'Atlantique, et leurs caractéristiques locales sont en fait étroitement liées aux déformations non linéaires que subissent ces ondes au cours de leur propagation depuis l'océan. Les circulations induites par les perturbations météorologiques intègrent elles aussi les réponses locales et globales.

Nos travaux de modélisation ont visé essentiellement l'étude de cette échelle globale, et l'insertion de zones côtières comme la baie de la Seine dans ce contexte d'ensemble. Compte tenu de leur emprise spatiale, nos modèles sont bidimensionnels et ne concernent que les transports moyens intégrés sur chaque verticale. Deux modèles ont été exploités. L'un couvre uniquement la Manche, avec une discrétisation élémentaire de 5 km., et donc une cellule de calcul de  $10 \times 10 \text{ km}^2$ . L'autre s'étend du Pas-de-Calais au rebord du plateau continental et comprend la mer Celtique, la Manche et le sud de la mer du Nord ; en raison de son extension spatiale, ce deuxième modèle est en coordonnées sphériques, avec une cellule de calcul de  $1/12^\circ$  de degré en latitude et  $1/18^\circ$  de degré en longitude. Une simulation de longue durée (1 mois) a été réalisée avec le premier modèle, permettant de reproduire les cycles semi mensuels et mensuels de la marée ; les conditions aux limites nécessaires à ces simulations ont été relevées dans l'"Atlas des composantes harmoniques de marées pour la Manche", publié par Chabert d'Hières et Le Provost (1979). Différentes simulations de courte durée, avec des situations de vent typiques, ont été effectuées sur le modèle de grande emprise, et analysées en termes de surcotes-décotes et de courants résiduels.

Des observations de niveaux et de courants de longue durée ont été réalisées depuis 1979 (Le Hir et l'Yavanc, 1985) et analysées en termes de composantes harmoniques de marée, d'une part, et de composantes résiduelles eulériennes d'autre part (Bertherat, Carcel et Le Provost, 1981). Un ensemble assez dense d'informations a ainsi été obtenu, apportant un certain éclairage sur l'inhomogénéité spatiale et la variabilité temporelle de ces grandeurs, et permettant une confrontation des résultats de modélisation avec la réalité.

Une analyse exhaustive de ces simulations numériques et une confrontation des résultats avec les observations ont permis d'apprécier le niveau de précision qui peut être atteint par ces approches :

\* Il a été prouvé qu'une telle modélisation, même avec une maille relativement grande, permet de traiter un spectre de marée fort complexe, et de reproduire fidèlement les processus de déformations non linéaires des ondes composan-

\* Institut de Mécanique de Grenoble - BP 68 - 38402 Saint Martin d'Hères.

\*\* Université de Zulia - Maracaibo - Vénézuéla.

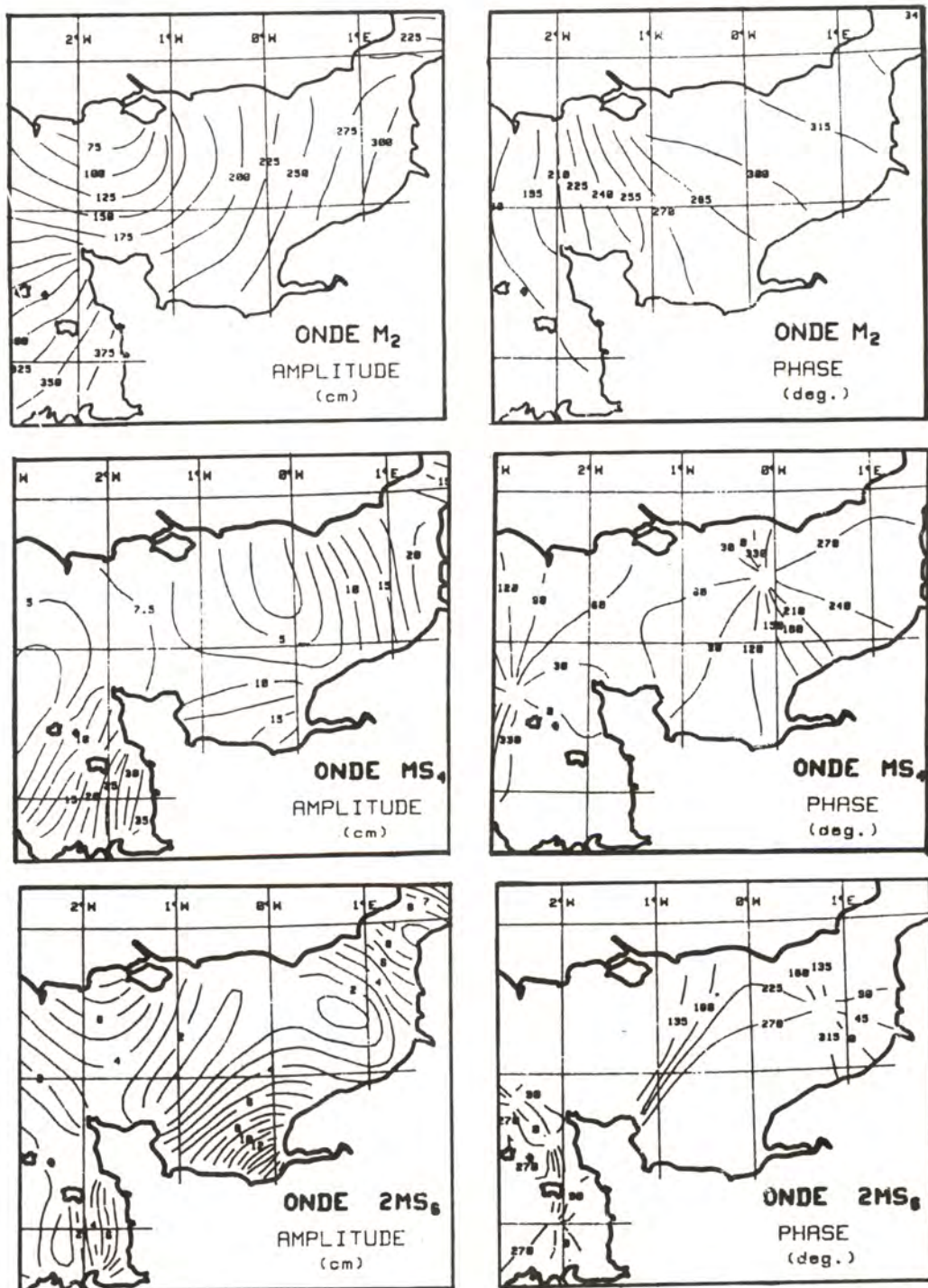


Figure 1 : Caractéristiques semi-diurnes (exemple  $M_2$ ), quart-diurnes (exemple  $MS_4$ ) et sixième-diurnes (exemple  $2MS_6$ ) des variations de la surface libre dues à la marée.



tes. (Le Provost et Fornerino, 1985).

\* L'utilisation des constantes harmoniques ainsi obtenues permet de reproduire ou prédire, à très faible coût, les variations des niveaux et des transports avec une précision meilleure que 10%, en tout point du domaine, et sur n'importe quelle période de temps. (Fornerino et Le Provost, 1985).

\* Ces simulations conduisent à des champs de courants résiduels cohérents qui semblent en accord avec les résultats des analyses des observations *in situ* (Le Provost et Fornerino, 1984).

Afin d'illustrer les traits essentiels de l'hydrodynamique de la baie de la Seine, quelques extraits des solutions ainsi établies sont présentés dans la suite de cet exposé.

### Les variations du niveau de la surface libre.

La forme très particulière de la marée au Havre est bien connue, avec sa tenue du plein de 2 heures. Cette particularité résulte de la déformation de l'onde venant de l'Atlantique : sa propagation par faibles fonds à partir du rebord du plateau continental, plus de 600 km en amont, et la présence des caps de la Hague, de Barfleur, de la presqu'île de Portland et de l'île de Wight dans une zone de forts courants (plus de 10 noeuds en vives-eaux au cap de La Hague), entraînent un enrichissement exceptionnel du spectre du signal océanique dans cette zone. En termes harmoniques, ces déformations se traduisent par une amplification des composantes quart-diurnes et sixième-diurnes qui atteignent au fond de la baie des amplitudes de l'ordre de :

$M_4$  (25cm),  $MS_4$  (16cm),  $MN_4$  (8cm)

$M_6$  (15cm),  $2MS_6$  (15cm),  $2MN_6$  (11cm)

pour des ondes fondamentales d'amplitudes :

$M_2$  (261cm),  $S_2$  (88cm),  $N_2$  (48cm)

Cette déformation de la marée n'est pas localisée à l'estuaire de la Seine, elle se retrouve très loin au large, et affecte en fait toute la baie de la Seine. Nous présentons à titre d'illustration les réseaux d'égales amplitudes et d'égales phases des ondes suivantes :

- $M_2$  : Onde dominante, typique des composantes semi-diurnes d'origine astronomique, avec un point amphidromique virtuel à la longitude de  $2^\circ W$ .
- $MS_4$  : Onde d'interaction entre  $M_2$  et  $S_2$ , montrant l'allure des ondes quart-diurnes, avec deux points amphidromiques, en Manche Ouest et Est et la faible amplification de ces ondes en Baie de Seine.
- $2MS_6$  : Onde non linéaire, aussi d'interaction entre  $M_2$  et  $S_2$ , typique des composantes sixième-diurnes, avec leur résonance exceptionnelle dans la Baie de Seine, résultant d'une oscillation transversale entre l'estuaire de la Seine et les côtes anglaises de Portland à Southampton.

### Les courants instantanés.

Pour caractériser un champ de courant, il est nécessaire d'utiliser quatre paramètres : l'amplitude, la direction et la phase du maximum de courant, ainsi que l'ellipticité de la rose de courant (rapport de l'intensité du petit axe au grand axe). A titre d'illustration, les réseaux relatifs aux ondes  $M_2$ ,  $M_4$  et  $M_6$  sont présentés sur la figure 2. On peut noter :

- Pour les ondes semi-diurnes 1) une augmentation de l'intensité du courant du fond de la baie vers la pointe de Barfleur, 2) une rotation de la direction principale de ce courant de  $330^\circ$  (c'est à dire  $-30^\circ$  par rapport au Nord) le long du Cotentin, à  $240^\circ$  (c'est à dire  $-60^\circ$ /Nord) au large d'Antifer, 3) un accroissement très important de l'ellipticité de la rose de courant dans la partie est de la baie.
- Pour les ondes quart-diurnes, 1) une augmentation de l'amplitude dans la partie est de la baie, 2) un accroissement très important de l'ellipticité dans la partie centrale de la baie, entre Barfleur et Antifer.
- Pour les ondes sixième-diurnes 1) une augmentation de l'amplitude vers Barfleur, 2) une direction presque constante (environ  $-30^\circ/N$ ); 3) une faible ellipticité.

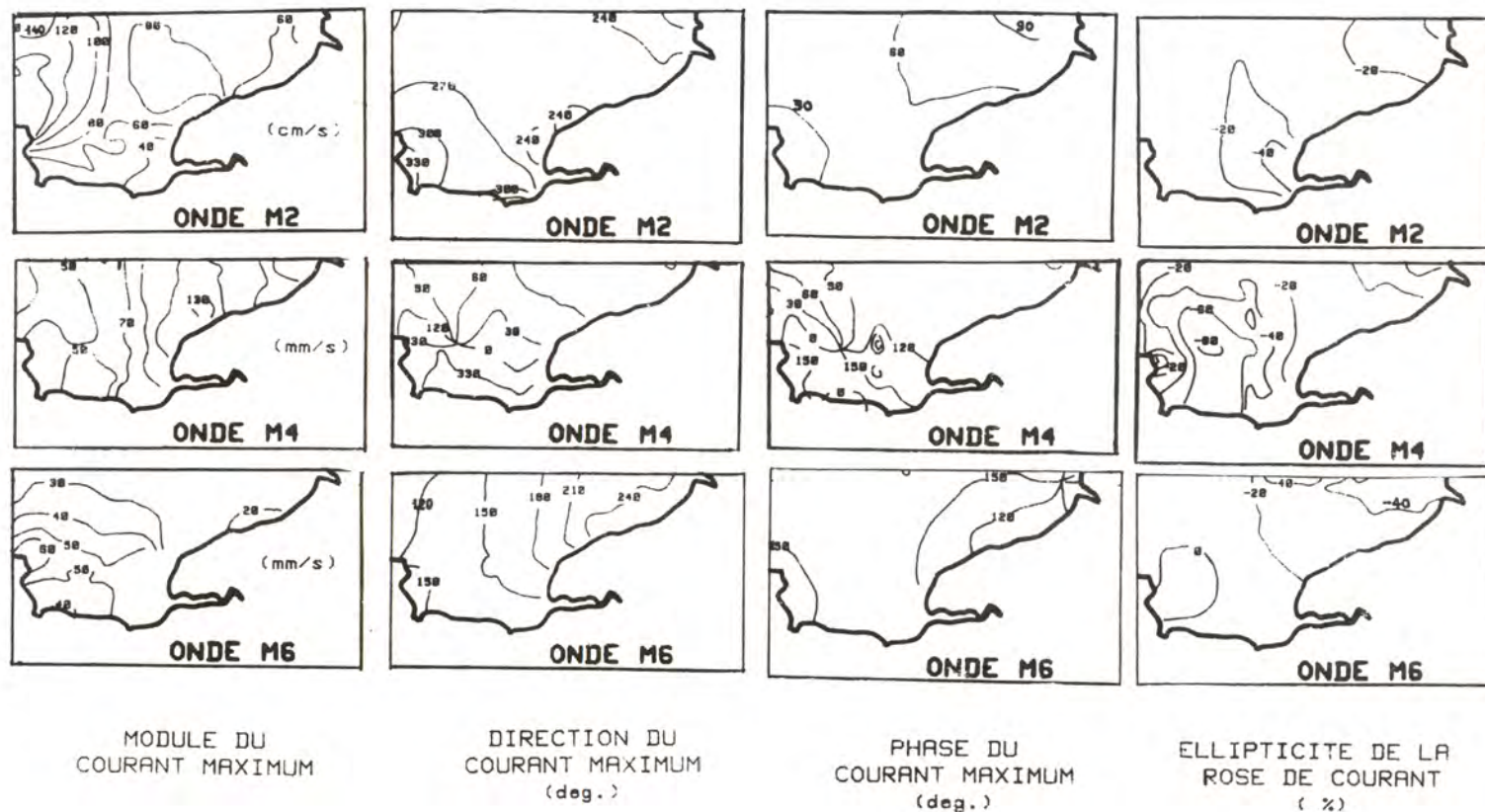


Figure 2 : Caractéristiques semi-diurnes (exemple M<sub>2</sub>), quart-diurnes (exemple M<sub>4</sub>) et sixième-diurnes (exemple M<sub>6</sub>) des courants de marée.



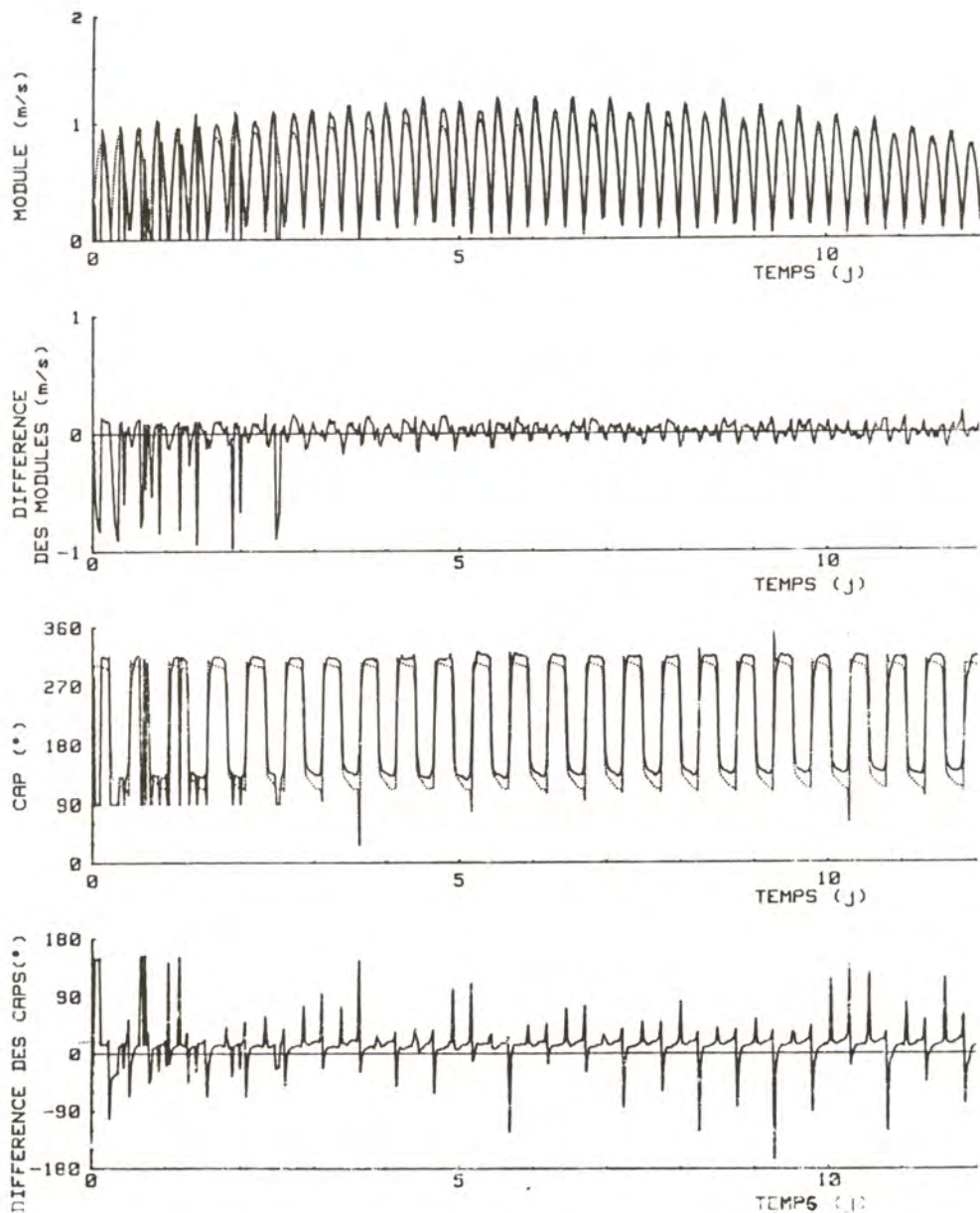


Figure 3 : exemple de comparaison entre prédiction (trait pointillé) et observation (trait plein) au point de coordonnées (49° 41' N , 0° 50' W).

Tous ces traits sont en accord avec les résultats des analyses des observations faites dans cette zone au cours des années 79, 81 et 82. La composition de ces différentes ondes conduit à des hodographes de courants fort complexes (Salomon, 1985). La connaissance de ces différentes composantes permet désormais d'effectuer des prédictions du courant instantané, à moindre coût, sur toute la Baie de Seine (et toute la Manche), à n'importe quel instant. Un exemple est présenté sur la figure 3: une observation du courant a été réalisée à mi-profondeur en ce point situé au large de Barfleur. Cette figure illustre la qualité de la prédiction réalisée à partir des informations données par le modèle numérique :

- Les écarts entre l'amplitude du courant prédit et celui observé sont très faibles (6,6 cm/s en valeur quadratique - Les écarts importants observables au début de l'enregistrement proviennent d'un mauvais fonctionnement de l'appareil de mesure). On peut noter que les courants prédits sont parfaitement en phase avec les courants réels.

- Un écart systématique affecte le cap prédit (35° d'écart type). Le modèle numérique comporte probablement un biais dans cette zone, dû à la taille de la maille de calcul. Mais il faut aussi mentionner que les courantomètres ont une imprécision de  $\pm 7^\circ$  sur les caps.

#### Les courants résiduels.

Une communication est consacrée à ce problème. Il n'y a donc pas lieu de développer ce point ici. Soulignons simplement que notre simulation réalisée sur un mois a conduit à l'identification des modulations semi-mensuelles et mensuelles du courant résiduel eulérien. (Le Provost et Fornerino, 1984). Ces modulations ont été clairement observées sur les observations *in situ*.

#### CONCLUSION

Avec ces modèles nous disposons maintenant d'outils donnant des informations relativement sûres sur l'hydrodynamique des courants dans la Manche et la Mer Celtique. Ces modèles globaux apportent en particulier les conditions aux limites nécessaires pour les modèles locaux de haute résolution. (Salomon, 1985, Thouvenin et Salomon, 1985). Comme nous l'avons déjà noté précédemment, la qualité des solutions obtenues est étonnante, compte tenu des maillages utilisés, mais elles demandent à être encore améliorées, pour pouvoir atteindre la composante résiduelle du courant. Des efforts de recherche sont donc à faire dans ce sens, au niveau des techniques de calcul (raffinement du maillage en certaines zones), des paramétrisations (frottement de fond, dissipations latérales), et de la prise en compte de la dimension verticale.

Bertherat C., Carcel R. & Le Provost C. (1981).- Analyse de courants et de niveaux en Baie de Seine. Rapport interne IMG-N° 79/6041.

Chabert d'Hières G. & Le Provost C. (1979).- Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. Annales Hydrog., Vol. 6, Fasc. 3, pp. 5-36.

Fornerino M. & Le Provost C. (1985).- Un modèle de prédiction des courants de marée dans la Manche. International Hydrographic Review. Monaco. LXII (2) pp. 143-16

Le Hir P. & L'Yavanc J. (1985).- Observations de courant en Baie de Seine. Ce volume, N° 1.

Le Provost C. & Fornerino M. (1984).- Les courants résiduels dans un modèle bidimensionnel de marées littorales. L'Hydraulique et la maîtrise du littoral. question IV, rapport n° 5.

Le Provost C. & Fornerino M. (1985).- Tidal spectroscopy of the English Channel with a numerical model. Journal of Physical Oceanography. 15 pp. 1009.1031.

Salomon J.C. (1985).- Courantologie calculée en Baie de Seine. Ce volume, N° 2.

Thouvenin B. & Salomon J.C. (1985).- Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion. Ce volume, N° 4.



# MODELE TRIDIMENSIONNEL DE CIRCULATION ET DE DISPERSION.

THOUVENIN B.\*, SALOMON J.C.\*.

## 1. Introduction

Le régime des courants marins en Baie de Seine est influencé par la forme du fond, des côtes et par les différences de densité que provoquent les apports fluviaux dans la partie est. Ceci leur confère un caractère tridimensionnel que l'on passe souvent sous silence parce que difficile à observer et à étudier.

Pourtant, les moyens de calcul modernes permettent d'étudier cette question sous l'angle de la modélisation numérique :

. Leendertse et Liu (1975, 1978) ont abordé ce problème par des modèles à couches multiples.

. Forristall (1974), Heaps (1971, 1980), Nihoul (1977), Davis et Owen (1979) et Le Hir (1980) ont découplé le calcul de la structure verticale de celui du champ moyen horizontal.

. On peut aussi séparer les modes barotropes et baroclines, ce qu'ont fait Sheng *et al.* (1978) ou Blumberg et Mellor (1980).

Nous avons choisi de résoudre directement les équations de l'hydrodynamique en utilisant la technique présentée par Hamilton (1975-1976) pour traiter les conditions aux limites supérieures et inférieures. Un modèle bidimensionnel en plan vertical (x,z) de ce type avait déjà été appliqué avec succès sur plusieurs sites littoraux (Hamilton, 1975, sur le canal de Rotterdam ; de Borne de Grandpré, 1979, sur l'estuaire de la Gironde ; Salomon, 1981, sur l'estuaire de la Seine ; de Borne de Grandpré *et al.*, 1981, sur l'estuaire du Saint Laurent).

Nous avons repris cette méthode générale, et développé le modèle sur la coordonnée transversale y.

## 2. Formulation mathématique

Le modèle résout les équations de Navier-Stokes, qui s'écrivent de la manière suivante, dans le repère orthonormé direct (0,x,y,z) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v + a g (\zeta - z) \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} \\ = \frac{1}{\rho} \left[ N'_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N'_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( N'_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

\* Laboratoire d'Océanographie Physique, Université de Bretagne occidentale, 29283 Brest Cedex.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu + ag (\zeta - z) \frac{\partial \bar{S}}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} \\ = \frac{1}{\rho} \left[ N'_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + N'_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( N'_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \rho g \quad (5)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + aS) \quad a = 0,78.10^{-3} \quad (6)$$

Dans ces équations, on a fait les hypothèses suivantes :

- approximation hydrostatique ;
- approximation de Boussinesq ;
- incompressibilité de l'eau ;
- forces astrales négligeables ;
- paramètre de Coriolis constant.

(u,v,w) sont les composantes de la vitesse selon les 3 axes (l'axe vertical étant dirigé vers le haut), f est le paramètre de Coriolis, S est la salinité,  $\zeta$  l'élévation de la surface et  $\rho_0$  la masse volumique de l'eau douce. Les coefficients  $N'/\rho = N$  et K sont les coefficients de viscosité et de diffusion turbulente qui paramètrent les échanges turbulents selon les trois axes. On considère les coefficients horizontaux constants dans l'espace et dans le temps.

Les gradients horizontaux de pression dans les équations (1) et (2) sont exprimés à partir de l'équation hydrostatique (5) et de l'équation d'état (6) en fonction de la pente de la surface et du gradient horizontal de la salinité moyenne S sur la verticale.

L'équation de la continuité (3) est transformée par le biais de deux intégrations différentes pour obtenir les variations de la surface de l'eau et la valeur de la vitesse verticale à chaque profondeur.

Par intégration entre le fond (-h) et la surface ( $\zeta$ ), il vient :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

avec :

$$\bar{U} = \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad \bar{V} = \int_{-h}^{\zeta} v dz$$



De la même manière, il vient :

$$w(x,y,z) = - \int_{-h}^z \frac{\partial u}{\partial x} dz - \int_{-h}^z \frac{\partial v}{\partial y} dz \quad (8)$$

On obtient ainsi 5 équations 1, 2, 4, 7, 8 que l'on résout directement en conservant les termes non linéaires. Une approximation supplémentaire a été introduite à ce stade pour simplifier les calculs : les salinités moyennes  $\bar{S}(x,y)$  sont approximées en salinités ponctuelles  $S(x,y,z)$ , ce qui restreint les applications du modèle à des estuaires peu stratifiés ou dont les profils verticaux de salinité sont peu différents sur l'horizontale. Cette restriction pourrait aisément être levée en incorporant au modèle le calcul de l'intégrale des salinités sur la verticale.

Les intégrales de chaque composante  $u$  et  $v$  et les débits d'eau  $U$  et  $V$  sont calculés en considérant chaque variable comme une fonction continue de la profondeur. Les intégrales peuvent alors être évaluées de façon précise à l'aide de fonctions splines à une dimension rejoignant les points de calcul et satisfaisant les conditions aux limites à la surface et au fond. Cette procédure permet également d'extrapoler leurs valeurs en des points virtuels extérieurs au domaine d'intégration qui sont utilisés dans les expressions en différences finies lorsque deux colonnes d'eau voisines n'ont pas le même nombre de points sur la verticale. Cette technique, qui fait l'originalité de ce modèle tridimensionnel, permet de résoudre les équations en tenant compte de la forme réelle du domaine et de ses variations temporelles.

La méthode d'intégration numérique a été décrite en détail par Thouvenin (1983) et Thouvenin *et al.* (1984).

### 3. Tests de validation

Pour vérifier le fonctionnement correct du modèle, on a réalisé plusieurs essais de validation dans des cas schématisés pour lesquels on disposait soit de solutions analytiques, soit de résultats d'autres modèles. On étudia successivement : l'effet du vent sur un océan infini, les mouvements d'inertie, les courants de densité dans un bassin rectangulaire, la propagation et la réflexion d'une onde de type Kelvin, et l'effet d'un sillon oblique dans un canal. Ces essais sont détaillés dans les publications citées plus haut.

Le modèle a, ensuite, été appliqué à la Baie de Seine pour reproduire les champs de courant tridimensionnels et l'advection/dispersion du sel.

### 4. Application à la Baie de Seine

Certaines caractéristiques de la marée dans la Baie rendent sa modélisation particulièrement délicate :

- le rapport marnage/profondeur est important ;
- la courbe des niveaux est fortement déformée, elle présente à la fois un front raide et une "tenue de plein" ;
- les profondeurs varient beaucoup entre l'ancienne vallée de la Seine (45 m) et les petits fonds de l'estuaire et du Sud de la Baie ;
- la frontière ouverte est très longue.

La limite de la zone a été choisie sur le parallèle joignant Antifer à Barfleur.

Les pas d'espace sont de 4 km dans le plan horizontal et de 4 m dans le plan vertical (Fig. 1).

Les conditions aux limites et les conditions initiales, pour les courants et les niveaux, sont fournies par le modèle bidimensionnel horizontal de la Baie (Salomon, 1985 dans ce même recueil), dont le pas d'espace est de 2 km.

Les conditions initiales de salinité sont issues de mesures sur le site.

La situation que nous avons choisie correspond à la journée du 3 octobre 1978 dans une période de vives eaux, le débit fluvial de la Seine étant égal à  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ .

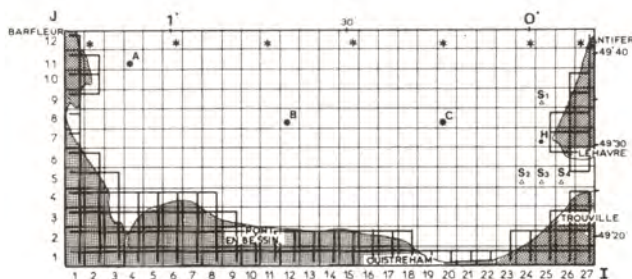


Fig. 1 : Grille horizontale de calcul.

Les composantes du courant intégrées sur la profondeur fournies par le modèle bidimensionnel sont développées sur la verticale pour le modèle tridimensionnel en respectant un profil de type Prandtl.

Les coefficients de viscosité et de diffusion ont été choisis de façon empirique, en se basant sur des expressions déjà employées dans un précédent modèle, en plan vertical, de l'estuaire de la Seine (Salomon, 1981).

$$k_{ft} = 5.10^{-3} \text{ MKS (coefficient de frottement)}$$

$$N_x = 10000 \text{ MKS} = N_y \text{ (viscosité horizontale)}$$

$$K_x = 30 - |u| \text{ DX}/4 \quad K_y = 30 - |v| \text{ DY}/4 \text{ (diffusion horizontale)}$$

$$N_z = 7.10^{-4} + 5.10^{-2} \bar{U} \log_{10} (0,1 z^3 + 1) (1 + 7 R_i)^{-0,25}$$

$$K_z = 7.10^{-4} + 5.10^{-2} \bar{U} \log_{10} (0,1 z^3 + 1) (1 + R_i)^{-1,75}$$

$\bar{U}$  = vitesse moyenne sur la profondeur

$$R_i = \text{nombre de Richardson global } R_i = \frac{ag H \Delta S}{\bar{U}^2}$$

Deux essais ont été menés, en considérant l'eau homogène, puis en tenant compte des gradients de densité.

#### 4.1. Premier essai : eau homogène

Les figures 2 et 3 montrent un exemple de la circulation tridimensionnelle dans la Baie, en coupes verticales, longitudinales (Fig. 2) et transversales (Fig. 3). L'axe vertical a été dilaté par rapport aux axes horizontaux. On observe sur ces champs de vitesse certains effets de la topographie :

- mouvements verticaux en profondeur, invisibles en surface ;
- inversion de vitesse verticale due à des accidents de la topographie (coupe xOz, j = 5, en i = 5,6) ;
- inversion de la composante longitudinale du courant (coupe xOz, j = 9, en i = 3).

En ce point, le courant porte à l'Est et suit la côte, tandis qu'au fond il est dirigé vers l'Ouest, parallèlement à la ligne de la topographie. Les hodographes de surface et de fond ont alors des directions différentes (Fig. 4).

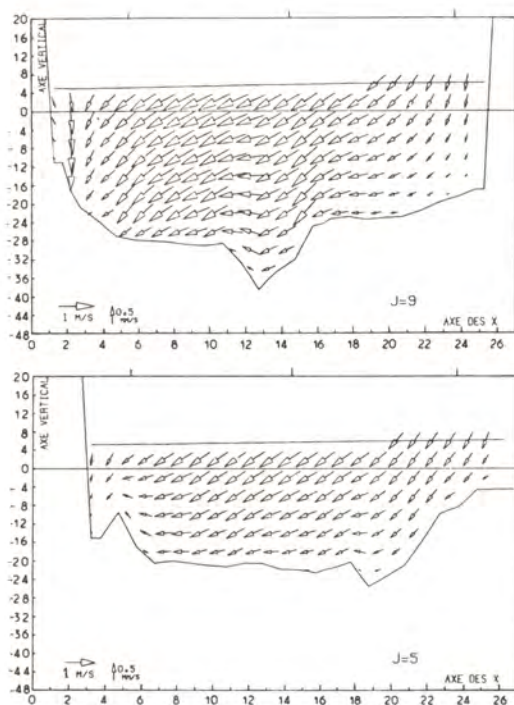
On retrouve également le déphasage du courant sur la verticale qui peut donner lieu à une inversion de la vitesse au moment de la renverse (point A - cf. Fig. 1) ; Fig. 5a). Cette avance du fond par rapport à la surface est observée sur les projections horizontales des vitesses en ce point ; l'hodographe de fond est décalé vers la gauche par rapport à l'hodographe de surface (Fig. 5b).

#### 4.2. Deuxième essai : densité variable

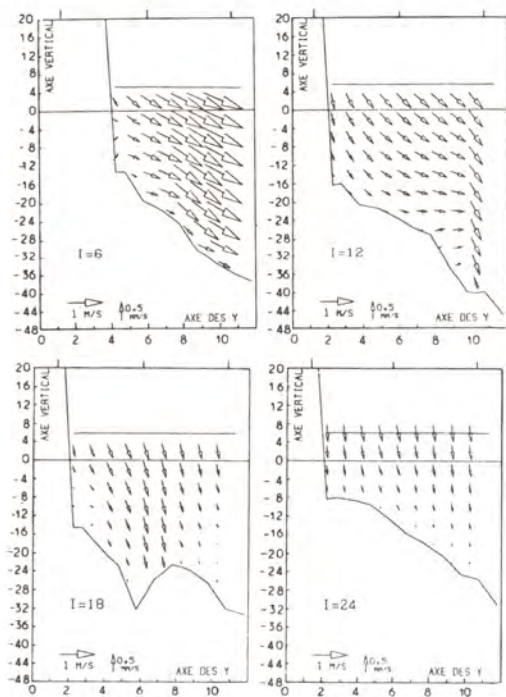
A partir d'un champ de salinité qui est utilisé comme condition initiale, le modèle permet d'observer les effets des gradients de densité sur la structure tridimensionnelle des courants.

Nous ne prendrons ici que l'exemple du point S<sub>3</sub> dans l'estuaire (position





**Fig. 2** : Coupes verticales Ouest-Est du courant (se référer à la Fig. 1 pour positionner les ordonnées).



**Fig. 3** : Coupes verticales Sud-Nord en différentes abscisses  $i$ .

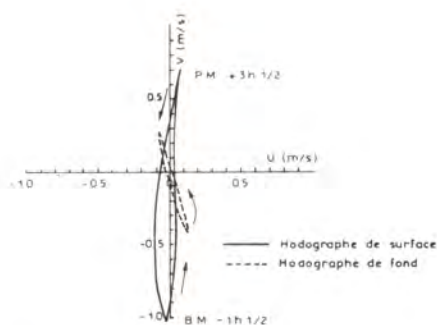


Fig. 4 : Hodographes au point  $i = 3, J = 9$ . Influence de la topographie.

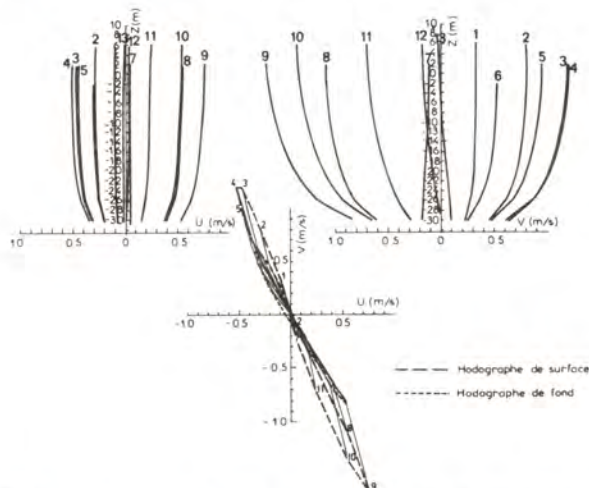


Fig. 5 : a) Profils verticaux des composantes  $u$  et  $v$  au point A.  
b) Projection horizontale des vitesses au point A. Hodographes de fond et de surface (courbe N° 1 : Pleine-Mer du Havre + 1 heure 1/2).

Fig. 1) où les gradients horizontaux de salinité sont assez forts ( $0,9 \text{ ‰ par km}$ ). On observe en ce point un basculement des profils verticaux de la composante Ouest-Est du courant (Fig. 6) provoqué par l'intensification du courant au fond vers les eaux moins salées de l'estuaire.

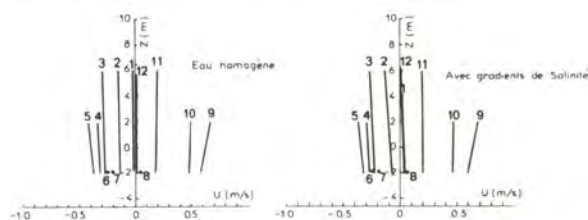


Fig. 6 : Evolution des profils verticaux du courant  $U$  pendant une marée au point  $S_3$ .

Ce cisaillement vertical plus important est reproduit sur les hodographes intégrés (Fig. 7) tracés en surface et au fond dans le premier et le deuxième essais. Lorsque la stratification est prise en compte, on observe des "vitesses résiduelles" (vecteur joignant les points 1 et 12) contraires en surface et au



fond, typiques d'une circulation d'estuaire, et prédites par la théorie.



Fig. 7 : Hodographes intégrés en surface et au fond au point S3.

## 5. Conclusion

L'intérêt du travail se situe sur deux plans :

- Concernant la modélisation, nous avons élaboré un outil numérique dont l'avantage est d'être réellement tridimensionnel, de ne pas faire intervenir la notion de couche horizontale, de pouvoir traiter un domaine de forme complexe sans limitation de l'amplitude des variations de niveau et de respecter une position fixe des points de calcul.

Les contraintes imposées par cette technique sont une stabilité numérique assez faible, mais acceptable en milieu côtier, pour une discrétisation spatiale de quelques kilomètres. Les paramètres d'échange turbulents n'ont été introduits ici que sous une forme empirique assez grossière.

Mais un modèle "3D" est une construction numérique complexe, qui doit évoluer et s'améliorer longuement avant de parvenir à une configuration optimale, adaptée à la résolution des problèmes concrets qui se posent à l'océanographie côtière. On le vérifie à propos des modèles "2D", qui s'améliorent encore aujourd'hui.

- Au plan de la dynamique de la Baie de Seine, le modèle a mis en évidence des phénomènes typiquement tridimensionnels : le déphasage du courant entre le fond et la surface, la déviation du courant près du fond du fait de la topographie, l'action des gradients de salinité qui créent une circulation inversée entre le fond et la surface, ainsi que des mouvements verticaux.

Ces quelques résultats restent schématiques, le modèle devra être amélioré, étalonné et vérifié plus complètement avant de prétendre représenter des phénomènes dynamiques fins. On devra également disposer de conditions aux limites précises sur les frontières extérieures.

Pourtant, la plupart des problèmes liés à la dynamique des eaux, qu'il s'agisse d'efforts sur les fonds, de déplacements sédimentaires, du mouvement réel des masses d'eau et de leur contenu en substances dissoutes ou en organismes vivants, de problèmes de dispersion et de mélange, tous recueilleront d'innombrables informations de ces champs de courants tridimensionnels.

Beaucoup de travail demeure à accomplir, mais c'est une perspective qu'il faudra se fixer pour les années à venir.

BLUMBERG A. et MELLOR G.L. (1980).- A coastal ocean numerical model. Lecture notes on coastal and estuarine studies. Mathematical modelling of estuarine physics, edited by J. Sundermann et al., Springer Verlag, Berlin, 203-214.

DAVIES A.M. et OWEN A. (1979).- Three dimensional numerical sea model using the Galerkin method with a polynomial basis set. *Appl. Math. Modelling*, 3, 321-428.

DE BORNE DE GRANDPRE C. (1979).- Modèle bidimensionnel en temps réel de la circulation verticale estuarienne. Application à la Gironde. *Oceanol. Acta*, 2, 1 : 61-68.

- DE BORNE DE GRANDPRE C., EL SABH M.I. et SALOMON J.C. (1981).- A two-dimensional numerical model of the vertical circulation of tides in the Saint-Lawrence estuary. Estuarine, Coastal Shelf Sci., 12 : 375-387.
- FORRISTALL G.Z. (1974).- Three dimensional structure of storm generated currents. J. Geophys. Res., 79 : 2721-2729.
- HAMILTON P. (1975).- A numerical model of the vertical circulation of tidal estuaries and its application of the Rotterdam Waterway. Geophys. J.R. Astron. Soc., 40 : 1-21.
- HAMILTON P. (1976).- On the numerical formulation of a time dependent multi-level model of an estuary, with particular reference to boundary conditions. Estuarine Processes, 2, Martin Wiley ed.
- HEAPS N.S. (1971).- On the numerical solution of the three dimensional hydrodynamic equations for tides and storm surges. Mem. Soc. R. Sci., Liège, 6, 2 : 143-180.
- HEAPS N.S. (1980).- Spectral method for the numerical solution of the three dimensional hydrodynamic equations for tides and surges. In : Notes on coastal and estuarine studies, mathematical modelling of estuarine physics, edited by J. Sundermann et al., Springer-Verlag, Berlin, 75-89.
- LEENDERTSE J.J. et LIU S.K. (1975).- Three dimensional flow simulation in estuaries. The Rand Paper Series, 5452.
- LEENDERTSE J.J. et LIU S.K. (1978).- A three dimensional turbulent energy model for non homogeneous estuaries and coastal sea systems. In : Hydrodynamics of estuaries and fjords, edited by J.C.J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam, 387-405.
- LE HIR P. (1980).- Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la baie de Seine. Thèse de 3ème Cycle, Université de Bretagne Occidentale, 122 p.
- NIHOUL J.C.J. (1977).- Three dimensional model of tides and storm surges in a shallow well mixed continental sea. In : Dynamics in atmosphere and oceans, 2, edited by J.C.J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam, 29-47.
- SALOMON J.C. (1981).- Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary. In : Ecohydrodynamics, edited by J.C.J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam.
- SALOMON J.C. et LE HIR P. (1981).- Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation numérique des phénomènes physiques. Université de Bretagne Occidentale, 286 p.
- SHENG Y.P., LICK W., GEDNEY R.T. et MOLLS F.B. (1978).- Numerical computation of three dimensional circulation in lake Erie. A comparison of a free-surface model and a rigid-lid model. J. Geophys. Oceanogr., 8 : 713-727.
- THOUVENIN B. (1983).- Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion pour des régions côtières à marée. Thèse de 3ème Cycle, Université de Bretagne Occidentale, 269 p.
- THOUVENIN B. et SALOMON J.C. (1984).- Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion en zone côtière à marée. Oceanologica Acta, Vol. 7, N° 4 : 417-429.



COURANTOMETRIE EN BAIE DE SEINE : COMPARAISON D'UNE MODELISATION NUMERIQUE ET DE MESURES PAR RADAR.

BROCHE P.\*, SALOMON J.C.\*\*\*, de MAISTRE J.C.\*, DEVENON J.L.\*.

Les modèles bidimensionnels de courant de marée sont de plus en plus utilisés pour obtenir une description de la circulation dans les zones côtières. Ils résolvent les équations de l'hydrodynamique à partir de conditions initiales sur tout le domaine et de conditions aux limites qui portent le plus souvent sur des hauteurs d'eau. L'imprécision des conditions sur les frontières ouvertes et les approximations inhérentes aux processus mathématiques d'intégration et à la modélisation physique de certains phénomènes (frottement, turbulence), amènent à attacher une attention particulière à la validation de ces modèles. Les radars décimétriques cohérents (ou radars HF Doppler) constituent une technique de courantométrie qui paraît bien adaptée à cette finalité : les mesures que l'on en obtient ont en effet des échelles d'intégration spatiale et temporelle comparables à celles des modèles, et leur couverture spatiale étendue (les mesures sont effectuées simultanément en plusieurs dizaines de points) donne à la comparaison une généralité originale.

Cette communication décrit les résultats d'une telle comparaison effectuée à propos de la partie occidentale de la Baie de Seine.

1. MODELISATION NUMERIQUE DES COURANTS DE MAREE.

Le modèle utilisé (Salomon *et al.*, 1980; Mariette *et al.*, 1982) est un modèle bidimensionnel en plan horizontal, traité par un procédé de différences finies dont le pas d'intégration temporelle est de 5 minutes et le pas de discrétisation spatiale de 2 km. Il est piloté par des conditions de niveau issues de l'atlas des composantes de marée en Manche, telles qu'elles ont été observées sur un modèle physique tournant (Chabert *et al.*, 1978). Sept points sont utilisés sur la ligne Barfleur-Antifer, entre lesquels il est procédé à des interpolations. C'est un modèle de prédiction, qui ne fait appel à aucune mesure directe relative à la période et à la zone concernées. Une présentation plus détaillée en est donnée dans une autre communication à ce Colloque (Salomon, 1985).

2. MESURES PAR RADAR.

Dans la gamme décimétrique (typiquement pour une fréquence  $f=10$  MHz, de longueur d'onde  $\lambda=30$  m), l'écho radar provient de la rétrodiffusion cohérente sur les vagues de longueur d'onde  $\lambda/2$  qui se propagent dans la

\* Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre (LSEET), Université de Toulon, 639, Bd. des Armaris, 83100 Toulon (CNRS UA 705).

\*\* Laboratoire d'Océanographie Physique, Université de Bretagne Occidentale, 6, Avenue Le Gorgeu, 29000 Brest (CNRS UA 712).

direction du faisceau radar. Leur vitesse est sensible à l'action du courant : la théorie montre qu'elle subit une modification égale à la projection dans leur direction de propagation de la vitesse du courant à la profondeur  $\lambda/8\pi$ , soit 1,25 m à la fréquence  $f=10$  MHz. La mesure de l'effet Doppler de l'écho (ou, plus précisément, le traitement de son spectre de fréquence, cf. Broche et al., 1983) permet ainsi la mesure de la composante parallèle au faisceau radar de la vitesse du courant à cette profondeur. L'usage de deux radars couvrant simultanément le même site sous deux angles de visée différents permet d'obtenir le vecteur courant complet.

Pour l'étude réalisée en Baie de Seine, les deux radars ont été installés à Lestre (Manche) et Grandcamp-Maisy (Calvados). Leurs caractéristiques techniques ont permis d'explorer, dans le domaine concerné par le modèle décrit ci-dessus, 20 points de mesure depuis Lestre (sur 6 azimuts et à 4 distances) et 6 points depuis Grandcamp (sur 2 azimuts et à 3 distances) (figure 1).

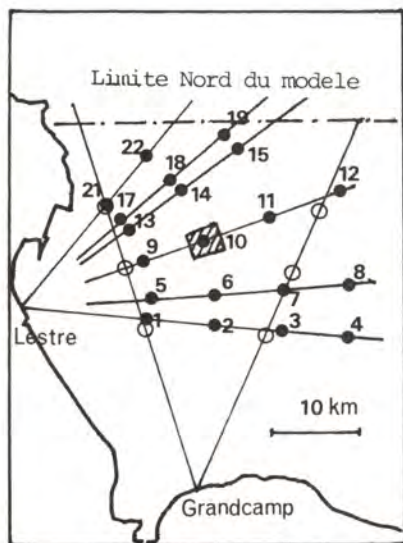


Figure 1 - Localisation des radars et des cellules sondées par chacun d'eux. Un exemple illustrant l'extension de chaque cellule est donné pour la cellule n° 10.

L'écho analysé provient en fait d'une portion finie de la surface de la mer ("cellule de mer") dont l'étendue, fonction des caractéristiques des radars et de la distance à chaque station, est de l'ordre d'une dizaine de km<sup>2</sup>. Le temps d'intégration nécessaire à une mesure est d'autre part de quelques minutes. Ces deux échelles d'intégration sont tout à fait comparables à celles du modèle. La précision des mesures dépend de la durée d'intégration et de la variabilité spatiale et temporelle du courant. Elle a pu être estimée théoriquement et évaluée directement à partir des résultats expérimentaux. Les deux méthodes donnent des valeurs concordantes, variant de 3 à 7 cm/s suivant la localisation de la cellule (les valeurs les plus grandes sont obtenues près de la côte) et suivant l'importance de la marée (cf. Broche et al., 1984).

L'expérience s'est déroulée pendant une période d'une vingtaine de jours en septembre-octobre 1982, dans laquelle on a sélectionné, pour la comparaison, les journées des 27 et 30 septembre et 2 octobre, qui correspondent respectivement à des marées faible, moyenne et forte.

### 3. COMPARAISON DES RESULTATS.

Une première comparaison qualitative est obtenue en reportant sur un même graphique les variations des mesures de vitesse radiale par le radar,  $r(t)$ , et des valeurs fournies par le modèle,  $m(t)$ . Quelques exemples sont donnés sur la figure 2. On constate des cas où l'accord est presque parfait, et des cas où existent des différences significatives d'amplitude ou de phase.

Pour procéder à une étude plus quantitative, on doit d'abord effectuer sur l'ensemble des données,  $r$  et  $m$ , un filtrage des composantes résiduelles de très basse fréquence, puisque le modèle ne prend en compte que les effets de la marée, alors que les mesures incluent les effets de tous les mécanismes possibles, et notamment ceux du vent (courant d'Ekman et dérive de Stokes).



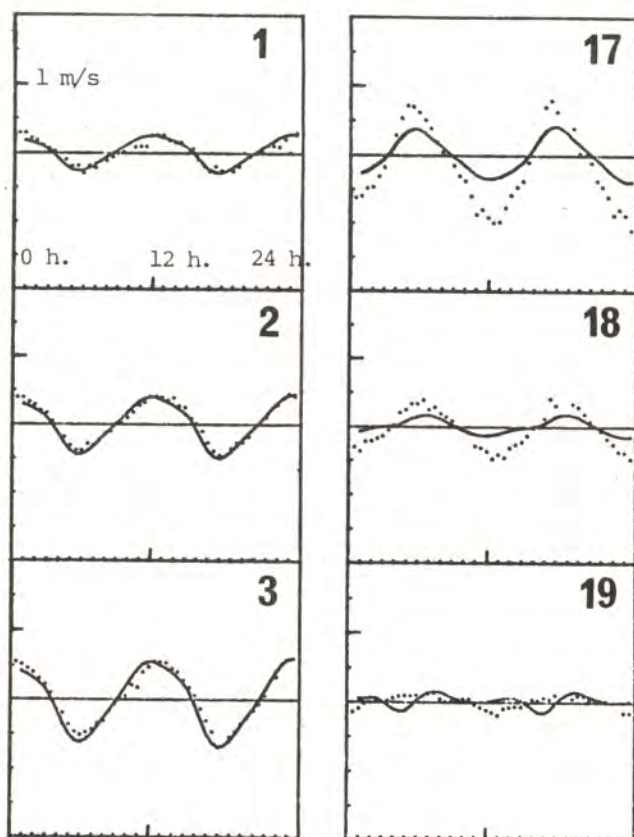


Figure 2 - Exemples de séries temporelles des composantes radiales de la station de Lestre, obtenues du modèle (trait plein) et des mesures (pointillés). Ces résultats se rapportent au 30 septembre, et aux cellules repérées par leur numéro (en haut à droite de chaque graphique, cf figure 1).

On peut alors :

(i) calculer l'écart quadratique moyen  $\sigma$  entre les deux séries temporelles  $r$  et  $m$ , donné par :

$$\sigma^2 = \langle (r(t) - m(t))^2 \rangle$$

Pour un tiers des cellules cet écart est inférieur au double de l'incertitude (intervalle de confiance à 95% dans l'hypothèse gaussienne) sur  $r$ , donc pratiquement non significatif. C'est d'autre part au voisinage de la côte qu'il est le plus important.

(ii) comparer les amplitudes et phases des composantes spectrales des séries  $r(t)$  et  $m(t)$  à la fréquence des modes de marée; compte-tenu de la durée limitée des données, l'analyse spectrale est effectuée par une méthode de moindres carrés qui optimise l'écart entre chaque série et une fonction sinusoïdale de période égale à la période du mode semi-diurne dominant (12,4 heures). Comme il est impossible de discriminer entre les modes M2 et S2, l'amplitude est en fait celle qui résulte de leur battement, elle varie donc comme le coefficient de marée. Les résultats obtenus pour la station de Lestre sont illustrés sur la figure 3.

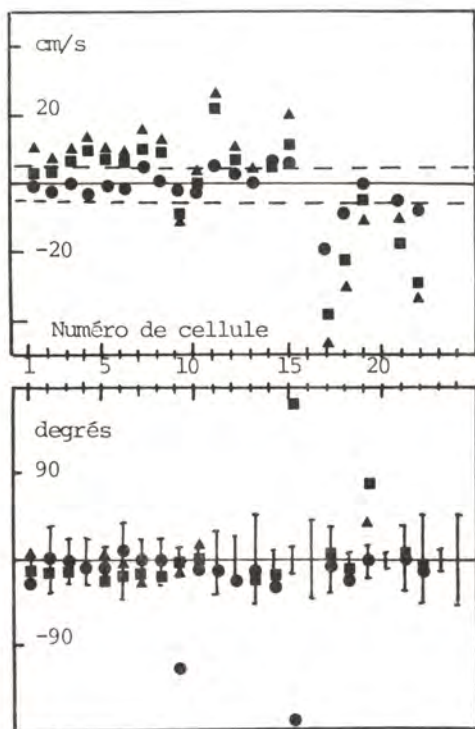


Figure 3 - Différences d'amplitude et de phase entre les composantes semi-diurnes des vitesses radiales données par le modèle et par les mesures, dans les différentes cellules repérées par leur numéro. Les dates correspondantes sont respectivement le 27 septembre (cercles), le 30 septembre (carrés), et le 2 octobre (triangles). Les intervalles reportés sur ces tracés correspondent au double de l'incertitude d'origine expérimentale (pour l'amplitude, seule une valeur moyenne a été reportée).

Les aspects les plus significatifs en sont les suivants :

- l'importance de l'écart en amplitude croît avec l'intensité de la marée; les écarts observés le 27 septembre sont presque tous inférieurs à 5 cm/s, alors qu'ils atteignent 10 cm/s le 30 et dépassent cette valeur le 2 octobre.

- lorsqu'ils sont supérieurs à l'incertitude liée aux mesures, les écarts présentent un caractère systématique, conservant, en une cellule donnée, le même signe : le modèle conduit à des vitesses supérieures aux mesures dans la plupart des cellules, excepté dans celles qui correspondent aux deux azimuts les plus au Nord.

- les écarts observés le 30 septembre et le 2 octobre sont pratiquement du même ordre de grandeur que l'écart quadratique moyen observé précédemment, ce qui montre bien que cet écart est dû pour une faible part seulement aux incertitudes sur  $r$ , et pour l'essentiel à une différence systématique d'amplitude entre  $r$  et  $m$ .

- la différence de phase, de une à quelques dizaines de degrés, est du même ordre de grandeur que l'incertitude attachée à l'analyse de  $r$ , et donc non significative. Les quelques exceptions concernent des cellules où la composante radiale a une amplitude voisine de zéro : une faible différence dans les valeurs peut se traduire par un changement de signe, donc une variation de phase de  $180^\circ$ .



(iii) comparer les vecteurs courant aux 6 cellules couvertes par la station de Grandcamp, où, par interpolation des données de Lestre, les deux composantes cartésiennes ont pu être obtenues avec une précision de l'ordre de 10 cm/s. La comparaison porte sur les paramètres des ellipses de marée obtenues des radars et du modèle (figure 4).

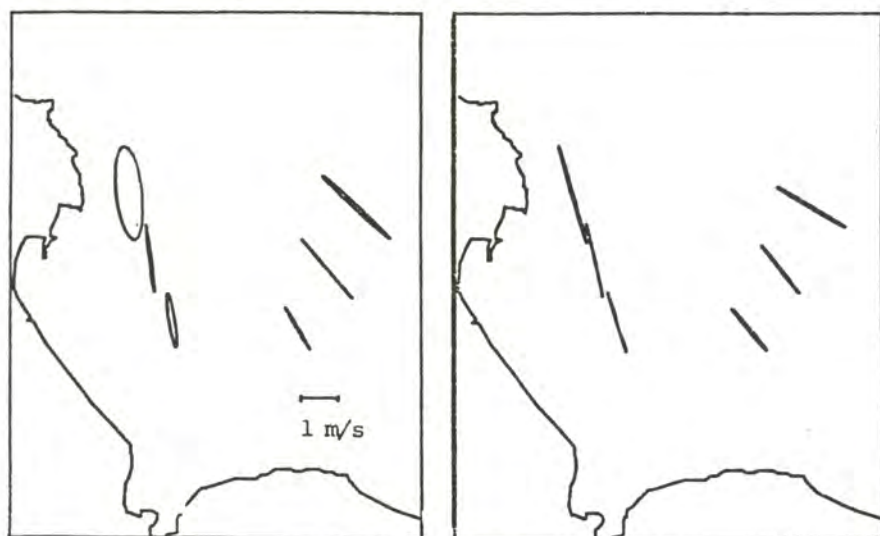


Figure 4 - Exemples d'ellipses de marée obtenues des mesures (à gauche) et du modèle (à droite) dans les 6 cellules couvertes par le radar situé à Grandcamp. Cette figure se rapporte au 2 Octobre.

Les principaux résultats sont les suivants :

- la direction des ellipses s'accorde à mieux que  $10^\circ$  près, et même à mieux que  $5^\circ$  près dans 2/3 des cas.
- le courant maximum s'accorde à mieux que 10 cm/s dans la moitié des cas.
- le courant minimum est inférieur à l'incertitude correspondante, et donc cohérent avec ce que donne le modèle (ellipses réduites à des segments), excepté au point le plus voisin du Cotentin.

#### 4. DISCUSSION.

Les échelles d'intégration en profondeur sont différentes pour les deux procédés (environ 1.25 mètre pour le radar, aux fréquences voisines de 10 MHz qui ont été utilisées, toute la profondeur d'eau pour le modèle). Toutefois, pour des courants de marée qui varient peu avec la profondeur sauf très près du fond, cette influence est probablement mineure et, les échelles d'intégration spatiale et temporelle étant au contraire du même ordre de grandeur, les différences observées traduisent essentiellement l'effet cumulé des incertitudes des deux méthodes. Deux types de différence sont en fait observés :

- (i) sur l'essentiel de la zone, le modèle paraît surestimer d'au plus une dizaine de cm/s l'amplitude du mode semi-diurne, sans déphasage significatif. Il arrive que cet écart soit supérieur à la seule incertitude d'origine

expérimentale. La différence ainsi mise en évidence chiffre la précision du modèle, qui est de quelques cm/s à une dizaine de cm/s, du même ordre que celle des procédés courantologiques classiques. Plusieurs causes contribuent à cette limitation : l'imprécision sur les conditions aux limites, la discrétisation de la description du domaine (bathymétrie et tracé des côtes), la modélisation du frottement et de la viscosité latérale.

(ii) près de la pointe de Barfleur, un écart important se manifeste à la fois sur la composante radiale de Lestre et sur le vecteur courant. Modèle et mesures par radar s'accordent pour indiquer qu'il existe dans cette zone un fort gradient horizontal de courant. Cette situation est défavorable à la fois aux mesures de composantes radiales (le courant est très inhomogène à l'intérieur des cellules de mer), et à la reconstitution du vecteur courant (la procédure d'interpolation linéaire qui est utilisée peut être mise en question). La différence observée traduit en somme la limitation de la résolution des radars, par la dimension des cellules et par la distance qui les sépare : des gradients trop importants à l'échelle de ces résolutions ne peuvent pas être rendus. C'est aussi dans cette zone que les incertitudes propres au modèle sont les plus importantes (proximité de la côte, de la frontière ouverte, ...).

La comparaison présentée porte sur une étendue totale de plusieurs centaines de km<sup>2</sup>. Partout où la résolution des radars est suffisante à l'échelle des gradients de courant que l'on peut rencontrer, on a obtenu un accord convenable entre les résultats des mesures et ceux du modèle, dont la précision a pu ainsi être estimée.

L'utilisation des radars HF apparaît, à la lumière de ces résultats, comme un outil très positif pour une validation globale des modèles numériques de circulation côtière. Des progrès dans la résolution apparaissent souhaitables pour l'étude des régions de fort gradient. On peut enfin envisager le développement de méthodes d'optimisation dans lesquelles les modèles intégreraient, avec un poids adapté à leur précision, les mesures, de façon à ajuster certains paramètres difficiles à modéliser a priori.

---

Broche P., J.C. de Maistre, P. Forget (1983) - Mesure par radar décimétrique cohérent des courants superficiels engendrés par le vent. Oceanologica Acta, Vol. 6, n° 1.

Broche P., J.C. de Maistre, J.L. Devenon (1984) - Courantométrie par radar HF en Baie de Seine. Rapport Scientifique CNEXO.

Chabert d'Hières G., C. Le Provost (1978) - Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. Annales hydrographiques, Vol. 6, n° 3.

Mariette V., G. Rougier, J.C. Salomon, B. Simon (1982) - Courants de marée en mer d'Iroise. Oceanologica Acta, Vol. 5, n° 2.

Salomon J.C., P. Le Hir (1980) - Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation numérique des phénomènes physiques. Rapport Scientifique UBO/CNEXO.

Salomon J.C. (1985) - Courantologie de marée en Baie de Seine. Ce volume, N° 2



## APPROCHE DE LA CIRCULATION RESIDUELLE EN BAIE DE SEINE.

LE HIR P.\*, SALOMON J.C.\*\*, LE PROVOST C.\*\*\*, CHABERT D'HIERES G.\*\*\*,  
MAUVAIS J.L.\*.

### INTRODUCTION

La dynamique de la baie de Seine est dominée par le courant de marée. Cependant, les excursions des particules au cours d'une marée sont bien inférieures aux dimensions de la baie, de telle sorte que l'étude du devenir des masses d'eau - et en particulier de la dilution du fleuve - exige la connaissance de l'hydrodynamique à échelle de temps supérieure à la période de marée, ce que nous appelons la circulation résiduelle.

Il est usuel de distinguer les courants résiduels "eulériens" qui sont des moyennes de vitesses en des points fixes et les courants résiduels "lagrangiens" qui désignent des vitesses réelles de déplacements. Les premiers sont utiles au sédimentologue ou au benthologue qui s'intéresse au courant que subit une particule ou un organisme qui se déplace peu, tandis que les seconds concernent les trajectoires effectives des masses d'eau et, dans une certaine mesure, celles des éléments en suspension. Dans notre travail, nous abordons principalement ce dernier aspect de la circulation résiduelle, en traitant séparément les différents phénomènes physiques concernés.

### 2. TEMPS DE STOCKAGE DE L'EAU DOUCE.

Pour évaluer l'importance du temps de résidence des eaux dans la baie on peut calculer le temps de stockage de l'eau douce obtenu en divisant le volume d'eau douce dans la baie par le débit de la Seine. Ce volume d'eau douce est estimé par rapport au volume total en fonction d'un déficit relatif en sel ( $S_{ref}-S$ )/ $S_{ref}$ , où  $S$  est la salinité locale et  $S_{ref}$  la salinité de l'eau de mer "Pure".

Le calcul a été effectué pour des situations observées lors de quatre campagnes hydrologiques en Baie de Seine, et est reporté sur la figure 1. Une valeur moyenne de la salinité en Manche, 34,5‰, est prise comme salinité de référence. Il apparaît que le régime saisonnier n'est pas très marqué et que le volume d'eau douce reste de l'ordre de 3% du volume total de la baie, sauf pour la campagne d'octobre 83 qui a suivi une période d'étiage prolongée. Les temps de stockage obtenus varient entre 43 et 113 jours, avec un minimum en hiver qui correspond sans doute à une expulsion des eaux douces en surface induite par des courants de densité plus forts (cf. § 5). Ces temps de stockage relativement longs entraînent un temps de renouvellement global de la baie au moins aussi long. On peut déduire une vitesse résiduelle-type: une particule d'eau devant quitter la baie de Seine doit en moyenne parcourir 100 km en 50 jours, ce qui donne un courant de 2,3 cm/s.

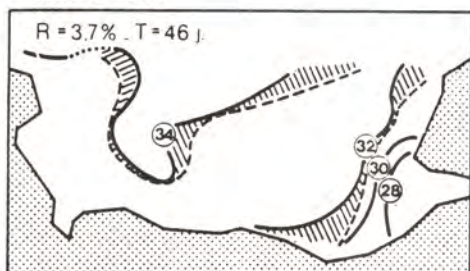
\* Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, 29273 Brest Cedex.

\*\* Laboratoire d'Océanographie Physique, Université de Bretagne occidentale, 29283 Brest Cedex.

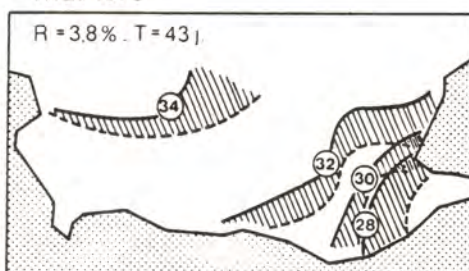
\*\*\* Institut de Mécanique de Grenoble, B.P. 68, 38402 Saint Martin d'Hères.

Ce dernier calcul néglige l'effet de la diffusion sur le déplacement à long terme des particules. Mais de nombreuses expériences ont montré que celui-ci devient faible vis-à-vis de l'effet de la convection dès que les courants résiduels dépassent le centimètre par seconde. Nous sommes dans ce cas.

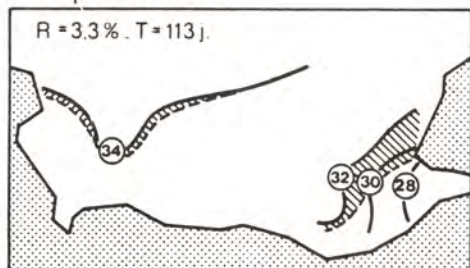
Mars 1979



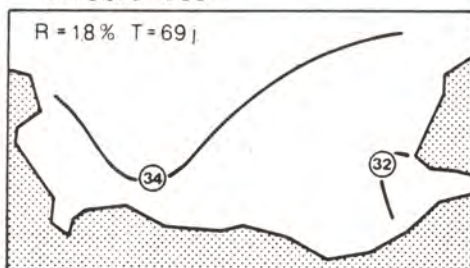
Mai 1978



Sept. Oct. 1978



Octobre 1983



$$R = \frac{\text{Volume d'Eau douce pour une Eau marine de Salinité } 34.5 \text{ ‰}}{\text{Volume total } (11.10^{10} \text{ m}^3)}$$

$$T = \text{Temps de Stockage de l'Eau douce (jours)}$$

ISOHALINES(‰)

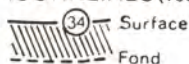


Fig. 1 : Structure haline en baie de Seine (Campagnes CNEXO)

### 3. LES SOURCES DE CIRCULATION RESIDUELLE.

Compte tenu de l'évaluation du temps de transit des masses d'eau en baie, on peut considérer que les vitesses résiduelles attendues en Baie de Seine sont de l'ordre de 0 à 5 cm/s, sauf cas d'exception. C'est ce qu'indiquent les moyennes des mesures (Le Hir et l'Yavanc, 1985). Plus généralement, on s'intéressera aux courants résiduels susceptibles de modifier notablement les caractéristiques du séjour des masses d'eau dans la baie, c'est-à-dire tels que le produit de leur vitesse par leur durée soit du même ordre que la dimension de la baie: ainsi un courant de 25 cm/s pendant 2 jours suffirait pour expulser les eaux de la Seine hors de la baie.

Selon ces caractéristiques de la circulation résiduelle, on peut distinguer trois principaux phénomènes sources :

- la marée qui n'est pas parfaitement sinusoïdale par le jeu des accélérations des topographies de fond et du frottement,
- les gradients de densité, dûs principalement au débouché de la Seine. On peut remarquer que le courant de continuité constitué par le débit du fleuve est négligeable, tandis que les mouvements induits par les gradients de salinité ne le sont pas.



- Les phénomènes météorologiques, surtout le vent. Mais le vent local n'est pas le seul facteur météorologique; la baie de Seine est reliée à la Manche qui a sa propre réponse aux vents et au champ de pression atmosphérique dans la région des îles Britanniques: il en résulte une pente de la surface et des courants principaux qui interviennent comme condition à la limite de la baie de Seine (Coeffe *et al.*, 1984).

La topographie du fond joue un rôle important car elle induit une déformation du champ de courant et donc des dérives "purement lagrangiennes". Cet effet est permanent et se manifeste principalement sur les courants instantanés qui sont les plus forts. La marée est donc la source la plus importante de dérive purement lagrangienne. Dans toute la suite, on admettra qu'il est possible de décrire les circulations résiduelles en superposant à la dérive lagrangienne de marée des courants résiduels eulériens induits par les autres facteurs cités précédemment.

#### 4. CIRCULATION RESIDUELLE DE MAREE.

La figure 2 présente à titre d'exemples des champs de courant résiduel lagrangien obtenus par simulations numériques d'une marée-type de vive-eau (Salomon, 1985), pour des heures de départ différentes: il est important

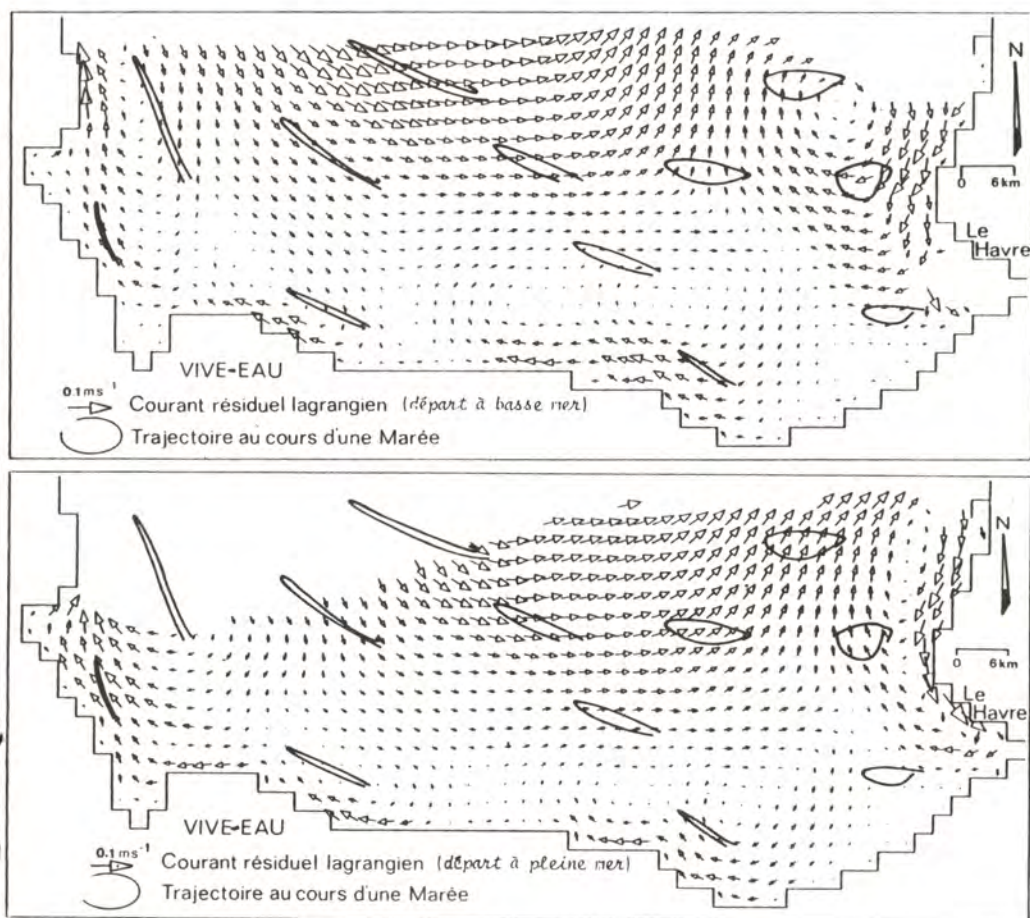


Fig. 2 Simulation bidimensionnelle du courant résiduel lagrangien



de rappeler que le devenir résiduel d'une particule après une marée dépend de la phase initiale de la marée. La différence est sensible dans les zones tourbillonnaires (car les centres des tourbillons se déplacent), en particulier devant la côte du Pays de Caux (à l'est): pour l'environnement le phénomène peut jouer un rôle considérable car un polluant rejeté devant le cap de la Hève pourra avoir un déplacement résiduel vers le nord ou vers le sud selon l'heure de lâcher et selon la proximité de la côte.

Les principales caractéristiques de la circulation résiduelle de marée sont les suivantes :

- a) formation de tourbillons côtiers tels que celui de Barfleur induit par le Cotentin ou ceux d'Antifer et de la côte du Calvados. Ceux là sont liés à la compétition entre la vortacité positive créée par le frottement latéral pendant le jusant et la vortacité négative formée de la même manière pendant le flot; le flot étant plus fort que le jusant, il en résulte des tourbillons anticycloniques. Ces structures lagrangiennes mises en évidence par modèle ont des vitesses caractéristiques de 5 cm/s et sont en général confirmées par les mesures eulériennes; ainsi des mesures devant Luc-sur-Mer donnent une résiduelle nord de 6 cm/s compatible avec le tourbillon de Ouistreham indiqué par le modèle. En ce qui concerne le tourbillon de Barfleur, les mesures lui confèrent une importance plus grande que le modèle, probablement parce que la limite de ce dernier est trop proche. D'ailleurs les modèles numériques de la Manche donnent un tourbillon anticyclonique de grande emprise à l'est du Cotentin (Maddock et Pingree, 1977; Lomer, 1978; Le Provost et Fornerino, 1984). Les vitesses résiduelles observées dans ce secteur atteignent 10 à 20 cm/s (Le Hir et L'Yavanc, 1985).

Ces tourbillons entraînent des recyclages de masses d'eau et ainsi augmentent localement leur temps de séjour. Par exemple un calcul de trajectoires indique qu'une particule "lâchée" devant Luc-sur-Mer est retrouvée au large de Ouistreham après 20 jours de simulation (Salomon, 1985).

- b) Dérive générale des masses d'eau vers l'est, particulièrement dans la partie nord de la baie où elle atteint 6 à 7 cm/s d'après modèle. Ce résultat n'apparaît pas dans les données eulériennes et n'a donc pas été vérifié; il peut être relié à la propagation vers l'est de l'onde marée. Sa valeur élevée mérite encore un examen plus approfondi qui ne pourra être conclu qu'à l'aide d'un modèle de plus grande emprise et de maille de calcul assez fine.

D'après la figure 2, cette dérive vers l'est concerne la moitié de la baie et entraîne les masses d'eau de l'ouest vers l'est en une vingtaine de jours. Ce schéma est tout à fait compatible avec les couvertures hydrologiques présentées en figure 1 ainsi qu'avec nombre d'images satellites.

Il faut noter que la marée a un effet barotrope et que les courants qui lui sont liés sont schématiquement semblables sur la verticale, sauf peut-être près du fond et des bords, à cause du frottement.

## 5. CIRCULATION HALINE.

Les apports d'eau douce par la Seine induisent des gradients de salinité et de température qui atteignent respectivement  $4.10^{-4}\%$   $m^{-1}$  et  $2.10^{-4}$   $^{\circ}C.m^{-1}$  (fig. 1). Par conséquent, du point de vue hydrodynamique, les effets des gradients de salinité sont largement prédominants. Ces effets sont décrits schématiquement dans une autre communication du présent recueil (Salomon, 1985). Rappelons qu'un gradient horizontal de densité induit un courant giratoire de la surface vers le fond, dirigé au fond vers les eaux les moins denses et en surface vers le large avec une déviation sur la droite due à la géostrophie. Compte tenu de la disposition des isohalines dans la partie orientale de la baie, on y obtient des courants convergents vers l'estuaire



au fond et globalement vers le nord-ouest en surface. Une mesure de fond réalisée à 15 km de l'embouchure de la Seine pendant deux mois d'hiver donne effectivement une vitesse moyenne de 6 cm/s vers l'est.

Afin de prendre en compte les déplacements des isohalines au cours d'un cycle de marée, nous avons calculé la structure verticale des courants en résolvant numériquement les équations résultant de la soustraction des équations de Saint-Venant aux équations de Navier-Stokes (Le Hir, 1980). La distribution des salinités est calculée à l'aide d'un modèle bidimensionnel horizontal, et le profil de viscosité choisi parabolique. Les résultats présentés sur la figure 3 confirment le schéma de circulation haline décrit plus haut avec des vitesses de l'ordre de 5 cm/s pour un gradient horizontal de densité égal à  $6.10^{-7} \text{ m}^{-1}$ . De plus l'effet de la topographie est évident: effectivement, dans les équations du mouvement, les termes de densité varient comme le carré de la profondeur.

#### 6. CIRCULATION INDUITE PAR LE VENT.

Il est impossible de bien décrire la circulation liée à la météorologie sans prendre en compte la réponse de la Manche aux vents et gradients de pression atmosphérique à grande échelle. Cependant, une simulation locale permet de comprendre la manière dont la baie réagit à un vent type et d'évaluer la durée et l'échelle des vitesses induites. C'est dans cet esprit que nous avons utilisé le modèle à 3 dimensions décrit par ailleurs (Thouvenin et Salomon, 1984).

La condition limite adoptée est celle d'un régime permanent hypothétique: dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement écrite parallèlement à la limite nord, on suppose un équilibre entre la pente de la surface, les contraintes en surface et au fond et la force de Coriolis. De plus l'interaction avec la marée n'est pas prise en compte. Nous avons réalisé un test pour lequel la contrainte sur le fond intègre un effet de marée de vive eau: les résultats convergent plus rapidement, avec des écarts de dénivellations de surface de 10 à 20% et des vitesses 30 à 50% plus faibles, mais les schémas de circulation décrits plus loin restent sensiblement les mêmes. Il faut remarquer que l'étude de l'effet du vent réel couplé à la marée nécessite un nombre impressionnant de calculs qui sont rendus vains par la méconnaissance des conditions à la limite.

Les simulations présentées en figure 4 correspondent à des champs uniformes de vents atteignant 15 m/s en 3 heures et se stabilisant. Un régime quasi permanent est atteint après 7 à 10 heures, sauf pour les vents d'est où se manifeste une oscillation du bassin (probablement à cause de l'effet Coriolis à la limite nord, qui n'agit pas de façon symétrique par vent d'est et par vent d'ouest). Mais en moyenne on observe une réponse à peu près inverse de la baie à des vents de directions opposées.

Par ailleurs, des effets de topographie sont mis en évidence :

- accélération des courants par faible profondeur (côtes du Calvados et du

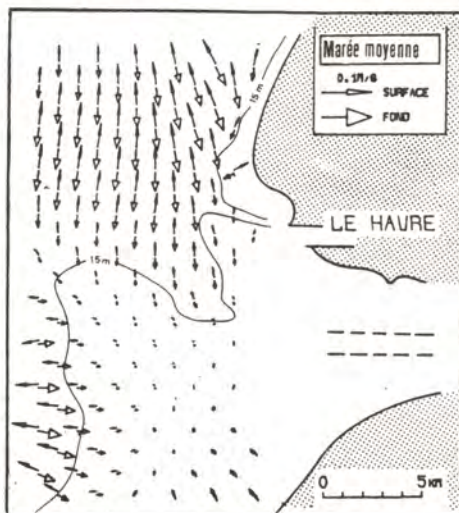


Fig. 3 : Simulation des fluctuations selon la verticale des courants de densité.

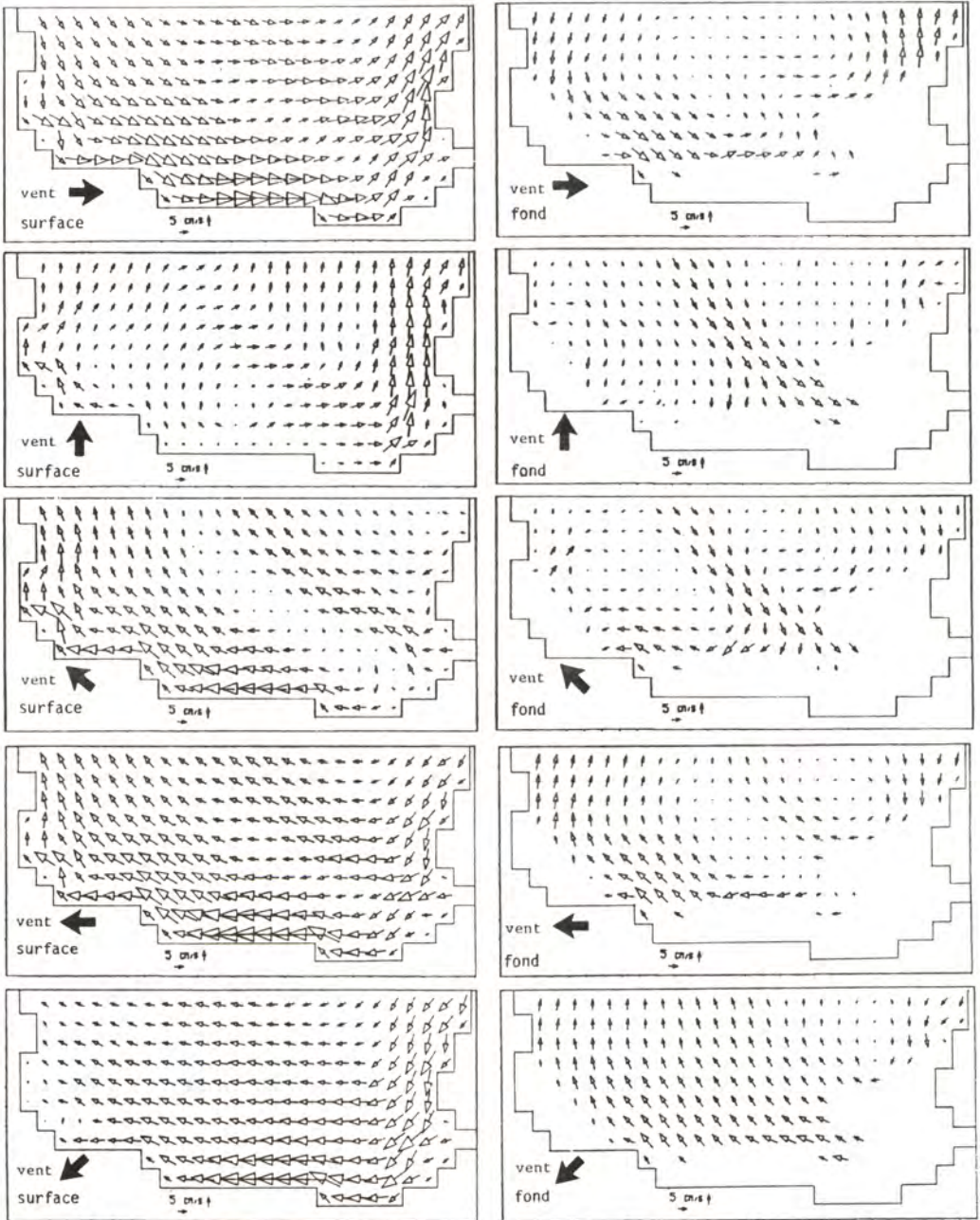


Fig. 4 : Simulations tridimensionnelles du vent en baie de Seine.



Pays de Caux): il en résulte une dissymétrie entre l'ouest et l'est où des vitesses très fortes sont atteintes (0,2 m/s pour un vent de 30 noeuds), - présence fréquente d'un courant de retour au fond de la paléovallée de la Seine accompagné en surface d'une réduction des vitesses (pour des vents S-W, W, N-W, N-E, E et S-E) ou d'une déviation par rapport au lit du vent (vents S et N).

Ces résultats sont en assez bon accord avec les mesures de courant. Les fluctuations de vitesses observées au fond de la paléovallée de la Seine sont opposées au vent (avec des vitesses de 3 cm/s pour des vents de 10 m/s) (fig. 5). De même les courants mesurés en surface devant le cap de la Hève (Le Hir et L'Yavanc, 1985) sont-ils forts (30 cm/s par vent de 10 m/s) et dirigés vers le N-NE pour des vents de secteur S, S-W, W, N-W et vers le S pour des vents N à E.

Les simulations autant que les mesures indiquent des vitesses induites par le vent souvent bien supérieures aux vitesses résiduelles moyennes (10 à 30 cm/s contre 5 cm/s): ainsi le vent peut avoir un effet important sur la circulation résiduelle alors qu'en moyenne sur une longue période il est presque nul. Par exemple, un vent d'ouest (fréquent) de 15 m/s peut transporter les eaux de surface de la Hève à Antifer en 1,5 j. et perturber considérablement les temps de séjour des eaux douces ou autres effluents.

## 7. SCHEMA GLOBAL DE LA CIRCULATION MOYENNE.

Nous avons représenté sur la figure 6 une solution de synthèse des résultats obtenus en termes de circulation résiduelle. Rappelons les principaux éléments du schéma de circulation :

- dérive vers l'est dans le centre nord de la baie, avec pénétration des eaux de la Manche par l'ouest et sortie vers nord-est,
- tourbillon anticyclonique devant Barfleur,
- courant côtier vers l'ouest devant la côte du Calvados.
- tourbillon anticyclonique devant le pays de Caux, favorisant la sortie de la Seine par le nord-ouest et la limitant près de la côte. La position géographique et l'intensité de cette sortie d'eau étant moins précisées que ne l'indique la figure 6, on a placé des points d'interrogations à cet endroit.

- dans la moitié est de la baie : convergence des eaux du fond vers l'estuaire de la Seine, et sortie des eaux douces principalement vers le nord ouest (mais aussi vers le nord et l'ouest). Ces masses d'eau viennent ensuite lécher la côte à partir d'Antifer.

- Perturbation de ce schéma à partir d'un vent de 5 m/s. En particulier de très fortes vitesses peuvent être observées en surface devant la côte entre la Hève et Antifer, et devant le plateau du Calvados. Enfin un contre courant de fond se forme assez fréquemment dans la paléovallée de la Seine.

Bien entendu, ces tendances de circulations moyennes qui parfois sont contraires doivent être modulées en fonction de paramètres représentatifs des phénomènes physiques à la source (coefficient pour la marée, débit de la Seine pour la circulation haline et force du vent pour les effets de la météorologie).

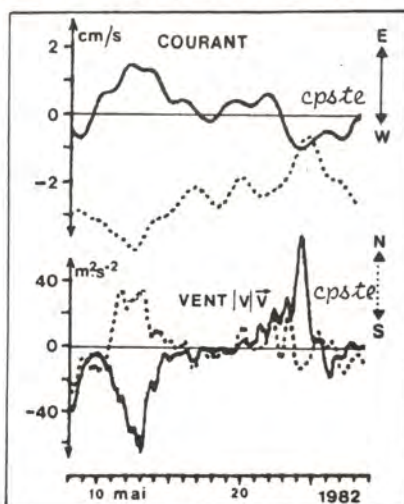


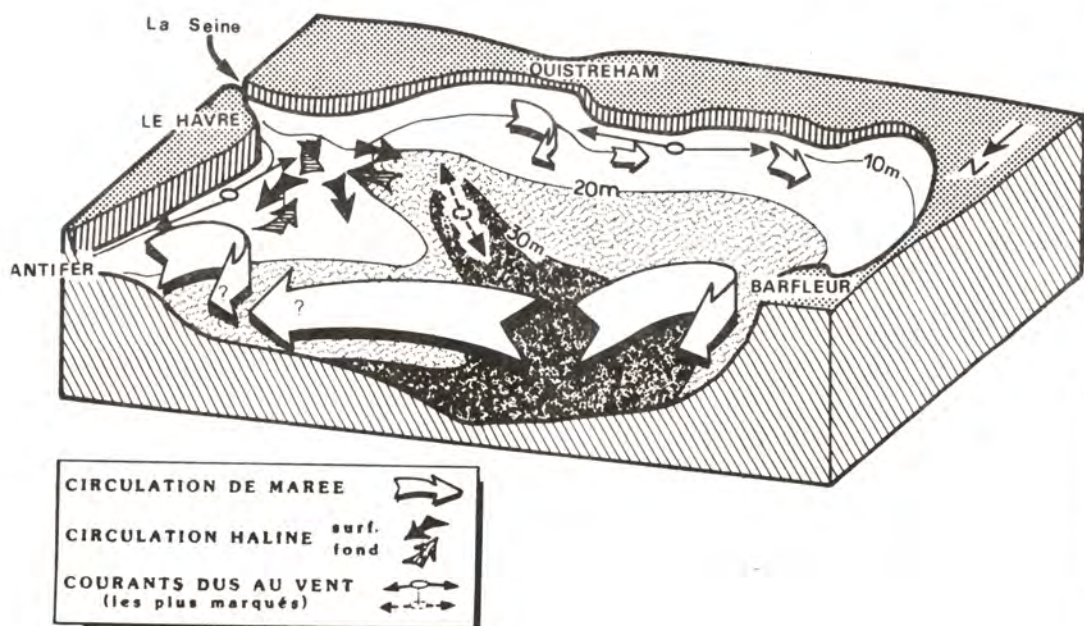
Fig. 5.- Evolution simultanée du vent et du courant résiduel mesuré au fond dans la paléovallée de la Seine.

## 8. CONCLUSION.

L'ensemble des études réalisées en Baie de Seine a permis d'établir un schéma des circulations résiduelles induites par trois phénomènes majeurs: la marée, les apports d'eau douce et les événements météorologiques. L'utilisation conjointe de divers moyens d'investigation (mesures courantologiques de longue durée, modèles numériques bi et tridimensionnels, calculs analytiques, hydrologie, télédétection) a donné des résultats en général cohérents et ainsi permet d'accorder une certaine confiance aux résultats présentés. Ces résultats sont en général en bon accord avec ceux des modèles de plus grande emprise cités dans la bibliographie. Ils les complètent et les précisent.

Cependant, il serait probablement opportun de confirmer certains aspects de la circulation lagrangienne à l'aide de quelques suivis de flotteurs pendant plusieurs jours: on peut citer la sortie des eaux de la Seine, la dérive vers l'est au centre de la baie et le recyclage éventuel des eaux au large de Ouistreham. De plus, il faut remarquer qu'un modèle numérique à mailles fines mais d'emprise plus grande que la baie permettrait de mieux préciser les échanges de masses d'eau avec la Manche orientale.

Fig. 6 **BAIE DE SEINE** **SCHEMA DE CIRCULATION RESIDUELLE**



Coeffe, Dalsecco, Esposito, Latteux (1984).- A finite element method for storm surge and tidal computations. 19th ICCE - Houston.

Le Hir P. (1980).- Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la baie de Seine. Thèse de doct. Ing. Université de Bretagne Occidentale.

Le Hir P. & L'Yavanc (1985).- Observations de courant en Baie de Seine. Ce volume, N° 1.



- Le Provost C. & Fornerino M. (1984).- Les courants résiduels dans un modèle bidimensionnel de marées littorales. Société hydrotechnique de France. Compte Rendu XVIIIe Journées de l'Hydraulique. Marseille.sept. 84.
- Lomer F. (1978).- La dérive en mers à marée. Thèse de doct. Ing. Université P. & M. Curie, Paris VI.
- Maddock L. & Pingree R.D. (1977).- Tidal residuals in the English Channel. J. Mar. Biol. Ass. U.K. 57 (2) pp. 339-354.
- Salomon J.C. (1985).- Courantologie calculée en Baie de Seine. **Ce volume**, N° 2.
- Thouvenin B. & Salomon J.C. (1984).- Modèle 3-D de circulation et de dispersion en zone côtière à marée. 1ers essais: cas schématique et Baie de Seine. Océanologica Acta 1985. Vol. 7 n° 4.

NOTE - Les données météorologiques utilisées pour la comparaison entre vent et courant ont été aimablement fournies par le Service de Climatologie Marine de la Direction de la Météorologie.

MODELES MATHÉMATIQUES DE COURANTS RESIDUELS SUR LE PLATEAU CONTINENTAL NORD  
EUROPEEN

S. DJENIDI, J.C.J. NIHOUL et F. RONDAY  
GHER, Université de Liège  
Laboratoire de Mécanique

B6 Sart Tilman  
B4000 Liège.

A. GARNIER  
Association EUR/CEA,  
dépt. de Protection sanitaire  
Institut de protection et de sûreté  
nucléaires, B.P. 6  
92260 Fontenay-aux-Roses.

INTRODUCTION

Les processus à méso-échelle tels que les marées et les courants transitoires induits par le vent sont de loin les plus intenses dans les mers continentales. Leur temps caractéristique s'étend de quelques heures à quelques jours et les courants qui leur sont associés peuvent largement dépasser des vitesses d'un mètre par seconde.

Cependant, les biologistes et les chimistes sont beaucoup plus intéressés par les phénomènes à macro-échelle qui ont des temps caractéristiques typiques des processus écologiques (de quelques semaines à quelques mois). L'importance des marées et des tempêtes pour la production de turbulence et pour le mélange des propriétés marines est évidemment considérée comme essentielle par les biologistes, mais beaucoup d'entre eux seraient déjà satisfaits d'une grossière paramétrisation de l'efficacité du mélange turbulent et d'une description générale de ce transport à long terme des masses d'eau qu'on appelle souvent "*circulation résiduelle*".

Mis à part les courants dus aux différences de densité, que nous n'envisageons pas ici et qui ne sont appréciables que dans les régions où les gradients de température et surtout de salinité sont importants, on peut considérer que les courants résiduels présents dans des bassins continentaux peu profonds tels que la mer du Nord et les mers adjacentes, sont principalement générés et entretenus par trois causes.

Celle qui paraît être prédominante au vu de ses effets à méso-échelle est sans doute la marée, surtout par le truchement de la composante semi-diurne lunaire ( $M_2$ ) qui joue un rôle essentiel dans la région étudiée. Si on fait abstraction des autres composantes ainsi que des conditions météorologiques, une moyenne sur une période de l'ordre du jour suffit pour éliminer l'effet transitoire de la marée et ne laisser ainsi que le résidu généré par ses interactions non linéaires : *c'est la circulation résiduelle de marée*.

La circulation résiduelle régionale est influencée par la circulation résiduelle globale c'est-à-dire la composante quasi stationnaire des écoulements pénétrant aux frontières.

Les modèles d'inflow-outflow ont montré que les flux aux frontières jouent un rôle important dans le calcul de la dérive à long terme des masses d'eau en ce sens qu'ils arrivent à reproduire les grandes tendances de celle-ci, et qu'à ce titre les conditions aux limites peuvent être considérées comme l'un des trois "forcings" de la circulation résiduelle (Nihoul et Runday, 1976).



La superposition des effets du vent à ceux de la marée donne lieu à des surcotes et à des modifications courantométriques qui peuvent être si importantes lors de conditions météorologiques sévères qu'il est impensable de négliger l'impact des *forces atmosphériques* sur la dérive à long terme des masses d'eau.

Malheureusement, à l'inverse de la marée qui a un comportement cyclique aisément prévisible, le champ éolien est caractérisé par une irrégularité et une complexité qui rendent délicate la prise en compte de cet effet.

Une circulation résiduelle obtenue par moyenne sur une période de l'ordre de quelques semaines, avec une succession d'événements météorologiques typiques d'une saison semble être la plus significative parce qu'elle présente un caractère "climatique" tout en reflétant la variabilité atmosphérique. Elle reste néanmoins difficile à déterminer à cause de la longueur des périodes à simuler.

Une manière d'éviter ce problème consiste en l'utilisation d'un vent moyen sur deux ou trois cycles de marée. Mais considérer une moyenne sur une période équivalente à celle du résiduel "tidal" n'est fiable que dans le cas d'une situation atmosphérique remarquablement persistante. En effet, si le vent obtenu par moyenne de conditions météorologiques réelles très variables peut donner des résultats valables dans les grandes lignes, il risque cependant de ne pas produire les effets de certains événements intenses qui ont été éliminés ou amoindris par le processus de moyenne, et de "lisser" en quelque sorte la circulation "climatique" associée qu'on veut approcher.

La circulation résiduelle étant implicitement incluse dans les équations dépendantes du temps de la circulation transitoire, il serait tentant de résoudre ces équations et de faire la moyenne de la solution transitoire pour obtenir les courants résiduels.

Sur le plateau continental nord européen, la large prédominance des mouvements à méso-échelle fait en sorte que les courants résiduels sont du même ordre de grandeur que l'erreur sur les courants transitoires calculés par un modèle ou mesurés à l'aide de courantomètres. Pour cette raison, il est plus correct de moyenner, non pas la solution, mais les équations elles-mêmes, sur un temps  $T$  suffisamment long pour éliminer les phénomènes transitoires.

Cette moyenne introduit des termes supplémentaires - *les tensions de Reynolds à méso-échelle* - dus aux non linéarités des équations, une forme paramétrisée de ces termes constituant la contribution des méso-échelles dans les équations de la circulation résiduelle. Ces équations sont indépendantes du temps à cause de la quasi stationnarité du phénomène (Nihoul et Roudy 1975 et 1976, Nihoul et al. 1979, Nihoul 1980, Nihoul et Runfola 1981).

Dans cette optique, la résolution des équations stationnaires moyennes qui décrivent la circulation résiduelle exige la prescription, le long des frontières du modèle, de *conditions aux limites* adaptées aux échelles de temps et aux conditions météorologiques considérés.

Les conditions - élévations ou vitesses résiduelles - sont néanmoins difficiles à obtenir à cause du fait que, d'une part les instruments ne sont pas spécialement conçus pour mesurer des grandeurs résiduelles et que, d'autre part, l'importance des frontières en mer ouverte ne permet pas l'établissement d'un réseau expérimental suffisamment dense; de plus, les séries temporelles de données doivent être de longue durée pour tenir compte des fluctuations saisonnières des phénomènes.

Dans la suite, une application au plateau continental nord européen essaiera d'illustrer ces considérations en montrant les effets respectifs des différents moteurs de la circulation résiduelle que sont la marée, le vent et les conditions aux limites.

## Le modèle mathématique

Comme précisé dans l'introduction, la circulation résiduelle est calculée selon la méthode des "tensions de Reynolds à méso-échelle" (TRME).

La quasi-homogénéité de la colonne d'eau, due aux faibles profondeurs et à l'intensité du brassage par les marées et les tempêtes, permet d'intégrer les équations de mouvement sur la verticale et de ne plus considérer alors que le champ de vitesses moyennes horizontales.

Faisant la moyenne temporelle des équations de Navier-Stokes, négligeant les dérivées par rapport au temps et passant au rotationnel par l'adoption du formalisme de la fonction de courant, on arrive à l'équation (Ronday 1976, Nihoul 1982) :

$$K \nabla^2 \psi + \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \left[ \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \frac{K}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \frac{f}{h} \right) \right] + \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \left[ \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \frac{K}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \frac{f}{h} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \frac{\theta_2}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \frac{\theta_1}{h} \right)$$

où  $\psi$  est la fonction de courant

$$\theta_1 \text{ et } \theta_2 \text{ sont les composantes de } \theta = C (W \|W\|) + \tau_t$$

$$\tau_t \text{ est le terme de TRME } \tau_t = - [g \zeta_1 \nabla \zeta_1 + \nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{U}_1 \mathbf{U}_1}{H} \right) + \frac{D}{H^2} \mathbf{U}_1 \| \mathbf{U}_1 \|]_0$$

$\mathbf{U}$  est le transport horizontal

$\zeta$  est l'élévation de la surface libre

$H$  est la profondeur instantanée  $H = h + \zeta$

$W$  est la vitesse du vent

$D$  et  $C$  sont des coefficients de friction sur le fond et à la surface libre

$K = \frac{D}{h} \| \mathbf{U}_1 \|_0$  est un nouveau coefficient de friction

$f$  est le paramètre de Coriolis.

L'indice indique une moyenne sur l'intervalle de temps choisi pour éliminer les contributions transitoires, une grandeur pouvant s'écrire sous la forme

$$x = x_0 + x_1 \text{ avec } (x)_0 = x_0 \text{ et } (x_1)_0 = 0.$$

## Application au plateau continental nord européen

La grille du modèle numérique couvre la mer du Nord, le Skagerrak, la Manche, la mer Celtique et la mer d'Irlande. La frontière du côté Atlantique est déterminée par l'isobathe de 200 mètres (figure 1.). Pour tenir compte de manière réaliste de la faible largeur de certains détroits tels que le Pas de Calais et le North Channel, une maille de petite dimension est nécessaire. La finesse de la maille (10' x 10') permet non seulement de mieux épouser la géométrie de la côte, mais aussi une meilleure représentation de la topographie du fond; cette amélioration revêt une grande importance dans le calcul des gradients de profondeurs qui interviennent dans le modèle mathématique.

Vu le formalisme utilisé pour traiter le problème de la circulation résiduelle (équation elliptique en termes de fonction de courant), il faut fournir les valeurs de  $\psi$  le long d'une frontière ouverte; la côte étant une ligne de courant on peut y imposer  $\psi = \text{cte}$  ou  $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0$ . Dans l'introduction, la difficulté d'obtenir des données significatives et en nombre suffisant a été évoquée, ce fait constituant une des limitations à l'applicabilité des modèles de circulation résiduelle.



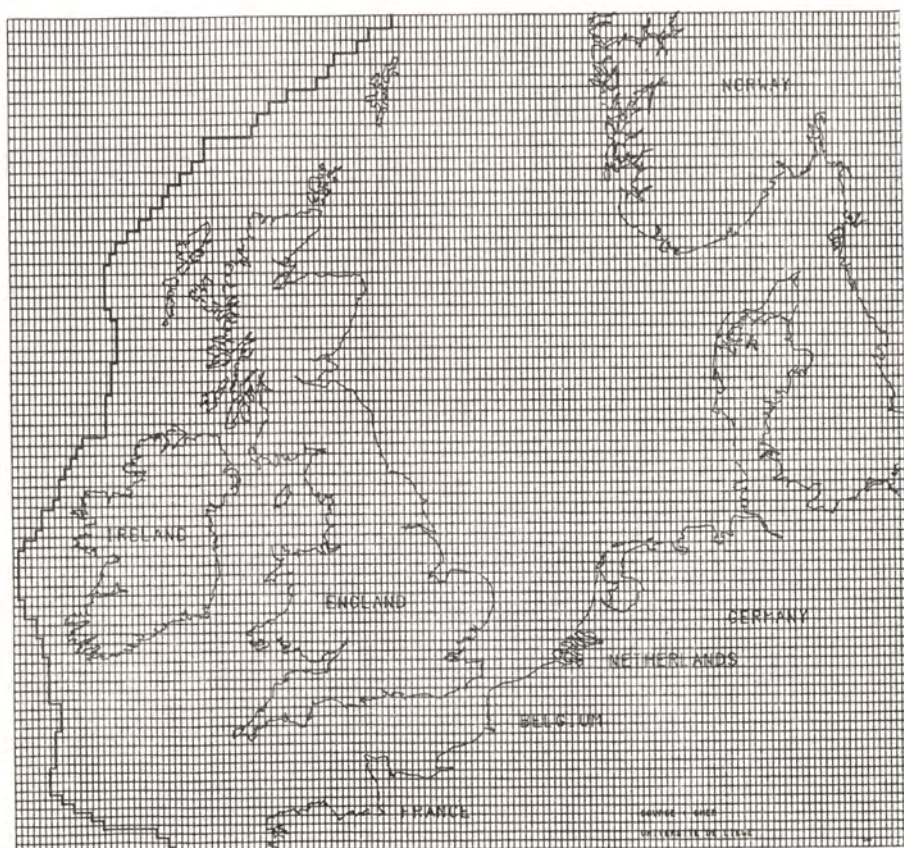


Fig.1.: Grille numérique pour le Plateau Continental Nord-Européen.

La compilation de données de courants, de salinités et de concentrations en césium 137 disponibles dans la littérature (Tulloch and Tait, 1959; CEA-NRPB report, 1979; Bowden, 1980; Pingree, 1980; Kautsky and Murray, 1981; Jefferies and al, 1982; ICES report, 1983; Otto, 1983; Ellet and Mac Dougall, 1984), a néanmoins permis d'estimer des valeurs moyennes pour les flux aux frontières (Djenidi et al, 1985).

Si on néglige les termes de TRME, ce qui revient à ignorer les interactions non linéaires des marées et des tempêtes et à considérer que la circulation résiduelle n'est principalement forcée que par les échanges avec l'Atlantique, on obtient le schéma de circulation de la figure 2. Il représente les grandes lignes de la dérive des masses d'eau induite par les deux branches du courant Nord Atlantique mais ne fait pas apparaître la structure fine et les écoulements secondaires révélés par les observations (Beckers et al, 1976; Zimmerman, 1976; Riepma, 1977; Prandle, 1978).

La prise en compte des termes de TRME, calculée à partir des résultats d'un modèle de marée (Djenidi et al, 1985), montre par contre une circulation beaucoup moins "lisse" associée à des méandres et des gyres, surtout dans les régions à géométrie tourmentée et à forts gradients de profondeurs (Manche, Mer d'Irlande, ...) où la contrainte de marée joue un rôle important (figure 3).

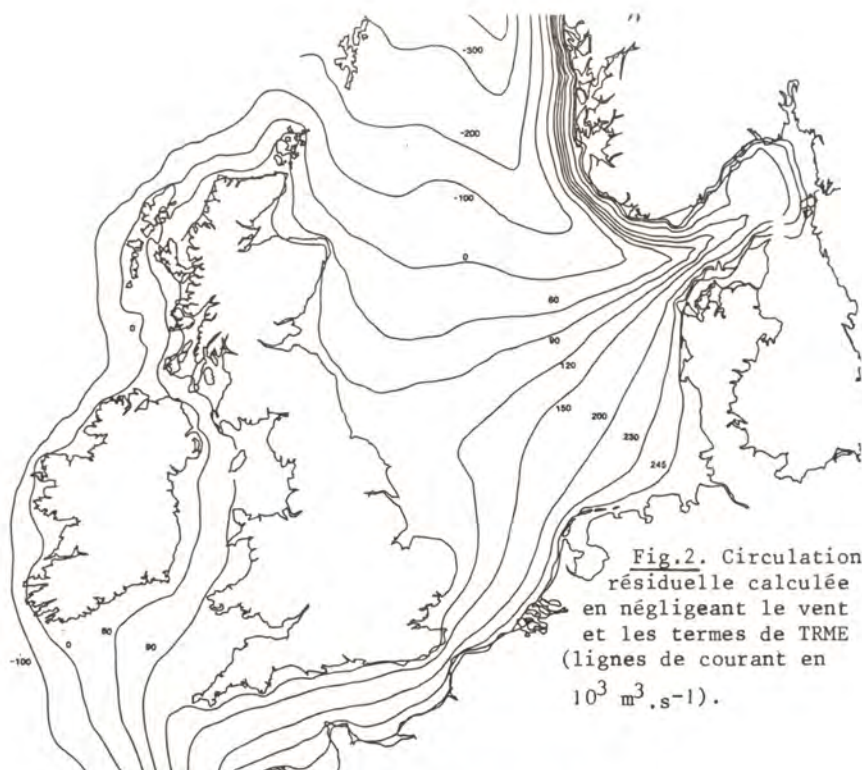


Fig.2. Circulation résiduelle calculée en négligeant le vent et les termes de TRME (lignes de courant en  $10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

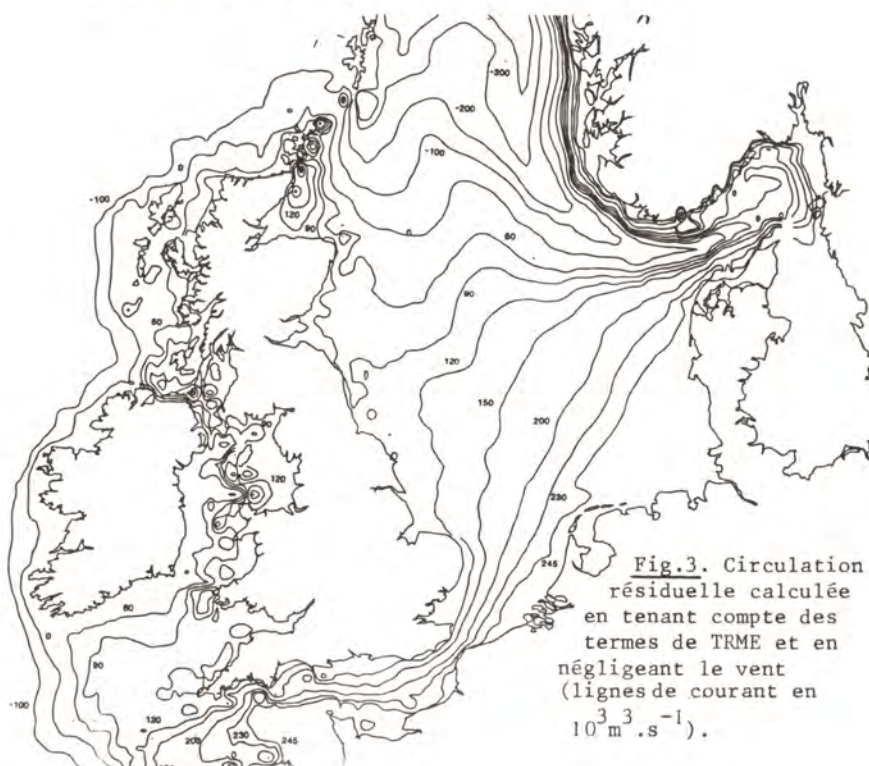


Fig.3. Circulation résiduelle calculée en tenant compte des termes de TRME et en négligeant le vent (lignes de courant en  $10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).



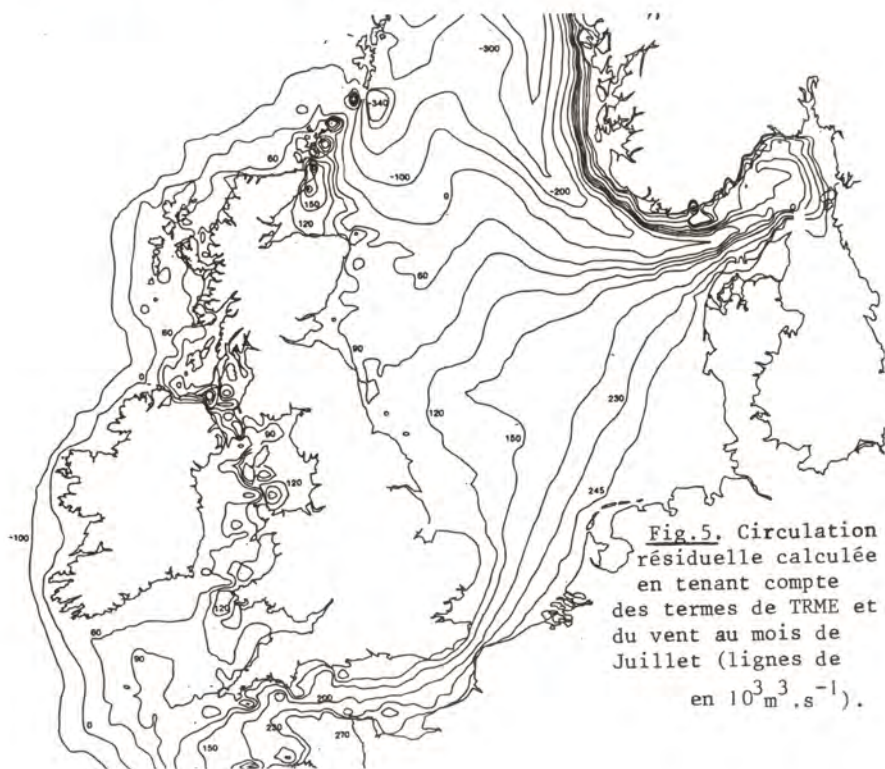
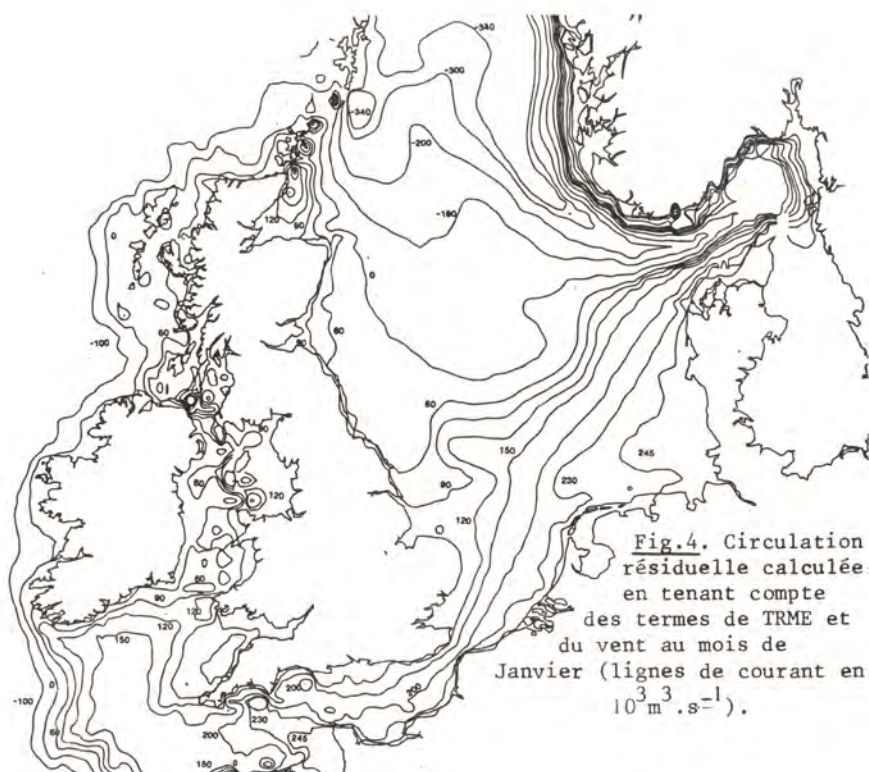




Fig. 6. : Circulation résiduelle sans vent et sans TRME





Fig. 7. : Circulation résiduelle sans vent et avec TRME

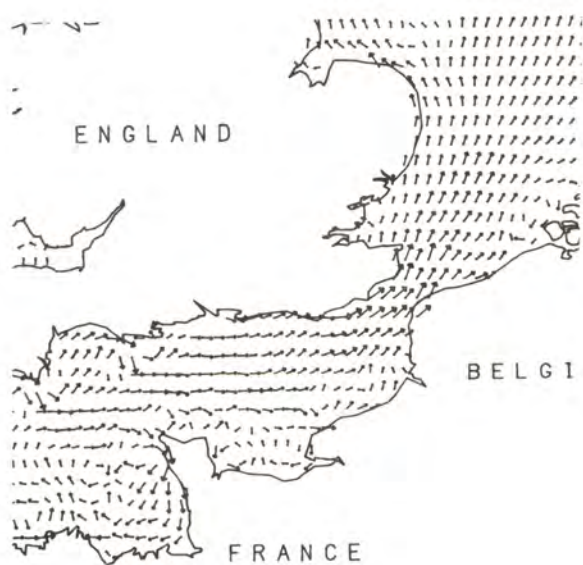


Fig. 8. : Circulation résiduelle avec TRME et avec vent d'hiver





Fig. 9. : Circulation résiduelle avec TRME et avec vent d'été

Pour mettre en évidence les effets du vent, deux situations météorologiques typiques des saisons d'hiver et d'été ont été sélectionnées. Les champs éoliens utilisés sont ceux des mois de janvier et juillet 1976 donnés par le modèle atmosphérique de l'Impérial Collège de Londres (vents géostrophiques toutes les trois heures aux noeuds d'une grille de  $1^\circ \times 1^\circ$ ). Nous nous sommes intéressés à la circulation résiduelle "climatique" décrite dans l'introduction mais, par souci d'économie de calculs sur ordinateur (rappelons qu'il est nécessaire de simuler la circulation à méso-échelle durant toute la période considérée afin de pouvoir calculer les termes de TRME correspondants), nous nous sommes limités à la borne inférieure de l'échelle de temps du phénomène, soit à des périodes d'une semaine. La difficulté d'obtenir des conditions aux limites qui correspondent aux événements de ces périodes nous obligent à utiliser les mêmes flux aux frontières que précédemment.

Les figures 4 et 5 qui représentent les deux cas étudiés montrent comment les conditions météorologiques modifient, en mer du Nord, l'évolution des deux branches du courant nord-atlantique entrant par la Manche et entre la Norvège et l'Ecosse. On peut également constater, d'une situation à l'autre, que la localisation et l'extension des structures tourbillonnaires résiduelles sont nettement perturbées en Mer du Nord, en Manche et en Mer Celtique, alors qu'elles restent peu affectées en Mer d'Irlande. Il apparaît aussi que la situation d'été se rapproche sensiblement de celle où les conditions atmosphériques sont négligées.

Malgré la grande étendue de la zone étudiée et grâce à la finesse de la grille utilisée, il est possible de détecter, dans les régions de plus faible emprise telles que la Manche et la baie sud de la Mer du Nord, des caractéristiques relativement précises de la circulation.

Par exemple, sur les figures 6 à 9 on représente de manière plus détaillée la courantométrie dans cette partie du plateau continental (un réseau plus dense de lignes de courant a été adopté pour mieux mettre en évidence certaines structures qui n'étaient pas apparentes dans les figures 2 à 5). L'examen de ces figures permet de mieux souligner les remarques précédentes sur le rôle respectif des éléments moteurs de la circulation résiduelle.

---

BECKERS, O., NIHOUL, J.C.J. and WOLLAST, R., 1976, La circulation résiduelle et la caractérisation des masses d'eau dans la zone belge, In : J.C.J. Nihoul (Editeur), Modélisation des systèmes marins. Projet Mer, Rapport final, Services du Premier Ministre, Programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles, 1976, 1 : 95-130

BOWDEN, K.F., 1980, Physical and Dynamical Oceanography of the Irish Sea, in The North West European Shelf Seas : the Sea Bed and the Sea in Motion II : Physical Resources, Elsevier Ocean Serie, 24 B, Banner et al. Eds, 391-414

CEE, 1979, Commission des Communautés Européennes, Méthodologie pour l'évaluation des conséquences radiologiques des rejets d'effluents radioactifs en fonctionnement normal, Rapport CEA - NRPB, Doc V/3865/79 - FR - EN

DJENIDI, S., RONDAY, F., BECKERS, Ph. and PIRLET, A., 1985, Etude de la circulation résiduelle en vue de l'évaluation de la dispersion d'effluents radioactifs dans l'environnement marin (Plateau Continental Nord-Européen), Rapport SC - 012 - B/BIAF/423 - F (SD)/DN01, Commissariat à l'Energie Atomique, 107 pp.



- ELLET, D.J. and Mc DOUGALL, N., 1984, Quelques résultats d'observations effectuées à l'ouest de la Grande Bretagne, Vol. 1, Séries temporelles de mesures océaniques (1983), C.O.I. Unesco Paris, 21 - 25
- I.C.E.S., 1983, Flushing times of the North Sea, Int. Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, Août 1983, Rapp. n° 123
- JEFFERIES, D.F., STEELE, A.K. and PRESTON, A., 1982, Further studies on the distribution of 137 Cs in British Coastal Waters, I : Irish Sea, Deep Sea Res., Vol. 29, n° 6 A, 713 - 738
- KAUTSKY, H. and MURRAY, C.N., 1981, Artificial radioactivity in the North Sea, Revue de l'Energie Atomique, Vienne (Autriche), Suppl. 2, 63 - 105
- NIHOUL, J.C.J., 1980, Residual circulation, long waves and mesoscale eddies in the North Sea, Oceanologica Acta, H3 : 309 - 316
- NIHOUL, J.C.J., 1982, Hydrodynamic models of shallow continental seas, Etienne Riga Edit., 198 pp.
- NIHOUL, J.C.J. and RONDAY, F., 1975, The influence of the tidal stress on the residual circulation, Tellus, 29, 484 - 490
- NIHOUL, J.C.J. and RONDAY, F.C., 1976, Hydrodynamic models of the North Sea, Mémoires Société Sc. Lg., 10 : 61 - 96
- NIHOUL, J.C.J., RUNFOLA, Y. and ROISIN, B., 1979, Non-linear three-dimensional modelling of mesoscale circulation in seas and lakes, in Marine Forecasting, J.C.J. Nihoul (Ed.), Elsevier Publ. Co, Amsterdam, 235 - 259
- NIHOUL, J.C.J. and RUNFOLA, Y., 1981, The residual circulation in the North Sea, In : J.C.J. Nihoul (Ed.), Ecohydrodynamics, Elsevier, Amsterdam, 219 - 271
- OTTO, L., 1983, Currents and water Balance in the North Sea, in North Sea Dynamics, Springer Verlag, Sundermann et Lenz Eds, 26 - 43
- PINGREE, R.D., 1980, Physical Oceanography of the Celtic Sea and English Channel, in the North-West European Shelf Seas : the Sea Motion II : Physical Chemical Oceanography, and Physical Resources, Elsevier Ocean. Series, 24 B, 415 - 466
- PRANDLE, D., 1978, Residual flows and elevations in the southern North Sea, Proc. Roy. Soc. London, A359, 189 - 228
- RIEPMA, H., 1977, Spatial variability of residual currents in an area of the Southern North Sea, ICES hydrography Committee, CM 1977/C : 43, 7 pp.
- RONDAY, F., 1976, Modèles hydrodynamiques, Modélisation des systèmes marins, Projet Mer, Rapport Final, J.C.J. Nihoul (Editor), Services du 1er Ministre, Programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles, Vol. 3, 270 pp.
- TULLOCH, D.S. and TAIT, J.B., 1959, Hydrography of the North-Western Approaches of the British Isles, Mar. Res. Scotland, 1, 32 pp.
- ZIMMERMAN, J.T.F., 1976, Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea, II, Neth. J. Sea Res., 10, 397 - 439

# DYNAMIQUE DES EAUX : SYNTHÈSE DES DISCUSSIONS

CHABERT D'HIERES G.\*

La discussion qui a suivi les exposés du thème n° 1 "Dynamique des eaux" a été brève. Le sujet était centré sur la connaissance des déplacements des masses d'eau à long terme (plusieurs jours, à quelques mois) sous les effets des mouvements de marée le long des limites et dans le domaine de la baie de Seine, de l'intrusion des eaux douces et turbides de la Seine et des vents. Toute question relative à ce thème nécessitait un développement scientifique très long qui ne pouvait être traité convenablement dans le temps disponible. Cinq interventions doivent être mentionnées ici, les autres se rapportant au sujet ayant été faites lors de la discussion des thèmes II et III. Ceci montre l'intérêt porté par les chercheurs des autres disciplines envers la connaissance de la dynamique du milieu. MM. J.C. Salomon et C. Le Provost ont apporté un complément d'explication qui illustre les notions de dérivées eulérienne et lagrangienne lors de l'expression des courants résiduels. Nous reproduirons ici in extenso le texte que ces auteurs ont proposé.

Complément par M. J.C. Salomon

(Communication "Courantologie calculée en Baie de Seine")

Des analyses complémentaires de la circulation résiduelle en Baie de Seine, présentées oralement, et une discussion abondante avec l'assistance du colloque, ont amené l'auteur de la communication à rappeler quelques définitions et à développer les arguments suivants :

- on appelle vitesse résiduelle d'Euler ( $\vec{V}_{RE}$ ), la moyenne des vitesses mesurées (ou calculées) au point fixe, durant une période de temps longue :

$$\vec{V}_{RE}(x_0, y_0) = \frac{1}{T} \int \vec{V}(x_0, y_0, t) dt \quad (1)$$

- on appelle vitesse résiduelle de Lagrange ( $\vec{V}_{RL}$ ), la moyenne des vitesses mesurées (ou calculées) d'une particule d'eau au cours de son déplacement, durant une période de temps longue :

$$\vec{V}_{RL}(\alpha) = \frac{1}{T} \int_T \vec{V}(\alpha) dt \quad (2)$$

$\alpha$  : désigne la particule qui a été choisie.

$\vec{V}_{RE}$  est une entité mathématique qui n'a pas de réalité physique, tandis que  $\vec{V}_{RL}$  représente réellement le déplacement des particules d'eau, à long terme, c'est-à-dire la circulation.

La méthode habituelle de mesure des courants à l'aide de courantmètres disposés au point fixe, ne permet pas d'accéder à cette quantité lagrangienne, d'où parfois la tentation de confondre les deux grandeurs (Euler et Lagrange), ce qui est la source d'erreurs d'interprétation.

La différence entre  $V_E$  et  $V_L$  s'appelle la vitesse de Stokes.

Un raisonnement mathématique simple permet d'évaluer l'ordre de grandeur de ce terme. Par un développement de Taylor au premier ordre on peut écrire l'expression approchée suivante :

\* Institut de Mécanique de Grenoble, B.P. 68, 38402 Saint Martin d'Hères.



$$V_{rL} \simeq V_{rE} + \int_T \left[ \int_{t_0}^{t'} \vec{V}(x_0, y_0, t'') dt'' \cdot \vec{\nabla} \vec{V}(x_0, y_0, t') \right] dt \quad (3)$$

terme de Stokes

On constate que le terme de Stokes fait intervenir l'intensité du courant instantané (c'est-à-dire la dimension de l'excursion de marée) et l'intensité du gradient horizontal des vitesses instantanées. Ces deux grandeurs sont importantes en milieu côtier, il importe donc de ne pas confondre  $V_{rE}$  et  $V_{rL}$ , et de ne pas employer l'expression "circulation résiduelle d'Euler" qui est dépourvue de sens.

Au prix d'hypothèses supplémentaires sur les caractéristiques des champs de vitesses instantanées, on peut évaluer la composante de Stokes dans quelques cas particuliers à l'aide de la formule 3 :

Supposons, par exemple, que le module de  $\vec{V}$  soit constant et que les champs de courants eulériens ne traduisent que la différence de phase due à la propagation d'une onde progressive; on déduit :

$$V_{rStokes} = V_0^2 / 2C$$

où  $V_0$  est le module du courant instantané

$C$  est la célérité de l'onde  $\simeq \sqrt{gH}$

Pour des ordres de grandeur caractéristiques des littoraux de la Manche ( $V_0 = 1$  m/s et  $H = 10$  m), la vitesse résiduelle de Stokes vaut 5 cm/s.

Cette valeur apparaît comme une sorte de nombre d'or en matière de circulation résiduelle de marée en zone côtière. Elle signifie que, lorsque les hypothèses simplificatrices qui ont été énoncées plus haut s'appliquent, la vitesse résiduelle lagrangienne se déduit de la vitesse résiduelle eulérienne en ajoutant un vecteur de 5 cm/s dirigé dans le sens de propagation de l'onde de marée. Quiconque a étudié la circulation résiduelle en divers points de nos littoraux reconnaîtra la réalité physique de cette quantité que l'on retrouve comme une sorte d'invariant physique.

Ces considérations théoriques sont générales, mais leur application correspond à des hypothèses simplificatrices qu'il convient de confronter aux réalités locales. On essaiera donc, chaque fois que possible, d'employer la relation n° 2 et non pas la relation n° 3.

On pourra procéder de deux manières :

- expérimentalement, en utilisant des flotteurs drogés qui suivent les déplacements de la masse d'eau. Il convient d'en utiliser un assez grand nombre pour obtenir un champ de circulations qui soit représentatif, ce qui revient à effectuer des mesures nombreuses et coûteuses.

- Par le calcul, on simulera la trajectoire de particules d'eau fictives à partir des champs de vitesses d'Euler, tels qu'ils sont donnés par les modèles mathématiques.

Une évaluation convenable de ces trajectoires à partir de modèles qui fournissent l'information sous forme "discrète" nécessite que l'excursion de marée soit définie par un nombre de points assez important (5 semble être un minimum). Cela signifie que seuls les modèles mathématiques à maille fine peuvent fournir la circulation à long terme des masses d'eau et par voie de conséquence, permettre de traiter les problèmes d'advection/dispersion de substances dissoutes.

Dans le cas de la baie de Seine, où les excursions de marée sont de l'ordre de 10 km, une maille de calcul de 2 km est la limite au-dessus de laquelle il n'est plus envisageable d'obtenir un schéma de circulation lagrangien (tel que celui qui est présenté dans la communication de l'auteur, fig. 4) qui soit correct.

La figure suivante montre une carte des composantes de Stokes ainsi obtenue, où la circulation vers l'est apparaît particulièrement nette :

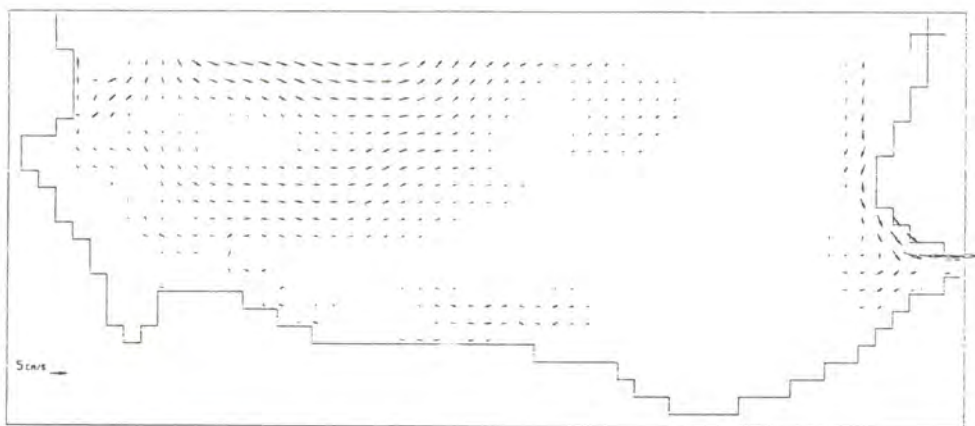


Figure 1.- Courants résiduels de Stokes.

On conçoit bien que ce champ de vecteurs de Stokes, ajouté à un champ de courants résiduels eulériens tel qu'il est présenté dans la communication de Le Hir et l'Yavanc, fig. 6, conduisent à une circulation des masses d'eau fortement différente du champ d'Euler. Le grand tourbillon anticyclonique eulérien qui affecte la moitié (environ) de la baie de Seine, se trouve réduit en terme de circulation de Lagrange par un facteur 2 ou 3, et limité à la partie la plus occidentale de la baie, ce qui est représenté fig. 7 de la communication sur la courantologie calculée en Baie de Seine.

Ainsi se trouve levée l'apparente contradiction présentée par les schémas de courants eulériens et la répartition de traceurs conservatifs (fig. 2, d'Aminot, Le Guellec et Mauvais), qui montrent une pénétration des eaux marines préférentiellement à proximité du Cotentin.

La fig. 6 de la communication de Le Hir, Salomon *et al.* propose un schéma de circulation conforme à ces indications.

En conclusion, l'auteur souhaite que l'exemple de la baie de Seine contribue à convaincre les chercheurs qui travaillent en milieu côtier de ne pas se laisser abuser par des champs de courants résiduels d'Euler, mais au contraire de rechercher systématiquement des circulations de Lagrange.

#### Complément par M. C. Le Provost

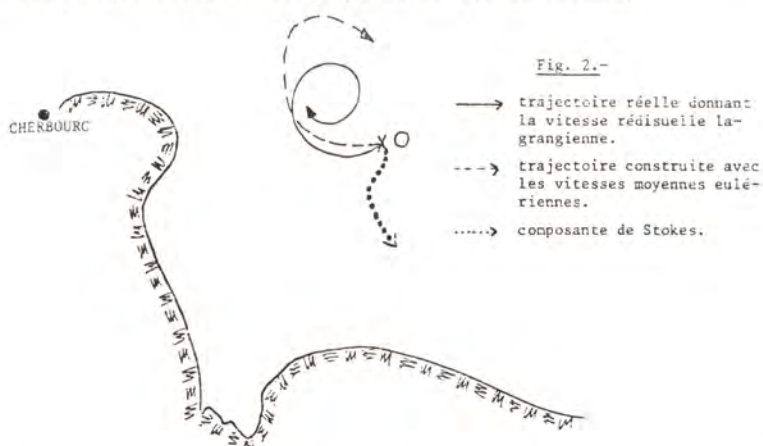
Pour illustrer les différences pouvant exister entre dérives "eulériennes" et dérives "lagrangiennes", nous avons réalisé une expérience utilisant les résultats de notre simulation de 1 mois de marée sur la Manche. Les résultats ne sont certes qu'indicatifs, car ils ont été obtenus à partir des informations fournies par notre modèle de maille de 10 km, insuffisante donc pour garantir quantitativement les résultats ci-dessus.

A partir d'un point, à l'origine dans le tourbillon de Barfleur, nous avons lâché une particule et suivi sa trajectoire au cours du temps sur 25 jours. Sur la figure 2, nous avons reporté cette excursion (trait continu), correspondant à la dérive lagrangienne (dans ce graphique, la variabilité à l'échelle de chaque marée a été éliminée du tracé afin de ne pas surcharger la figure et nous n'avons pointé la position de la particule qu'une fois par marée, périodiquement).

Dans cette zone, nous connaissons a priori, par analyse des résultats de notre simulation, le champ moyen de la dérive eulérienne résiduelle. Nous avons tracé la trajectoire d'une particule qui aurait transité dans ce champ (fig. 4, dérive eulérienne). Enfin, nous avons reporté sur le schéma



la dérive de Stokes, que subirait la particule lâchée au même point, dans le champ de courant instantané calculé, mais duquel on a retranché a priori la composante résiduelle eulérienne. (fig. 2, dérive de Stokes).



On constate sur cet exemple que la dérive de Stokes est à  $90^\circ$  de celle d'Euler et que la dérive lagrangienne "réelle" conduit en conséquence à un mouvement tourbillonnaire nettement plus réduit que le tourbillon eulérien de Barfleur (donné par notre modèle) ne le laisse penser a priori.

#### Commentaire :

L'intervention de J.C. Salomon met bien en évidence la notion de vitesse de Stokes qu'utilise C. Le Provost. Ce dernier montre bien le résultat après 25 jours de fonctionnement du système. L'exemple de calcul appliqué donné par J.C. Salomon donne un ordre de grandeur de la vitesse résiduelle accompagnant une onde longue cylindrique et progressive par 10 m de fond. Mais il serait préférable de prendre une onde partiellement stationnaire oscillant sur des fonds de 35 m. L'ordre de grandeur trouvé serait alors différent. Il serait par contre bon de rajouter la prise en compte des effets des frottements latéraux engendrant une vorticité qui elle-même engendre le tourbillon de Barfleur. Le sujet devient très complexe.

Les autres interventions portent :

- sur la cohérence de tous les résultats (P. Le Hir) (mesures *in situ* et modèle) tendant à prouver l'existence du tourbillon de Barfleur.
- Sur la mesure des courants résiduels lagrangiens à l'aide de flotteurs (C. Latouche). Cette mesure pourrait-elle apporter des éléments de réponse à la controverse Lagrange-Euler? On doit employer simultanément un grand nombre de flotteurs, et par moyennes statistiques, mesurer le déplacement le plus probable pour éliminer les effets de la turbulence de l'écoulement de marée. Cette mesure est donc complexe, mais elle peut donner la valeur de l'erreur que l'on fait en considérant les courants eulériens à la place des courants lagrangiens.
- Sur l'application de ces notions aux phénomènes de diffusion (M. Bélorgey). La notion de vitesse d'Euler est plus commode, mais la notion exacte est celle de Lagrange matérialisée par variation de distance de deux flotteurs représentant celle de deux particules d'eau. La distance initiale des deux flotteurs fixe l'échelle de la turbulence que l'on prend en compte.

Il s'agit là de la prise en compte des effets de la turbulence. Les équipes du GRECO Manche se sont plutôt attachées à éliminer ces effets en effectuant les lissages appropriés. Mais il est bien entendu que la part de la dispersion dans le phénomène de transport à long terme des masses d'eau est aussi à prendre en compte. La connaissance des courants résiduels est toutefois primordiale.

Les interventions faites aux cours des discussions des autres thèmes ont toujours été axées sur l'existence et la position géographique des sorties des eaux de la baie entraînant les eaux de la Seine dans la région et au-delà d'Antifer. Les avis sont encore partagés. Seule une modélisation numérique fine et exacte du système pourra permettre de conclure.

A ces champs de courants résiduels, supposés connus, il faudra rajouter, suivant les avis de MM. Khalanski, Migniot, Caillot, Bélorgey, Temperville et Chabert d'Hières, les effets des houles, des conditions météorologiques et fluviatiles, moyennes et exceptionnelles.

Les recherches sur la houle et plus généralement sur les modèles de transport en zone côtière sont à développer. Les études de couche limite et de turbulence sous la houle sont abordées à l'Institut de Mécanique de Grenoble et à l'Université du Havre. Il est nécessaire d'y rajouter les études :

- de courants engendrés par la houle,
- de modifications apportées par les courants à la houle et notamment les effets de décambrure et de cambrure suivant que le courant est de même sens ou de sens opposé à la direction de propagation de la houle,
- de la contribution de ces effets du courant lui-même (variation du coefficient de frottement), à la turbulence et à la vitesse instantanée du courant sur le fond.

Les problèmes de fronts latéraux de la veine turbide des eaux de la Seine sont importants mais n'ont pas été largement abordés.



**THEME 2**



***DYNAMIQUE DES SUSPENSIONS***

***ET DES DEPOTS***

*Dynamique des suspensions et des dépôts en Baie de Seine : une  
synthèse des résultats* LARSONNEUR C.

- 8 - AUFFRET J.P. et d'OZOUVILLE L. Cartographie du prisme sédimentaire holocène en Baie de Seine orientale, par sismique réflexion à haute définition
- 9 - AVOINE J. Evaluation des apports fluviatiles dans l'estuaire de la Seine
- 10 - AVOINE J. et CREVEL L. Influence des apports fluviatiles en Baie de Seine
- 11 - LAFITE R., DUPONT J.P. et LAMBOY M. Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en Baie de Seine
- 12 - DUPONT J.P., LAFITE R. et LAMBOY M. Contribution de l'étude des suspensions à la compréhension des mécanismes hydrosédimentaires estuariens et littoraux en Manche centrale et orientale
- 13 - DUPONT J.P. et LAFITE R. Importance et rôle du matériel organique vivant et inerte dans les suspensions de la Baie de Seine.
- 14 - BRUN-COTTAN J.C. et BEN BRAHIM M. Particules en suspension dans la Baie de Seine : concentration et sédimentation instantanée en période d'étiage
- 15 - THOMAS Y.F. Etude des transports de matières en suspension en Manche par emploi de l'imagerie CZCS
- 16 - AVOINE J., DUBRULLE L. et LARSONNEUR C. La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la Baie de Seine - conséquences sur l'environnement
- 17 - CREVEL L. La dynamique sédimentaire en Baie de Seine nord-orientale, fluctuations et évolution de la couverture meuble
- 18 - AUFFRET J.P. et d'OZOUVILLE L. Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine
- 19 - AVOINE J., CAILLOT A., HOSLIN R., LARSONNEUR C., MASSIAS J. et QUESNEY M. Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en Baie de Seine
- \*20 - COLLINS M. *Sediment and water movement in coastal embayments*

*Synthèse des discussions*

LARSONNEUR C.



## DYNAMIQUE DES SUSPENSIONS ET DES DEPOTS EN BAIE DE SEINE : UNE SYNTHESE DES RESULTATS.

LARSONNEUR C.\*

Au cours des années 1960 et 1970, les travaux de recherches sédimentologiques appliqués à la baie de Seine ont essentiellement porté sur la nature et l'épaisseur de la couverture de dépôts meubles. Une carte de répartition des sédiments superficiels a été établie en 1971 (Larsonneur), complétée et précisée par la suite, elle s'intègre à la publication de synthèse réalisée par le Laboratoire de Géologie marine de l'Université de CAEN et publiée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières avec la collaboration du Centre National pour l'Exploitation des Océans en 1978 : "Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000". Ce document fait ressortir des enchaînements progressifs de dépôts qui vont, pour la zone considérée, des cailloutis du Nord-Est du Cotentin aux sédiments vaseux des extrémités de la baie de Seine. Il s'agit dans l'ensemble d'un matériel litho-bioclastique dont la répartition est étroitement liée aux vitesses des courants de marée. Les houles n'exercent un rôle dominant que sur la frange côtière (Larsonneur *et al.*, 1982).

Les campagnes de prospection par sismique réflexion continue ont ensuite permis de déterminer l'épaisseur de cette couverture meuble, de cartographier le réseau de paléovallées et de dessiner la bathymétrie au toit du bedrock. Ainsi, le paléoréseau hydrographique de la Seine a-t-il été reconstitué (Auffret et Larsonneur, 1977; Auffret *et al.*, 1980) soulignant l'importance des rivières de la région durant les périodes froides du Quaternaire. Ce travail d'investigation, d'intérêt à la fois fondamental et appliqué (géométrie et dynamique des corps sédimentaires submergés - ressources en agrégats.) a été poursuivi et approfondi en baie de Seine orientale en utilisant de la sismique à haute définition; il fait l'objet de la communication de Auffret et d'Ozouville (ce colloque) sur laquelle je reviendrai plus loin.

Avant la mise en oeuvre du programme pluridisciplinaire de recherches sur la baie de Seine par le GRECO MANCHE, les travaux portant sur la dynamique des suspensions et des dépôts, sur l'évolution des fonds, étaient peu nombreux à l'exception de ceux accomplis dans les zones portuaires et surtout sur l'estuaire de la Seine dans le cadre du Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer (1978-1980). Ces importantes recherches, par une large coopération d'équipes scientifiques, avaient notamment permis de reconstituer l'évolution historique de l'estuaire, de caractériser le bouchon vaseux, de déterminer les processus de comblement de l'estuaire. Depuis 1982, ces travaux ont été complétés et appliqués à l'estuaire de l'Orne (Dubrulle, 1982) et à la baie des Veys (Dubrulle et Larsonneur, 1984), autres exutoires importants de la baie de Seine. Parallèlement aux apports liquides, les apports solides ont été évalués et caractérisés, les modalités de transport en suspension et sur le fond ont été étudiées, les conditions d'érosion et de dépôt ont été déterminées afin de définir le fonctionnement hydrosédimentaire de la baie de Seine, milieu macrotidal de géométrie simple et régulière, soumis à de fortes influences fluviales. Les principaux résultats

\* Laboratoire de Géologie marine, Université de CAEN, 14032 CAEN CEDEX.



sont rapportés dans les communications présentées à ce colloque, je m'efforcerai d'en dégager l'essentiel en soulignant les acquis majeurs et en indiquant les questions qui restent posées. Les différents points abordés concernent les apports fluviaux, la dynamique estuarienne et le régime hydrosédimentaire de la baie de Seine sachant que les relations de cette dernière avec le domaine ouvert de la Manche ont été peu étudiées sur le plan de la dynamique des suspensions et des dépôts.

# 1. LES APPORTS FLUVIAUX

Seule la Seine a fait l'objet d'études récentes et quantifiées à ce sujet. L'intéressante synthèse présentée par Avoine mériterait d'être complétée par des données comparables sur les rivières du Calvados afin d'établir le bilan de tous les apports à la baie de Seine.

Les résultats rapportés par Avoine se basent sur les mesures effectuées à Poses; c'est-à-dire à 160 kilomètres en amont de l'embouchure de la Seine. Pour la période 1960-1984, le débit moyen annuel du fleuve fut de 435 m<sup>3</sup>/s avec pour extrêmes 240 m<sup>3</sup>/s en 1964 et 625 m<sup>3</sup>/s en 1983; les débits instantanés variant de 100 m<sup>3</sup>/s à 2000 m<sup>3</sup>/s environ.

La charge solide transportée en suspension est fonction du débit fluvial mais il apparaît que les plus fortes concentrations se rencontrent lors de la première crue après une longue période de faibles débits. De plus, les eaux sont plus turbides durant la phase ascendante des crues qu'au maximum de débit ou que durant la phase descendante. Les 3 courbes présentées à titre d'exemple par Avoine (ce colloque) illustrent clairement ces relations sachant que l'intervalle entre les crues influe également sur les concentrations relevées. Des résultats comparables ont été obtenus en Loire, en Gironde; ils semblent caractéristiques des rivières de régions tempérées. Dans ces conditions, les teneurs en matières en suspension (M.E.S.) varient sur une très large gamme, de 3,3 mg/l à 267 mg/l et les apports solides durant la phase ascendante des crues représentent à eux seuls, en 20 jours, 50% des apports annuels qui s'élèvent en moyenne à 500 000 tonnes, l'éventail des valeurs moyennes étant compris entre 200 000 et 1 000 000 tonnes. C'est un bilan fort modeste qui correspond à un taux d'érosion de 7,5 tonnes/km<sup>2</sup>, soit un arasement du bassin versant de l'ordre de 4 mm/millénaire. La Seine est donc une rivière sénile. Signalons ici que les apports annuels de l'Orne sont de 10 000 à 25 000 tonnes (Dubrulle, 1982).

Les apports en métaux, à l'état dissous et particulaire, ont été calculés à partir des analyses effectuées depuis 1976 à la Bouille, 100 km en amont de l'embouchure, par la Cellule anti-pollution du Service de Navigation de la Seine. Les apports moyens annuels en métaux dissous ont été évalués sur la base du débit fluvial moyen de 435 m<sup>3</sup>/s. Les résultats fournis par Avoine indiquent pour la Seine des teneurs relativement élevées en Zn, Pb, Cu et surtout Ni et Cd. Les apports à l'état particulaire ont également été chiffrés, ils révèlent une contribution anthropique importante de l'ordre de 95% pour Hg, Cu, Cd, Zn, de 85% pour Ni, Pb, Cr, de 70% pour Mn, Co, V, moins de 50% pour Fe et Ti sachant que les teneurs naturelles sont très basses dans le bassin sédimentaire de la Seine. Il ressort également que la phase particulaire associée au matériel en suspension est largement dominante pour de nombreux métaux à l'exception de Ni et surtout de Hg et de Pb dont la nocivité est bien connue. De tels résultats quantitatifs manquent pour les autres rivières tributaires de la baie. On sait cependant que les apports de l'Orne sont relativement chargés en Fe, Mn, Zn, Cu, Cr et Ni tandis que ceux des rivières de la baie des Veys sont peu élevés dans l'ensemble et marqués par Ni et Cd (Dubrulle, 1982; Dubrulle et Larssonneur, 1984).



## 2. LA DYNAMIQUE ESTUARIEENNE

Avant de parvenir à la mer les apports des rivières sont soumis à une dynamique estuarienne de régime macrotidal qui contrôle le mouvement des masses d'eau et des sédiments, régit les processus de dépôt et de remise en suspension, induit des modifications physico-chimiques du matériel transporté. Aux importantes études réalisées sur l'estuaire de la Seine depuis 1978 (Avoine, 1981 et 1982; Avoine *et al.*, 1981) sont venus s'ajouter des travaux récents sur l'estuaire de l'Orne (Dubrulle, 1982) et sur le couple estuarien de la baie des Veys (Dubrulle et Larsonneur, 1984). Une synthèse des résultats est présentée à ce colloque par Avoine, Dubrulle et Larsonneur dans le but de dégager les principaux caractères du fonctionnement estuarien en milieu macrotidal.

Le marnage en baie de Seine varie en effet de 3 m à 7,5 m et les marées jouent un rôle déterminant sur la dynamique estuarienne. Suite au frottement sur les petits fonds de la baie, l'onde sinusoïdale de marée se déforme et devient asymétrique dans les couloirs estuariens. La durée du montant est alors plus courte que la durée du perdant et une tenue du plein de 2 h à 2 h 30 apparaît autour de la pleine mer. Cette altération de la courbe de marée s'accroît vers l'amont et s'accompagne d'une asymétrie des courbes de vitesses de courant : le flot dure moins longtemps mais s'installe plus brutalement que le jusant. De plus, ce dernier se concentre dans le chenal principal, de telle sorte que les calculs de vitesses résiduelles font généralement apparaître là un mouvement vers l'aval à toutes profondeurs. La circulation étagée avec courants résiduels vers l'amont au fond et vers l'aval en surface ne prend place que dans les embouchures. Ainsi, le point nodal de circulation se situe-t-il très en aval de la limite de l'intrusion saline. Ce schéma diffère de celui des estuaires microtidaux où la circulation résiduelle induite par les courants de densité s'observe dans toute l'étendue de l'intrusion saline. Dans les chenaux secondaires (Seine) et sur les berges, l'influence dominante du flot détermine, par contre, des résultantes dirigées vers l'amont.

Ces actions hydrodynamiques contrôlées par le jeu des marées et particulièrement bien marquées en vive-eau et en étiage jouent un rôle déterminant sur les processus de remise en suspension, de transport et de dépôt des sédiments. Le bouchon vaseux, souvent très turbide, résulte essentiellement de remises en suspension au flot et au jusant; les décantations qui se produisent à l'étalement de pleine mer le font presque entièrement disparaître. Ces alternances de gonflement-dégonflement, particulièrement bien développées en vives-eaux, s'accompagnent d'un mouvement de va-et-vient au cours de la marée, de 10 à 20 km selon la dimension des estuaires. Ce modèle d'évolution du bouchon vaseux en régime macrotidal diffère nettement de celui qui s'observe dans les estuaires microtidaux où la masse de matières en suspension varie peu au cours du cycle de marée. On relève en outre dans ces derniers, ceux de la côte Est des Etats-Unis notamment, un important gradient de turbidité de la surface au fond, alors que les fortes turbulences du régime macrotidal tendent à homogénéiser les eaux.

Les cycles lunaires, vives-eaux-mortes-eaux, se traduisent par des variations importantes des vitesses de courants et par conséquent des possibilités de remise en suspension des sédiments. En vives eaux, les charges en M.E.S. peuvent être 20 fois supérieures à ce qu'elles sont en mortes-eaux. C'est également là une particularité des estuaires macrotidaux; ces variations cycliques des teneurs en M.E.S. ne se rencontrent pas en régime microtidal. Il convient de souligner que la crème de vase, identifiée dans certains estuaires macrotidaux comme la Gironde (Allen *et al.*, 1975) ou la Loire (Galenne, 1974), n'a pas été rencontrée en baie de Seine. Cela résulte probablement de la nature relativement grossière, silto-sableuse, du matériel transporté en suspension dans les estuaires considérés.



En outre, la position et la concentration du bouchon vaseux sont influencées par le débit fluvial. En étiage, sous l'influence prépondérante du flot, le matériel fin remonte vers l'amont et la masse des sédiments en suspension dans le bouchon vaseux est maximale. En crue par contre, le jusant renforcé du courant fluvial déplace le bouchon vaseux vers l'aval jusqu'à son expulsion partielle en mer. Il en résulte une diminution de la quantité de M.E.S. stockée dans l'estuaire. Ce mode de fonctionnement se distingue là encore de celui des milieux microtidaux où le bouchon vaseux cantonné dans la partie amont est d'autant mieux développé que le débit fluvial est élevé.

Dans ces conditions, des envasements importants se produisent à l'intérieur de l'estuaire en étiage, notamment dans la partie amont. L'origine marine des sédiments est alors prouvée par certains oligoéléments métalliques utilisés comme traceurs, les radionucléides notamment comme le soulignent Auffret *et al.* dans le cas de l'Orne (ce colloque). Ces longues périodes de faibles débits sont également favorables aux apports sablo-silteux dans la partie inférieure de l'estuaire sous l'action conjuguée des houles et des courants de marée. En crue, les envasements intéressent les zones d'embouchures et le proche horizon marin: avant-port de Caen-Ouistreham, port du Havre et ses abords, banc du Ratier par exemple. Il reste que le bilan sédimentaire des milieux considérés est positif, les estuaires de la baie de Seine se colmatent. Celui de l'Orne, ceux de la baie des Veys sont presque entièrement comblés. Bien que considérablement réduit, celui de la Seine est encore le moins évolué (Auffret et d'Ozouville, ce colloque).

Compte tenu du degré de colmatage des estuaires, des endiguements existants et de la dynamique du bouchon vaseux en fonction du débit fluvial, le temps de résidence des eaux douces est très court en période de crue (de quelques heures à quelques jours selon la dimension des estuaires), alors qu'en étiage il peut atteindre plusieurs semaines voire quelques mois. Dans ces conditions de faibles débits, il est classique d'observer un enrichissement de la phase dissoute pour de nombreux métaux au niveau du bouchon vaseux résultant du remaniement des fonds sous l'action des courants de marés (Boust, 1981). En crue, les courts temps de résidence expliquent la relative homogénéité de la fraction dissoute dans l'ensemble de l'estuaire. En ce qui concerne le temps de résidence du matériel particulaire, un problème se pose, celui du stockage sur les aires de sédimentation dans les estuaires, temporaire ou définitif. Dans l'état actuel des connaissances, on peut seulement comparer les apports fluviaux au matériel présent en suspension dans le bouchon vaseux. Ce dernier représente pour la Seine 0,4 à 2 ans des apports annuels (Avoine *et al.*, 1984). Il faut toutefois souligner que le renouvellement du stock peut être très rapide (5 jours en crue en 1983), alors qu'il atteint plusieurs mois en étiage. Cette différence dans les temps de renouvellement ou de résidence du matériel sédimentaire dans l'estuaire est fondamentale à considérer pour rendre compte des échanges qui se produisent à la transition eau douce-eau salée. Ces derniers ne sont pas encore suffisamment connus pour établir des bilans complets d'exportation entre les estuaires et le large. Il apparaît toutefois qu'il s'agit plus de zones de transit que de stockage, ce rôle ayant été accentué par les aménagements (Avoine *et al.*, 1981 et 1984). Enfin, le caractère macrotidal des milieux considérés, par les turbulences et le brassage qui lui sont associés, conduit à des taux de pollution relativement modérés dans l'ensemble, malgré des apports assez élevés pour diverses substances (Avoine, Dubrulle et Larssonneur; Guéguéniat, Boust *et al.*, ce colloque).

### 3.- LE REGIME HYDROSEDIMENTAIRE DE LA BAIE DE SEINE

La baie de Seine se trouve à l'interface entre une mer à très forte énergie, la Manche et un bassin versant assez vaste, drainé par plusieurs rivières, principalement la Seine, qui rassemblent des eaux chargées de polluants



d'origine industrielle, agricole et urbaine et qui possèdent un estuaire. Les mouvements des masses d'eau y sont importants dans un cadre morphologique simple de telle sorte que nous avons là un domaine marin exemplaire, susceptible d'éclairer à l'échelle mondiale les processus physiques, chimiques, biologiques qui s'exercent en milieu à hydrodynamisme élevé. L'un des principaux objectifs du programme baie de Seine fut de s'attacher à son fonctionnement hydrosédimentaire, sachant que la partie orientale qui reçoit la Seine, l'Orne, la Dives et la Touques fut étudiée en priorité. Les résultats les plus nombreux concernent aujourd'hui cette zone.

### 3.1. L'influence des apports fluviaux en Baie de Seine :

L'impact des eaux douces se manifeste surtout dans la partie orientale de la baie où débouchent les principales rivières. Partant de là, les eaux dessalées s'écoulent d'une part vers l'Ouest, d'autre part vers le Nord déterminant une stratification de densité particulièrement marquée en crue. Il en résulte une circulation résiduelle inverse en surface et en profondeur mise en évidence par modèle numérique (Thouvenin et Salomon; Le Hir *et al.*, ce colloque) et vérifiée en nature (Le Hir et L. Yavanc; Avoine et Crevel, ce colloque). Quant à la partie occidentale de la baie où pénètrent les eaux de la Manche, elle présente un caractère franchement marin (Le Hir *et al.*, ce colloque).

Nous avons vu ci-dessus que des suspensions sont expulsées en Baie de Seine en période de crue, principalement à basse-mer. Il en résulte des *panaches turbides* visibles sur images satellites (Thomas, ce colloque) et cartographiés par mesures directes (Avoine et Crevel, ce colloque). Il apparaît que le panache de la Seine peut s'avancer jusqu'au Parfond et il est probable qu'une partie des suspensions s'échappe de la baie par le Nord. Le matériel transporté en suspension se répartit sur toute la tranche d'eau mais dans la partie orientale de la baie, le calcul des flux résiduels par Avoine et Crevel montre des inversions entre surface et fond avec évacuation vers le large en surface et mouvement opposé en profondeur, déterminant notamment un transit vers l'estuaire de la Seine. C'est en étiage que ces mouvements inverses sont les plus marqués. En crue, l'expulsion du matériel en suspension vers le domaine marin est largement dominante. Cet impact des apports solides d'origine estuarienne sur la sédimentation vaseuse de la baie de Seine est mis en évidence par certains oligoéléments métalliques qui constituent des marqueurs. Ainsi, Avoine et Crevel montrent que l'influence de la Seine s'exerce principalement dans l'embouchure et vers le Nord sur la frange côtière du Pays de Caux. De même, le nickel permet par exemple de cerner la zone d'impact de l'Orne sur le milieu marin (Avoine, Dubrulle et Larssonneur, ce colloque). En baie des Veys, ces mêmes auteurs montrent que ces expulsions de matériel fin, plus ou moins contaminé, sont cause d'envasements dans les parcs ostréicoles et occasionnent des problèmes de salubrité.

L'imagerie obtenue par le capteur Coastal Zone Color Scanner (CZCS) opérant sur le Satellite Nimbus 7 a permis à Thomas (ce colloque) de caractériser la distribution des matières en suspension des eaux de surface sur une grande partie de la Manche durant l'année 1981. 16 scènes ont été acquises conduisant à la sélection de 7 images qui forment une chronique convenablement répartie dans le temps. Pour chaque image une carte des concentrations en M.E.S. des eaux de surface a été réalisée sur la base de mesure faites *in situ*. Ces documents instantanés mettent en relief les variations spatiales des teneurs en M.E.S. et leurs évolutions temporelles sous l'effet conjugué des débits fluviaux, des courants de marée et de la houle. Les fronts estuariens apparaissent particulièrement bien en crue (image du 01/02/81 avec un débit de 1 100 m<sup>3</sup>/s pour la Seine), tandis qu'en étiage (06/09/81) ils s'estompent presque totalement. Les autres images illustrent des situations intermédiaires. On relève également une frange de turbidités côtières plus ou



moins élevées selon la turbulence du milieu. Les images du 14/02/81 et du 22/06/81 montrent enfin une structure relativement turbide à l'Est du Cotentin qui localise selon Thomas le tourbillon de Barfleur décelé par modélisation numérique des courants de marée (Salomon, ce colloque). Ce vaste mouvement anticyclonique qui se rapporte à la circulation résiduelle trouve donc dans certaines conditions météorologiques une expression instantanée sous forme de concentrations relativement plus fortes en matières en suspension.

### 3.2. L'étude des matières en suspension :

Les particules en suspension dans les eaux de la baie de Seine et des estuaires qui en sont tributaires sont d'une grande diversité qualitative et texturale qui se traduit par des comportements dynamiques variés. Lafite, Dupont et Lamboy (ce colloque) ont mis au point une stratégie d'étude de ce matériel comportant notamment :

- une granulométrie en nombre et en volume des particules,
- un traitement statistique de ces résultats par la méthode des classifications ascendantes hiérarchisées,
- l'analyse factorielle des données granulométriques,
- la quantification des fractions organiques et minérales,
- des observations au microscope électronique à balayage.

L'application de cette méthode à la campagne Elie de décembre 1983, par exemple, fait apparaître pour la partie orientale de la baie de Seine une distinction nette entre des silts fins issus de l'estuaire et le matériel marin composé de gros éléments planctoniques. Par ailleurs, le pôle marin faiblement concentré, le pôle estuarien au contraire fortement concentré et une zone de transition plus ou moins développée se dégagent clairement du diagramme bivarié d'interprétation construit à partir d'un millier d'échantillons.

Après cette contribution à caractère méthodologique, Dupont, Lafite et Lamboy apportent une série de résultats sur le matériel particulaire de l'estuaire de la Seine et de la baie de Seine orientale. En estuaire, la partie amont est caractérisée par des silts moyens à spectre étalé: les silts fins dominent très largement dans la zone du bouchon vaseux et se retrouvent dans le panache turbide de l'embouchure où ils s'associent progressivement à des silts grossiers, voire à des sablons de nature organique. Les spectres granulométriques sont beaucoup plus homogènes en Baie de Seine, mais les principales composantes du matériel en suspension ont pu être mises en évidence par analyse factorielle. On retrouve notamment la fraction silteuse fine caractéristique du bouchon vaseux et dont la répartition suit les isohalines, tandis que le matériel biologique devient prépondérant vers le large notamment aux abords d'Antifer. L'ensemble de ces résultats sur les suspensions conduit les auteurs à proposer une interprétation schématique dans laquelle ils définissent des *fronts* entre les masses d'eau. Ainsi existe-t-il un front entre les eaux estuariennes et marines. Pour illustrer ce phénomène au contact duquel les échanges sont encore mal connus, les auteurs font part de leurs observations le long du littoral crayeux du Pays de Caux. Là se rencontre un contact relativement brutal entre les eaux côtières très chargées en coccolites issues de la craie et les eaux du large peu concentrées. Cet exemple particulièrement bien tranché pourrait servir de modèle à l'étude des échanges au niveau des fronts.

La *fraction organique*, vivante et inerte, joue un rôle très important dans les suspensions de la baie de Seine, elle fait l'objet de la communication de Dupont et Lafite illustrée par une série de photos au microscope électronique à balayage (M.E.B.).

Le matériel organique vivant est très riche en diatomées qui, par le mucus qu'elles secrètent, sont parfois à l'origine d'agrégats organo-minéraux. Dans l'ensemble, les populations planctoniques qui sont soumises à des cycles sai-



sonniers caractérisent souvent certaines classes du spectre granulométrique des suspensions et conditionnent leur comportement hydrodynamique. On reconnaît également des pelotes fécales de forme ovoïde, plus ou moins allongées et des pseudofèces ne présentant aucune structure organisée. Les Copépodes sont à l'origine de nombreuses pelotes.

La fraction inerte renferme divers éléments figurés identifiés au M.E.B.: tissus vasculaires d'origine végétale, fibres de cellulose, particules carbonées correspondant à des résidus de combustion industrielle. Elle contient également des structures organo-minérales variées: agrégats, flocons, voiles... Des dosages d'hydrocarbures ont en outre été effectués dans les eaux de surface de la partie orientale de la baie de Seine, ils montrent des teneurs relativement élevées à l'embouchure de la Seine et au Nord du dépôt de dragage d'Octeville qui constitue probablement une source secondaire. Quant aux teneurs en matière organique totale, elles intègrent à la fois le matériel vivant et inerte de telle sorte qu'elles ne sont pas obligatoirement liées aux charges en suspension.

Les spectres granulométriques de suspensions ont également été étudiés par Brun-Cottan et Ben Brahim lors de la campagne Elie de décembre 1983 qui se déroula, rappelons le, en étiage. Les 200 échantillons analysés ont permis aux auteurs de calculer le *flux de sédimentation*, qui varia de 0,3 à 4 mg/m<sup>2</sup> / heure. Dans ces conditions, la quantité de matière déposée sur le fond au cours d'un cycle de marée était de l'ordre de 20 g/m<sup>2</sup> aux points F3 et F4 situés respectivement au large du cap d'Antifer et du cap de la Hève, alors que la quantité totale de matières, intégrée sur la colonne d'eau, était de 80 à 150 g. En admettant un régime de sédimentation - remise en suspension équilibré pendant plusieurs marées, les valeurs obtenues impliquent que les particules en suspension résident en moyenne 70 à 80% de leur temps dans l'eau et 20 à 30% dans le sédiment sur le fond. Ces résultats ne sont évidemment valables que pour les conditions de la mission considérée, en période de crue ou après tempête les bilans sont probablement très différents.

### 3.3. Éléments de dynamique sédimentaire en baie de Seine.

#### 3.3.1. Envasements - désenvasements :

L'expulsion du bouchon vaseux durant les crues conduit, nous l'avons vu, à des envasements dans les zones d'embouchure. Le suivi sédimentologique de ces zones (Avoine et Crevel, ce colloque) montre que ces dépôts sont souvent temporaires suite au remaniement de matériel fin par les courants de marée et les houles. Ainsi observe-t-on en Baie des Veys, dans la région de Grandcamp, le désenvasement progressif des parcs à huîtres après des envasements hivernaux souvent soudains (Avoine, Dubrulle et Larsonneur, ce colloque). Les matières remises en suspension sont soit réintroduites en estuaire, soit dispersées plus au large où elles peuvent produire de nouveaux envasements, également temporaires (Crevel, Avoine, ce colloque). Les observations les plus précises à ce sujet ont été faites entre la région havraise et le port d'Antifer. Au SW du port du Havre, les deux stations de suivi régulier des peuplements benthiques (Gentil *et al.*; Avoine et Crevel, ce colloque) montrent d'importantes variations des teneurs en pélites au cours du temps. Des envasements se produisent en période d'étiage, des désenvasements l'hiver mais les informations sont encore trop fragmentaires pour rendre compte des processus qui contrôlent ces alternances envasements-désenvasements. Entre la Hève et Antifer, grâce à 4 campagnes successives de prélèvements, de février à septembre 1982, et à une étude statistique des données par analyse factorielle des correspondances, des variations de la couverture de dépôts meubles ont été mises en évidence par Crevel (1983, ce colloque) entre - 13 et - 20 m. Nous sommes là dans une zone fortement influencée par les apports sur le dépôt de dragage d'Octeville. Des envasements se produisent en pério-



de de calme hydrodynamique tandis que le matériel fin est remobilisé durant les tempêtes laissant la place à des sédiments plus sableux. Le rôle des fortes houles sur la sédimentation semble d'ailleurs fort important, il est encore malheureusement très mal connu. Outre quelques observations portant sur la nature des fonds après tempêtes on dispose d'un profil de turbidités réalisé en crue devant l'embouchure de la Seine par Avoine (Avoine *et al.*, 1984) dans des conditions de morte-eau et mer agitée (fig.). On constate que les teneurs en M.E.S. sont alors élevées dans toute la colonne d'eau, et dans l'ensemble, supérieures à celles relevées en période de vive-eau, par mer calme. Quant aux travaux de Crevel (ce colloque), ils montrent en outre que les fluctuations de la couverture de dépôts meubles ne se marquent plus au-dessous de -20 m et que le matériel fin issu du dépôt de dragage d'Octeville se déplace vers le Nord confirmant en cela les résultats acquis par traceurs radioactifs (Tola, 1984; Avoine *et al.*, ce colloque); ils peuvent ainsi contribuer à l'envasement du port d'Antifer. La comparaison de levés bathymétriques réalisés en 1978 et en 1982 dans cette enceinte portuaire a permis à Crevel de chiffrer le bilan sédimentaire pour 4 ans. L'exhaussement moyen annuel est d'environ 5 cm sachant que les envasements se situent préférentiellement dans la partie nord, le long des ouvrages, et aux abords du port de service. Les volumes accumulés représentent environ 10 à 12% des largages effectués sur le site d'Octeville. Ils sont toutefois sous-estimés dans la mesure où une frange de 200 m environ, bordant la digue, n'a pas fait l'objet des levés bathymétriques de comparaison. Malgré cette réserve, il semble que les atterrissements enregistrés dans le port d'Antifer soient légèrement inférieurs aux prévisions qui étaient de 17 cm/an. Considérant par ailleurs les connaissances acquises en dynamique sédimentaire et les coûts de transports, l'emplacement retenu pour les dépôts de dragages du port du Havre représente un compromis acceptable.

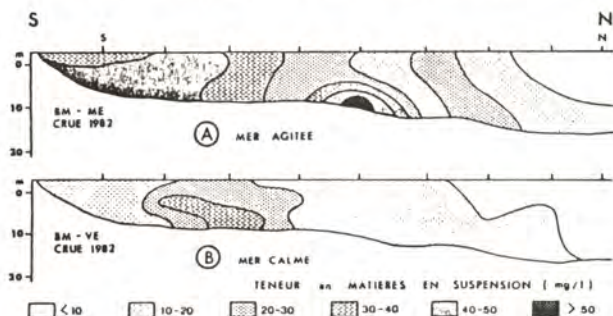


Fig. Influence de la houle sur la turbidité des eaux de la baie de Seine.

Les fluctuations de la couverture sédimentaire ont également été observées par enregistrements au sonar à balayage latéral. Auffret et d'Ozouville ont en effet enregistré des structures permanentes ou temporaires interprétées comme issues de la reprise de dépôts fins cohésifs sous l'action des agents hydrodynamiques. Ces structures représentent des formes d'érosion en sillons ou en taches et des rubans temporaires de vase dont la variabilité, selon les types de conditions météorologiques, a été constatée.

D'après l'ensemble des résultats acquis dans la partie orientale de la baie de Seine, le bilan sédimentaire s'établit à partir des processus suivants. Il existe des apports issus de la Seine en crue, non chiffrés, mais probablement fort modestes en comparaison des importants volumes déversés sur le dépôt de dragage d'Octeville, en moyenne 2,4 millions de  $m^3$ /an (Chauvin *et al.*, ce colloque); 30% de ces apports anthropiques, hétérogènes, restent sur place. Une partie du matériel évacué vers le Nord se répartit, temporairement au moins, sur les fonds. La fraction piégée par la digue du port d'Antifer



représente environ 15%, tandis que, le système n'étant pas clos, du matériel fin peut être progressivement dispersé plus loin pour sortir de la baie. Nous n'avons à présent qu'une seule donnée sur les flux de matières entre la baie de Seine et la Manche orientale. Située au Nord d'Antifer, elle indique un flux résiduel vers l'Est en surface et vers le SSW au fond (Avoine, communication orale).

### 3.3.2. Les apports du sonar à balayage latéral et de la sismique réflexion à haute définition :

La couverture de la baie de Seine au sonar à balayage latéral par Auffret et d'Ozouville met en évidence une série de structures sédimentaires et fournit des précisions sur la répartition superficielle des dépôts. Les principaux apports nouveaux à ce sujet concernent l'existence de longs rubans sableux ornés de mégarides et de trainées sableuses qui se superposent à un environnement graveleux résiduel dans les parties centrale et occidentale de la baie. Le sable constitue alors une phase mobile organisée en structures sédimentaires longitudinales et transversales qui indiquent une direction de transit vers le Sud-Est, c'est-à-dire vers l'estuaire de la Seine. Le domaine occidental situé à l'intérieur d'une ligne Barfleur-Grandcamp montre au contraire des transits sédimentaires vers le Nord-Ouest de telle sorte que les mouvements s'effectuent en sens opposé sur les deux flancs des bancs de Saint-Marcouf et du Cardonnet.

Plusieurs irrégularités morphologiques (paléovallée, plateaux rocheux) sont à l'origine de trainées ou de rubans sableux en baie de Seine centrale. Il y a peu de structures observables en baie de Seine orientale, probablement à cause de la finesse et de la cohésion des dépôts. Cependant, comme nous l'avons signalé ci-dessus, des formes d'érosion de sédiments vaseux ont été mises en évidence comportant notamment des formes lichénoïdes localisées sur les deltas de jusant et des réseaux de sillons ramifiés, de profondeur métrique, subperpendiculaires au littoral, et situés entre l'Orne et la Touques. Il y a là une source de matériel qui contribue au colmatage des estuaires.

Le *prisme sédimentaire* de la baie de Seine orientale a été cartographié par sismique réflexion à haute définition par Auffret et d'Ozouville. Ce prisme forme une couverture continue, d'épaisseur modeste, ne dépassant 10 m que sous 1/5 de sa surface, à savoir aux extrémités ouest et est. Il se compose de sédiments fluvio-marins à marins mis en place durant la transgression holocène. Les principales unités sédimentaires en présence sont le banc de Seine et les deltas de marée de la Seine et des rivières du Calvados. La zone située entre la paléovallée de la Seine et la côte du Calvados est très monotone et masque un réseau de chenaux de 4 à 6 m de profondeur représentant le modelé de la surface préholocène avec les anciennes rivières du Calvados. En dehors de ces dépressions comblées par la transgression holocène, la couverture sédimentaire est mince, voire inexistante, laissant affleurer des formations argilo-tourbeuses postglaciaires identifiées par Avoine (1981) et localement en voie d'érosion. Nous sommes donc là en présence d'une zone à bilan sédimentaire nul à négatif.

Le banc de Seine est accroché au versant septentrional de la paléovallée de la Seine et porte de nombreuses structures sédimentaires observées au sonar latéral (Auffret et d'Ozouville, ce colloque): rubans, mégarides, ridins. Ces dernières indiquent des transports vers le Nord-Est sur le flanc sud et vers le Sud-Ouest sur le flanc nord. Ces convergences de transit témoignent de l'activité sédimentaire actuelle du banc construit par les courants de marée. Les auteurs font intervenir principalement l'action du flot chenalisé par la paléovallée de la Seine et associée à une surverse qui chasse les sédiments latéralement, puis l'action du jusant, guidé par un effet de sillage créé par le cap de la Hève au débouché de la Seine.



Les deltas de marée constituent des protubérances sédimentaires d'une dizaine de mètres d'épaisseur devant les embouchures. Ils proviennent principalement d'une accumulation de sables déplacés par les houles dominantes de secteur ouest et renforcées par les courants de flot. Les apports vaseux d'origine estuarienne peuvent également s'y déposer, mais ils sont soumis à remaniements et leur contribution au bilan global, si elle reste à quantifier, semble mineure en raison des fortes énergies qui règnent aux faibles profondeurs considérées. L'évolution de ces constructions sédimentaires conduit à l'émersion d'une barrière côtière, coiffée de dunes, comme celle qui se développe aux embouchures de l'Orne et de la Dives et qui favorise le colmatage interne des basses vallées. Dès lors, il apparaît que l'évolution des corps sédimentaires de l'embouchure de la Seine est moins avancée. Cependant, la masse principale du delta de jusant commence à déborder le cap de la Hève, progressant vers l'Ouest en direction du banc de Seine. Cette évolution doit conduire à l'émersion d'une barrière d'embouchure qui favorisera le comblement déjà fort avancé de la Seine (Auffret et d'Ozouville, ce colloque).

### 3.3.3. Les apports des expériences par traceurs radioactifs:

Plusieurs expériences avec traceurs radioactifs ont été réalisées dans la partie orientale de la baie de Seine afin de caractériser les mouvements sédimentaires en intégrant l'effet combiné des houles et des courants de marée. Ces études, menées par le service d'application des radio éléments du C. E.A., avaient pour but, les unes de déterminer le transport en charriage des sables, les autres d'apprécier les possibilités de remise en suspension de sédiments vaseux plus ou moins concentrés. Une synthèse des résultats est présentée ici par Avoine *et al.*

Les sites étudiés dans la partie sud, de Ouistreham à Honfleur, montrent que la résultante des transits sédimentaires par charriage, observée sur plusieurs mois, est dirigée vers l'Est, c'est-à-dire vers l'estuaire de la Seine. Ce transfert est dû à l'action des courants de flot dominants. Près du rivage, au-dessus de l'isobathe -6 m environ, les fortes houles de secteur ouest à nord-ouest provoquent en outre un déplacement des sables vers la côte accompagné d'une dérive littorale d'autant plus importante que la tranche d'eau est mince.

En extrapolant à toute la largeur de l'embouchure (12 km) les débits solides calculés dans les marquages effectués au Nord de Deauville, le volume annuel introduit en charriage dans l'estuaire serait de 65 000 m<sup>3</sup>. Les résultats montrent également que les sédiments fins de la baie sont aisément remis en suspension par les courants de marée, même les plus faibles. Dans l'estuaire de la Seine, près d'Honfleur, des vitesses de l'ordre de 1m/s près du fond, fréquemment atteintes, remobilisent la totalité du matériel déposé, en l'occurrence des sables fins à très fins (grain moyen compris entre 0,175 et 0,26 mm).

Quant aux expériences réalisées entre Le Havre et Antifer, elles permettent de conclure à un mouvement général des sédiments vers le Nord-Est par des fonds inférieurs à -15 m, tant en charriage qu'en suspension. Ce résultat est en accord avec les observations faites dans la zone de dépôt de dragage d'Octeville et rappelés ci-dessus (Crevel, ce colloque). Les schémas de circulation résiduels présentés par Salomon et Le Hir *et al.* (ce colloque) font par contre apparaître des mouvements Nord-Sud le long du littoral cauchois entre Antifer et le cap de la Hève. Il y a là matière à discussion en notant que dans cette zone les conditions de circulation en surface diffèrent assez nettement de celles qui s'exercent au fond (Le Hir et l'Yavanc; Thouvenin et Salomon; Avoine et Crevel, ce colloque) et que ces conditions subissent l'influence des débits et des vents (Le Hir *et al.*, ce colloque). En l'occurrence, les modèles bidimensionnels nous paraissent inadaptes.



### 3.3.4. Sur les bilans sédimentaires en baie de Seine orientale:

Avoine *et al.* (ce colloque) abordent pour conclure leur article le problème des bilans sédimentaires dans la partie orientale de la baie de Seine. Comme nous l'avons vu, les apports annuels de la Seine sont au maximum de 0,7 millions de m<sup>3</sup> alors que les atterrissements dans l'estuaire et dans le port du Havre sont chaque année de l'ordre de 5 millions de m<sup>3</sup>. Il faut donc admettre une importante alimentation en provenance de la mer. Celle-ci est prouvée par différentes observations, celles basées sur les oligoéléments métalliques notamment, stables (Avoine, Dubrulle et Larsonneur, ce colloque) et radioactifs (Auffret *et al.*, ce colloque). Dans ces apports marins, l'érosion côtière ne contribue que pour 200 000 à 300 000 m<sup>3</sup>/an; l'essentiel des transits sédimentaires s'effectue donc en domaine subtidal. D'après les expériences faites avec traceurs radioactifs, les volumes charriés sur le fond sont évalués à 65 000 m<sup>3</sup>. Même si cette valeur est sous estimée, c'est probablement en suspension qu'est introduite dans l'estuaire la majeure partie du matériel sédimentaire qui participe à son comblement. Quelle en est l'origine ? Dès 1929 Volmat suggérait un abaissement des fonds de la baie de Seine orientale. Cette hypothèse est plausible d'autant plus que des érosions ont été observées au sonar latéral par Auffret et d'Ozouville (ce colloque) devant les côtes du Calvados, mais cela n'exclut pas une origine plus lointaine. Des radionucléides issus des rejets de l'usine de la Hague se retrouvent dans les dépôts estuariens et les structures sédimentaires enregistrées en baie de Seine occidentale à centrale témoignent de transits résultants vers le Sud-Est (ce colloque). Mais à quelle vitesse se déplacent les sédiments sableux sur le fond ? Quelle est la part du matériel d'origine proximale et du matériel d'origine distale dans les constructions sédimentaires de la baie ? Ce sont des questions auxquelles il n'est pas possible de répondre précisément aujourd'hui. Il reste qu'au cours de la transgression holocène, par remaniements de formations continentales antérieures et production de bioclastes marins, des sédiments sableux à vaseux se sont accumulés dans les extrémités de la baie sous l'action de conditions hydrodynamiques dominées par les courants de marée (Larsonneur *et al.*, 1982). Le prisme sédimentaire adossé à la côte se prolonge dans les estuaires dont le comblement s'est accéléré depuis 2 siècles du fait des aménagements. Un transfert de matériel a donc dû s'opérer d'aval en amont entraînant probablement un appauvrissement du stock sédimentaire subtidal à intertidal. En Baie de Seine orientale, de la Seine à l'Orne, c'est au rythme de 5 millions de m<sup>3</sup>/an que les estuaires accumulent le matériel venu de la mer (Avoine *et al.*, ce colloque). Comme le montrent Auffret et d'Ozouville cette évolution conduit à l'émersion d'une barrière côtière abritant un estuaire sénile, souvent aménagé; c'est le cas des rivières du Calvados. L'embouchure de la Seine n'est pas encore parvenue à ce stade, mais le calibre de l'estuaire s'est fortement réduit depuis un siècle et demi et sa surface est passée de 130 km<sup>2</sup> à 30 km<sup>2</sup> (Avoine, 1981); son oblitération quasi complète est proche. Qu'advient-il après ? Compte-tenu des faibles apports fluviaux et des fortes énergies en présence dans ce domaine macrotidal, l'évolution vers la structure delta est exclue. C'est vers une côte régularisée, bordée de dunes, aux exutoires étroits que nous allons dans la mesure où les conditions climatiques et la position du niveau marin se maintiendront.

Dans ce cadre, les apports fluviaux bien que réduits, se déverseront directement à la mer, principalement en crue; plus de zones estuariennes tapon susceptibles de stocker et de transformer certains polluants associés aux sédiments. Quant aux chenaux de navigation, leur tendance sera évidemment au comblement accéléré, leur entretien deviendra de plus en plus difficile.



## CONCLUSION .

Les différentes communications présentées montrent que les acquis dans le domaine de la dynamique sédimentaire sont nombreux et importants. Sur le plan méthodologique d'abord je relève tout particulièrement la mise au point d'une stratégie d'étude des suspensions par Lafite *et al.* et l'utilisation de moyens d'investigation modernes comme la télédétection (Thomas) et le sonar à balayage latéral (Auffret et d'Ozouville). L'imagerie et les enregistrements recueillis se trouvent valorisés par les mesures *in situ* et les modélisations effectuées parallèlement. La confrontation de toutes les données et leur discussion accroissent encore la richesse des interprétations.

Les apports fluviaux de la Seine ont été quantifiés par Avoine, il conviendrait d'acquérir des renseignements équivalents sur les rivières du Calvados. Il ressort principalement que dans nos régions, la première crue est responsable des apports les plus importants, tant en matière en suspension qu'en métaux-traces. Par ailleurs, la dynamique estuarienne a été définie en soulignant ses particularités en milieu macrotidal (Avoine, Dubrulle et Larssonneur). Ce caractère joue un rôle essentiel en baie de Seine, tant dans la remise en mouvement et le transfert du matériel sédimentaire, que dans la circulation et le brassage des eaux. Il en résulte d'intenses remaniements, un bouchon vaseux tantôt volumineux et concentré, tantôt presque inexistant, des échanges sur toute la colonne d'eau, une forte dilution des polluants, une vaste dispersion du matériel. Ainsi, par exemple, les acidités élevées provoquées par les rejets de l'usine Thann et Mulhouse n'engendrent pas de répercussions majeures sur le milieu vivant (Proniewski, ce colloque). Ce régime que l'on qualifie même parfois d'hypertidal, tant l'effet des marées y est déterminant, assure le maintien d'un degré de pollution modéré en baie de Seine bien que les apports soient relativement élevés en différentes substances nocives (Avoine; Aminot *et al.*; Guéguénat, Boust *et al.*, Sylvestre *et al.*; Merlin *et al.*; Noël *et al.*; Gentil *et al.*, ce colloque). Des problèmes demeurent cependant, qu'il s'agisse des déversements de phosphogypses (Aminot *et al.*, Proniewski), de certaines pollutions métalliques : Hg, Cu, Cd, Zn, Pb, Ni, Cr, Ag (Avoine; Guéguénat, Boust *et al.*; Chassard-Bouchaud *et al.*), de teneurs élevées en sels nutritifs favorisant les eaux colorées (Aminot *et al.*; Paulmier et Joly), de doses importantes en micropolluants comme les P.C.B. (Abarnou et Simon, ce colloque). En matière d'impact sur le milieu vivant, il ressort que les envasements constituent l'un des effets les plus marquants (Gentil *et al.*; Proniewski). Des apports brutaux déterminés par une crue subite peuvent entraîner l'asphyxie des organismes et conduire à la modification des peuplements. Inversement, ces derniers se reconstituent suite à des désenvasements (Desprez et Dupont). Ces fluctuations envasements-désenvasements ont été mises en évidence en plusieurs régions de la baie de Seine tant par suivi direct de la nature des fonds (Avoine et Crevel; Avoine, Dubrulle et Larssonneur; Crevel) que par la reconnaissance au sonar à balayage latéral (Auffret et d'Ozouville). C'est l'un des résultats importants du programme, mais il reste à en définir précisément les modalités en fonction de la profondeur et du cadre morphologique et hydrodynamique. Le caractère soudain ou progressif de ces fluctuations est important à considérer en matière de dynamique des peuplements benthiques. Or, peu de données existent à ce sujet. Le rôle des houles notamment est très mal connu. Les progrès attendus proviendront de suivis concentrés dans le temps et surtout de mesures en continu, *in situ*, par station autonome. Il convient également de noter que ces processus qui mettent souvent en jeu l'action conjuguée des courants de marée et des houles s'exercent par faibles profondeurs, entre 0 et -10 m principalement. Or, cette frange côtière est dans l'ensemble insuffisamment étudiée; elle est pourtant très importante à connaître sur le plan de ses relations avec les zones intertidales, sachant qu'elle est également le siège de riches nourriceries



(Duval, ce colloque). Un effort particulier devra porter sur cette frange côtière à l'avenir, il sera favorisé en baie de Seine par le lancement du N.O. "Côte de Normandie".

La mobilité des fonds sédimentaires a été bien perçue sur les enregistrements de sonar à balayage latéral (Auffret et d'Ozouville); c'est là un outil remarquable dont l'utilisation devra être intensifiée afin de resserrer la maille des observations et de les répéter dans des conditions météorologiques différentes. La quantification des volumes en mouvement sur le fond reste à faire. D'après les conclusions des expériences par traceurs radioactifs (Avoine *et al.*), les débits solides résultants sont probablement faibles. En ce qui concerne les problèmes de remise en suspension, une origine n'a pas été étudiée, celle provenant des processus de bioturbation. Il y a là encore un champ de recherches important, surtout quand on connaît la densité de certains peuplements benthiques (Gentil *et al.*, ce colloque).

L'étude du fonctionnement hydrosédimentaire de la baie de Seine figurait parmi nos objectifs, les acquis sont nombreux, des interrogations demeurent, certains aspects sont à développer et à approfondir. Parmi les acquis je relèverai ce qui concerne la dynamique des suspensions à l'interface estuaires-baie de Seine. Des évacuations en mer ont lieu en période de crue avec envasements dans les embouchures et aux abords. Puis des désenvasements progressifs se produisent ultérieurement, engendrant une dispersion du matériel avec envasement de nouvelles zones un peu plus profondes ou réintroduction de particules sédimentaires en estuaires, très en amont parfois, en période d'étiage (Avoine, Dubrulle et Larssonneur; Avoine *et al.*; Guéguénat, Boust *et al.* 2). Le bilan est en faveur du comblement de ces exutoires fortement aménagés depuis le siècle dernier. Les zones naturelles de dépôt ont peu à peu disparu de telle sorte qu'à présent, les estuaires de la baie de Seine sont davantage des milieux de transit que de stockage. L'impact des pollutions sur le proche horizon marin se trouve renforcé. C'est le cas par exemple en baie des Veys pour les récentes installations conchylicoles de la région de Grandcamp. En l'occurrence, il est certain que la poldérisation quasi complète des couloirs estuariens, en supprimant les vasières correspondantes, a engendré le glissement des champs vaseux vers l'aval, ce qui défavorise aujourd'hui le développement des activités ostréicoles surtout (Avoine, Dubrulle et Larssonneur). Il est essentiel de préserver le plus longtemps possible les zones naturelles de marais qui demeurent encore en estuaires.

Parmi les questions incomplètement solutionnées, il y a celle des mouvements sédimentaires en suspension soumis à une circulation étagée des eaux par effet de densité. Cette situation se présente aux abords des embouchures importantes de la baie de Seine orientale et donne lieu à des résultats qui ne sont pas tous rigoureusement concordants (Le Hir et l'Yavanc; Salomon; Thouvenin et Salomon; Le Hir *et al.*; Crevel; Avoine et Crevel; Avoine *et al.*, ce colloque). Le problème est à trois dimensions et se trouve compliqué par les fluctuations du débit et l'influence des vents. Nul doute qu'il y a encore là matière à recherches dont l'intérêt se trouve renforcé par les incidences pratiques : envasements des installations portuaires, devenir des rejets de dragages.

Parmi les problèmes qui n'ont été que peu abordés figurent ceux des relations entre baie de Seine occidentale et baie de Seine centrale-orientale d'une part, entre baie de Seine et Manche orientale d'autre part. Les études de dynamique des eaux (Le Hir *et al.*), de mouvements sableux sur les fonds (Auffret et d'Ozouville) permettent de distinguer très nettement la partie occidentale à l'intérieur d'une ligne Barfleur-Pointe de la Percée, du reste de la baie de Seine. Mais y a-t-il des échanges entre ces 2 zones ? à quelle vitesse ? Cette dualité de fonctionnement à l'intérieur même de la baie n'a

été que peu étudiée. Une première réponse provient cependant de l'étude du fluorure (Aminot *et al.*, ce colloque). Quant aux rapports entre la baie de Seine et la Manche orientale au niveau d'une ligne Barfleur-Antifer, ils mériteraient d'être approfondis partant des acquis suivants développés dans ce mémoire :

- les eaux marines entrent par le Nord-Ouest et des sorties s'effectuent au Nord-Est (Le Hir *et al.*);
- des particules en suspension marquées par des radionucléides rejetés au cap de la Hague pénètrent en baie de Seine (Auffret *et al.*);
- le temps de stockage en baie de Seine a été estimé, il est compris entre 43 et 113 jours (Le Hir *et al.*; Aminot *et al.*).

Le flux de matières évacué au large d'Antifer n'est notamment pas connu, pas plus que les flux d'entrées.

En abordant le programme de recherches sur la baie de Seine nous avons, au travers du schéma de distribution de ses dépôts superficiels une vision figée de ses caractères sédimentologiques. Nos divers travaux montrent qu'il y a mouvements, échanges, apports et érosions. Une dynamique active donc, dans un milieu de haute énergie et dont nous commençons aujourd'hui à comprendre le fonctionnement.

- 
- ALLEN G.P., SAUZAY G., CASTAING P. & JOUANNEAU J.M. (1975).- Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. In: Estuarine processes, t. 2, Academie Press, New York, p. 63-79.
- AUFFRET J.P. & LARSONNEUR C. (1977).- Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord-Cotentin. Bull. Soc. géol. Norm., t. IXIV, 4, p. 21-33.
- AUFFRET J.P., ALDUC D., LARSONNEUR C. & SMITH A.J. (1980).- Cartographie du réseau de paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche orientale. Ann. Inst. océanogr., NS, t. 56, p. 21-35.
- AVOINE J. (1981).- L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3ème cycle, Caen, 236 p.
- AVOINE J. (1982).- Mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Seine. Mém. Soc. géol. Fr., NS., n° 144, p. 17-25.
- AVOINE J., ALLEN G., NICHOLS M., SALOMON J.C. & LARSONNEUR C. (1981).- Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. Mar. geol., 40, p. 119-137.
- AVOINE J., BOUST D. & GUILLAUD J.F. (1984).- Flux et comportement des contaminants dissous et particuliers dans l'estuaire de la Seine (France). Proc. Symp. on contaminant Fluxes through the coastal zone, Nantes. sous presse.
- BOUST D. (1981).- Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3ème cycle, Caen, 186 p.
- CREVEL L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse de 3ème cycle, Paris IX, 185 p.
- DUBRULLE L. (1982).- Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. Thèse 3ème cycle, Caen, 394 p.



- DUBRULLE L. & LARSONNEUR C. (1984).- La baie des Veys : étude hydrosédimentaire. Rap. ronéot., 115 p.
- GALENNE B. (1974).- Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la crème de vase. Thèse de 3ème cycle, Nantes, 323 p.
- LARSONNEUR C. (1971).- Manche centrale et baie de Seine, géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse Caen, 394 p.
- LARSONNEUR C., BOUYASSE P. & AUFFRET J.P. (1982).- The superficial sediments of the English Channel and its Western approaches. Sedimentology, t. 29. p. 851-864.
- SCHEMA D'APTITUDE ET D'UTILISATION DE LA MER POUR L'ESTUAIRE DE LA SEINE (1977-1980) - Rapports inédits, Cent. Nat. Exp. Océans, Mission Et. Bas. Seine et Mission Amén. Bass. Norm.
- TOLA F. (1984).- Etude du rejet de produits de dragage à l'aide de traceurs radioactifs, transfert et dispersion des fines particules en suspension et évolution dans le temps des sédiments déposés sur le fond. XVIIIe journées de l'Hydraulique, Marseille, I.15.1.-I.15.8.
- VOLMAT M. (1929).- Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22e Cah. Rech. Hydr. sur le régime des côtes, Paris, Imp. Nat., 39 p.

CARTOGRAPHIE DU PRISME SEDIMENTAIRE HOLOCENE EN BAIE DE SEINE ORIENTALE, PAR  
SISMIQUE REFLEXION A HAUTE DEFINITION.

AUFFRET J.P.\*, d'OZOUVILLE L.\*\*.

Les sédiments holocènes constituent en Baie de Seine orientale une couverture sédimentaire continue dans l'est de la baie. Ce prisme sédimentaire, qui représente le bilan des apports de la transgression holocène, a été étudié par sismique réflexion à haute définition. La carte réalisée inclut dans un seul ensemble des formations déposées en 8 000 ans environ d'histoire géologique en phase transgressive. Il se compose donc, non seulement des sédiments sous-marins ou littoraux de la phase actuelle de fin de transgression qui constituent l'unité superficielle, mais également des dépôts littoraux et estuariens développés alors que le niveau marin était plus bas, puis submergés par la transgression. Cette cartographie d'ensemble illustre la convergence vers le sud-est du bilan des transits sédimentaires holocènes, suggérant le mode de comblement, par des sédiments d'origine sous-marine, des estuaires de la Seine et de la côte du Calvados.

La différence entre le stade sénile atteint par l'état d'évolution actuel des embouchures de l'Orne et de la Dives, et le stade actif de l'estuaire de la Seine, réside principalement dans l'émergence d'une barrière côtière dunaire fermant les estuaires de la côte du Calvados.

La carte en isopaques (équidistance = 2 m) des dépôts holocènes (fig. 1) résulte de la compilation de l'ensemble des mesures de sismique réflexion auxquelles nous avons pu avoir accès. Nous avons réalisé les compléments nécessaires à une couverture complète avec un étinceleur S.I.G. 50 joules. La densité des informations ainsi rassemblées nous a permis d'affiner la connaissance de ce corps sédimentaire (Auffret *et al.*, 1983).

Les sédiments holocènes en accumulation mesurable sont confinés dans l'entonnoir que dessine la côte entre la Seine et l'Orne. La définition des enregistrements sismiques dont nous avons disposé ne permet pas d'estimer les épaisseurs de sédiments meubles inférieures à 2 m. On peut cependant considérer que le bed-rock ou les alluvions pléistocènes sont sub-affleurants sur les plateaux sous-marins du Bessin vers l'ouest et du bec de Caux au nord. La couverture sédimentaire holocène de la baie de Seine orientale est de faible extension par rapport à la taille de la baie, et d'épaisseur modeste (elle ne dépasse 10 m que sous 1/5 de sa surface), la vitesse sismique retenue pour le calcul d'épaisseur des sédiments holocènes est 1600 m/s.

#### 1. LES UNITES PRESENTES (Fig. 1).

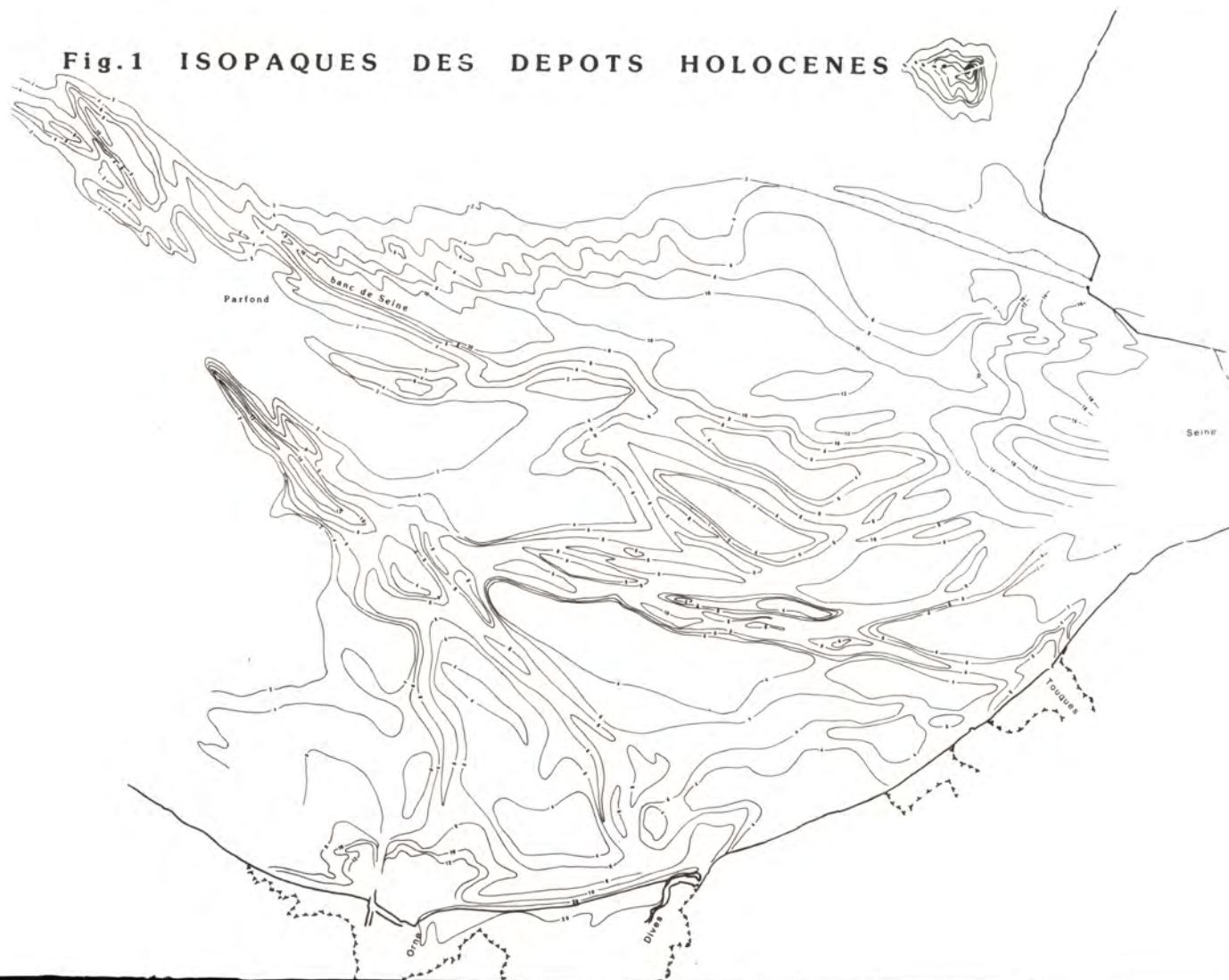
Deux unités sédimentaires sont séparées par la paléovallée de la Seine, trait morphologique principal de la surface anté-holocène, qui constitue une gouttière entre la dépression du Parfond et l'axe de l'estuaire de la Seine. Au nord de cette gouttière, les alluvions pléistocènes, accumulées préférentiel-

\* Université de Caen, Laboratoire de Géologie Marine, 14032 Caen Cedex.

\*\* IFREMER, à CCOP/SOPAC, Mineral Ressources Dpt. Suva, Fiji.



Fig.1 ISOPAQUES DES DEPOTS HOLOCENES



lement en rive droite de la paléovallée, portent le banc de Seine (Auffret, Larsonneur, 1977). Au sud, la surface antéholocène est constituée par l'affleurement des séries jurassiques de la côte du Calvados, entaillées par un réseau de chenaux prolongeant les vallées de l'Orne, la Dives et la Touques. Au débouché de celles-ci est également représentée l'emprise des formations fluvi-marines constituant les deltas de marées externes des estuaires.

## 2. NATURE DES SEDIMENTS.

Les sédiments sont connus par de nombreux prélèvements superficiels (Larsonneur, 1971; Vaslet *et al.*, 1978; Avoine *et al.*, 1984). L'unité superficielle est formée, en fraction dominante, de sables fins (md 0,3 mm, dispersion 0,5). Bonnefille (1963) a établi un diagramme simple permettant d'estimer le courant moyen nécessaire à l'entraînement de telles particules. Entre 30 m de profondeur et le littoral cette vitesse varie de 0.6 à 0.4 m/s. Des vitesses supérieures sont ici atteintes en vive eau (Salomon, 1985, fig. 1), ces sables fins sont donc mobiles. Ils reposent sur des formations fossiles, argilo-sableuses, estuariennes, diachrones et étagées, dont l'étude en fonction de la profondeur a permis à Larsonneur (1971) d'établir une courbe de la montée de la mer flandrienne en Baie de Seine entre - 10 000 ans et l'actuel.

En sismique, on obtient une bonne pénétration dans ces sédiments. La discontinuité entre l'unité sableuse superficielle et les sédiments fluviomarins sous-jacents est parfois perceptible, en particulier sous le banc de Seine. Les sédiments fluviomarins comprennent parfois des niveaux organiques ou tourbeux contenant des gaz; ils se comportent alors en écran acoustique (zone sourde) en particulier au large des côtes du Calvados, entre la Dives et la Seine, où Avoine (1981) avait conclu à l'affleurement de sédiments fossiles. L'ensemble cartographié sur la fig. 1 comporte donc la superposition de deux formations, des sables marins récents en surface, actuellement en cours d'envasement au débouché des estuaires, reposant sur un ensemble fossile de formation fluvi-marine d'estuaire représentant la phase rapide de colmatage au front transgressif de la mer holocène submergée par la poursuite de la transgression.

## 3. ETUDE DES DIFFERENTES UNITES SEDIMENTAIRES.

3.1. Le banc de Seine est accroché à l'accroche du versant septentrional de la paléovallée de la Seine (Parfond). Le versant méridional du banc porte de nombreuses structures sédimentaires traduisant le déplacement des sables vers le NE (Auffret et d'Ozouville, 1985). Ces structures sont des rubans sableux lorsque la couverture sédimentaire est faible. Aux approches du banc, des champs de mégarides ( $\lambda = 10$  à 20 m,  $h = 0.5$  à 1 m) deviennent coalescentes et leur association donne des ridins ( $\lambda = 200$  m,  $h = 3$  à 5 m). Le versant septentrional du banc de Seine porte quelques mégarides à polarité SW. Cette convergence des transits sédimentaires vers l'axe du banc est la règle générale pour ce type de construction dont l'épaisseur est ici modeste, de l'ordre de 10 m. Vers l'est, le banc de Seine se raccorde en continuité aux lobes de jusant du delta de marée de la Seine.

- *Interprétation dynamique de l'origine du banc* : le chenal du Parfond constitue une voie préférentielle de pénétration de l'onde de marée de flot dans la baie (pointe de flot) visible sur les cartes des champs de courants instantanés, ou des représentations de maxima de vitesse de courant (Salomon, 1985). Cette chenalisation provoque une surverse tendant à chasser latéralement les sédiments entraînés vers les bords de la paléovallée, où s'individualisent des rubans de sable (Auffret et d'Ozouville, 1985). Le remplissage rapide de l'estuaire de la Seine au flot, se traduit par une "tenue du plein" de la courbe de marée une heure environ avant et après la pleine mer (Le Floch, 1961). Ce phénomène renforce encore, en fin de flot, la surverse vers



le NE connue sous le nom de courant de Verhaule. Les directions et les dissymétries des structures sédimentaires du flanc sud du banc de Seine indiquent une polarité des transits sédimentaires tractés conforme à cette dynamique des eaux. Cette action n'est que partiellement inversée au jusan, en raison de vitesses de courant plus faibles (asymétrie de la courbe de marée), et de l'effet de sillage exercé par le cap de la Hève qui sépare le flux de vidence de l'estuaire de l'onde générale de jusan provenant de la Manche orientale. Enfin, la perturbation d'écoulement provoquée par le versant du Parfond entraîne la création, sur le flanc méridional du banc de Seine, d'une cellule de circulation cylindrique ou hélicoïdale responsable d'un contre-courant local dirigé vers le banc selon le principe de "séparation de flux" proposé par Allen (1984). Ce schéma de construction du banc de Seine nous paraît plus compatible avec la circulation résiduelle de marée et les directions de transit vers le NE indiquées par les structures sédimentaires que l'hypothèse d'un entraînement des sables vers le SW proposé par Larssonneur (1971).

3.2. Entre la paléovallée de la Seine et le plateau du Calvados, les fonds sont très monotones et dépourvus de structures sédimentaires superficielles (d'Ozouville et Auffret, 1985), à l'exception de structures d'érosion près de la côte. En fait, la couverture sédimentaire holocène masque ici un réseau de chenaux de 4 à 6 m de profondeur qui représentent le modèle de la surface sur laquelle s'est avancée la transgression holocène (fig. 1). Cette couverture est constituée d'argiles et sables fluvio-marins, sous une pellicule sableuse marine très mince ou absente. Avoine (1981) a rencontré cette formation fossile à l'affleurement au large de la Dives et la sismique nous a montré à l'ouest du méridien de Houlgate de larges surfaces formant écran à la pénétration du signal, interprétées ici comme l'affleurement de sédiments organiques contenant des gaz. La faible épaisseur ou l'absence des dépôts récents s'accorde avec les structures d'érosion mises en évidence par sonar latéral (Auffret *et al.*, 1985). Nous ignorons cependant si cette érosion est confinée là où nous l'avons observée, ou si elle concerne de plus larges surfaces.

La couverture sédimentaire holocène de la plateforme du Calvados, au sud de la paléovallée de la Seine, semble donc formée principalement de sédiments fluvio-marins fossiles affleurants ou faiblement recouverts de sables marins récents, voire même en voie d'érosion.

Notons qu'une petite accumulation développée en pointe vers le NW au sud du Parfond (fig. 1) est liée, comme le banc de Seine, au versant méridional de la paléovallée à l'abri duquel elle est développée.

### 3.3. Les deltas de jusan de l'Orne, la Dives, la Touque et la Seine :

Au débouché des estuaires, s'observent des protubérances sédimentaires dessinées sur les cartes marines par les isobathes de 0 et 5 m, voire 10 m pour le delta de jusan de la Seine. Ces ensembles représentent en partie l'équivalent actuel de l'unité fluvio-marine fossile observée au large du Calvados, sous la couche superficielle de sables marins. Ce sont les corps sédimentaires les plus actifs de la zone étudiée comme en témoignent les importants taux de sédimentation indiqués par les volumes annuels de dragage nécessaires pour le maintien des chenaux de navigation, qui atteignent plusieurs millions de mètres cubes en Baie de Seine (Avoine *et al.*, 1984). Il s'agit de constructions fluvio-marines qui, bien que situés à la sortie des estuaires, sont constituées principalement par des sédiments d'origine marine issus de la dérive littorale.

#### 3.3.1. Interprétation dynamique :

Les sables de plage sont poussés vers l'est le long de la côte du Calvados sous l'action des vagues et le débit solide, mesuré jusqu'à une profondeur de -5 m par suivi de traceur radioactif à l'ouest de l'Orne serait de l'ordre



de 60 000 m<sup>3</sup> par an (S.A.R. 1980). La source sédimentaire dominante est donc marine et composée de sables tractés par les vagues sur les plages et leur façade pré-littorale. L'action fluviale, ou plutôt estuarienne, est à la fois dynamique et sédimentaire: la marée, de régime semi-diurne macrotidal, deux fois par jour vide et emplit les estuaires. Ce volume oscillant d'eau de mer est considérable par rapport aux débits fluviaux (on peut évaluer à 12 ce rapport pour la Seine en vive eau), il est en outre transverse par rapport au débit solide de la dérive littorale, sur laquelle il exerce donc le même rôle qu'un épi de plage. Cet épi hydraulique arrête la dérive littorale au débouché des estuaires construisant ainsi les deltas externes de jusant.

Les estuaires internes jouent également un rôle sédimentaire dans l'évolution des deltas de marée de jusant comme sites d'accumulation temporaire, en condition d'étiage, de vase marine molle à haute teneur en eau ou "crème de vase". Les mesures de radioactivité artificielle nous ont permis de caractériser ces crèmes de vase dans l'Orne, à proximité du barrage de Caen (Auffret *et al.*, 1985). Elles sont brutalement expulsées hors des estuaires par les crues qui apportent également en mer des suspensions fluviales. Ce phénomène, appelé sortie du bouchon vaseux, est montré par Avoine *et al.* (1984) pour la Seine et par Dubrulle et Larsonneur (1984) pour l'Orne. Il est interprété comme une évolution récente causée par le développement des endigages en estuaire. Nous avons retrouvé des dépôts en masse de vases à la surface des deltas de jusant d'estuaires sur les enregistrements de sonar latéral (d'Ozouville et Auffret, 1986), ainsi que des figures d'érosion indiquant une reprise active de ces couches de vase molle par les houles de tempête jusqu'à une profondeur de -10 m (cote hydrographique). Les fluctuations d'extension importantes des surfaces envasées offshore en Baie de Seine (Avoine *et al.*, 1984) permettent de conclure que les phénomènes de reprise des vases actuelles, non compactées, sont aussi actifs ici que la sédimentation de ces sédiments fins. Le bilan cumulé de la sédimentation actuelle des vases, hors des estuaires et de leurs deltas de jusant, nous semble donc une contribution mineure au développement du corps sédimentaire holocène représenté figure 1.

### 3.2.2. Discussion :

Les deltas de marée externe, sont des unités très actives de sédimentation fluvio-marine car les apports sableux de la dérive littorale et vaseux des estuaires s'y rejoignent. Ces deltas de marée, exposés en promontoires à l'action des houles et des vents de mer, deviennent ainsi la source sédimentaire principale des sables de plage et de dunes et le support des flèches transverses ou poutiers qui barrent les estuaires. Ces cordons, par coalescence, évoluent vers la barrière côtière caractéristique des littoraux construits (Guilcher, 1954).

Il est intéressant de constater l'écart d'évolution existant ici entre les petits estuaires séniles de la côte du Calvados où l'émersion d'une barrière côtière a accéléré le colmatage interne des basses vallées (elles sont actuellement complètement comblées et aménagées), et l'estuaire de la Seine, moins évolué, où la masse principale du delta de jusant atteint actuellement le méridien du cap de la Hève (fig. 1). La progression des endigages qui reportent vers l'aval la sortie du chenal de Rouen, a accéléré la migration vers l'ouest du delta de jusant. Cette évolution conduira à terme à l'émersion d'une barrière côtière dunaire au front de l'estuaire avec pour conséquence l'accélération du colmatage de l'estuaire interne. Avoine (1981) a estimé cette échéance à 60 ans. Soulignons que cette barrière côtière a déjà existé au XVII<sup>e</sup> siècle entre Trouville et le Banc du Ratier (carte de 1677, in Lennier, 1885).

## 4. CONCLUSION.

Après avoir établi une carte détaillée en isopaques, de la géométrie du



prisme sédimentaire holocène, bilan de 8 000 ans d'évolution naturelle et de 150 ans d'évolution contrôlée par les travaux d'aménagement; nous avons recherché les formes sédimentaires actives, caractérisant l'évolution actuelle. A l'échelle mesurable par les méthodes géophysiques utilisées, la sédimentation sableuse actuelle est très inégalement répartie sur la surface occupée par les sédiments holocènes. Elle est limitée au banc de Seine et aux deltas de marée des estuaires. Le reste de la surface a un bilan sédimentaire nul ou même négatif, comme les figures pré littorales d'érosion sous-marine le montrent.

La sédimentation fine (vase) d'origine estuarienne a un caractère temporaire et son rôle dans le bilan global du prisme sédimentaire, hors des estuaires internes, paraît mineur en raison du niveau élevé d'agitation des eaux par les courants de marée et les houles, principalement lors des tempêtes.

- 
- Allen J.R.L. (1984).- Sedimentary structures, their character and physical basis. Dev. in Sedimentol, v. 30, 1196 p, Elsevier ed., Amsterdam.
- Auffret J.P. & Larssonneur C. (1977).- Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord du Cotentin. Journées Lennier, Bull. Soc. Géol. Normandie, LXIV, n° 4, p. 21-33.
- Auffret J.P., Alduc D., Larssonneur C. & Smith A.J. (1983).- La Manche orientale, carte au 1/500 000e des paléovallées et bancs sableux, CNEXO-BRGM ed, Orléans.
- Auffret J.P., Walker P. & d'Ozouville L. (1984).- Le sonar à balayage latéral et ses applications à l'étude des transports sédimentaires en Manche. XVIIIe Journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 1/14, 8 p.
- Auffret J.P. & d'Ozouville L. (1985).- Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine. Ce volume, N° 18.
- Auffret J.P., Guéguénat P., Lepy M.C., Patry J.P. & Saur H. (1985).- Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983. Ce volume, N° 21.
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine, sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 264 p.
- Avoine J., Boust D., Crevel L., Dubrulle L. & Guéguénat P. (1984).- Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. Soc. Hydro. Fr., 18ème Journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 1/3, 8 p.
- Avoine J., Caillot A., Hoslin R., Larssonneur C., Massias J. & Quesney M. (1984).- Mise en évidence de mouvements sédimentaires en Baie de Seine à l'aide de traceurs radioactifs. Soc. Hydro. Fr., 18ème Journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 1/2, 8 p.
- Bonnefille R. (1963).- Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu. Bull. Cent. Rech. Chatou, n° 5, p. 67-72.
- Dubrulle L. & Larssonneur C. (1984).- Dynamique sédimentaire de l'estuaire de l'Orne. Soc. Hydro. Fr., 18ème Journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 1/6, 6 p.
- Guilcher A. (1954).- Morphologie littorale et sous-marine. PUF ed., Paris, 216 p.
- Larssonneur C. (1971).- Manche centrale et Baie de Seine: Géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse, Caen, 394 p.

- Le Floch J.F. (1961).- Propagation de la marée dynamique dans l'estuaire de la Seine et la Seine Maritime. Thèse, Paris, 507 p.
- Lennier G. (1885).- Mémoires notes et documents pour servir à l'étude de l'estuaire de la Seine. 3 vol. Hustin ed., Le Havre.
- d'Ozouville L. & Auffret J.P. (1986).- Répartition et évolution actuelle des sédiments superficiels en Baie de Seine orientale en utilisant un sonar à balayage latéral. Océanol. Acta, à paraître.
- Salomon J.C. (1985).- Courantologie calculée en Baie de Seine. Ce volume, N° 2.
- S.A.R. (1980).- Etude des mouvements sédimentaires à l'aide de traceurs radioactifs au voisinage de l'embouchure de l'Orne. Rap. CEA 80/8/Q2, 50 p.
- Vaslet D., Larssonneur C. & Auffret J.P. (1978).- Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000e et notice. B.R.G.M. ed., Orléans.



# EVALUATION DES APPORTS FLUVIATILES DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

AVOINE J.\*

## INTRODUCTION

L'activité économique et l'urbanisation concentrées sur le bassin versant de la Seine sont à l'origine d'importants rejets s'ajoutant aux apports naturels. Un suivi régulier a permis d'estimer pour ce fleuve, principal exutoire de la baie de Seine, les apports en termes de débit liquide, de charge solide et de pollution métallique. Cette investigation s'avère indispensable, notamment pour l'établissement de bilans sédimentaires permettant d'expliquer l'origine des matériaux déposés dans l'estuaire de la Seine et pour le calcul du temps de résidence des polluants.

## 1 - DEBIT LIQUIDE et DEBIT SOLIDE

### 1.1. - Débit liquide

Les mesures sont effectuées au barrage de Poses, 160 km en amont de l'embouchure. L'examen des débits moyens calculés annuellement de 1960 à 1984 montre des variations notables d'une année sur l'autre (fig. 1). Durant cette période, la moyenne annuelle a été de 435 m<sup>3</sup>/s, avec des extrêmes de 240 m<sup>3</sup>/s en 1964 et de 625 m<sup>3</sup>/s en 1983. En régime tempéré humide, le débit liquide maximal s'observe en période hivernale et printanière, les crues se produisant généralement entre décembre et avril. Les débits instantanés dépassent exceptionnellement 2.000 m<sup>3</sup>/s lors des crues et sont de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/s en étiage (fig. 2 A).

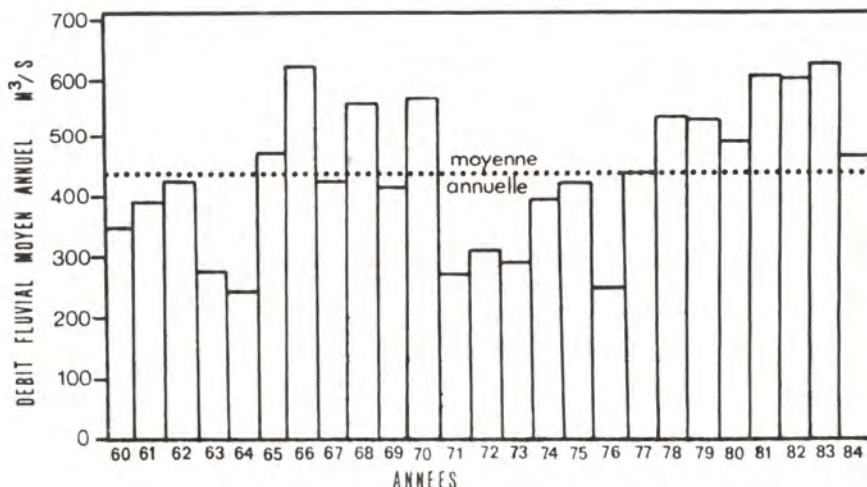


Fig. 1. Débit liquide moyen mesuré à Poses de 1960 à 1984.

\* Laboratoire de Géologie Marine, Université de Caen, 14032 CAEN CEDEX.

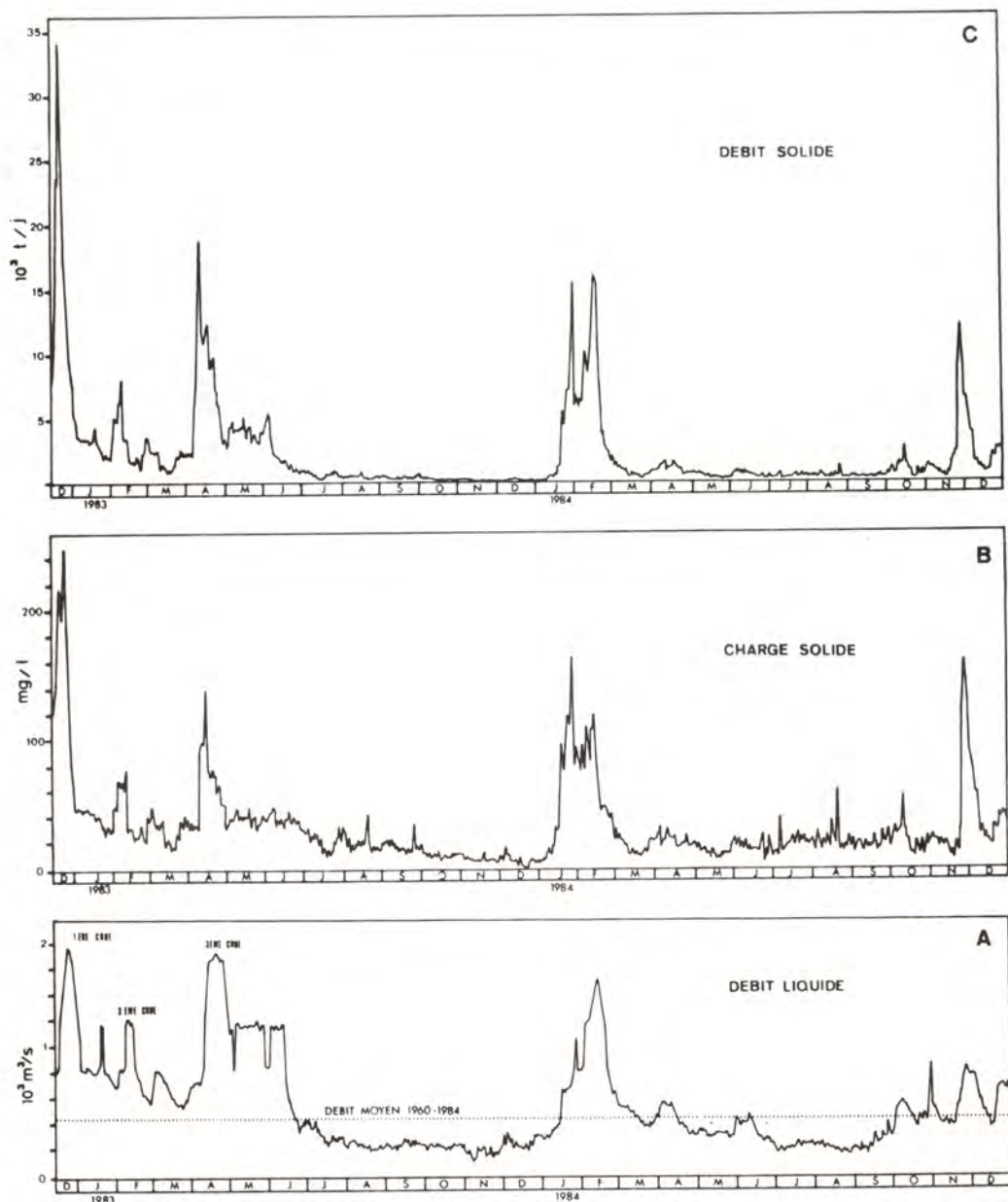


Fig. 2.- Evolution journalière à Poses du débit liquide (A), de la concentration en M.E.S. (B) et des apports solides (C) de décembre 1982 à décembre 1984.

### 1.2. - Charge solide

Dans les rivières soumises à un climat tempéré, les apports sédimentaires se font essentiellement en suspension, le charriage restant très subordonné (Müller et Förstner, 1968). De nombreux travaux ont montré que la charge solide est généralement bien corrélée avec le débit fluvial, le transport sédimentaire étant beaucoup plus important en crue qu'en étiage (Al - Jabbari et al, 1980 ; Milliman, 1981 ; Müller et Förstner, 1968) : Dans le cas de la Seine, une précédente étude, basée sur des données incomplètes, avait montré une corrélation identique (Avoine, 1981). Un suivi quotidien entrepris au niveau du déversoir du barrage de Poses a permis de préciser cette relation. Le choix du



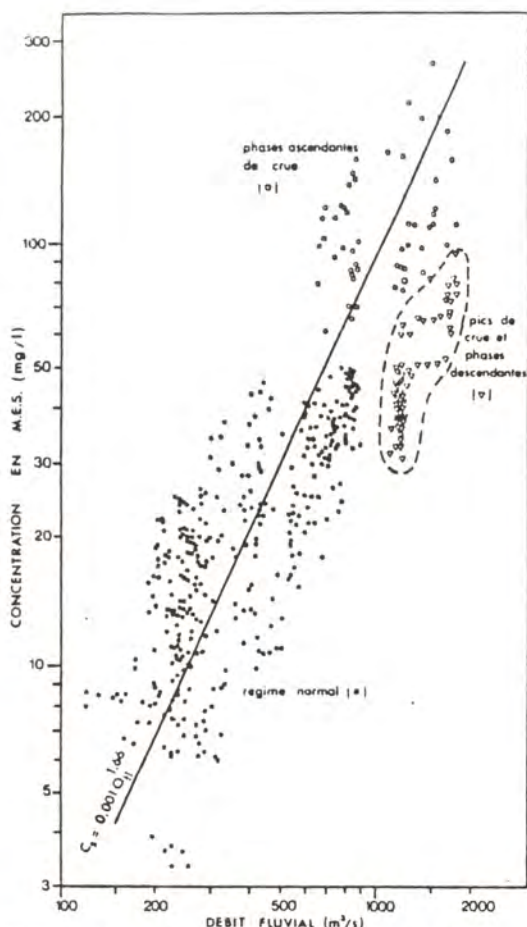


Fig. 3. Relation entre la charge solide et le débit fluvial à Poses. Mesures de décembre 1982 à décembre 1984.

successives de l'hiver 1982-83. Ces courbes forment dans les trois cas une boucle d'hystérésis, la charge solide maximale précédant le maximum de débit liquide, phénomène décrit dès 1935 par Hjülstrom dans plusieurs rivières, et plus récemment par Milliman (1980) et Wood (1977). Par ailleurs, les plus fortes concentrations se rencontrent lors de la première crue, après une longue période de faible débit. Lors des crues suivantes, les teneurs en M.E.S. sont beaucoup plus faibles, d'autant plus que l'intervalle séparant deux crues successives est court, respectivement 39 jours et 55 jours dans l'exemple présenté. Des observations comparables ont été faites par Al-Jabbari et al (1980) et Milliman (1980). Les mécanismes entrant en jeu sont décrits par Wood (1977). Selon cet auteur, le phénomène d'hystérésis caractérise un apport de particules correspondant à un épuisement total du stock sédimentaire disponible en quelques jours au début des crues. La reconstitution de ce stock demande du temps et, s'il y a plusieurs crues successives, le matériel épuisé ne se réaccumule pas. Ainsi la charge solide reste-t-elle faible, d'autant plus que les crues sont rapprochées. Ce schéma s'applique parfaitement à la Seine et correspond au modèle e de la terminologie de Wood (1977). Les données disponibles dans des rivières comparables à la Seine, telles la Gironde

site a été dicté, d'une part par la nécessité de s'affranchir des fluctuations de la charge solide, sous l'influence des courants de marée, dans la partie aval de la rivière soumise à la marée dynamique, d'autre part pour disposer parallèlement de mesures du débit fréquentes et sûres.

Au cours du suivi, de décembre 1982 à décembre 1984, les concentrations en matières en suspension (M.E.S.) ont varié de 3,3 mg/l à 267 mg/l (fig. 2 b). L'ensemble des résultats, au total 750 mesures, et les débits liquides correspondants sont reportés sur la figure 3. Malgré une certaine dispersion des valeurs, il existe une relation évidente entre les deux paramètres. Une observation plus approfondie montre que la charge solide atteint un maximum durant la phase ascendante des crues, comparativement à celle anormalement faible mesurée durant les maxima de débit et lors de la phase descendante des crues. En faisant abstraction de ces dernières valeurs, la relation entre la charge solide  $C_s$  et le débit fluvial  $Q$  est une droite dont l'expression dans une échelle logarithmique est :

$$C_s \text{ (à Poses)} = 0,001.Q^{1,66} \quad (1)$$

Afin de préciser la relation entre la concentration en M.E.S. et le débit liquide durant les crues, la figure 4 donne à titre d'exemple les courbes individuelles correspondant aux crues

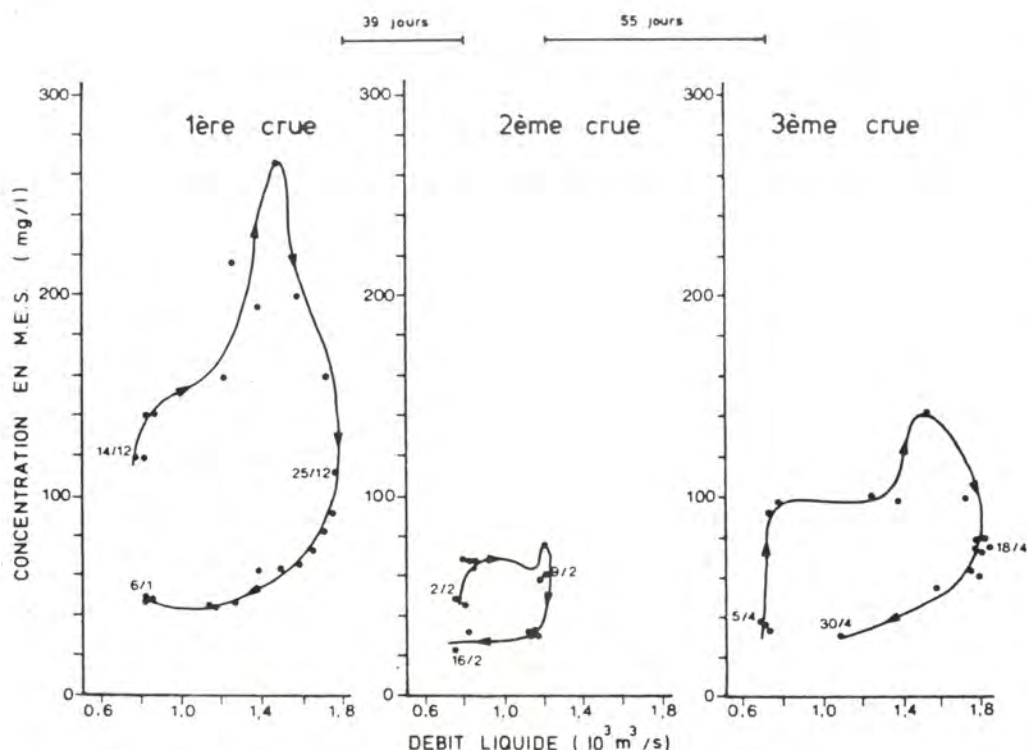


Fig. 4 Relation entre la charge solide et le débit fluvial à Poses durant les 3 crues de l'hiver 1982-83.

(Jouanneau, 1982) et la Loire (Guillaud, 1983 ; Manickam, 1982) montrent un schéma analogue sans doute généralisable à l'ensemble des rivières en climat tempéré humide.

### 1.3. - Débit solide

Compte-tenu de l'existence d'hystérésis entre la charge solide et le débit fluvial lors des crues, le calcul des apports sédimentaires à partir de la relation (1) est source d'importantes erreurs. Les brusques variations ne peuvent être mises en évidence que par un suivi très serré dans le temps. La figure 2 C montre l'évolution du débit solide de la Seine calculé quotidiennement de décembre 1982 à décembre 1984. Les valeurs extrêmes sont de 33900 T/j en crue et de 63 T/j en étiage pour des concentrations en M.E.S. de 267 mg/l et 3,3 mg/l respectivement. 75 % des apports annuels de la Seine se produisent en période de crue, chiffre comparable à celui calculé dans d'autres rivières (Al-Jabbari et al, 1980 ; Schubel, 1974 ; Vale, 1981). Les apports solides durant la phase ascendante des crues représentent à eux seuls 50 % des apports annuels en 20 jours, dont une large part revient à la première crue. Le total annuel calculé à Poses est de  $1,01 \cdot 10^6$  T de l'hiver 1982 au début de l'hiver 1983, et de  $0,53 \cdot 10^6$  T l'année suivante. Ces résultats comparés à ceux obtenus précédemment (Avoine, 1981) ne montrent pas de divergence considérable. La moyenne calculée antérieurement reste donc valable, soit  $0,5 \cdot 10^6$  T/an, avec une fourchette allant de  $0,2 \cdot 10^6$  T/an à  $1 \cdot 10^6$  T/an selon les années.

A partir de ces chiffres, il est possible d'évaluer le taux d'érosion du bassin versant. Pour un débit solide annuel de  $0,5 \cdot 10^6$  T (mini  $0,2 \cdot 10^6$ , maxi  $1 \cdot 10^6$ ), le taux d'érosion est de 7,5 T/km<sup>2</sup>/an (mini 3, maxi 15), ce qui est très faible comparativement aux grands fleuves mondiaux (Milliman, 1981). D'après ces chiffres l'arasement du bassin versant de la Seine est de l'ordre de 0,4 cm par millénaire en conditions moyennes.



## 2 - APPORTS en METAUX-TRACES

Les teneurs et les apports annuels de la Seine en métaux dissous et particulaires ont été calculés à partir des analyses effectuées depuis 1976 à la Bouille, 100 km en amont de l'embouchure, par la cellule anti-pollution du Service de la Navigation de la Seine. Les métaux mesurés sont : Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Ti, V. Le protocole d'analyses et l'interprétation de l'ensemble des résultats ont fait l'objet d'une synthèse détaillée (Avoine et al, 1984) dont les principales conclusions seront reprises ici.

L'étude statistique des concentrations en métaux dissous ne permet pas de mettre en évidence de relations systématiques entre les teneurs observées pour chaque métal et les variations du débit fluvial. Un certain équilibre existe au cours de l'année et, à l'instar de Jouanneau (1982) en Gironde, une teneur moyenne a été calculée pour estimer les apports moyens annuels correspondant à un débit fluvial de 435 m<sup>3</sup>/s (tableau 1). Par rapport aux concentrations habituellement rencontrées dans les fleuves (Martin et Meybeck, 1979), certains métaux présentent des teneurs plus élevées dans la Seine. C'est le cas notamment de Zn, Pb, Cr (2 fois), de Ni (4 fois) et de Cd qui apparaît très élevé.

| MÉTAL | TENEUR MOYENNE<br>(µg/l) | APPORTS ANNUELS MOYENS<br>T/an |
|-------|--------------------------|--------------------------------|
| Cd    | 0,4 ± 0,3                | 5,5                            |
| Co    | 0,5 ± 0,4                | 6,9                            |
| Cr    | 1,4 ± 1,0                | 19                             |
| Cu    | 4,2 ± 2,0                | 58                             |
| Fe    | 13,3 ± 11,9              | 182                            |
| Hg    | 0,04 ± 0,03              | 0,5                            |
| Mn    | 5,9 ± 5,2                | 81                             |
| Ni    | 7,8 ± 4,9                | 107                            |
| Pb    | 1,0 ± 0,6                | 13,7                           |
| Zn    | 32 ± 24                  | 440                            |

Tableau 1.- Teneur moyenne en métaux dissous et écart-type mesurés à la Bouille de 1976 à 1984. Apports annuels moyens pour un débit de 435 m<sup>3</sup>/s.

Les teneurs en métaux-traces liées aux suspensions montrent des variations notables au cours de l'année, difficilement corrélables avec les fluctuations de la charge solide et du débit fluvial. Cependant, un bilan moyen peut s'avérer utile à long terme, en considérant les concentrations moyennes pour chaque métal et les apports solides annuels estimés précédemment. (Tableau 2A). Comparée aux grands fleuves réputés non pollués (Martin et Meybeck, 1979), la Seine présente des teneurs élevées pour plusieurs métaux: Cr, Cu, Zn. La contribution anthropique dans les apports de la Seine a pu être estimée en évaluant le fond géochimique régional dans des sédiments de la période pré-industrielle de la région de Rouen issus du dépôt de M.E.S. apportées par le fleuve (Avoine et al., 1984).

Cette contribution est considérable pour la plupart des métaux, de l'ordre de 95 % pour Hg, Cu, Cd, Zn, de 85 % pour Ni, Pb, Cr, de 65 % pour Mn, Co, V (tableau 2 A). Le fer et le titane semblent au contraire d'origine principalement naturelle. Ces chiffres sont à considérer avec prudence mais ils illustrent parfaitement le fort degré de pollution engendré par l'activité humaine dans une région où les teneurs naturelles restent faibles par rapport aux moyennes mondiales, du fait de la nature géologique essentiellement sédimentaire du bassin versant. La comparaison des pourcentages obtenus dans la Seine pour les métaux qui semblent principalement d'origine anthropique, avec ceux calculés récemment en Gironde par Donard et al. (1983), montre que dans ce dernier cas la part des apports naturels est plus grande, compte-tenu de la présence d'un substratum partiellement cristallin qui enrichit le milieu en métaux.

| A  | Teneurs en métaux particuliers (a) |                                           | Apports moyens de la Seine |                     |                         |                              | B  |
|----|------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|----|
|    | Suspensions fluviales (ug/g) (b)   | Sédiments fluviaux non pollués (ug/g) (c) | TOTAUX (T/an) (d)          | NATURELS (T/an) (d) | ANTHROPIQUES (T/an) (d) | CONTRIBUTION ANTHROPIQUE (%) |    |
| Cd | 13,1 ± 6,5                         | 0,34 ± 0,04                               | 6,6                        | 0,17                | 6,4                     | 97                           | 55 |
| Co | 13,6 ± 6,5                         | 5,2 ± 1                                   | 6,8                        | 2,4                 | 4,4                     | 65                           | 50 |
| Cr | 167 ± 80                           | 29 ± 1                                    | 84                         | 15                  | 69                      | 83                           | 82 |
| Cu | 260 ± 140                          | 5 ± 1                                     | 130                        | 2                   | 123                     | 98                           | 69 |
| Fe | 25500 ± 7000                       | 15500 ± 600                               | 12250                      | 7400                | 4850                    | 40                           | 99 |
| Hg | 2,5 ± 1,6                          | 0,034 ± 0,01                              | 1,3                        | 0,02                | 1,3                     | 98                           | 72 |
| Mn | 1110 ± 500                         | 340 ± 30                                  | 555                        | 170                 | 385                     | 70                           | 87 |
| Ni | 75 ± 50                            | 16 ± 2                                    | 38                         | 8                   | 30                      | 79                           | 26 |
| Pb | 180 ± 90                           | 27 ± 1                                    | 90                         | 13,5                | 77                      | 85                           | 87 |
| Ti | 2050 ± 800                         | 1400 ± 20                                 | 1025                       | 700                 | 325                     | 32                           | /  |
| V  | 170 ± 110                          | 69 ± 5                                    | 85                         | 35                  | 50                      | 59                           | /  |
| Zn | 770 ± 250                          | 34 ± 2                                    | 385                        | 17                  | 368                     | 96                           | 47 |

Tableau 2.-A: Apports naturels et anthropiques de la Seine en métaux particuliers;

a : calculés pour 3,6% d'Al (teneur moyenne des apports fluviaux et écart-type);

b : teneurs moyennes mesurées à la Bouille de 1976 à 1984;

c : sédiments pré-industriels de Tourville-la-Rivière;

d : calculés pour une charge annuelle de  $0,5 \cdot 10^6$  T.

B : Importance relative des apports annuels particuliers (P) et dissous (D) en métaux-traces à la Bouille.

L'importance de la phase particulaire par rapport à la phase dissoute est représentée sur le tableau 2B. Il apparaît que la plupart des métaux sont amenés par la Seine sous forme particulaire, c'est-à-dire associés au matériel en suspension qui est un vecteur de pollution métallique.

Bien que l'influence des rejets effectués directement dans l'estuaire peut être localement mise en évidence, les apports provenant de la Seine demeurent prépondérants pour la plupart des métaux. Seuls Ti, Mn et à moindre degré Fe, sont rejetés en fortes quantités dans l'estuaire, surtout sous forme dissoute, et sont la cause de pollutions locales.

## CONCLUSION

Cette étude met en évidence l'extrême variabilité des apports fluviaux au cours de l'année, d'un point de vue quantitatif. Ces apports s'effectuent principalement durant la phase ascendante des crues, et surtout lors des premières pluies hivernales, résultats à prendre en considération dans tout calcul du temps de résidence dans l'estuaire, non seulement de l'eau et des suspensions, mais surtout des métaux-traces apportés par le fleuve. Par ailleurs, la Seine apparaît à l'heure actuelle comme une rivière sénile à faible capacité d'érosion, du fait principalement de la topographie adoucie de son bassin versant, du couvert végétal important et des travaux de régularisation de son cours.



- Al-Jabbari M.H., McManus J. & Al-Ansari N.A. (1980).- Sediment and solute discharge into the Tay estuary from the river system. Proc. R. Soc. Eding., vol. 78 B, p. 15-32.
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 236 p.
- Avoine J., Boust D. & Guillaud J.F. (1984).- Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine (France). Proc. Symp. on Contaminant Fluxes through the Coastal Zone, Nantes, (à paraître).
- Donard O., Latouche C., Bourg A.C.M. & Vernet J.P. (1983).- Occurrence and behaviour of mercury and cadmium in the sediments of an estuarine system: the Gironde. Int. Conf. "Heavy Metals in the Environment", Heidelberg, p. 960-963.
- Guillaud J.F. (1983).- Evaluation des apports en matières en suspension à Montjean (Loire) pour une année hydrologique moyenne. Rap. Ronéot. CNEXO, 5 p.
- Jouanneau J.M. (1982).- Matières en suspension et oligo-éléments métalliques dans le système estuarien gironдин: comportement et flux. Thèse, Bordeaux, 150 p.
- Manickam S. (1982).- Etude hydrologique et sédimentologique de la zone de transition entre la Loire fluviale et l'estuaire. Thèse 3ème cycle, Nantes, 281 p.
- Martin J.M. & Meybeck M. (1979).- Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. Mar. Chem., vol. 7, p. 173-206.
- Milliman J.D. (1980).- Sedimentation in the Fraser river and its estuary, southwestern British Columbia (Canada). Estuar. Coast. Mar. Sci., vol. 10, p. 609-633.
- Milliman J.D. (1981).- Transfer of river-borne particulate material to the oceans. In : Martin J.M., Burton J.D. & Eisma D. (eds.). River inputs to ocean systems, United Nations, New York, p. 5-12.
- Müller G. et Förstner V. (1968).- General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenhein and some other rivers. Nature, vol. 217, p. 244-5.
- Schubel J.R. (1974).- Effects of tropical storm Agnes on the suspended solids of the northern Chesapeake bay. In: Gibbs R.J. (ed). Suspended solids in water, Plenum Press, New York, p. 113-132.
- Vale C. (1981).- Entrada de matéria em suspensão no estuário do Tejo durante as cheias de Fevereiro de 1979. Recursos Hídricos, vol. 2, n° 1, p. 37-45.
- Wood P.A. (1977).- Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England. Sedimentology, vol. 24, p. 437-445.

# INFLUENCE DES APPORTS FLUVIATILES EN BAIE DE SEINE.

AVOINE J.\* & CREVEL L.\*

## INTRODUCTION

L'étude hydrologique de la Baie de Seine, entreprise dans différentes conditions de marée et de débit fluvial, a permis de mettre en évidence deux domaines bien différenciés par la répartition des salinités (fig. 1). La partie occidentale présente un caractère franchement marin, marqué par la pénétration importante des eaux de la Manche, et où la circulation des eaux est dominée par l'existence d'un tourbillon résiduel de marée créé par la presqu'île du Cotentin (Le Hir et L'Hyavanc, 1984, Le Hir *et al.*, ce colloque). La partie orientale, où sont localisées les principales rivières, est soumise à l'influence directe des apports fluviaux, qui entraîne une stratification saline des eaux à l'origine d'une circulation résiduelle de densité. Nous résumons ici les résultats les plus importants obtenus quant aux échanges entre les systèmes estuariens, principalement celui de la Seine, et le domaine marin, en termes de dilution des eaux de la baie par les apports d'eau douce, et de dispersion des apports solides des rivières ainsi que leur contribution à la sédimentation vaseuse en Baie de Seine.

## 1.- INFLUENCE DES APPORTS LIQUIDES

L'impact des eaux douces dans le secteur oriental de la baie est particulièrement net en période de crue (fig. 2). Il se produit alors des écoulements d'eau dessalée selon deux directions distinctes, d'une part vers l'Ouest, d'autre part vers le Nord où l'influence fluviale se fait sentir jusqu'aux limites de la baie en Manche orientale. Les mesures réalisées dans le cadre du Réseau National d'Observation (Guillaud, 1978) et dans l'étude de la partie nord-orientale de la baie (Crevel, 1983) ont montré que la stratification des eaux est importante en toutes saisons au débouché de la Seine et plus au large. Les gradients de salinité sont cependant plus intenses en période de

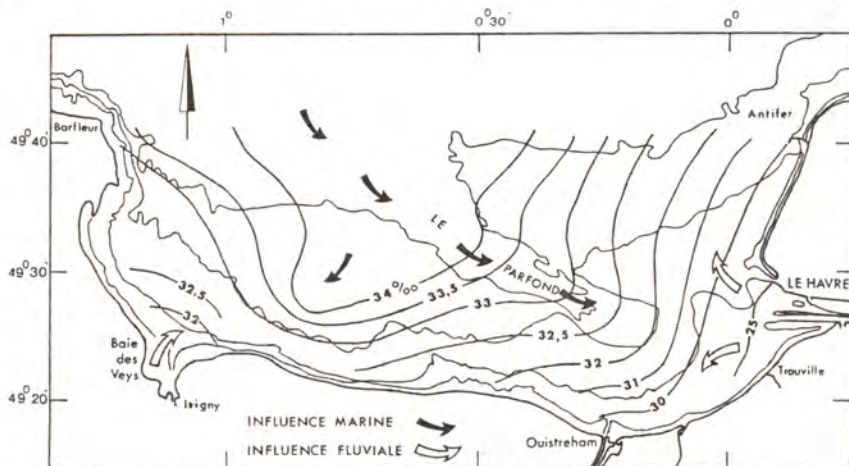


Figure 1.- Répartition des salinités à basse mer dans les eaux de surface, en période de crue et marée de vives-eaux (mars 1979).

\* Laboratoire de Géologie marine, Université de Caen, 14032 Caen Cedex.



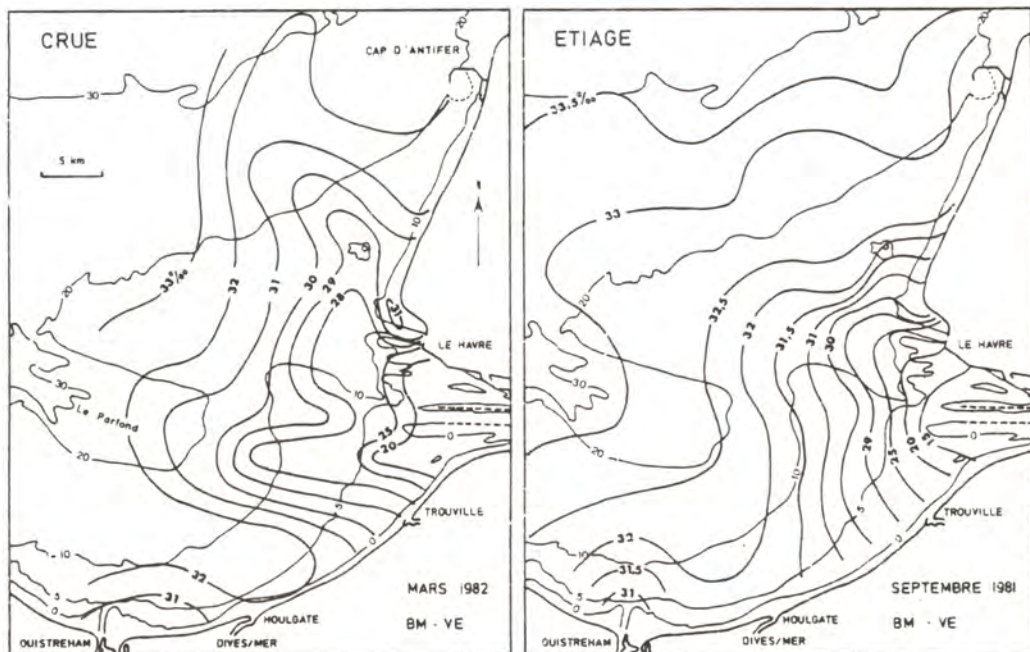


Figure 2.- Impact des apports d'eau douce sur la salinité des eaux de surface dans la partie orientale de la baie, en marée de vives-eaux, à basse mer, en période de crue (mars 1982) et d'étiage (septembre 1981).

crue. Une étude par modèle numérique montre que les gradients de densité, liés à la stratification saline, induisent une circulation résiduelle inverse en surface et en profondeur, dirigée vers l'estuaire au fond, vers le large en surface (Le Hir, 1980, Le Hir *et al.*, ce colloque). Cette configuration qui se rapproche d'une situation estuarienne a été confirmée par des mesures de courants (Le Hir et L'Hyavanc, 1985, ce colloque). L'hypothèse d'un écoulement homogène sur la verticale, qui est souvent faite pour les zones littorales à forts courants de marée, n'est donc pas toujours vérifiée. C'est là un élément à prendre en considération dans toute étude de dynamique des sédiments en suspension.

## 2.- DISPERSION DES APPORTS SOLIDES

### 2.1. Rôle du bouchon vaseux :

Dans les estuaires, le bouchon vaseux constitue un lieu de stockage provisoire pour les matières en suspension (M.E.S.) apportées par les rivières. Les études entreprises en Baie de Seine ont montré que les variations du débit fluvial jouent un rôle important sur la position et la masse totale du bouchon vaseux (Avoine *et al.*, ce colloque). Il reste cantonné dans les estuaires en période d'étiage durant laquelle la masse de M.E.S. stockée est maximale, avec un temps de résidence important, de quelques semaines à plusieurs mois selon les estuaires. En période de crue, le bouchon vaseux est déplacé vers l'aval, les M.E.S. sont partiellement expulsées en mer après un temps de résidence très bref, de l'ordre de quelques heures à quelques jours. Dans le cas de la Seine (Fig. 3), l'influence des eaux turbides sortant de l'estuaire à basse mer se fait sentir jusqu'à la dépression du Parfond, où les teneurs en M.E.S. sont de plusieurs dizaines de mg/l. La réalisation de profils verticaux montre que

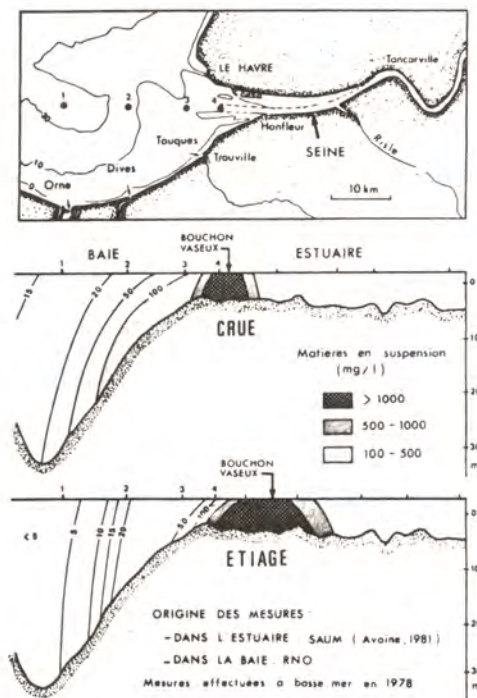


Fig. 3.- Extension vers le large du bouchon vaseux de la Seine à basse mer, en crue et en étiage.

l'expulsion du matériel estuarien n'est pas cantonnée aux eaux de surface mais intéresse toute la colonne d'eau.

## 2.2. Extension du panache d'eau turbide

La réalisation de coupes synoptiques en différentes conditions de marée et de débit fluvial a permis de déterminer l'extension du panache turbide formé par la sortie en mer des eaux de la Seine (fig. 4). Cette extension est étroitement corrélée avec la dessalure des eaux observée parallèlement (fig. 2), ce qui montre bien l'influence fluviale dans ce secteur de la baie, qui se traduit par un écoulement d'eau saumâtre très turbide vers l'ouest et vers le nord.

Les études microgranulométriques des suspensions dans le panache d'eau turbide ont permis de constater que le matériel situé au large présente des similitudes avec celui du bassin versant de la Seine (Dupont *et al.*, ce colloque). Il s'agit de particules très fines, dont la répartition suit assez bien celle des courbes isohalines. L'exportation de sédiments en suspension d'origine fluviale au domaine marin ne concerne donc que les éléments les plus fins; la fraction plus grossière, silto-sableuse, reste cantonnée dans l'estuaire.

## 2.3. Flux résiduel de sédiments en suspension :

Les mesures en point fixe des vitesses de courants et des charges en M.E.S., au cours de cycles semi-diurnes de marée, permettent de calculer le débit solide de flot et de jusant et d'en déduire le transit sédimentaire résultant, selon la méthode d'Inglis et Allen (1957). Dans les estuaires macrotidaux, les chiffres obtenus n'ont qu'une valeur indicative, compte-tenu des flux verticaux se produisant à l'échelle de la marée lors des cycles érosion - sédimentation et des variations liées à la morphologie. Ce n'est plus vrai devant les embouchures et plus au large où les flux de M.E.S. peuvent être appréhendés avec une bonne précision, tout au moins en ce qui concerne les directions de transport. La fig. 5 reprend l'essentiel des données acquises devant l'estuaire de la Seine et vers le nord-est, en marée de vives-eaux, en crue et en étiage. Ces données, bien qu'incomplètes, permettent d'établir les principales caractéristiques des transits sédimentaires en suspension dans cette partie de la baie :

- en période de crue, l'expulsion de matériel en suspension depuis l'estuaire vers le domaine marin est générale, à l'exception du chenal Sud de la Seine à l'abri de l'influence directe des eaux fluviales. La dispersion des M.E.S. vers le large est importante sur toute la colonne d'eau. Par des fonds de - 15 à - 20 m, la tendance s'inverse près du fond, le transit des suspensions se fait en direction de l'estuaire, alors qu'il reste vers le large en surface. Ce schéma est tout à fait conforme à la circulation résiduelle étagée observée par Le Hir et L'Hyavanc (1985, ce colloque), particulièrement développée en période de crue lorsque la stratification saline est maximale en Baie de Seine orientale.



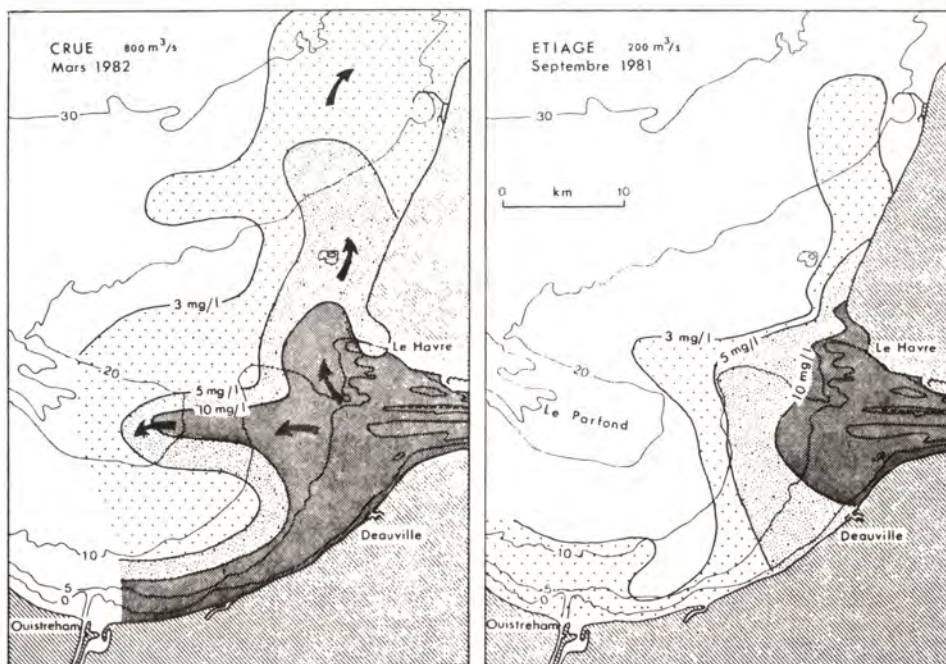


Figure 4.- Répartition des matières en suspension dans les eaux de surface de la partie orientale de la baie, en marée de vives-eaux, à basse mer, en crue et en étiage.

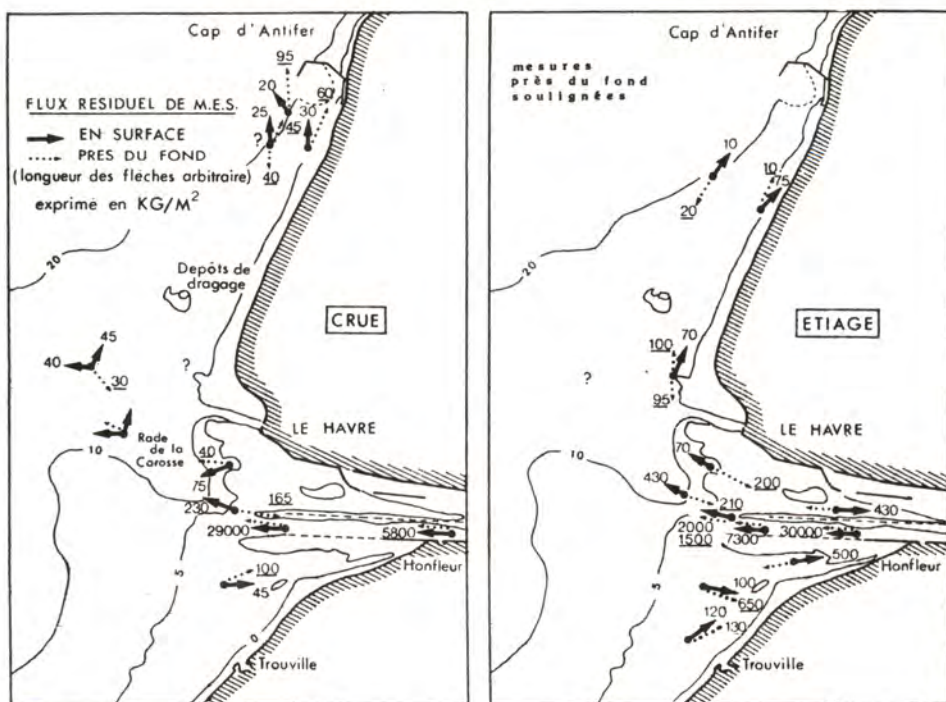


Figure 5.- Flux résiduels de sédiments en suspension dans la partie orientale de la baie, en marée de vives-eaux, en crue et en étiage.

- En période d'étiage, en dehors d'une très faible sortie de M.E.S. vers le large dans les eaux de surface, à l'aval du chenal principal et vers le nord-est, les flux résiduels s'inversent comparativement à la période de crue; les transits sédimentaires en suspension s'effectuent de la baie vers l'intérieur de l'estuaire, principalement dans les eaux de fond.

### 3.- INFLUENCE DES APPORTS FLUVIATILES SUR LA SEDIMENTATION.

#### 3.1. Envasements dans les embouchures :

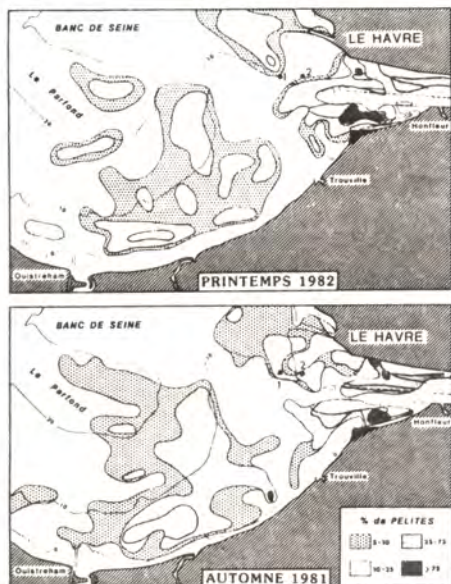


Fig. 6.- Répartition des zones d'envasement dans la partie sud-orientale de la baie, en crue (printemps 1982) et en étiage (automne 1981).

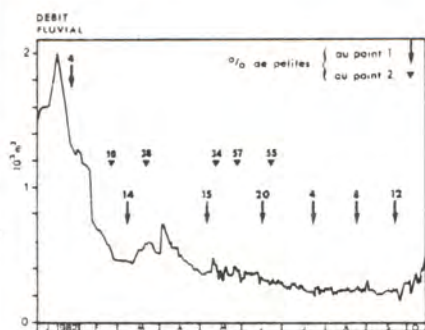


Fig. 7.- Evolution annuelle de l'envasement dans la partie Nord de l'embouchure de la Seine (localisation des points 1 et 2 figure 6).

La comparaison de cartographies de la couverture de dépôts meubles, réalisées en différentes périodes de l'année, permet d'apprécier l'étendue des envasements (% de pélites) et leurs fluctuations saisonnières (Avoine *et al.*, 1984a). La fig. 6 montre deux situations extrêmes, d'une part pendant l'automne 1981 par faible débit fluvial, d'autre part au printemps 1982 en période de crue. Il apparaît que dans l'embouchure de la Seine, les dépôts vaseux ont une extension maximale durant les crues, conséquence directe de l'expulsion du bouchon vaseux en mer et d'apports solides importants (Avoine, ce colloque). Ces mécanismes conduisent à des envasements temporaires devant le chenal principal et dans la partie aval des chenaux adjacents. Ces dépôts fins peuvent être aisément remobilisés par les houles de tempête. Ils régressent à la fin des crues lorsque leur alimentation n'est plus suffisante pour équilibrer leur érosion. Des envasements se produisent également dans les dépressions situées plus au large, principalement dans la partie aval de la rade de la Carosse, ainsi que dans l'avant-port du Havre. En période d'étiage, les dépôts fins régressent à l'aval de l'estuaire et se développent par contre davantage vers l'amont.

Le suivi sédimentologique régulier de deux points situés au Nord de l'embouchure (points 1 et 2, fig. 6 et 7), permet de préciser certains caractères de l'évolution des dépôts fins dans ce secteur. Un cycle annuel d'envasement-désenvasement peut être mis en évidence, dont les principaux caractères sont :

- 1) les faibles teneurs en pélites durant les crues, les apports étant expulsés à ce moment là plus au large ou déposés dans d'autres secteurs de l'estuaire;



- 2) l'envasement progressif observé au printemps corrélativement à la décroissance du débit fluvial;
- 3) le faible taux d'envasement en période d'étiage estival.

Cette évolution pourrait être attribuée à la remontée en direction de l'estuaire des vases fluides déposées en crue dans la rade de la Carosse, selon des mécanismes imprécisés en l'absence d'observations directes. L'action dominante des courants de flot, en provoquant un transport résiduel en suspension près du fond en direction de l'estuaire, peut être invoquée. De même, l'action des faibles houles sur les vases fluides peut entraîner leur déplacement rapide, sans remises en suspension, comme c'est le cas dans plusieurs embouchures étudiées récemment par Kendrick et Derbyshire (1983). Dans ce dernier cas, la colonne d'eau reste peu turbide et le déplacement peut se faire par périodes successives, ce qui semble également être le cas pour la Seine selon les données disponibles.

### 3.2. Contribution des métaux-traces :

L'impact des apports solides des fleuves sur la sédimentation fine en baie de Seine a été abordée par l'étude des oligo-éléments métalliques dont certains constituent des marqueurs de l'influence fluviale (Boust, 1981 ; Dubrulle, 1982 ; Avoine *et al.*, 1984b). Dans le cas de la Seine en particulier (fig. 8), cet impact est clairement mis en évidence dans les secteurs envasés de l'embouchure et vers le nord, où cette influence directe est relayée par l'existence du dépôt de dragages d'Octeville dont le matériel est issu de l'estuaire après sédimentation dans l'avant-port du Havre. Vers le large, l'influence estuarienne s'atténue rapidement, et reste cantonnée en deçà de la limite des panaches d'eaux turbides mis en évidence lors des campagnes hydrologiques (fig. 4) et par l'interprétation d'images satellite en termes de charge solide (Thomas, ce colloque). Vers l'ouest, les dépôts vaseux situés au large du Calvados (fig. 6) sont pauvres en métaux-traces d'origine anthropique et semblent plutôt issus de l'érosion de sédiments pélicitiques anciens, à l'affleurement dans ce secteur (Avoine, 1981). Une contamination par les

apports fluviaux apparaît cependant au nord de la dépression du Parfond. Elle peut être liée à des apports de suspensions en crue, déposées dans la dépression, puis remontées vers la côte à la belle saison sous l'action des courants de flot dominants. A cette époque de l'année, l'introduction de matériel fin contaminé par les rejets de l'usine de traitement de la Hague peut être observée dans les estuaires de la Baie de Seine (Auffret *et al.*, 1980), ce qui confirme le transit de sédiments en suspension depuis le domaine marin vers les estuaires en période d'étiage.

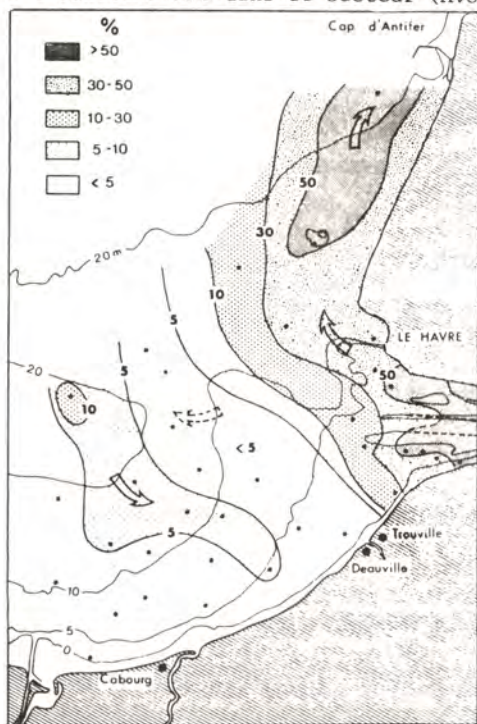


Fig. 8.- Part des apports d'origine estuarienne dans les sédiments fins de la partie orientale de la baie (exprimée en %; d'après Avoine *et al.*, 1984b).

## CONCLUSION

Une première synthèse schématique de l'influence des apports fluviaux dans la partie orientale de la Baie de Seine peut maintenant être proposée à la lumière de l'ensemble des résultats (fig. 9). En période de crue, la dispersion des suspensions vers le large est importante, principalement dans les eaux de surface. Il est possible dans ces conditions qu'une partie du matériel quitte la baie par le Nord-Est en direction de la Manche orientale; ce transit est amplifié par les rejets de produits de dragage au nord du Havre. La circulation résiduelle étagée permet cependant un mouvement en direction de l'estuaire près du fond, dont l'ampleur reste probablement réduite. En période de faible débit fluvial, la tendance générale s'inverse, des sédiments fins pénètrent dans les estuaires depuis le domaine marin, principalement près du fond, sous l'action dominante des courants de flot.

Les transits sédimentaires en suspension à l'interface estuaire - baie apparaissent étroitement liés aux variations du débit fluvial. D'une manière générale, en Baie de Seine, du matériel sort des estuaires lors des crues, et entre en étiage. Cette caractéristique se retrouve dans de nombreux environnements estuariens, qu'ils soient microtidaux (Nichols, 1977; Schubel, 1974), ou macrotidaux (Castaing, 1981; Castaing et Allen, 1981). Les différences résident plutôt dans le fait qu'il y a similitude ou non entre les sédiments expulsés en mer et ceux introduits depuis le large. Dans les estuaires de la Baie de Seine, une partie des apports fluviaux est réintroduite après leur expulsion. Il faut cependant tenir compte des départs hors de la baie, et à l'inverse de l'introduction de matériel fin d'origine variée. En l'absence de mesures de longue durée, les connaissances actuelles ne permettent pas d'établir un bilan sédimentaire précis à l'échelle de la Baie de Seine.

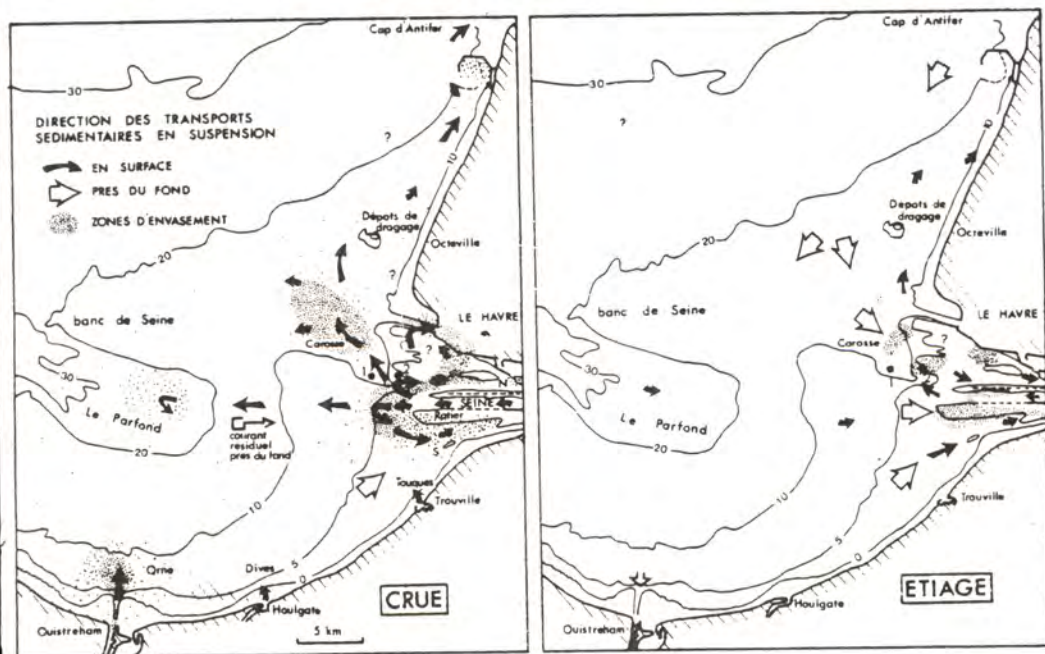


Figure 9.- Schéma synthétique des transits sédimentaires en suspension dans la partie orientale de la baie, en période de crue et d'étiage.



- Auffret J.P., Guéguénat P., Lepy M.C., Patry J.P. & Saur H. (ce colloque).- Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983.
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3ème cycle, Caen, 236 p.
- Avoine J. (1985).- Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 9.
- Avoine J., Allen G.P., Nichols M., Salomon J.C. & Larssonneur C. (1981).- Suspended sediment transport in the Seine estuary, France : effects of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. In : Nichols M.M. & Allen G.P. (eds). Estuary-shelf interrelationships, Mar. Geol., sp. iss., vol. 40, n° 1/2, p. 119-137.
- Avoine J., Boust D., Crevel L., Dubrulle L. & Guéguénat P. (1984a).- Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. XVIIIèmes Journées de l'Hydraulique, Marseille, p. I.3.1. - I.3.8.
- Avoine J., Boust D. & Guillaud J.F. (1984b).- Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine (France). Symp. on Contaminant Fluxes through the Coastal Zone, Nantes, Rap. 2., ICES Ed., à paraître.
- Avoine J., Dubrulle L. & Larssonneur C. (1985).- La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la Baie de Seine - conséquences sur l'environnement. Ce volume, N° 16.
- Boust D. (1981).- Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3ème cycle, Caen, 186 p.
- Castaing P. (1981).- Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde. Thèse Bordeaux, 530 p.
- Castaing P. & Allen G.P. (1981).- Mechanisms controlling seaward escape of suspended sediment from the Gironde; a macrotidal estuary in France. In : Nichols M.M. & Allen G.P. (eds.). Estuary-shelf interrelationships, Mar. Geol., sp. iss., vol. 40, n° 1/2, p. 101-118.
- Crevel L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la Baie de Seine. Thèse de 3ème cycle, Caen, 164 p.
- Dupont J.P., Lafite R. & Lamboy M. (1985).- Contribution de l'étude des suspensions à la compréhension des mécanismes hydrosédimentaires estuariens et littoraux en Manche centrale et orientale. Ce volume, N° 12.
- Guillaud J.F. (1978).- Interprétation des résultats du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin. Point d'appui Baie de Seine. Rap. ronéot., CNEXO, 85 p.
- Inglis C.C. & Allen F.H. (1957).- The regime of the Thames estuary as affected by currents, salinity and river flow. Proc. Inst. Civ. Engin., vol. 7, p. 827-868.
- Jeandel C., Martin J.M. & Thomas A.J. (1980).- Origine et comportement des isotopes du plutonium et du césium 137 dans l'estuaire de la Seine. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 291, p. 125-128.
- Kendrick M.P. & Derbyshire B.V. (1983).- Factors affecting the supply and distribution of sediment in some tropical ports. In : Dynamics of Turbid Coastal Environments, Can. J. Fish. Aquat. Sci., vol. 40 (suppl. 1), p. 35-43.
- Le Hir P. (1980).- Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la baie de Seine. Thèse de Docteur Ingénieur, Brest, 122 p.

- Le Hir P. & L'Hyavanc J. (1984).- Etude des circulations moyennes en baie de Seine à partir de mesures de longue durée. XVIIIèmes Journées de l'Hydraulique, Marseille, p. IV.4.1. - IV.4.5.
- Le Hir P. & L'Hyavanc J. (1985).- Observations de courant en Baie de Seine. Ce volume, N° 1.
- Le Hir P., Salomon J.C., Le Provost C., Chabert d'Hières G. & Mauvais J.L. (1985).- Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine. Ce volume, N° 6.
- Nichols M.M. (1977).- Response and recovery of an estuary following a river flood. J. Sed. Petrol., vol. 47, n° 3, p. 1171-1186.
- Schubel J.R. (1984).- Effects of tropical storm Agnes on the suspended solids of the northern Chesapeake bay. In : Gibbs R.J. (ed.). Suspended solids in water, Plenum Press, New York, p. 113-132.
- Thomas Y.F. (1985).- Etude des transports de matières en suspension en Manche par emploi de l'imagerie CZCS. Ce volume, N° 15.



STRATEGIE D'ETUDE DES SUSPENSIONS MISE EN OEUVRE EN BAIE DE SEINE.

LAFITE R.\*, DUPONT J.P.\*, LAMBOY M.\*

La caractérisation des suspensions fut d'abord abordée en Seine par Rajcevic B.M. (1957) puis Germaneau J. (1969). Une étude plus systématique a été réalisée dans le cadre du SAUM-Estuaire de Seine en 1978 (Dupont J.P. & David F., 1980). Dans un domaine dynamiquement équivalent, la mer du Nord, Eisma D. et Kalf J. (1979) ont pu caractériser les tailles et la distribution des particules en suspension. Nos travaux, poursuivis dans le cadre du Programme Baie de Seine du GRECO Manche, ont permis de mettre en évidence la diversité qualitative et texturale des particules en suspension, tant dans l'estuaire que dans le domaine plus marin "Baie de Seine".

Cette diversité, qui se traduit dans les comportements dynamiques des différents types de particules, a justifié la diversification de la stratégie d'échantillonnage et la mise au point d'une méthodologie dont l'originalité réside dans l'établissement de corrélations entre l'analyse de données quantitatives et la caractérisation qualitative (Nelsen T.A., 1981).

1. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

L'étude des suspensions *in situ* est la formule idéale, mais reste très difficile à mettre en oeuvre. Nous avons donc été conduits à réaliser des prélèvements ponctuels. Ceux-ci doivent toutefois fournir un échantillonnage représentatif des eaux, dans l'espace et dans le temps.

1.1. Hétérogénéité de la colonne d'eau :

Les données physiques ont montré que la circulation des masses d'eau n'est pas homogène dans l'ensemble de la tranche d'eau. Par ailleurs, l'affrontement des masses d'eau marine et continentale introduit, localement, des gradients physico-chimiques, notamment de salinité (Avoine J., 1981). Il a donc été décidé de traiter les prélèvements de trois niveaux (fond, milieu, surface).

1.2. Cartographie des observations :

Pour l'élaboration de synthèses cartographiques instantanées, nous avons essayé de suivre l'onde de marée en réalisant des radiales autour des situations de pleine mer et basse mer avec un décalage maximum de + ou - 1h 30 mn.

1.3. Variations temporelles en point fixe :

Les prélèvements en point fixe selon un cycle de marée traduisent les déplacements des masses d'eau en fonction des courants.

1.4. Suspensions et déplacements lagrangiens des masses d'eau :

L'échantillonnage réalisé en suivant le trajet d'une bouée dérivante permet de comparer le comportement des suspensions.

\* Laboratoire de Géologie GRECO Manche. Faculté des Sciences - Université de Rouen - B.P. 67 - 76130 Mont-Saint-Aignan.

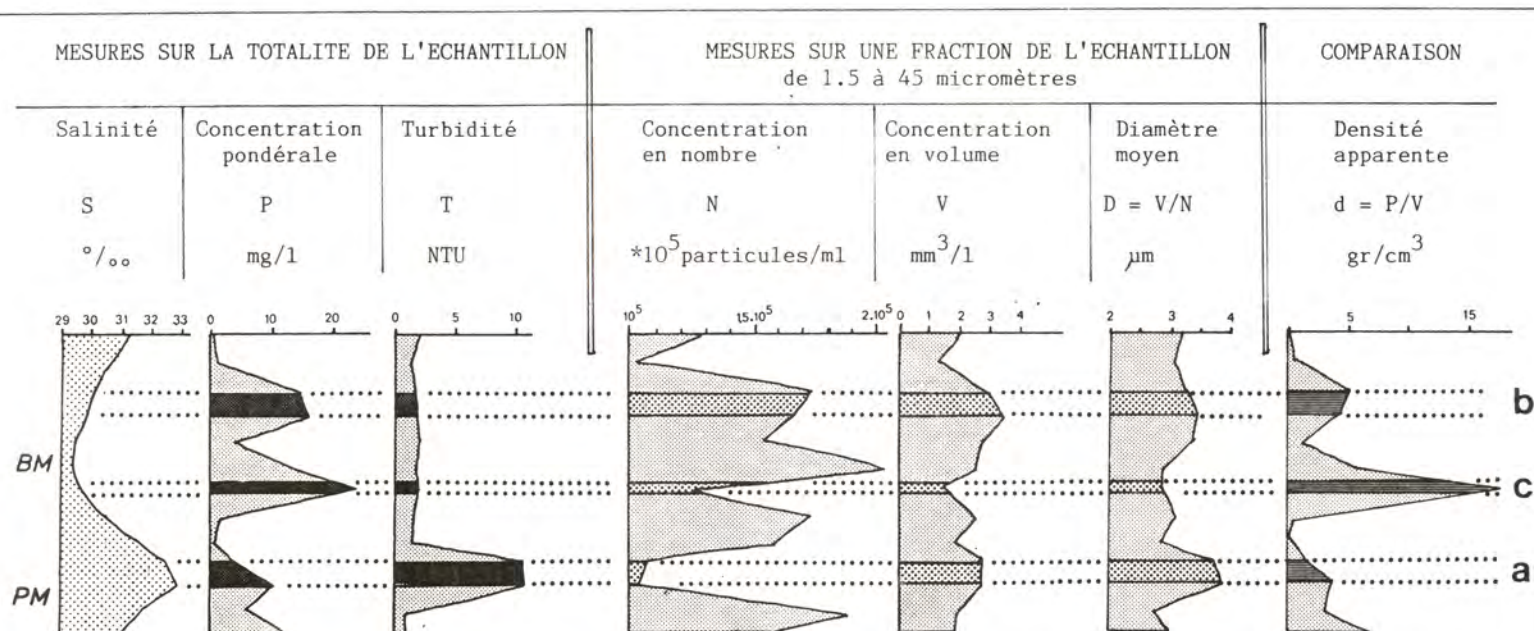


Figure 1. - Comparaison des paramètres physico-chimiques  
sur un prélèvement en point fixe au large du cap de la Hève  
(Campagne Elie - Décembre 1983)



## 2. ACQUISITION DE DONNEES ET METHODES UTILISEES

### 2.1. Paramètres physico-chimiques :

Les mesures de salinité et de température traduisent le mélange des masses d'eaux marines et continentales. Les valeurs de turbidité sont en relation avec la masse de matières en suspension (M.E.S.), mais la nature et la texture des particules peuvent modifier cette relation (fig. 1). La fluorimétrie peut renseigner sur l'importance des pigments chlorophylliens (plancton).

### 2.2. Quantification des fractions organique et minérale :

Les matières en suspension, recueillies sur filtres sans cendres prépesées, sont quantifiées, puis soumises à des calcinations à 500°C (destruction des matières organiques et perte de masse des minéraux argileux), puis à 800°C (destruction des carbonates et de certaines argiles).

### 2.3. Granulométrie :

Les études préliminaires "d'échantillon total" dans les suspensions de l'estuaire de la Seine (Dupont J.P. et David P., 1980) ont montré :

- la diversité qualitative (nature, densité et propriétés optiques) du matériel en suspension;
- le caractère déterminant de la fraction silteuse inférieure à 50  $\mu\text{m}$ .

Ceci nous a conduit à préférer les données granulométriques basées sur le principe de la conductivité; nous utilisons un compteur de particules du type Coulter (Brun Cottan, 1976) muni d'une sonde d'orifice 100  $\mu\text{m}$ . Les variations de salinité en Baie de Seine ne sont pas suffisamment fortes pour introduire des erreurs importantes dans les comptages.

Des paramètres généraux, calculés pour l'intervalle de mesure (1,5 à 45  $\mu\text{m}$ ), sont également utilisés: le nombre total et le volume global de particules, exprimés en concentration.

### 2.4. Observation des particules :

Les filtrats sont observés à la loupe binoculaire, puis au microscope électronique à balayage afin d'identifier et de mesurer les particules. Des dosages à la microsonde sont parfois nécessaires (Honjo S., Susumu et Emery K.O., 1976).

## 3. TRAITEMENTS DE DONNEES ET RESULTATS

Pour illustrer l'intérêt de cet ensemble de données et présenter les démarches ainsi que les traitements analytiques réalisés, nous partirons des résultats recueillis lors des campagnes.

### 3.1. Fluctuations des paramètres physico-chimiques et caractérisation des suspensions :

Un prélèvement toutes les heures pendant un cycle de marée sur un point géographiquement fixe permet de suivre les caractéristiques des eaux et des suspensions transitant par ce point (mesures dites "en point fixe").

En décembre 1983, au large du cap de la Hève, le suivi d'un point fixe révèle une grande fluctuation des salinités de surface (fig. 1) et une relative stabilité des salinités en profondeur. Ceci montre une stratification verticale des eaux par une influence estuarienne prédominante en surface.

Les concentrations de matériel en suspension sont faibles (inférieures à 20 mg/l) et les diamètres apparents sont également faibles (de 2,6 à 3,6  $\mu\text{m}$ ). La comparaison des fluctuations relatives entre ces paramètres calculés sur la fraction mesurée des suspensions (de 1,5 à 45  $\mu\text{m}$ ) et ceux incluant l'ensemble d'un échantillon (poids de M.E.S. et turbidité) permet d'individualiser :

- un pic très marqué de turbidité au flot, avec des teneurs en M.E.S. assez faibles (a, sur fig. 1).

La concentration en nombre de particules est faible alors que le diamètre moyen est relativement grand ( $3,6 \mu\text{m}$ ), ce qui traduit une prédominance des particules grossières. La densité apparente calculée est faible (voir définition au § 3-4). Les pertes pondérales à  $500^\circ\text{C}$  sont élevées et témoignent d'un taux élevé de matières organiques. L'observation à la loupe binoculaire et au M.E.B. met en évidence l'abondance d'un plancton riche et varié de caractère marin, ainsi que la présence d'agrégats et de flocons. Ce pic affecte l'ensemble de la tranche d'eau qui est alors de salinité homogène (près de  $33\text{‰}$ ).

- Un pic de M.E.S. au jusant, avec une turbidité assez faible (b, sur fig. 1).

La concentration en nombre de particules est forte; le diamètre moyen est relativement important ( $3,3 \mu\text{m}$ ); la densité apparente est assez faible. L'ensemble de ces données caractérise un matériel de taille et de densité moyennes. L'observation au M.E.B. montre un matériel silteux fin minéral. Ce pic n'est visible qu'en surface et est associé à la diminution de salinité des eaux superficielles lors du jusant. Ce matériel silteux fin a donc une origine estuarienne.

- Un pic de M.E.S. très marqué à mi-marée, avec une turbidité faible (c, fig. 1).

La concentration en nombre de particules et le diamètre moyen ( $<3 \mu\text{m}$ ) ont des valeurs moyennement élevées qui traduisent la présence d'une fraction silteuse. La densité apparente très forte suggère la présence de particules de taille supérieure à la gamme de mesure et de densité forte. Les pertes à  $800^\circ\text{C}$  sont importantes et témoignent d'une dominante carbonatée et argileuse. L'observation au M.E.B. montre la présence de nombreux agrégats et de frustules de diatomées benthiques souvent brisés. Ce matériel provient de rejets d'une drague.

Par conséquent, l'étude des particules en suspension confère une signification qualitative aux fluctuations de paramètres généraux, tels que M.E.S. et turbidité, et permet une interprétation dynamique en se calant par rapport aux données courantologiques ou de salinité.

L'exemple choisi permet en outre de caractériser trois mécanismes essentiels en Baie de Seine à l'approche de l'estuaire :

- le "panache turbide organique" très riche en plancton marin (turbidité importante, M.E.S. faible);
- le "panache turbide minéral" très riche en particules fines émanant de l'estuaire au jusant (M.E.S. forte pour turbidité faible);
- la remise en suspension avec une importante population d'agrégats.

### 3.2. Analyse des données granulométriques et identification au M.E.B. :

#### PRINCIPE

Les résultats granulométriques font l'objet d'un traitement statistique par la méthode des classifications ascendantes hiérarchisées sur un tableau de distance euclidienne à partir de données centrées et réduites. Le critère d'agrégation est la maximisation du moment centré d'ordre 2.

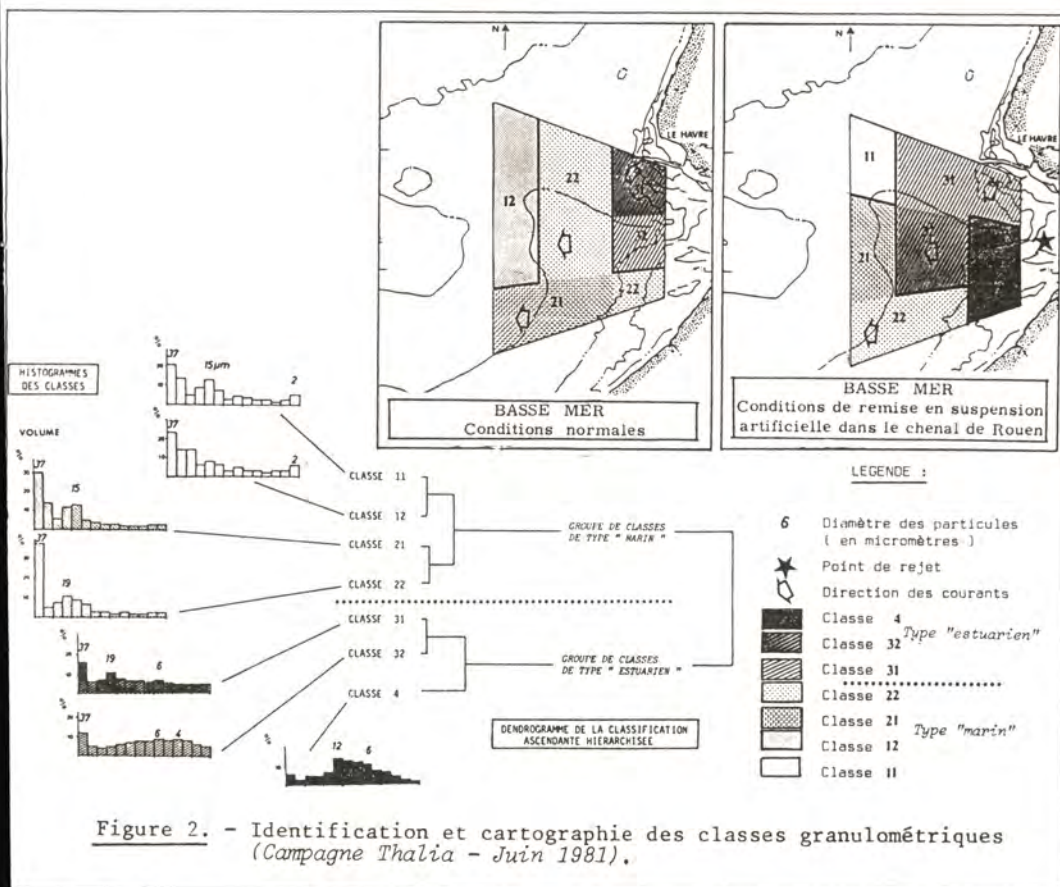
Les histogrammes granulométriques sont ainsi réunis en classes de similitude. Chacune de ces classes est caractérisée par un histogramme moyen (fig. 2). Les modes caractéristiques de chaque classe sont définis qualitativement par observation à la loupe binoculaire puis au M.E.B.

#### RESULTATS

Exemple tiré de la campagne Thalia de juin 1981. L'analyse a été réalisée sur 36 échantillons de surface selon 4 couvertures cartographiques différentes (2 à pleine mer, 2 à basse mer).

La figure 2 présente le dendrogramme des classes avec leurs histogrammes correspondants. L'ensemble peut être subdivisé en deux groupes :





- Les classes de type "estuarien", caractérisées par l'importance en pourcentage volumique des particules de la taille des silts fins, correspondant à une fraction minérale fine;
- les classes de type "marin", avec les modes granulométriques les plus grossiers bien marqués correspondant aux populations planctoniques : *Ditylum* vers 15 µm et *Rhizosolenia*, *Thalassiosira* et *Chaetoceros* entre 25 et 40 µm.

Ces données de la classification ascendante hiérarchisée sont reportées cartographiquement pour les deux situations à basse mer: l'une en conditions normales, l'autre à la suite d'une remise en suspension artificielle dans le chenal de Rouen (drague suceuse du port autonome de Rouen, cf. point de rejet de la fig. 2).

Dans le premier cas, les classes de caractère marin sont largement prépondérantes. Seuls, les échantillons prélevés face au chenal de Rouen et à la sortie du port du Havre témoignent d'un apport de silts fins minéraux caractérisant l'influence estuarienne.

Dans le second cas, la remise en suspension artificielle réalisée plus à l'Est dans le chenal de Rouen est nettement mise en évidence par un panache turbide minéral qui se développe dans l'axe du chenal conformément aux conditions courantologiques.

### 3.3. Analyse factorielle des données granulométriques :

#### PRINCIPE

L'analyse en composante principale normée a été choisie pour cette étude. La distance retenue est la distance euclidienne. Ce traitement des données permet de générer un nuage multidimensionnel dans lequel chaque échantillon correspond à un point. Le volume ainsi défini est caractérisé par des axes factoriels hiérarchisés en fonction de leur degré de contribution à la morphologie du nuage.

Ce traitement permet ainsi de hiérarchiser les composantes "dynamiques" principales responsables des spectres granulométriques (Chanut J.P. & Poulet S.A., 1982).

Inversement, il est important de déterminer les tailles de particules affectées par ces composantes "dynamiques". Pour ce faire, nous recherchons le degré de contribution de chacune des classes de taille à la définition des axes factoriels.

#### RESULTATS

Nous prendrons pour exemple la composante n° 2 de l'analyse factorielle des résultats de la campagne en basse mer de mars 1982. Cette composante est définie principalement par les silts fins ( $< 4 \mu\text{m}$ ) et, accessoirement, par les silts grossiers ( $> 15 \mu\text{m}$ ); ces spectres de contribution des tailles au facteur 2 sont représentés dans la figure 3 avec la cartographie qualitative des échantillons contribuant le plus à l'élaboration de ce facteur 2.

La répartition des échantillons les plus affines avec le facteur 2 par leurs silts fins est conforme au tracé des isohalines et caractérise la dispersion fluviale en Baie de Seine. Les échantillons affines au facteur 2 par leur fraction grossière sont localisés juste à l'entrée de l'estuaire et se poursuivraient en amont; ils correspondent au matériel grossier remis en suspension dans le chenal sud.

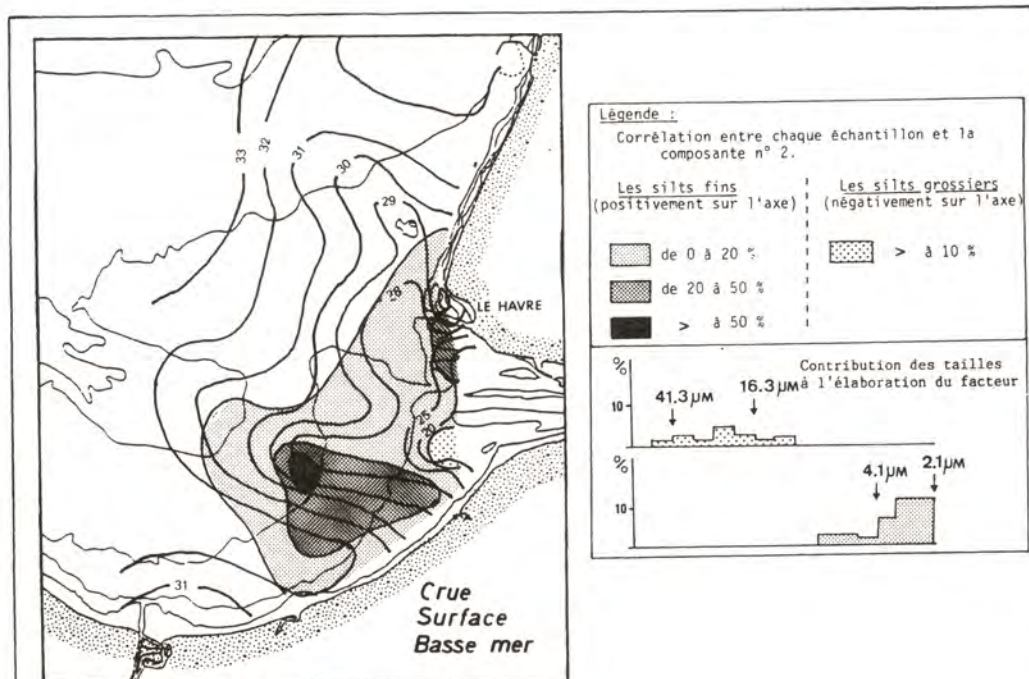


Figure 3. - Identification et cartographie de la 2ème composante d'une analyse factorielle (analyse en composante principale) (Campagne Plutéeus II - Mars 1982)



Ce traitement permet de mettre en évidence :

- les tailles caractérisant le mieux un mécanisme tel que la dispersion fluviale en Baie de Seine (résultats confirmés par l'observation au M.E.B.);
- les limites du panache concerné.

### 3.4. Utilisation de diagrammes bivariés de synthèse :

#### PRINCIPE

Chaque campagne est réalisée dans des conditions hydrodynamiques spécifiques. Les corrélations, délicates en ce qui concerne la caractérisation générale du matériel en suspension, rendent nécessaires l'utilisation de diagrammes de synthèse.

Dans le diagramme proposé (fig. 4) chaque échantillon peut être figuré par un point défini :

- en abscisse par le logarithme de la concentration en volume des particules dénombrées sur l'intervalle de mesure;
- en ordonnée par le logarithme de la concentration pondérale de la totalité de l'échantillon.

Le rapport de la masse sur le volume permet d'obtenir une densité apparente dont nous avons pu constater l'intérêt au paragraphe 3.1.. Cette densité apparente peut se trouver surestimée ( $> 10 \text{ gr/cm}^3$ ) par le fait que les deux paramètres (poids et volume) ne recouvrent pas la même fraction d'une population donnée. Des échantillons contenant une population significative de particules dont le diamètre se situe en dehors de l'intervalle de mesure pourront être reconnus. Les lignes d'isodensité servent de référence pour la caractérisation du matériel, laquelle est par ailleurs contrôlée par observation directe au M.E.B.

La position du point sera également inféodée à la concentration globale du matériel en suspension qui, pour une densité apparente constante, varie parallèlement aux lignes d'isodensité.

#### RESULTATS

Pour accroître l'intérêt interprétatif du diagramme de la fig. 4, nous avons réuni l'ensemble des données disponibles tant en Baie de Seine que dans d'autres domaines étudiés.

Cette représentation permet, dans un premier temps, de séparer :

- des échantillons caractérisés par une densité apparente forte, qui comportent une fraction minérale de taille inférieure à  $1,5 \mu\text{m}$ , de nature carbonatée (débris de coquilithes du panache littoral crayeux) ou de nature argileuse;
- des échantillons caractérisés par une densité apparente faible liée à une importante fraction planctonique de densité réelle faible et de taille souvent supérieure à  $45 \mu\text{m}$ .

Il s'agit là d'échantillons très typés dans leur composition. En ce qui concerne une grande partie des échantillons prélevés en estuaire et Baie de Seine, les particules sont principalement de la taille des silts et les points correspondants s'inscrivent autour de la ligne d'isodensité apparente  $d = 2$ . La différenciation entre les échantillons se réalise alors selon la concentration du matériel en suspension et nous pouvons distinguer :

- un pôle marin faiblement concentré;
- un pôle estuarien dont les échantillons les plus concentrés correspondent au "bouchon vaseux" et comporte à l'extrême une fraction sablon ( $< 45 \mu\text{m}$ ) ;
- une zone de remise en suspension caractérisée par des silts et des agrégats (panache défini au § 3.1.);
- une zone de transition ou de contact qui est plus développée en crue qu'en étiage.

A partir de paramètres simples, ce type de représentation, calé à partir d'observations initiales, permet de mettre en évidence les traits dominants des suspensions d'un échantillon ou d'une campagne tout en les situant dans un contexte plus général.

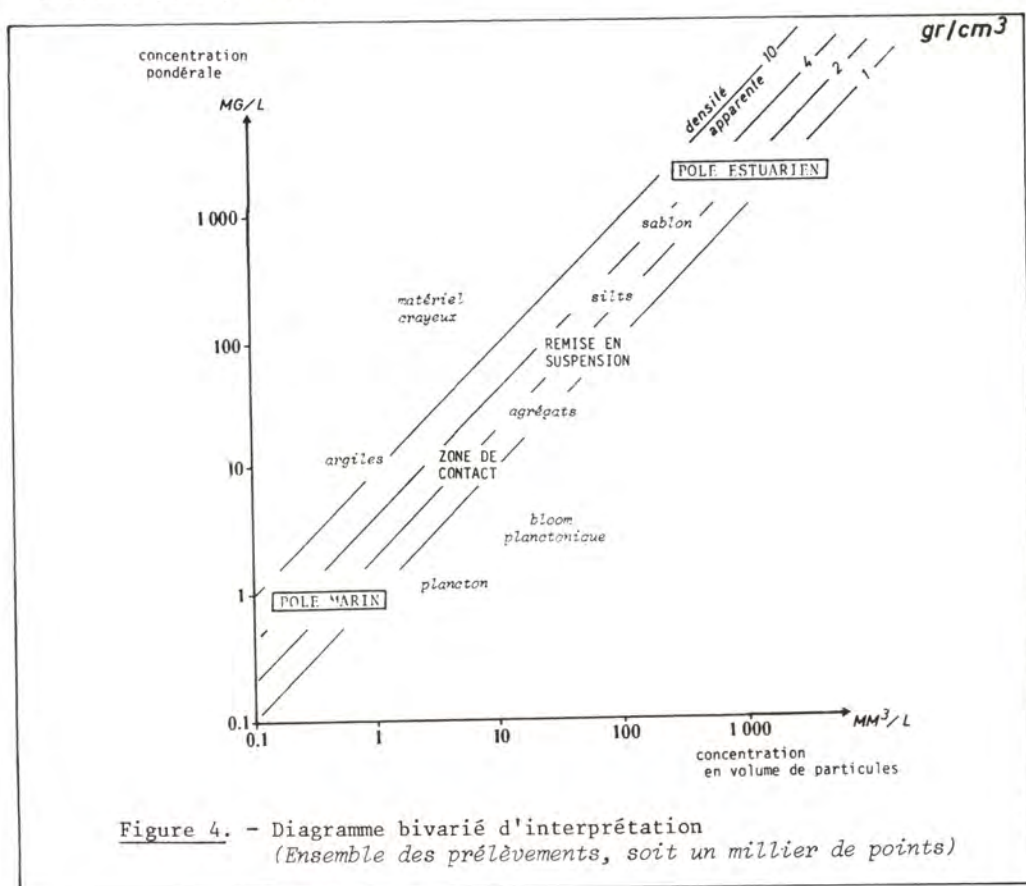


Figure 4. - Diagramme bivarié d'interprétation  
(Ensemble des prélèvements, soit un millier de points)

#### 4. CONCLUSION

Les paramètres physico-chimiques généraux, dont l'acquisition est simple, permettent de caractériser des évolutions globales; cependant, ils ne rendent pas compte de la complexité de détail des situations.

L'analyse des données granulométriques, confortée par l'utilisation du M.E.B., permet :

- de mettre en évidence la diversité des populations particulières,
- de caractériser ces populations,
- de suivre leur évolution,
- d'établir leur liaison avec des mécanismes hydrodynamiques spécifiques.

Avoine J. (1981). - L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3ème cycle, Caen, 270 p.

Brun-Cottan J.C. (1976). - Contribution à l'étude de la granulométrie et de la cinétique des particules marines. *J. Rech. Océanogr.*, Vol. I., n° 4, p. 41 à 54.



- Chanut J.P. & Poulet S.A. (1982).- Short-term variability of the size spectra of suspended particles in a rapidly changing environment. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 15, p. 497-513.
- Dupont J.P. & David F. (1980).- Microgranulométrie des suspensions du bouchon vaseux. In " Rapport S.A.U.M. Estuaire de la Seine, tome a - Eau et sédiments", MEBS/MABN, 38 p..
- Eisma D. & Kalf J. (1979).- Distribution and particle size of suspended matter in the southern bight of the north sea and the eastern channel. Netherlands Journal of sea research, Vol. 13, n° 2, p. 298-324.
- Germaneau J. (1969).- Origine, déplacement et dépôt des suspensions. In "Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine". Cent. Rech. Et. Océanol. n° 2, Vol. VIII, fasc. 1-2.
- Honjo S., Susumu & Emery K.L. (1976).- Suspended matter off eastern Asia : scanning electron microscopy and X-Ray probe analysis. In: "Volcanoes and tectonosphere", Tokai University Press, Japan, p. 259-288.
- Nelsen T.A. (1981).- The application of Q-mode factor analysis to suspended particulate matter studies: examples from the New York bight apex. Mar. Geology, Vol. 39, p. 15-31.
- Rajcevic B.M. (1957).- Etudes des conditions de sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Supplément aux Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 10<sup>e</sup> année, n° 117, Série : Sols et Fondations p. 744-775.
- Zbinden R. (1980).- Microgranulométrie du seston de la baie du Mont Saint Michel. Mémoire du labo. de Géomorphologie de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, n° 35, 171 p.

CONTRIBUTION DE L'ETUDE DES SUSPENSIONS A LA COMPREHENSION DES MECANISMES  
HYDROSEDIMENTAIRES ESTUARIENS ET LITTORAUX EN MANCHE CENTRALE ET ORIENTALE.

DUPONT J.P. \*, LAFITE R. \*, LAMBOY M. \*.

L'imagerie fournie par les satellites met en évidence le panache thermique (CNEXO, 1978) et turbide (Thomas Y.F., 1985) de la Seine et des zones littorales de Haute-Normandie et de Picardie. Les suspensions correspondantes ont pu être caractérisées, conformément à une stratégie d'étude (Lafite R., Dupont J.P., Lamboy M., 1985).

Dans l'ensemble côtier macrotidal ainsi défini, nous tenterons de dégager les spécificités dynamiques et le matériel propres à chacun des domaines étudiés.

# 1. ESTUAIRE DE LA SEINE

Pour illustrer les spécificités du matériel particulaire dans le domaine estuarien interne, nous prendrons pour exemple les résultats recueillis lors de la campagne réalisée le 10 mai 1978 (étiage), le long d'une radiale longitudinale, de caractère synoptique, à basse mer, dans le chenal de navigation de la Seine (fig. 1).

La répartition des teneurs pondérales de M.E.S. et des isohalines localise le bouchon vaseux au niveau du point 4 du profil (Avoine J., 1981).

L'étude granulométrique a permis d'établir les distributions en taille des particules au fond, au milieu et en surface. L'expression pondérale ( $10^{-4}$  mg/l) de ces répartitions granulométriques confirme les différences de concentration en particules entre les divers échantillons. La nature du matériel correspondant a, par ailleurs, été caractérisée par observation au microscope électronique à balayage (M.E.B.).

D'amont en aval, nous constatons:

## - Point n° 9 :

La salinité est nulle, les spectres granulométriques sont homogènes sur l'ensemble de la colonne d'eau et témoignent d'une dominance des silts moyens.

## - Point n° 7 :

Les concentrations de M.E.S. sont légèrement plus fortes au fond. Le matériel correspondant est constitué essentiellement de silts moyens, mal classés, mais l'on voit apparaître un pic grossier dans les sablons (50 à 100  $\mu$ m) constitués d'agrégats et de grains de quartz.

En surface, un pic bien marqué autour de 5  $\mu$ m correspond à des populations de diatomées planctoniques d'eau douce (abondance des genres *Cyclotella* et *Melosira*).

## - Point n° 5 :

Nous pénétrons dans le "bouchon vaseux". Les concentrations sont plus importantes. Le spectre granulométrique au fond est caractérisé par trois modes

\* Laboratoire de Géologie GRECO Manche. Faculté des Sciences. Université de Rouen. B.P. 67 - 76130 Mont-Saint-Aignan.



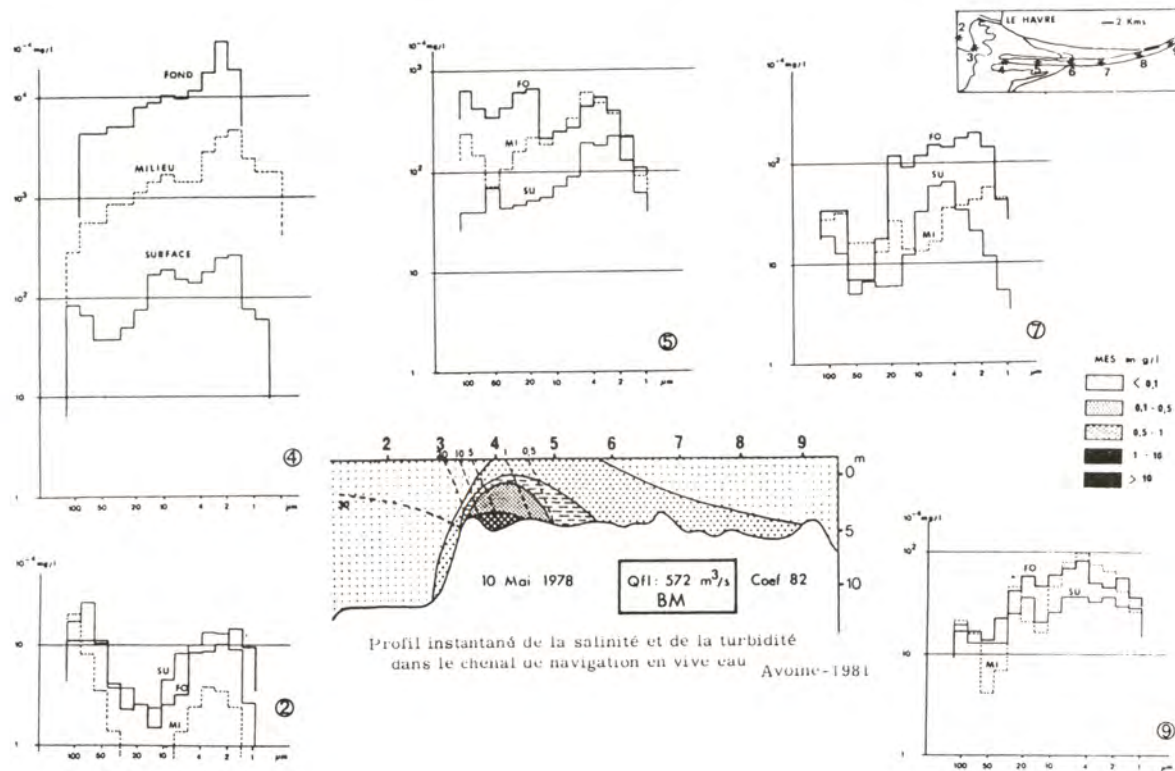


Figure 1. - Evolution des tailles et des concentrations des matières en suspension du domaine fluvial au domaine marin.

bien marqués: les silts fins ( $< 4 \mu\text{m}$ ), les silts grossiers constitués essentiellement d'agrégats ( $10 \text{ à } 30 \mu\text{m}$ ), et les éléments de la taille des sables (agrégats et quartz  $> 50 \mu\text{m}$ ).

#### - Point n° 4 :

Nous sommes au coeur de la zone la plus turbide avec de très fortes teneurs en M.E.S. ( $> 10 \text{ g/l}$  au fond). Les spectres granulométriques s'échelonnent depuis la surface jusqu'au fond avec un facteur  $\times 10$  de concentration entre chacun des trois niveaux de prélèvement.

Cette masse turbide est constituée essentiellement de silts fins. L'abondance des silts grossiers et des sables visualisée au M.E.B. ne se traduit pas selon des modes granulométriques, mais leurs concentrations sont toutefois supérieures à celles observées au niveau du point 5.

#### - Point n° 2 :

Dans la zone externe, les concentrations sont les plus faibles et les spectres granulométriques mettent en évidence deux pics principaux: l'un dans les silts fins  $< 8 \mu\text{m}$ , l'autre dans les silts grossiers et les sables, reconnu au M.E.B. comme étant principalement constitué de matériel organique associé avec quelques agrégats.

### CONCLUSIONS

Le matériel en suspension dans le cours aval de la Seine (point 9) correspond à des silts moyens à spectre étalé dont l'importance est renforcée au fond à l'approche des zones plus turbides.

Les mécanismes de remise en suspension associés au "bouchon vaseux" affectent les silts fins qui dominent largement dans la zone de turbidité maximale lorsque celle-ci est très élevée.

Ces mêmes silts fins se retrouvent au large dans des zones peu concentrées et constituent le panache estuarien de la Seine qui se développe en baie (cf. § suivant). Ils sont alors associés à un matériel organique.

## 2. BAIE DE SEINE

Les données granulométriques en Baie de Seine sont plus homogènes qu'en estuaire, notamment par la disparition du pic grossier des sables.

L'analyse en composante principale normée (A.C.P.) appliquée aux données granulométriques exprimées en concentration ( $\text{mm}^3/\text{L}$ ) permet de dégager les grands traits de la distribution des particules en suspension. La distance retenue par l'A.C.P. est la distance euclidienne.

L'analyse factorielle des résultats de la campagne Cryos de septembre 1981 (étiage), ayant consisté en radiales à pleine mer et basse mer, permet de dégager quatre composantes "dynamiques" principales.

Pour évaluer l'importance de ces facteurs sur les caractères des suspensions en Baie de Seine, nous localiserons les échantillons les mieux corrélés avec ces composantes dynamiques, à basse mer, puis à pleine mer, sur deux coupes longitudinales perpendiculaires, l'une d'orientation O-E dans l'axe du chenal principal de la Seine, l'autre N-S (fig. 2) au large de la Hève.

#### Composante $F_1$ :

Elle correspond à un stock étalé de silts moyens.

A basse mer, les échantillons les plus représentatifs sont localisés au débouché de l'estuaire et à proximité de la côte du Calvados. Ce panache est beaucoup plus développé vers le Nord que vers l'Ouest.

A pleine mer, ce panache se rétracte de façon importante. Vers l'Est, face à l'estuaire, il est pratiquement absent, excepté au fond. Ce panache est plus développé sur la radiale N-S, mais il est alors inféodé à l'activité des dragues qui rejettent peu avant la pleine mer.



## localisation

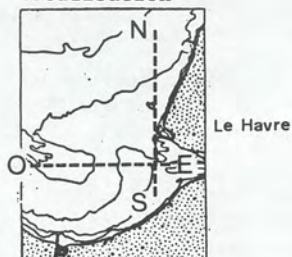
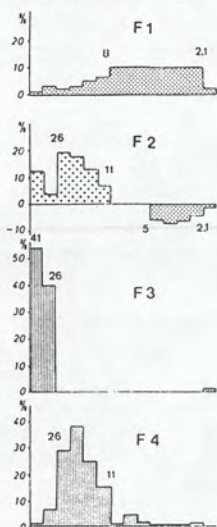


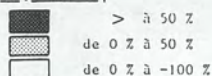
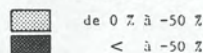
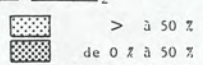
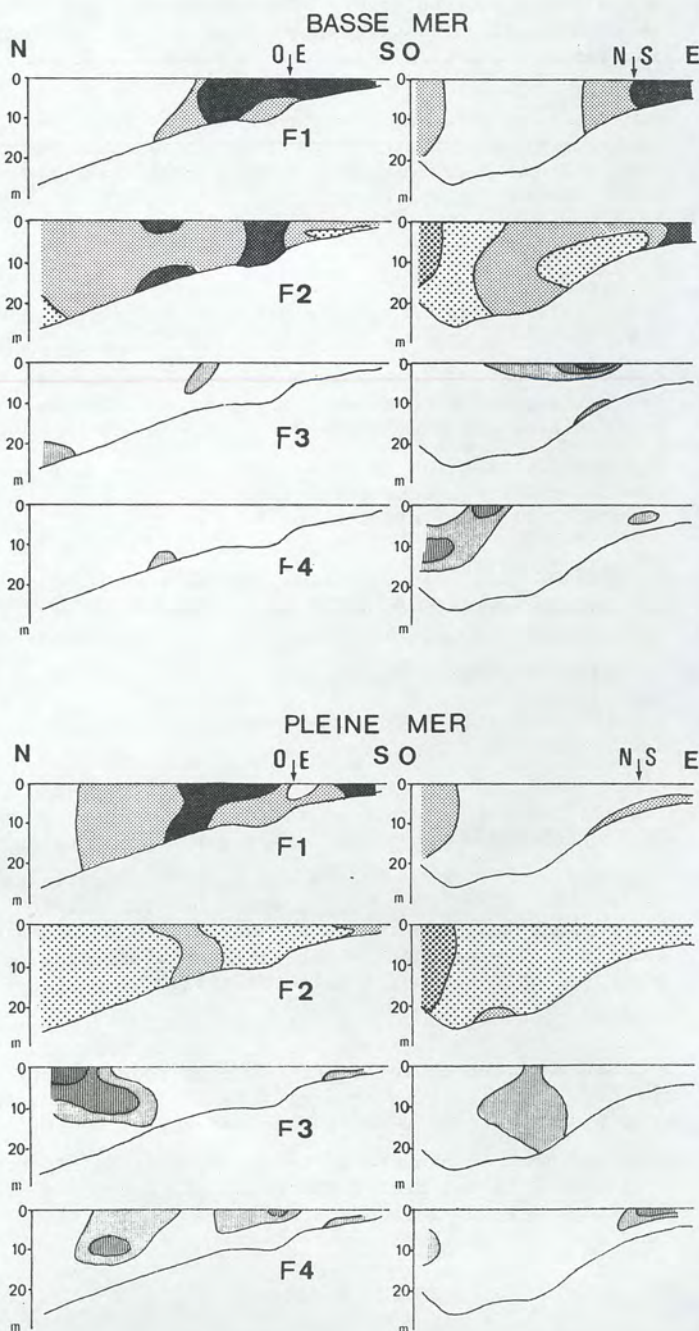
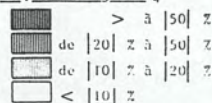
Figure 2. - Evolution des composantes dynamiques principales en baie de Seine

contribution des tailles à l'élaboration des facteurs



## Légende :

Pourcentage de corrélation entre chaque échantillon et leur composante (de 100 à -100 %)

Composante F<sub>1</sub>Composante F<sub>2</sub>Composante F<sub>3</sub> et F<sub>4</sub>

Il faut, par ailleurs, noter la présence à l'ouest, quelles que soient les conditions de marée, d'un pôle à forte affinité avec la composante  $F_1$  dont l'interprétation est hypothétique dans l'état actuel de nos connaissances. Cette observation confirmée par toutes les campagnes réalisées devra être approfondie par une étude en Baie de Seine occidentale.

#### Composante $F_2$ :

Elle est liée aux silts fins minéraux ( $< 5 \mu\text{m}$ ) et aux silts grossiers constitués essentiellement par des agrégats de 10 à 50  $\mu\text{m}$ .

La radiale E-O à basse mer montre un gradient décroissant, très étalé, de silts fins, depuis l'entrée de l'estuaire vers le large. Ce panache estuarien de silts fins est plus développé vers le Nord à basse mer.

A pleine mer, l'influence de ces silts fins disparaît presque totalement dans la radiale E-O, mais persiste au niveau de la zone de dépôts de dragage au large de Cauville.

En ce qui concerne les populations d'agrégats (silts grossiers), la radiale E-O présente une corrélation maximale vers l'ouest tant à basse mer qu'à pleine mer. A basse mer, on enregistre toutefois une zone d'influence de ces silts grossiers en aval de l'estuaire. A pleine mer, on constate que la rétraction du panache des silts fins provenant de l'estuaire laisse place à une large extension de l'influence de ces agrégats.

Les mêmes observations peuvent être réalisées sur la radiale N-S avec une faible contribution des agrégats à basse mer excepté toutefois à proximité immédiate de l'estuaire, et un très large développement à pleine mer excepté au niveau de la zone des dépôts de dragage au niveau de laquelle les silts fins doivent masquer l'influence de cette fraction minérale plus grossière.

#### Composante $F_3$ :

Elle correspond à la contribution du matériel biologique de taille comprise entre 26 et 41  $\mu\text{m}$ . Les organismes concernés sont essentiellement des Diatomées du genre *Chaetoceros*, des Dinoflagellés, des Tintinnoides et des larves d'Ostracodes.

Ce matériel est bien développé en surface à basse mer dans la partie médiane de la radiale E-O et se retrouve dans l'ensemble de la colonne d'eau à pleine mer.

Selon la radiale N-S, ce matériel est peu représenté à basse mer, mais il se développe à pleine mer au nord de la zone des dépôts de dragage: apports venant du nord conformément aux conditions courantologiques.

#### Composante $F_4$ :

Il s'agit également de matériel biologique, mais de taille plus petite, comprenant également des *Chaetoceros* et des larves d'Ostracodes en association avec d'autres Diatomées dont *Rhizosolenia*, *Diploneis*, ainsi que des Dinoflagellés (*Prorocentridae*).

Selon la radiale E-O, à basse mer, ce matériel n'est bien représenté qu'à l'ouest; à pleine mer, il est repoussé devant l'estuaire.

Selon la radiale N-S, l'influence de ces organismes, très limitée à basse mer, est, en revanche, très développée à pleine mer, surtout en surface.

#### CONCLUSION

Cette analyse factorielle met en évidence les principales composantes du matériel en suspension en Baie de Seine et permet d'aborder les mécanismes de leur dispersion. En ce qui concerne le matériel essentiellement minéral, nous distinguons :

- une fraction silteuse moyenne ( $F_1$ ) déjà reconnue dans l'estuaire et dont le panache important à basse mer est plus développé vers le nord que vers l'ouest;



- une fraction silteuse fine ( $F_2$ ) qui était prépondérante dans le bouchon vaseux de l'estuaire (cf. §1) et dont l'importance se poursuivrait dans la partie aval de l'estuaire; nous retrouvons en Baie le caractère estuarien de cette fraction dont la répartition est conforme aux isohalines et à leur déplacement au cours de la marée, avec une extension maximale à basse mer et un faible développement à pleine mer (Avoine J. *et al.*, 1984).

- Une fraction silteuse grossière ( $F_2$ ) qui pourrait avoir une double répartition, l'une très limitée effluente de l'estuaire ou des zones de remises en suspension, l'autre plus étendue au sein des échantillons moins chargés en M.E.S. à pleine mer.

Le matériel biologique a également une importance fondamentale, puisqu'il correspond aux composantes  $F_3$  et  $F_4$ . Il est souvent déterminant au large, et plus particulièrement au nord de la zone des dépôts de dragage à pleine mer, par suite d'apports venant du nord et d'une éventuelle action de blocage exercée par les rejets des dragues.

L'importance de cette zone de dépôt de dragage sur la constitution du matériel en suspension est donc évidente et doit être prise en compte en ce qui concerne les problèmes géochimiques.

Les phénomènes observés dans la partie ouest de la zone étudiée restent à préciser.

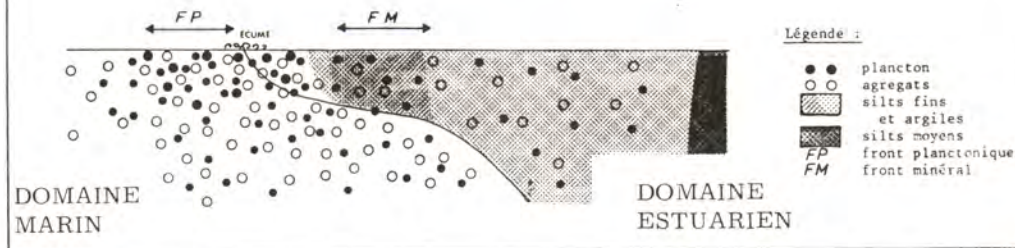
### 3. LES MECANISMES DE FRONTS AFFECTANT LES MASSES D'EAU

#### 3.1. Le système estuaire - Baie de Seine :

Dans les études précédentes, nous avons considéré que le milieu étudié n'était pas homogène et nous avons utilisé les paramètres physico-chimiques pour décrire des gradients. En fait, l'observation *in situ*, l'étude des suspensions et la connaissance des mécanismes physiques aux limites, nous amènent à admettre l'existence de discontinuités au niveau desquelles se développent des fronts dans lesquels les mécanismes d'échange sont encore à définir.

En s'inspirant des travaux de Bowman et Iverson (1978) et en exploitant les données recueillies en estuaire et Baie de Seine à propos du matériel en suspension, nous pouvons proposer l'interprétation schématique suivante pour définir un front entre les eaux à influence fluviale ou estuarienne et les eaux à influence marine (fig. 3).

Figure 3. - Front estuarien externe.



Ce mécanisme de front, naturel ou artificiel par déversement de dragage, va entraîner un blocage des dilutions particulières de l'une ou l'autre masse d'eau, ainsi que des phénomènes de concentration tels que :

- l'accumulation des particules minérales fines en surface (FM) caractérisée par de fortes teneurs en M.E.S. pour des turbidités moyennes,
- l'accumulation de matériel planctonique sur l'ensemble de la colonne d'eau (FP), présentant de fortes turbidités pour de faibles teneurs en M.E.S..

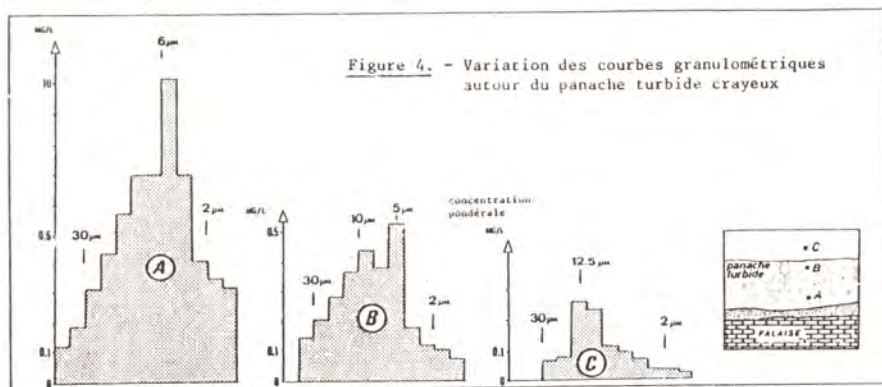
Ces phénomènes ont été illustrés par des données en point fixe (cf. résultats point fixe La Hève de décembre 1983 dans Lafite, Dupont, Lamboy, 1985). De tels processus de front ont été observés dans d'autres domaines; ils peuvent être moins complexes et constituent alors des modèles (au sens non mathématique du terme) de fonctionnement intéressants à étudier.

### 3.2. Le panache turbide du littoral crayeux de Haute-Normandie :

Le long du littoral crayeux de Haute-Normandie situé à l'est du cap d'Antifer, les apports fluviaux de M.E.S. sont négligeables. C'est le démantèlement des éboulis crayeux qui fournit un abondant matériel en suspension formé de coccolithes (Simon S. et Dupont J.P., 1983).

Les suspensions sont concentrées dans une frange littorale d'environ un kilomètre de large avec des concentrations de surface supérieures à 20 mg/l, même en absence de houle. Le matériel correspondant présente le plus souvent deux modes principaux :

- le plus important, situé entre 4 et 6  $\mu\text{m}$ , correspond aux coccolithes de la craie et se prolonge dans les particules plus fines (fragments de coccolithes); à proximité immédiate du littoral, ce mode est exclusif (fig. 4A).
- L'autre, situé entre 9 et 12  $\mu\text{m}$  voire plus, est lié au plancton actuel (fig. 4, histogramme bimodal B).



Le contact entre ce panache turbide littoral et les eaux du large de turbidité faible est relativement brutal: passage de plus de 20 mg/l à moins de 10 mg/l en quelques dizaines de mètres. De plus, la composition du matériel en suspension au large est très différente : mode principal planctonique et quasi absence de matériel crayeux (fig. 4C).

Les relations entre le panache turbide littoral et les eaux du large ne se résument pas en un simple phénomène de dilution qui introduirait une progression graduée du littoral vers le large. Les mécanismes physiques d'échange en zone de bordure littorale restent à préciser mais les coccolithes doivent pouvoir constituer un excellent marqueur des apports littoraux. La zone littorale de Haute Normandie pourrait ainsi devenir un bon "modèle" pour l'étude des phénomènes hydrodynamiques de bordure.



### 3.3. Principaux aspects dynamiques en Baie de Somme :

Le panache turbide littoral, précédemment défini, se déplace globalement le long des côtes vers le nord-est et pénètre dans le domaine interne de la baie de Somme, siège d'un colmatage important par du matériel quartzeux et carbonaté.

Au large, dans les domaines externes même non affectés par des différences de salinité, nous retrouvons un front estuarien externe, qui se manifeste par une ligne d'écume très nette et qui évolue en fonction des conditions de marée. Cette discontinuité se concrétise par un front turbide organique que révèlent les données fluorimétriques des eaux de surface et qui est caractérisé par une concentration en germes pathogènes, marqueurs d'origine continentale.

Dans le domaine interne, nous observons une seconde discontinuité liée au gradient de salinité plus ou moins étalé selon les conditions hydrodynamiques (marée et débit fluvial). Les courants, fortement chenalisés, y sont responsables d'une remise en suspension abondante concernant des particules fines, mais surtout des particules grossières de la taille des sablons et même des sables (grains de quartz jusqu'à 500  $\mu\text{m}$ ). Ce mécanisme, relativement limité au sein des chenaux, est particulièrement développé au flot sur les bords des chenaux et sur les zones de slikke (Dupont J.P. et Lafite R., 1984).

L'absence de véritable bouchon vaseux résulte de l'aménagement du cours inférieur de la Somme et de la Maye qui modifie artificiellement les débits et réduit les apports particuliers fluviaux.

### 4. CONCLUSION

L'étude du matériel en suspension permet de caractériser le matériel spécifique à chaque domaine et ses relations avec les paramètres dynamiques.

Il apparaît possible en Baie de Seine de définir des polarités géographiques en ce qui concerne le matériel en suspension :

- polarité estuarienne caractérisée par la remise en suspension de la fraction sablon dans le domaine estuarien interne et par la dispersion des silts fins constituant le panache estuarien en Baie,
- polarité marine matérialisée par la dominance des éléments planctoniques,
- polarité côtière inféodée au contexte géologique: remise en suspension de silts fins à proximité des côtes du Calvados, panache turbide constitué de coquilithes le long du littoral crayeux de Seine Maritime,
- polarité artificielle liée aux rejets de dragages et autres activités portuaires.

Les limites des domaines concernés fluctuent en fonction des conditions hydrodynamiques (marée et débit fluvial). Ces limites peuvent être définies comme des fronts dont l'étude est délicate en Baie de Seine par suite de la complexité des masses d'eau et de leur circulation. Des investigations pluridisciplinaires complémentaires sont nécessaires; elles pourront tirer profit de l'étude de "modèles" plus simples, tels le panache turbide littoral de Haute Normandie et les fronts turbides observés en Baie de Somme.

---

Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Caen, 270 p..

Avoine J., Boust D., Lafite R. & Thomas Y. (1984).- Dispersion des apports fluviaux en Baie de Seine. Communication 5<sup>e</sup> Congrès Européen de Sédimentologie, Marseille.

- Bowman M.J. & Iverson R.L. (1978).- Estuarine and plume fronts. In "Oceanic fronts in coastal processes" de Bowman M. and Essias W.E., p. 87 à 104, Ed.Springer Verlag, Berlin.
- CNEXO/COB (1978).- Baie de Seine, Campagne Thalia, mai 1978, 189 p..
- Dupont J.P. & Lafite R. (1984).- Principales caractéristiques hydrobiosédimentaires de la baie de Somme. Communication Colloque "L'Environnement en Picardie", AMBE, Amiens, 9 et 10 octobre 1984.
- Lafite R., Dupont J.P. & Lamboy M. (1985).- Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en Baie de Seine. Ce volume, N° 11.
- Simon S. & Dupont J.P. (1983).- Suivi biosédimentaire et impact biologique des travaux d'aménagements dans la centrale nucléaire de Paluel. Rapport E.D.F., Suivi 1981-1982, 145 p..
- Thomas Y.F. (1985).- Mouvements et charges turbides des eaux de la Manche d'après les données CZCS, capteur opérant sur le satellite Nimbus-7, ce volume, N° 15.



## IMPORTANCE ET ROLE DU MATERIEL ORGANIQUE VIVANT ET INERTE DANS LES SUSPENSIONS DE LA BAIE DE SEINE.

DUPONT J.P. \*, LAFITE R. \*

Les matières organiques vivantes et celles biologiquement inertes occupent une place importante au sein du matériel en suspension dans la baie de Seine. L'analyse des données microgranulométriques couplée avec une identification au M.E.B. permet de démontrer (Dupont J.P., Lafite R. & Lamboy M., 1985) que certaines fractions organiques et certaines structures organo-minérales peuvent être à l'origine de modes granulométriques qui constituent alors une composante déterminante pour la caractérisation dynamique du matériel en suspension.

Nous avons ainsi constaté que la fraction organique, et notamment planctonique, était déterminante au large et pouvait se concentrer localement au contact des fronts entre masses d'eau. De la même façon, les agrégats organo-minéraux sont présents dans l'ensemble du domaine estuaire - Baie de Seine.

Il importe donc de mieux définir ce matériel organique pour mieux apprécier son importance et son rôle dans le fonctionnement de cet écosystème.

### 1. IMPORTANCE ET ROLE DU MATERIEL ORGANIQUE VIVANT

#### 1.1. Importance des Diatomées :

Dans la fraction planctonique vivante, les Diatomées occupent une place d'autant plus importante que le traitement subi par les échantillons (dessiccation) ne permet pas de conserver convenablement les organismes ne possédant pas de squelette minéral ou organique.

Nous avons vu que l'étude des populations phytoplanctoniques (essentiellement Diatomées, Dinoflagellés, Silicoflagellés et Algues vertes mal conservées) et zooplanctoniques, (larves de Copépodes et d'Ostracodes, Tintinnoïdes) permet de donner une signification à certains modes granulométriques. Mais ces populations obéissent à des cycles saisonniers, avec de grandes périodes de blooms planctoniques :

- en mars, avec essentiellement le genre *Thalassiosira*,
- en juin-juillet, avec *Rhizosolenia* spp., *Ditylum brightwellii*, Dinoflagellés,
- en septembre, avec un très grand développement du genre *Chaetoceros*.

En Baie de Seine, il est souvent inutile de recourir à une détermination spécifique: les représentants des genres dominants ayant des domaines écologiques bien spécifiques, conformément aux études de plancton réalisées à l'occasion du SAUM Estuaire de Seine (Vu Do Q. et Houssemaine J., 1980). Nous distinguons par exemple les genres représentés en domaine estuarien et fluvial, tels que *Melosira* et *Cyclotella*, et le genre *Thalassiosira* essentiellement marin (sous réserve de l'éventuelle présence d'une des espèces connues depuis peu comme euryhalines).

\* Laboratoire de Géologie GRECO Manche - Faculté des Sciences - Université de Rouen. B.P. 67 - 76 130 Mont-Saint-Aignan.

Nous retrouvons, par ailleurs, des Diatomées à caractère benthique, notamment des pennées appartenant au groupe des *Navicula*, qui peuvent témoigner de mécanismes de remise en suspension.

### 1.2. Rôle des Diatomées planctoniques dans l'agrégation des particules minérales en suspension:

Les Diatomées et, en particulier les centriques, peuvent être à l'origine d'agrégats par la production d'un mucus externe qui permet l'encollage de particules minérales de la taille des silts fins et des argiles. En ce qui concerne les *Thalassiosira*, le phénomène est très courant et concerne d'abord la ceinture, la face valvaire perforée étant le siège d'importantes circulations d'eau. La photo n° 1, montre l'exemple de deux frustules de *Thalassiosira* avec un début d'agrégation particulière sur la ceinture (de face sur le cliché); les deux frustules sont reliés entre eux par un mince cordon muqueux (A); ils appartiennent en fait à une chaîne comportant une vingtaine d'individus vivants au moment du prélèvement. Après leur mort, la matière organique des cellules peut favoriser la fixation d'une plus grande quantité de matière minérale, notamment sur les faces valvaires; les frustules peuvent alors être plus ou moins complètement encroûtés et participer ainsi à la formation d'agrégats. C'est le cas présenté dans la photo n° 2 qui montre deux frustules de *Thalassiosira* mortes (B et C) au sein d'un agrégat.

Les liens entre les silts et les frustules ont ici un caractère organo-minéral et nous n'avons pas observé de "ponts siliceux" à l'instar de Ernisee J.J. et Abbott W.H. (1975).

### 1.3. Rôle du zooplancton dans la constitution d'"agrégats" s.l.: les pelotes fécales et les pseudofèces :

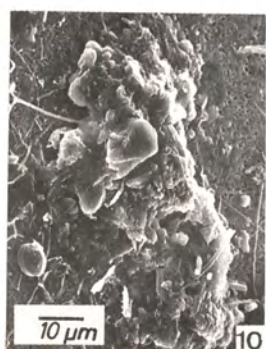
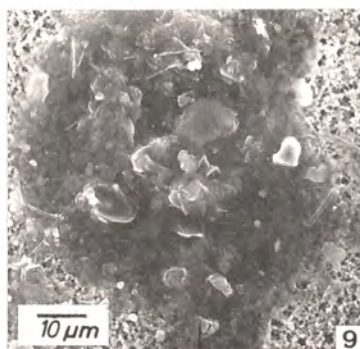
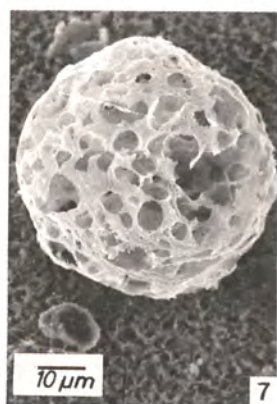
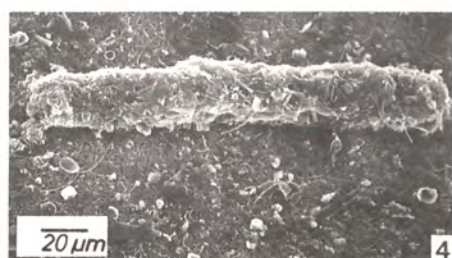
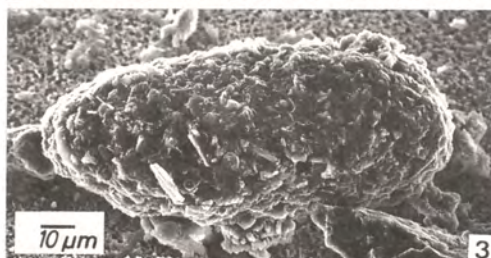
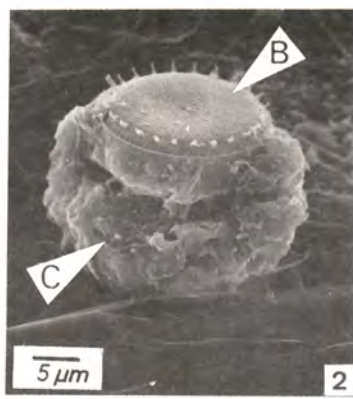
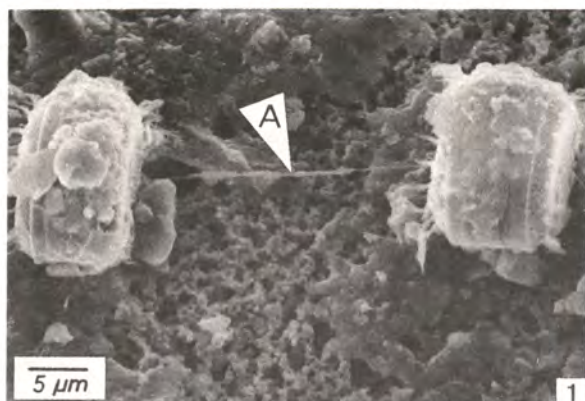
Parmi les agrégats ou agglomérats particuliers observés en suspension, nous trouvons fréquemment des éléments organisés selon une forme géométrique régulière pouvant être caractérisés comme des pelotes fécales.

L'étude des pelotes fécales rejetées par des organismes benthiques réalisée par Arakawa K.U. (1970) et abordée par nous-mêmes en Baie de Seine, montre que

#### PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE : SUSPENSIONS OBSERVEES AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.

- Photo 1 : Début d'agglomération autour des zones connectives de deux frustules de *Thalassiosira* vivantes. (A: cordon muqueux ou cytoplasmique reliant les cellules) (X 2000).
- Photo 2 : Agrégat en formation intégrant deux frustules de *Thalassiosira* mortes (B et C) (X 1600).
- Photo 3 : Pelote fécale ovoïde riche en matériel minéral fin (X 600).
- Photo 4 : Pelote fécale de copépode riche en soies de *Chaetoceros socialis* (X 400).
- Photo 5 : Fragment de tissu vasculaire d'origine végétale (X 400).
- Photo 6 : Fibre cellulosique (X 160).
- Photo 7 : Particule carbonée : résidu de combustion d'origine industrielle (X 800).
- Photo 8 : Voile organique non structuré (X 80).
- Photo 9 : Association organo-minérale à dominante organique : "flocon" (X 800).
- Photo 10 : Association organo-minérale à dominante minérale : "agrégat" (X 800).







les pelotes fécales ont une forme régulière souvent ovoïde et une bonne cohésion notamment en ce qui concerne la pellicule superficielle généralement plus riche en matières organiques. Cette cohésion du matériel minéral fin lié au matériel organique confère à l'ensemble une surface régulière et une morphologie conservée malgré la succion exercée lors de la filtration pour séparer les M.E.S..

Au contraire, les pseudofeces ne présentent aucune structure organisée et restent donc difficiles à identifier dans des suspensions naturelles.

La photo n° 3 montre un exemple d'agglomérat de 110  $\mu\text{m}$  de long, présentant une forme ovoïde et une surface régulière. Il s'agit d'une pelote fécale composée de matériel minéral fin, de 4 à 5  $\mu\text{m}$ , enrobé dans un matériel organique non structuré.

La photo n° 4 présente un type régulier de pelote fécale de forme allongée (175  $\mu\text{m}$  de long). A l'intérieur, nous distinguons des filaments siliceux identifiés comme des soies de *Chaetoceros sociale*, toujours très abondants dans les prélèvements correspondants: il s'agit en fait d'une pelote fécale de copépode. D'ailleurs, quelques copépodes eux-mêmes ont été parfois recueillis.

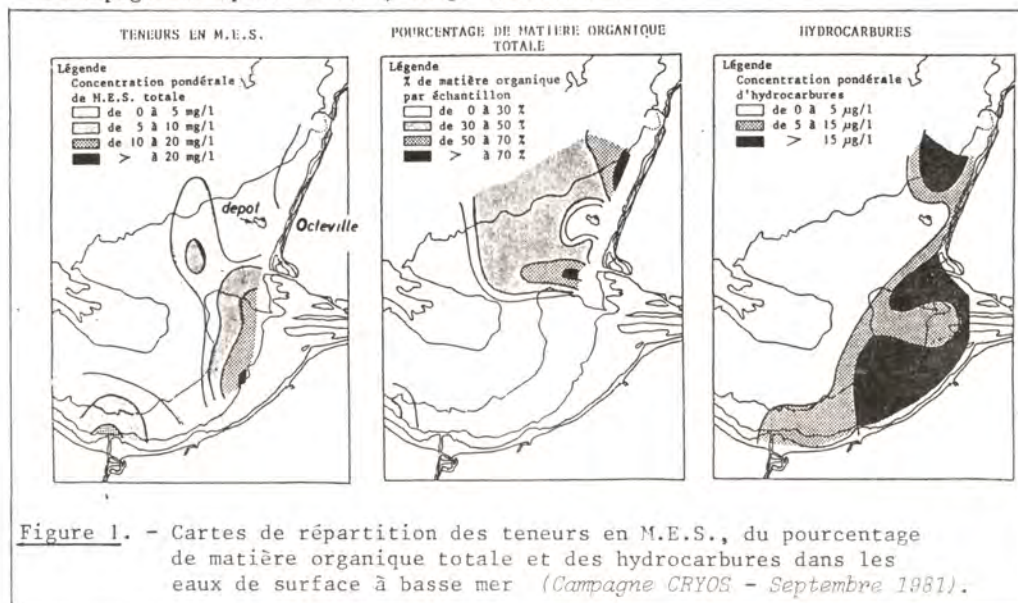
## 2. IMPORTANCE ET ROLE DES MATIERES ORGANIQUES NON VIVANTES

### 2.1. Les données de quantification :

L'importance des matières organiques peut être abordée par la quantification globale après calcination à 500°C. Les résultats obtenus peuvent être reportés cartographiquement en faisant ressortir soit les concentrations, soit les pourcentages par rapport aux teneurs en M.E.S.. Ceci permet de mettre en évidence l'importance de la fraction organique totale y compris la fraction planctonique vivante.

La différenciation entre matière organique vivante et non vivante peut être abordée par le dosage des hydrocarbures. Ces valeurs ont un intérêt discutable puisqu'elles sont inféodées à la pollution chronique et accidentelle du domaine étudié, mais le comportement de ces substances peut donner des indications quant aux mécanismes de répartition des matières organiques non vivantes (les hydrocarbures représentent une fraction qui n'est généralement pas associée à la fraction vivante).

La confrontation de la cartographie des teneurs en M.E.S., du pourcentage de matières organiques totales et des teneurs en hydrocarbures en surface durant la campagne de septembre 1981, (fig. 1) montre :





- des teneurs en hydrocarbures élevées dans le secteur de la zone des dépôts de dragage au large d'Octeville; elles correspondent à de faibles teneurs en M.E.S. et à des pourcentages élevés de matière organique totale;
- des teneurs en hydrocarbures élevées au débouché de l'estuaire, correspondant à des teneurs en M.E.S. élevées et un faible pourcentage en matière organique totale excepté au large du Havre.

Les fractions organiques non vivantes du type des hydrocarbures ont donc une répartition spécifique qui ne peut être totalement parallélisée, ni avec celle de la charge totale en M.E.S., ni avec celle de la concentration ou du pourcentage de matière organique totale. De la même façon, les rapports C/N tirés des dosages C H N traduisent l'importance relative des matières organiques non vivantes par rapport aux matières organiques vivantes. Les données recueillies en décembre 1983 montrent :

- un accroissement du rapport C/N en profondeur, traduisant une importance du matériel organique non vivant en profondeur;
- un gradient décroissant du rapport C/N selon la coupe longitudinale amont-aval de l'estuaire de la Seine, ce qui traduit une influence croissante des matières organiques vivantes vers le large.

## 2.2. Les éléments figurés :

Dans le matériel en suspension, nous observons des éléments figurés organiques non vivants qui peuvent être identifiés. Les photos 5, 6 et 7 permettent d'illustrer les éléments les plus répandus.

### a) Débris végétaux de caractère cellulo-pectique ou ligneux :

La photo n° 5 montre un fragment de 140  $\mu$ m de long de tissu vasculaire végétal. De tels fragments sont abondants en surface dans l'estuaire de Seine et peuvent être à l'origine d'un mode grossier de nature organique caractérisé par une excellente flottabilité. Ces éléments se trouvent ainsi concentrés au niveau des lignes d'écume qui se développent à la faveur des fronts.

### b) Fibres de cellulose (photo 6)

Ces fibres d'un demi millimètre de long sont abondantes, isolées, de couleur variable; elles sont répandues dans l'ensemble du domaine Baie de Seine, y compris dans l'estuaire et plus en amont dans le domaine fluvial. Il est probable qu'elles résultent de la pollution (dilacération de papier).

### c) Particules carbonées (photo 7)

Des boulettes à structure alvéolée ou "spongieuse" ont été trouvées dans l'ensemble des échantillons en suspension. Leur nature carbonée (avec des traces de soufre) a été confirmée par une étude à la microsonde. D'après Jedwab J. (1968), il s'agit de résidus de combustion qui sont diffusés dans l'atmosphère. Ces particules illustrent ainsi les problèmes de pollution atmosphérique. Elles ont été reconnues en abondance dans les sédiments subtidiaux devant l'estuaire et en zone intertidale (Honfleur); elles contribueraient à l'accroissement de la teneur en carbone des sédiments (Griffin J.J. et Goldberg E.D., 1981).

## 2.3. Les structures organo-minérales :

### a) Voiles organiques (photo 8)

Ils apparaissent à la surface des filtres sous forme d'une pellicule fine, de couleur sombre, sans structure définie. Ils sont généralement plus abondants dans les prélèvements de surface.

### b) Associations organo-minérales à dominante organique (photo 9)

Ces agglomérats comportent des silts, des argiles et des éléments organiques structurés englobés dans une matrice organique non structurée plus épaisse que les voiles organiques. Nous appelons "flocons" ces éléments non structurés à dominante organique, mais il n'existe pas de terminologie établie.

Cette organisation est comparable à celle des pseudofeces libérées par des mollusques filtrants; en l'absence de caractères descriptifs spécifiques, la distinction est délicate à effectuer.

c) Structures organo-minérales à dominante minérale (photo 10)

Ces agglomérats essentiellement constitués d'éléments minéraux liés par une matrice argilo-organique peuvent être appelés des "agrégats". Ils sont abondants, tant au niveau de la Seine qu'au niveau des eaux du large en Baie de Seine. Les Diatomées peuvent participer à leur élaboration (cf. §1-2).

d) Discussion méthodologique

Compte tenu de l'extraction des M.E.S. par filtration sous vide, les associations organo-minérales sont déformées par la pression et ont tendance à s'aplatir: il est possible d'apprécier le degré de structuration de ces associations en fonction inverse de leur aplatissement. Ceci justifie la distinction précédemment établie entre "flocons" et "agrégats", et permet d'isoler parmi ces derniers des "agrégats rigides" non déformés, tels que celui de la photo 2, et d'autres "mous" déformés.

Une étude de la morphologie réelle des flocons et des agrégats déformables peut être réalisée par :

- congélation des échantillons d'eau par l'azote liquide, puis lyophilisation (procédure comparable à celle réalisée par Barbaroux L. (1980);
- rinçage à l'eau distillée des lyophilisats avant l'observation pour évacuer le sel qui pourrait s'être introduit dans les structures.

Après ces traitements délicats, nous constatons que ces flocons et agrégats déformables ont une structure spongieuse.

### 3. CONCLUSION

L'étude du matériel planctonique vivant permet de caractériser certaines populations du spectre granulométrique. Ces données doivent prendre en compte les cycles biologiques saisonniers; l'identification d'espèces ou de genres caractéristiques d'un compartiment du milieu fournit des informations sur les processus hydrodynamiques et sédimentaires. Des phénomènes de concentration planctonique se réalisent au niveau des fronts et permettent de les souligner.

Les organismes vivants jouent également un rôle dans la réalisation de structures organo-minérales. Les associations entre matière organique non vivante et fraction minérale fine ont une morphologie qui ne résulte pas obligatoirement d'une activité biologique; cette morphologie est plus ou moins structurée et vacuolaire. Ces caractères morphologiques des associations organo-minérales influent sur leurs comportements hydrosédimentaire et géochimique. La répartition des matières organiques non vivantes est relativement spécifique et partiellement indépendante de celle de la fraction minérale et de la fraction planctonique vivante.

---

Arakawa K.Y. (1970).- Scatological studies of the bivalvia (mollusca). Ad. Mar. biol., 8, p. 310-398.

Barbaroux L.H. (1980).- Evolution des propriétés physiques et chimiques des sédiments dans le passage continent-océan. L'effet estuarien (estuaire de la Loire et ses parages). Thèse d'Etat, Nantes, 431 p..

Dupont J.P., Lafite R. & Lamboy M. (1985).- Contribution de l'étude des suspensions à la compréhension des mécanismes hydrosédimentaires estuariens et littoraux en Manche centrale et orientale. Ce volume, N° 12.



- Griffin J.J. & Goldberg E.D. (1981).- Sphericity as a characteristic of solids from fossil fuel burning in a lake Michigan sediment. Geochimica and cosmochimia Acta, vol. 45, p. 763-769.
- Jedwab J. (1971).- Particules de matière carbonée dans les nodules de manganèse des grands fonds océaniques. C.R. Ac. Sc., Paris, t. 272, sér. D, p. 1968-1971.
- Vu Do Q. & Houssemaine J. (1980).- Etude qualitative et quantitative du phytoplancton dans l'estuaire de la Seine. In "Rapport S.A.U.M. Estuaire de la Seine, tome C-les algues", MEBS/MABN, 33 p..

PARTICULES EN SUSPENSION DANS LA BAIE DE SEINE : CONCENTRATION ET SEDIMENTATION INSTANTANEE EN PERIODE D'ETIAGE.

BRUN-COTTAN J.C.L.\*, BEN BRAHIM M.\*.

INTRODUCTION ET DEFINITION DE LA STRATEGIE DE MESURE

Au cours de la campagne ELIE-83, effectuée en décembre 1983 sur la Thalassa en Baie de Seine, 200 spectres de taille des particules en suspension ont été mesurés. A chaque station, 3 prélèvements ont été effectués en surface, près du fond et dans la zone de transition. Les profondeurs, salinité et température des prélèvements étaient déterminées par une CTD Guildline du PIROCEAN. Les mesures granulométriques ont été faites à bord dans les minutes qui suivent leur prélèvement, selon le principe "Coulter" (2,6), avec une sonde de 380  $\mu\text{m}$ , un détecteur et un amplificateur logarithmique couplés avec un analyseur multicanaux 200 points (3, 4, 5, 6). La sonde de 380  $\mu\text{m}$  permet d'analyser la taille des particules dont les dimensions sont comprises entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ . L'utilisation d'une sonde de 100  $\mu\text{m}$  permettrait l'analyse du spectre de tailles des particules de 1 à 40  $\mu\text{m}$ , qui représentent près de 90% de la concentration massique des suspensions marines, mais moins de la moitié de leur flux de sédimentation instantané (3, 4, 5, 6, 7). L'emploi de la sonde de 100  $\mu\text{m}$  en milieu estuarien, très concentré, est délicat, il nécessite soit une dilution de la suspension étudiée dans de l'eau de mer filtrée, soit une électronique à seuil de détection variable, car les spectres mesurés directement sont déformés, effet de minimisation du nombre des particules de fort diamètre par les fortes concentrations en nombre de particules (3.5). De plus, un Coulter équipé d'une sonde de 100  $\mu\text{m}$  était utilisé lors de cette campagne par le laboratoire de Sédimentologie de Rouen.

La sonde de 380  $\mu\text{m}$  permet de mesurer directement le spectre de tailles en évitant les artefacts dus à une trop forte concentration en petites particules et surtout d'analyser les particules responsables de la quasi totalité du flux de sédimentation instantané, cela toutefois au détriment des petites particules inférieures à 10  $\mu\text{m}$  qui portent souvent plus de la moitié de la concentration massique, la concentration ainsi mesurée correspond à 30 à 50% de la concentration totale réelle, ceci est vrai en ce qui concerne les suspensions en haute mer ainsi que pour quelques exemples de vases estuariennes (1). Nous avons donc fait le pari que les particules de moins de 10  $\mu\text{m}$ , dans la baie de Seine, ne portent qu'une part négligeable du flux de sédimentation instantané, comme pour les suspensions connues.

Le logiciel utilisé permet d'estimer la proportion des petites particules non mesurées, dans la mesure où elles suivent la même loi lognormale que les particules prises en compte, les écarts à cette loi peuvent introduire une erreur sur l'estimation pondérale des particules significativement mesurables, c'est-à-dire dont la taille est comprise entre 1 et 150  $\mu\text{m}$ . Le choix de la sonde de 380  $\mu\text{m}$  est donc, a priori, celui qui convient le mieux pour obtenir les spectres de tailles à partir desquels nous tentons un premier essai de quantification des flux de sédimentation des particules estuariennes.

\* Laboratoire de Physique et Chimie Marines, Université Pierre & Marie Curie - Tour 24, 4, Place Jussieu - 75230 Paris Cédex 05.



Les conditions de prélèvement des points localisés sur les différentes radiales, définies pour la mission Elie-83, varient à la fois dans le temps et dans l'espace, elles ne permettent donc pas d'identifier facilement d'éventuelles relations entre les différents paramètres étudiés. Les mesures analysées sont donc essentiellement celles effectuées aux points fixes F3 et F4, situés respectivement à 2,8 miles dans le 315° du cap d'Antifer et à 2,1 miles dans l'ouest du cap de la Hève, ainsi qu'aux stations dérivantes correspondantes, de type lagrangien, situées pour B3 entre F3 et 4 miles au sud-ouest de F3 et pour B4 entre F4 et 4 miles nord-nord-est de F4.

#### RESULTATS GRANULOMETRIQUES

La distribution granulométrique des particules, entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ , étudiées au cours de la campagne Elie-83 est pratiquement toujours très bien décrite par une fonction log-normale, comme cela est visible sur la figure 4. Elle est généralement unimodale pour cette gamme de tailles, parfois bimodale dans la zone de mélange entre l'eau saumâtre et l'eau de mer. Parmi les différents paramètres centraux définissant les spectres de tailles, le diamètre moyen relatif à la distribution des volumes des particules semble le plus représentatif, c'est donc lui qui est utilisé ici. Les valeurs de ce diamètre pour les particules contenues dans l'eau salée ou saumâtre de la baie de Seine sont nettement plus élevées que celles des particules franchement marines (1, 3, 5, 6, 7, 9). Elles varient de 78  $\mu\text{m}$  dans les eaux les plus douces à 33  $\mu\text{m}$  dans les eaux les plus salées. Cela est visible sur les figures 1 et 3, particulièrement aux stations B4 et F4, ainsi que sur les courbes de la figure 4.

Les prélèvements dits "moyens" ont été effectués, quand cela était possible, à l'interface eau saumâtre-eau de mer, en F4 le gradient vertical était très fort, d'où le fait que la salinité du point moyen oscille entre celle de l'eau de surface et celle de l'eau profonde, le diamètre moyen des particules correspondant à ces points est lui toujours analogue à celui de l'eau de surface; cela montre que la forme des spectres granulométriques des particules se propage plus rapidement vers le bas que par un simple mélange turbulent, ce qui est suggéré par leur forte vitesse de chute (fig. 4).

#### ESTIMATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES PARTICULES.

Les paramètres des particules qui intéressent le plus les géochimistes et les sédimentologues sont ceux relatifs aux concentrations massiques, aux flux de sédimentation et au temps de résidence des éléments sous leurs différentes phases; pour y avoir accès à partir des spectres de tailles, il faut connaître la masse volumique des particules étudiées. Cette masse volumique n'est en fait ni mesurée ni bien connue, elle dépend essentiellement de l'origine, terrigène ou biogène des particules, mais on a pu observer que de manière générale elle décroît lorsque la taille des particules augmente (9), cela étant dû à ce que les plus grosses particules sont principalement constituées de matière organique fortement hydratée pouvant contenir divers éléments fins en proportion variable. Dans le cas présent, faute de mesures directes, la masse volumique des particules est estimée décroître selon une loi "puissance" de leur taille (3, 4, 5, 6, 9) rendant au mieux compte en moyenne des mesures de densité effectuées sur des suspensions naturelles. Ces suspensions concernent essentiellement des particules marines (2, 9), certaines mesures ont toutefois été effectuées au voisinage d'embouchures rejetant des suspensions fortement terrigènes, comme le Var et le Congo (3, 5), il apparaît pour ces deux exemples une augmentation de la densité "humide" pouvant atteindre 50%.

A partir de cette évaluation et des paramètres caractéristiques de la fonction log-normale associée, il devient possible de calculer la concentration massique des particules en suspension (concentration humide), leur flux de sédimentation instantané et leur vitesse moyenne de chute. L'erreur introduite par l'estimation arbitraire de la masse volumique des particules ne doit pas,



d'après les deux cas cités, dépasser 50% sur l'évaluation de la concentration massique, puisque pour une classe de taille cette concentration est proportionnelle à cette masse volumique; par contre elle peut être importante sur l'évaluation du flux vertical, puisque l'erreur sur le flux est proportionnelle à l'erreur sur la concentration que multiplie l'erreur sur la différence entre la masse volumique des particules et celle de l'eau. L'approche proposée ici est toutefois, actuellement, la seule qui permette une évaluation directe du flux vertical instantané de sédimentation.

#### CHARGE MASSIQUE, RESULTATS ET DISCUSSION

La concentration massique correspondante à un canal est le nombre de particules comptées dans ce canal, multiplié par leur volume moyen (la largeur d'un canal est de 2% de la taille qui lui correspond) et multiplié par la masse volumique humide afférente à cette taille. La charge totale est obtenue par la sommation des charges des 200 canaux, plus les charges estimées des extrémités non mesurées des spectres. Ces dernières valeurs sont calculées en posant que ces extrémités sont en continuité lognormale avec la partie mesurée du spectre.

Pour l'ensemble des 200 échantillons analysés, comme pour ceux des 4 stations B et F, la concentration estimée varie en moyenne entre 1 à 5 mg/l, avec des valeurs maximales autour de 15 mg/l. Nous avons comparé nos valeurs avec celles obtenues, lors de la même campagne par le laboratoire de sédimentologie de Rouen (7). Ce laboratoire a mesuré les spectres granulométriques des particules dont la taille était comprise entre 1.5 et 40  $\mu\text{m}$ , ainsi que la charge massique par pesée à sec et la turbidité par néphélométrie *in situ*. Les spectres obtenus par cette équipe sont très souvent unimodaux, le pic étant situé au voisinage de 7  $\mu\text{m}$  comme pour les suspensions purement marines, avec une quasi absence de particules au-delà de 15  $\mu\text{m}$  (présentation orale de ces résultats), ceci permet de simplifier la procédure de comparaison en assumant que le recouvrement entre leurs spectres et les nôtres est quasi nul. Pour vérifier que notre impasse sur la mesure des petites particules était justifiable, nous avons pris le parti d'optimiser la charge des particules mesurées par le laboratoire de Rouen en leur affectant une masse volumique moyenne de 1.6 gr/l, qui est une valeur maximale admissible pour des particules humides (1, 2, 3, 5).

La situation idéale eut donc été que la somme des charges estimées à partir des mesures granulométriques des deux laboratoires soit voisine de la charge mesurée par pesée. Cette situation est proche de la réalité uniquement lorsque les charges pondérales sont inférieures à 5 mg/l, mais alors la corrélation entre les deux types de mesures est faible; dans ce cas, les concentrations correspondantes aux familles des petites et des grosses particules sont voisines. Lorsque la charge pondérale dépasse 5-6 mg/l, la concentration en petites particules reste pratiquement invariante, tandis que la concentration en grosses particules tend à suivre la charge pondérale; la charge totale estimée est donc alors en majorité le fait de la famille des grosses particules, tout en étant souvent inférieure à la charge pondérale. Ceci semble indiquer que les fortes charges sont surtout supportées par les particules les plus grosses et que, soit notre instrumentation ne les voit pas toutes, soit leur masse volumique est supérieure à notre estimation à partir des mesures au large. Il faut toutefois être prudent dans l'interprétation de ces comparaisons, d'autant que les mesures de turbidité ne sont en corrélation avec aucun des autres types de mesures.

Il semble que pour ces 4 stations (surtout F4 et B4), apparaisse une certaine périodicité, d'autant que ces stations n'ont pas été effectuées au cours de la même marée, il est toutefois difficile de généraliser cette constatation sur un nombre de périodes aussi restreint. En B4 et F4 l'apparition d'eau douce en surface correspond au moment où les courants portent au large en entraînant l'eau de la Seine (10), ceci est logique pour la station fixe F4, pour la station B4 cela implique soit un très fort coefficient de mélange



horizontal, soit que la trajectoire du bateau n'ait pas été strictement lagrangienne et qu'il soit sorti de la masse d'eau suivie. La charge en particules varie sensiblement dans le temps, elle ne semble pas liée à la salinité mais plutôt à un effet de mélange lié à la marée. Une nette augmentation, spasmodique, de la charge apparaît au voisinage du fond en F4, elle peut être interprétée comme étant une remise en suspension due à la friction du courant sur le fond, fort à ce moment de la marée (10).

#### FLUX DE SEDIMENTATION DES SUSPENSIONS, RESULTATS ET DISCUSSION

Le flux de sédimentation instantané des suspensions analysées est calculé par la même procédure que celle utilisée pour la charge massique, en multipliant ici la concentration de chaque classe de taille par la vitesse de chute lui correspondant et en évaluant le flux des extrémités non mesurées par continuité lognormale. En ce qui concerne la famille des grosses particules, mesurées par notre laboratoire, le flux de sédimentation instantané varie de 0.3 à 4 g/m<sup>2</sup>/heure, il est très fortement lié à la granulométrie, comme cela apparaît clairement fig. 4 où le diamètre moyen portant le flux de sédimentation est compris entre 40 et 150  $\mu$ m. La part du flux de sédimentation afférente aux petites particules peut être négligée, en effet, pour les charges inférieures à 5 mg/l nous avons vu précédemment que les deux familles participent à peu près à parts égales, comme les diamètres moyens de ces familles sont dans un rapport de 4 à 6, le rapport des flux correspondants est largement supérieur à 15; pour les fortes charges, ce rapport est encore beaucoup plus élevé du fait que même la participation massique des petites particules est faible.

L'incertitude sur la connaissance de la masse volumique des particules est particulièrement gênante dans l'évaluation du flux de sédimentation, puisque, comme nous l'avons écrit précédemment, la vitesse de chute est proportionnelle à la différence entre la masse volumique des particules et celle de l'eau de mer. L'estimation faite sur les grosses particules est basée sur l'hypothèse, en général vérifiée, que les particules de plus de 15  $\mu$ m sont très fortement hydratées. Les valeurs des flux ainsi obtenues peuvent être considérées comme minimales; il n'est pas à exclure que les valeurs réelles puissent être nettement plus élevées, peut être d'un facteur 2, voire 3.

La mission Elie 83 a eu lieu en période d'étiage, ce qui correspond aux flux de sédimentation les plus faibles, or l'intégration à l'échelle de l'année des flux instantanés calculés ici, fournit des taux de sédimentation démesurément trop élevés, il semble évident que la majeure partie des particules qui atteignent le fond, soit remise en suspension ultérieurement; en simplifiant, on peut même admettre que pour une durée de quelques cycles de marée, le bilan dépôt/érosion puisse être considéré comme nul. Dans ce cas, à l'échelle de la baie de Seine, le flux de remise en suspension dans la colonne d'eau doit équilibrer le flux de sédimentation. Le flux de sédimentation  $\Phi$  est donc alors nul,  $\Phi = w.C - K_z \cdot (dC/dz) = 0$ , C étant la concentration massique, w étant la vitesse instantanée de chute de l'ensemble des particules, calculée à partir des spectres granulométriques et  $K_z$  le coefficient de diffusion turbulente verticale.  $K_z$  étant grand dans cette zone littorale à forts courants de marée, le gradient  $dC/dz$  nécessaire à l'annulation de  $\Phi$  n'est pas décelable. L'expression du flux donnée ici est eulérienne, mais dans la mesure où la turbulence est un phénomène statistique à moyenne nulle et où  $K_z$  est considéré constant dans la colonne d'eau (6), ce qui n'est en fait jamais vrai au voisinage du fond, on peut admettre que d'un point de vue lagrangien, les particules se comportent comme si elles chutaient dans toute la colonne d'eau avec la vitesse w, puis étaient remises en suspension à partir du fond et homogénéisées dans la masse d'eau.

#### TEMPS DE RESIDENCE DES SUSPENSIONS, DISCUSSION

A partir de la connaissance du flux de sédimentation, de la vitesse w et de la hauteur de la colonne d'eau, on peut estimer le temps de résidence moyen



dans l'eau, entre deux remises en suspension. D'après nos mesures, ce temps serait compris entre 0.5 et 2 jours. Dans le cas où la masse volumique des particules serait plus élevée que celle estimée, cela impliquerait une diminution du temps de résidence. La concentration en petites particules peut ici jouer un rôle non négligeable, l'introduction des valeurs obtenues par le laboratoire de Rouen peut amener un doublement des temps de résidences déduits de nos mesures.

Ces valeurs de temps de résidence peuvent être obtenues de manière analogue à partir du flux virtuel de sédimentation des particules (c'est-à-dire le terme correspondant au seul effet de la vitesse  $w$ , qui, intégré sur un cycle de marée aux points F3 et F4 donnerait un dépôt de l'ordre de  $20 \text{ g/m}^2$ ), l'ordre de grandeur de la hauteur moyenne  $h$  de la colonne d'eau et la concentration moyenne obtenue à partir de la quantité totale de matière en suspension intégrée sur cette colonne, le "standing crop", qui est de l'ordre 80 à  $150 \text{ g}$ . Le temps de résidence s'écrit alors :  $t = h.C/\phi$ .

La capacité qu'ont les particules à servir de vecteur d'échange d'éléments chimiques entre l'eau et le sédiment dépend non seulement de leur temps de résidence dans l'eau, mais aussi de leur temps de résidence dans le sédiment superficiel et du rapport de ces temps, qui est une sorte d'indice de "turn-over". Le temps de résidence dans le sédiment est fonction de la profondeur de remaniement, plus cette profondeur est importante, plus le temps de résidence dans la couche sujette à remise en suspension est élevé. Le meilleur moyen de connaître le temps de résidence des particules dans le sédiment est la mesure de la décroissance dans le sédiment superficiel de radioéléments dont la période est de l'ordre de quelques jours à quelques semaines, comme par exemple le  $^{234}\text{Th}$ . De telles mesures n'ont pas encore été effectuées en Baie de Seine. Dans l'hypothèse où la majeure partie des particules serait remise en suspension dans un cycle de marée, les particules passeraient en moyenne deux fois plus de temps dans l'eau que dans le sédiment, ce rapport s'inverserait dès que l'essentiel du remaniement sédimentaire se produirait sur une durée atteignant la période d'un cycle de vive eau.

#### CONCLUSION.

Les quelques données présentées ici n'ont de valeur que pour les conditions d'étiage de cette mission, qui bien que n'étant pas de saison, sont en moyenne les plus fréquentes. Elles ne prennent pas en compte les effets des crues et des tempêtes qui tout en n'étant que des phénomènes de courte durée, sont peut être dominants en termes de bilans globaux.

Brun-Cottan J.C. (1967).- Influence du marquage radioactif sur les paramètres dynamiques des sédiments pélagiques. Thèse de 3ème cycle.

Brun-cottan J.C. (1971).- Etude de la granulométrie des particules marines. Mesures effectuées avec un compteur Coulter. Cahiers Océanogr., vol 23, n° 2, pp. 193-205.

Brun-Cottan J.C. (1976).- Contribution à l'étude de la granulométrie et de la cinétique des particules marines. Thèse de doctorat d'Etat en sciences physiques, Université Pierre & Marie Curie, 12 février 1976.

Brun-Cottan J.C. (1976).- Stokes settling and dissolution rate model for marine particles as a function of size distribution. Journal of Geophysical Res. vol. 81 n° 9, 20 mars 1976, pp. 1601-1605.

Brun-Cottan J.C. (1977).- Contribution à l'étude de la granulométrie et de la cinétique des particules marines. Journal de Recherches Océanographiques vol. 1, 1976, pp. 41-54.

Brun-Cottan J.C. (1985).- Vertical transport of particles within the Ocean. NATO-ASI on "The role of Air-Sea exchange in geochemical cycling" Bombannes, France 16-27 septembre 1985. Publié par Reidel courant 1986.



- Lafite R., Dupont J.P. & Lamboy M. (1985).- Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en Baie de Seine. Ce volume, N° 11.
- Lambert C., Jehanno C., Silverberg N., Brun-Cottan J.C. & Chesselet R. (1981).- Log-normal distribution of suspended particles in the Ocean. Journal of Marine Research, vol. 39, 1, 1981, pp. 77-98.
- Mac-Cave I.N. (1975).- Vertical flux of particles in the Ocean. Deep Sea Research, 1975, vol. 22, pp. 491-502.
- Salomon J.C. & Le Hir P. (1977).- Etude de l'estuaire de la Seine : modélisation numérique des phénomènes physiques. Laboratoire d'Océanographie Physique, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Bretagne Occidentale.

## ELIE "83"

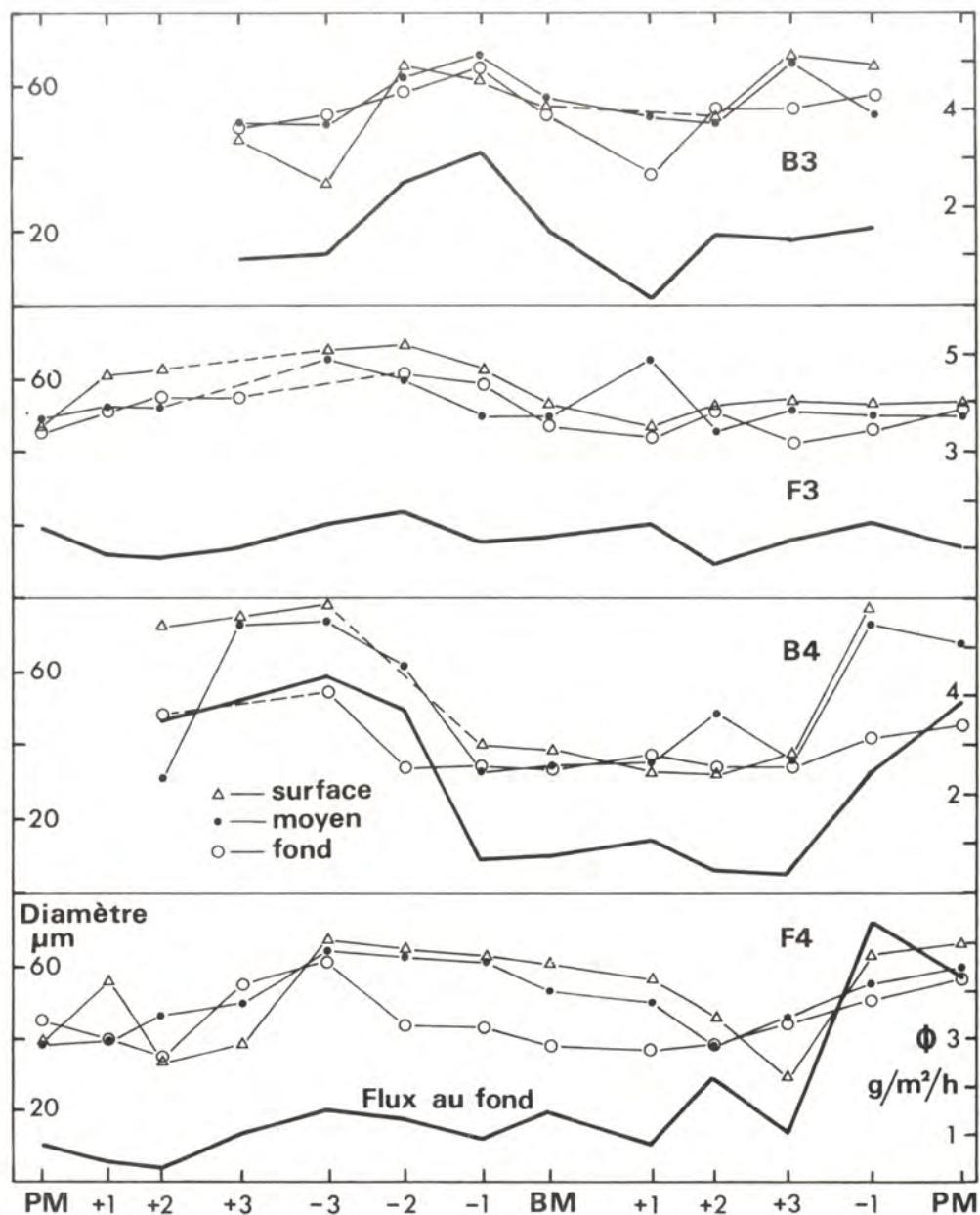
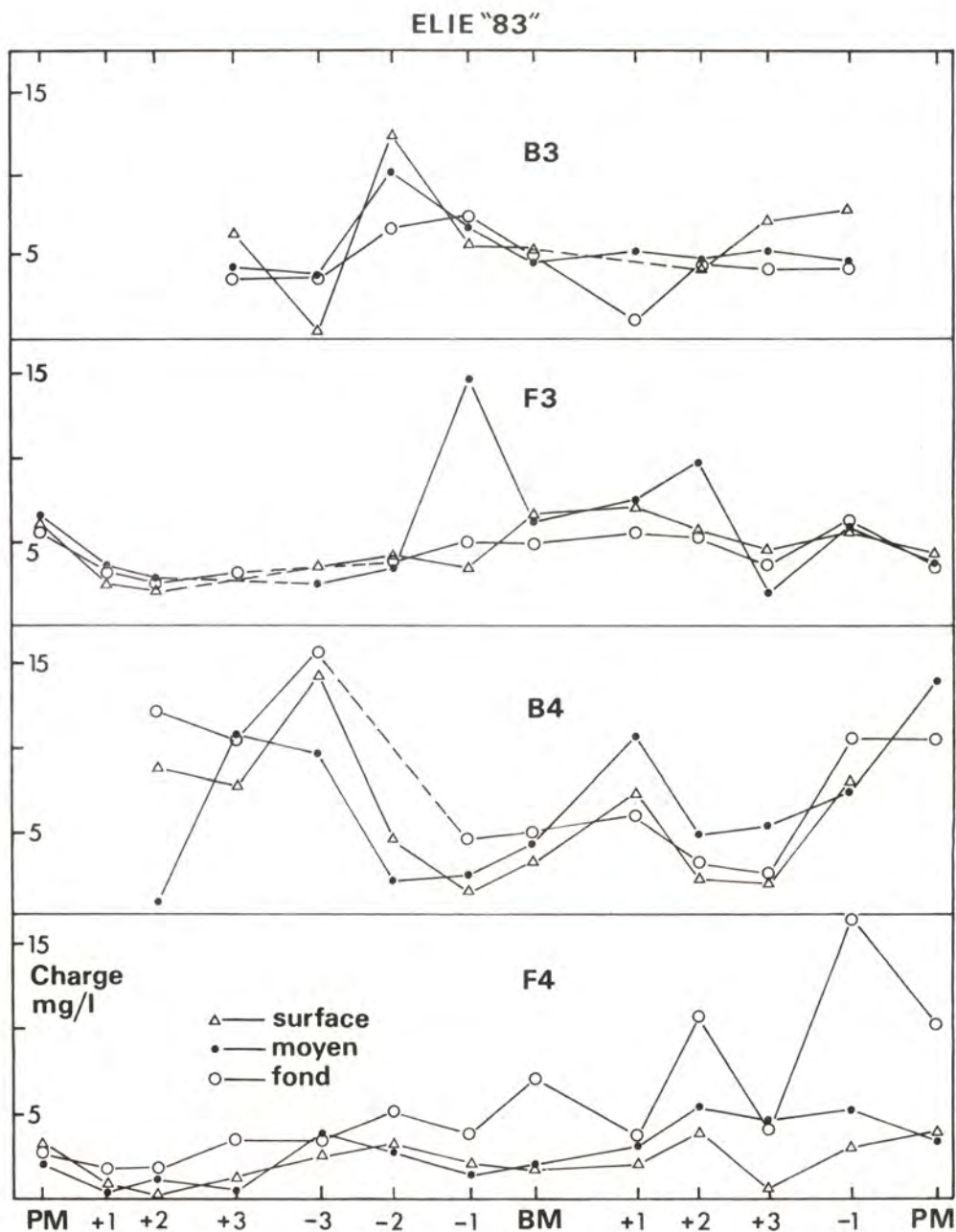


fig.1

Le flux au fond est calculé à partir de l'échantillon le plus près du fond. La quantité de particules déposée par cycle de marée étant calculée par intégration du flux heure par heure et la vitesse moyenne de chute étant de l'ordre de 30 cm/heure, seules les particules contenues dans les derniers mètres sont donc prises en compte. L'effet de la taille sur le flux de sédimentation apparaît ici prépondérant par rapport à celui de la charge.





La charge est calculée à partir des paramètres central  $\mu$  et de dispersion  $\sigma$  de la fonction log-normale associée aux particules et à partir de la loi puissance donnant la masse volumique des particules en fonction de leur taille :  $p = p_0 (1 + \alpha (L/L_0)^{-\beta})$ , où  $\alpha = 0.53$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $L$  est la taille exprimée en cm et  $L_0 = 1$ .

## ELIE "83"

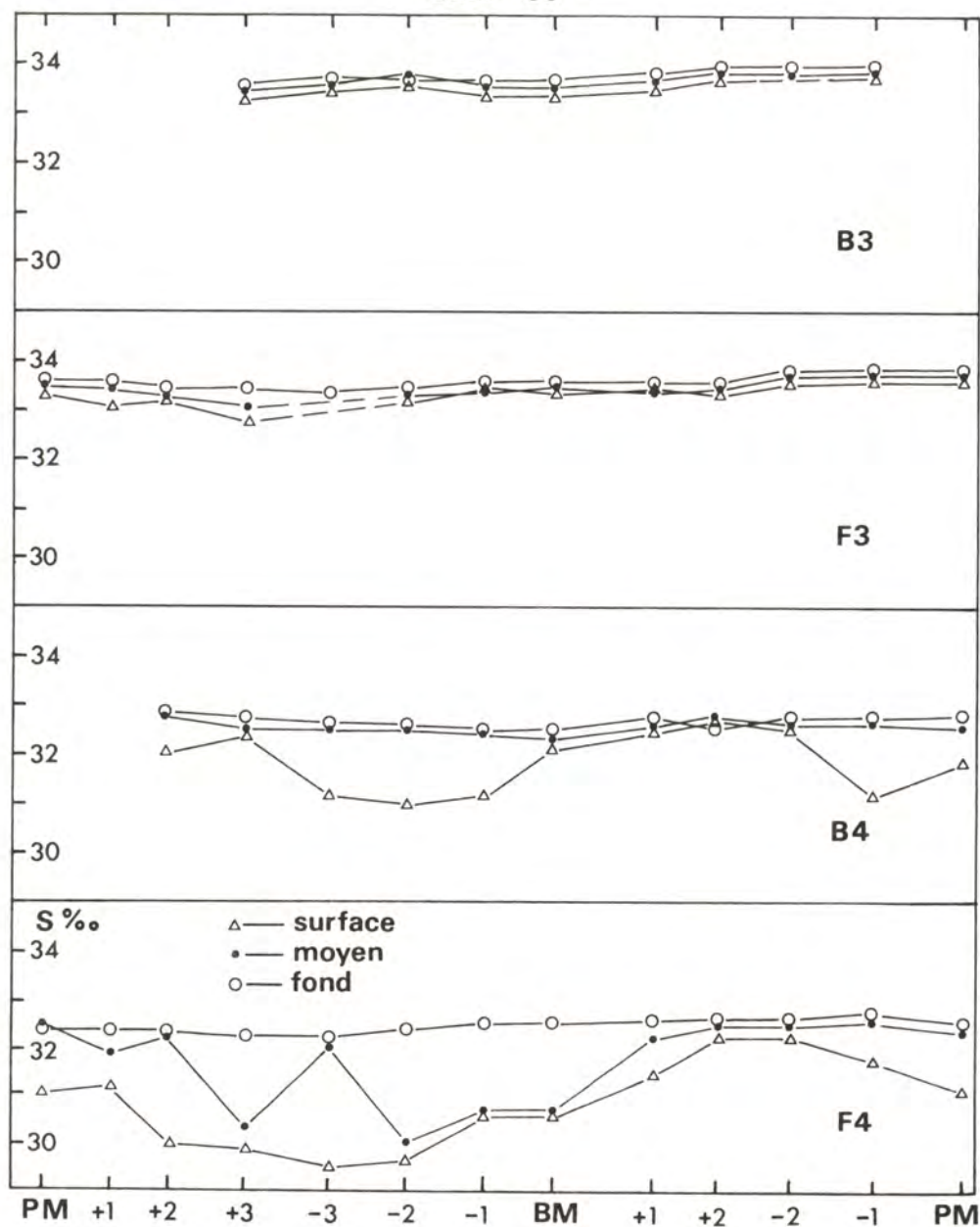


fig. 3

Les paramètres concernant les stations B et F sont donnés en fonction de la marée, les stations ont été effectuées sur des cycles de marée différents. Les stations B3 et F3 sont peu touchées par l'eau de la Seine, dont le débit était faible en cette période d'étiage.



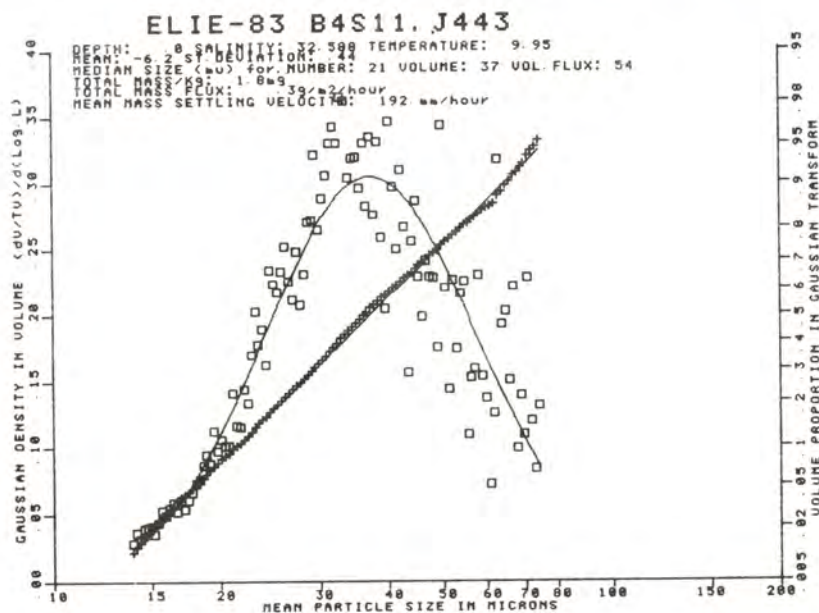
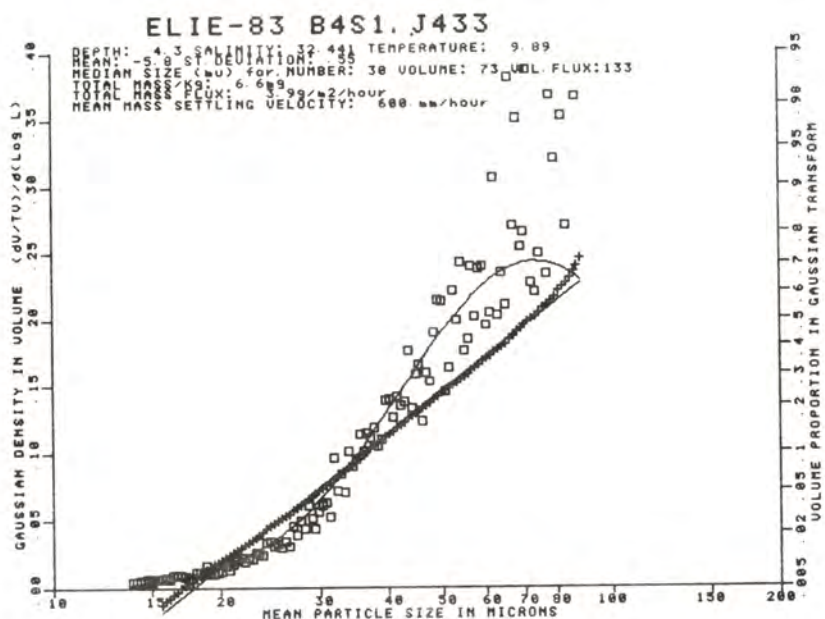


fig. 4

Distribution granulométrique en Baie de Seine: les carrés représentent la densité de probabilité des particules de la taille considérée "L", caractérisées par leur volume  $dV$  (axe de gauche); la courbe passant par ces points est la gaussienne associée à la meilleure loi log-normale les décrivant. Les croix représentent l'intégrale des valeurs précédentes, dont la proportion en volume des particules ayant une taille inférieure à  $L$  (axe de droite), la courbe qui les décrit est la droite de Henri. B4S1 est un échantillon caractéristique de l'eau de surface peu salée, B4S11 représente l'eau typiquement marine.

ETUDE DES TRANSPORTS DE MATIERES EN SUSPENSION EN MANCHE PAR EMPLOI DE L'IMAGERIE CZCS.

THOMAS Y.F.\*

RESUME. L'interprétation d'une série de seize enregistrements du radiomètre Coastal Zone Color Scanner opérant sur le satellite Nimbus-7 a permis de caractériser la distribution des matières en suspension des eaux de surface de la Manche lors de l'année 1981.

L'interprétation des documents cartographiques obtenus après calibration de l'imagerie en termes de réflexion diffuse de l'océan et calcul des teneurs en matières en suspension par emploi d'algorithmes fondés sur des mesures *in situ* a permis les opérations suivantes :

- observation des remises en suspension de matériel alluvial infratidal sous l'effet conjugué des courants de marée et de la houle;
- caractérisation des zones intertidales fournissant par érosion des matériaux à la dérive littorale;
- détermination des limites d'extension du panache d'eaux turbides de l'estuaire de la Seine en fonction des débits de celle-ci;
- calcul sur une année moyenne de l'ordre de grandeur de la charge solide et modélisation de cette dernière en tout point de la zone d'étude;
- estimation des masses et volumes de matériaux en suspension sur l'ensemble de la Manche et tentative d'obtention d'un bilan;
- enfin, différenciation des comportements hydrologiques des bassins occidental et oriental de la Manche.

1.- INTRODUCTION : LE PACKAGE CZCS.

Le 24 octobre 1978, la NASA a placé le satellite Nimbus-7 sur une orbite héliosynchrone dont le noeud ascendant est au midi local. Une partie de la charge scientifique utile de ce dernier inclut un radiomètre expérimental à six capteurs: le Coastal Zone Color Scanner (CZCS), premier "package" spatial uniquement dévolu à la mesure des propriétés optiques des eaux de surface de l'océan. Son principal objectif est de fournir une estimation quantitative de la nature et de la qualité des matériaux minéraux et organiques en suspension dans les eaux de surface des océans et des zones côtières.

Pour ce faire, le capteur CZCS dispose :

- de quatre bandes spectrales situées dans le visible, centrées sur 443 (bleu), 520 (bleu-vert), 550 (vert-jaune) et 670 (rouge) nanomètres, larges de 20 nanomètres, destinées à l'estimation de la qualité des eaux;
- d'une bande proche infra-rouge centrée sur 750 nanomètres, large de 100 nanomètres, utilisable pour la discrimination des masses continentales, nuageuses et océaniques;
- d'une bande infra-rouge thermique centrée sur 11500 nanomètres, large de 2000 nanomètres, réservée pour l'estimation de la température des eaux de surface.

\* Unité de Recherche "Etude des Rivages" associée au C.N.R.S. (U.A. 910), Laboratoire de Géographie de l'Ecole Normale Supérieure, 1, rue Maurice Arnoux, F 92129 MONTROUGE.



Le capteur CZCS a un balayage actif de 78 degrés centré au Nadir et un champ de vue instantané de 0,049 degré, qui produisent à l'altitude nominale de 955 km une résolution au sol de 0,825 km sur une largeur de balayage de 1566 km. Il est muni d'un dispositif qui permet d'incliner le plan de balayage le long de la trace de  $\pm 20$  degrés par pas de 2 degrés afin de minimiser l'influence de la réflexion solaire directe (1).

## 2. METHODE D'ETUDE.

### 2.1. Détermination des réflectances:

La luminance due à la diffusion atmosphérique et à la réflexion spéculaire par la surface de l'océan est d'un ordre de grandeur supérieur à celui du signal rétrodiffusé par l'océan. Aussi, une procédure d'extraction du signal utile a-t-elle été mise en oeuvre. Elle inclut les phases suivantes :

- conversion des valeurs digitales en luminance avec prise en compte de la perte de sensibilité des capteurs et de la dégradation du système de calibration (2);
- transformation des luminances en réflectances absolues corrigées par la diffusion et de la transmission Rayleigh ainsi que de l'absorption par l'ozone atmosphérique (3);
- correction de la diffusion par les aérosols par utilisation de la réflectance à 670 nanomètres (4) après déduction du résidu de réflectance diffuse par emploi d'une procédure itérative fondée sur l'existence d'une relation entre les réflectances diffuses des eaux,  $R(w,i)$ , aux longueurs d'onde  $i = 550$  et  $670$  nanomètres (5):  $R(w,i = 670) = 1,87 \cdot R(w,i = 550)^{1,89}$ .

### 2.2. Détermination de la charge solide:

Les concentrations en matières en suspension, MES, sont estimées sur la base d'une relation entre la teneur en MES et la réflectance diffuse des eaux,  $R(w,i)$ , à la longueur d'onde  $i$ .

La réflectance diffuse des eaux a été déterminée à 4 des 6 longueurs d'onde du radiomètre CZCS (443, 520, 550 et 670 nanomètres). Au-dessus de la surface, par établissement du rapport entre la luminance ascendante mesurée selon un angle de 45 degrés avec la verticale d'une part et l'éclairement descendant d'autre part. La réduction des effets de perturbation dus à la réflectance de surface sur la luminance ascendante a été minimisée par emploi d'un filtre polarisant, permettant ainsi d'assimiler le signal capté à la seule composante diffuse de la réflexion de la masse d'eau. La mesure de la sensibilité relative des capteurs de luminance et d'éclairement a été réalisée en orientant les deux collecteurs de lumière vers une source lumineuse diffuse et isotrope. La précision attendue d'un tel dispositif est de 5% sur l'ordre de grandeur de la réflectance (6).

Parallèlement, des échantillons d'eau étaient prélevés en surface pour détermination de la teneur en MES associée.

L'étude d'une série de 145 spectres de réflexion diffuse acquis en Manche, dans le golfe normand-breton (7), nous a permis de retenir l'expression ci-après pour relier au mieux la teneur en MES, exprimée en  $\text{mg.l}^{-1}$ , aux réflectances diffuses, mesurées au-dessus de la surface, à la longueur d'onde de 550 nanomètres (5):  $\text{MES} = 96,78 \cdot R(w,i = 550)^{1,19}$ .

## 3. RESULTATS.

Une chronique de 16 scènes CZCS, acquises par la station de réception du Department of Electrical Engineering of Electronics de l'Université de Dundee (Grande Bretagne), couvrant la zone géographique  $48^\circ 30' \text{ N.}$  à  $51^\circ \text{ N.}$  et  $3^\circ \text{ W.}$  à  $2^\circ \text{ E.}$  a fait l'objet d'un traitement préliminaire. 7 images, formant une chronique convenablement répartie dans le temps, ont été retenues.

### 3.1. Les conditions d'acquisition de l'imagerie:

Les conditions d'acquisition: numéro d'orbite, date, heure T.U., gain, tilt, angle zénithal solaire, angle zénithal de visée, angle de rétrodiffusion et exposant d'angstrom retenu, ainsi que les conditions hydro-climatologiques: coefficient de marée et heure de la pleine mer du Havre, débit de la Seine à la station de jaugeage de Poses (Seine Maritime), pression atmosphérique, vitesse et direction du vent, état de la mer, visibilité et nébulosité observés au sémaphore climatologique du cap de la Hève (Seine Maritime) sont rappelés ci-après (tableaux 1 et 2).

Une cartographie infographique des teneurs en MES des eaux de surface a été réalisée après rectification géométrique de chaque image. Elle met en relief la variabilité temporelle des MES et montre leurs variations spatiales instantanées (fig. 1 à 7).

### 3.2. La circulation des masses d'eaux:

D'une façon générale, on constate que le positionnement de la zone frontale entre les eaux claires et turbides montre une bonne correspondance avec le schéma courantométrique.

En outre, la distribution des MES révèle - sur certaines images - une structure turbide localisée à l'emplacement d'un tourbillon décelé par modélisation numérique des courants de marée en Manche (8 et 9) ; le "tourbillon de Barfleur". Situé à l'est du Cotentin, ce tourbillon qui se développe dans le sens anticyclonique a un rayon de 40 à 50 km, son centre est placé à environ 25 km de la côte et crée près de Barfleur des courants résiduels extrêmement forts (de l'ordre de  $27 \text{ cm.s}^{-1}$ ). La structure turbide quant à elle s'observe particulièrement bien sur les images du 14 février et du 22 juin 1981 où des turbidités légèrement plus élevées que celles des eaux environnantes contribuent à la mettre en valeur.

Enfin, la répartition des MES sur l'image du 26 mars 1981 souligne remarquablement les différences de comportement de la Manche Ouest d'une part et du bassin oriental de cette dernière d'autre part ; aux eaux claires situées à l'ouest du golfe normand breton font contraste des eaux nettement plus chargées en MES. Les courbes d'isoturbidité épousent dans l'ensemble l'allure des courbes isobathymétriques. On a là un phénomène lié aux variations de possibilité de stratification des eaux (10) ; au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'Est, les profondeurs d'eau deviennent plus faibles et les courants de marée plus forts; la production d'énergie cinétique turbulente par frottement des courants sur le fond devient alors importante. En Manche orientale la couche turbulente intéresse l'ensemble de la masse d'eau (11). Cette homogénéisation verticale des eaux ramène en surface des particules tant minérales qu'organiques, accroît la diffusion optique des eaux et donc leur réflectance. De telles situations ne peuvent être observées en hiver: les eaux des bassins occidental et oriental étant alors homogénéisées sous l'effet des tempêtes, elles ne peuvent l'être davantage en été: les états de mer cléments étant favorables à la décantation du stock de MES; elles existent essentiellement en saison intermédiaire lorsque d'une part un stock important de MES est mobilisable et que d'autre part les échanges de chaleur à l'interface air-mer ont déjà contribué à stratifier les masses d'eaux du bassin occidental.

### 3.3. Les fronts estuariens :

Les lentilles d'eaux à fortes turbidités situées aux débouchés des estuaires de la Seine et des fleuves côtiers sont observables sur les images. Ainsi, par exemple, les effets des variations de débit de la Seine sur le régime turbide des eaux de surface de l'embouchure de la Seine ont pu être appréciés :



| SCENE     | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | numéro |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| ORBITE    | 11488    | 11668    | 12221    | 12525    | 13437    | 14349    | 14387    | numéro |
| DATE      | 01.02.81 | 14.02.81 | 26.03.81 | 17.04.81 | 22.06.81 | 27.08.81 | 06.09.81 | j.m.a  |
| HEURE     | 10.55    | 11.30    | 11.49    | 11.45    | 11.20    | 11.09    | 10.48    | h. mn  |
| GAIN      | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | code   |
| TILT      | 0        | 18       | 0        | 18       | 18       | 18       | 18       | °      |
| ANG. SOL. | 69,3     | 63,8     | 48,0     | 39,6     | 27,8     | 41,5     | 44,9     | °      |
| ANG. VIS. | 22,2     | 30,2     | 33,5     | 41,8     | 28,3     | 24,3     | 30,8     | °      |
| ANG. DIF. | 106,7    | 130,3    | 115,3    | 126,6    | 155,1    | 160,5    | 146,9    | °      |
| EXP. ANG. | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |        |

Tableau 1.- Conditions d'acquisition de l'imagerie.

| SCENE     | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | numéro                          |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------|
| COE.MAR.  | 47     | 51     | 64     | 76     | 70     | 69     | 44     | cent.                           |
| P.M.      | +3.39  | +6.00  | -1.20  | +2.36  | -1.34  | +3.04  | -3.36  | h.mn                            |
| DEBIT     | 1100   | 790    | 780    | 520    | 350    | 290    | 230    | m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> |
| PRE. ATM. | 1027,6 | 1013,4 | 1001,8 | 1008,1 | 1016,0 | 1016,9 | 1011,5 | mb                              |
| VIT. VEN. | 2      | 2      | 13     | 3      | 7      | 1      | 2      | m.s <sup>-1</sup>               |
| DIR. VEN. | 220    | 120    | 280    | 60     | 340    | 260    | 220    | °                               |
| ETAT MER  | 1      | 1      | 3      | 3      | 3      | 1      | 1      | code                            |
| VISIBILI. | 200    | 250    | 1500   | 2000   | 3000   | 200    | 700    | dam                             |
| NEBULOSI. | 0      | 0      | 0      | 1      | 1      | 1      | 1      | code                            |

Tableau 2.- Conditions hydro-climatologiques observables lors de l'acquisition de l'imagerie.

| Point      | 1       | 2       | 3       | 4       | 5                        |
|------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------|
| Latitude   | 48°30'N | 48°30'N | 48°30'N | 48°30'N | 48°30'N                  |
| Longitude  | 0°00'W  | 0°15'W  | 0°30'W  | 0°45'W  | 1°00'W                   |
| 01-02-1981 | >20.0   | >20°0   | >20°0   | >20°0   | >20.0 mg.l <sup>-1</sup> |
| 14-02-1981 | 16.9    | 16.9    | 17.5    | 19.2    | 6.3 mg.l <sup>-1</sup>   |
| 26-03-1981 | 10.8    | 9.6     | 9.5     | 9.6     | 9.1 mg.l <sup>-1</sup>   |
| 17-04-1981 | 6.3     | 6.3     | 6.4     | 6.6     | 6.6 mg.l <sup>-1</sup>   |
| 22-06-1981 | 2.4     | 2.4     | 2.4     | 2.4     | 2.7 mg.l <sup>-1</sup>   |
| 27-08-1981 | 2.8     | 2.4     | 2.4     | 2.2     | 2.3 mg.l <sup>-1</sup>   |
| 06-09-1981 | 3.2     | 3.0     | 3.1     | 3.0     | 3.3 mg.l <sup>-1</sup>   |

Tableau 3.- Teneurs en matières en suspension, exprimées en mg.l<sup>-1</sup>, en cinq points de la baie de Seine pour chacune des 7 images traitées.

- l'image du 1er février 1981 montre une situation de crue, débits de l'ordre de  $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , et des teneurs en MES toujours supérieures à  $13 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- l'image du 17 avril 1981 associe des valeurs moyennes de turbidité, environ 6 à  $7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , et des débits du fleuve de l'ordre de  $550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- enfin, l'image du 6 septembre 1981 montre une situation estivale typique avec un faible débit du fleuve, environ  $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , et des eaux marines aux turbidités faibles et voisines de  $2,5$  à  $3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . Des conditions favorables: faible agitation prolongée des eaux et débits fluviaux voisins de l'étiage ont privilégié les mécanismes de décantation.

On notera qu'il a été possible de déterminer la fonction de variation des teneurs moyennes en MES de début février à début septembre 1981 en chaque point de la zone d'étude. On fournit ici, à titre d'exemple, les résultats obtenus en 5 points de la baie de Seine au droit de l'estuaire (tab. 3).

### 3.4. Les turbidités côtières:

Une frange turbide ourle le littoral: elle est particulièrement développée dans le golfe normand breton en période hivernale (images du 1er et du 14 février, du 26 mars et du 17 avril 1981) où son extension est fortement liée aux houles de tempête; de forts courants de marée l'entretiennent également au large du cap de la Hague et de la pointe de Barfleur en participant à la remise en suspension et au transport des dépôts meubles de ces zones peu profondes. Enfin, les falaises vives qui entaillent les dépôts de marnes d'âge Jurassique du littoral du Calvados ainsi que les séries crayeuses d'âge Crétacé du Pays de Caux (voir tout particulièrement l'image du 6 septembre 1981) sont soumises à des mécanismes d'érosion variés entretenus tant par les eaux de ruissellement que par les vagues de tempête qui alimentent, certes irrégulièrement mais de manière notable, les eaux de surface en MES (12).

## 4. CONCLUSION

L'imagerie CZCS semble confirmer, via l'existence de la structure turbide qui lui est associée, un tourbillon prédit par emploi de modèles numériques et dont l'ordre de grandeur de taille est d'environ  $3$  à  $5 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ .

Par ailleurs, l'exceptionnelle abondance et qualité de l'imagerie disponible - 16 scènes pour la seule année 1981 - nous a autorisé à déterminer l'ordre de grandeur des teneurs en MES sur un cycle annuel en chaque point de la Manche et à calculer une fonction décrivant sa variation (13). Cette description met en relief de très fortes variations temporelles des teneurs en MES sous l'effet conjugué des débits fluviaux, des courants de marée et de la houle.

- 
- (1) NASA. *The nimbus-7 users' guide*. Edited by C.R. Madrid, Management and Technical Services Company, Betsville, Maryland, 1978.
  - (2) Syn (Y.Y.). Corrections for inflight calibration of the coastal zone color scanner. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 1983, p. 829-834.
  - (3) Viollier M., Tanré D. & Deschamps P.Y.- An algorithm for remote sensing of water color from space. *Boundary Layer Meteorology*, 18, 1980, p. 247-267.
  - (4) Gordon H.R.- Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans. *Applied Optics*, 17, 1978, p. 1631-1636.
  - (5) Thomas Y.F.- Télédétection de structures turbides en Manche. *L'Espace Géographique*, 13, 1984, p. 273-276.



- (6) Zbinden R.- *Les suspensions de la baie du Mont St Michel; étude micrograinométrique et radiométrique*. Thèse présentée à l'Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne pour le titre de Docteur de 3ème cycle, 1981, 302 p..
- (7) Pingree R.D. & Maddock L.- Tidal residuals in the English Channel. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 57, p. 339-354.
- (8) Fornerino M.- *Modélisation des courants de marée en Manche*. Thèse présentée à l'Université Scientifique et Médicale et l'Institut Polytechnique de Grenoble pour le titre de Docteur Ingénieur, 267 p..
- (9) Simpson J.H. et Pingree R.D.- Shallow sea fronts produced by tidal stirring. In: *Oceanic fronts in coastal processes*; Bowman M.J. & Esaias W.E., Ed., Berlin, Springer Verlag, 1981, p. 29-42.
- (10) Agoumi A., Enderlé M.J. & Gras R.A.- Modélisation du régime thermique de la Manche. *Oceanologica Acta*, 4, 1983, p. 393-406.
- (11) Dupont J.P., Lafite R. & Lamboy M.- Contribution de l'étude des suspensions à la compréhension des mécanismes hydrosédimentaires estuariens et littoraux en Manche centrale et orientale. In : *La Baie de Seine*, Colloque National du C.N.R.S. organisé par le GRECO "MANCHE", Caen, 24-25 et 26 avril 1985, Vol. 2, p. 85-92.
- (12) Thomas Y.F.- Apport de la télédétection à l'étude des structures turbides: la Manche. In : *Télédétection et gestion des ressources : l'aspect opérationnel*, 5ème Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, Chicoutimi, 22-24 mai 1985, à paraître.

Figure 1.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 6,0 à 15,0  $\text{mg.l}^{-1}$ ; orbite CZCS n° 11488 du 01-02-1981 à 10h 55 mn T.U.

Figure 2.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 3,5 à 11,5  $\text{mg.l}^{-1}$ ; orbite CZCS n° 11668 du 14-02-1981 à 11h 30 mn T.U.

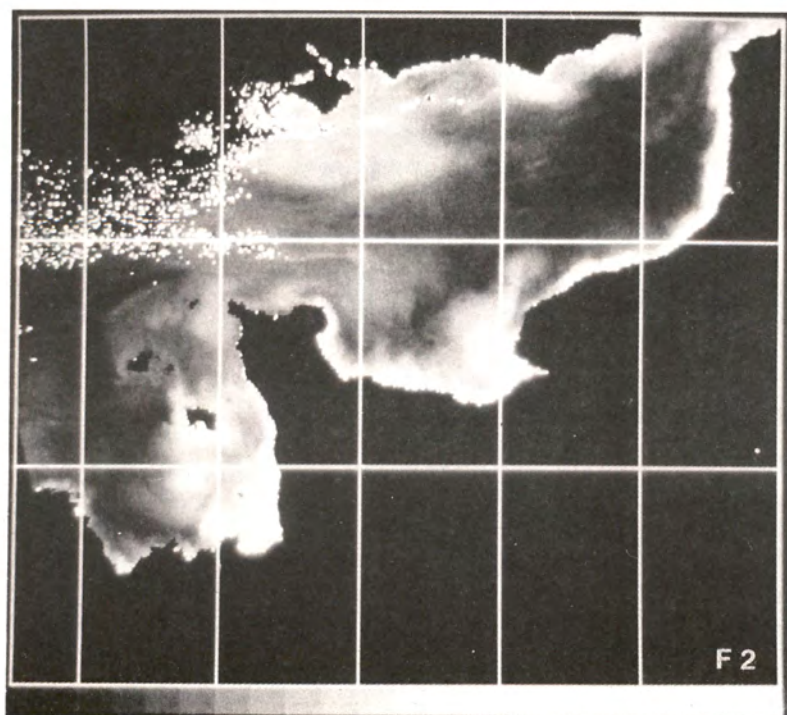
Figure 3.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 1,2 à 7,1  $\text{mg.l}^{-1}$ ; orbite CZCS n° 12221 du 26-03-1981 à 11h 49mn T.U.

Figure 4.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 0,5 à 4,5  $\text{mg.l}^{-1}$ ; orbite CZCS n° 12525 du 17-04-1981 à 11h 45mn T.U.

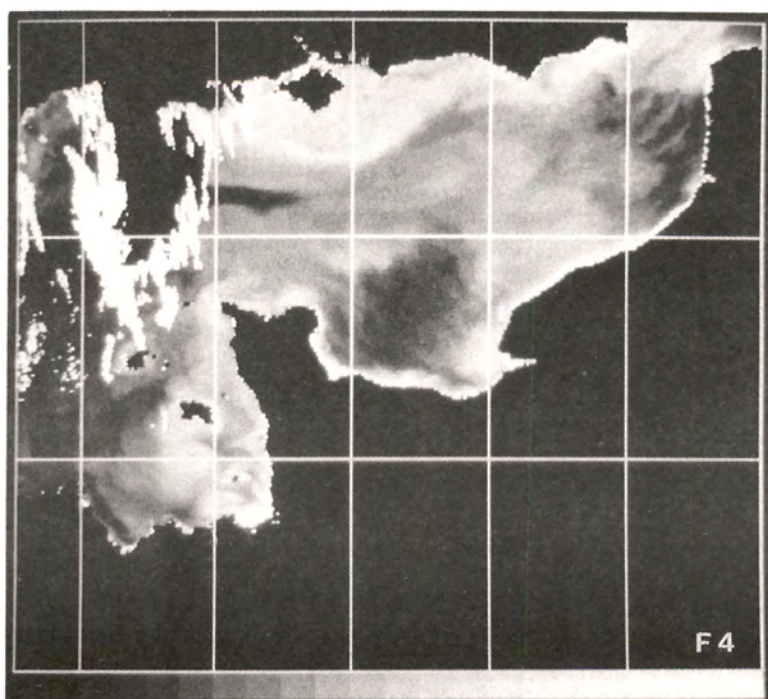
Figure 5.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche; l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 1,0 à 2,1  $\text{mg.l}^{-1}$ ; orbite CZCS n° 13437 du 22-06-1981 à 11h 20mn T.U.

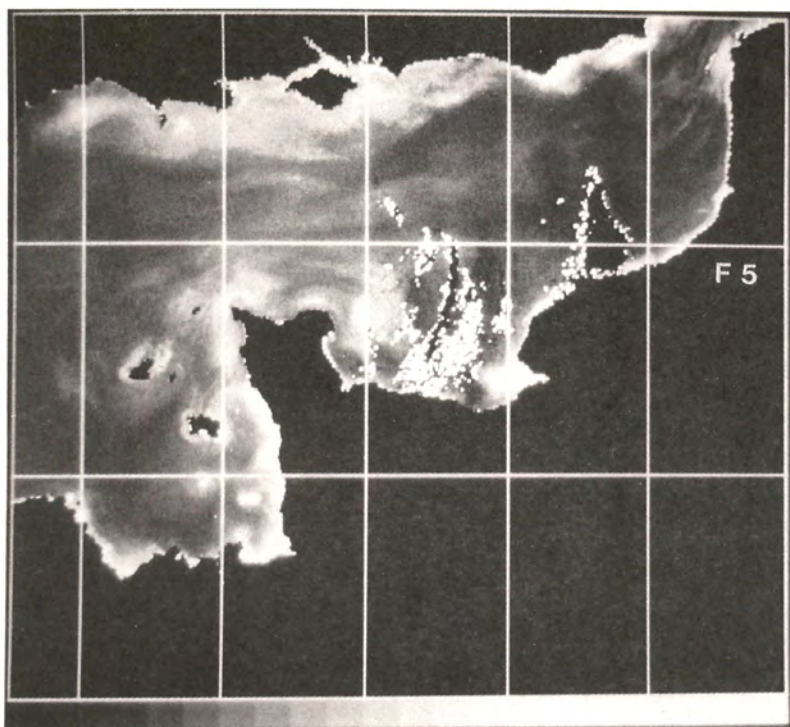
Figure 6.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 0,6 à 2,6  $\text{mg.l}^{-1}$ ; orbite CZCS n° 14349 du 27-08-1981 à 11h 09mn T.U.

Figure 7.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 0,6 à 2,6  $\text{mg.l}^{-1}$ ; orbite CZCS n° 14387 du 06-09-1981 à 10h 48mn T.U.

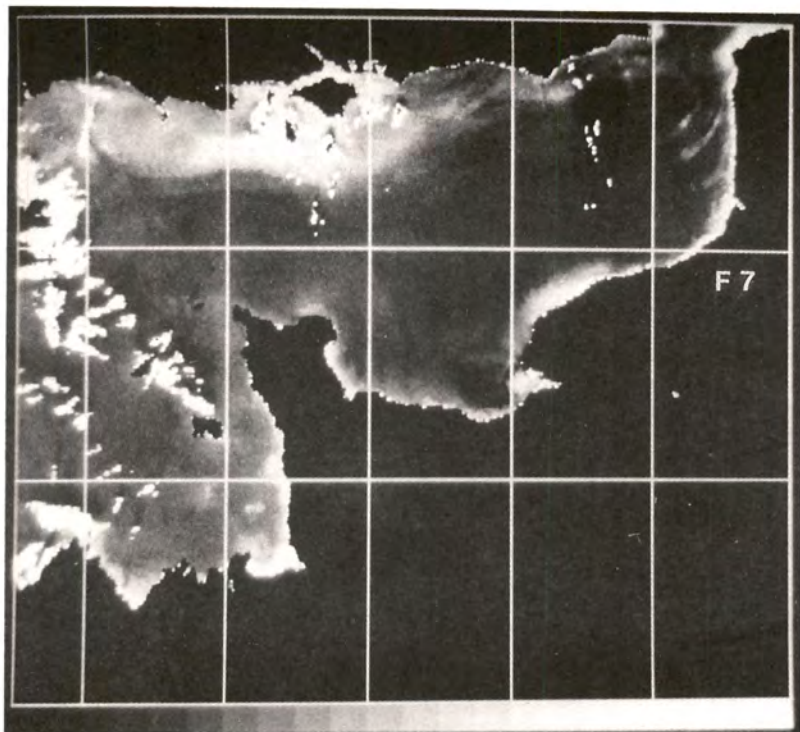












Messieurs Viollier M. du Centre d'Etudes en Océanographie et Biologie Marine (Roscoff), Baloi J.Y. et Lecomte P. du Laboratoire d'Optique Atmosphérique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille (Villeneuve d'Asq) se sont chargés de la mise en oeuvre du radiomètre permettant la réalisation de ce travail, nous les en remercions vivement.

## LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DANS LES ESTUAIRES DE LA BAIE DE SEINE - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT.

AVOINE J.\*, DUBRULLE L.\*, LARSONNEUR C.\*.

La connaissance de la dynamique sédimentaire dans les estuaires permet d'appréhender les processus d'envasement et de colmatage dont ces milieux sont le siège. Elle contribue aussi à la compréhension des caractères physico-chimiques et biologiques de ces environnements complexes qui représentent des zones de transit, de transfert et de stockage. La marée constitue à côté du débit fluvial un paramètre fondamental du fonctionnement estuarien et les nombreux travaux accomplis ces dernières années dans le monde conduisent à distinguer les estuaires macrotidaux et microtidaux. Dans ces derniers, bien représentés sur la côte est des Etats-Unis, l'influence de la marée est faible, la stratification des eaux est très marquée et les écoulements de densité contrôlent la circulation résiduelle orientée vers l'aval en surface et vers l'amont au fond. Dans les estuaires macrotidaux la marée joue un rôle essentiel, d'une part en créant de forts remaniements des fonds, d'autre part en provoquant des concentrations de charges turbides indépendantes de la circulation de densité.

Avec un marnage qui varie de 3m à 7,50m la Baie de Seine est un milieu macrotidal où débouchent plusieurs estuaires, les principaux étant celui de la Seine, celui de l'Orne et le système double de la baie des Veys (voir carte de situation au début du volume). Les nombreux travaux dont ils ont été l'objet récemment (Avoine, 1981, 1982; Avoine *et al.*, 1981; Boust, 1981; Dubrulle et Larssonneur, 1984, notamment) conduisent à présenter ici une synthèse du fonctionnement estuarien en Baie de Seine. Après avoir dégagé les traits essentiels de la dynamique sédimentaire, nous examinerons quelques problèmes liés à l'aménagement et à la sauvegarde de l'environnement.

### 1.- LA DYNAMIQUE DES EAUX.

L'onde sinusoïdale de marée qui se propage en Baie de Seine se déforme sur les petits fonds par frottement de telle sorte que la courbe devient asymétrique; la durée du montant est alors plus courte que celle du perdant. En outre, une stabilisation du niveau marin se produit pendant 2h à 2h30 autour de la pleine mer. C'est en vives-eaux que ces caractéristiques apparaissent le mieux. Au cours de la propagation de l'onde de marée dans les estuaires, la déformation acquise dans la baie s'accroît fortement vers l'amont (fig. 1). L'élévation rapide du niveau de l'eau dans les chenaux est responsable du mascaret encore bien visible dans la baie des Veys mais très atténué dans les autres estuaires du fait des aménagements. Parallèlement, le rétrécissement des sections vers l'amont, la réflexion de l'onde sur les berges et le frottement sur le fond modifient conjointement l'amplitude de la marée. Celle-ci augmente légèrement dans la partie aval des estuaires avant de décroître progressivement vers l'intérieur (fig. 1A). Selon la terminologie de Le Floch (1961) il s'agit donc d'estuaires hypersynchrones. Il faut encore noter que sur l'Orne et les rivières de la baie des Veys, des aménagements transversaux ont fait disparaître la dynamique naturelle de l'estuaire amont.

\* Laboratoire de Géologie marine, Université de Caen, 14032 Caen Cedex.



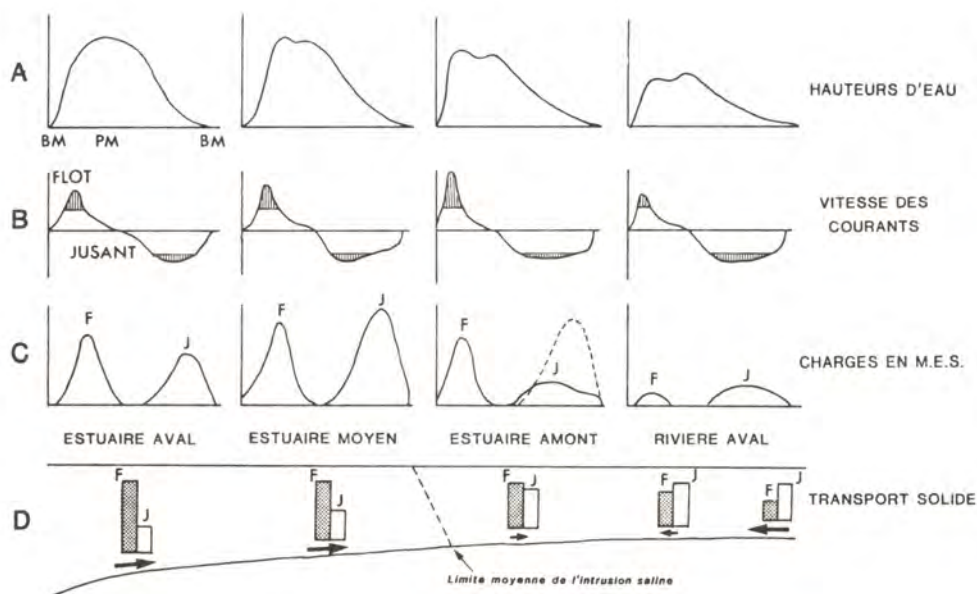


Fig. 1 - Evolution schématique des principaux paramètres physiques dans les estuaires macrotidaux de la baie de Seine - Conditions de vives-eaux et d'étiage. (F: flot; J: jusant).

L'asymétrie de la courbe de marée s'accompagne d'une asymétrie des courbes de vitesse de courant (fig. 1B). La réduction importante de la durée du montant induit une augmentation rapide des courants de flot après la basse mer. Par contre, le jusant s'établit progressivement après la longue étaie de pleine mer. D'aval en amont on relève d'abord une amplification des courants de flot puis leur diminution graduelle (fig. 1B). Par ailleurs, la figure 1 montre que les courants de flot atteignent leur maximum pour des hauteurs d'eau plus élevées que celles correspondant aux maxima de courants de jusant. Ces derniers se manifestent donc essentiellement dans les chenaux principaux alors qu'au flot de rapides courants s'exercent dans les chenaux secondaires, sur leurs berges et les bancs adjacents. Ces caractéristiques également observées dans la mer des Wadden (Postma, 1961) sont particulièrement nettes dans l'estuaire de la Seine où l'effet de chasse du jusant a été amplifié artificiellement par des digues (Avoine *et al.*, 1981). Il faut ajouter que les cycles lunaires, vives-eaux-mortes-eaux et les variations du débit fluvial, altèrent le schéma général de fonctionnement décrit ci-dessus et applicable à une situation d'étiage et de vives-eaux. Lorsque l'amplitude décroît, l'asymétrie de l'onde de marée s'estompe et les vitesses des courants de flot et de jusant deviennent comparables pour des valeurs plus faibles. Par ailleurs, l'augmentation du courant des rivières lors des crues, accroît l'effet du jusant et réduit celui du flot.

La salinité des eaux estuariennes varie longitudinalement et verticalement en fonction de la marée et du débit fluvial. Comme l'ont montré Allen *et al.*, (1980, 1982) pour différents estuaires macrotidaux, la marée, par la turbulence qu'elle induit, exerce un rôle essentiel sur le mélange eaux douces-eaux salées. Aussi, ce mélange s'atténue-t-il en mortes-eaux par faibles courants; il en résulte alors une stratification beaucoup plus marquée qu'en vives-eaux. De plus, les gradients de salinité se réduisent en période d'étiage, lorsque les eaux marines pénètrent en masse dans les estuaires, tandis qu'en crue se forme un coin salé, particulièrement bien développé en mortes-eaux. Durant les périodes de fort débit, en raison du va-et-vient de l'intrusion saline au cours de la marée, il faut également souligner que les estuaires se trouvent entièrement en eau douce à basse mer.

Le calcul de la circulation résiduelle déduite des mesures eulériennes de courants dans les chenaux des trois estuaires, et d'un modèle numérique pour la Seine (Salomon, 1981), fait apparaître d'une manière générale un mouvement résultant vers l'aval, à toutes profondeurs. Par contre, une circulation étagée avec des courants résiduels vers l'amont, près du fond, et vers l'aval, en surface, prend place dans les embouchures. Le point nodal de circulation des eaux se situe donc la plupart du temps à ce niveau voire même plus au large, c'est-à-dire très en aval de la limite de l'intrusion saline. Ce schéma ne se rencontre pas dans les estuaires microtidaux où la circulation résiduelle étagée induite par les courants de densité, s'observe dans toute l'étendue de l'intrusion saline (Officer, 1975). Cette différence fondamentale est liée au régime macrotidal et au fait que les courants de jusant sont concentrés dans le chenal principal. Au flot, nous avons vu que le maximum de courant s'établit à un niveau d'eau plus élevé de telle sorte que la circulation résiduelle s'oriente vers l'amont, au-dessus des berges. Ce schéma simple se complique dans l'embouchure de la Seine qui comporte plusieurs chenaux. Là, le chenal central de navigation prolongeant le cours du fleuve constitue un chenal de jusant avec circulation résiduelle orientée vers l'aval, tandis que les chenaux adjacents, au nord et au sud, forment des chenaux de flot à résultante amont. Cette ambivalence prononcée a été largement amplifiée par les travaux d'endiguage (Avoine *et al.*, 1981). La circulation résiduelle dans les estuaires macrotidaux comme ceux de la baie de Seine présente donc des caractères plus complexes que ceux décrits en régime microtidal, d'autant plus que le stockage et le relargage d'eau en cours des cycles lunaires successifs de vives-eaux et de mortes-eaux pourrait, selon Allen *et al.* (1980, 1982), être à l'origine de mouvements résiduels importants.

## 2.- LA DYNAMIQUE DES SEDIMENTS EN SUSPENSION

Les études réalisées dans les trois estuaires considérés mettent clairement en évidence le rôle fondamental de la marée sur la dynamique sédimentaire, notamment sur la remise en suspension des dépôts et sur le piégeage des matières en suspension (M.E.S.). Plusieurs échelles de temps sont à considérer : les cycles semi-diurnes, les cycles lunaires vives-eaux - mortes-eaux et les cycles saisonniers liés aux variations du débit fluvial.

### 2.1 - Dynamique sédimentaire au cours d'un cycle de marée

Une étroite corrélation peut être mise en évidence entre les variations de la vitesse des courants de marée et la charge en M.E.S. près du fond (fig. 1B et 1C). Schématiquement, le maximum de M.E.S. se rencontre lors des pointes de courant de flot et de jusant, lorsque les vitesses mesurées à 1m du fond ( $U_{100}$ ) dépassent la vitesse critique d'érosion des sédiments ( $U_c$ ). La turbidité augmente progressivement tant que  $U_{100} > U_c$  et décroît lorsque  $U_{100} < U_c$ .  $U_c$  varie avec la nature granulométrique des fonds. Dans le cas de la Seine qui a fait l'objet d'études détaillées, la fraction silto-argileuse est remise en suspension lorsque  $U_{100}$  dépasse 60 cm/s. L'érosion maximum se produit lorsque  $U_{100}$  atteint 100 cm/s ce qui correspond à la remise en suspension des sables fins largement dominants dans cet estuaire (Avoine, 1981).

Dans le détail, le rapport entre la charge en M.E.S. et la vitesse des courants n'est pas linéaire d'amont en aval des estuaires (fig. 1C). A l'aval, la dominance des courants de flot s'accompagne de charges turbides plus importantes au montant qu'au perdant ; la relation est alors respectée. Dans la partie moyenne, l'augmentation des vitesses de flot due au raidissement de l'onde de marée provoque de fortes remises en suspension mais les charges relevées au jusant sont supérieures malgré des courants de moindre vitesse. Dans cette portion de l'estuaire, l'addition d'une seconde source de M.E.S. provenant de remaniements amont perturbe la relation turbidité-vitesse de courants. Dans la partie amont, la



courte durée du flot, malgré des vitesses encore amplifiées, entraîne des turbidités moindres. Au jusant, les observations varient selon les estuaires. Avec une tranche d'eau relativement élevée et de faibles vitesses comme dans le cas de la Seine, les teneurs en M.E.S. sont réduites. Par contre, pour l'Orne et la baie des Veys, l'étroitesse de l'estuaire amont engendre, sous faible tranche d'eau, des turbidités importantes, indépendantes de la vitesse des courants. Au-delà de l'intrusion saline, dans la partie fluviale, vitesses de courants et charges en M.E.S. décroissent parallèlement.

La remise en suspension des sédiments par les courants de marée est à l'origine d'un bouchon vaseux, très turbide, d'autant mieux développé que les vitesses sont élevées. La figure 2A représente l'évolution schématique de ce bouchon vaseux au cours d'un cycle de marée de vives-eaux. Il se produit des phénomènes de gonflement et de dégonflement en relation avec la fluctuation des vitesses de courant.

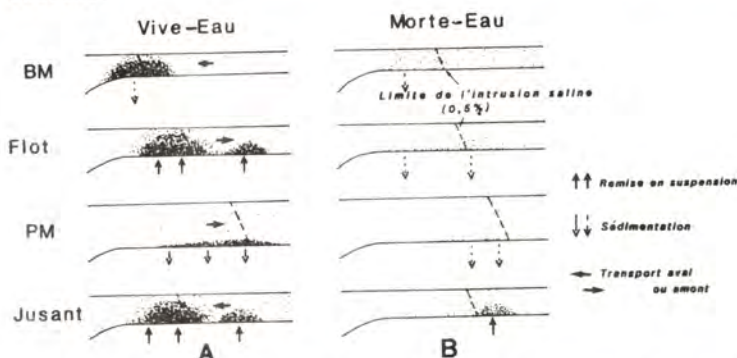


Fig. 2.- Evolution schématique du bouchon vaseux au cours de la marée, en vives-eaux et en mortes-eaux dans les estuaires macrotidaux de la Baie de Seine.

De fortes remises en suspension ont lieu au cours du flot et du jusant, parfois très en amont de l'intrusion saline comme cela a également été observé dans d'autres estuaires (Allen *et al.*, 1977; Gallenne, 1974; Vale & Sundby, 1984). Une grande partie des suspensions se décante durant l'étale de pleine mer de telle sorte que le bouchon vaseux disparaît presque totalement; ce phénomène montre bien qu'il est étroitement lié aux remises en suspension. Au cours du cycle semi-diurne, la masse totale de M.E.S. varie dans un rapport de 1 à 10 environ entre la pleine mer et le maximum de turbidité au cours du flot. Cette évolution cyclique, calquée sur celle des courants, s'accompagne d'un mouvement de va-et-vient au cours de la marée, de 10 à 20 km selon la dimension des estuaires considérés.

Ce modèle d'évolution du bouchon vaseux est largement représenté dans les estuaires macrotidaux. Des schémas comparables ont en effet été décrits dans d'autres estuaires français (Allen, 1972; Allen *et al.*, 1977, 1980, 1982; Beslier, 1982; Gallenne, 1974), en Grande-Bretagne, dans la Severn (Kirby & Parker, 1983) et le Tay (Dobereiner & Mc Manus, 1983), au Portugal dans le Tage (Vale et Sundby, 1984)... Compte tenu de la grande variabilité de la masse de sédiments en suspension au cours de la marée dans les estuaires macrotidaux, ces derniers diffèrent fondamentalement des environnements microtidaux où la masse du bouchon vaseux n'évolue presque pas à cette échelle de temps, sauf près du fond où se produisent des remises en suspension locales (Schubel, 1968, 1969). La turbulence restant faible, les eaux plus chargées du fond ne se mélangent pas avec la tranche d'eau supérieure. C'est tout différent en régime macrotidal où apparaissent des profils verticaux de turbidité homogènes en période de forts courants (Avoine, 1981; Kirby et Parker, 1983).

En étiage, lorsque l'influence des marées est maximum, l'évaluation des charges solides transportées au cours du flot et du jusant montre une nette prédominance du flot dans la partie aval et moyenne des estuaires ce qui entraîne une remontée des sédiments fins vers l'amont, au-delà de la limite de l'intrusion saline (fig. 1D). Ce résultat est une conséquence de l'asymétrie de l'onde de marée et du niveau élevé du plan d'eau lorsque s'établissent les courants maxima de flot. Un type de transport analogue, dû à l'asymétrie flot-jusant, a déjà été décrit par Postma (1961) en mer des Wadden et Groën (1967) en a donné une description théorique. Il se manifeste également en régime microtidal, notamment dans les marais de Floride, où une asymétrie en faveur de jusant induit au contraire une résultante de transport vers l'aval (Boon, 1974, 1975). D'autres facteurs combinés à la marée, telle la morphologie, interviennent également, mais d'une manière générale, dans les estuaires macrotidaux, la tendance est au transport résultant vers l'amont. Allen *et al.* (1980, 1982) voient dans cette caractéristique une explication possible du piégeage des sédiments fins et du maintien du bouchon vaseux dans le domaine estuarien. Ce mécanisme oppose les environnements macrotidaux aux estuaires microtidaux dans lesquels la formation du bouchon vaseux est principalement liée à la concentration des particules en suspension au niveau du point nodal de la circulation résiduelle (Nichols et Poor, 1967).

## 2.2 - Influence des cycles lunaires vives-eaux-mortes-eaux

Les cycles vives-eaux-mortes-eaux se traduisent par des variations d'amplitude de 3 à 8m et des variations parallèles de la vitesse des courants de marée qui se reflètent sur la capacité d'érosion des sédiments. Ainsi, en mortes-eaux, la charge maximale en M.E.S. peut-elle être 20 fois moins importante qu'en vive-eaux (fig. 2B). Le bouchon vaseux, alors peu développé et peu évolutif, est comparable à celui rencontré dans les estuaires mésotidaux (Vale et Sundby, 1984). Ces variations cycliques de la masse de sédiments en suspension ne se rencontrent pas en régime microtidal.

Les cycles lunaires sont à l'origine de cycles sédimentaires importants en régime macrotidal. Les études entreprises, notamment sur la Gironde (Allen, 1972; Allen *et al.*, 1975, 1977) et sur la Loire (Gallenne, 1974), ont conduit leurs auteurs à mettre en évidence la formation de crème de vase durant les mortes-eaux, période de sédimentation, et son érosion au cours des vives-eaux. Cependant, des lentilles turbides semblables à celles décrites dans ces estuaires n'ont pas été observées dans ceux de la Baie de Seine. Il semble que la nature dans l'ensemble plus sableuse des sédiments en soit la cause. Ce matériel relativement grossier, introduit par la mer, est largement prédominant sur les apports fluviaux fins de telle sorte qu'il se crée un bouchon silto-sableux. C'est là une différence notable entre les estuaires de la Baie de Seine et la plupart des autres estuaires macrotidaux connus.

## 2.3 - Influence des variations du débit fluvial

Les variations de débit fluvial jouent un rôle important dans la dynamique sédimentaire estuarienne, en particulier sur la position, l'extension et la concentration du bouchon vaseux (fig. 3A). En étiage, ce dernier reste cantonné dans les estuaires et la masse de sédiments en suspension est maximale.



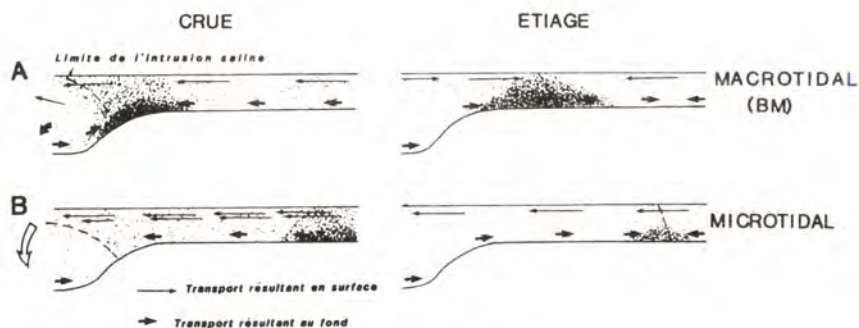


Fig. 3 - Extension schématique du bouchon vaseux, en étiage et en crue, en régimes macrotidal et microtidal.

Lorsque le débit fluvial augmente, le bouchon vaseux est déplacé vers l'aval et partiellement expulsé en mer ; la quantité de M.E.S. stockée en estuaire décroît donc fortement. En termes de charges solides, les courants de jusant sont alors prédominants sur les courants de flot et leur résultante s'oriente vers l'aval dans tout l'estuaire.

Ce schéma s'oppose à celui rencontré dans les environnements microtidaux (fig. 3B), où le bouchon vaseux est d'autant mieux développé que le débit fluvial est élevé (Schubel, 1974 ; Nichols, 1977). En étiage, le bouchon vaseux, très peu turbide, est situé en amont, à la limite de l'intrusion saline, dans la zone du point nodal de circulation. Lors des crues, le système est fortement déséquilibré. Les apports solides et l'érosion des fonds due aux courants de jusant sont fortement amplifiés par le débit élevé de la rivière, sont à l'origine de la formation d'un bouchon vaseux très turbide qui se maintient dans la même zone que précédemment c'est-à-dire très en amont de l'intrusion saline rejetée alors à l'aval. Selon les études de Schubel (1974) et Nichols (1977), le milieu retrouve ensuite son équilibre en 4 à 8 semaines.

### 3 - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

Les processus sédimentaires qui viennent d'être décrits ont de nombreuses répercussions sur l'environnement estuarien et les abords marins proches. Les principaux problèmes qui se présentent en Baie de Seine concernent la maintenance des chenaux de navigation, les envasements intertidaux, subtidaux et portuaires, les problèmes de pollution.

A l'intérieur des estuaires, les mouvements sédimentaires à l'échelle d'une marée sont considérables. La remise en suspension maximale lors du flot équivaut en effet à une érosion de 1cm sur l'ensemble du domaine fluviomarin. C'est, nous l'avons vu, le bouchon vaseux qui contrôle la sédimentation, tout particulièrement dans les ports et les chenaux.

Dans le cas de la Seine par exemple, des envasements importants se produisent devant les écluses du canal de Tancarville en période d'étiage, lorsque le bouchon vaseux occupe la partie amont de l'estuaire, à 25 km de l'embouchure environ. L'envasement du port de Honfleur est un phénomène plus constant dû à sa position aval, dans la zone de balancement du bouchon vaseux. La difficulté de maintenir une souille en amont de Honfleur a fait renaître un vieil adage : plus on drague profond, plus il y a sédimentation. En l'occurrence, des expériences mettant en oeuvre des traceurs radioactifs ont confirmé la remise en suspension

de sédiments sableux situés à l'aval de la souille et leur transfert vers l'amont, induisant le comblement observé (Avoine *et al.*, 1984b). D'ailleurs la tendance au colmatage est générale dans les estuaires de la Baie de Seine fortement alimentés à l'aval par des apports marins sous l'action des houles et des courants de flot très actifs en période d'étiage. On évalue notamment à plus de 4 millions de m<sup>3</sup> les dépôts annuels dans l'estuaire de la Seine, la contribution fluviale ne représentant qu'à peine le 1/6 de cet important volume. Dans le cadre de leur évolution postglaciaire, les estuaires considérés sont aujourd'hui séniles, la tendance est à la formation d'un chenal étroit, peu profond, cheminant entre des zones hautes, progressivement hors d'eau. Malgré une accentuation de cet évolution par endigages successifs, la Seine apparaît comme le moins évolué des systèmes estuariens étudiés en offrant encore des surfaces naturelles propices à l'accumulation d'importants volumes de sédiments. A l'opposé, le colmatage estuarien est presque total en baie des Veys.

La sédimentation vaseuse qui s'accompagne de pollutions chimiques ou organiques est étroitement liée aux variations du débit fluvial. En crue, le bouchon vaseux est partiellement expulsé hors des estuaires, du matériel sédimentaire est évacué en mer. Au contraire en étiage, les transports prédominants s'effectuent vers l'amont. L'utilisation d'oligoéléments métalliques comme traceurs permet de caractériser ces mouvements ; l'estuaire de l'Orne en donne un bon exemple en considérant le nickel comme marqueur des suspensions (fig. 4).

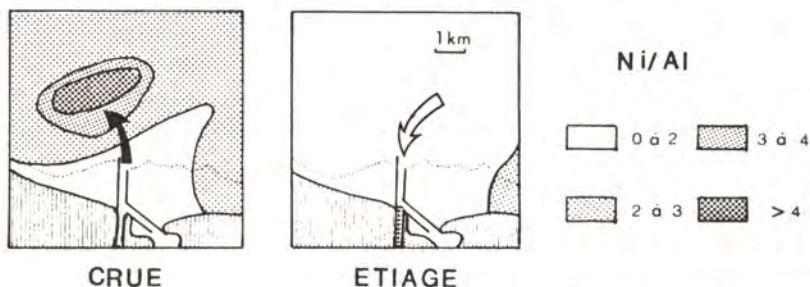


Fig. 4 - Répartition des teneurs en nickel normalisées à l'aluminium dans les sédiments de l'embouchure de l'Orne, en crue et en étiage.

Il apparaît que durant les crues les sédiments s'accumulent dans l'avant-port de Caen-Ouistreham, dans le chenal et dans le domaine marin proche. Pendant les longs étiages, le matériel déposé devant l'embouchure est progressivement remobilisé, mélangé, pour une partie dispersé en Baie de Seine, une autre partie étant réintroduite dans l'estuaire accompagnée de particules marquées par des radionucléides industriels provenant du large (Auffret *et al.*, ce colloque). Dans l'estuaire de la Seine, des envasements comparables se produisent dans le port du Havre et dans l'embouchure (Avoine et Crevel, ce colloque). Quant à ceux qui se manifestent en baie des Veys, ils ont un impact important sur la qualité sanitaire des parcs à huîtres de la région de Grandcamp (Dubrulle et Larssonneur, 1984); ils sont schématisés sur la figure 5. En crue, des sédiments vecteurs de polluants sont transportés en mer avec le jusant, puis partiellement réintroduits dans la baie avec le flot. Par décantation autour de la pleine mer, des dépôts s'effect-



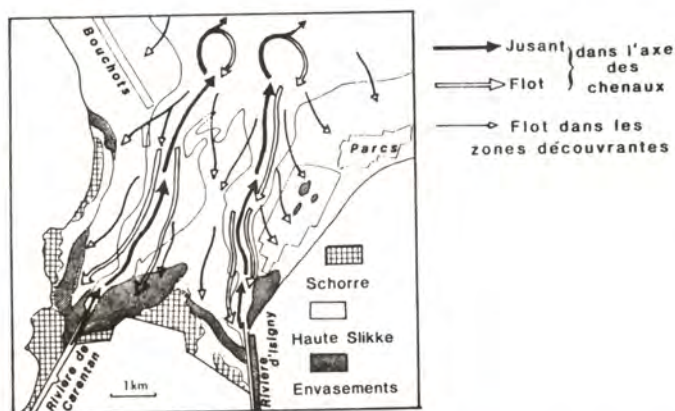


Fig. 5 -

Représentation schématique du fonctionnement hydrosédimentaire de la baie des Veys.

tuent dans les zones abritées, en particulier sur les parcs à huîtres les plus internes. Sous l'influence des courants de marée et des houles, le dé-ensablement se produit en périodes de faibles débits et le matériel fin est en partie repoussé vers l'amont dans les chenaux et sur les slikkes adjacentes; il pourra être repris par la crue suivante. Il faut souligner que dans cette baie, les importants travaux de poldérisation ont presque entièrement fait disparaître les vasières susceptibles de recevoir les charges turbides et de les stocker. Le double système estuarien est pratiquement réduit aux chenaux aménagés des rivières de telle sorte que son influence s'est accrue sur le proche horizon marin.

Un dernier problème important sur le plan pratique concerne le temps de résidence de l'eau et des suspensions dans les estuaires. Compte tenu du degré de colmatage des estuaires, des endiguements et de la dynamique du bouchon vaseux en fonction des variations du débit fluvial, les temps de résidence sont très courts en période de crue, de l'ordre de quelques heures à quelques jours, alors qu'ils atteignent quelques semaines à plusieurs mois en étiage. Ces données sont à prendre en considération dans l'établissement des bilans massiques de contaminants. Il convient également d'évoquer le rôle du régime macrotidal dans certains mécanismes chimiques au niveau des estuaires. En période d'étiage, il est classique d'observer un enrichissement de la phase dissoute pour de nombreux métaux, au niveau du bouchon vaseux, résultant de la remise en suspension qui provoque un relargage d'une fraction des métaux à l'état particulaire et favorise le mélange des eaux interstitielles avec les eaux de l'estuaire. Ce phénomène a été particulièrement bien décrit dans la Seine (Boust, 1981; Avoine *et al.*, 1984a). En période de crue, l'intensité des apports fluviaux et les très courts temps de résidence expliquent la relative homogénéité observée dans l'ensemble de l'estuaire. Le caractère macrotidal des milieux considérés, par les turbulences et les brassages qu'il entraîne, conduit enfin à des taux de pollution relativement modérés malgré l'importance des apports.

### 3 - CONCLUSION

Les estuaires de la baie de Seine présentent des caractères typiquement macrotidaux avec :

- de fortes turbulences induites par les courants de marée;
- une circulation résiduelle orientée vers l'aval dans les chenaux principaux et vers l'amont dans les zones latérales;
- un bouchon "vaseux" de nature principalement silto-sableuse dont la dimension et la concentration suivent étroitement le cycle de marée.

Son développement est plus important en étiage, alors qu'il est partiellement évacué en crue;

- une tendance au transport sédimentaire vers l'amont sous l'action dominante du flot due à l'asymétrie de l'onde de marée. La conséquence est un colmatage progressif résultant principalement d'apports marins, à dominante sableuse.

C'est en étiage et en vives-eaux que la plupart de ces caractéristiques ressortent le plus nettement.

- Allen G.P. (1972).- Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse, Bordeaux, 314 p.
- Allen G.P., Sauzay G., Castaing P. & Jouanneau J.M. (1975).- Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. In : Willey M. (ed). Estuarine processes, t.2, Academic Press, New-York, p. 63-79.
- Allen G.P., Castaing P. & Jouanneau J.M. (1977).- Mécanismes de remise en suspension et de dispersion des sédiments fins dans l'estuaire de la Gironde. Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XIX, n° 2, p. 167-176.
- Allen G.P., Salomon J.C., Bassoullet P., Du Penhoat Y. & De Grandpré C. (1980).- Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. Sediment. Geol., vol. 26, p. 69-90.
- Allen G.P., Castaing P. & Salomon J.C. (1982).- Effets de la marée sur le mouvement de l'eau et des sédiments dans les estuaires. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S. n° 144, p. 5-16.
- Auffret J.P., Guéguénat P., Lepy M.C., Patry J.P. & Saur H. (1985).- Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983. Ce volume N° 21.
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 236 p.
- Avoine J. (1982).- Mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Seine. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S. n° 144, p. 17-25.
- Avoine J., Allen G.P., Nichols M., Salomon J.C. & Larssonneur C. (1981).- Suspended sediment transport in the Seine estuary, France : effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. In : Nichols M.M. & Allen G.P. (eds). Estuary-shelf interrelationships, Mar. Geol., vol. 40, n° 1/2, p. 119-137.
- Avoine J., Boust D. & Guillaud J.F. (1984a).- Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine (France). Proc. Symp. on contaminant fluxes through the coastal zone, Nantes, Rap. 2 (à paraître).
- Avoine J., Caillot A., Hoslin R., Larssonneur C., Massias J. & Quesney M. (1984b).- Mise en évidence des mouvements sédimentaires en Baie de Seine à l'aide de traceurs radioactifs. Contribution à l'étude du comblement de l'estuaire de la Seine. XVIIIe journées de l'Hydraulique, Marseille, p. I.2.1.-I.2.8.
- Avoine J. & Crevel L. (1985).- Influence des apports fluviaux en Baie de Seine. Ce volume, N° 10.
- Beslier A. (1982).- Les caractères hydrosédimentaires de la rivière de Morlaix. Trav. Stat. Biol. Roscoff, N.S. n° 28, p. 1-57.



- Boon J.D. (1974).- Optimized of discharge and suspended-sediment transport in a salt-marsh drainage system. In : Relations sédimentaires entre estuaires et plateaux continentaux, Mém. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, n° 7, p. 67-73.
- Boon J.D. (1975).- Tidal discharge asymetry in a salt marsh drainage system. Limnol. Oceanogr., Vol. 20, p. 71-80.
- Boust D. (1981).- Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse 3ème cycle, Caen, 186 p.
- Dobereiner C. & Mc Manus J. (1983).- Turbidity maximum migration and harbor siltation in the Tay estuary. In : Gordon D.C. Jr. & Hourston A.S. (eds.). Dynamics of turbid coastal environments, Can. J. Fish. Aquat. Sci., n° 40 (suppl. 1), p. 117-129.
- Dubrulle L. & Larssonneur C. (1984).- La baie des Veys: étude hydrosédimentaire. Rap. ronéot., 115 p.
- Gallenne B. (1974).- Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la crème de vase. Thèse 3ème cycle, Nantes, 323 p.
- Groen P. (1967).- On the residual transport of suspended matter by an alternating tidal current. Neth. J. Sea Res., 3 : 564-574.
- Kirby R. & Parker W.R. (1983).- Distribution and behavior of fine sediment in the Severn estuary and inner Bristol Channel, U.K. In : Gordon D.C. Jr. & Hourston A.S. (eds.). Dynamics of turbid coastal environments, Can. J. Fish. Aquat. Sci., n° 40 (suppl. 1), p. 83-95.
- Le Floch J.F. (1961).- Propagation de la marée dynamique dans l'estuaire de la Seine et la Seine Maritime. Thèse, Paris, 507 p.
- Nichols M.M. (1977).- Response and recovery of an estuary following a river flood. J. Sed. Petrol., vol. 47, n° 3, p. 1171-1186.
- Nichols M.M. & Poor G. (1967).- Sediment transport in a coastal plain estuary. J. Waterways and harbors, Proc. Am. Soc. Civil Engin., vol. 93, n° WW4, p. 83-95.
- Officer C.B. (1976).- Physical oceanography of estuaries. Wiley, New-York, 465 p.
- Postma H. (1961).- Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea. Res., vol. 1, p. 148-190.
- Salomon J.C. (1981).- Modelling turbidity maximum in the Seine estuary. In : Nihoul J.C.J. (ed.). Ecohydrodynamics, Elsevier oceanography series, vol. 32, p. 285-317.
- Schubel J.R. (1968).- Turbidity maximum of the northern Chesapeake bay, Science vol. 161, p. 1013-1015.
- Schubel J.R. (1969).- Size distributions of the suspended particles of the Chesapeake bay turbidity maximum. Neth. J. Sea. Res., vol. 4, p. 283-309.
- Schubel J.R. (1974).- Effects of tropical storm Agnes on the suspended solids of the northern Chesapeake bay. In : Gibbs R.J. (ed.). Suspended solid in water, Plenum Press, New-York, p. 113-132.
- Vale C. & Sundby B. (1984).- The relationship between the turbidity maximum and the tidal amplitude in the Tagus estuary. (sous presse).

LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE EN BAIE DE SEINE NORD-ORIENTALE, FLUCTUATIONS  
ET EVOLUTION DE LA COUVERTURE MEUBLE.

CREVEL L.\*

1 - NATURE ET REPARTITION DES SEDIMENTS

Les sédiments ont été prélevés avec une benne Shipeck selon des radiales perpendiculaires à la côte. L'espacement entre les points, variable, était d'environ 1000m au large, réduit en fonction de la profondeur vers la côte; un benna-ge était effectué tous les 2 mètres d'exhaussement. Les échantillons ont été analysés suivant les techniques classiques de tamisage.

1.1 - Zonéographie sédimentaire

La zonéographie sédimentaire a été obtenue selon la méthode mise au point par Larssonneur (1977), utilisée en Manche, basée sur les caractéristiques granulométriques et calcimétriques des échantillons.

Les fonds marins entre Le Havre et Antifer peuvent être séparés en 3 grandes zones sédimentaires:

- Le domaine du large au delà de l'isobathe -20m ,
- La zone intermédiaire limitée à l'ouest par une ligne parallèle à la côte située à environ 4000m du rivage et à l'est par l'isobathe -13m,
- La frange côtière de -13 à -5m.

La zone du large (Fig. 1) est occupée par des sédiments gravelo-sableux mal classés qui se répartissent suivant un gradient d'affinement du nord au sud, dû aux courants de marée. L'effet de cap, au niveau d'Antifer, renforce l'intensité de ceux-ci. Les dépôts du domaine intermédiaire sont riches en particules fines dont l'origine essentielle est attribuée à la dispersion des produits de dragage d'Octeville et pour une moindre part, aux apports de la Seine. Ces particules sont soumises à l'action des courants de marée. A l'abri de la digue du port pétrolier, un enrichissement non négligeable en éléments fins est observé.

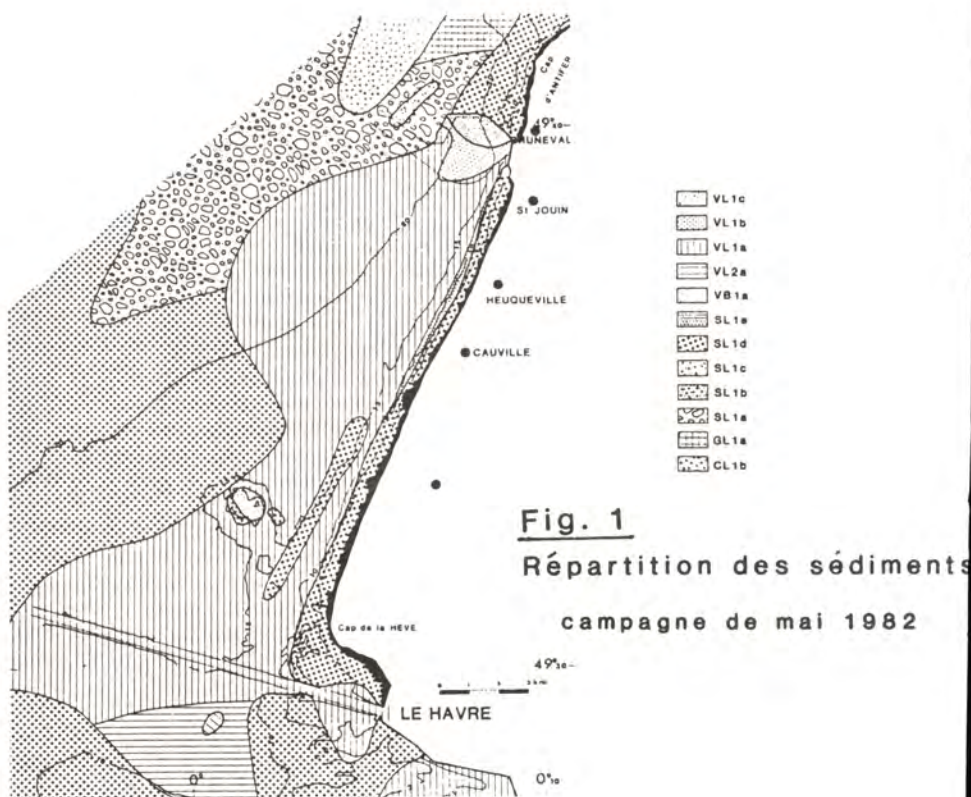
La frange côtière est constituée de sablons assez bien classés, pauvres en pélites. Ils sont soumis à l'action prépondérante des houles qui ne permettent pas, dans ce secteur, la sédimentation de particules inférieures à 0,2mm (L.C.H.F., 1973).

---

\* Laboratoire de Géologie Marine, Université de Caen, 14 032 Caen Cedex.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse de 3ème cycle (Crevel, 1983). Nous résumons ici l'essentiel des résultats concernant la dynamique sédimentaire de la partie nord-orientale de la baie de Seine.





**Fig. 1**  
Répartition des sédiments  
campagne de mai 1982

Le type de classification que nous avons utilisé pour établir la zonéographie sédimentaire était assez mal adapté à l'étude des fluctuations de la couverture meuble. Nous nous sommes attachés à caractériser les échantillons avec la totalité de l'information granulométrique dont nous disposions. Nous avons fait appel aux techniques statistiques.

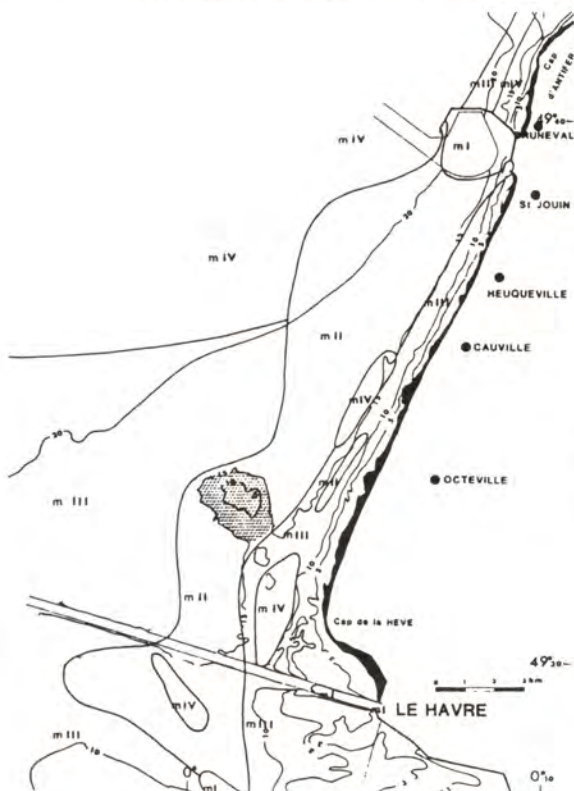
### 1.2 - Classification statistique : l'analyse factorielle

Chaque échantillon a été étudié sur 22 classes granulométriques, de  $16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  à  $55 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ . Pour l'homogénéité des données, nous avons travaillé sur les pourcentages différentiels. Nous disposions d'un fichier des données granulométriques, établi d'après les calculs des paramètres sédimentologiques réalisés sur micro-ordinateur. Nous avons pour l'analyse factorielle, utilisé le logiciel "ANAFAC-COR", mis au point par Jambu et Lebeaux (Grelet - Puterflam, 1981). C'est un programme d'analyse statistique des données, de portée générale. Il permet, dans notre cas, de représenter chaque échantillon par un point, dans un espace vectoriel à 22 dimensions. Le nuage de points ainsi obtenu, est la fidèle représentation des sédiments et autorise la classification. L'interprétation de l'analyse est basée sur la projection du nuage, dans un espace à deux dimensions. Nous avons réalisé un logiciel permettant la représentation du nuage par rapport aux trois principaux axes factoriels, ce qui facilite l'interprétation.

Le calcul a permis de dégager, dans le cas de la campagne déjà étudiée, 4 ensembles de sédiments (Fig. 2):

- L'ensemble mI, localisé dans le port pétrolier, dans l'avant port du Havre et son chenal, dans l'estuaire, traduit les zones d'accumulation de matériaux fins.

- L'ensemble mII forme une bande parallèle au rivage, joignant les zones riches en pélites de l'estuaire au sud, à Antifer au nord.
- L'ensemble mIII concerne des sables moyens se situant sur le littoral jusqu'à -15m et au large jusqu'à la transversale de Cauville.
- L'ensemble mIV est constitué de sables grossiers localisés essentiellement au large du terminal d'Antifer.



**Fig. 2**

**Analyse factorielle**

**cartographie des groupes  
de sédiments obtenus pour  
la campagne de mai 1982**

Pour les ensembles mI à mIV, nous observons un accroissement de la taille moyenne des particules, accompagné d'une diminution de la teneur en pélites. Ce type de classification fait apparaître clairement les zones de décantation (ensemble mI), le domaine soumis aux envasements (mII). Les zones pauvres en éléments fins sont bien délimitées, elles sont liées, soit à l'action des houles (ensemble mIII), soit à l'action des courants de marée (ensemble mIV).

## 2 - EVOLUTION DE LA COUVERTURE MEUBLE : ETUDE STATISTIQUE

L'analyse factorielle des correspondances, appliquée à l'ensemble des échantillons recueillis en 4 campagnes sédimentaires a mis en évidence certaines évolutions.

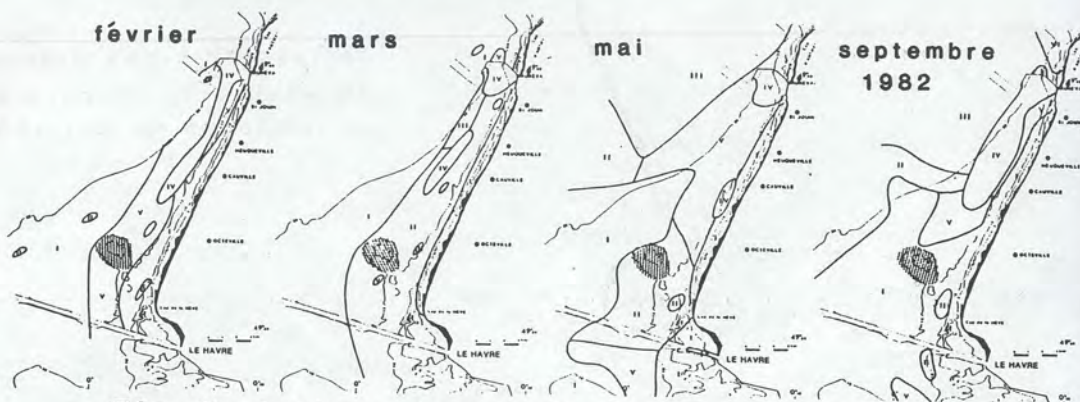
Le calcul statistique a permis de définir cinq groupes sédimentaires principaux (Fig. 3):

- Le groupe I, formé de sables fins envasés et mal classés (écart type 0,9), a un spectre granulométrique homogène.

La taille moyenne des grains est de 0,34mm et le pourcentage de pélites de 5 %. Il borde toujours le littoral de -5m à -15m, et constitue également les fonds situés plus au large jusqu'à -20m notamment entre l'estuaire et la transversale de Cauville.



- Le groupe II, de spectre homogène, représente des sables moyens à fins envasés (9 % de pélites), mal classés (écart type 1,8), de taille moyenne égale à 0,5mm. Ces sablons ont une situation géographique fluctuante dans le temps. Ils apparaissent au large, au delà de -20m au niveau de Cauville où ils ont été échantillonnés en mai et en septembre. Après les fortes tempêtes qui ont précédé la campagne de prélèvements de mars, ils constituent le substrat du domaine intermédiaire. Leur extension se réduit après une période de calme et de faibles apports extérieurs.
- Le groupe III est formé de sables grossiers très mal classés (moyenne 1,14mm, écart type 2). Il est localisé dans la partie septentrionale de notre zone au-delà de -20m où il a été reconnu en mai et en septembre.
- Le groupe IV se situe en toute période, dans l'anse du terminal pétrolier et forme une digitation vers le sud. Ce sont des sables envasés (moyenne 0,14mm, 43 % de pélites), mal classés (écart type 1,9), formant un spectre dispersé.
- Le groupe V localisé en zone intermédiaire, disparaît en période de forte agitation (mars et septembre). Il est formé de sables fins et de sablons envasés (moyenne 0,22mm, 17 % de pélites) réunis en un spectre granulométrique homogène.



**Fig. 3** Analyse factorielle - cartographie des groupes

Parmi ces cinq groupes nous observons un gradient d'affinement de la taille moyenne des particules pour les groupes III, II, I, V et IV: un gradient d'augmentation de la teneur en pélites pour les groupes I, III, II, V et IV: un gradient d'amélioration du classement pour les groupes III, IV, II, V et I.

Au cours de l'année, nos méthodes n'ont pas permis de mettre en évidence les fluctuations de la zone littorale au-dessus de -13m. Les sédiments sont toujours du groupe I. La zone du large située par des fonds supérieurs à -20m n'évolue pas. Elle est constituée du Nord au Sud par des sédiments des groupes III, II, I. Nous observons un gradient d'affinement dans le même sens en liaison avec une amélioration du classement.

Les variations saisonnières de la couverture sédimentaire s'effectuent, pour l'essentiel, dans la zone intermédiaire comprise entre -13 et -20m.

En période de calme et après d'importants apports naturels et anthropiques, le groupe IV forme une digitation issue du terminal d'Antifer en direction du Sud (Fig. 3 - février), le groupe V est géographiquement bien représenté. Après de fortes agitations (Fig. 3 - mars), l'extension du groupe IV est réduite, il en reste un témoin au large de Cauville. Les particules fines mêlées aux sédiments du groupe V ont été évacuées. Ces derniers appartiennent alors au groupe II. Le calme revenu, en mai, les fonds sont recontaminés par des particules fines. Le groupe V s'étend au détriment du groupe II. Au mois de septembre, après des apports réduits et une longue évolution en période de calme dominant, les sédiments appartiennent aux groupes I et V, les mieux classés. Le domaine intermédiaire est globalement occupé par des sédiments plus grossiers qu'en période de crue et plus fins qu'en période de forte agitation.

Les évolutions enregistrées en zone intermédiaire sont dues aux contaminations du matériel en place par des éléments fins, en déséquilibre hydrodynamique. Ces envasements s'organisent suivant un cycle lié, d'une part aux volumes d'apports anthropiques et naturels, d'autre part à l'énergie du milieu (Fig. 4).

Les houles de tempête jouent un rôle dans la remise en mouvement des particules fines. Ces dernières peuvent ensuite être transportées par les courants dont l'action contrôlée par les marées a une résultante probablement constante vers le nord (L.C.H.F., 1973; Salomon, 1980, Crevel 1983). En position latérale sur le schéma (Fig. 4) figure l'échelle croissante des apports de matériel fin dans le système. Les situations sédimentaires observées sont représentées en trait gras. Les positions centrales rendent compte des conditions de forte turbulence. La périphérie est réservée aux périodes de calme hydrodynamique. Passer d'une position périphérique au centre (flèches en gras), correspond à une évolution rapide de la couverture meuble, au cours d'une tempête par exemple. Les flèches fines indiquent au contraire des évolutions lentes en période de calme hydrodynamique. Les situations sédimentaires représentées sont caractérisées par le mois durant lequel elles ont été observées. Deux situations non échantillonnées sont dessinées. Le passage direct d'une situation de type février à une situation de type septembre est probablement impossible. Une telle évolution doit transiter par une position centrale qui permet une évacuation massive des éléments fins en dehors du système.

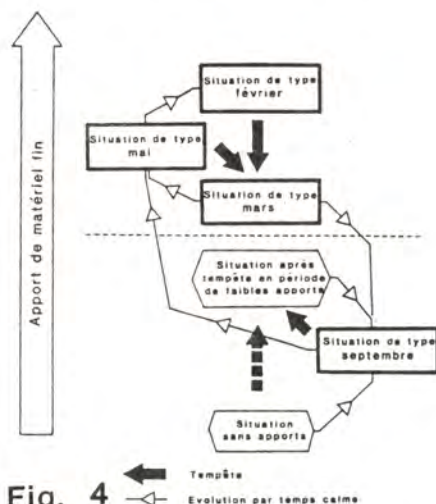


Fig. 4

Schéma de l'évolution de la couverture sédimentaire

### 3 - EVOLUTION PLURI-ANNUELLE DE LA COUVERTURE MEUBLE

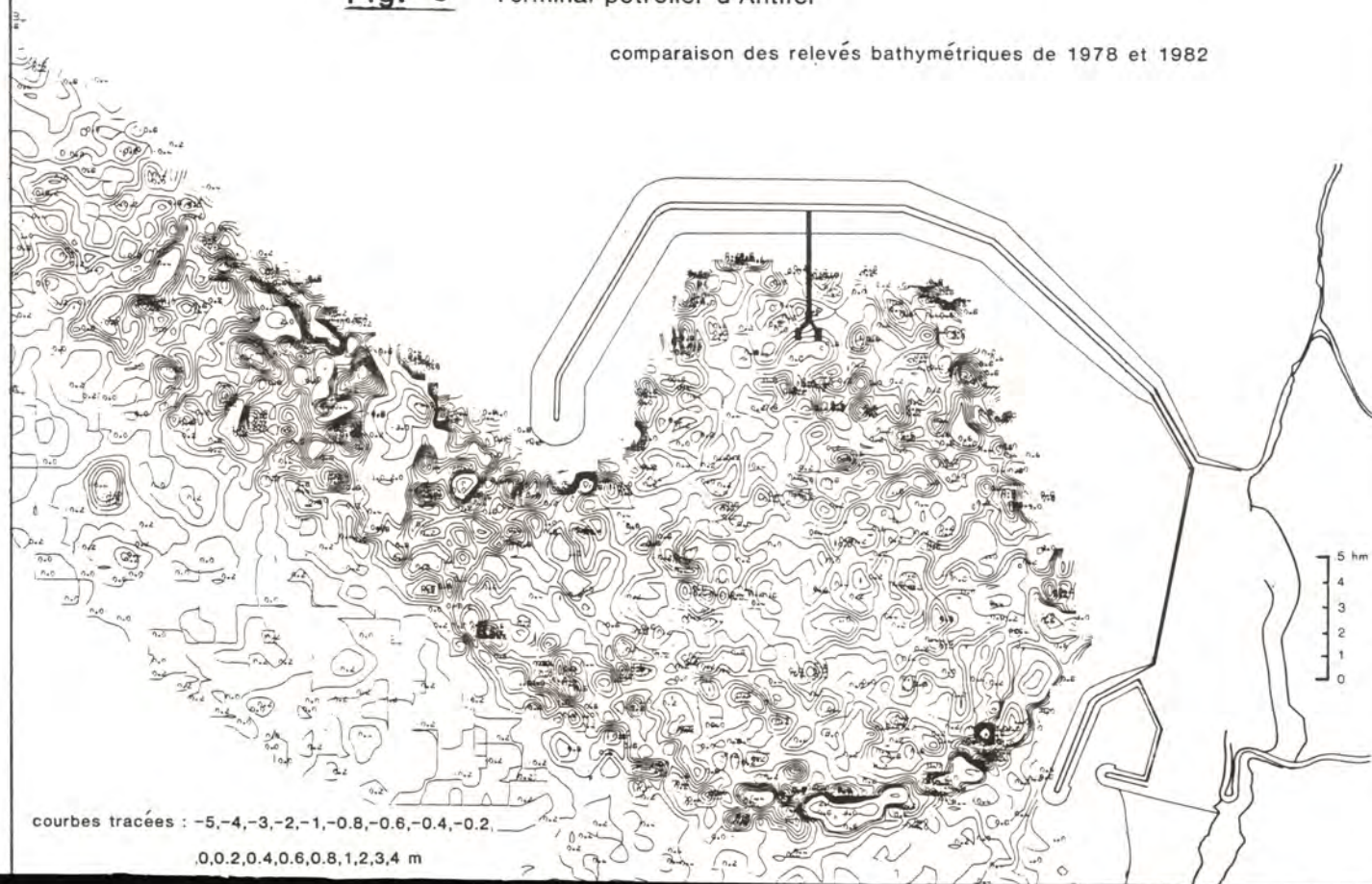
Les études préliminaires à la construction du terminal pétrolier d'Antifer ont permis de dresser une carte précise de la zone côtière (L.C.H.F., 1973). Nous utiliserons celle-ci comme référence, préférentiellement à celle de 1967 (Larsonneur et Hommeril, 1967) qui présentait une maille plus lâche. Après la construction du terminal, en 1978, une campagne d'échantillonnage (Avoine, 1981) a été réalisée en baie de Seine orientale.

Les cartes de 1973 et 1978, concernant la fraction pélique, montrent un panache continu de sédiments envasés, enraciné sur le dépôt d'Octeville.



**Fig. 5** Terminal pétrolier d'Antifer

comparaison des relevés bathymétriques de 1978 et 1982



Les variations de teneur sont imputables aux modes de prélèvement. Les valeurs sont comparables à celles que nous avons pu noter lors de nos campagnes, en 1982.

Dans la région immédiate du port d'Antifer, entre 1973 et 1978, Monbet (1980) a constaté un accroissement important de la teneur en pélites dans les sédiments. Un envasement se produit tout particulièrement dans la partie NW du terminal où les teneurs dépassent 90 %.

Nous avons voulu dresser le bilan sédimentaire de cette zone. La digue artificielle du terminal d'Antifer a créé un domaine favorable au piégeage des particules en suspension. La comparaison des relevés bathymétriques précis de 1978 et 1982 a été réalisée par cartographie assistée par ordinateur (Fig. 5).

Dans l'enceinte du terminal, les exhaussements les plus importants se trouvent au nord d'une ligne orientée sensiblement NW-SE, passant par la pointe de la digue, et principalement contre celle-ci. Il ne faut pas oublier le port de service et ses abords. Celui-ci avait été rapidement comblé dès sa construction (Lesueur, 1976). Les érosions observées au sud de la zone creusée artificiellement sont probablement dues à des affaissements de talus. Des creusements, à l'extrémité de la digue sont très importants. Ils sont liés à l'effet de cap induit par cette dernière.

Sur la zone cartographiée, les apports ont été quantifiés. Nous avons planimétré les zones d'exhaussement et d'érosion dans l'enceinte du port. Le bilan, positif, de l'ordre de 769 000 m<sup>3</sup> de février 1978 à janvier 1982, est sous-évalué. Les régions proches des digues, favorables à la sédimentation n'ont pas été cartographiées. Pour la zone investiguée, ceci correspond à une élévation moyenne de 0,05m/an. Durant cette même période, sur le dépôt d'Octeville, 6 173 000 m<sup>3</sup> ont été largués. Notre bilan indique donc que 10 à 12 % au moins des rejets effectués à Octeville sont piégés par la digue. Des études par traceurs ont montré (L.C.H.F., 1973) que 70 % des rejets sur le dépôt étaient entraînés. Elles estimaient en outre à 0,17m/an l'exhaussement probable dans l'enceinte du port. Les calculs de flux de matières en suspension, le long du littoral cauchois (Crevel, 1983), et les traçages radioactifs ont montré un net transit vers le Nord. Le dépôt de dragage d'Octeville est donc en grande partie responsable des envasements constatés dans le port d'Antifer. Un déplacement de ce dépôt pourrait-il améliorer la situation? Plus à l'ouest, et à la même latitude, les produits de dragage risqueraient d'être réintégrés dans la dynamique sédimentaire de l'estuaire en raison des résiduelles de courant s'orientant alors vers le sud près du fond (Crevel, 1983). Rejetés au NW de l'emplacement actuel, au-delà de l'isobathe -20m, les matériaux seraient entraînés vers le Nord et participeraient moins au comblement du terminal pétrolier mais les transports seraient allongés, d'où un surcoût important.

Les campagnes sédimentaires que nous avons réalisées ont précisé les variations de la couverture meuble. Les fluctuations sont essentiellement localisées dans la zone intermédiaire au-delà de -13m. Les distinctions n'ont été possibles que par l'utilisation de l'analyse factorielle. Ces changements liés principalement aux apports anthropiques et naturels d'une part, et aux conditions hydrodynamiques d'autre part, s'organisent suivant un schéma cyclique. La digue du terminal d'Antifer, en favorisant la rétention de matériel fin, est un élément déterminant de la dynamique sédimentaire dans ce secteur. Le système n'est néanmoins pas clos, et des pertes de matières en suspension s'effectuent vers le Nord.

Depuis 1978, la sédimentation de la baie de Seine nord-orientale semble stabilisée à l'échelle pluri-annuelle, malgré les fluctuations reconnues et les envasements dans l'enceinte du terminal pétrolier d'Antifer.



AVOINE J. (1981). - L'estuaire de la Seine, Thèse 3ème cycle Caen, 236 p., ronéot..

AVOINE J., BOUST D., CREVEL L., DUBRULLE L., GUEGUENIAT P. (1984). - Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. XVIII Jour, Hydr., Marseille.

BLANK J.P., KOROSK B.P. (1979). - Etude des courbes granulométriques globales par l'analyse factorielle des correspondances. Rev. Géomorpho. Dyn., t. 28, sér. 1, p 1-13.

CREVEL L. (1983). - Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse 3ème cycle, Paris XI, 185 p., ronéot..

GRELET - PUTERFLAM Y. (1981). - Lecture commentée de sortie de programmes en analyse des données. Bull. Assoc. Dev. An. Donn., N° 11, 147 p..

LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE (1973). - Etude du littoral entre Le Havre et Antifer:

- Mesures en nature, sédimentologie et géomorphologie. Port Auton. du Havre, rap. ronéot., 49 p..

- Etude théorique et interprétation des résultats. Port auton. du Havre, rap. ronéot., 24 p.,

LARSONNEUR C. (1977). - La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en Manche. J. Rech. Océanogr., Vol. 212, p. 33-39.

LARSONNEUR C., HOMMERIL P. (1967). - Sédimentation dans la partie orientale de la baie de Seine. Rev. Soc. Sav. de Haute Normandie, t. 47, p. 45-75.

LESUEUR P. (1976). - Terminal pétrolier du Havre-Antifer, étude sédimentologique D.E.A. Nantes, rap. ronéot., 26 p..

MONBET Y. (1980). - Evolution des peuplements benthiques. Port Auton. du Havre, rap. ronéot., 114 p..

RIVIERE A. (1977). - Méthodes granulométriques, techniques et interprétation. Masson éd. Paris.

SALOMON J.C. (1980). - Etude de l'estuaire de la Seine, modélisation numérique des phénomènes physiques. Univ. Bret. Occ., rap. inédit.

APPORTS DE L'IMAGERIE FOURNIE PAR LE SONAR A BALAYAGE LATERAL A LA CONNAISSANCE DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE EN BAIE DE SEINE.

AUFFRET J.P. \*, D'OZOUVILLE L. \*\*.

Les enregistrements continus du sonar à balayage latéral permettent d'observer les contrastes de la répartition des sédiments sur le fond. Leur degré d'hétérogénéité et leur évolution avec le temps est ainsi aisément perceptible, ainsi que la nature des contacts entre les différentes formations sédimentaires reconnues lors des cartographies établies par prélèvements. Nous avons utilisé le sonar à balayage latéral EG.G.sms960 de l'IFREMER (Berné *et al.*, 1985). Cet équipement permet de recueillir une imagerie corrigée en temps réel des facteurs d'anamorphose (obliquité transversale et compression longitudinale). Une couverture à grandes mailles de la baie de Seine a été réalisée en deux campagnes, du 9 au 14 mai 1982 et du 11 au 17 juillet 1983.

En Baie de Seine, les larges surfaces occupées par des sédiments sablo-graveleux ou graveleux dans la partie centrale ou occidentale ont montré la présence de structures sédimentaires nombreuses, témoignant de transits sableux en traction sur le fond. Elles indiquent une direction générale de transport vers le sud est, avec quelques inversions locales déterminées par la morphologie sous-marine ou littorale. A l'est de la baie, les sables fins présentent peu de structures de transit, mais par contre des signes d'envasement. La dynamique sédimentaire des vases est caractérisée par un cycle annuel, où alternent des phases de dépôt en masse lors des crues, à proximité immédiate des estuaires; et des phases de reprise de ces vases sous l'action des houles. Plus au large, des images sporadiques de "rubans de vase" paraissent issues de la remise en suspension de vases par la houle, suivie d'un entraînement de ces suspensions par le courant de marée. En Baie de Seine orientale, des structures attribuables au transport de sable tracté sur le fond ne sont observables que localement, à l'approche du banc de Seine et du banc du Ratier, et près du port d'Antifer. Ces informations complètent la connaissance de la distribution des sédiments et de leur dynamique acquise antérieurement par prélèvements et photographie sous-marine (Larsonneur, 1971), sonar latéral (Auffret *et al.*, 1984), ainsi que par suivi de traceurs (Avoine *et al.*, 1984).

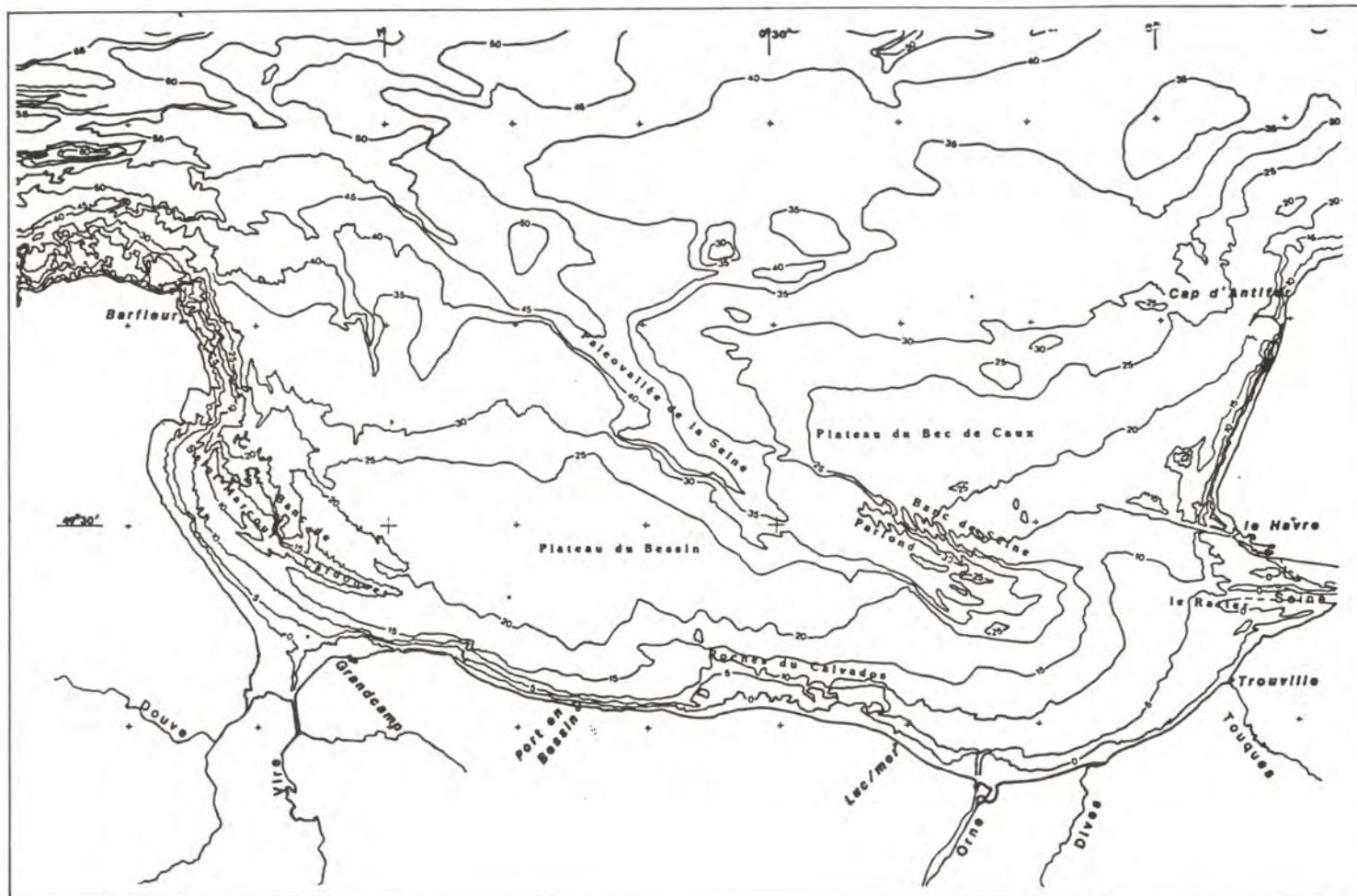
1. REPARTITION DES SEDIMENTS (fig. 2).

L'utilisation de l'image fournie par le sonar à balayage latéral pour la reconnaissance de la nature du sédiment repose sur l'évaluation des propriétés de rétrodiffusion, qui varient avec la granulométrie, et sont traduites sur l'enregistrement par une gamme de gris de 16 niveaux. Le relief sous-marin est simultanément exprimé par des contrastes de réflexion acoustique. Le sonar ne

\* Université de Caen, Labo. Géologie marine, Fr., 14032 Caen Cédex.

\*\* IFREMER, à CCOP/SOPAC, Mineral Ressources Dpt., SUVA, FIJI.





peut donc être utilisé que confronté avec la connaissance des sédiments acquis par prélèvements et photographie sous-marine; mais il permet d'observer la nature des contacts entre les différents faciès sédimentaires, et révèle ainsi la coexistence de phases résiduelles et mobiles que les prélèvements même ponctuels ont tendance à mélanger. Les principaux apports nouveaux à la connaissance de la répartition des sédiments (Vaslet *et al.*, 1978), sont la mise en évidence d'anomalies sableuses linéaires de direction NW-SE en Baie de Seine occidentale et centrale. Ces rubans correspondent à une différenciation sédimentaire sableuse en longs couloirs étroits ornés de mégarides sur un environnement de graviers sableux. L'asymétrie des mégarides indique une direction de transit vers le SE. Ces rubans sont de deux types différents par leur taux d'enrichissement relatif en sable par rapport à leur environnement graveleux. Au large, suivant exactement le versant sud de la paléovallée de la Seine, ce sont des rubans sableux étroits correspondant à un enrichissement en sable de 25 à 50%; sur la plateforme entre Barfleur et les rochers du Calvados, ce sont par contre des rubans sablo-graveleux et plus larges, correspondant à un enrichissement relatif en sable de 15 à 30%. Par ailleurs, les évolutions mises en évidence de la répartition des fonds graveleux, sableux, et sablo-vaseux, apportent des précisions à la cartographie par prélèvement. Le sable, constituant une phase mobile sur une surface résiduelle graveleuse de large extension, a tendance à se rassembler en traînées étroites qui convergent vers l'est. Au nord du Bessin, l'anomalie topographique que constitue le plateau rocheux du Calvados provoque l'accumulation d'une surface sableuse à mégarides et ridins (sand sheet), allongée parallèlement à la côte entre la pointe du Hoc et le nord d'Arromanches. On note que cette accumulation sableuse ne s'effectue pas ici contre le littoral, mais de 3 à 5 km au large, par une profondeur de 15 à 20 m.

En Baie de Seine orientale le faible contraste de rétrodiffusion entre le sédiment fin et le sable est défavorable à l'utilisation des enregistrements à des fins de cartographie sédimentaire. De plus, les sédiments fins ont tendance à se mélanger en proportion variable au sable, ces évolutions progressives sont difficilement perceptibles au sonar.

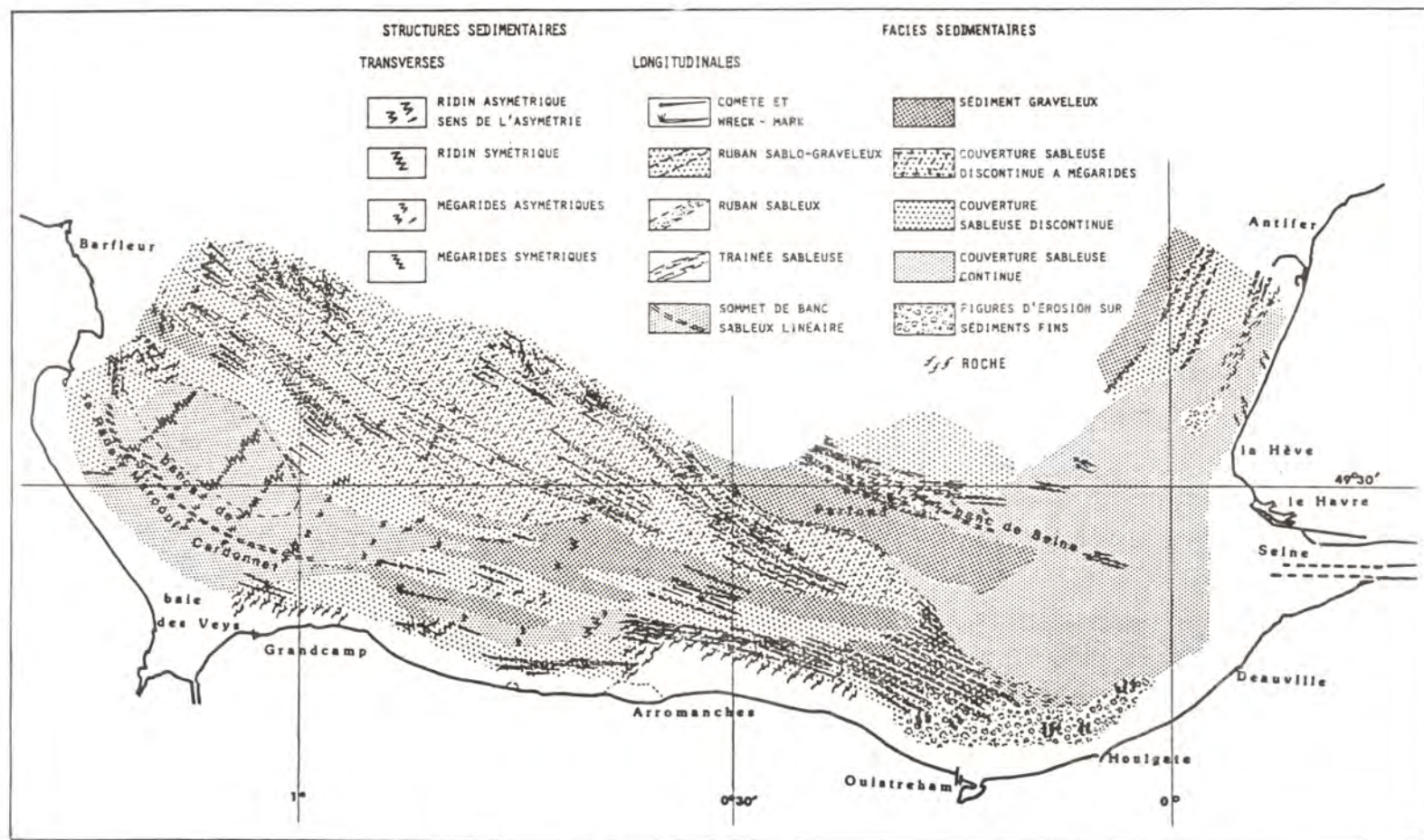
## 2. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE.

Les chercheurs anglo-saxons sous l'impulsion de Belderson, Kenyon et Stride (1972), utilisent depuis plus de 20 ans le sonar à balayage latéral pour décrire les principales formes sous-marines qui expriment le déplacement des sédiments. Nous avons voulu dépasser le simple constat descriptif de l'existence des formes sédimentaires sous-marines et des directions de transit qu'elles expriment, pour chercher à définir les phénomènes sédimentaires actuellement actifs : érosion, transport et dépôt. En Baie de Seine occidentale et centrale, les structures sédimentaires indiquant le déplacement de sédiments tractés sur le fond sont nombreuses. Nous avons retrouvé la plupart des structures classiquement décrites (Belderson *et al.*, 1972).

- Les structures longitudinales sont parallèles au courant générateur et de faible élévation par rapport à la surface de sédiments graveleux qui les porte. Les bancs sableux linéaires, dont l'épaisseur en baie de Seine peut dépasser 20 m (Auffret *et al.*, 1983), constituent donc une exception. Le banc de Seine ainsi que le banc de Saint-Marcouf et Cardonnet représentent la forme d'accumulation offshore des sables marins, principale phase sédimentaire mobile en charriage sous l'action des courants.

- Les structures transversables sont des rides sédimentaires dont la taille varie depuis les rides, plus petites que le pouvoir séparateur du sonar mais vues en photographie sous-marine (Larsonneur, 1971), jusqu'aux grandes vagues de sable ou ridins (longueur d'onde supérieure à 20 m), formes de troisième ordre qui portent elles-mêmes des mégarides. Nous avons pu observer des formes





**Fig.2** Faciès et figures sédimentaires

transverses de longueur d'onde comprise entre 0,6 m (limite inférieure du pouvoir séparateur de l'équipement) et 200 m pour quelques ridins du banc de Saint-Marcouf, du banc de Seine et d'Antifer. La plupart sont dissymétriques et traduisent ainsi le sens du transit sédimentaire résiduel; mais il existe également des formes symétriques, en particulier les formes de courte longueur d'onde (0,6 à 1,2 m) qui sont des rides de houle. Celles-ci sont rares en Baie de Seine, à moins que leur faible longueur d'onde ne les rende imperceptibles dans les conditions moyennes d'enregistrement.

A côté de ces formes sédimentaires maintes fois décrites, nous avons pu observer en Baie de Seine orientale des structures permanentes ou temporaires que nous avons interprétées comme issues de la reprise sous l'action de la houle et des courants des sédiments fins cohésifs. Ces structures sont, d'une part des formes d'érosion en sillons ou en taches, et d'autre part des rubans temporaires de vase en suspension à l'interface eau-sédiment. Nous avons noté la coïncidence entre ces rubans de vase et un type de condition météorologique; ils correspondent probablement à un phénomène temporaire de couche néphéloïde ou de crème de vase à forte dilution sur le fond (d'Ozouville & Auffret, 1986).

### 3. PHENOMENES SEDIMENTAIRES.

#### 3.1. Direction et sens des transits en traction (fig. 2).

##### 3.1.1. En Baie de Seine occidentale :

On note une tendance générale de transit vers le SE exprimée par de nombreuses structures sédimentaires. Le domaine situé au sud d'une ligne joignant Barfleur et Grandcamp échappe à cette règle. Les transits sédimentaires s'effectuent en sens inverse sur les deux flancs des bancs de Saint Marcouf-Cardonnet, vers le NW sur le flanc interne du banc et vers le SE sur son flanc externe. Entre les îles Saint-Marcouf et la zone des rubans sablo-graveleux du large, s'étend une surface ovale de couverture sableuse continue peu épaisse, ornée de mégarides et de ridins dépourvus de dissymétrie apparente. Nous avons pu observer, lors d'un profil enregistré au flot puis au jusant, une inversion de sens des indices secondaires de polarité (inversion de crêtes) dans cette zone à mégarides et ridins sub-symétriques.

Ces directions de transit sédimentaire sont en accord avec les données de courantologie (Salomon, 1985; Le Hir, 1984; Le Provost et Fornerino, 1984). Le sens de transport vers le SE correspond à la dissymétrie générale de la courbe de marée en Baie de Seine où le flot est en général dominant sur le jusant, à l'exception de contre courants littoraux générés, dans la baie des Veys, par le promontoire du Cotentin. Les surfaces d'accumulation sédimentaire coïncident également avec les zones d'amortissement des courants instantanés aux deux extrémités de la baie.

##### 3.1.2. En Baie de Seine centrale :

On peut observer des particularités de la répartition des sédiments liées à la géomorphologie sous-marine. Ainsi les rubans sableux les plus éloignés du littoral (fig. 2) sont étroitement associés au versant méridional de la paléovallée de la Seine, qui correspond ici à une dénivellation d'une quinzaine de mètres (Auffret & Larssonneur, 1977). Les causes de cette localisation du ruban de sable sont à rechercher dans le mode hydrodynamique de genèse de ces structures sédimentaires à la convergence de vortex longitudinaux (McLean, 1981). Ces vortex sont créés par la perturbation du flux d'écoulement des courants de marée par le versant de la paléovallée selon le schéma de Nikuradse (in Allen, 1984). Sur le méridien de Ver-sur-Mer, un décrochement vers le nord du versant provoque une montée des rubans sur le plateau du Calvados.



Ils rencontrent probablement là des conditions hydrodynamiques défavorables car ils ne se maintiennent que sur 8 km environ, longueur à rapprocher des 65 km du ruban principal représenté sur la fig. 2 entre Barfleur et le méridien d'Arromanches. Au pied du versant septentrional de la paléovallée de la Seine, on observe également la formation de rubans de sable. Ils portent à l'approche du banc de Seine de grandes mégarides en croissant ( $\lambda=10$  à 20 m,  $h=1$  à 2 m). Ces mégarides se rassemblent en ridins pour former l'unité superficielle du banc de Seine. Ce banc, malgré son étalement et son profil bas est donc une unité sédimentaire active dont la localisation est liée au versant du Parfond (Auffret et d'Ozouville, 1985).

On peut également constater le rôle joué par le plateau des rochers du Calvados dont les reliefs sont débordés vers le nord par des trainées sableuses étroites à polarité vers l'est. Elles se prolongent vers l'est dans un vaste champ de rubans sableux situé, au nord de Luc-sur-Mer à la transition entre le plateau de roches sub-affleurantes du Bessin et la couverture sableuse continue de la baie de Seine orientale vers laquelle progressent les sables. Nous n'avons pas observé d'anomalie morphologique à l'amont de ce champ de rubans, son origine doit donc être recherchée dans les facteurs purement hydrodynamiques. L'étude de Salomon (1985, fig. 1 et 3) montre que le facteur hydrodynamique discriminant de cette zone est l'élongation des roses de courant et donc des trajectoires lagrangiennes de l'excursion de marée. Cette observation est cohérente avec l'allongement des rubans de sable dont la direction est conforme à l'élongation des roses de courant.

### 3.1.3. En Baie de Seine orientale :

La majeure partie des fonds est dépourvue de structures sédimentaires observables par le sonar latéral. Ceci est probablement dû à des causes sédimentologiques et hydrodynamiques. Il s'agit en effet de la zone estuarienne de la baie, caractérisée par l'épaisseur notable de sa couverture sédimentaire meuble constituée de sable fin (Auffret et d'Ozouville, 1985), ainsi que par un envasement saisonnier (Crevel, 1983; Avoine *et al.*, 1985) qui accroît la cohésion des dépôts. L'hydrodynamique est également différente: les vitesses de courants sont plus faibles et les trajectoires de marée ont un caractère rotatif par opposition à leur caractère alternatif à l'ouest (Salomon, 1985, fig. 3). Il faut noter que les figures sédimentaires observées au sonar latéral étant en majorité linéaires, leur genèse s'accommode mal de courants rotatifs.

Des structures, attribuables à l'action de la houle sur le fond, ont été mises en évidence ici en raison de la faible profondeur moyenne d'eau, ce sont d'une part des remises en suspension des vases et d'autre part des structures pré-littorales d'érosion (fig. 2).

En 1982, les conditions météorologiques ayant été variables au cours de la campagne, nous avons pu observer des formes évolutives apparaissant après les périodes de houle et interprétées comme issues de la remise en suspension par les vagues de particules fines ou de faible densité (débris organiques). Ces suspensions constituent à l'interface eau-sédiment une couche turbide de "crème de vase" étirée en rubans parallèles par les courants de marée (d'Ozouville et Auffret, 1986). Cette reprise des vases a également été observée par utilisation de traceurs radioactifs (S.A.R. 1984) et par les cartographies saisonnières établies par prélèvement (Avoine *et al.*, 1984).

Sur le pré-littoral entre l'Orne et la Touques, existent des réseaux de sillons ramifiés de profondeur métrique, de direction perpendiculaire au littoral et aux isobathes (fig. 1). Le fond de ces sillons, à forte rétrodiffusion, porte des mégarides de houle sub-symétriques de longueur d'onde de 0,7 à 1 m. Il sont associés à des formes plus irrégulières, lichenoïdes, localisées sur les deltas de jasant des estuaires. Des analogies existent avec les sillons pré-littoraux à mégarides de houle mis en évidence en Baie de Morlaix



(Augris *et al.*, 1986) et sur les littoraux des Etats-Unis (Morang & McMaster, 1980), où des formes en thalles existent également (Shipp, 1984). Ces formes lichenoides résultent probablement de l'érosion de vases molles, à forte teneur en eau, par la houle: les prodeltas de jusant de l'Orne et de la Dives sont envasés lors des crues par l'expulsion et le dépôt en masse de la crème de vase accumulée dans les estuaires en étiage (Auffret *et al.*, 1985).

Les formes en sillons, en raison de leur profondeur, affectent plutôt les sédiments compactés de l'unité fluvio-marine fossile observée à la base du prisme sédimentaire holocène, qui affleurent ici (Auffret et d'Ozouville, 1985). La concentration de sédiments graveleux au fond des sillons et les mégarides de houle qui les ornent, indiquent que ces sédiments coquilliers oscillent sous l'action des houles, à l'image des galets sur une plage. Cette oscillation exerce donc, lors des tempêtes, une action d'abrasion sur les dépôts sablo-argileux compactés, creusant les sillons selon le mécanisme décrit pour les courants par Flood (1981). La méconnaissance de ces phénomènes d'érosion sous-marine est une source probable du déficit des apports constaté dans les tentatives d'estimation du bilan de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine (Avoine *et al.*, 1984).

#### 4. CONCLUSION.

Malgré le caractère incomplet de la couverture régionale réalisée au sonar latéral, les résultats obtenus comblent une lacune de connaissances des formes sédimentaires de transit sur la plate-forme française. Il apporte une moisson d'informations à la connaissance de la dynamique sédimentaire de la baie de Seine. Par l'observation en continu des objets sédimentaires d'échelle moyenne qu'il permet, il est complémentaire des techniques antérieurement utilisées: cartographie régionale par prélèvements ou observations ponctuelles locales par photographie ou traceur. Les informations recueillies sur la dynamique actuelle de l'unité sédimentaire superficielle sont également utiles à la connaissance du bilan des dépôts holocènes établi par l'étude sismique (Auffret et d'Ozouville, 1985).

A l'exception des zones estuariennes orientales et occidentales sablo-vaseuses, la baie de Seine a une couverture meuble de graviers d'épaisseur réduite sur laquelle s'effectuent des transits sableux vers le SE, qui s'expriment par des structures sédimentaires de surface. Le rôle de ces transits dans l'alimentation des zones d'accumulation reste à quantifier. Des phénomènes d'érosion sous-marine, dont il serait également souhaitable de mesurer l'efficacité, ont été découverts en Baie de Seine orientale. Cette capacité à observer en continu les objets et les phénomènes fait de la reconnaissance par sonar à balayage latéral un préalable efficace à la définition des stratégies d'étude en phases de projet. En phase de réalisation, c'est un complément indispensable aux techniques ponctuelles d'étude du fond de la mer, de sa dynamique sédimentaire et de ses faunes, si l'on a l'ambition d'étendre les conclusions acquises à un espace régional.

- 
- Allen J.R.L. (1984).- Sedimentary structures, their character and physical basis. Dev. in Sedimento., v30, 1196 p., Elsevier ed., Amsterdam.
- Auffret J.P. & Larssonneur C. (1977).- Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le nord du Cotentin. Journées Lennier, Bull. Soc. Géol. Normandie, LXIV, n° 4, p. 21-33.
- Auffret J.P., Alduc D., Larssonneur C. & Smith A.J. (1983).- La Manche orientale, carte des paléovallées et bancs sableux. CNEOX/BRGM ed, Orléans.
- Auffret J.P., Walker P. & d'Ozouville L. (1984).- Le sonar à balayage latéral et ses applications à l'étude des transports sédimentaires en Manche. XVIIIèmes Journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 1/14, 8 p.



- Auffret J.P. & d'Ozouville L. (1985).- Cartographie du prisme sédimentaire holocène en Baie de Seine orientale par sismique réflexion à haute définition. Ce volume, N° 8.
- Auffret J.P., Guéguéniat P., Lepy M.C., Patry J.P. & Saur H. (1985).- Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983. Ce volume, N° 21.
- Augris C., Auffret J.P., Cabioch L. & Koch P. (1986).- Etude de sillons sédimentaires courbes découverts en Baie de Morlaix par sonar à balayage latéral. C.R.A.S., à paraître.
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine, sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 264 p.
- Avoine J., Boust D., Crevel L., Dubrulle L. & Guéguéniat P. (1984).- Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. Soc. Hydro. Fr., 18èmes Journées de l'Hydraulique, Marseille, rap. 1/3, 8 p.
- Avoine J., Caillot A., Hoslin R., Larsonneur C., Massias J. & Quesney M. (1984).- Mise en évidence de mouvements sédimentaires en Baie de Seine à l'aide de traceurs radioactifs. Soc. Hydro. Fr., 18èmes Journées de l'Hydraulique, Marseille, rap. 1/2, 8 p.
- Belderson R.H., Kenyon N.H., Stride A.H. & Stubbs A.R. (1972).- Sonographs of the Sea-floor, a picture atlas. Elsevier, Amsterdam, 185 p.
- Berne S., Braud F. & Walker P. (1986).- Une nouvelle approche de la cartographie géologique et sédimentologique du plateau: l'utilisation du traitement numérique des images de sonar latéral. Bull. Soc. Géol. Fr., à paraître.
- Bonnefille R. (1963).- Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu. Bull. Cent. Rech. Chatou, n° 5, p. 67-72.
- Crevel L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine nord-orientale. Thèse 3ème cycle, Université de Caen, 185 p.
- Dubrulle L. & Larsonneur C. (1984).- Dynamique sédimentaire de l'estuaire de l'Orne. Soc. Hydro. Fr., 18èmes Journées de l'Hydraulique, Marseille rap. 1/6, 6 p.
- Flood R.D. (1981).- Distribution, morphology and origin of sedimentary furrows in cohesive sediments, Southampton water. Sedim., v 28, p. 511-529.
- Larsonneur C. (1971).- Manche centrale et baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse, Caen, 394 p.
- Le Hir P. & L'Hyavanc J. (1984).- Etude des circulations moyennes en Baie de Seine à partir de mesures de longue durée. Soc. Hydro. Fr., 18èmes Journées de l'Hydraulique, Marseille, rap. 4/4, 6 p.
- Le Provost C. & Fornerino M. (1984).- Les courants dans un modèle bidimensionnel de marées littorales. Soc. Hydro. Fr., 18èmes Journées de l'Hydraulique, Marseille, rap. 4/5, 9 p.
- Mc Lean S.R. (1981).- The role of non-uniform roughness in the formation of sand ribbons. Mar. Geol., v42, p. 49-74.
- Morang A. & McMaster R.L. (1980).- Nearshore bedform patterns along Rhode island from side-scan sonar surveys. J. Sed. Petrol., v 50, n° 3, p. 831-840.
- d'Ozouville L. & Auffret J.P. (1986).- Répartition et évolution actuelle des sédiments superficiels en Baie de Seine orientale en utilisant un sonar à balayage latéral. Océanol. Acta, à paraître.

- Salomon J.C. (1985).- Courantologie calculée en Baie de Seine. Ce volume, N° 2.
- S.A.R. (1980).- Etude des mouvements sédimentaires à l'aide de traceurs radioactifs au voisinage de l'embouchure de l'Orne. Rap. ORIS 80/8/Q2, 50 p.
- S.A.R. (1984).- Etude au moyen de traceurs radioactifs des mouvements sédimentaires en Baie de Seine. Rap. ORIS/SAR-84-09, 27 p.
- Shipp R.C. (1984).- Bedforms and depositional sedimentary structures of a barred neashore system, eastern Long Island- New-York. Mar. Geol., v. 60, p. 235-259.
- Vaslet D., Larssonneur C. & Auffret J.P. (1978).- Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000e et notice. B.R.G.M., ed., Orléans.



CONTRIBUTION DES TRACEURS RADIOACTIFS A L'ETUDE DES MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES  
EN BAIE DE SEINE.

AVOINE J. \*, CAILLOT A. \*\*, HOSLIN R. \*\*, LARSONNEUR C. \*, MASSIAS J. \*\*,  
QUESNEY M. \*\*.

INTRODUCTION

L'utilisation de formules de transport pour la quantification des mouvements sédimentaires sur le littoral et en domaine subtidal est source d'imprécisions importantes. En effet, la plupart des équations proposées ne prennent pas en compte les effets combinés des courants de marée et des houles. Aussi, le recours à des observations directes s'avère-t-il souvent nécessaire, notamment par la mise en oeuvre de traceurs radioactifs. La comparaison avec les transports théoriques déterminés à partir de mesures de courants et d'enregistrements de houles permet en outre de vérifier la validité des équations proposées (Heathershaw, 1981).

En baie de Seine, les dépôts sablo-vaseux présentent des fluctuations importantes au cours du temps (Crevel, 1983 ; Avoine *et al.*, 1984). Ces mouvements sédimentaires en régime hydrodynamique de forte énergie occasionnent des atterrissements d'origine marine dans l'estuaire de la Seine, contribuant ainsi à son comblement (Avoine, 1981). Pour préciser ces phénomènes, des campagnes de mesures ont été réalisées dans la partie sud-orientale de la baie, à l'aide de traceurs radioactifs, entre 1979 et 1984. Plusieurs sites expérimentaux ont été choisis, de Ouistreham à Honfleur, afin de quantifier les transits sédimentaires et de fixer la limite d'action des courants de marée et des houles en fonction de la nature des dépôts et de leur profondeur. Les techniques utilisées consistent à introduire dans le milieu des matériaux aisément détectables ayant même comportement hydrodynamique que le sédiment naturel ; elles ont été décrites dans le détail, notamment par Courtois et Monaco (1969), Caillot (1982 et 1983). En baie de Seine, les traceurs utilisés ont permis d'étudier, d'une part le charriage des sables entre - 2 m et - 15 m, d'autre part la remise en suspension de sédiments vaseux à différentes concentrations.

Nous rapportons ici les principaux résultats obtenus que nous complétons par les conclusions des expériences effectuées antérieurement pour le compte du Port Autonome du Havre sur le littoral cauchois (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1973 ; Tola, 1984) . Nous discutons ensuite du rôle des mouvements sédimentaires mis en évidence dans le comblement de l'estuaire de la Seine.

---

\* Laboratoire de géologie marine, Université de Caen, 14 032 Caen Cedex.

\*\* CEA/SAR, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay. BP 2, 91190 Gif-sur-Yvette.

## 1 - Les MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES en BAIE DE SEINE

1.1. - Partie sud-orientale de la baie

La figure 1 et le tableau 1 résument les conditions expérimentales et les principaux résultats obtenus au cours d'études d'une durée généralement supérieure à 6 mois. Ainsi ont été pris en compte de nombreux cycles de marée et plusieurs tempêtes.

Le mouvement général des sables marqués, sous l'effet des courants de marée alternatifs, est bien mis en évidence par le réseau de courbes isochocs correspondant à l'étalement du traceur sur les fonds de part et d'autre du point d'immersion. Il apparaît clairement une prédominance du flot sur le jusant entraînant un mouvement parallèle à la côte d'ouest en est (fig. 2).

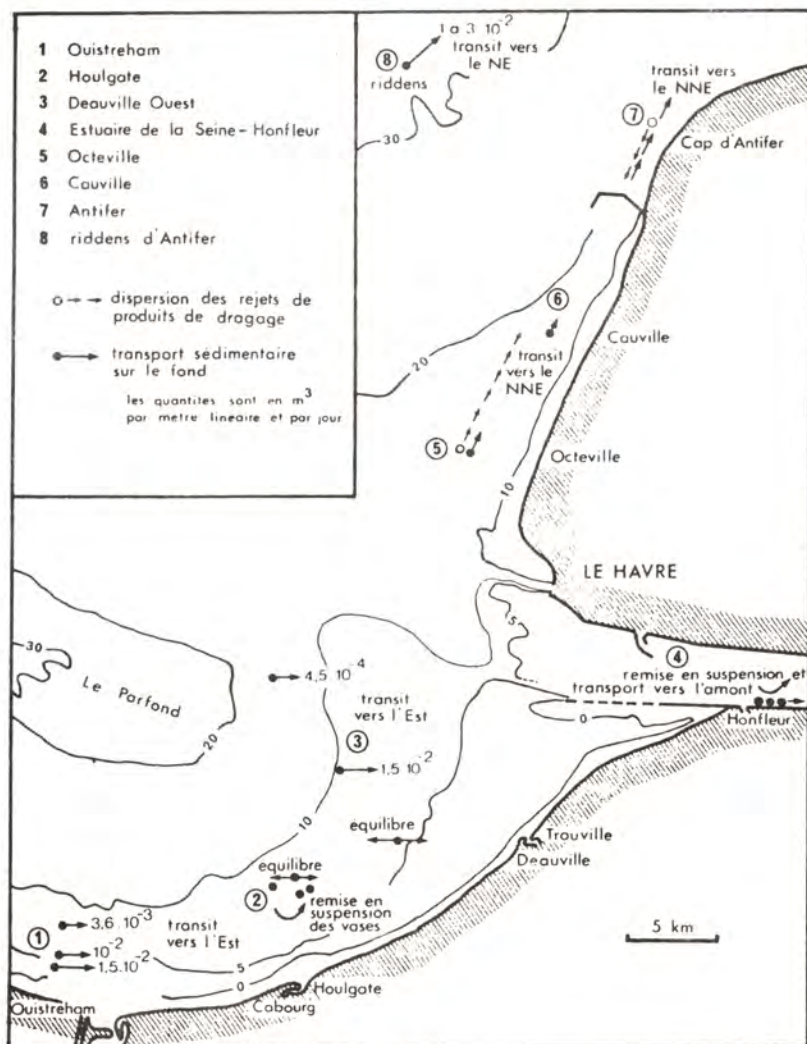


Fig. 1 - Localisation et principaux résultats acquis lors des expériences par traceurs radioactifs en baie de Seine orientale.



| Sites<br>et<br>Dates                                                      | Profondeur<br><br>( m ) | Granulométrie ( mm ) |                 |             |                 | Traceur                                             | Durée<br>de<br>l'étude<br>( jours ) | Transport solide<br><br>( m <sup>3</sup> /m et par jour )         |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|                                                                           |                         | Sédiment naturel     |                 | Traceur     |                 |                                                     |                                     |                                                                   |
|                                                                           |                         | Etalement            | d <sub>50</sub> | Etalement   | d <sub>50</sub> |                                                     |                                     |                                                                   |
| OUISTREHAM<br>( 1979 )                                                    | -2,5                    | 0,04 à 0,62          | 0,21            | 0,16 à 0,20 | 0,185           | Verre à                                             | 200                                 | 1,5.10 <sup>-2</sup> vers l'Est                                   |
|                                                                           | -5,5                    | 0,04 à 0,42          | 0,18            | 0,16 à 0,20 | 0,185           | l'Iridium 192                                       |                                     | 10 <sup>-2</sup> vers l'Est                                       |
|                                                                           | -7,5                    | 0,04 à 0,50          | 0,21            | 0,20 à 0,31 | 0,25            | Période 74 j.                                       |                                     | 3,6.10 <sup>-3</sup> vers l'Est                                   |
| HOULGATE<br>( 1983 )                                                      | -8,0                    | 0,04 à 0,31          | 0,16            | < 0,04      | 250g/l          | Vase marquée<br>à<br>l'Hafnium 181<br>Période 45 j. | 30                                  | remise en suspension<br><br>avec<br><br>U <sub>B</sub> = 0,7 cm/s |
|                                                                           | -8,0                    | 0,04 à 0,31          | 0,16            | < 0,04      | 350g/l          |                                                     |                                     |                                                                   |
|                                                                           | -8,0                    | 0,04 à 0,31          | 0,16            | < 0,04      | 500g/l          |                                                     |                                     |                                                                   |
|                                                                           | -8,0                    | 0,04 à 0,31          | 0,16            | 0,10 à 0,25 | 0,16            | Verre à<br>l'Iridium 192                            | 200                                 | équilibre                                                         |
| DEAUVILLE<br>Ouest<br>( 1982 )                                            | -5,0                    | 0,04 à 0,40          | 0,18            | 0,12 à 0,25 | 0,18            | Verre à<br><br>l'Iridium 192                        | 208                                 | équilibre                                                         |
|                                                                           | -10,0                   | 0,04 à 0,40          | 0,18            | 0,16 à 0,31 | 0,22            |                                                     |                                     | 1,5.10 <sup>-2</sup> vers l'Est                                   |
|                                                                           | -15,0                   | 0,04 à 0,40          | 0,18            | 0,16 à 0,31 | 0,22            |                                                     |                                     | 4,5.10 <sup>-4</sup> vers l'Est                                   |
| NONFLEUR<br>chenal<br>( 1980 )<br>Débit fluvial:<br>300 m <sup>3</sup> /s | -12,1                   | 0,04 à 0,08          | 0,05            | 0,16 à 0,20 | 0,17            | Verre au<br>Néodyme 147<br>Période 11 j.            | 9                                   | En vives-eaux:<br>14 tonnes par marée<br>vers l'amont.            |
|                                                                           | -11,3                   | 0,08 à 0,20          | 0,16            | 0,16 à 0,20 | 0,17            |                                                     |                                     | En mortes-eaux:<br>0,25 tonne par marée<br>vers l'amont.          |
|                                                                           | -11,5                   | 0,08 à 0,20          | 0,16            | 0,23 à 0,26 | 0,26            |                                                     |                                     |                                                                   |

Tableau 1 : Conditions expérimentales des études réalisées par traceurs radioactifs entre 1979 et 1983. Principaux résultats obtenus. (a) concentration des vases marquées.

Parallèlement, devant Ouistreham, par des fonds de - 3,5 m et de - 5 m, l'action de la houle, dominante de secteur W à NW, se traduit par un mouvement du traceur en direction de la côte. Une action comparable est également visible à l'Ouest de Deauville par des fonds de - 5 m et devant Houlgate à - 8 m. L'influence d'un courant de retour pendant les périodes de mauvais temps est constatée devant Ouistreham.

Au total, le transit observé, principalement lié à la prédominance des courants de flot, entraîne, par charriage, de faibles quantités de sables en direction de l'estuaire. Le débit volumique mesuré est au maximum de  $1,5.10^{-2}$  m<sup>3</sup>/m et par jour.

Devant Houlgate, par des fonds de - 8 m, l'étude des phénomènes de remise en suspension a été entreprise parallèlement. Il s'agissait d'examiner le comportement de dépôts vaseux qui forment un stock sédimentaire important en baie de Seine orientale. La remise en suspension de ces matériaux cohésifs dépend principalement de leur rigidité initiale, elle-même fonction de leur concentration (Migniot, 1977). L'expérience à l'aide de vases marquées a montré que les courants de marée, même les plus faibles, sont capables de remettre en suspension 85 % de sédiments cohésifs plus ou moins concentrés, mais non consolidés, la rigidité initiale des dépôts étant inférieure à 2 N/m<sup>2</sup>. Lors de cette expérience, la mesure en continu des vitesses de courants près du fond a permis de déterminer la vitesse critique d'érosion U<sub>\*</sub> en fonction du coefficient de marée (tableau 2, d'après Hoslin *et al.*, 1984).

|                                 |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| coefficient de marée            | 42   | 52   | 60   | 68   | 86   | 106  | 112  |
| U <sub>*</sub> en flot (cm/s)   | 0,64 | 0,70 | 0,86 | 0,94 | 1,20 | 1,70 | 1,73 |
| U <sub>*</sub> en jusant (cm/s) | 0,62 | 0,65 | 0,71 | 0,78 | 0,95 | 1,22 | 1,33 |

Tableau 2 - Valeurs de U<sub>\*</sub> en fonction du coefficient de marée

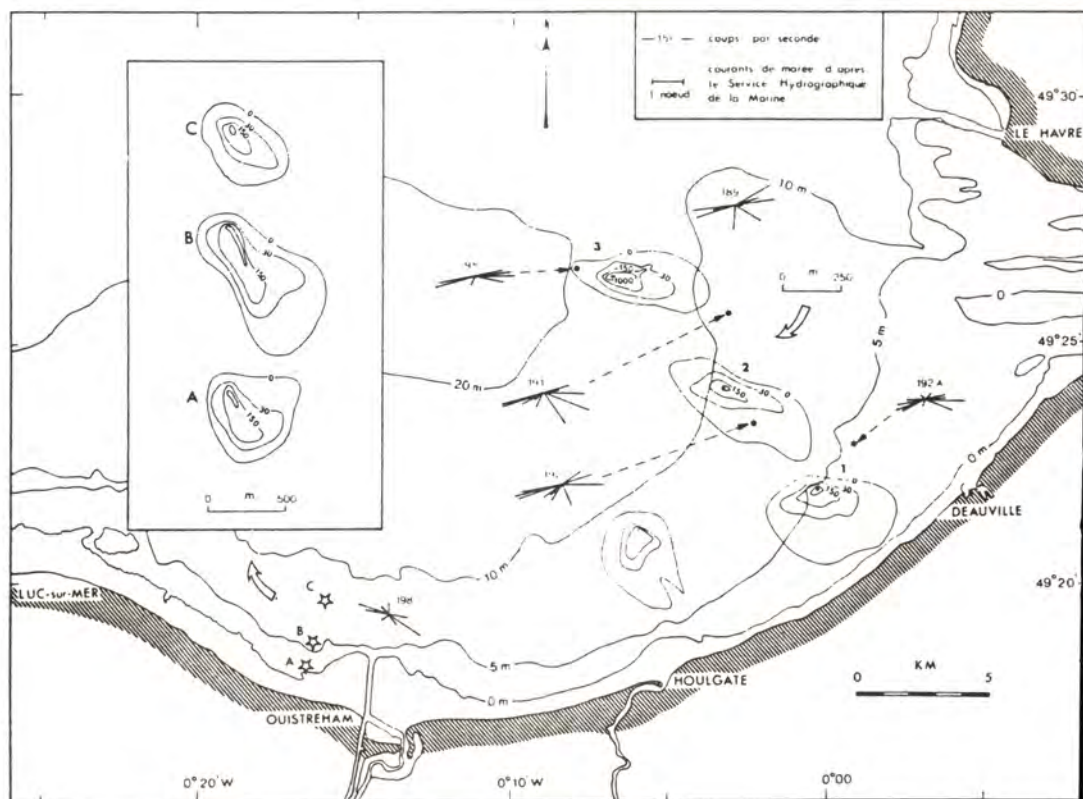


Fig. 2 - Expériences de Ouistreham, Deauville Ouest et Houlgate : courbes isochocs 4 mois après l'immersion des traceurs.

Ces mesures montrent que les vases non consolidées sont remises en suspension pour des valeurs de  $U_*$  très faibles (0,7 cm/s). Une grande mobilité des sédiments vaseux est ainsi mise en évidence ; elles permet de rendre compte des fluctuations saisonnières observées dans la partie orientale de la baie. Les dépôts vaseux résultant d'apports de crue ou de la remobilisation de sédiments fins reliques, sont très instables, particulièrement en période agitée durant laquelle la turbidité des eaux augmente fortement (Avoine *et al.*, 1984).

Dans l'estuaire de la Seine, et plus précisément devant Honfleur, une expérience par traceurs radioactifs a été réalisée en période d'étiage. Elle a permis de déterminer le début d'entraînement, le transport avec début de remise en suspension et le transport en suspension généralisé de particules identiques aux sédiments en place (Caillot, 1982). Il ressort que la vitesse critique d'érosion  $U_*$  doit être trois fois supérieure à celle du début d'entraînement pour obtenir une remise en suspension de 30 à 40 %, soit 3,5 cm/s pour des particules de 0,175 mm, et 4,8 cm/s pour celles de 0,26 mm. Ces valeurs de  $U_*$  correspondent respectivement à des vitesses instantanées à 1 m du fond de 0,7 m/s et de 0,95 m/s. Le transport est généralisé (90 % de remise en suspension) lorsque  $U_*$  dépasse 4,8 cm/s pour les particules de 0,175 mm et 6 cm/s pour celles de 0,26 mm, ce qui équivaut à des vitesses de 0,9 m/s et de 1,1 m/s. Ces résultats se rapprochent des calculs théoriques selon la formule de transport d'Einstein (Caillot, 1982). La pénétration vers l'amont des sédiments marins, observée avec les traceurs radioactifs, est due à l'asymétrie de l'onde de marée qui entraîne dans l'estuaire, sous l'action dominante des courants de flot, un transport résultant supérieur à celui occasionné par les courants de jusant (Avoine *et al.*, ce colloque).



## 1.2. Partie nord-orientale de la baie

Pour mieux connaître les mouvements des produits de dragage du port du Havre, rejetés au large d'Octeville par des fonds de - 14 m, plusieurs expériences par traceurs radioactifs ont été réalisées le long du littoral du Pays de Caux (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1973 ; Tola, 1984). Elles permettent de tirer de précieux enseignements sur les directions de transits sédimentaires dans cette partie de la baie (fig. 1). La première étude consistait à immerger près de la surface, à la hauteur du dépôt de dragages, 70 tonnes de sédiments sablo-vaseux marqués à l'or 198, pendant le flot d'une marée de vives eaux. Cette expérience montre que les vases ont parcouru 7 km vers le NNE en 4 heures, en formant un nuage turbide qui se sédimente progressivement. Les sables rejetés parallèlement se répartissent plus rapidement sur les fonds sur une distance de 1500 m. Une deuxième étude a été entreprise pour suivre l'évolution dans le temps des produits déposés sur le fond. Deux immersions de verre à l'iridium 192, de granulométrie identique à celle des matériaux dragués, ont été effectuées de part et d'autre du dépôt de dragages. Une troisième immersion de sables marqués, de granulométrie proche de celle des sédiments naturels du fond, a été faite au large de Cauville, par des fonds de - 14 m (fig. 1). Il apparaît que les sédiments naturels en place ne subissent qu'un très faible mouvement vers le NNE, comparativement aux matériaux dragués, très mobiles sous les mêmes actions hydrodynamiques. Ainsi, les houles de secteur dominant W à NW font remonter la fraction sableuse la plus fine des produits de dragage en direction de la côte, tandis que la fraction la plus grossière se déplace rapidement vers le NNE dans la direction du flot.

Entre le Havre et Antifer, les expériences par traceurs radioactifs permettent de conclure à un mouvement général des sédiments vers le NE par des fonds inférieurs à - 15 m, ce qui occasionne notamment l'envasement progressif du terminal pétrolier d'Antifer (Crevel, 1983). D'autres expériences, réalisées à la limite du domaine étudié, d'une part au N du terminal pétrolier, d'autre part sur les ridins situés au NE de la baie de Seine (fig. 1), confirment l'existence d'un transit sédimentaire depuis la partie nord-orientale de la baie vers la Manche orientale.

## 2 - DISCUSSION

Les différentes expériences par traceurs radioactifs dans la partie sud-orientale de la baie de Seine montrent que la résultante des transits sédimentaires par charriage est dirigée vers l'est, c'est-à-dire vers l'estuaire de la Seine. Ce transit est dû à l'action des courants de flot dominants. Près du rivage, au-dessus de l'isobathe - 6 m, les fortes houles de secteur ouest à nord-ouest provoquent en outre un déplacement des sables vers la côte, d'autant plus important que la tranche d'eau diminue.

En extrapolant à toute la largeur de l'embouchure (12 km) les débits solides calculés dans les marquages de sables réalisés au NW de Deauville, le volume annuel introduit en charriage dans l'estuaire serait de 65 000 m<sup>3</sup>. Nos résultats montrent également que les sédiments fins de la baie sont aisément remis en suspension par les courants de marée, même les plus faibles. D'après le modèle numérique établi par Salomon et Le Hir (1981) le déplacement résiduel de ces charges turbides s'effectue vers le secteur oriental.

L'ensemble des mouvements sédimentaires mis en évidence contribue donc au comblement de l'estuaire de la Seine, mais certains problèmes se posent.



Les atterrissements annuels évalués par comparaison de relevés bathymétriques (Vigarié, 1964 et 1965 ; Avoine, 1981) sont de l'ordre de 4,5 millions de m<sup>3</sup> (moyenne établie sur la période 1934-1978). Le débit solide de la Seine est au maximum de 0,7 million de m<sup>3</sup>. La majeure partie des dépôts provient donc de la mer. De plus, 0,7 million de m<sup>3</sup> de vase sont dragués annuellement dans l'avant-port du Havre. Ce matériel se rattache directement à celui de l'estuaire de la Seine d'après ses caractéristiques minéralogiques et géochimiques (Avoine, 1981 ; Boust, 1981) ; il s'ajoute donc au bilan positif relevé. Ainsi, c'est environ 4,5 millions de m<sup>3</sup> de sédiments qui proviennent annuellement de l'horizon marin.

Dans ces apports, les données de Volmat (1929) et les travaux synthétiques du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1973 et 1980) montrent que l'érosion côtière ne contribue que pour 200 000 à 300 000 m<sup>3</sup>/an qui se répartissent comme suit :

- 60 000 à 100 000 m<sup>3</sup> de sable provenant des falaises du Pays de Caux entre Le Havre et le cap d'Antifer,
- 200 000 m<sup>3</sup> environ de matériaux (suspensions surtout) issus de l'érosion du littoral du Calvados entre Ouistreham et Honfleur.

L'essentiel des transits sédimentaires s'effectue donc en domaine subtidal. Compte-tenu des volumes impliqués et rapportés ci-dessus, le transport en charriage établi à l'aide des traceurs radioactifs (65 000 m<sup>3</sup>/an) apparaît sous-estimé. Cependant, il est probable que dans l'estuaire la majeure partie du matériel est introduite en suspension.

L'origine de ces sédiments peut maintenant être posée. Dès 1929, Volmat suggérait une érosion des fonds de la baie de Seine orientale à l'est du méridien d'Houlgate. Il se basait sur la comparaison de relevés bathymétriques successifs et concluait à un abaissement moyen des fonds de 0,68 m pour la période 1834-1913. C'est un chiffre voisin de 1cm/an. Sachant que la surface considérée (limitée au Nord par le parallèle du Havre) est d'environ 170 millions de m<sup>2</sup>, on obtient ainsi un démaigrissement annuel de l'ordre de 1,7 millions de m<sup>3</sup>. En élargissant le périmètre intéressé à une ligne joignant Le Havre - Le Parfond - Luc-sur-Mer (extrémité orientale des rochers du Calvados) l'érosion annuelle s'élève à 3 millions de m<sup>3</sup>. Ces chiffres sont évidemment à prendre avec les plus grandes réserves sachant que les conclusions de Volmat demandent à être vérifiées et que s'il y a érosion, elle doit être très inégalement répartie. Néanmoins, ils aboutissent à des volumes dont l'ordre de grandeur est proche de celui que nécessitent les atterrissements dans l'estuaire de la Seine. Une érosion de la partie sud-orientale de la baie de Seine est donc très probable, le prisme sédimentaire holocène y est d'ailleurs mince (Auffret et d'Ozouville, ce colloque), les formations argilo-tourbeuses post-glaciaires affleurent largement (Avoine, 1981). Cette hypothèse n'exclut pas des apports en suspension d'origine plus lointaine venant sédimenter dans un fond de baie de moyenne à faible énergie. De tels apports sont prouvés par la présence de radionucléides issus des rejets de La Hague dans les sédiments fins de la zone considérée (Guéguénat *et al.*, 1979 ; Jeandel *et al.*, 1980). Par contre, une alimentation par charriage de la baie de Seine sud-orientale doit être probablement très faible. La contribution des apports du large par rapport aux sources proximales est inconnue de même que la production biologique qui représente 20 à 25 % du matériel sédimenté.

Il faut encore noter que la possibilité d'une alimentation par des sédiments de la partie nord-orientale de la baie semble à exclure, compte tenu des résultats obtenus par les traceurs radioactifs montrant dans ce secteur



un transit sédimentaire général vers le NNE, par des fonds inférieurs à - 15 m. D'autres travaux permettent de confirmer cette tendance, en particulier le calcul de l'intégrale de sollicitation au transport d'après un modèle numérique de courants (Salomon et Le Hir 1981), ainsi que la mesure des flux résiduels de sédiments en suspension en différents points du littoral entre Le Havre et Antifer (Crevel, 1983). Ces travaux montrent cependant que les mouvements sédimentaires, pour l'essentiel du sud vers le nord au-dessus de - 15 m, s'inversent au-delà ; l'ampleur de ce transit du N vers le S doit toutefois être modérée.

En considérant l'ensemble de la baie de Seine orientale, entre le cap d'Antifer et l'embouchure de l'Orne, c'est-à-dire en prenant en compte les atterrissements dans les petits estuaires du Calvados (Orne, Dives, Touques), le volume des apports marins annuels est d'environ 5 millions de m<sup>3</sup>. A ce rythme, le prisme sédimentaire accumulé dans la partie orientale de la baie de Seine s'est considérablement appauvri au cours des derniers siècles tandis que se colmataient les estuaires, celui de la Seine principalement.

---

AUFFRET J.-P. et d'OZOUVILLE L. (1985).- Cartographie du prisme sédimentaire holocène en Baie de Seine orientale, par sismique réflexion à haute définition. Ce volume, N° 8.

AVOINE J. (1981).- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 236 p.

AVOINE J., CREVEL L., DUBRULLE L., BOUST D. et GUEGUENIAT P. (1984).- Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. XVIIIème Journées de l'hydraulique, Marseille, p. I.3.1. - I.3.8.

AVOINE J., DUBRULLE L. et LARSONNEUR C. (1985).- La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la Baie de Seine - conséquences sur l'environnement. Ce volume, N° 16.

BOUST D. (1981).- Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse 3ème cycle, Caen, 186 p.

CAILLOT A. (1982).- Quelques emplois de traceurs radioactifs en milieu estuarien. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S. n°144, p. 111-115.

CAILLOT A. (1983).- Guidebook on nuclear techniques in geology. Techn. Rep. Ser. 91, AIEA, p. 109-128.

COURTOIS G. et MONACO A. (1969).- Radioactive methods for the quantitative determination of coastal drift. Mar. Geol., Vol. 7, p. 183-206.

CREVEL L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse 3ème cycle, Caen, 164 p.

GUEGUENIAT P., AUFFRET J.-P. et BARON Y. (1979).- Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans les sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976-1977-1978. Oceanol. Acta, vol. 2, n°2, p.165-180.

HEATHERSHAW A.D. (1981).- Comparisons of measured and predicted sediment transport rates in tidal currents. In : Sedimentary dynamics of continental shelves, Mar. Geol. sp. iss., vol. 42, n°1/4, p. 75-104.

- HOSLIN R., MASSIAS J., PUJOL J.-P., REGNARD P. et ROLL T. (1984).- Etude au moyen de traceurs radioactifs des mouvements sédimentaires en baie de Seine. Rap. ronéot., CEA/ORIS/SAR/S/84-09/H 47, Saclay, 27 p.
- JEANDEL C., MARTIN J.M. et THOMAS A.J. (1980).- Origine et comportement des isotopes du plutonium et du césium 137 dans l'estuaire de la Seine. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 291, p. 125-128.
- LABORATOIRE CENTRAL d'HYDRAULIQUE de FRANCE (1973).- Etude du littoral entre le Havre et Antifer. Rap. ronéot., Maisons-Alfort.
- LABORATOIRE CENTRAL d'HYDRAULIQUE de FRANCE (1980).- Catalogue sédimentologique des côtes de France : de l'estuaire de la Seine à la baie du Mont-Saint-Michel. Rap. ronéot., Maisons-Alfort.
- MIGNIOT C. (1977).- Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments. Houille Blanche, n°1, p. 9-47.
- SALOMON J.C. et LE HIR P. (1981).- Etude de l'estuaire de la Seine : modélisation numérique des phénomènes physiques. Rap. ronéot., Univ. Bretagne occidentale, 286 p.
- TOLA F. (1984).- Etude du rejet de produits de dragage à l'aide de traceurs radioactifs. Transfert et dispersion des fines particules en suspension et évolution dans le temps des sédiments déposés sur le fond. XVIIIème Journées de l'Hydraulique, Marseille, p. I.15.1-I.15.8.
- VIGARIE A. (1964).- Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine. Thèse compl., Paris, 239 p.
- VIGARIE A. (1965).- Les modalités du remblaiement alluvial dans l'estuaire de la Seine. Cah. Océanogr., vol. XIV, n°5, p. 301-330.
- VOLMAT M. (1929).- Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22e Cah. Rech. Hydr. sur le régime des côtes, Paris, Imp. Nat., 39 p.



SEDIMENT AND WATER MOVEMENT IN COASTAL EMBAYMENTS.

COLLINS M.\*

Embayments are shallow water inner continental shelf environments which include deltas, estuaries and intertidal flats; they are located within a coastal zone where frictionally-dominated flows are predominant (Gorsline & Swift, 1977)(Fig. 1). The energy inputs to such systems is highly variable and, consequently, some of the sedimentary processes which take place are more understandable and predictable than others.

In terms of attempts to generalise the characteristics of such environments analyses have been carried out which classify deltas in terms of climate, tectonics, fluvial regime, sediment input, and receiving basin characteristics (Elliot, 1978). In contrast, embayments vary considerably in their physical characteristics and in the way in which energy inputs combine to transport sediment. Transport processes which take place in embayments are the result of tidally- and wave-induced currents, river inputs, and relative changes in sea level in response to eustatic or isostatic movement; these characteristics can be used to define the *regime* of an embayment. Tidal influence can be classified in terms of its' spring tidal range or as microtidal (<2m), mesotidal (2-4m) or macrotidal (>4m)(Davies, 1964). Regions of high tidal range are characterised by broad intertidal coastal zones, with the associated dissipation of wave energy. In areas of low tidal range, there is less dissipation of wave

---

\* Department of Oceanography, University College, Swansea, SA2 8PP, Wales, U.K.

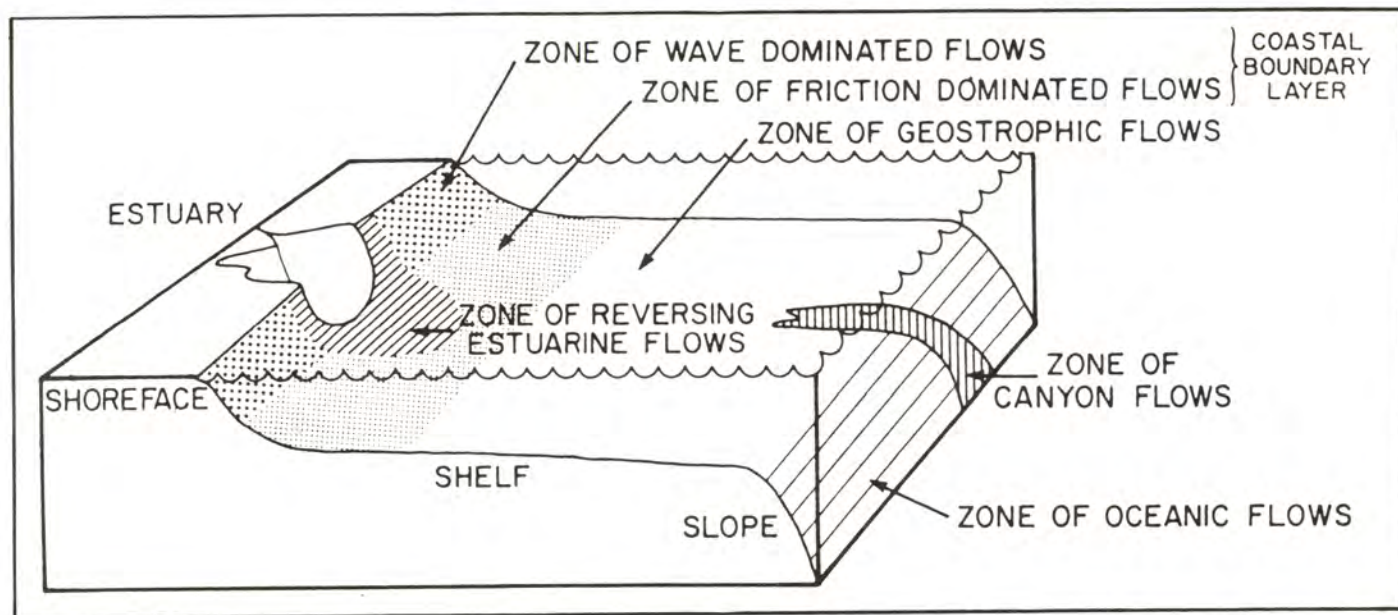


Figure 1. Geomorphic units of the continental shelf and associated hydrodynamic zones (from Gorsline and Swift (Eds.). *Shelf Sediment Dynamics: A National Overview*, 1977).



energy and its' concentration results in the erosion of any cliffed coastline.

Wave action at a coastline, within an embayment, is a more difficult variable to quantify, than the tidal characteristics. 'Typical' wave conditions for the design of coastal engineering works are taken sometimes as the 'significant wave' height ( $H_{1/3}$ ), which represents the mean height of the highest  $1/3$  of the wave height spectra. Even this does not represent, however, the extreme storm events which can drastically influence the movement of sedimentary material in coastal waters. In addition to the effects of wave heights and their breaking characteristics on the shoreline, the obliqueness of wave approach to the coastline generates longshore currents within the nearshore zone. Mass movement of water towards the coastline, caused by waves, can be associated with rip currents. Such currents return the water in an offshore direction as a concentrated flow (Mackenzie, 1958).

In an attempt to understand the broad pattern of wave/current interactions on the inner shelf, it has been suggested that currents are more effective in shaping the sea floor, than in developing the coastal configuration. The configuration is considered to be the result of refracted wave patterns (Bird, 1983). Currents are the mechanism, therefore, by which sediments are removed from a coastal zone which has been eroded by waves. In terms of research commitment, the superimposed effect of waves on currents has received less attention than research on currents and waves as independent sediment transporting mechanisms. Nevertheless, their combined influence can create considerable variability in the predicted transport paths for material moving as bedload (see below); this could be an important factor in understanding long-term patterns of

accumulation or erosion of sedimentary material (Pattiaratchi & Collins, 1984).

Fluvial discharge and its seasonal variability also influences sedimentary processes in embayments. Rivers need act not only as the source of supply of fine- or coarse-grained sediments to the shallow marine environment, but can create plumes of low salinity surface waters which extend over large areas of the adjacent sea bed: these waters overlies the more saline waters originating from offshore. Such surface layers can influence mixing processes within the near-surface waters and also inhibit the transfer of energy, from the air/sea boundary and through the water column, to the sea bed (Sultan *et al.*, 1984).

The energy inputs to embayments, described above, vary in temporal and spatial intensity; this is reflected in suspended sediment and bed load transport paths and rates. Although interdisciplinary and detailed studies have been carried out on specific embayments (Collins *et al.*, 1980; Conomos, 1979), such as the Baie de Seine, some research has concentrated upon the transport processes themselves. Hence, the Gulf du Lion (southwestern France) and the Gulf de Gascogne (Atlantic seaboard of France) are considered to be embayments which are dominated by wave action, on the basis of the onshore/offshore gradients in the texture of the sediments and the superimposed wave power. Conversely, and on the same comparative basis, Carmarthen Bay (southwestern British Isles) and the North Yorkshire (U.K.) Shelf of the North Sea are considered to be tidally-dominated areas in terms of sediment transport (Jago & Barusseau, 1981, 1983). In spite of these attempts to subdivide the inner continental shelf areas into dynamic categories, however, there is still a considerable amount of debate on the



subject of the geological implications of the dominance of wave- over tidally-induced processes at the coastline (Davis & Hayes, 1984).

Against a background of their response to tidal and wave energy inputs, embayments can also be areas of transient sediment storage and through which material passes either from offshore to onshore or in the opposite direction. In the case of transfer towards the coastline, waves can provide the energy to move material from an adjacent sea bed to the nearshore zone. In the case of movement in an offshore direction, river-borne sediments are supplied to the coastline and transported subsequently offshore. Embayments will now be described here to illustrate these contrasting sets of sedimentological conditions and demonstrate how embayments, such as the Baie de Seine, form part of a much larger sedimentary system. A range of scientific approaches and expertise have been incorporated into the investigations which will be described. The techniques include: numerical and physical modelling; the measurement of currents, using direct reading or self-recording current meters; the deployment and recovery of drogues and drifters; dye tracing, to examine surface water movement and dispersion processes; sedimentological analyses, including those for grain size and heavy mineral concentration; geophysical investigations; and the application of spaceborne and airborne remote sensing. Details of the way in which these approaches have been adapted for use in the research of embayments are contained within the various publications cited.

The first area to be considered is *Swansea Bay*, which is a highly industrialised embayment situated along the northern coastline of the Bristol Channel, southwestern British Isles (Fig. 2). The region is one of high tidal and wave energy. Spring tidal ranges are of the order of 10m.

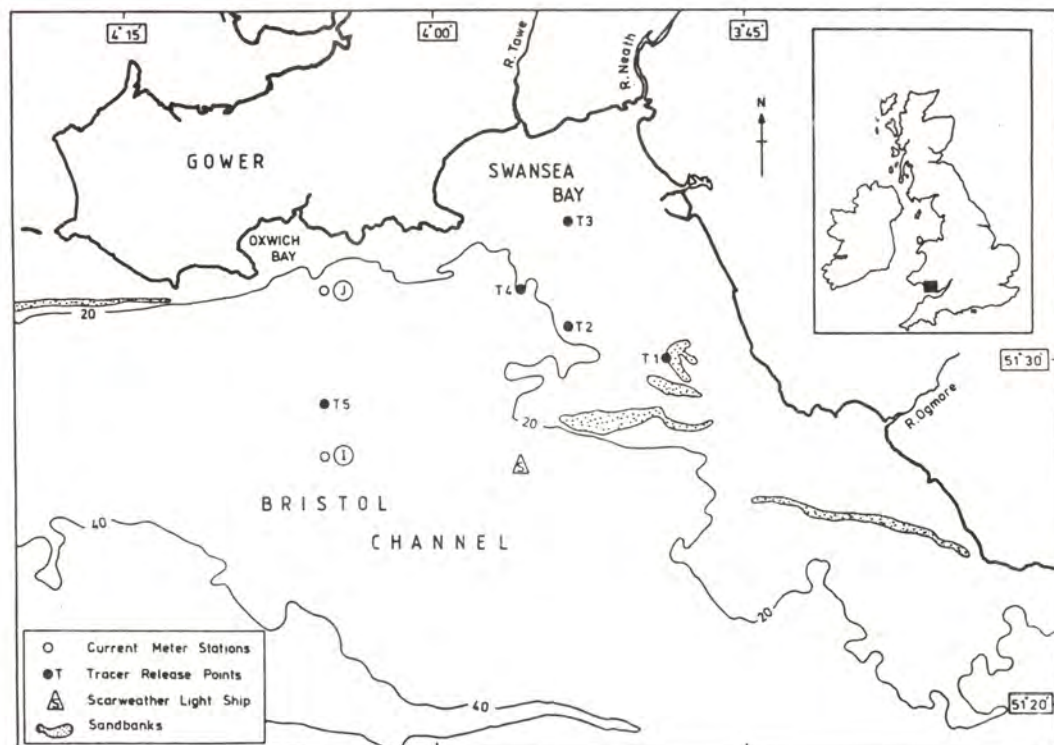


Figure 2. Swansea Bay and the adjacent northern Bristol Channel showing rivers and oceanographic monitoring stations.

Key: tracer release points ( $T_1$  to  $T_5$ ); self-recording current meter stations (I and J); (Scarweather) Light Vessel (S) and sandbanks (shaded).  $T_1$  is the release position for Scandium<sup>46</sup> tracer, with a mean grain size of  $170\mu\text{m}$ ;  $T_5$  the position of release of fluorescent sand ( $400\mu\text{m}$ ).

Bathymetry is in metres above Chart Datum.



with maximum observed wave heights of the same order of magnitude and with their origin out in the Atlantic Ocean. Minor low freshwater discharges enter the area, with annual sediment inputs only of the order of 75,000 tonnes. It has been estimated that such an input of material would increase the suspended sediment concentration in the waters of the embayment by only 0.25mg/l at any one instant in time (Collins, Ferentinos & Banner, 1979).

Sediment transport processes within Swansea Bay and the adjacent Bristol Channel have been examined by various investigators often resulting in contradictory interpretations of transport paths (Harris & Collins, 1985). Foraminiferal and sedimentological evidence has inferred, for example, that material has been transported, on a long-term basis, from offshore to onshore (Culver, 1980). In contrast, the orientation of large-scale bedforms (Culver *op.cit.*) and bed-load sediment transport paths predicted from recent self-recording current meter data show transport is in the opposite direction (Heathershaw, 1981). These apparently contradictory inferred directions of transport emphasise the need to examine the influence of 'extreme' or 'storm' events, caused by the superimposition of wave activity upon that of currents, on embayments.

Similar tracer studies carried out in the Swansea Bay area indicate changes in sediment transport paths and rates which can take place under the influence of extreme wave action. In 1975 and 1976 material of size ? was treated with Scandium<sup>46</sup> and released on to the sea bed; its movement was monitored then over a 12-month period (Heathershaw and Carr, 1977). The results of this investigation showed two long-term trends in the transport paths (Fig. 4). One direction of transport was related to the orientation of the main tidal flow; the other to the direction of approach of

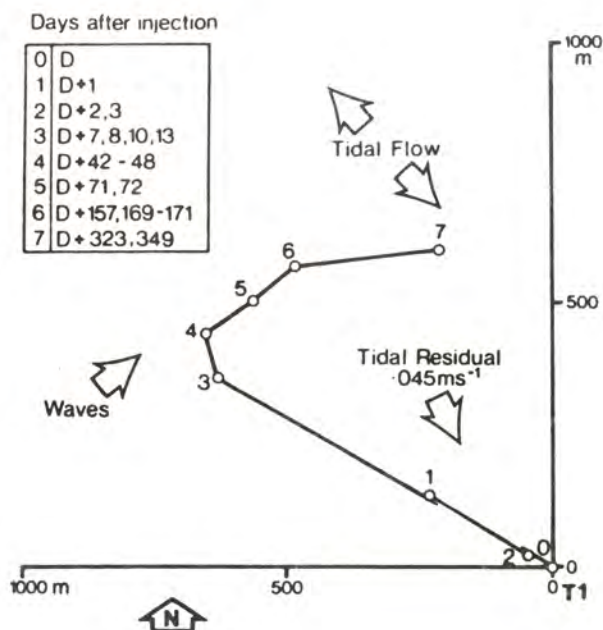


Figure 3. Movement of the tracer at Site  $T_1$  (for location, see Fig. 2), over a 349-day period (from Heathershaw and Carr, 1977).

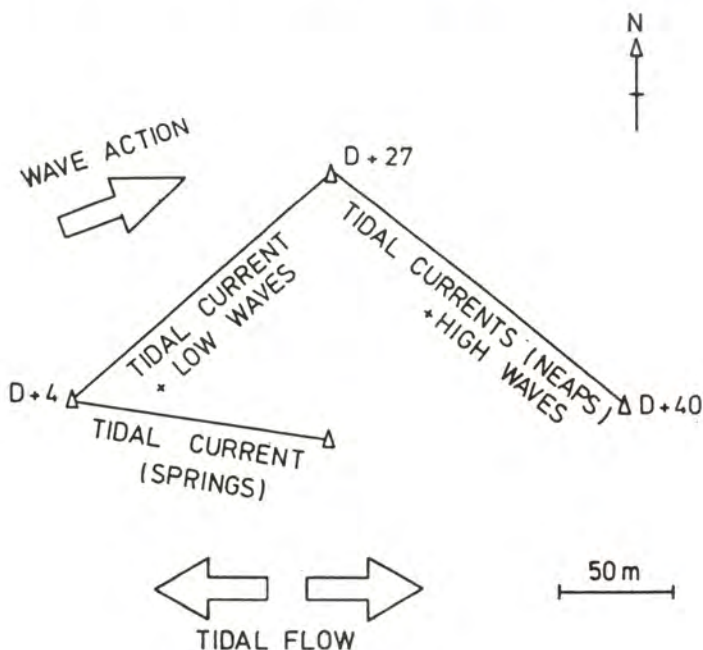


Figure 4. Movement of the tracer at Site  $T_5$  (for location, see Fig. 2), over a 40-day period (from Pattiaratchi and Collins, *Marine Geology*, 1984).



southwesterly swell waves from the Atlantic (Fig. 3). A similar study was carried out in 1976, but involved the release of 1 tonne of fluorescent sand onto the sea bed. Subsequent monitoring of the movement of the centroid of the deposit took place over a 40-day period. The results demonstrated the immediate response of loosely-consolidated material on the sea bed, to wave action. During the first part of the monitoring period, over the first 4 days (up to D+4), movement of the tracer follows the spring tidal current direction. From D+4 to D+27, movement is in response to the combined action of current and waves. Similarly, between D+27 and D+40, the tracer responds to high wave energy input superimposed upon neap tidal currents. It should be noted that there is almost complete opposition between bed load transport directions under spring tidal conditions, in the absence of waves, and neap tides under the influence of waves (Fig. 4). The varying transport directions identified during the fluorescent tracer study were confirmed subsequently by using self-recording current meter data (for location see Fig. 2) for the application of bed load transport formulae for movement of sediment under the combined influence of waves and currents (Pattiaratchi & Collins, 1984; 1985). At a current meter station located within 30m of water (Fig. 2), the predicted transport was towards the west under spring tidal conditions alone, but towards the east when waves were superimposed upon neap tides (Fig. 5). Measured and predicted transport paths can be used, in this way, to understand regional sediment transport pathways (Fig. 6). These data emphasise the important concept that directions of sediment movement can change in the presence of waves. The embayment itself (*Swansea Bay*) is representative of a coastal zone where net long-term sediment transport is to landward.

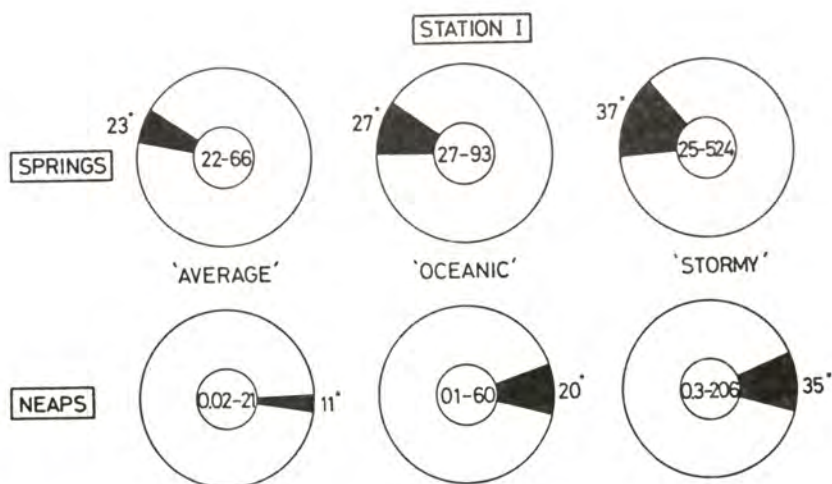


Figure 5. Station I (see Fig. 2): Summary of predicted bedload transport vectors under the combined influence of waves and currents, based upon the formulae of Bagnold, Bijker and Madsen and Grant (from Pattiaratchi and Collins, *Marine Geology*, 1984).

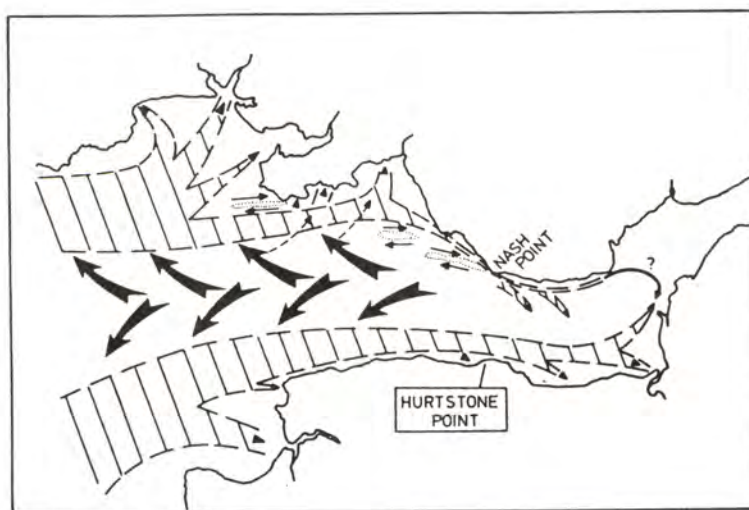


Figure 6. Conjectural near-bottom drift in the Bristol Channel, as indicated by sea bed drifter patterns. Ebb-dominated flow is located within the central part of the Channel. Flood-dominated zones are present along the northern and southern coastlines; these are created by the combined influence of tidal currents and waves (from Collins and Ferentinos *Oceanologica Acta*, 1984).



Another area for consideration is *Thermaikos Bay (Gulf)* in the northwestern part of the Aegean Sea, eastern Mediterranean. A series of shallow water embayments or gulfs receive fine-grained sediment input from two major river systems (Axios and Aliakmon). The rivers have formed, through deposition of sediment at their mouths, bird-foot type delta systems. (Fig. 7). The catchment area of the River Axios extends to the mountainous regions of Yugoslavia and, in response to snowmelt on the mountains, the maximum sediment/water discharge occurs in April. In contrast, the River Aliakmon is smaller and has a catchment area which is more confined to the coastal zone; this responds to localised rainfall, with peak discharges occurring in February/March (Fig. 8) (Robles *et al.*, 1983).

The Aegean region is one in which the influence of river sediment inputs can be identified to as far back as 500 B.C. (Conispoliatis, 1979) and, during certain seasons of the year, the complete embayment is overlain by low salinity and highly turbid waters originating from the river systems (see Fig. 9, representing surface water salinities in February). Such plumes from the river systems vary in their areal extent, both seasonally and in direct and relatively immediate response to local wind conditions (Collins, 1983; Balopoulos *et al.*, 1985). Fluvial sediments have been and are being deposited over the beds of the adjacent inner and outer embayments (Conispoliatis, 1983); they have been identified, on the basis of the clay mineral distributions, further offshore in water depths of around 1500m (Lykousis *et al.*, 1981). The embayments form, therefore, an area for the temporary storage of fine-grained sediments; these are eventually transported offshore.

Offshore transport of sediments is effected by turbidity currents, in a tectonically-active region of the eastern Mediterranean Sea (Ferentinos

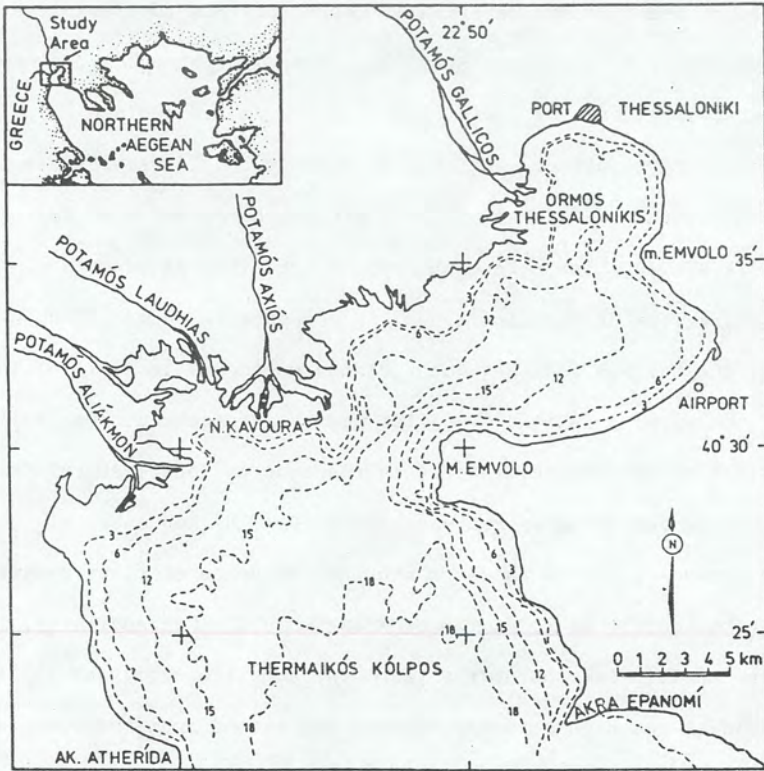


Figure 7. The location and bathymetry of Thermaikos Bay, northwestern Aegean Sea. Bathymetry in fathoms, abstracted from Greek Government Hydrographic Chart, 1959. The river systems (Gallicos, Axios, Laudhias and Aliakmon) and their associated deltas are shown.

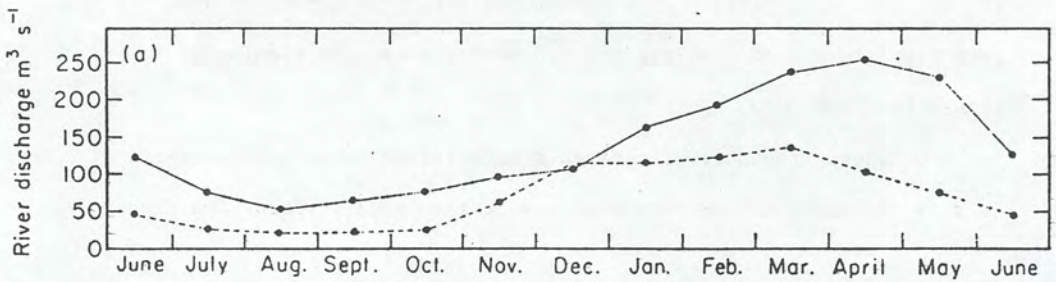


Figure 8. Mean monthly discharge information ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) from the rivers Axios (—) and Aliakmon (---), 1962/63 - 1970/71 (from Robles *et al.*, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1983).



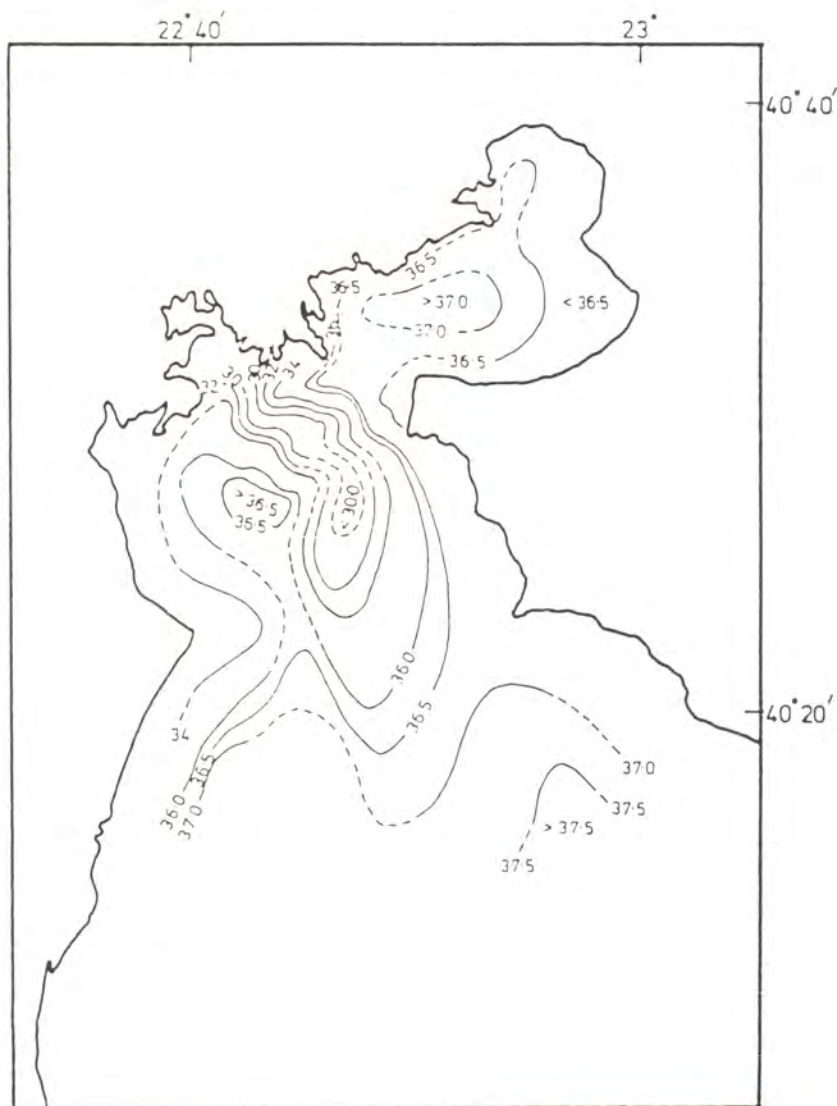


Figure 9. Surface water salinities in the Thermaikos Bay (Gulf), in ‰, showing the extent of the low salinity 'plume' from the mouth of the R. Axios, February 1976 (from Robles *et al.*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983).

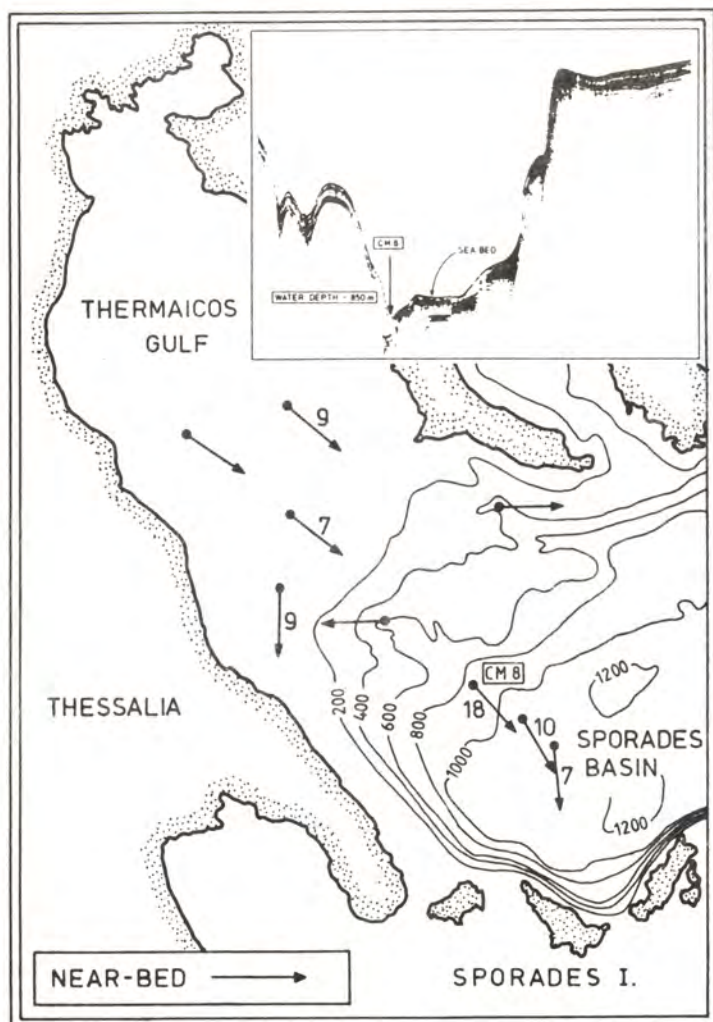


Figure 10. Near-bed residual currents in the N.W. Aegean Sea, obtained from self-recording current meters. Arrows show directions of the residuals; associated arrows the magnitude of the residual speed, in  $\text{cms}^{-1}$ . Inset to the Figure shows the submarine canyon bathymetry in the vicinity of current meter (CM) 8, from shallow seismic (3.5kHz) survey data. Bathymetry is in metres. (Current meter data supplied by C.B. Pattiaratchi, based upon observations made during RRS *Discovery* Cruise 137).



*et al.*, 1981), and within near-bed water movements, self-recording current meter observations from the area have shown there to be residual water movement in an offshore direction, extending along the axis of a submarine canyon (Fig. 10). A similar mechanism for the transfer of fine-grained material from the continental shelf to an adjacent perched deep-water basin (1800m in depth) has been identified for the Zakynthos Valley/Canyon system in the eastern Ionian Sea, western Greece (Ferentinos *et al.*, 1985).

The transport of fine-grained material, of fluvial origin, across the continental shelf/ slope and through the submarine canyons of the Aegean Sea constitutes a regional pattern of sediment movement (Fig. 11). Within this pattern, the embayments are areas through which transport takes place, from landward to seaward.

Transport systems along the western coastline of the United States are similar to those in the Aegean Sea and are where littoral cells are formed. Each cell consists of: input of sediment from longshore transport within the littoral zone, sometimes associated with an embayed coastline; and offshore movement through a submarine canyon system (Fig. 12). The canyons in this latter area, in contrast to those in the Aegean, act as conduits for coarse-grained material. Another example of the investigation of a complete sedimentary system is the study of benthic biological activity in Suruga and Sagami Bays, central Japan; this is providing information to establish the basic framework for the understanding of sediment movement within the adjacent troughs and basins (Okada & Ohta, 1983).

The detailed investigations described above, relating to *Swansea Bay* and *Thermaikos Bays* demonstrate that processes which take place in embayments, particularly those concerned with water and sediment movement, represent only a constituent part of a much larger transport system.

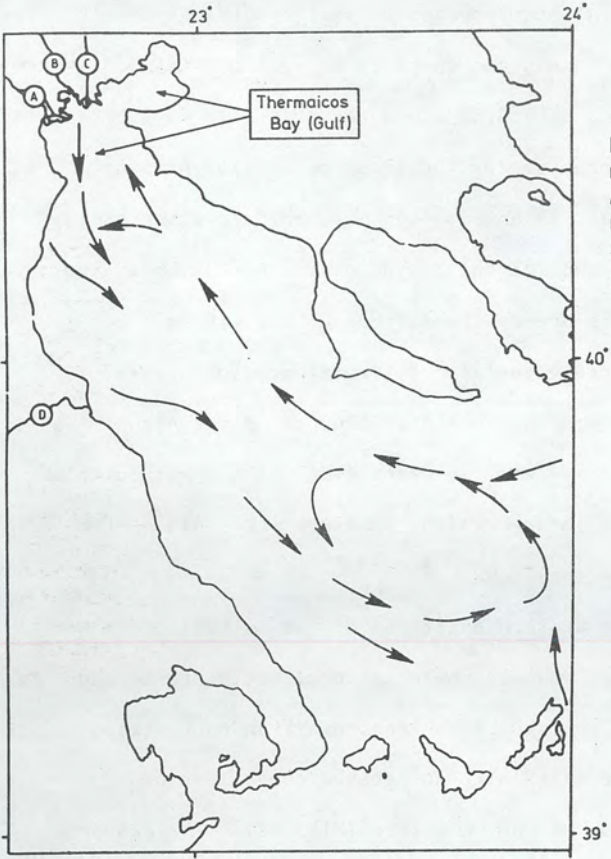


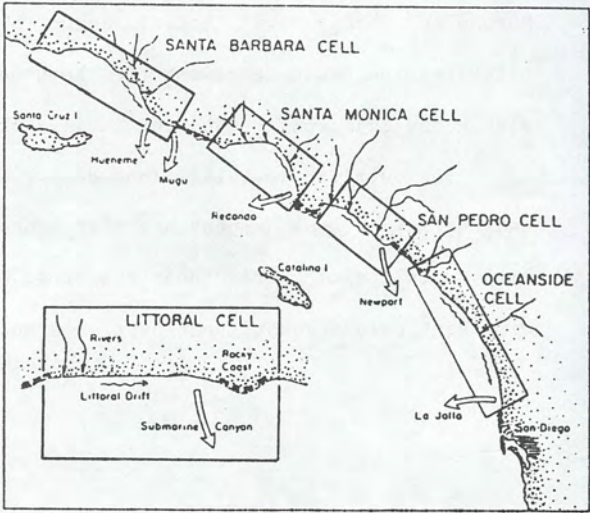
Figure 11

Pattern of surface residual water movement over the northwestern Aegean Sea, inferred from the mineralogy of the fine-grained bottom sediments.

Key : A = R. Gallicos; B = R. Axios; C = R. Aliakmon; D = R. Pinios.

Figure 12

The southern California coast divided into a series of cells, each cell being a system where rivers add sand to the beaches and the sand moves south as littoral drift to be trapped within submarine canyons and lost offshore to deep water (from Komar, 1976).





Transport of sediment can take place from onshore to offshore, through embayments within the coastal zones, where there are major river inputs. From an offshore source of supply, material can move in the opposite direction, to create coastal environments of net deposition.

#### CONCLUSION

- (i) that the superimposed effect of waves should be considered, in inner continental shelf areas which are dominated apparently by tidal currents, to establish the long-term effects of storm activity;
- and (ii) that embayments form part of much larger sediment transport systems and, consequently, require understanding within their regional setting.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The author thanks warmly Jan Greengo and Keith Naylor for their typing and draughting assistance, respectively.

---

Balopoulos, E.Th., Collins, M.B. & James, A.E. 1985. Satellite images and their use in the numerical modelling of coastal processes. Int. Jnl. Remote Sensing (in press).

Bird, C.F. 1983. Coasts: An Introduction to Coastal Geomorphology, (3rd Edition), Blackwell, Oxford, 320pp.

Collins, M. 1983. The application of satellite imagery to sedimentological investigations on the continental shelf. In: Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea, China Ocean Press (Beijing)/Springer Verlag (Berlin), 893-919.

- Collins, M.B., Banner, F.T., Tyler, P.A., Wakefield, S.J. & James, A.E. (Eds.). 1980. Industrialised Embayments and their Environmental Problems: A Case Study of Swansea Bay. Pergamon Press, Oxford, 616pp.
- Collins, M.B., Ferentinos, G. & Banner, F.T. 1979. The hydrodynamics of a high (tidal and wave) energy embayment (Swansea Bay, northern Bristol Channel), U.K. Estuarine & Coast. Mar. Sci., 8, 49-74.
- Conispoliatis, N. 1979. Sedimentology and Mineralogy of Thermaikos Bay, N.W. Aegean Sea. Unpub. M.Sc. Thesis, University of Wales, 133pp.
- Conispoliatis, N.K. 1983. The distribution of clay minerals in the recent surface sediments of the Thermaikos Bay. OPYKTO OYTO, 22, 37-46.
- Conomos, T.J. (Ed.). 1979. San Francisco Bay: The Urbanised Estuary. American Association for the Advancement of Science, 493pp.
- Culver, S.J. 1980. Differential two-way sediment transport in the Bristol Channel and Severn Estuary, U.K. Marine Geology, 34, M39-M43.
- Davies, J.L. 1964. A morphogenetic approach to world shorelines. Zeits. Geomorph., 8, (Sp. No.), 127-142.
- Davis, R.A. Jr. & Hayes, M.O. 1984. What is a wave-dominated coast? Marine Geology, 60, 313-329.
- Elliot, T. 1978. Deltas. In: Reading, H.G. (Ed.). Sedimentary Environments and Facies. Blackwell Scientific Publications, 97-142.
- Ferentinos, G., Brooks, M. & Collins, M.B. 1981. Gravity-induced deformation on the north flank and floor of the Sporhades Basin of the North Aegean Trough. Marine Geology, 44, 289-302.
- Ferentinos, G., Collins, M.B., Pattiaratchi, C.B. & Taylor, P. 1985. Mechanisms of sediment transport and dispersion in a tectonically active submarine/valley canyon system: Zakynthos Straits, N.W. Hellenic Trench. Marine Geology, 65, 243-269.



- Gorsline, D.S. & Swift, D.J.P. (Eds.). 1977. Continental Shelf Dynamics: A National Overview. Report of a Workshop, Colorado, NSF, U.S.A., 134pp.
- Harris, P.T. & Collins, M.B. 1985. Bedform distributions and sediment transport paths in the Bristol Channel and Severn Estuary, U.K., Marine Geology, 62, 153-166.
- Heathershaw, A.D. 1981. Comparisons of measured and predicted sediment transport rates in tidal currents. In: Nittrouer, C.A. (Ed.). Sedimentary Dynamics of Continental Shelves, Elsevier, Amsterdam, 75-104.
- Heathershaw, A.D. & Carr, A.P. 1977. Measurements of sediment transport rates using radioactive tracers. Coastal Sediments '77, ASCE/Charleston, S. Carolina, Nov. 2-4, 1977, 399-416.
- Jago, C.F. & Barusseau, J.P. 1981. Sediment entrainment on a wave-graded shelf. In: Nittrouer, C.A. (Ed.). Sedimentary Dynamics of Continental Shelves, Elsevier, Amsterdam, 279-299.
- Jago, C.F. & Barusseau, J.P. 1983. Shore-normal textural gradients of inner continental shelves. In: Sedimentation on the Continental Shelf, With Special Reference to the East China Sea. China Ocean Press (Beijing)/Springer Verlag (Berlin), 877-892.
- Komar, P.D. 1976. Beach processes and Sedimentation, Prentice-Hall, New Jersey, 429pp.
- Lykousis, V., Collins, M.B. & Ferentinos, G. 1981. Modern sedimentation in the N.W. Aegean Sea. Marine Geology, 43, 111-130.
- Mackenzie, J.D. 1958. Rip Current Systems, J. Geol., 66(2), 103-113.

- Okada, H. & Ohta, S. 1983. Benthic biological activity. In: Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, China Ocean Press (Beijing)/Springer Verlag (Berlin), 93-105.
- Pattiaratchi, C.B. & Collins, M.B. 1984. Sediment transport under waves and currents: a case study from the northern Bristol Channel, U.K. Marine Geology, 56, 27-40.
- Pattiaratchi, C.B. & Collins, M.B. 1985. Sand transport under the combined influence of waves and tidal currents: an assessment of available formulae. Marine Geology, 67, 83-100.
- Robles, F.L.E., Collins, M.B. & Ferentinos, G. 1983. Water masses in Salonica Bay and Thermaikos Bay (northwestern Aegean Sea), Estuarine Coast. & Shelf Sci., 16, 363-378.
- Sultan, S.A.R., James, A.E. & Collins, M.B. 1984. A note on processes influencing the mixed layer depth in the northwestern Aegean Sea. Thalassografica, 7, 5-18.



## DYNAMIQUE DES SUSPENSIONS ET DES DEPOTS : SYNTHESE DES DISCUSSIONS

LARSONNEUR C.\*

Les nombreux acquis en matière de dynamique des suspensions et des dépôts n'ont pas tous donné lieu à discussion. Au cours des débats, les observations ont surtout porté sur les bilans, sur l'influence importante mais mal connue des houles, sur la délicate question des mouvements sédimentaires entre Le Havre et le cap d'Antifer et sur l'étude des flux de sédimentation déduits de l'analyse des matières en suspension. Des remarques générales ont également été formulées, une distinction des principaux types d'embouchures fluviales sur le littoral français a été proposée (C. Latouche).

Parmi les technologies modernes mises en oeuvre dans le programme Baie de Seine figurent l'utilisation des traceurs radioactifs et celle des images par satellites.

Pour J.L. Mauvais, compte-tenu des incertitudes sur les formules de transports, les marqueurs radioactifs constituent l'un des seuls moyens de mesures corrects. Il est dommage que nous n'ayons pas, en France, suffisamment de dynamiciens pour exploiter les résultats et valoriser cette technologie avancée. En matière de télédétection, les dépouillements nombreux réalisés à l'IFREMER-Brest montrent qu'il est actuellement difficile d'appréhender la dynamique des masses d'eau avec les images disponibles qui sont trop largement séparées dans le temps. Seule l'analyse de situations rapprochées permettra d'aboutir à de fructueuses interprétations (J.L. Mauvais).

L'emploi du Sonar à balayage latéral s'est révélé particulièrement intéressant pour l'étude des mouvements sédimentaires. Par exemple, J.P. Auffret précise que des surfaces lisses par beau temps font place, après tempête, à des surfaces ondulées, ornées de rubans de sédiments vaseux. De son côté, J.C. Salomon observe que les zones à rubans sableux sont celles où les trajectoires de courants au cours de la marée sont linéaires; là où elles sont elliptiques, il n'y a pas de rubans.

L'étude des particules en suspension a conduit J.C. Brun-Cottan et M. Ben Brahim à une évaluation des flux de sédimentation dans les conditions de la campagne Elie de décembre 1983 (vive eau, étiage). Cette intéressante démarche s'appuie sur des mesures de tailles de particules et sur des évaluations concernant les concentrations pondérales qui ne sont pas en accord avec les résultats acquis par J.P. Dupont, R. Lafite et M. Lamboy. Dans une intervention très argumentée, M. Lamboy formule les observations suivantes :

### 1. TAILLE DES SUSPENSIONS

J.C. Brun-Cottan et M. Ben Brahim estiment que le diamètre moyen des particules en suspension varie de 78  $\mu\text{m}$  dans les eaux les plus douces à 33  $\mu\text{m}$  dans les eaux les plus salées, la distribution granulométrique des suspensions au sein de ces deux types d'eaux étant unimodale.

Les travaux de l'équipe rouennaise (R. Lafite *et al.*, J.P. Dupont *et al.*; J.P. Dupont et R. Lafite, ce colloque), montrent au contraire la distribution généralement plurimodale des suspensions et font ressortir l'importance des silts fins et moyens (2 à 20  $\mu\text{m}$ ) vers le pôle estuarien, et celle de populations plus grossières, principalement constituées de matériel organique, en domaine marin.

\* Laboratoire de Géologie Marine - Université de Caen - 14 032 Caen cédex.

La gamme des tailles mesurées est différente dans les deux laboratoires : entre 10 et 150  $\mu\text{m}$  pour J.C. Brun-Cottan et M. Ben Brahim, entre 1,5 et 45  $\mu\text{m}$  pour R. Lafite, J.P. Dupont et M. Lamboy. Toutefois, ni cette différence, ni celle du nombre des canaux de mesures, ne permettent d'expliquer totalement la disparité des résultats. L'observation au M.E.B. des filtrats des échantillons J433 et J443 dont la distribution granulométrique a été figurée par J.C. Brun-Cottan et M. Ben Brahim montre de très nombreuses particules de taille inférieure à 10  $\mu\text{m}$  et de rares particules grossières (diatomées et grains de quartz vers 40  $\mu\text{m}$  pour l'échantillon J443, uniquement des diatomées vers 80  $\mu\text{m}$  pour l'échantillon J433).

La prise en compte des particules de taille inférieure à 10  $\mu\text{m}$  paraît donc absolument nécessaire à l'équipe de Rouen pour l'obtention de paramètres représentatifs des populations de particules en suspension.

## 2. CONCENTRATIONS PONDERALES

Sur la fig. 1, sont reportées, pour le point fixe F4 et le suivi lagrangien B4, les valeurs de charge calculées par J.C. Brun-Cottan et M. Ben Brahim ainsi que les poids des M.E.S. totales mesurées au laboratoire de Rouen sur les mêmes points de prélèvement (pesée des filtrats). Ces diagrammes font parfaitement ressortir les distorsions entre les valeurs, ainsi que la situation différente dans le temps des pics de concentration.

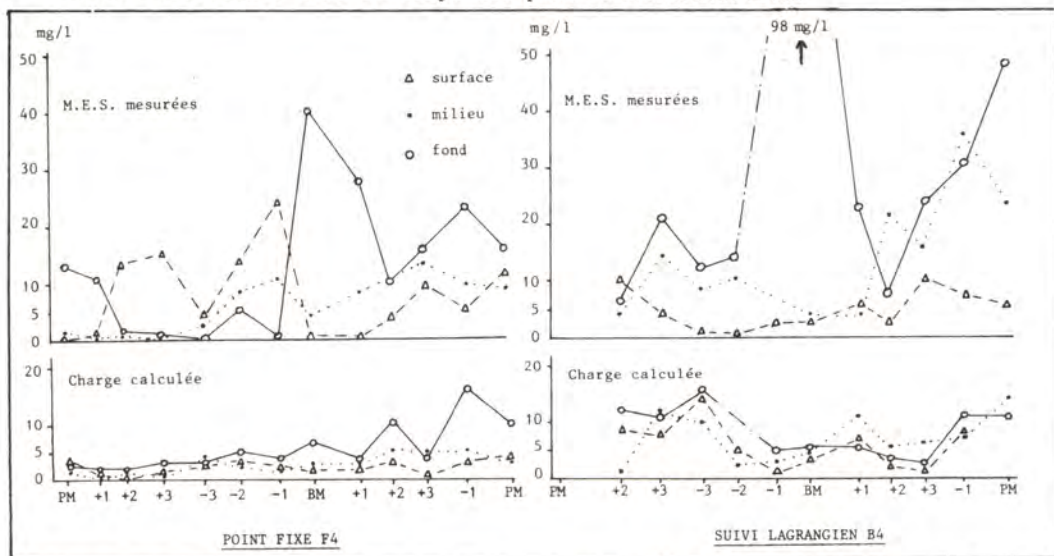


Fig. 1.- Comparaison entre les charges calculées par J.C. Brun-Cottan et M. Ben Brahim et les concentrations pondérales mesurées par R. Lafite, J.P. Dupont & M. Lamboy lors de la campagne Elie.

Pour les prélèvements de surface du point fixe F4, les valeurs de charge calculées ont été confrontées, sur la fig. 2, avec les paramètres physico-chimiques et les concentrations pondérales mesurées (R. Lafite, J.P. Dupont et M. Lamboy, ce colloque, fig. 1).

Pour M. Lamboy, il semble que le calcul des charges ait été basé sur des approximations ne tenant pas assez compte de la diversité du matériel en suspension concernant la taille des populations de particules et la masse volumique. Sur le premier point il a déjà été souligné ci-dessus que les fines particules devaient être prises en compte: la comparaison des résultats concernant les concentrations massiques conforte cette idée et souligne également l'importance probable des fines particules dans la concentration massique et le flux massique. En ce qui concerne la masse volumique, l'équi-



pe de Rouen a montré la diversité des particules en suspension, dans leur nature et leur densité; ceci a été confirmé pour les deux échantillons J433 et J443 cités en référence (voir ci-dessus). S'il est vrai que dans la baie de Seine les grosses particules ont fréquemment une masse volumique faible liée alors à leur nature organique (diatomées, agrégats), il semble néanmoins très difficile de relier la taille et la masse volumique par une loi puissance.

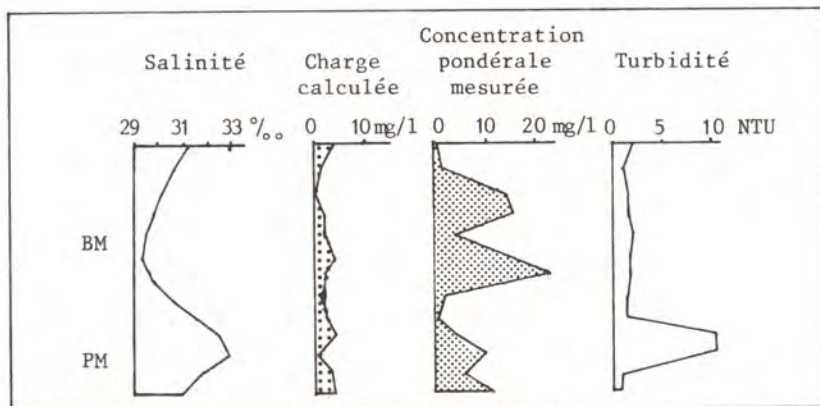


Fig. 2.- Comparaison entre les charges calculées par J.C. Brun-Cottan et M. Ben Brahim et les paramètres mesurés par R. Lafite *et al.*, Campagne Elie, Point Fixe F4, surface.

Plusieurs intervenants ont ensuite insisté sur le fait que les résultats obtenus provenaient de mesures effectuées par mer calme ou peu agitée et que l'influence de la houle n'était guère prise en compte. Celle-ci vient se superposer à l'action des courants de marée, elle modifie alors l'importance, voire le sens des transports (C. Migniot). M. Belorgey et A. Temperville insistent sur la turbulence créée par la houle et par conséquent sur les remises en suspension engendrées. A ce propos, J. Avoine rapporte un exemple tiré d'études américaines sur la côte est des Etats-Unis. Des mesures de turbidité réalisées sur station autonome montrent que les charges en suspension passent de 2 à 3 mg/l en période de beau temps, à 80 mg/l durant les tempêtes. A. Temperville indique que des recherches en laboratoire sont entreprises sur ce problème. Après avoir développé un modèle d'agitation de houle pour un site fixe, il faut maintenant s'attacher, dit-il, à la question de la couche limite. Pour cela, des études expérimentales fines sont nécessaires, elles ont déjà commencé au Havre (M. Belorgey et J. Lebas) pour les houles courtes et à l'Institut de Mécanique de Grenoble pour les houles longues. L'influence des matières en suspension sur la couche limite devra être envisagée dans un second temps. Pour M. Belorgey, l'aspect "couche limite" n'est pas le seul à prendre en compte, il faut également inclure la turbulence créée par les composantes verticales des vitesses orbitales qui agissent sur le fond comme des jets fluides. Ces travaux en laboratoire devront être accompagnés de mesures *in situ* par station autonome de mesures qu'il faut mettre en oeuvre le plus tôt possible.

Les modèles de circulation résiduelle de Lagrange établis par les océanographes physiciens indiquent une dérive nord-sud devant la côte cachoise, du cap d'Antifer à l'estuaire de la Seine. Ce résultat soulève la discussion dans la mesure où il est prouvé que les vases déversées sur le dépôt de dragage d'Octeville se dispersent largement vers le Nord. Un panache turbide s'étalant jusqu'au port d'Antifer apparaît effectivement sur les vues satellites ainsi que sur certaines photographies aériennes (J. Guyader). C. Migniot précise que sur la frange côtière, les transports en charriage ont lieu du Nord vers le Sud sous l'action des houles, mais qu'en revanche, plus au large, les mouvements de sédiments en suspension s'effectuent de manière dominante du Sud vers le Nord. Plusieurs intervenants soulignent

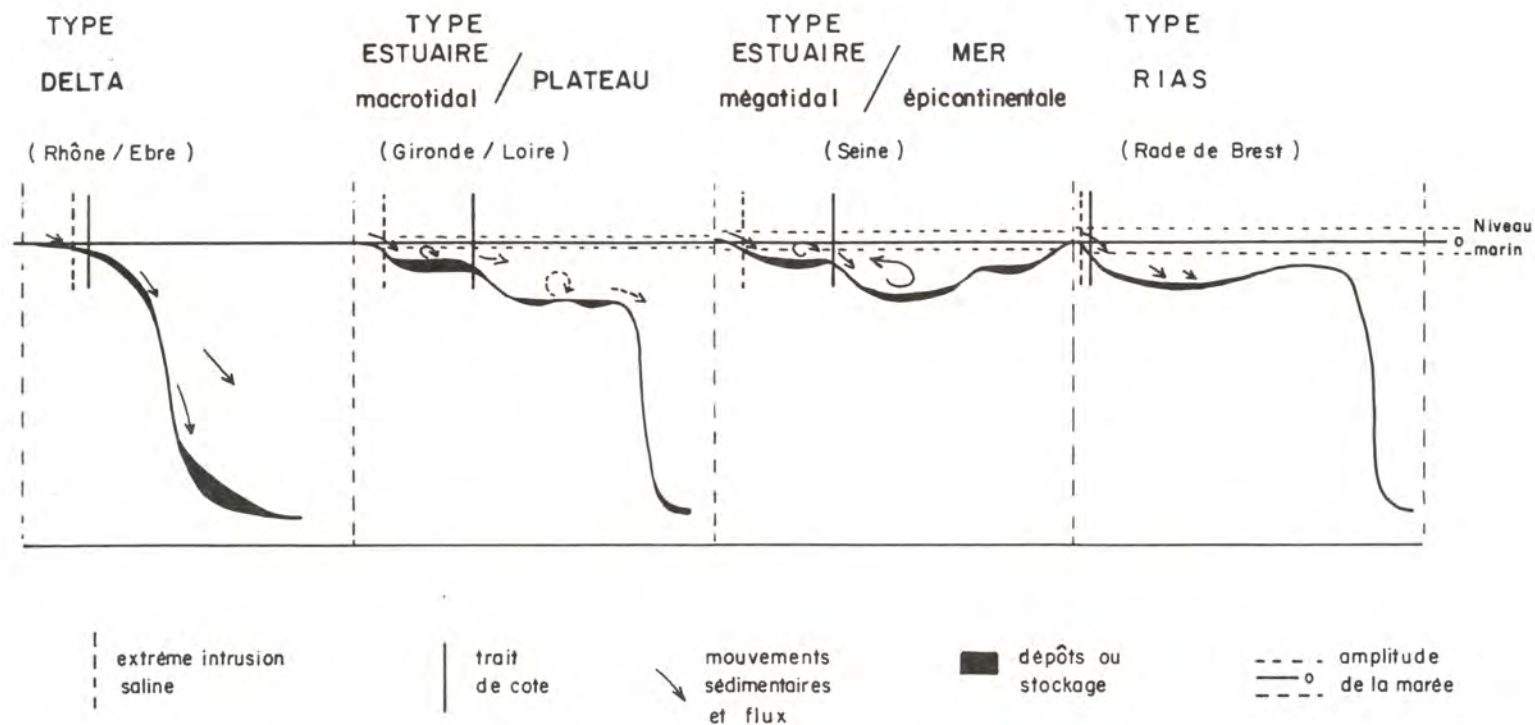


Figure 3.- Schéma des principaux types d'embouchures sur les côtes françaises (C. Latouche).



l'influence des gradients de salinité à l'embouchure de la Seine (J.C. Salomon, P. Le Hir) et le fait que les courants résiduels diffèrent de la surface au fond (L. Crevel) mais, ce ne sont pas ces courants qui transportent les sédiments déclare J.C. Salomon. Il y a indépendance entre les déplacements des masses d'eau et ceux des sédiments (J. Avoine) sachant que, selon C. Migniot, les transports sédimentaires s'effectuent suivant une certaine puissance des vitesses de courants (2 à 3) et que les mouvements résultants peuvent ainsi se trouver en opposition avec les transports des masses d'eau. Le Hir précise que des calculs de charriage réalisés selon la formule de Bagnold modifiée, en utilisant des vitesses de courants de fond mesurées à l'Ouest du cap de la Hève, donnent une composante orientée vers le Nord. Mais les résultats sont variables selon les paramètres retenus et quantitativement, les valeurs obtenues ne sont pas fiables.

A ce propos, C. Migniot souligne que les formules qui ne prennent en compte que le transport en charriage sous-estiment considérablement la réalité, une partie très importante du transport s'effectue en suspension et le bilan total peut être 10 fois supérieur au transport évalué par une formule ne s'appliquant qu'au charriage.

Enfin, comme l'ont montré P. Le Hir *et al.* (ce colloque), le rôle du vent doit également être pris en compte.

Ainsi, les mouvements sédimentaires sont-ils souvent complexes, dépendant de plusieurs paramètres et difficiles à cerner. Il ne faut donc pas s'étonner que les facteurs qui régissent les bilans soient encore mal connus et aient donné lieu à plusieurs questions et à une discussion fructueuse.

Pour J.M. Jouanneau, la possibilité de retour, en période d'étiage, d'une partie de la charge expulsée en crue constitue l'une des originalités des estuaires débouchant en baie de Seine. Cela ne se rencontre pas dans les autres grands estuaires français (Gironde, Loire) et doit être relié au caractère macrotidal du milieu. A ce sujet, J.M. Jouanneau demande à J. Avoine si des limites de non retour ont été mises en évidence en baie de Seine ou si l'on doit considérer que le matériel expulsé en crue a pour devenir, à plus ou moins long terme, de revenir dans les estuaires pour contribuer à leur colmatage. J. Avoine déclare qu'il est encore difficile de répondre précisément à cette question, il faut cependant observer :

- que les apports fluviaux ne quittent probablement la baie de Seine qu'en faible quantité; au niveau du cap d'Antifer où les transports sont dirigés vers le N-N-E ;

- que le bilan sédimentaire des estuaires est largement positif avec des flux d'entrées supérieurs aux flux de sorties.

H. Chamley s'interroge sur ce résultat, considérant, en ce qui concerne la Seine, l'opposition qui existe entre le volume potentiel considérable de sédiments fins issus du bassin versant et le volume potentiel a priori beaucoup plus réduit, disponible dans le domaine marin. Des phénomènes à caractère aléatoire et exceptionnel, de très importants apports fluviaux notamment, ne sont-ils pas susceptibles d'intervenir ? S'il est vrai que les charges en matières en suspension sont parfois élevées en crues, le suivi journalier du débit solide de la Seine, à Poses, ne permet pas de retenir cette hypothèse (J. Avoine). Force est d'admettre que les apports venant de la mer sont largement dominants, ils ont progressivement comblé les estuaires de la baie de Seine. J.L. Mauvais demande alors pourquoi l'évolution des embouchures de l'Orne, de la baie des Veys, est plus avancée de ce point de vue que celle de la Seine.

Selon C. Larssonneur il faut d'abord prendre en compte les dimensions de l'exutoire fluvial initial, beaucoup plus importantes dans le cas de la Seine. L'exposition des couloirs estuariens, leur direction par rapport aux agents de l'hydrodynamisme marin à fluvio-marin, les stocks de matériel sablo-



silto-argileux disponibles dans le proche environnement marin, doivent également avoir leur rôle.

La plupart des spécialistes considèrent en outre que les aménagements ont accéléré les processus de colmatage, ce n'est pas l'opinion de L. Barailler qui déclare que dans le cas de la Seine les interventions humaines n'amènent qu'une redistribution spatiale des sédiments dans l'intérêt des activités portuaires. Quant aux remises en suspension par les dragages leur influence est, selon lui, du même ordre de grandeur que celle des tempêtes. Dans de nombreux cas, l'action positive des ouvrages sur la sédimentation est indéniable : zones de dépôts à l'abri de certaines digues par exemple (C. Larssonneur).

Au terme de cette active et intéressante discussion, C. Latouche souligne que les recherches entreprises visent notamment à bien connaître le fonctionnement des environnements côtiers pour mieux apprécier l'influence des activités humaines et leurs altérations éventuelles. Des comparaisons sont nécessaires, des systèmes de références doivent être définis. Ainsi, en ce qui concerne les embouchures fluviales, 4 types bien représentés sur les façades maritimes françaises peuvent être distingués du point de vue des flux au milieu marin et de leur devenir (fig. 3).

- 1) Les deltas (type delta du Rhône). L'étroitesse du plateau, l'absence de marée, permettent aux apports terrigènes d'atteindre de manière quasi directe le domaine profond.
- 2) Les estuaires macrotidaux débouchant sur un vaste plateau continental (type Loire et Gironde). En relation avec l'amplitude élevée de la marée, ces systèmes sont caractérisés par un stockage plus ou moins prolongé (de l'ordre de 1 à 2 ans) des MES, et des expulsions discontinues à l'océan. Une partie des matériaux solides est même définitivement piégée dans le système.

La largeur du plateau constitue d'autre part un facteur favorable au stockage des éléments fins dans des vasières. Au total, les expulsions de matières solides dans le domaine profond sont limitées.

- 3) Les estuaires macrotidaux débouchant dans des mers épicontinentales (type Seine) sont également caractérisés par un stockage des matières d'origine continentale. Il s'ajoute également ici un stockage d'apports d'origine marine liés aux remaniements consécutifs, à faible profondeur, des fonds marins eu égard à l'amplitude des marées et à l'énergie des houles.
- 4) Les rias (type rade de Brest) représentent des embouchures "vides" et donc susceptibles de piéger la quasi-totalité des matériaux solides d'origine fluviale. Les flux sédimentaires à l'océan sont extrêmement limités.

A chacun de ces 4 types de dynamique sédimentaire correspond un fonctionnement géochimique spécifique. Les estuaires constituent les systèmes les plus réactifs du fait de la durée pendant laquelle les particules oscillent à l'intérieur, c'est-à-dire dans un gradient de salinité important et très étendu dans l'espace. Des solubilisations de diverses substances initialement sous forme particulaire, y ont été reconnues (cas du carbone organique et de nombreux métaux lourds). Les estuaires sont de ce fait des pièges à sédiments, mais des exportateurs de substances dissoutes. Par opposition, les deltas exportent en mer des matériaux solides bruts, c'est-à-dire des matériaux sur lesquels restent fixées diverses substances susceptibles d'être ultérieurement mobilisées. Les rias, enfin, constituent des pièges pour ces mêmes matériaux.



*Comportement chimique et géochimique des éléments à l'état de traces dans l'estuaire de la Seine : une synthèse des résultats*  
GUEGUENIAT P.

- 21 - AUFFRET J.P., GUEGUENIAT P., LEPY M.C., PATRY J.P. et SAUR H. Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983
- 22 - AMINOT A., LE GUELLEC A.M. et MAUVAIS J.L. Le fluorure en Baie de Seine
- 23 - AMINOT A., KEROUËL R. et MAUVAIS J.L. Les éléments nutritifs en Baie de Seine
- \*24 - GALLET P. Mise en évidence des profils d'évolution pluri-annuelle associés aux séries de mesures de paramètres hydrobiologiques effectuées dans l'estuaire de la Seine dans le cadre du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin
- 25 - GUEGUENIAT P., BOUST D., HEMON G., PHILIPPOT J.C., LAGARDE G. et HEITZ C. Distribution de 40 éléments à l'état de traces dans les suspensions de la Seine. Utilisation du lanthane pour étudier les processus sédimentaires dans l'estuaire et dans la baie
- 26 - FISCHER J.C., WARTEL M., GUEGUENIAT P. et GANDON R. Pouvoir complexant des eaux de l'estuaire de la Seine
- 27 - FISCHER J.C. et WARTEL M. Evolution des la complexation des métaux : Ca, Mg, Cd, Pb et Cu dans l'estuaire de la Seine
- 28 - GANDON R., GUEGUENIAT P., FISCHER J.C. et WARTEL M. Etude de la distribution des formes solubles minérales et organiques du fer, du zinc et du cuivre dans l'estuaire de la Seine
- 29 - GUEGUENIAT P., BOUST D., GANDON R., HEMON G., PHILIPPOT J.C., SANCHEZ J.P., MARIN P. et PIERI J. Etude du comportement géochimique du fer dans l'estuaire de la Seine
- \*30 - LUOMA S.N. Biological availability of sediment-bound trace metals

*Synthèse des discussions*

GUEGUENIAT P.

COMPORTEMENT CHIMIQUE ET GEOCHIMIQUE DES ELEMENTS A L'ETAT DE TRACES DANS  
L'ESTUAIRE DE LA SEINE : UNE SYNTHESE DES RESULTATS.

GUEGUENIAT P. \*

Les travaux de chimie et de géochimie ont débuté en 1983 (deux années après les autres disciplines) et ont porté essentiellement sur la zone estuarienne. Certaines équipes ont participé en 1978-1979 au Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer (SAUM) de l'estuaire de la Seine et à quelques actions dans la Baie : embouchures de la Vire, de l'Orne, à la demande de l'Agence de Bassin Seine-Normandie. Il a résulté de ces dernières actions une banque précieuse de données à partir notamment des travaux de Boust (1981), Avoine (1981), Dubrulle (1982) et la constitution d'un stock inégalable d'échantillons qui n'a pas encore été épuisé, loin s'en faut, pour les analyses multi-éléments.

Dans le cadre du GRECO, les principales actions ont porté sur les thèmes suivants :

- a) forme physico-chimique des métaux traces (Fe, Zn, Cu, Pb, Cd) dans les eaux, par polarographie et par fixation sur bioxyde de manganèse.
- b) pouvoir complexant des eaux, constantes de stabilité des complexes organiques.
- c) comportement géochimique du fer en faisant intervenir : des méthodes d'attaques partielles, des analyses par effet Mössbauer, l'utilisation de traceurs radioactifs.
- d) analyses multi-éléments par activation neutronique et par fluorescence X avec excitation par des protons accélérés à 1.5 MeV (PIXE).
- e) application des mesures de radioactivité artificielle *in situ* à des études hydrosédimentaires.

En géochimie, nous avons largement fait appel à des techniques nucléaires. Une collaboration étroite a été instaurée entre le C.E.A. (Laboratoire de Radioécologie Marine de La Hague - Laboratoire de Radiométrie d'Orsay spécialisé en activation neutronique), le C.N.R.S. (Laboratoire de Chimie Nucléaire de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg spécialisé en effet Mössbauer et en analyse PIXE) et la Marine Nationale (Groupe d'Etudes Atomiques de Cherbourg, pour les mesures de radioactivité artificielle). Nous nous sommes intéressés tout particulièrement au cas du fer qui représente un élément classiquement étudié en milieu estuarien en particulier parce qu'il contrôle la concentration de nombreux polluants métalliques dans la colonne d'eau. Dans l'estuaire de la Seine une telle étude prend un relief supplémentaire si on considère l'importance de rejets industriels de sulfate ferreux qui ont atteint 160 tonnes/jour lors des opérations SAUM en 1978-1979, 60 tonnes/jour lors des opérations GRECO en 1983-1984. La nature et la localisation des rejets affectant l'estuaire et la baie de Seine orientale sont décrites sur la figure 1.

En chimie des eaux, deux laboratoires sont intervenus: le laboratoire de Chimie Analytique et Marine de Lille, le laboratoire de Radioécologie Marine de La Hague. Le premier a mesuré par polarographie (pour cuivre, plomb, cadmium) les formes libres, complexées déplacées par abaissement de pH, complexées détruites par irradiation UV. Le second a distingué - pour fer, cuivre, zinc - les

\* Laboratoire de Radioécologie Marine, C.E.A., B.P. 270, 50107 Cherbourg.



formes non complexées, les complexes organiques dégradables, en faisant intervenir des différences dans les modalités de fixation sur  $MnO_2$ . Nous avons également introduit l'élément calcul pour prédire la répartition des diverses formes physico-chimiques en cadmium, plomb, cuivre, en mettant au point un programme informatique qui prend en compte l'existence simultanée d'une cinquantaine de complexes (Laboratoire de Lille).

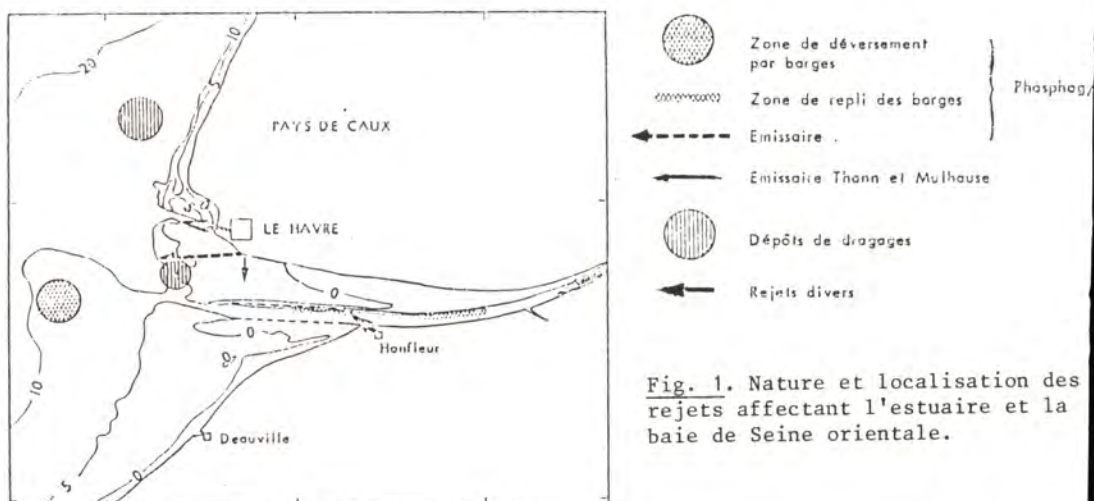


Fig. 1. Nature et localisation des rejets affectant l'estuaire et la baie de Seine orientale.

Cinq thèmes seront détaillés ici :

- les analyses multi-éléments en géochimie,
- le comportement géochimique du fer,
- la notion de pouvoir complexant des eaux,
- le comportement du cuivre dans les eaux de l'estuaire de la Seine,
- l'influence des processus sédimentaires sur les teneurs en métaux dissous.

Au préalable on illustrera par un exemple ( $^{137}\text{Cs}$ ) l'intérêt que peut présenter l'utilisation des traceurs radioactifs artificiels pour des études océanographiques.

#### A.- RADIOCHIMIE

Le principe des travaux basés sur les indicateurs radioactifs artificiels pour étudier les déplacements de masses d'eau repose essentiellement sur le suivi de deux traceurs radioactifs :  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{125}\text{Sb}$ .

##### Antimoine 125

Le  $^{125}\text{Sb}$  est entièrement associé à la masse d'eau; sa fixation au niveau des constituants biologiques, suspensions et sédiments (sauf échantillons réducteurs ou riches en fer) est faible. Il constitue en outre un marqueur spécifique de l'usine de La Hague avec des rejets 2 à 4 fois plus élevés qu'à Sellafield (rejets en mer d'Irlande).

##### Césium 137

Le  $^{137}\text{Cs}$  constitue un marqueur spécifique de l'usine de traitement de combustibles irradiés de Sellafield avec des rejets 100 à 1000 fois plus élevés que ceux de La Hague. Par conséquent, le suivi des rapports  $^{125}\text{Sb}/^{137}\text{Cs}$  doit permettre de différencier les effets de Sellafield et de La Hague chaque fois

qu'une interférence est possible. Le  $^{137}\text{Cs}$  représente en outre un des principaux radionucléides introduits dans le milieu par les retombées atmosphériques consécutives aux tests nucléaires en atmosphère; il en résulte que le  $^{137}\text{Cs}$  est mesurable dans toutes les eaux naturelles. En ce qui concerne le cadre de nos travaux, nous nous sommes posés la question de déterminer quel est le niveau d'activité dans les eaux, au-dessus duquel il y a une influence industrielle? A partir de 0,15 pCi/l en  $^{137}\text{Cs}$  nous considérerons qu'il y a amorce d'influence industrielle.

### Résultats ( $^{137}\text{Cs}$ )

Grâce à des campagnes à la mer menées dans le cadre de collaborations entre le CEA, la COGEMA, le groupe d'Etudes Atomiques de la Marine Nationale (GEA), le laboratoire de Lowestoft (Fischeries - U.K.), le GRECO (campagne Thalassa de décembre 1983 - utilisation du Pluteus en mai 1982 et mai 1983-1984 dans les eaux des îles anglo-normandes) on a pu cartographier la répartition du  $^{137}\text{Cs}$  en mer d'Iroise, Manche et Mer du Nord. Sa distribution en Baie de Seine, Manche centrale et occidentale est représentée sur la fig. 2. Il est intéressant, sur cette carte, de considérer la zone caractérisée par des activités comprises entre 0.07 et 0.15 pCi/litre : il s'agit d'eaux dans lesquelles l'influence du  $^{137}\text{Cs}$  d'origine industrielle n'est pas décelable; les mouvements de cette énorme masse d'eau doivent exercer une influence importante sur la Manche et la baie de Seine.

La figure 2 regroupe des observations étalées tout au long de l'année 1983: il conviendrait maintenant de suivre les fluctuations saisonnières sur plusieurs années.

Parmi les autres acquis 1984-1985, notons :

- a) La présence d'un front d'activité très net entre Jersey et Guernesey qui se poursuit à partir de Jersey vers les Roches Douvres;
- b) La chenalisation des eaux influencées par l'établissement de la Hague dans le Pas-de-Calais.

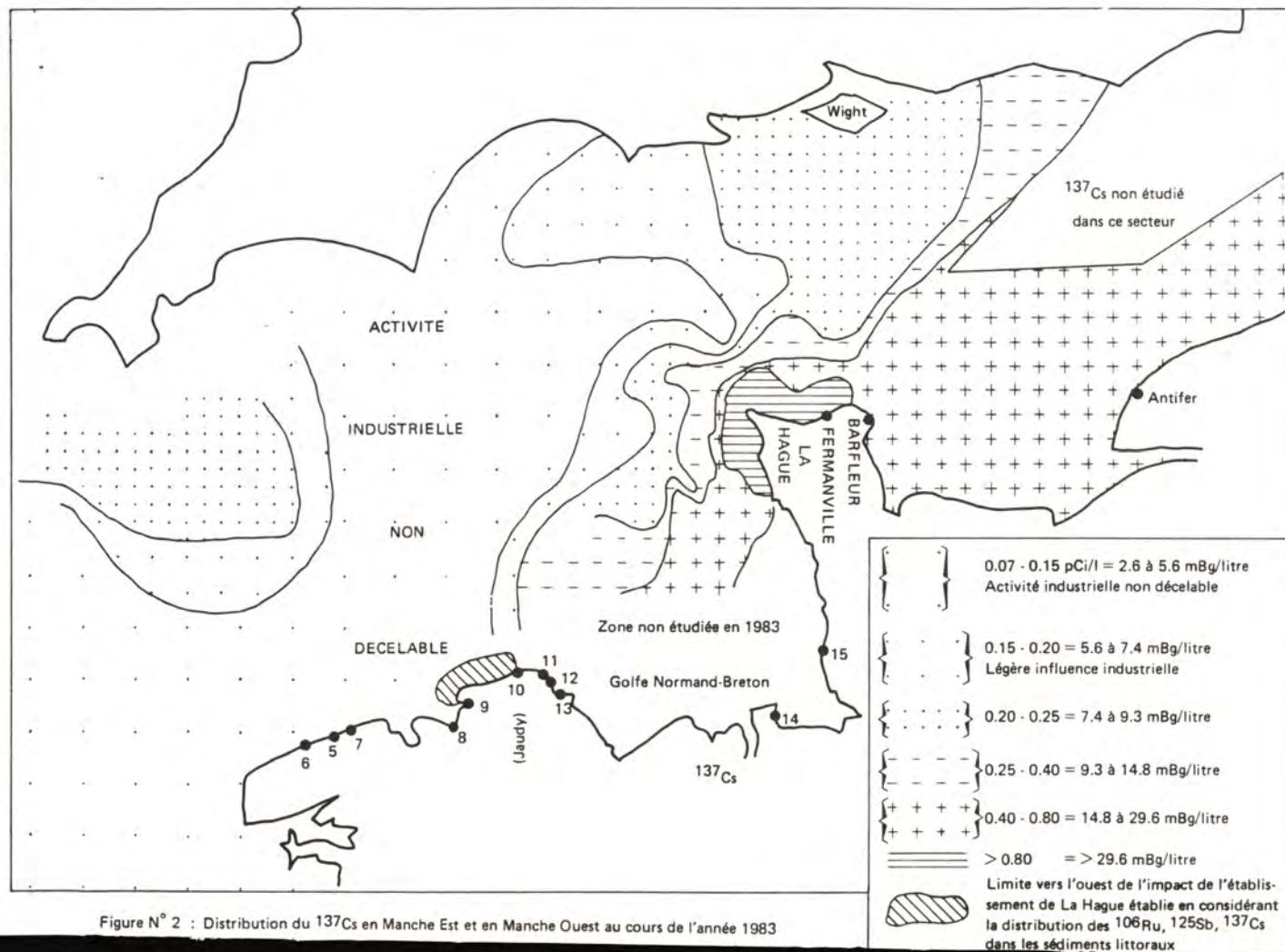
## B.- GEOCHIMIE

### 1. LES ANALYSES MULTI-ELEMENTS

On a mesuré, dans les suspensions et les sédiments, quarante éléments à l'état de traces par activation neutronique et par fluorescence X induite par des protons accélérés à 1.5 MeV (PIXE)). Parmi les éléments mesurés certains le sont par les deux techniques (Fe, K, Rb, Br, Sr, Cd, Ba), d'autres sont spécifiques soit à l'activation (terres rares, Au, As, Co, Cs, Hf, Sb, Ta, Th, U, W et parfois Se, Mo, Ga, Ir, Hg) soit à PIXE (Pb, Cu, Ni, S, P, Ti, Sn, V, Al, Cl, I, S, P).

Les analyses par activation neutronique et par PIXE ont été réalisées respectivement au Laboratoire de Radiométrie du C.E.A. à Orsay et au Laboratoire de Chimie Nucléaire du C.N.R.S. à Strasbourg-Kronembourg. Le fait de travailler sur une faible masse de produit, de l'ordre de 100 mg, offre un très grand intérêt maintes fois apprécié: analyses d'échantillons, par le Laboratoire d'Orsay et le Laboratoire de Strasbourg, de lune (Jérôme, Philippot - 1973) de céramiques médiévales (Delcroix, Philippot - 1973), de nodules de manganèse (Zlatanova - 1973), de minéraux (Lagarde *et al.*, 1983)... Dans le cas présent on pouvait se heurter à des difficultés d'interprétation des résultats dans la mesure où les suspensions et surtout les sédiments pouvaient ne pas être homogènes; ce risque était d'autant plus important que la surface explorée lors de l'analyse par fluorescence X ne représente que quelques mg de l'échantillon. Il apparaît une bonne reproductibilité des résultats ( $r^2 = 0.966$  pour Zn,  $n = 9$ ); cependant il convient de rester prudent; en présence de minéraux lourds du type zircon présents en Baie de Seine: on ne réussirait pas toujours à homogénéiser convenablement les échantillons.





Ces analyses multi-éléments, quoique coûteuses, représentent vu leur précision et le grand nombre d'éléments mesurés (40), un intérêt inappréciable sur le plan fondamental. Elles révèlent notamment l'existence de traceurs géochimiques intéressants (La, Hf,...) et apportent des informations précises sur le comportement de nombreux éléments dont certains, difficiles à mesurer, restent peu étudiés (argent et or en particulier). On discutera successivement :

- a) du scandium et des références utilisées en géochimie,
- b) des éléments associés ou non avec le scandium,
- c) de l'application des analyses multi-éléments à l'étude de processus hydro-sédimentaires,
- d) de l'or, de l'argent, de l'antimoine et de l'uranium, éléments non corrélés avec Sc.

### 1.1. Le scandium :

L'aluminium et le scandium peuvent être considérés comme d'excellents indicateurs de la présence d'argiles dans les suspensions et les sédiments (Rankama-Sahama- 1949; Martin *et al.*, 1978; Spencer *et al.*, 1972; Nelson 1979; Thomas *et al.*, 1982; Cauwet *et al.*, 1980). Les corrélations entre l'aluminium et le scandium sont très bonnes dans les rivières, les estuaires et les suspensions marines (Thomas *et al.*, 1982).

Les normalisations par rapport au scandium (teneur de l'élément en ppm/teneur du scandium en ppm) partent du principe que les éléments à l'état de traces se trouvent associés essentiellement à la phase argileuse; elles permettent de s'affranchir du paramètre granulométrie. Pour illustrer l'intérêt de cette démarche, nous reprendrons, pour l'estuaire de la Seine, l'exemple du cobalt choisi par Thomas *et al.* (1982) pour constater qu'il n'y a pas, malgré la diversité des bassins versants, de différence dans les valeurs Co/Sc des grands fleuves mondiaux : Orénoque (0.9-1.5), Yangtze (1.29-1.38), Indus (1.02-1.11), Parana (0.83-0.94) et français : Dordogne (1.29-1.41), Garonne (0.95-1.31), Rhône (1.07), Loire (1.33) qu'ils ont étudiés.

On retrouve cette homogénéité avec la moyenne (Co/Sc) mondiale (1.1-1.13) calculée par Martin et Whitfield (1981).

Dans l'ensemble de la baie de Seine et ses estuaires 66% des valeurs ( $n = 58$ ) relevées entre 1978 et 1984, se situent dans la gamme  $0.9 < \text{Co/Sc} < 1.8$  donc ne posent pas de problèmes particuliers d'interprétation. En ce qui concerne les autres résultats ( $1.8 < \text{Co/Sc} < 22$ ) la présence d'un excès de cobalt s'explique, soit par une pollution de la fraction argileuse, soit par une localisation de cet élément sur des sites autres que les argiles. Dans ce dernier cas il peut s'agir d'une pollution ou d'un phénomène naturel :

- a) Le cobalt se concentre au niveau de certains composés organiques. Comme les suspensions de la baie de Seine sont riches en matière organique inerte ou vivante (Dupont-Lafite, 1985) et que cette dernière est dépourvue de scandium, il n'est pas étonnant de constater que les résultats normalisés des suspensions de la baie sont le plus souvent supérieurs à ceux de l'estuaire. L'échantillon le plus significatif à cet égard a été recueilli au large du cap d'Antifer: teneur en Sc très faible (2.5 ppm), teneur en cobalt (55 ppm), Co/Sc = 22.5
- b) Certains éléments sont naturellement associés à des minéraux lourds comme le zircon. Dans les sédiments marins les teneurs habituelles en zirconium représentent généralement 100 ppm. Parmi les échantillons étudiés en baie de Seine ( $n = 12$ ), deux valeurs atteignant 1000 ppm en zirconium ont été relevées : les sédiments correspondants ont des valeurs normalisées anormalement élevées en cobalt (2.0-3.5).

Les relations ( $n = 35$ ) entre le scandium et les oligo-éléments mesurés dans les sédiments et les suspensions de l'estuaire de la Seine par activation



neutronique sont résumés ci-dessous, pour la période 1978-1981, dans le tableau 1. Les échantillons amont ( $S \leq 1\%$ ) n'ont pas été pris en compte de même que quatre suspensions de l'estuaire présentant des signes de pollution accidentelle.

| Très bonne<br>corrélation<br>$r^2 > 0,8$ | Bonne<br>corrélation<br>$r^2 \ 0,5-0,8$ | Légère<br>corrélation<br>$0,30-0,5$ | Mauvaise<br>corrélation<br>$r^2 < 0,3$ |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| As sédiments (0,849)                     | As suspensions (0,556)                  | Co sédiments (0,471)                | Sb suspensions                         |
| Cs sédiments (0,831)                     | Cs suspensions (0,752)                  | Ba sédiments (0,39)                 | U suspensions                          |
| Cr sédiments (0,975)                     | Cr suspensions (0,710)                  |                                     | Au suspensions                         |
| Eu sédiments (0,911)                     | Eu suspensions (0,625)                  |                                     | Au sédiments                           |
| Fe sédiments (0,989)                     | Co suspensions (0,708)                  |                                     | Zn suspensions                         |
| Fe suspensions (0,925)                   | Rb suspensions (0,572)                  |                                     | Hf sédiments                           |
| La suspensions (0,80)                    | Rb sédiments (0,658)                    |                                     | Ba suspensions                         |
| La sédiments (0,86)                      | Th sédiments (0,75)                     |                                     |                                        |
| Th suspensions (0,86)                    | U sédiments (0,54)                      |                                     |                                        |
| Zn sédiments (0,91)                      | Cs suspensions (0,730)                  |                                     |                                        |
| Cs sédiments (0,85)                      | Ce sédiments (0,56)                     |                                     |                                        |
| Ce suspensions (0,83)                    | Yb suspensions (0,78)                   |                                     |                                        |
|                                          | Yb sédiments (0,75)                     |                                     |                                        |

Tableau 1.- Relation entre les éléments à l'état de traces, mesurés par activation neutronique et Sc.

### 1.2. Contribution anthropique :

Pour établir la contribution anthropique en oligo-éléments dans les sédiments et suspensions de la Seine, Avoine *et al.* (1984), Guéguénat *et al.* (1985) utilisent des références différentes: les sédiments de l'ère pré-industrielle de Rouen pour les premiers, la croûte terrestre pour les derniers. Il en résulte des appréciations différentes de cette contribution anthropique notamment pour le cuivre : 99% par rapport aux sédiments de Rouen qui ont une teneur exceptionnellement faible (5 ppm), 87% par rapport à la croûte terrestre qui en contient 32 ppm. Le choix de cette dernière référence (Martin et Meybeck - 1979) semble préférable pour l'étude de l'estuaire, objectif de travail, en raison de la dilution des apports fluviaux par des apports marins.

On a observé en Seine en 1979, dans les suspensions de Quillebeuf, des facteurs d'enrichissement qui dépendent des conditions de débit. Les gammes de valeur sont les suivantes : 60-100 pour Ag et Cd, 10-40 pour Au, Hg, Sn; 7-15 pour Pb; 2-7 pour Cu, Sb, U, Zn; 2 pour Cs, Cr, Ni et 1 à 2 pour Eu, La, Ta, Sr. Des valeurs comparables ou inférieures à la croûte terrestre ont été trouvées pour Ba, Co, Sc (0,7), Ti, Hf. Les teneurs en crue sont nettement supérieures à celles en étiage pour Ag, Cd, Au, Hg, Pb, Sn, Cu, Sb, U. Quelques valeurs d'étiage dépassent celles de la crue: As, Th, Hf, Ta, Mn. En crue 1984, la situation, sauf en ce qui concerne le lanthane, a peu évolué par rapport à 1979: les facteurs d'enrichissement sont : Ag = 60, Au = 35, Sb = 7, Cr = 2.5, Co = 1.6, W = 4.2.

### 1.3. Utilisation du lanthane comme marqueur des apports fluviaux :

On a bénéficié entre 1978 et fin 1983 avec le lanthane, d'un marqueur des apports fluviaux de la Seine, non réactif dans un estuaire. L'intensité du signal exprimée en valeurs normalisées (La/Sc) n'est pas constante en amont: 4.8-6.1 en étiage 1978 (Quillebeuf), 7.1-7.2 en crue 1979 (Quillebeuf), 5.8-6.7 en étiage 1979 (Quillebeuf), 5.5 en étiage 1983 (Tancarville).

Dans les suspensions des autres estuaires de la baie de Seine, la Vire (La/Sc = 3.0) l'Orne (La/Sc = 2.9) les observations effectuées se situent dans

les gammes habituelles des fleuves français: Loire (3.5), Dordogne (3.5-3.7), Garonne (3), Rhône (3) et étrangers non pollués: Mackenzie (2.6-3.1), Parana (2.5-2.6), Yangsté (2.2-2.4), Indus (2-2.1), Orénoque (3.4-3.6) (Thomas *et al.*, 1982). C'est en 1979 que nous allons utiliser au mieux le lanthane comme marqueur des apports fluviaux en raison de la constance du message vérifié en étiage, en crue en mortes eaux, en crue en vives eaux, de l'existence d'un stock d'échantillons de suspensions et de sédiments qui assure une très bonne couverture de l'ensemble de l'estuaire et même de la partie Est de la baie de Seine pour les sédiments. L'exploitation des données relatives au lanthane indique :

- Une remise en suspension de matériaux, en crue en amont de l'intrusion saline. Si on considère le spectre des éléments mesurés par activation neutronique, l'origine de ces matériaux serait marine. Cette observation est confirmée d'une part par les mesures de radioactivité artificielle, d'autre part par la mesure du fer associé aux enduits minéraux.
- Une homogénéisation des valeurs  $La/Sc$  dans les MES sur l'ensemble de l'estuaire en étiage que l'on retrouve avec : les teneurs en zinc extractible, en zinc total (Boust, 1981), en fer associé aux enduits minéraux.
- Une analogie entre les sédiments de Honfleur ( $La/Sc = 4.7$ ) du Havre ( $La/Sc = 4.7$ ), du bouchon vaseux de crue ( $La/Sc = 4.49$ ), de dépôts de dragage ( $La/Sc = 4.9$ ) d'Octeville.
- Un renforcement du signal lanthane pour la MES à la sortie de l'estuaire en raison des rejets industriels.
- Une différenciation très nette en étiage de la MES à la sortie de l'estuaire entre le chenal Nord ( $La/Sc = 5.4-5.9$ ) et le chenal Sud ( $La/Sc = 3.7-4.4$ ).

Le lanthane se révèle un traceur géochimique intéressant pour étudier les processus sédimentaires dans l'estuaire et la baie de Seine. Les données obtenues sont confirmées par les observations des sédimentologues, la distribution de 40 éléments à l'état de traces dans les suspensions et les sédiments, les résultats d'études particulières axés sur le fer et le zinc extractibles. En ce qui concerne l'utilisation des radionucléides artificiels, on observe un très bon accord pour les remises en suspension, en crue en amont de l'intrusion saline, de matériaux marins vraisemblablement déposés en étiage. Par contre, pour les sédiments de Honfleur, alors que le lanthane indique une influence fluviale indéniable ( $La/Sc = 4.7$ ), les radionucléides montrent une influence marine à 100%. Les résultats de ce double marquage indiquent une expulsion des particules fluviales en mer, suivie d'une réinjection partielle dans l'estuaire. En mesurant dans la matière organique, les rapports entre isotopes du carbone ( $C^{13}-C^{12}$ ), Thomas et Martin (communication personnelle) aboutissent à un schéma analogue dans l'estuaire de la Seine. La technique utilisée exploite les différences qui existent dans la distribution isotopique du carbone dans la matière organique d'origine continentale ( $\delta^{13}C = -24 \text{ à } -26$ ) et marine ( $\delta^{13}C = -15$ ). Ces apports terrigènes dans les estuaires ne sont pas particuliers à la Seine. Ils ont été déjà observés ailleurs ne serait-ce qu'en Baie de Seine; dans l'Orne (Auffret *et al.*, 1985), dans la Vire (Dubrulle et Larssonneur, 1984).

En novembre 1984 les apports de lanthane par le fleuve en crue n'a plus aucun caractère exceptionnel ( $La/Sc = 3.5$ ). Les suspensions de l'estuaire restent cependant marquées par cet élément ( $4.2 < La/Sc < 5.1$ ). Cette évolution amont-aval confirme, pour l'estuaire, les remises en suspension de matériaux déposés antérieurement, la réinjection d'anciens apports fluviaux ayant conservé la mémoire du message lanthane. On ignore encore l'ori-



gine de l'anomalie constatée en La entre 1978 (début des études) et décembre 1983 (La/Sc = 5.5 en amont pour cette dernière période).

#### 1.4. Les éléments non corrélés avec le scandium :

Les éléments non corrélés avec le scandium (Au, Ag, Hf, U, Sb, Zn dans suspension) dans l'estuaire de la Seine méritent un examen approfondi:

- a) teneurs élevées en crues 1979 et 1984 (Au, Ag), en crue 1979 (Au seulement); utilisation possible de Au comme traceur des suspensions fluviales,
- b) comportement géochimique peu connu (Au, Ag, Hf),
- c) intérêt fondamental (Zn, désorption à partir du bouchon vaseux),
- d) origine inconnue.

Pour faire ressortir, sur le plan quantitatif, la signification des analyses effectuées sur Au, Ag, Hf, Sb dans l'estuaire de la Seine, on a rassemblé dans le tableau 2, les données recueillies par Martin et Meybeck (1978) dans les grands étrangers, de Thomas *et al.* (1982) dans les grands fleuves français, les résultats obtenus (non encore publiés) par les équipes du GRECO "Manche" sur l'ensemble des côtes françaises et dans les grands fonds océaniques. Cette dernière étude a permis de passer en revue des échantillons de provenances très diverses et de pallier un manque de données, notamment au sujet de l'or, concernant leur présence en milieu marin.

On entamera la discussion avec le zinc qui illustre au mieux la prédominance des processus sédimentaires, propres à l'estuaire de la Seine, sur les mécanismes physico-chimiques.

##### 1.4.1. LE ZINC

Dans l'estuaire de la Seine les remises en suspension d'apports marins observées en crue en amont, masquent le phénomène de désorption au contact du milieu salin car les suspensions du fleuve (Zn = 800-900 ppm) sont nettement plus polluées que les apports marins (Zn = 75-100 ppm). La connaissance de ce processus sédimentaire est capitale sinon la diminution des teneurs en zinc qui atteint un facteur 3 (1979) lorsque S passe de 0 à 2.05‰, pour une teneur en Sc constante, serait à tort (Cuégueniat *et al.*, 1985), attribuée exclusivement à un déplacement de cet élément par les cations de l'eau de mer.

##### 1.4.2. L'OR

Les teneurs en or des suspensions de la Seine, en période de crue, sont exceptionnellement élevées (260-350 ppb) comparativement à tous les autres estuaires français; notons dans les grands fleuves étrangers: Amazone 250 ppb, Parana 70 ppb, Congo 40 ppb. Dans le Merderet, petit affluent de la Vire, qui se jette dans la partie Ouest de la baie de Seine, on a observé dans les sédiments des teneurs très élevées (570 ppb) liées à la richesse minière du bassin versant. Il n'y a pas, dans ce dernier cas, d'incidence au niveau de la baie de Seine: les suspensions et les sédiments de l'estuaire de la Vire ne présentent pas d'originalité particulière (13-17 ppb).

Dans le milieu marin côtier on observe parfois, très localement, dans les suspensions des teneurs en Au voisines de celles de la Seine en relation semble-t-il avec des activités portuaires (400 ppb en rade de Toulon) ou des origines granitiques (granit de Barfleur au Cap Lévy: des teneurs atteignant 350 ppb ont été relevées). L'hypothèse d'une origine portuaire pour l'or se trouve confirmée avec les résultats de la rade de Cherbourg (Au = 115 ppb) et le profil longitudinal de l'or dans la Seine et son estuaire avec une augmentation des teneurs au niveau de Rouen et du Havre. Dans le domaine des sédiments des grands fonds les teneurs en or sont très faibles (<10 ppb).

Ajoutons, au sujet des origines de l'or, la forte reconcentration (plusieurs ordres de grandeur) de cet élément, par rapport à la croûte terrestre, dans les météorites d'où une utilisation possible pour étudier les flux de matériaux extra-terrestres sur la terre (Crocket *et al.*, 1973).

Si on tient compte de tous les résultats d'analyses de suspensions et de sédiments analysés de 1978 à décembre 1984, les relations entre l'or et les autres éléments non corrélés avec le scandium sont, pour l'estuaire, les suivantes :

Au/Ag  $r^2 = 0.49$   
 Au/Sb  $r^2 = 0.742$   
 Au/Hf  $r^2 = 0.052$   
 Au/U  $r^2 = 0.277$   
 Au/Zn  $r^2 = 0.778$

#### 1.4.3. L'ARGENT

Dans les grands fleuves français - sauf Orne (Ag = 3ppm) - autres que la Seine, l'argent n'a pas été mis en évidence. Dans cette dernière les teneurs atteignent 13-24 ppm en crue; quelques teneurs plus élevées ont été enregistrées dans les fleuves étrangers: Saint-Laurent (60 ppm), Congo (38 ppm), Yenisseï (29 ppm), Ob (14 ppm)...

Dans le milieu marin (tableau 2) les résultats significatifs se limitent aux suspensions et aux sédiments de l'estuaire de la Seine (4 à 6 ppm). Le problème de l'argent mérite d'être posé pour la Seine et son estuaire : il représente un élément toxique important et sa biodisponibilité à partir des sédiments est élevée : Luoma - Jenne (1977), Harvey - Luoma (1985), Thomson *et al.*, 1985.

#### 1.4.4. L'ANTIMOINE

Les teneurs de l'antimoine dans les suspensions sont relativement peu variables (1 à 5 ppm) dans les estuaires étrangers et français, dont la Seine (4 à 5 ppm en crue), passés en revue. Le comportement géochimique de l'antimoine dans l'estuaire de la Seine se rapprocherait de celui de l'or ( $r^2 = 0.742$ ). Il se peut, comme c'était le cas de l'or, que les activités portuaires constituent une source d'introduction d'antimoine dans le milieu marin. Les teneurs élevées en antimoine, enregistrées en rade de Toulon (8-21 ppm), confirment cette hypothèse.

#### 1.4.5. L'URANIUM

Les teneurs de l'uranium dans les suspensions de la Seine en (1979) en crue (12-14 ppm), en étiage 1979 (7-9 ppm), ressortent assez nettement des normes habituelles observées dans les autres estuaires (2 à 5 ppm) étrangers (pas de données dans les autres estuaires français). En 1983 (étiage), (1984) (crue) les résultats obtenus ne présentent plus d'originalité particulière en amont (4 à 5 ppm). Dans l'évolution des résultats observés dans les suspensions de 1979 à 1984, la diminution de l'importance de l'uranium est à rapprocher de celle du lanthane. Une autre analogie apparaît entre ces deux éléments avec les évolutions croissantes (en crue 1984), décroissantes (en crue 1979) pour ces deux éléments dans les suspensions, du fleuve à la mer. Il en résulte pour les trois campagnes effectuées entre 1979 et 1984, une analogie entre le lanthane et l'uranium ( $r^2 = 0.541$ ). Cette propriété traduit avant tout une évolution quantitative comparable, caractéristique de ces deux seuls éléments, dans les apports fluviaux.



|                                                | (n)  | Au<br>ppb | Ag<br>ppm | Sb<br>ppm | Hf<br>ppm | Sc<br>ppm |
|------------------------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <u>Côtes françaises</u>                        |      |           |           |           |           |           |
| Estuaire Gironde                               | 2    | 63-67     | -         | 2.6-2.7   | 2.8- 7.9  | 12 -12.5  |
| Baie de Bourgneuf                              | 2    | x -21     | -         | NM -4.4   | 5.3-14.8  | 8.4-13.5  |
| Rade de Brest                                  | 3    | -         | -         | -         | 8 -14     | 12.7-16.2 |
| Aber-Wrach                                     | 4    | x -15     | -         | x -1.4    | 5.5-11.5  | 6.8-11.9  |
| Baie de Morlaix                                | 1    | -         | -         | -         | 9.9       | 10.6      |
| Rance                                          | 1    | 14        | -         | -         | 4.8       | -         |
| Baie Mt.-St.-Michel                            | 15   | <15       | -         | -         | 3.3-14.6  | 6 -11.9   |
| O-N-O Cotentin                                 | 6    | -         | -         | -         | 6 - 9.1   | 7.5-13.7  |
| Cap Hague                                      | (1)  | 6.2       | -         | 1.4       | 9.4       | 4.5       |
| Rade Cherbourg                                 | (3)  | 100-115   | -         | 2.0-4.0   | 7.8-12.8  | 6.8-9.3   |
| Cap Levy                                       | (12) | 19-350    | -         | 2.8-4.7   | 5-22      | 3 -10     |
| (zone granitique)                              |      |           |           |           |           |           |
| Cap Flamanville                                | (2)  | x -21     | -         | 6 -13     | 1.4-2.2   | 18 -39    |
| (zone granitique)                              |      |           |           |           |           |           |
| <u>Grands fonds (sédiments)</u>                |      |           |           |           |           |           |
| Cap-Vert                                       | (6)  | -         | -         | 0.4-1.1   | 1.8-4.1   |           |
| Pacifique                                      | (5)  | x -11     | -         | 1.6-1.7   | 6.7-8.2   |           |
| <u>Côtes françaises (suspensions)</u>          |      |           |           |           |           |           |
| Mer du Nord                                    | (3)  | 29-85     | -         | 1.1-1.6   | 1.7-2.5   | 5.8-8.4   |
| Petite rade Toulon                             | (2)  | 246-420   | -         | 8.1-20.8  | 0.5-1.3   | -2.5      |
| <u>Autres fleuves français*(suspensions)</u>   |      |           |           |           |           |           |
| Loire                                          |      | 44        | -         | 3.8       | -         | 14.6      |
| Dordogne                                       |      | 26        | -         | 4-5.1     | -         | 11.0      |
| Garonne                                        |      | 20-57     | -         | 3.5-4.7   | x -4.0    | 9.8-16.2  |
| Rhône                                          |      | 34        | -         | 2.7       | 3.0       | 11.4      |
| <u>Grands fleuves étrangers* (suspensions)</u> |      |           |           |           |           |           |
| Amazone                                        |      | 250       | -         | 1.9       | 6.2       | 18        |
| Congo                                          |      | -         | 38        | 1.0       | 5.1       | 12        |
| Danube                                         |      | -         | <0.3      | 1.9       | 5.7       | 16        |
| Ganges                                         |      | -         | -         | -         | 8.4       | 11.5      |
| Mékong                                         |      | -         | -         | 3.2       | 4.0       | 19.5      |
| Mississipi                                     |      | -         | 0.7       | -         | -         | -         |
| Niger                                          |      | -         | -         | -         | -         | -         |
| Nil                                            |      | -         | -         | -         | -         | -         |
| Ob                                             |      | -         | 14        | -         | -         | -         |
| Orénoque                                       |      | -         | -         | -         | -         | -         |
| St-Laurent                                     |      | -         | 60        | -         | -         | -         |
| Parana                                         |      | 70        | -         | 3.0       | 7.4       | 25.4      |
| Yenissei                                       |      | -         | 29        | -         | -         | -         |
| Tamise** (Suspensions)                         |      | -         | -         | -         | 1.7-5.2   | 7-16      |
| Tamise** (Sédiments)                           |      | -         | -         | -         | 2.8-6.0   | 1.8-8.6   |

Tableau 2.- Au, Ag, Sb, Hf, Sc dans suspensions et sédiments fluviaux, estuariens et marins.

x = limite inférieure non établie; - = non mesuré; n= nombre d'échantillons analysés.

\* = Thomas, Martin, 1982.

\*\*= Nelson, 1979.

#### 1.4.6. LE HAFNIUM

Parmi les résultats relatifs au hafnium, les suspensions et les sédiments de l'estuaire de la Seine (2.2-6.7 ppm) ne présentent aucune caractéristique particulière si on les compare aux grands fonds océaniques du Pacifique (6.7-8.2) et du Cap Vert (1.8-4.1), aux grands fleuves étrangers non pollués (4 à 7.4 ppm), aux autres fleuves français (3-4.8 ppm).

En Baie de Seine quelques sédiments dépassent nettement (15-25 ppm) les normes précédentes. Il n'y a guère que dans les suspensions granitiques (23 ppm au cap de Flamanville, 22 ppm au cap Lévy), dans la Tamise: jusqu'à 60 ppm, Nelson *et al.* (1979) que des valeurs équivalentes ou supérieures sont observées. Dans ce dernier cas, l'origine n'a pas été déterminée. Dans la baie de Seine on serait en présence de zircon, minéral lourd auquel se trouvent naturellement associés un certain nombre d'éléments à l'état de traces dont le hafnium. Ce dernier se trouve lié au zirconium avec un rapport Zr/Hf compris entre 39 et 40, proche des rapports observés d'une part dans les roches ignées et métamorphiques, dans les minéraux par Brook (1970), et d'autre part, dans les zircons (39) par Murali *et al.* (1983). Le hafnium, qui en activation neutronique possède une très bonne section efficace de capture de neutrons, constitue par conséquent un excellent indicateur de la présence de zirconium beaucoup plus difficile à doser en raison de la fission de l'uranium présent dans les échantillons lors de l'activation (apparition de zirconium de fission). Parmi les autres éléments associés au zirconium dans l'estuaire de la Seine, notons la présence de cobalt, thorium, molybdène, tantale, lanthane (La/Sc compris entre 7 et 7.5). Ces éléments pourraient avoir une origine naturelle, la présence de zircon ayant été constatée par observation au microscope (Avoine - communication personnelle).

Certaines fortes valeurs normalisées observées par le lanthane dans les sédiments de la baie de Seine s'expliqueraient soit par la présence de zircon, soit par l'influence de rejets industriels de l'aval, soit par la sédimentation des apports fluviaux les plus grossiers.

#### 2.- LE FER

On évoquera brièvement les principaux acquis obtenus sur le comportement géochimique du fer avant de développer les relations entre le fer et le scandium.

##### 2.1. Les acquis

a) la précipitation du fer revêt un caractère exceptionnel en Baie de Seine :

- sur le plan quantitatif: les teneurs en fer associé aux enduits minéraux des MES et sédiments peuvent atteindre 18 000-20 000 ppm pour l'estuaire;
- sur le plan qualitatif en raison de l'existence de rejets industriels (60-160 tonnes/jour) de sulfate ferreux qui posent des problèmes fondamentaux relatifs à une polymérisation des produits d'hydrolyse.

b) L'évolution du fer associé aux enduits minéraux dans les suspensions, en fonction de la salinité, s'explique par les processus sédimentaires révélés par le lanthane. L'évolution du fer associé aux enduits minéraux entre 1978 et 1984 traduit celle de rejets industriels qui ont été de 160 t/j en 1978, de 60 t/j en 1983.

c) Les rapports Fe II/Fe III dans les suspensions de l'estuaire (10 000 à 20 000 ppm de fer associé aux enduits minéraux) sont de 0.16 à 0.21, ils atteignent 7% au voisinage de l'émissaire de rejet industriel de fer (teneur en fer associé aux enduits minéraux : 50 000 ppm).



## 2.2. Les relations fer-scandium

Les relations entre le fer et le scandium sont très bonnes dans l'estuaire de la Seine :  $r^2 = 0.871$  pour 33 échantillons de suspensions ( $n = 26$ ) et de sédiments ( $n = 7$ ) recueillis entre 1978 et 1984.

Les valeurs moyennes suivantes (Fe/Sc) ont été observées :

- 3595 : suspensions de l'étiage 1978 ( $n = 6$ );
- 3620 : suspensions de la crue 1979 ( $n = 8$ );
- 3400 : suspensions de l'étiage 1981 ( $n = 5$ );
- 3083 : suspensions de l'étiage 1983 ( $n = 3$ );
- 3300 : suspensions de la crue 1984 ( $n = 6$ );
- 3520 : sédiments de 1979 prélevés ( $n = 6$ ) dans la zone enrichie en fer ( $0.8 < \text{Fe/Al} < 1.34$ ).

L'estuaire de la Seine peut être caractérisé par une valeur moyenne Fe/Sc de 3400, on trouve des résultats comparables de la partie fluviale (Fe/Sc = 3300-3350), dans les autres estuaires de la baie de Seine :

La Vire (3050-3500) d'une part, l'Orne (3125-3630) d'autre part.

En période d'étiage les transits sédimentaires en suspension s'effectuent de la baie vers l'intérieur de l'estuaire (Avoine & Crevel, 1985). Des analyses des suspensions effectuées dans ces conditions ont permis de caractériser les rapports Fe/Sc dans les apports marins: 3040 ( $n = 4$ ).

Dans les sédiments de la partie ouest de la baie de Seine, les valeurs Fe/Sc sont en moyenne de 2900 ( $n = 6$ ).

Dans les autres estuaires des grands fleuves français étudiés par Thomas et Martin (1982), on constate des résultats normalisés en fer comparables à ceux de la Seine : 3270 en Loire, 3380-3930 en Dordogne, 2780-3110 dans la Garonne, 2780 dans le Rhône. Dans une étude portant sur la Garonne, Cauwet *et al.* constatent que le rapport Fe/Sc varie peu depuis le fleuve (3020) jusqu'à l'embouchure (2970).

Il est étonnant de constater que la normalisation, par le scandium, des teneurs en fer total dans les sédiments et les suspensions de l'estuaire de la Seine ne permet pas de mettre en évidence:

- a) la zone de précipitation du fer;
- b) l'augmentation des teneurs en fer associé aux enduits minéraux qui se manifeste d'amont en aval;
- c) l'enrichissement inhabituel en fer associé aux enduits minéraux;
- d) l'évolution des rejets industriels dans l'estuaire.

Pour expliquer ce manque de variations dans les valeurs en fer normalisées par rapport au scandium, nous émettons l'hypothèse que ce dernier élément se trouve partiellement associé aux enduits minéraux. Les normalisations par rapport au scandium seraient par conséquent à utiliser avec précaution tout du moins dans l'estuaire de la Seine. Sur ce sujet d'intérêt fondamental se greffe un problème propre à l'estuaire de la Seine qui concerne la nature même des rejets industriels de fer effectués en aval. Ces derniers sont constitués de fer ferreux qui a un rayon ionique de  $0.74 \text{ \AA}$  très proche de celui du  $\text{Sc}^{3+}$  ( $0.81 \text{ \AA}$ ); la présence de ce dernier élément est très probable dans les composés ferreux (Norman - Haskin *et al.*, 1968) donc dans les rejets industriels. Les hydroxydes  $\text{Fe}^{3+}$  (oxydation immédiate du  $\text{Fe}^{2+}$  dans le milieu marin) et de  $\text{Sc}^{3+}$  étant très insolubles, on peut s'attendre à ce que le scandium soit coprécipité par l'hydroxyde ferrique. Il convient par conséquent, dans les futures recherches, de déterminer si la présence de scandium dans les enduits minéraux représente un phénomène général ou particulier à l'estuaire de la Seine. Pour le moment on se contentera de vérifier la présence de scandium dans les enduits minéraux de fer; nous avons opéré comme suit :

- a) mesure du scandium dans les eaux de la Manche et de l'estuaire de la Seine (filtration à  $0.45 \mu\text{m}$ );
- b) mesure du scandium dans les enduits minéraux d'un sédiment de l'estuaire.



### 2.2.1. Le scandium dissous dans les eaux de la Manche

Le scandium dissous a été analysé dans les eaux (filtrées à 0,45  $\mu\text{m}$ ) par coprécipitation avec  $\text{MnO}_2$  préparé dans le milieu à analyser par réduction du  $\text{MnO}_4\text{K}$  par  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Les résultats ont été les suivants :

- eaux côtières du nord-ouest Cotentin (n = 7): moyenne 0,0011  $\mu\text{g/l}$ ;
- étiage - estuaire Seine (n = 5): 0,0069-0,014 " "
- crue - estuaire Seine (n = 6): 0,0063-0,01 " "

Les teneurs du scandium dans les eaux côtières du nord-ouest Cotentin se situent dans la gamme de résultats (0,0002-0,001) observée par Spencer *et al.* (1970) et Brewer *et al.* (1972), qui constituent, avec celles de Darras *et al.* (1976), à notre connaissance, les seules données disponibles. En Baie de Seine, on enregistre des teneurs cinq à dix fois supérieures aux précédentes mais on a constaté des résultats équivalents dans les eaux côtières de la mer du Nord: 0,0131 dans le port de Dunkerque; 0,0062 à l'embouchure de l'Aa, 0,0024 à quelques milles des côtes du Pas-de-Calais.

Les rapports Fe/Sc dans les eaux de l'estuaire de la Seine, compris entre 2100 et 2700, sont légèrement inférieurs à ceux qui ont été observés dans les sédiments.

Dans les analyses d'eau précédentes, l'examen des réactifs utilisés n'a pas permis d'établir les teneurs en scandium du bruit de fond. Cependant, les travaux effectués par Darras *et al.* (1976) après séparation du scandium (activé directement sur 5  $\text{cm}^3$  d'eau de mer) confirme les données précédentes: les teneurs de cet élément sont de 0,0018  $\mu\text{g/l}$ , en Méditerranée, de 0,0017, en Manche. Par ailleurs, selon Darras *et al.*, 1976, les teneurs en Sc de la Seine seraient de 0,002  $\mu\text{g/l}$  inférieures à celles que nous avons trouvées dans l'estuaire : 0,006 à 0,014  $\mu\text{g/l}$ .

### 2.2.2. Le scandium dans les enduits minéraux

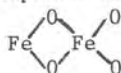
Une suspension de l'estuaire a été analysée à l'état brut puis après déferrugination par la méthode acide oxalique - oxalate  $\text{NH}_4^+$ . La teneur du fer extractible était de 11 000 ppm. A l'état brut, les teneurs en scandium étaient de  $8.3 \pm 0.2$  ppm. Après traitement elles étaient de  $6.3 \pm 0.2$  ppm: il y a par conséquent 2 ppm de Sc associés aux enduits minéraux (soit 20.25% du Sc total). Les rapports Fe/Sc sont de 3855 dans l'échantillon brut, de 3333 dans la matrice, de 5500 dans les enduits minéraux. La présence de Sc dans les enduits minéraux est ainsi démontrée.

### 2.3. Rétention des éléments à l'état de traces sur l'hydroxyde ferrique.

Les enduits minéraux de fer et de manganèse, les minéraux authigènes (carbonates, sulfates, sulfures), les aluminosilicates amorphes, la matière organique déterminent, pour la plupart des oligo-éléments, la réactivité de l'interface sédiment-eau. Le rôle de l'hydroxyde ferrique est capital à cet égard tant par la large gamme des éléments pouvant être adsorbés (Zn, Cu, Ni, Pb, As, Sb, Se, Cr, Cd, U, W, terres rares, Ru, Nb, Pu, Am, Th) que par la faiblesse des teneurs en  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  pouvant provoquer un entraînement partiel non négligeable à l'interface sédiment-eau ou dans la colonne d'eau. A des teneurs aussi faibles que 25  $\mu\text{g/l}$  d'eau de mer, l'hydrolyse de l'hydroxyde ferrique modifie très notablement la répartition formes solubles/ formes particulières de l'yttrium, du cobalt, du cérium et du niobium (Bernovskaya *et al.*, 1971) étudiés expérimentalement à titre d'exemple. Dans les sédiments étudiés, les teneurs en fer associées aux enduits minéraux sont élevées de l'ordre de 10 000ppm à 20 000ppm ce qui laisse présager un rôle important dans la sorption. Ces enduits sont constitués par des oxydes ou hydroxydes allant de l'état amorphe à l'état cristallisé. Le zinc se fixerait préférentiellement sur les composés amorphes (Gandon, 1983), le cobalt



sur les composés cristallisés (Luoma, 1981), d'où une distinction très importante à établir. Ainsi, le coefficient de distribution du zinc pourrait être 100 fois plus élevé ( $K_D : 10^7$ ) avec des composés OH-Fe-OH qu'avec des composés polymérisés avec liaisons pont-oxygène (Gandon, 1983).



Des études expérimentales de sorption avec traceurs radioactifs et des adsorbants sous forme amorphe et cristallisée (précipité de fer recueilli à la sortie de l'émissaire de rejet industriel de Thann et Mulhouse) illustrent l'importance jouée par la forme physico-chimique du fer (Gandon, 1983), en ce qui concerne les coefficients de distribution (KD) pour  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  en milieu marin :

|                                    | $^{65}\text{Zn}$    | $^{60}\text{Co}$      | $^{54}\text{Mn}$  |
|------------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| Fe(OH) <sub>3</sub> non polymérisé | $3.6 \times 10^6$   | $6.8 \times 10^5$     | $7.9 \times 10^5$ |
| Fe(OH) <sub>3</sub> polymérisé     | $2.3 \times 10^5$   | $1.2 \times 10^4$     | $2 \times 10^4$   |
| Goethite                           | $1 \times 10^4$     | $0.8-2.0 \times 10^3$ | $6 \times 10^1$   |
| Limonite                           | $1 \times 10^4$     | $7 \times 10^2$       | $2 \times 10^2$   |
| Hématite                           | $0.3-6 \times 10^3$ | $1 \times 10^3$       | $1 \times 10^3$   |
| Magnétite                          | $4 \times 10^2$     | $1 \times 10^2$       | $7 \times 10^1$   |
| Sidérite                           | $2 \times 10^4$     | $1 \times 10^3$       | $2 \times 10^3$   |
| Pyrite                             | $5.5 \times 10^3$   | $4 \times 10^1$       | $5 \times 10^1$   |
| Précipite de source hydrothermale  | $2 \times 10^5$     | $5 \times 10^2$       | $3 \times 10^2$   |
| Précipite Thann* Mulhouse          | $6 \times 10^4$     | $9 \times 10^2$       | $3 \times 10^2$   |

\* échantillon recueilli en 1978 à la sortie de la conduite de rejets.

La rétention des éléments traces sur les composés ferriques représente, par conséquent, un phénomène important dans le cycle des métaux. Le plus souvent, seule une action positive est envisagée. On oublie alors le rôle négatif de ces mêmes enduits, associés aux sédiments, qui dissimulent les sites de sorption localisés sur la matière organique et les argiles. Ce phénomène concerne en particulier le césium dont l'affinité pour les argiles et plus particulièrement l'illite est bien connue alors que sa sorption sur les composés ferriques est nulle en milieu marin. C'est avec cette double optique "positive-négative" que l'étude de la réactivité des enduits minéraux du fer a débuté en considérant :

- les échantillons prélevés entre 1978 et 1984 au nombre de 6, sur les 60 analysés, qui se singularisent par des teneurs en fer, normalisées par rapport au scandium anormalement élevées;
- des éléments théoriquement entraînés par la précipitation de Fe(OH)<sub>3</sub> (Sb, Zn, Co, As, Cr);
- un élément non entraîné (Cs);
- un élément sur lequel on ne dispose pas d'informations (Au).

Les résultats obtenus, normalisés par rapport au scandium, reportés dans le tableau 3 dégagent un classement moyen des affinités des éléments pour le fer: Sb; Zn (2.8) > Au (1.9) > Co (1.75) > As (1.15) > Cs (0.93).

Ces données permettent d'illustrer l'importance que peut revêtir l'hydroxyde ferrique dans la rétention des éléments à l'état de traces. Pour approfondir cette question, il faudra : a) déterminer la fraction des éléments liée à Fe(OH)<sub>3</sub> en analysant des échantillons bruts et débarrassés du fer extractible; b) tenir compte du degré de cristallisation des oxydes et hydroxydes ferriques.

|                                                                 | Fe/Sc                                  | Sb/Sc | Zn/Sc | Co/Sc   | As/Sc   | Au/Sc<br>x 10 <sup>3</sup> | Cs/Sc  |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------|---------|---------|----------------------------|--------|
| Valeurs (A)<br>habituelles                                      | 3440                                   | 0.25  | 40    | 1.2-2.0 | 1.3-1.5 | 6-8                        | 1-1.15 |
|                                                                 | Teneurs Fe/Sc accidentellement élevées |       |       |         |         |                            |        |
| Estuaire (a)                                                    | 4120                                   | 0.87  | 112   | 3.5     | 1.71    | 2                          | 1.02   |
| " (b)                                                           | 4637                                   | 0.84  | 119   | 3.0     | 1.28    | 12                         | 0.87   |
| " (c)                                                           | 4400                                   |       | 44    | 2.0     | 1.53    | 6                          | 0.90   |
| " (d)                                                           | 3750                                   | 0.50  | 165   | 2.0     | 1.71    | 24                         | 1.14   |
|                                                                 | 3855                                   | 0.39  | 83    | 3.5     | 2.04    | 22                         | 1.06   |
| moyenne (B)                                                     |                                        | 0.65  | 105   | 2.8     | 1.65    | 13.2                       | 1.0    |
| B/A                                                             |                                        | 2.6   | 2.6   | 1.75    | 1.18    | 1.88                       | 0.93   |
| MES recueillie à la sortie de l'émissaire de rejets industriels |                                        |       |       |         |         |                            |        |
| C                                                               | 9844                                   | 0.36  | 34.4  | 3.3     | 3.9     | 15.6                       | 0.75   |

Tableau 3.- Etude de la distribution de quelques éléments (Sb, Zn, Co, As, Au, Cs) dans des échantillons riches en fer.

La rétention des éléments au niveau des hydroxydes de fer va constituer un des prochains axes de recherches, les données précédentes ne sont que préliminaires.

### C.- CHIMIE DES EAUX

#### 1. INTRODUCTION

Les auteurs qui se sont intéressés au comportement des éléments solubles en milieu aqueux ont le plus souvent utilisé des classifications empiriques qui traduisent la complexité de l'approche du problème.

En dehors des formes ioniques simples, Batley, Florence (1976) ne distinguent pas moins de sept catégories de complexes organiques de stabilités croissantes caractérisés par leur réponse vis-à-vis de trois traitements élémentaires (échanges d'ions sur résine complexante, irradiation ultraviolette, redissolution anodique) (d'après Courtot-Coupez, 1979-1980); Figuera, MacDuffie (1980) utilisent les vocables de composés (inorganiques ou organiques) très labiles, modérément labiles, légèrement labiles et inertes (d'après Leppard, 1983); Fukai *et al.*, 1975 différencient les formes minérales (cationiques ou associées à des composés inorganiques labiles) des formes complexées par la matière organique oxydables en milieu persulfate.

Pour doser les éléments dissous nous avons utilisé deux méthodes :

la polarographie par redissolution anodique en mode impulsif différentiel et la préconcentration des métaux étudiés sur  $MnO_2$ . La première permet de doser Cu, Pb, Cd, en différenciant les classes: métal libre, métal complexé sous forme non organique, métal complexé par matière organique; la seconde dose Fe, Zn, Cu et distingue les formes minérales, les formes organiques dégradables et les formes organiques non dégradables. La polarographie utilisée par le laboratoire de Lille offre en outre l'intérêt de déterminer la capacité complexante des eaux en faisant intervenir la concentration totale des ligands organiques et la constante de stabilité des complexes formés.

#### 1. METHODES UTILISEES

##### 1.1. Etudes par polarographie (CM Lille)

Les analyses par redissolution anodique en mode impulsif différentiel fournissent, pour un échantillon d'eau filtrée sur 0,45  $\mu m$ , 3 valeurs:



a) la concentration en métal dit libre, directement accessible par la méthode de dosage, cette concentration dépend de la valeur du potentiel appliqué à l'électrode indicatrice pendant la phase de dépôt (- 1,2 V par rapport à l'électrode au calomel pour le dosage du Pb et du Cd et - 0,8 V pour le dosage du cuivre) qui se fait au pH naturel de l'eau de mer.

b) La concentration en métal mesurée en milieu acide ( $\text{HNO}_3$ , pH 1). En déduisant de la valeur obtenue la concentration en métal libre, on obtient la fraction engagée dans les complexes détruits en milieu acide: il s'agirait essentiellement de composés d'origine minérale.

c) La concentration obtenue après irradiation ultraviolette en milieu acide qui représente la teneur de l'élément, toutes formes confondues. On obtient la fraction engagée dans les complexes détruits par irradiation UV en déduisant la précédente valeur.

### 1.2. Sorption sur $\text{MnO}_2$

En tirant profit des modalités de sorption des éléments à l'état de traces sur  $\text{MnO}_2$ , on a distingué des formes coprécipitables et des complexes minéraux et organiques dégradables.

#### 1.2.1. Formes coprécipitables :

La coprécipitation du bioxyde de manganèse dans l'eau de mer, entraîne avec des rendements de 90 à 100%, les formes minérales et laisse en solution les composés organiques. Le bioxyde de manganèse est préparé dans la solution à analyser par réduction de  $\text{KMnO}_4$  à pH 8 en assurant un contact de 24 heures. Les composés minéraux non complexés (formes libres), les complexes minéraux et organiques instables pendant la durée de l'expérience sont entraînés, Guéguéniat *et al.*, 1975-1976. Cette méthode à ce stade n'offre pas un caractère original marqué; elle a déjà été utilisée par de nombreux auteurs Gadde Laitinen (1974), James & Naughton 1977, Murray (1975) Fukai (1966), Van Den Berg (1984). Les modes de préparation des adsorbants sont très différents selon les auteurs et il faut bien distinguer entre les coprécipitations dans la solution et les simples adsorptions sur des précipités colloïdaux préformés et même secs et réduits en poudre.

#### 1.2.2. Des complexes dégradables :

Sur une eau épuisée par le traitement précédent, une seconde précipitation  $\text{MnO}_2$  ( $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ ) suivie d'un contact de 3 mois entre le précipité et l'eau de mer entraîne les complexes minéraux et organiques dont la stabilité est inférieure à 3 mois et supérieure à 24 heures (puisque ces composés n'ont pas été entraînés lors de la première coprécipitation). Cette observation est empirique mais elle révèle l'existence de composés qui ont des propriétés bien réelles.

### 1.3. Le pouvoir complexant des eaux

La méthode de détermination de la capacité complexante apparente des eaux de l'estuaire de la Seine utilisée est dérivée de celles proposées dans la littérature (Hart, 1981; Chau, 1974; Van Den Berg, 1979). En faisant l'hypothèse simplificatrice, de l'existence du seul équilibre :  $\text{Cu} + \text{Hu} \rightleftharpoons \text{Cu-Hu}$  (les charges ont été omises pour plus de clarté) ou Hu représente le complexant organique, Cu le cuivre libre, Cu-Hu le complexe 1-1 formé.

$$\frac{\text{Cu}}{(\text{Cu})_T - (\text{Cu})} = \frac{(\text{Cu})}{(\text{Hu})_T} + \frac{1}{K' (\text{Hu})_T} \quad (\text{Plavsic, 1982})$$

avec :

(Cu) : concentration du cuivre "libre",

(Cu)<sub>T</sub> : concentration totale en cuivre,

(Hu)<sub>T</sub> : concentration totale en ligande organique,

K' : constante apparente de stabilité du complexe Cu-Hu.

Ainsi, en suivant la concentration du cuivre "libre" supposée directement accessible par la technique analytique utilisée (redissolution anodique en mode impulsif différentiel) lors d'ajouts connus de cuivre à différents échantillons provenant d'un même site de prélèvement, on peut atteindre la concentration totale en ligand organique ( $Hu_T$ ) et la constante apparente de stabilité ( $K'$ ) par l'étude mathématique des droites obtenues en traçant :

$$\frac{(Cu)}{(Cu_T) - (Cu)} = f |(Cu)|$$

La valeur de la pente des droites permet de déterminer  $Hu_T$  et l'ordonnée à l'origine  $K'Hu_T$ . La concentration totale en ligande organique ( $Hu_T$ ) est généralement retenue comme estimation de la capacité complexante des eaux. Pour leur part, Fischer *et al.*, 1985 préfèrent utiliser le critère  $K'(Hu_T)$  qui fait intervenir la constante de stabilité dans la définition du pouvoir complexant. On montre que  $K'(Hu_T) \sim (Cu-Hu)/Cu$ , la concentration totale en ligande organique étant généralement très grande par rapport à la concentration initiale en cuivre. Le produit  $K'(Hu_T)$  nous renseigne donc dans la plupart des cas sur la valeur du rapport: métal complexé/métal "libre".

## 2. LE CUIVRE DISSOUS DANS L'ESTUAIRE

Les deux méthodes d'analyses s'articulent autour du cuivre dont l'étude sera développée pour illustrer l'intérêt de travailler sur un même sujet avec deux techniques différentes :

### 2.1. Le calcul

Le cuivre semble représenter un élément idéal pour étudier la complexation par la matière organique. En effet, selon les méthodes de calcul, (voir ci-dessous) 90 à 98% du cuivre seraient complexés par la matière organique lorsque la salinité varie de 0 à 28‰. (Fisher - Wartel, 1985).

|                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| SZ                 | < 1  | 3.4  | 6.4  | 9    | 21.9 | 24   | 28   | 29.6 |
| Cu-Hu              | 99.6 | 97.9 | 96.3 | 95.2 | 95.4 | 95.0 | 91.8 | 84.0 |
| Cu-CO <sub>3</sub> |      | 1.9  | 3.1  | 4.0  | 4.3  | -    | 7.7  | 13.3 |

### 2.2. Les résultats obtenus sur le terrain

On a rassemblé dans le tableau 4 la répartition, en fonction de la salinité ( $0.6‰ < S < 29.6‰$ ), des formes chimiques du cuivre dissous: fraction coprécipitable avec  $MnO_2$ , complexes organiques dégradables après 3 mois de contact avec  $MnO_2$ , complexes détruits par abaissement de pH (polarographie), cuivre total (polarographie).

Les teneurs en cuivre total varient de 3.5 µg/l (en amont) à 1.2 (en aval). En ce qui concerne les répartitions des diverses formes il y a apparemment contradiction entre les deux techniques notamment en ce qui concerne l'estimation des formes libres qui sont négligeables pour la polarographie alors qu'elles représentent 0.2 à 0.8 µg/l selon  $MnO_2$ . Cette opposition serait due à l'instabilité de certains complexes pendant la durée de l'expérience en présence des réactifs utilisés ( $KMnO_4 - H_2O_2$ ).

C'est précisément cette instabilité qui pourrait expliquer les discordances (Van Den Berg, 1984) observées actuellement entre de nombreux auteurs au sujet du cuivre. Les données de la littérature citées ci-dessous reprennent celles de Van Den Berg; elles sont édifiantes pour illustrer l'actualité, la difficulté et l'intérêt du sujet.



Par conséquent, il n'y aurait pas destruction des composés organiques de stabilité supérieure à 24 h (en présence de  $MnO_2$ ) dans l'estuaire et il n'y aurait pas d'influence des rejets industriels de l'aval en ce qui concerne cette fraction.

### 3. EVOLUTION DU POUVOIR COMPLEXANT

Les valeurs de  $H_u$  et  $K'H_{uT}$  (pouvoir complexant) sont reportées dans le tableau 4. D'une manière générale, il semble que le comportement de la matière organique ( $H_u$ ) soit conservatif dans l'estuaire ( $r^2$  en fonction de  $S = 0.828$ ). Les constantes de stabilité ( $K \times 10^7$ ) sont également relativement constantes : 2.1 à 6.8 pour  $3.4 < S\text{‰} < 29.6$ . Par contre, en amont pour  $S = 0.64\text{‰}$ ,  $K = 14.4$ ; on obtient pour ce point un pouvoir complexant (P.C.) très élevé (101) comparable à ceux qui ont été observés: dans le lac Huron : (320), dans la rivière Onaping (152) par Van Den Berg (1979). En aval ( $S = 28 - 30\text{‰}$ ) dans la Seine, P.C. = 6-11, valeurs proches de celles de la Manche orientale (5.1) et de la mer Adriatique Plavsic, 1982).

Le pouvoir complexant des eaux représente une notion importante: il peut en partie rendre compte de l'extraction et de la remobilisation des métaux et de la matière organique à partir des particules en suspensions. Ainsi, en un même point entre la surface ( $S\text{‰} = 9.5$ ) et le fond ( $S\text{‰} = 9.0$ ), les constantes de stabilité ont été nettement supérieures en surface (6.8) qu'au fond (2.1) alors que les teneurs en matières organiques sont plus élevées au fond ( $7.7 \times 10^7$ ) qu'en surface ( $6.1 \times 10^7$ ). Ce phénomène pourrait être imputable à une modification de la composition et des propriétés des eaux de fond provoquée par une remise en suspension d'apports marins constatée en géochimie.

| S‰   | $H_u \times 10^7$<br>mole/l | Pouvoir<br>complexant | CuT  | CuM  | CuOD | CuH <sup>+</sup> |
|------|-----------------------------|-----------------------|------|------|------|------------------|
| 0.6  | 7.0                         | 101.1                 | 1.56 | 0.54 | 1.20 | 1.37             |
| 3.4  | 10.5                        | 38.4                  | 2.93 | 0.52 | 1.17 | 2.70             |
| 6.4  | 8.32                        | 26.1                  | 3.42 | 0.38 | 0.82 | 2.63             |
| 9.0  | 7.7                         | 15.9                  | 2.40 |      |      | 2.0              |
| 9.5  | 6.1                         | 41.7                  | >2.8 | 0.19 | 0.73 | 2.77             |
| 21.9 | 4.84                        | 21.8                  | 1.35 | 0.40 | 0.53 | 1.06             |
| 23.9 | 5.42                        | 19.2                  | 1.63 | 0.24 | 0.40 | 1.25             |
| 24.1 | 6.7                         | 18.7                  | 1.46 | 0.23 | 0.31 | 1.07             |
| 26.8 | 2.32                        | 14.4                  | 0.69 | 0.40 | 0.30 | 0.99             |
| 27.2 | 3.08                        | 10.8                  | 0.79 | 0.29 | 0.31 | 0.76             |
| 28.0 | 2.86                        | 11.1                  | 1.58 | 0.42 | 0.32 | 1.06             |
| 29.6 | 1.87                        | 5.9                   | 1.17 | 0.86 | 0.27 | 1.17             |

Tableau 4.- Evolution dans l'estuaire: concentration en ligand organique ( $H_{uT}$ ), pouvoir complexant ( $K'$ ), cuivre total (CuT), cuivre engagé dans des complexes détruits par abaissement de pH (Cu-H<sup>+</sup>), cuivre coprécipitable avec  $MnO_2$  (Cu-M), cuivre organique dégradable (Cu-O-D) après 3 mois de contact avec  $MnO_2$ . Les teneurs en cuivre sont exprimées en  $\mu\text{g/litre}$ .  $H_{uT}$  représente la somme des ligands complexants organiques exprimés en  $10^{-7}$  mole/l.

| % de la fraction organique | Technique                                       | Référence                     |
|----------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|
| 30 - 50 %                  | Chelex                                          | Batley Florence 1976          |
| 80 %                       | DPASV                                           | Duinker et Kramer 1977        |
| 50 - 75 %                  | ultrafiltration DPASV                           | Hasle et Abdullah 1981        |
| 97 %                       | XAD - 2                                         | Hirose <i>et al.</i> , 1982   |
| 3 - 5 %                    | XAD - 2 + chromatographie                       | Mills et Quin 1981            |
| 50 %                       | filtration DPASV                                | Nilsen et Lund 1982           |
| 80 %                       | XAD - 2 - extraction                            | Sogiùira <i>et al.</i> , 1978 |
| 6 - 30 %                   | séparation des molécules organiques par bullage | Wallace 1982                  |

L'utilisation des deux techniques se révèle un atout intéressant :

Par la polarographie on établit que le cuivre se trouve essentiellement sous forme organique (à plus de 90%) avec 90% de composés organiques détruits par abaissement de pH.

Par  $MnO_2$ , on montre que dans la fraction détruite par abaissement de Ph, il existe trois catégories de complexes: les premiers ont une stabilité inférieure à 24 heures, les seconds une stabilité comprise entre 24 heures et 3 mois, les derniers ne sont pas détruits par le traitement précédent.

Les composés dégradables ont une existence bien réelle dans le milieu; on en veut pour preuve les propriétés très différentes qu'ils présentent dans l'estuaire :

Composés dégradables de stabilité inférieure à 24 heures.

L'évolution de ces composés est indépendante de la salinité (fig. 3) et du pH (Gandon *et al.*, 1985).

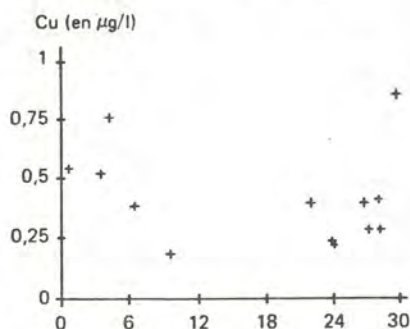


Fig. 3.- Evolution des composés minéraux du cuivre en fonction de la salinité (les complexes dégradables pendant la durée de l'expérience appartiennent à cette fraction).

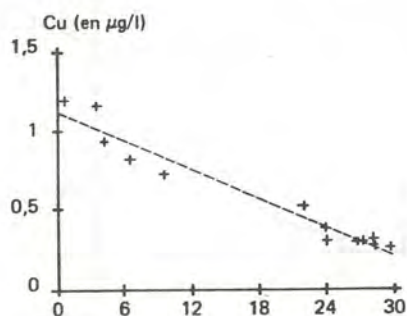


Fig. 4.- Evolution des composés dégradables du cuivre (stabilité supérieure à 24 heures et inférieure à 3 mois) en fonction de la salinité.

Composés dégradables (1 j < t < 3 mois).

L'évolution du cuivre organique dégradable est fonction de la salinité ( $r^2 = 0.928$   $n = 11$ ) (fig. 4).

Les comportements de la matière organique et du cuivre organique seraient conservatifs dans l'estuaire (Gandon *et al.*, 1985); en ce qui concerne les composés organiques du cuivre, les relations avec la salinité sont :



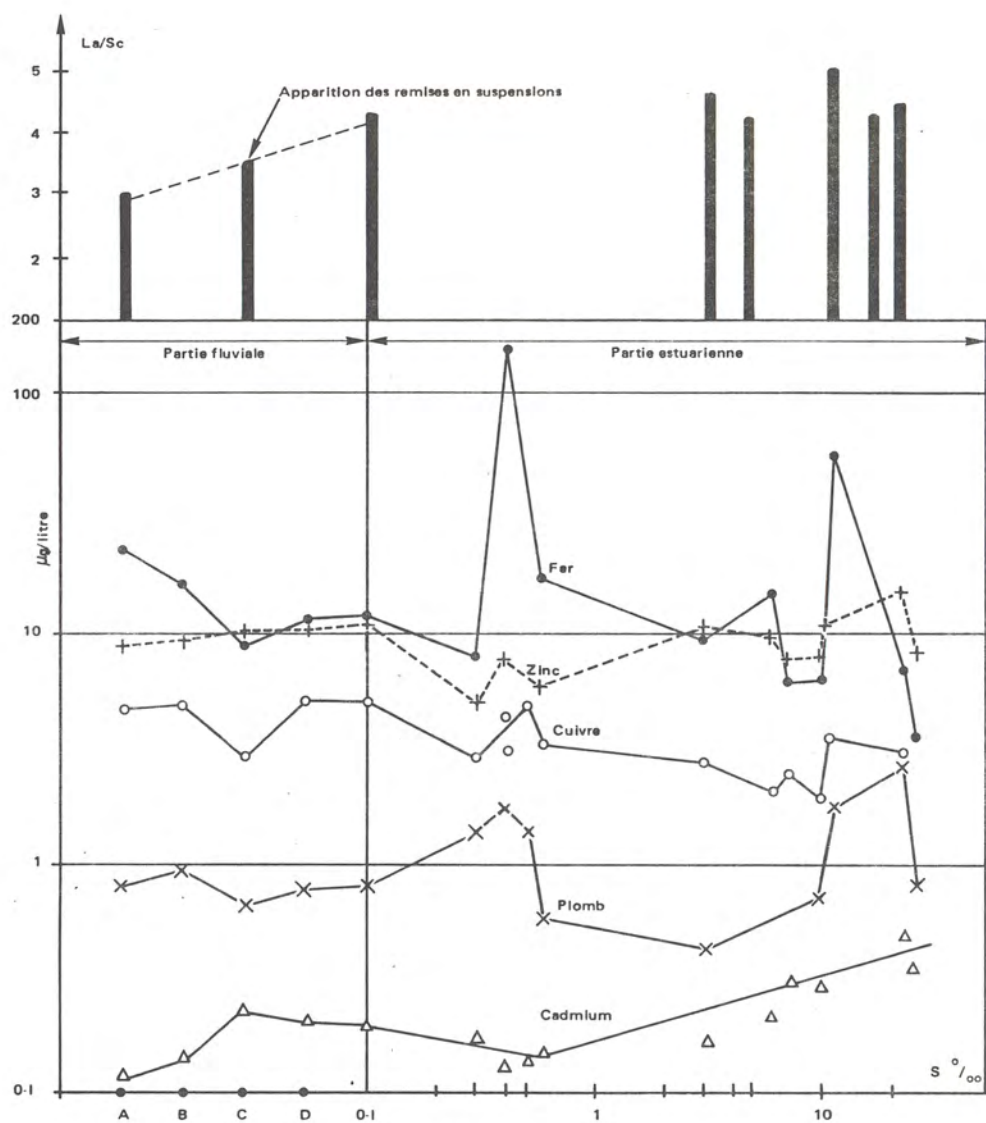


Figure n° 5 - Evolution des teneurs en fer - zinc - cuivre - plomb - cadmium dans les eaux de la Seine et son estuaire - A : St Aubun B : La Bouille C : Vieux Port D : Quillebeuf

|                                          |               |   |          |
|------------------------------------------|---------------|---|----------|
| Cuivre total                             | $r^2 = 0.825$ | } | $n = 11$ |
| Complexes déplacés en milieu acide       | $r^2 = 0.832$ |   |          |
| Complexes dégradables (1 j < t < 3 mois) | $r^2 = 0.928$ |   |          |

#### D.- INFLUENCE DES PROCESSUS SEDIMENTAIRES SUR LES TENEURS EN ELEMENTS DISSOUS.

Les sorptions et désorptions d'éléments à l'état de traces dont les suspensions apportées par la Seine sont le siège au contact du milieu salin sont difficiles à étudier en raison des dissolutions des mêmes éléments qui accompagnent les remises en suspension de matériaux marins dans le domaine des faibles salinités et même en amont de l'intrusion saline. Ce thème n'a pas été traité lors du colloque de Baie de Seine à Caen : les publications en chimie des eaux, de même que la discussion précédente sur le cuivre (§ D2) ont été établies avec des échantillons recueillis en décembre 1983, avec des moyens à la mer lourds, ne permettant pas d'obtenir des eaux de salinité inférieure à 0,6‰ en surface, de 6‰ au fond. Au cours de la campagne de novembre 1984 en crue, à la bouée 22, on a pu explorer ce domaine des faibles salinités en appliquant la méthodologie décrite précédemment. Les résultats obtenus lors de cette campagne pour cuivre, cadmium, plomb, fer, zinc, dissous sont reportés sur la figure n° 5. Il s'agit pour les trois premiers éléments du métal total dosé par polarographie, pour les deux derniers des composés libres et des complexes organiques et minéraux de stabilité inférieure à 24 heures fixés sur  $MnO_2$ . Dans le cas du fer et du zinc les valeurs présentées sont obtenues par défaut mais pour le fer la fraction mesurée représente 90 à 95% du total. Les remises en suspension de matériaux marins provoquent un net accroissement du fer dissous (filtration 0,45  $\mu m$ ) vers l'amont dans les eaux peu salées : on passe en effet de 10  $\mu g/l$  dans la partie fluviale à 167  $\mu g/l$  pour  $S = 0,4‰$  au fond. Dans les mêmes conditions les teneurs en plomb sont multipliées par un facteur 3 (0,6 à 1,8  $\mu g/l$ ). Cette solubilisation est moins nette pour le cuivre et le zinc, elle n'existe pas pour le cadmium. Pour ce dernier élément les teneurs croissent régulièrement vers l'aval (0,2 à 0,7  $\mu g/l$ ) suite à la formation de complexes  $CdCl_3^-$  et  $CdCl_4^{--}$ . Dans cet exemple, le message lanthane disparu dans les suspensions de la Seine (La/Sc = 2,99 en amont de Rouen) mais on le retrouve dans l'estuaire avec la remise en suspension des anciens apports fluviaux : La/Sc = 3,5 dans la zone de mélange en amont de l'intrusion saline (Vieux-Port), 4,3 à la bouée 22 ( $S = 0‰$ ), dans l'estuaire lors de la basse mer, 4,6 à la bouée 22 ( $S = 3,2‰$ ), 5,1 à la bouée 22 ( $S = 6,4‰$ ).

La décroissance vers l'aval des teneurs en éléments particuliers résulte, d'une mise en solution de ces éléments et d'un mélange avec des sédiments issus de l'aval pauvres en métaux. Le matériel particulaire présent en une station X de la zone de mélange est constitué de 3 fractions : fluviale ancienne (F.A.), fluviale récente (F.R.), apports marins (M).

Le taux de décroissance d'un élément particulaire, entre une station du fleuve et une station X de la zone de mélange, est fonction de la salinité des eaux en X, des teneurs dans les fractions  $F_A$ ,  $F_R$ , M et de la composition du matériel particulaire en X. A titre d'exemple on observait les taux de décroissance suivants à la bouée 28, en crue lors de la pleine mer de mortes eaux ( $S = 1,6‰$ ).

- 80 - 90% : Au
- 70 - 80% : Ag, Zn
- 60 - 70% : Ba, Hf, V, W
- 50 - 60% : Co, Sb, Tb, Yb
- 40 - 50% : Cr, La
- 30 - 40% : Ce, Eu
- 10 - 20% : Rb, Th, Sc
- 0 - 10% : Cs

Il résulte de cette situation à la station X une faible pollution des particules (Zn = 225 ppm, Au = 50 ppb, Ag = 3.7 ppm) comparativement aux observations faites en amont le même jour (Zn = 900 ppm, Au = 300 ppb, Ag = 14-24 ppm). Comme les éléments à fort taux de décroissance sont très appauvris dans les apports marins (Zn = 90 ppm, Au = 8 ppb, Ag non mesurable) on est amené à



penser que cette fraction M est nettement prédominante dans les particules en suspension au niveau de la station X. L'examen des valeurs  $La/S_c$  : 7.2 pour la fraction  $F_R$ , 5.2 en X, 3.3 pour M indique au contraire une prédominance de la fraction fluviatile qui ne peut être qu'ancienne. Ceci implique que l'or et le zinc ont une réactivité élevée dans l'estuaire, d'où une élimination importante dans  $F_A$  suite à une trajectoire, en milieu marin, dans l'espace et dans le temps qui reste à préciser.

Le problème de l'estimation quantitative des fractions  $F_A$ ,  $F_R$ , M est complexe. En outre, dans l'exemple cité,  $F_A$  a été soumis à une variation de salinité de 0 à 1.6‰ qui a pu déjà remettre en solution une partie de la fraction réactive de Au et Zn; ceci est surtout possible pour Au si on considère la faiblesse relative des teneurs et la formation probable de complexes chlorés solubles. Cependant, le processus de décroissance est déjà nettement entamé en amont de l'intrusion saline (bouée 28, crue, basse mer de mortes eaux), l'hypothèse précédente est ainsi confirmée.

Une autre conséquence intéressante de la réactivité des métaux liés aux sédiments a été évoquée par Chauvin *et al.*, 1985 : il concerne la dispersion des éléments à l'état de traces associés aux produits de drainage issus du Havre et rejetés dans la baie de Seine au large d'Octeville. Une campagne effectuée en 1980 sur les sédiments superficiels, dont sont extraites ces vases, avait permis de mettre en évidence des concentrations en zinc de 200 ppm, en As de 14,5 ppm, en cuivre de 43 ppm, en plomb de 82 ppm. Les concentrations des micropolluants minéraux des sédiments déposés sur le site d'Octeville sont inférieures aux précédentes. Cet appauvrissement est probablement lié à une redissolution des éléments lors des dragages ou opérations annexes (Chauvin *et al.*, 1985). Les teneurs ( $\mu\text{g/l}$ ) mesurées sur des eaux filtrées en 5 stations recueillies sur la zone de dépôt sont relativement élevées puisqu'elles peuvent atteindre 72 pour Zn, 4,7 pour Cd, 2,6 pour Pb, 7,4 pour Cu.

#### DISCUSSION - CONCLUSION

L'estuaire et la baie de Seine représentent un système à maints égards perturbé :

- complexité des processus sédimentaires avec en particulier la réinjection dans l'estuaire d'anciens apports fluviatiles;
- rejets industriels de l'aval de l'estuaire;
- présence de matière organique vivante dans la baie;
- existence des rejets de dragage du port du Havre.

La décroissance amont-aval des concentrations métalliques particulières sous l'influence de mélange avec des sédiments pauvres en métaux issus de la partie aval des estuaires a été constatée dans certains estuaires nord-européens par Muller *et al.* (1975), Dunker *et al.* (1976). Dans l'estuaire de la Seine cette décroissance paraît en certains cas être spectaculaire, les teneurs en zinc peuvent chuter de 1000 ppm (partie fluviale) à 20 ppm en amont de l'intrusion saline. Dans cet estuaire de la Seine, le matériel provenant de l'amont est constitué en partie par d'anciens apports fluviatiles qui ont perdu la fraction métallique réactive. Il ressort de ces processus sédimentaires une dissimulation des indices de pollutions qui réapparaît dans la baie au niveau de la matière organique vivante avec des teneurs en zinc pouvant atteindre 1500 ppm. On ne peut s'empêcher de relier cet enrichissement en zinc avec d'une part la présence, dans la zone de prélèvement, de Diatomées du genre *Chaetoceros*, de Dinoflagellés, de Tintinnoides et de larves d'Ostracodes constatées par Dupont *et al.*, 1985, avec d'autre part, les redissolutions de zinc consécutives aux dépôts de dragages (des teneurs de 72  $\mu\text{g/l}$  en zinc ont été observées). La reconcentration des métaux par la matière organique vivante pose le problème des transferts dans les chaînes trophiques. Malheureusement on ne dispose pas, pour le moment, des données quantitatives sur les teneurs des principaux polluants métalliques dans les divers maillons des chaînes. Il

manque, par conséquent, un lien entre les données de chimie-géochimie et les résultats de bioaccumulation obtenus par Chassard-Bouchaud *et al.* (1985) avec la microscopie analytique. Il serait de même intéressant d'étudier la biodisponibilité, à partir des sédiments, du plomb, zinc, cuivre, nickel, argent, or, selon que ces éléments sont ou ne sont pas associés à l'hydroxyde ferrique.

- 
- Auffret J.P., Guéguénat P., Lepy M.C., Patry J.P. & Saur H. (1985).- Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983. Ce volume, N° 21.
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine. Sédiments et dynamique sédimentaire Thèse de 3ème cycle. Mention Géologie. 19/01/1981. Université de Caen. U.E.R. des Sciences de la Terre et de l'Aménagement Régional.
- Avoine J., Boust C.D. & Guillaud J.F. (1984).- Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine (France). Proc. Symp. on Contaminant Fluxes through the Coastal Zone, Nantes.
- Avoine J. & Crevel L. (1985).- Influence des apports fluviaux en Baie de Seine. Ce volume, N° 10.
- Batley G.E. & Florence T.M. (1976).- Determination of the chemical forms of dissolved cadmium, lead and copper in seawater, *Mar. Chem.*, 4: 347.
- Bernovskaya R.N., Bogdanov Y.A., Gromov V.V., Lisitsyn A.P., Spitsyn V.I. & Tikhomirov V.N. (1971).- Influence of iron on the physico-chemical state of radioelements in sea water. *Radiochemistry* 13, 1, pp. 158-160.
- Boust D. (1981).- Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3ème cycle soutenue le 27/02/1981 à l'Université de Caen. U.E.R. des Sciences de la Terre et de l'Aménagement régional.
- Brewer P.G., Spencer D.W. & Robertson D.E. (1972).- *Earth. Planet. Sci. Letters*, 16, 111.
- Brooks C.K. (1970).- The concentration of zirconium and hafnium in some igneous and metamorphic rocks and minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 34, pp. 411-416.
- Cauwet G., Elbaz F., Jeandel C., Jouanneau J.M., Lapaquellerie Y., Martin J.M. & Thomas A. (1980).- Comportement géochimique des éléments stables et radioactifs dans l'estuaire de la Gironde en période de crue. *Bull. Inst. de Géol. du bassin d'Aquitaine*, n° 27, pp. 5-33.
- Chassard-Bouchaud C., Noël P., Hubert M. & Hallegot P. (1985).- Intérêt de la microscopie analytique pour l'étude d'impact de métaux-traces et de terres rares sur le milieu vivant. Application à l'étude d'une zone polluée : la baie de Seine. Ce volume, N° 31.
- Chau Y.K., Gachter R. & Lum-Shue-Chan K. (1974).- Determination of the Apparent Complexing Capacity of Lake Waters. *J. Fish. Res. Board Can.* 31, p. 1515-1519.
- Chauvin P., Freger G. & Guyader J. (1985).- Synthèse des connaissances sur les effets du dépôt de dragage d'Octeville. Ce volume, N° 40.
- Courtot-Coupez J. (1979-1980).- Les métaux traces dans l'eau de mer, méthodes de dosage et formes chimiques. *Oceanis*, 5 (hors série), 455-567.
- Crockett J.H., Mac Dougall J.D. & Harriss R.C. (1973).- Gold palladium and iridium in marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 2547-2556.
- Darras R., May S. & Engelman Ch. (1976).- Applications récentes de l'analyse par activation dans le domaine de la pollution. Measurement, detection and control of environmental pollutants. I.A.E.A. Vienna. 1976. STI/PUB/432.



- Delcroix G. & Philippot J.Cl. (1973).- Neutron Activation analysis by the monostandard method. Application to the study of ancient ceramics J. Radioanalyt. Chem. 15, pp. 87-101.
- Dubrulle L. (1982).- Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. Thèse de 3ème cycle. Mention Géologie 28 mai 1982. Univ. Caen. U.E.R. des Sciences de la Terre et de l'Aménagement littoral.
- Dubrulle L. & Larssonneur C. (1984).- La baie des Veys, Etude hydrosédimentaire Rap. Roneot. 115 p.
- Dupont J.P. & Lafite R. (1985).- Importance et rôle du matériel organique vivant et inerte dans les suspensions de la baie de Seine. Ce volume, N° 13.
- Figura P. & McDuffie B. (1980).- Determination of the labilities of soluble trace metal species in aqueous environmental samples by anodic stripping voltammetry and Chelex column and batch methods, Anal. Chem., 52 : 1433.
- Fischer J.C. & Wartel M. (1985).- Evolution de la complexation des métaux : Ca, Mg, Cd, Pb et Cu dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 27.
- Fischer J.C., Wartel M., Guéguénat P. & Gandon R. (1985).- Pouvoir complexant des eaux de l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 26.
- Fukai R., Huynh-Ngoc L. & Vas D. (1966).- Determination of Trace Amounts of Cobalt in sea-water after Enrichment with Solid Manganese Dioxide. Nature Vol. 211 n° 5050, pp. 726-727, August 13.
- Fukai R., Murray C.N. & Huynh-Ngoc L. (1975).- Variation of soluble zinc in the Var River and its estuary. Est. Coast. Mar. Sci., 3, 177-188.
- Gadde P.R. & Laitinen H.A. (1974).- Studies of heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese dioxides. Anal. Chem., 46, 13, 2022-2026.
- Gandon R. (1983).- Les mécanismes d'adsorption des espèces minérales cationiques et anioniques sur les hydroxydes polymères du fer ferrique et les produits d'oxydation du fer ferreux en milieu aqueux. Rapport C.E.A. R. 5238.
- Gentil F., Irlinger J.P., Elkaïm B. & Proniewski F. (1985).- Dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés à *Abra alba* de la baie de Seine orientale. Ce volume, N° 35.
- Guéguénat P., Gandon R. & Lucas Y. (1975).- Determination of radionuclides of Ce, Co, Fe, Ru, Zn and Zr in seawater by preconcentration of colloidal manganese dioxide. Technical Report Series n° 169, IAEA-Vienne, 137-145.
- Guéguénat P., Gandon R., Hémon G. & Philippot J.Cl. (1976).- Méthodes de mesures d'éléments à l'état de traces dans l'eau de mer par activation neutronique et absorption atomique. IAEA, SM 206/28, 369-382.
- Guéguénat P., Boust D., Hémon G., Philippot J.C., Lagarde G. & Heitz C. (1985).- Distribution de 40 éléments à l'état de traces dans les suspensions de la Seine. Utilisation du Lanthane pour étudier les processus sédimentaires dans l'estuaire et dans la baie. Ce volume, N° 25.
- Hart B.T. (1987).- Trace metal Complexing Capacity of natural Waters : a review. Environ. Technol. Lett. 2 p. 95-110.
- Harvey R.W. & Luoma S. (1985).- Effect of adherent bacteria and bacterial extra cellular polymers upon assimilation by *Macoma balthica* of sediment-bound Cd, Zn and Ag. Mar. Ecol. in press.

- James R.O. & Mac Naughton M.G. (1977).- The adsorption of aqueous heavy metals on inorganic minerals. Geochim. Cosmochim. Acta, 41, 1549-1555.
- Jerome D.Y. & Philippot Cl. (1973).- Chemical Composition of Luna 20 Soil and Rock Fragments, Geochim. Cosmochim. Acta, 37 : 909-914.
- Leppard G.C. (1983).- Trace elements speciation in surface waters and its Ecological Implications. Plenum Press, New-York and London, 28-29.
- Luoma S.N. & Jenne E.A. (1977).- Estimating Bioavailability of sediment Bound Trace-Metals with Chemical Extractants. In Biological Implications of Metals in the Environment (Ed. by Wildung R.E. and Drucker H) NTIS. Springfield V.A.
- Luoma S.A. (1981).- A statistical assessment of the form of trace metals in oxidized estuarine sediments employing chemical extractants. The Science of the Total Environment, 17 pp. 165-196.
- Martin J.M., Salvadori T. & Thomas A.J. (1978).- Le mercure et les oligo-éléments dans le Delta du Rhône. IV<sup>e</sup> Journées Etud. Pollutions (CIESM-Antalya), 197-202.
- Martin J.M. & Meybeck M. (1979).- Elemental Mass /balance of material carried by major world Rivers. Mar. Chem. 7, 1979, 173-206.
- Martin J.M. & Whitfield M. (1981).- The significance of the river input of chemical elements to the ocean. To be published in Proceedings of NATO Advanced Research Institute on "Trace Metals in Sea Water", March 30-April 1, 1981, Erice, Italy; Plenum Press, New-York, C.S. Wong Editor.
- Murali A.V., Parthasarathy R., Mahadevan T.M. & Sankar DAS. (1983).- Trace element characteristics, REE patterns and partition coefficients of zircons from different geological environments. A case study of Indian zircons. Geochim. Cosmochim. Acta, 47 pp. 2047-2052.
- Murray J.W. (1975).- The interaction of Cobalt with hydrous manganese dioxide. Geochim. Cosmochim. Acta, 39, 635-647.
- Nelson (1979).- Minor Elements in the Sediments of the Thames Estuary. Estuarine and Coastal Marine Science, 9, pp. 623-629.
- Norman J.C. & Haskin L. (1968).- The Geochemistry of Sc : a comparison to the rare earths and Fe. Geochim. Cosmochim. Acta, 32, pp. 93-108.
- Plavšić M., Kaznaric D. & Branica M. (1982).- Determination of the Apparent Copper Complexing Capacity of Seawater by Anodic Stripping Voltammetry. Mar. Chem. 11 p. 17-31.
- Rankama K. & Sahama Th. G. (1949).- The rare earths metals : scandium, Yttrium, the lanthanides. In Geochemistry. The University of Chicago Press, Chicago.
- Spencer D.W. & Brewer P.G. (1970).- Crit. Rev. Solid. State Sci. 1409.
- Spencer D.W., Brewer P.G., Sachs P.L. (1972).- Aspects of the distribution and trace element composition of suspended matter in the Black Sea. Geochim. Cosmochim. Acta, 36, pp. 71-86.
- Thomas A.J. & Martin J.M. (1982).- Chemical Composition of river suspended sediments: Yangtze, Mackenzie, Indus, Orinoco, Parana and French rivers (Seine, Loire, Garonne, Dordogne, Rhône). Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg.



- Thomson E.A., Luoma S.N.; Johansson C.E. & Cain D.J. (1985).- Comparaison of sediments and organisms in identifying sources of biologically available trace metal contamination. Water. Res. 18, 6, pp. 755-765.
- Van Den Berg C.M.G. & Kramer J.R. (1979).- Determination of complexing Capacities of Ligands in natural Waters and Conditional Stability Constants of the Copper Complexes by means of Manganese dioxyde. Anal. Chim. Acta. 106, p. 113-120.
- Van Den Berg C.M.G. (1984).- Organic and inorganic speciation of Copper in the Irish Sea. Mar. Chem. 14, 201-212.
- Zlatanova R. (1973).- Analyse non destructive d'éléments traces: Etude d'un nodule de manganèse, Commissariat à l'Energie Atomique, Rapport CEA-R-4413, pp. 1-27.

LES RADIONUCLEIDES EMETTEURS GAMMA DANS LES SEDIMENTS DE L'ESTUAIRE DE L'ORNE PENDANT LES ANNEES 1977-1983.

AUFFRET J.P.\*, GUEGUENIAT P.\*\* , LEPY M.C.\*\*\*, PATRY J.P.\*\*\*, SAUR H.\*\*\*.

INTRODUCTION

La Baie de Seine, dans laquelle se jettent l'Orne et la Seine, est soumise à l'impact des rejets de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague, d'une manière décrite par Germain *et al.* (1979), Lepy (1982) pour le milieu biologique, Guéguéniat, Le Hir (1980) pour les eaux, Guéguéniat *et al.* (1976) (1981) pour les sédiments.

Le présent travail vise un triple objectif :

Effectuer un suivi régulier de l'évolution de la radioactivité artificielle gamma sur les sédiments et les suspensions de l'estuaire de l'Orne, en essayant de différencier les parts revenant aux rejets industriels et aux retombées atmosphériques consécutives aux explosions nucléaires.

Comparer les résultats obtenus dans cet estuaire avec ceux relevés dans les sédiments du cap Lévy, de la rade de Cherbourg, des ports de Saint-Vaast et de Goury, résultats utilisés par Guéguéniat *et al.* (1979) pour suivre l'évolution de la radioactivité artificielle dans les sédiments du Nord Cotentin.

Utiliser la radioactivité artificielle pour étudier le fonctionnement de l'estuaire de l'Orne.

1. SEDIMENTS ETUDIES

1.1. Origine :

Le choix des échantillons et les conditions de prélèvement, vu leur importance fondamentale pour les interprétations ou les comparaisons du résultat des mesures (Foulquier *et al.*, 1982), ont été soigneusement définis pour cette étude.

Les points de prélèvement ont été répartis sur le site où les conditions de sédimentation sont variées, afin qu'un éventuel facteur hydrosédimentaire de concentration de la radioactivité n'échappe pas à notre investigation.

L'estuaire de l'Orne est constitué par la juxtaposition de trois unités géographiques, comprenant d'aval vers l'amont (fig. 1) :

1.1.1. L'avant-port de Ouistreham :

Site totalement aménagé avec un chenal entretenu par dragage et des aires latérales d'envasement. Une trappe à suspensions y a été installée dans laquelle l'eau se renouvelle à chaque pleine mer. L'avant-port subissant peu

\* Laboratoire de géologie marine, Université de Caen, 14032 Caen Cedex.

\*\* C.E.A., Laboratoire de radioécologie marine, Département de protection, B.P. 270, 50107 Cherbourg, France.

\*\*\* Laboratoire de Physique Corpusculaire, Université de Caen, 14032 Caen Cedex.



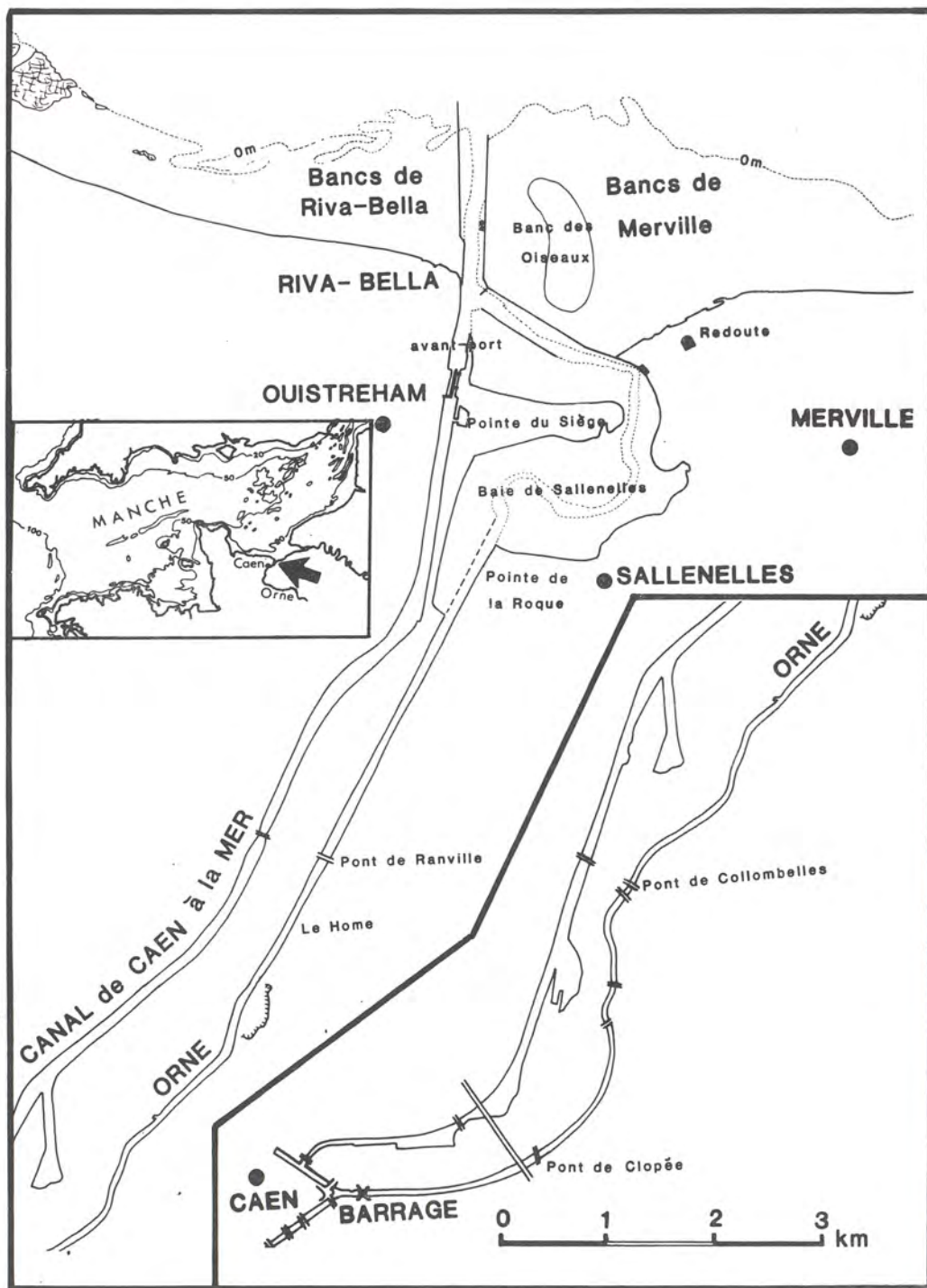


Figure 1.- Estuaire de l'Orne : schéma de situation.

l'impact des eaux douces, ce dispositif permet l'étude des suspensions d'origine marine.

### 1.1.2. La baie de Sallenelles :

C'est la partie externe et non aménagée de l'estuaire de l'Orne. Dans cette zone, les sédiments sont prélevés, en rive gauche, dans une caisse de décantation nettoyée à chaque prélèvement et, en rive droite, sur une vasière.

### 1.1.3. L'Orne canalisée de la pointe de la Rocque au barrage de Caen :

Ce tronçon est complètement aménagé en canal calibré à berges pentées originellement étayées par des empierrements. Actuellement, ces berges sont en cours de dégradation sous l'action de loupes de glissement. Elles entraînent dans le chenal les argiles bleues dans lesquelles est creusé celui-ci.

Cet estuaire amont est directement soumis à l'influence des eaux douces de l'Orne. Le débit du fleuve est contrôlé par le jeu des vannes du barrage de Caen. Celui-ci arrête également la remontée de la marée.

- En étiage, le barrage étant fermé, le mélange de l'eau de mer et de l'eau douce de surverse s'effectue donc artificiellement et brutalement à Caen.
- En crue, l'eau de mer est repoussée jusqu'à la baie de Sallenelles par la chasse des eaux douces non retenues par le barrage.

Fily (1967) et Dubrulle (1982) ont décrit la structure hydrologique de l'estuaire et donné des sections longitudinales représentant l'évolution des principaux paramètres de l'environnement au cours du cycle de marée et du cycle saisonnier.

### 1.2. Composition :

Nous avons cherché à prélever uniquement des vases fines et à répéter les prélèvements strictement au même endroit afin de faire intervenir aussi peu que possible les fluctuations du paramètre granulométrique sur les taux de comptage. La composition granulométrique et minéralogique des sédiments de l'Orne est connue depuis l'étude de Fily (1967).

En moyenne, les échantillons comptés sont constitués de 30% d'argile ( $< 2 \mu\text{m}$ ) et 50% de silts (2 à  $20 \mu\text{m}$ ) dans l'avant-port et l'estuaire amont. En baie de Sallenelles, les sédiments prélevés sont légèrement plus grossiers avec 25% d'argiles, 45% de silts, le reste étant constitué de sablons.

La teneur en calcaire est très homogène à  $30 \pm 5\%$ . L'analyse des minéraux argileux montre la présence surtout d'illite, kaolinite, smectite et chlorite dans le rapport moyen  $3,5 \text{ I} + 3 \text{ K} + 2 \text{ S} + 1,5 \text{ C}$ . La teneur en matière organique est de 3 à 5%.

## 2. MATERIEL ET METHODES

Le détecteur utilisé est une diode au germanium lithium de  $60 \text{ cm}^3$ . Le système de détection et la méthode expérimentale utilisés ont été décrits ailleurs (Damoy, 1978; Damoy *et al.*, 1980). Le tableau I donne les activités minimales détectables par le dispositif de mesure pour les radionucléides artificiels étudiés.

## 3. RESULTATS - ORIGINE DES RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS

### 3.1. Radionucléides naturels :

En ce qui concerne les radionucléides naturels émetteurs gamma, les activités massiques pour le  $^{201}\text{Tl}$  (chaîne du  $^{238}\text{Th}$ ), le  $^{214}\text{Bi}$  (chaîne du  $^{238}\text{U}$ ) et le  $^{40}\text{K}$ , ont été mesurées dans chaque échantillon. Ces activités sont de l'ordre de  $0,12 \text{ pCi.g}^{-1}$  pour  $^{208}\text{Ti}$ , de  $0,60 \text{ pCi.g}^{-1}$  pour  $^{214}\text{Bi}$  et de  $11 \text{ pCi.g}^{-1}$  pour  $^{40}\text{K}$ .

Ces valeurs sont très stables dans l'échantillonnage en raison de la



TABLEAU DES MESURES

| LIEU DE PRELEVEMENT              | DATE<br>DE<br>PRELEVEMENT | $^{106}_{Ru}$<br>+<br>$^{106}_{Rh}$ | $^{144}_{Ce}$<br>+<br>$^{144}_{Pr}$ | $^{137}_{Cs}$ | $^{125}_{Sb}$ |
|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|
| TIRAGE RIVE GAUCHE<br>NOZAL      | 1.12.1977                 | 2,1                                 | 0,94                                | 1,22          |               |
|                                  | 5.10.1979                 | 10,04                               | Tr                                  | 1,04          | 0,17          |
|                                  | 29.09.1980                | 5,03                                |                                     | 0,92          |               |
|                                  | 27.03.1981                | 3,2                                 |                                     | 0,83          |               |
|                                  | 17.06.1982                | 5,3                                 |                                     | 0,8           | 0,17          |
|                                  | 2.06.1983                 |                                     |                                     | 0,25          |               |
|                                  | 18.10.1983                | 4                                   |                                     | 0,7           | 0,11          |
| POINTE DU SIEGE<br>TRAPPE-BATEAU | 1.12.77                   | 1,42                                |                                     | 0,36          |               |
|                                  | 30.10.1978                | 4,16                                |                                     | 0,96          | 0,19          |
|                                  | 4.05.1979                 | 11,08                               |                                     | 0,86          |               |
|                                  | 5.10.1979                 | 7,92                                |                                     | 0,86          | 0,28          |
|                                  | 10.03.1980                | 5,95                                |                                     | 0,81          | 0,20          |
|                                  | 29.09.1980                | 3,95                                |                                     | 0,6           | 0,21          |
|                                  | 27.03.1981                | 3,82                                | 1,52                                | 0,75          | 0,16          |
|                                  | 21.01.1982                | 4,83                                | 1,16                                | 0,9           | 0,23          |
|                                  | 17.06.1982                | 5,32                                | 0,48                                | 0,99          | 0,17          |
|                                  | 18.10.1983                | 4,9                                 |                                     | 0,74          | 0,11          |
| SALLENELLES<br>BAIE              | 10.03.1980                | 9,29                                |                                     | 1,23          | 0,25          |
|                                  | 29.09.1980                | 3,39                                |                                     | 0,92          | 0,14          |
|                                  | 27.03.1981                | 6,14                                |                                     | 0,97          | 0,25          |
|                                  | 17.06.1982                | 5,02                                | 0,44                                | 1,01          | 0,14          |
|                                  | 2.06.1983                 | 8,33                                |                                     | 1,22          | 0,19          |
|                                  | 18.10.1983                |                                     |                                     |               |               |
| OUISTREHAM<br>PORT               | 30.10.1978                | 7,24                                | 1,76                                | 1,26          |               |
|                                  | 4.05.1979                 | 16,2                                | 1,36                                | 1,22          | 0,31          |
|                                  | 5.10.1979                 | 9,76                                |                                     | 0,97          | 0,15          |
|                                  | 29.09.1980                | 5,96                                |                                     | 0,85          | 0,15          |
|                                  | 31.10.1980                | 6,38                                |                                     | 0,86          |               |
|                                  | 27.03.1981                | 6,87                                |                                     | 0,88          | 0,21          |
|                                  | 21.01.1982                | 8,44                                | 1,22                                | 1,08          | 0,21          |
|                                  | 17.06.1982                | 6,82                                | 0,72                                | 1,00          | 0,23          |
|                                  | 2.06.1983                 | 7,29                                |                                     | 0,99          | 0,15          |
|                                  | 18.10.1983                | 4,96                                |                                     | 0,93          | 0,23          |
| OUISTREHAM<br>TRAPPE             | 30.10.1978                | 5,24                                | 1,94                                | 1,06          | 0,15          |
|                                  | 4.05.1979                 | 18,1                                | 1,64                                | 1,21          | 0,24          |
|                                  | 5.10.1979                 | 8,1                                 | 0,88                                | 0,82          | 0,13          |
|                                  | 10.03.1980                | 9,98                                |                                     | 1,08          |               |
|                                  | 29.09.1980                | 6,44                                |                                     | 0,84          |               |
|                                  | 27.03.1981                | 7,72                                | 0,52                                | 0,94          | 0,34          |
|                                  | 21.01.1982                | 5,18                                | 1,06                                | 0,82          | 0,17          |
|                                  | 17.06.1982                | 8,5                                 | 1,25                                | 1,1           | 0,17          |
|                                  | 2.06.1983                 | 7,2                                 |                                     | 0,86          |               |
|                                  | 18.10.1983                | 5,2                                 |                                     | 0,76          |               |

stabilité de la composition et de la granulométrie des prélèvements effectués à des dates différentes. Dans une mesure durant 22 h l'activité des radionucléides naturels dans le spectre de bruit de fond de notre appareillage est également stable.

| Elément           | Energie E (KeV) du photon détecté | A <sub>m</sub> (pCi/Kg) | Période |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------|
| <sup>144</sup> Ce | 133,5                             | 170                     | 284 J   |
| <sup>141</sup> Ce | 145,4                             | 40                      | 23 J    |
| <sup>125</sup> Sb | 427,9                             | 100                     | 2,7 A   |
| <sup>134</sup> Cs | 604,7                             | 30                      | 2,1 A   |
| <sup>106</sup> Ru | 621,6                             | 350                     | 367 J   |
| <sup>110</sup> Ag | 657,7                             | 40                      | 253 J   |
| <sup>137</sup> Cs | 661,6                             | 40                      | 30 A    |
| <sup>95</sup> Zr  | 756,4                             | 70                      | 65,2 J  |
| <sup>95</sup> Nb  | 765,8                             | 40                      | 35 J    |
| <sup>54</sup> Mn  | 834,8                             | 40                      | 303 J   |
| <sup>60</sup> Co  | 1332,5                            | 40                      | 5,3 J   |

Tableau 1.- Activités minimales détectables par le dispositif de mesure.

Les valeurs de A<sub>m</sub> données dans le tableau ont une précision de l'ordre de 6%. Ces résultats s'appliquent à des mesures d'une durée de 22 heures faites sur des échantillons mis en forme dans la géométrie indiquée. Dans ces conditions, les corrections d'absorption sont négligeables.

Un pic dans le spectre, dû à un photon d'énergie E n'est pas conservé si l'incertitude sur la mesure de sa surface est supérieure à 45%.

### 3.2. Radionucléides artificiels :

Le <sup>106</sup>Ru + <sup>106</sup>Rh : ce radionucléide est présent dans tous les échantillons. Les activités détectées sont habituellement de l'ordre de 6 pCi.g<sup>-1</sup>. Elles diminuent lorsque, dans le cours de l'Orne, la distance à la mer augmente mais elles peuvent conserver à Caen des valeurs significatives (2pCi.g<sup>-1</sup>). Une valeur maximale (10 à 18 pCi/g) a été très nettement observée en tous les points de prélèvements marins durant mai 1979 suivie d'une diminution - supérieure à la seule décroissance radioactive - qui se poursuit jusqu'en septembre 1980 (3 à 6 pCi/g). Au-delà on observe une légère augmentation avec un maximum qui se placerait vers juin 1982 (5,3 à 8,5 pCi/g). Cette évolution entre 1977 et 1980 est tout à fait comparable à celle observée par Guégéniat *et al.* (1981) au cap Levy avec en particulier un maximum de 92 pCi/g mis en évidence le 16 mai 1979. Les évolutions des activités dues au <sup>106</sup>Ru + <sup>106</sup>Rh dans les sédiments marins prélevés au cap Levy et à la pointe du Sièg entre 1977 et 1983 sont reportées sur la figure 2.

<sup>137</sup>Cs : le Césium 137 est également présent dans tous les échantillons étudiés, avec des activités variant de 0.200 à 1.300 pCi.g<sup>-1</sup> (le plus souvent, activité de l'ordre de 0.9 pCi.g<sup>-1</sup>). La distribution du <sup>137</sup>Cs présente une grande stabilité tant dans l'espace que dans le temps: la teneur moyenne observée entre 1979 et 1982 est de 0.94 pCi.g<sup>-1</sup> ce qui représente une valeur 1.6 fois supérieure à celle du cap Levy.



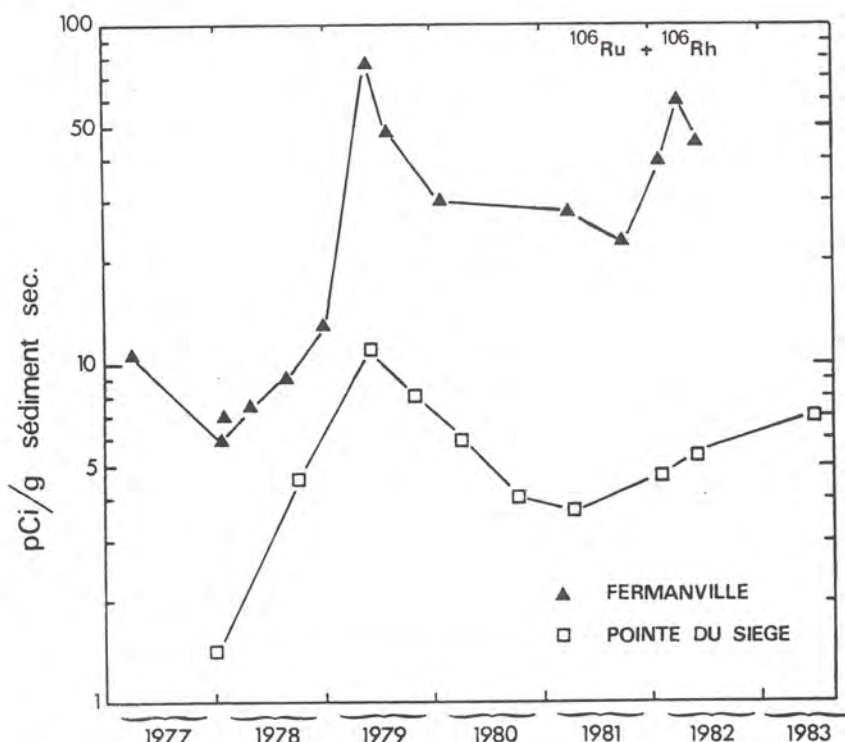


Figure 2.- Evolution de l'activité massique due au  $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$  dans les sédiments prélevés au cap Levy et à la pointe du Siège entre 1977 et 1983.

$^{125}\text{Sb}$  : L'antimoine est détecté dans trois échantillons sur quatre avec des activités inférieures à  $0.5 \text{ pCi.g}^{-1}$  et en moyenne égales à  $0.2 \text{ pCi.g}^{-1}$ .

$^{125}\text{Sb}$  est détecté plus fréquemment dans les échantillons prélevés près de la mer, et de façon plus régulière dans les prélèvements effectués depuis 1979. La valeur moyenne, entre 1979 et 1982, est de 0,2 c'est-à-dire 2,6 fois moins élevée que celle du cap Levy.

$^{144}\text{Ce}$  : le Cérium n'apparaît pas dans tous les échantillons. Son activité maximale est de  $0.97 \text{ pCi.g}^{-1}$  obtenue en 1978. Son comportement en fonction du temps est assez net : présent dans quelques échantillons en 1979, il disparaît complètement en 1980 pour revenir progressivement et être présent dans tous les échantillons de 1982. En 1983, sa présence est très épisodique.

$^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$  : Zirconium-Niobium apparaissent dans un échantillon sur trois. L'activité maximale du  $^{95}\text{Zr}$  est  $1,26 \text{ pCi.g}^{-1}$ . Absents des échantillons jusqu'en mars 1981, ils apparaissent à cette date et leurs activités diminuent pour ne subsister qu'à l'état de trace en 1982. On ne peut mettre en évidence le rôle de la position géographique des échantillons.

Dans de rares échantillons nous avons détecté de plus  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{110}\text{Ag}$  et  $^{134}\text{Cs}$ .

### 3.3. Interprétations des mesures :

Pour interpréter ces mesures et en particulier pour préciser la provenance de ces radionucléides (retombées atmosphériques ou rejets dans le milieu marin des effluents liquides de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de la Hague), nous avons effectué des mesures complémentaires dans des

algues, des sédiments de l'Orne à l'amont de Caen, donc non soumis à l'influence marine et sur des végétaux terrestres (Cosson *et al.*, 1983, Lepy, 1982).

Le  $^{106}\text{Ru}$  est entièrement d'origine marine et provient des rejets de la Hague. Présent dans tous nos échantillons de sédiment marin, il est systématiquement absent des sédiments prélevés dans l'Orne en amont de Caen et dans tous les végétaux terrestres. Les activités mesurées dans les sédiments marins sont 3 à 4 fois supérieures à celles dues uniquement aux retombées atmosphériques.

L'activité maximale de mai 1979 (fig. 2) correspond bien, comme à Fermanville, à une augmentation de  $^{106}\text{Ru}$  dans les rejets de la Hague ou à une modification de forme physico-chimique, dans les effluents industriels, de ce radionucléide (Guéguénat, Gandon, 1977). Il est intéressant de constater la coïncidence dans le temps des pics d'activité au cap Levy et à l'embouchure de l'Orne.

Le  $^{106}\text{Ru}$  est aussi présent dans tous nos échantillons d'algues prélevées sur les côtes du Calvados et les activités décroissent lorsqu'on s'éloigne de la Hague (5,4 pCi.g<sup>-1</sup> à Goury, 1 pCi.g<sup>-1</sup> à Luc-sur-Mer, 0,6 pCi.g<sup>-1</sup> au Havre).

Les conclusions concernant le  $^{144}\text{Ce}$  sont plus difficiles à établir. Ce radionucléide n'apparaît pas dans tous les échantillons. Son activité a été maximale (0,97 pCi.g<sup>-1</sup>) pour une période (oct. 78) au cours de laquelle les rejets de la Hague ont été les plus faibles (0,85 pCi.g<sup>-1</sup> en août 78 au cap Levy). A la même période sur des stations non soumises à des rejets industriels, on atteignait 0,9 pCi/g en Baie de Bourgneuf, 1,75 pCi/g dans le golfe du Morbihan, 1,45 pCi/g sur le littoral vendéen. En 1982, l'influence de la Hague a atteint en  $^{144}\text{Ce}$  un maximum pour la période d'étude; la répercussion a été nette au cap Levy (15 pCi/g), très atténuée sinon nulle à l'embouchure de l'Orne (0,46 pCi/g en valeur moyenne). Il est par conséquent très difficile de conclure sur le rôle, à l'embouchure de l'Orne, du  $^{144}\text{Ce}$  d'origine industrielle d'autant plus qu'il faut ajouter, qu'entre 1978 et 1982, les teneurs moyennes en  $^{144}\text{Ce}$  dans la baie de Bourgneuf (zone de référence pour des retombées atmosphériques) ont présenté une évolution comparable à celle de la partie marine de l'Orne 0,59 pCi/g en 1978, 0,29 pCi/g en 1982. L'hypothèse de Guéguénat *et al.* (1979) trouve là un argument; le  $^{144}\text{Ce}$ , de forme particulaire ou colloïdale rejeté par l'usine de la Hague, migre préférentiellement vers l'ouest.

Le  $^{137}\text{Cs}$  est présent dans tous les échantillons de sédiments marins, d'algues (Cosson *et al.*, 1983) et, avec des activités moindres, dans la quasi totalité des échantillons non soumis à l'influence marine. On peut lui attribuer une double origine: rejets de la Hague, retombées atmosphériques. Ces deux origines auraient une contribution sensiblement égale.

$^{134}\text{Cs}$ : le  $^{134}\text{Cs}$  absent des retombées atmosphériques constitue un traceur des rejets industriels. Un seul résultat concernant ce radionucléide a pu être obtenu: 0,2 pCi/g en juin 1982 à Sallenelles (précision de 50% dans la mesure) pour un rapport isotopique  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  compris entre 37 et 110. Entre juin 1981 et juin 1982, les mêmes rapports isotopiques entre les mêmes radionucléides étaient de 6; on retrouve ce résultat dans les Fucus (Lepy, 1982) recueillis à Goury le 11 décembre 1981:  $^{137}\text{Cs}$ : 0,36 pCi/g;  $^{134}\text{Cs}$ : 0,06 pCi/g;  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs} = 6$ .

Cette différence des rapports isotopiques entre Goury et Sallenelles indique pour ce dernier site pour l'échantillon impliqué une contribution non négligeable des retombées atmosphériques dans les résultats.

$^{103}\text{Ru}$ : il n'est apparu que dans deux échantillons en mars 1981 à Caen (0,59 pCi/g) et à Ouistreham (0,23 pCi/g). Pour ces deux mêmes échantillons, les teneurs en  $^{95}\text{Zr}$  étaient respectivement de 1,26 et 0,49 d'où un rapport constant  $^{95}\text{Zr}/^{103}\text{Ru} = 2,14$  à Caen et 2,13 à Ouistreham équivalent à celui observé en 1977 par Guéguénat *et al.* (1979) sur les sédiments des bandes



côtières françaises de l'Atlantique, Manche, Baie de Seine et mer du Nord.

Comme l'on fait ces auteurs en constatant que le  $^{103}\text{Ru}$  était un marqueur des retombées, nous pouvons également conclure qu'il en est de même pour le  $^{95}\text{Zr}$ .

Enfin le  $^{125}\text{Sb}$  est détecté dans les sédiments marins avec des activités 2 à 3 fois supérieures à celles dues aux retombées : son origine est essentiellement due aux rejets de la Hague.

#### 4. DISCUSSION. IMPLICATIONS SEDIMENTOLOGIQUES DES RESULTATS.

Jeandel *et al.* (1980) ont étudié au cours de l'hiver 1979-1980 la distribution des radionucléides artificiels dans les grands estuaires français; la comparaison des résultats pour  $^{137}\text{Cs}$  -  $^{106}\text{Ru}$  -  $^{125}\text{Sb}$  (pCi/g) avec l'Orne et la Seine montrent l'impact des rejets industriels.

|    | SEINE       | LOIRE       | GIRONDE     | ORNE      |
|----|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Cs | 1.06 ± 0.47 | 0.56 ± 0.11 | 0.45 ± 0.09 | 0.8 1.8   |
| Ru | 3.4 ± 1.6   |             |             | 4. 4.5    |
| Sb | 0.4         | 0.14        | 0.008       | 0.13 0.24 |

Au point de vue de l'irradiation externe un lit de sédiments ayant une activité de 25 pCi/g (ce qui correspond environ à l'activité maximale mesurée en mai 1979) entraînerait, par l'émission gamma et beta, à son contact un débit de dose absorbée d'environ 1,5 millirad.an<sup>-1</sup>, ce qui est faible en comparaison de l'irradiation naturelle (150 à 200 mrad.an<sup>-1</sup>, Ancellin, 1979).

Les taux d'activité mesurés sont en moyenne moins élevés dans l'estuaire sans qu'une différence de composition granulométrique soit imputable. De plus, le sens de variation au cours du temps est toujours parallèle dans l'Orne et dans l'avant-port. On peut en conclure que les sources du signal radioactif sont les mêmes dans ces deux environnements; elles sont surtout d'origine marine comme le montrent les activités plus élevées mesurées à Ouistreham. Les sédiments marins remontent dans l'estuaire où ils subissent une dilution d'origine tellurique, par les suspensions apportées par la rivière, surtout en période de crue. Ces résultats sont en accord avec les observations sédimentologiques de Fily (1967) et Dubrulle (1982).

Les échantillons de l'estuaire amont, en particulier ceux prélevés à proximité du barrage de Caen, sont très intéressants par les brusques variations qu'ils montrent. En période d'étiage de l'Orne, les taux de comptage sont ici très voisins de la moyenne générale dans l'embouchure. Dans ce cas, l'échantillon est donc un mélange des vases que l'onde de marée montante a rencontrées en aval dans l'estuaire et qu'elle a remises en suspension et poussées contre les vannes.

En période de crue de l'Orne, ces sédiments sont totalement dépourvus d'éléments de période moyenne ( $^{106}\text{Ru}$  et  $^{144}\text{Ce}$ ) leur activité en  $^{137}\text{Cs}$  restant peu variable. Dans son état actuel d'aménagement, l'estuaire de l'Orne passe donc par deux stades où le bilan du fonctionnement sédimentaire est totalement inverse ainsi que le montre la simple observation régulière d'un cycle annuel :

- En étiage, le barrage de Caen est fermé et l'apport d'eau douce dans l'estuaire est pratiquement négligeable en raison des prélèvements effectués à l'amont pour l'alimentation en eau des populations ou du canal maritime. Il se dépose alors, en particulier entre le barrage et le pont de Clopée, une couche de crème de vase qui peut dépasser 1 m d'épaisseur dans laquelle les activités mesurées en Cérium et Ruthénium démontrent l'origine marine bien que diluée par la reprise de sédiments déposés en aval dans l'estuaire.
- En crue, les vannes sont ouvertes car le débit de la rivière peut dépasser 150 m<sup>3</sup>/s. L'effet de chasse ainsi produit érode et pousse vers l'aval cette

masse vaseuse qui peut même être expulsée hors de l'estuaire à basse mer. Nous avons cherché à quantifier ce volume par la pose de bornes sur une surface de vasière de 11 000 m<sup>2</sup> située en rive gauche à proximité aval du barrage de Caen. L'effet de chasse de la crue du 15 au 20 janvier 1984 a ainsi pu être mesuré; 45 cm de vase ont été érodés en moyenne sur la vasière surveillée soit un volume de 4 950 m<sup>3</sup> pour cette seule crue. Après les crues, les sédiments prélevés à proximité du barrage, sont compactés, présentent de nombreuses gouges d'érosion et ne contiennent que <sup>137</sup>Cs. Ils peuvent donc être considérés comme "fossiles". Ce résultat est difficile à concilier avec les mesures de Dubrulle (1982) qui observe des flux résiduels de suspensions dirigés vers l'aval quelles que soient les conditions de marnage et débit du cycle annuel de l'estuaire (p. 32 et 145). Ces vases expulsées en mer se déposent à l'ouest du chenal d'accès de l'avant-port de Ouistreham (LCHF 1976; Dubrulle, 1982). L'étude du delta de marée de l'Orne au sonar à balayage latéral (d'Ozouville *et al.*, 1985), montre que cette vase, qui se dépose à l'ouest de la sortie de l'estuaire par une profondeur de 6 à 9 m, constitue des voiles d'envasement discontinus repris et dilacérés par les houles hivernales. Cette disposition est l'équivalent pour un estuaire macrotidal, du modèle de prodelta microtidal proposé par l'école de Perpignan (Aloisi *et al.*, 1977) pour les exutoires fluviaux méditerranéens.

Le rôle déterminant de l'estuaire amont au voisinage du barrage de Caen, comme site d'accumulation temporaire durant l'étiage d'un épais bouchon de "crème de vase", est un apport nouveau de nos mesures de radioactivité artificielle à la connaissance de la dynamique sédimentaire de l'estuaire. La chasse brutale de cette vase molle lors des crues de l'Orne, est certainement à l'origine des apports en masses de vases à forte teneur en eau dans l'avant-port de Ouistreham lors des crues. Cet envasement atteindrait (LCHF, 1976) un taux annuel moyen de 2 mètres.

- Aloisi J.C., Auffret G.A., Auffret J.P., Barusseau J.P., Hommeril P., Larsonneur C. & Monaco A. (1977).- Essai de modélisation de la sédimentation annuelle sur les plateaux continentaux français. Bull. Soc. Géol. Fr., 19, (2), p. 183-195.
- Ancellin J. & Bovard P. (1979).- Données radioécologiques concernant le site marin de la Hague. C.R. du 3ème colloque de l'AEN Tokyo, 1-5 octobre 1979.
- Cosson J., Lepy M.C., Patry J.P. & Saur H. (1983).- Etude des radioéléments artificiels émetteurs gamma, présents dans les algues des côtes du Calvados pendant les années 1980-1982. Bot. Mar., t. 27, p. 301-307.
- Damoy F. (1978).- Mise en oeuvre d'une chaîne Ge-Li de spectrométrie de haute résolution entre 100 KeV et 2 MeV. Réalisation du traitement automatique de l'information par un ordinateur en ligne. Application à l'identification et à la mesure de très faibles activités de radioléments gamma artificiels dans les sédiments du littoral Bas-Normand. Thèse de 3ème cycle, Univ. Caen, 114 p.
- Damoy F. & Patry J.P. (1980).- Ensemble de mesures des faibles doses de radioéléments émetteurs gamma. Nucl. Instruments and Methods 173 (1980) 311-316.
- Dubrulle L. (1982).- Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. Thèse de 3ème cycle. Univ. Caen, 212 p.
- Fily G. (1967).- Etude sédimentologique et hydrologique de l'estuaire de l'Orne et du littoral adjacent. Thèse de 3ème cycle. Univ. Caen, 128 p.



- Foulquier L. & Philippot J.C. (1982).- Métrologie de l'environnement. Echantillonnage et préparation d'organismes d'eau douce. Mesure de radionucléides émetteurs gamma. Rapport Commis. Energie Atom. R-5164.
- Germain P., Masson M. & Baron Y. (1979).- Etude de la répartition de radionucléides émetteurs gamma chez des indicateurs biologiques littoraux des côtes de la Manche et de la mer du Nord, de février 1976 à février 1978. Rapport Commis. Energie Atom. R-5017.
- Guéguéniat P., Baron Y. & Auffret J.P. (1976).- Note sur l'évolution de la radioactivité artificielle dans les sédiments de la Manche, pendant les années 1971-1975. Rapport Commis. Energie Atom. R-4739.
- Guéguéniat P. & Gandon R. (1977).- Le Ruthénium. Cas particulier du devenir d'un radionucléide dans le milieu marin. Recueil des communications du 4ème Congr. Intern. Assoc. Intern., Radiopr. Paris, avril 1977, 255-258.
- Guéguéniat P., Auffret J.P. & Baron Y. (1979).- Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans des sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976-1977-1978. Océanol. Acta 1979, vol. 2, n° 2.
- Guéguéniat P. & Le Hir P. (1980).- Données nouvelles sur la dispersion des radionucléides en Manche. Internat. Atomic. Energy Agency, Vienne, 1980.
- Guéguéniat P., Auffret J.P. & Ballada J. (1981).- Sediments as indicators of artificial radionuclide distribution west of la Hague. International Atomic Energy Agency. Vienna 1981.
- Jeandel C., Martin J.M. & Thomas A.J. (1981).- Les radionucléides artificiels dans les estuaires français. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1981.
- L.C.H.F. (1976).- Estuaire de l'Orne et accès au port de Ouistreham, synthèse générale des études effectuées. Rapport D.D.E., Calvados, 35 p.
- Lepy M.C. (1982).- Etude sur les radioéléments artificiels, émetteurs gamma, présents dans des sédiments et des algues de la baie de l'Orne, pendant les années 1980-1982. Thèse de 3ème cycle. Univ. Caen, 105 p.
- d'Ozouville L. & Auffret J.P. (1986).- Répartition et évolution actuelle des sédiments superficiels en Baie de Seine en utilisant un sonar à balayage latéral. Océanol. Acta (à paraître).

### 1. Introduction

L'ion fluorure est reconnu comme toxique pour la vie aquatique (Bremond et Perrodon, 1979). De ce fait, il a été l'objet d'études d'accumulation et de toxicité chez divers organismes marins et estuariens : Algues, Mollusques, Crustacés, Poissons (Martin *et al.*, 1982). L'accumulation dans des organismes de consommation courante pourrait représenter un risque pour la santé humaine du fait de la rétention du fluorure dans les tissus humains (Spencer *et al.*, 1981). Il est donc important de rester attentif aux concentrations de fluorure dans les eaux et de contrôler les apports.

En Seine et en baie de Seine, la pollution fluorée provient des rejets industriels de phosphogypse, sulfate de calcium di-hydraté, qui est un sous-produit de la fabrication d'acide phosphorique destiné à la production d'engrais. Il se forme lors de l'attaque du minerai naturel (mélange de fluorapatite  $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]_3\text{CaF}_2$  et de  $\text{CaCO}_3$ ) par l'acide sulfurique, et contient donc du fluorure comme impureté.

Abstraction faite des apports industriels, le fluorure est présent dans les eaux naturelles et en particulier dans l'eau de mer où sa concentration avoisine 1,3 mg/l. On le considère comme un élément conservatif car sa concentration reste très peu affectée par l'activité biologique du milieu ou par des processus de précipitation et d'inter-action avec les particules. Il peut donc servir de traceur de mélange des masses d'eaux.

Le présent travail a pour but de déterminer l'impact des apports de fluorure en baie de Seine, au-delà de l'embouchure de la Seine. Il complète en cela les travaux de Martin et Salvadori (1983) qui se sont limités à l'estuaire. Nous examinerons donc les distributions spatiales obtenues au cours de plusieurs campagnes et nous comparerons les résultats aux valeurs marines normales.

### 2. Les apports industriels de fluorure

Trois usines déversent du phosphogypse en Baie de Seine : l'une située au Havre, la COFAZ, les deux autres près de Rouen, à savoir CDF-Chimie-AZF au Grand-Quevilly (anciennement Rhône-Poulenc) et CDF-Chimie-AZF à Grand-Couronne



(anciennement Azote et Produits Chimiques). Ces trois usines produisent environ la moitié des phosphogypses en France. Le tableau 1 montre les quantités déversées de 1974 à 1983 : elles plafonnent depuis 1978 entre 2 et 2,5 Mt.

Tableau 1. Rejets de phosphogypses en baie de Seine (Mt) et rejets de fluorure soluble correspondant (t)

|                            | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Grand Quevilly             | 0,25 | 0,55 | 0,55 | 0,59 | -    | -    | 0,76 | 0,84 | 0,75 | 0,80 |
| Grand Couronne             | 0,29 | 0,35 | 0,36 | 0,56 | -    | -    | 1,00 | 0,70 | 0,81 | 0,81 |
| Le Havre                   | 0,00 | 0,19 | 0,28 | 0,43 | 0,62 | -    | 0,74 | 0,61 | 0,59 | 0,71 |
| Total (Mt)                 | 0,54 | 1,09 | 1,19 | 1,59 | 2,00 | 2,40 | 2,50 | 2,15 | 2,15 | 2,32 |
| F <sup>-</sup> soluble (t) | 1350 | 2700 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 6250 | 5400 | 5400 | 5800 |

Rejetés en totalité dans la Seine avant 1974, les phosphogypses ont été ensuite éliminés de plusieurs façons : par une conduite sous-marine pour l'usine du Havre, par barges déversant dans une zone délimitée de la baie (fig. 1) pour les deux autres usines. En outre, une certaine quantité est déversée dans la Seine au niveau de Rouen, par les égouts des deux usines d'une part et par la surverse lors du chargement des barges d'autre part : en 1977 par exemple, sur 1,6 Mt on estimait que 0,23 Mt étaient déversées dans la Seine. Par gros temps les barges sont autorisées à décharger dans des zones de repli situées très en amont par rapport à la zone normale de déversement. Notons que, depuis août 1984, l'usine du Grand-Quevilly n'effectue plus de rejet en mer (stockage à terre).

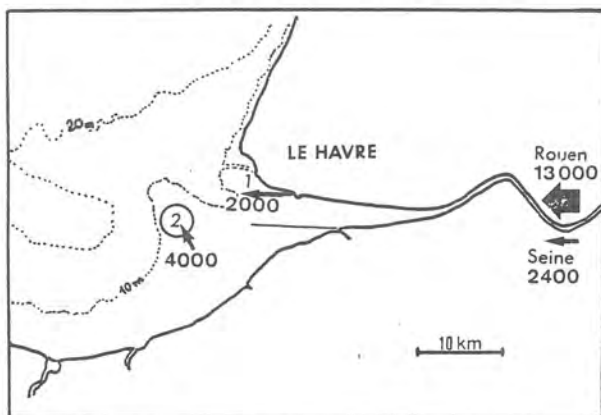


Figure 1. Apports de fluorure soluble ou dissous en baie de Seine, exprimés en tonnes par an. 1 : exutoire de la COFAZ ; 2 : zone de dépôt par barge des usines de Rouen.

La concentration du fluor dans le phosphogypse est comprise entre 0,1 et 1,8 % (quelquefois jusqu'à 2 à 3 % au Havre) avec une moyenne d'environ 0,8-1 % (Mangin, 1978). Toutefois ce fluor n'est pas soluble en totalité dans l'eau de mer. Diverses mesures effectuées par le Laboratoire Municipal de Rouen indiquent qu'environ un quart du fluor contenu dans les phosphogypses est soluble dans l'eau de mer. Ainsi le rejet de fluorure soluble représente-t-il 0,25 % du rejet de phosphogypses (tableau 1). Mais par ailleurs les deux usines de Rouen rejettent dans la Seine, par exutoire, des effluents très riches en fluorure dissous ou soluble. Martin et Salvadori (1983) ont estimé ces débits annuels à environ 13 000 tonnes, soit plus de deux fois la quantité provenant des déversements de phosphogypses dans la baie. La figure 1 schématise les apports annuels en fluorure dissous ou solubles.

### 3. Les concentrations naturelles

Dans l'eau de mer le fluorure est considéré comme conservatif. De ce fait sa concentration peut varier selon la salinité mais le rapport fluorure/chlorinité (F/Cl) reste constant. Warner *et al.* (1975) ont fait la synthèse des valeurs de ce rapport et réalisé une intercalibration sur un grand nombre d'échantillons. Ils aboutissent à un rapport F/Cl de  $(6,71 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$  (F est exprimé en g/kg et Cl en ‰). L'incertitude de mesure, au seuil de confiance de 99 %, étant de  $\pm 0,02 \cdot 10^{-5}$ , les erreurs systématiques seraient de  $\pm 0,05 \cdot 10^{-5}$ . Ainsi, les concentrations normales en fluorure pour des eaux de mer de salinités 34 et 35 ‰ sont respectivement de 1,29 et  $1,33 \pm 0,01$  mg/l.

Dans les rivières, les concentrations sont généralement comprises entre 0,1 et 0,2 mg/l. C'est le cas dans la Seine (en amont de Rouen) où la teneur moyenne est d'environ 0,15 mg/l (Martin et Salvadori, 1983). Du fait des différences de concentrations entre eaux douce et marine et du caractère conservatif du fluorure, les concentrations dans un estuaire varieront linéairement avec la chlorinité (ou salinité) entre les deux valeurs précédemment citées. Pour l'estuaire de la Seine on aura donc :

$$F^- \text{ (mg/l)} = 0,0337 S \text{ ‰} + 0,15 \quad \text{avec } S \text{ ‰} = 1,80655 \text{ Cl ‰}.$$

Au niveau 34 ‰, la contribution due à l'eau de la Seine n'accroîtrait la concentration en fluorure que de 0,004 mg/l. Du fait de la présence de fluorure dans l'eau douce, le rapport F/Cl n'est pas constant dans un estuaire. Quand la chlorinité décroît, ce rapport augmente vers la valeur élevée observée dans l'eau douce, soit pour la Seine #  $500 \cdot 10^{-5}$  (c'est-à-dire F # 0,15 mg/l et Cl # 0,03 ‰). Il est important de noter que la valeur marine du rapport F/Cl est la plus faible valeur naturelle rencontrée dans un estuaire non pollué. Dans la partie marine, où le rapport F/Cl varie faiblement avec la salinité, toute anomalie due à une source polluante doit pouvoir aisément être détectée.

### 4. Matériel et méthodes

Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide de bouteilles NISKIN de 5 litres, filtrés et conservés à température ambiante dans des flacons de polyéthylène placés à l'abri de la lumière. Les analyses ont été effectuées quelques semaines, parfois quelques mois, plus tard (des contrôles de salinité n'ont pas révélé d'évaporation significative).

Les mesures ont été faites selon la méthode de WARNER (1971) à l'aide d'une électrode spécifique des ions fluorure, couplée à une électrode de référence au calomel. La cellule de mesure était thermostatée à 25°C. La mesure se fait en milieu complexant (citrate) tamponné en force ionique et en pH (5 à 5,5) selon la technique des ajouts dosés : on détermine ainsi le fluorure total dissous, libre et complexé.

La méthode a été testée sur des eaux océaniques profondes provenant du Pacifique. L'analyse de trente échantillons a fourni un rapport F/Cl de  $6,70 \cdot 10^{-5}$  avec un écart-type de  $\pm 0,06 \cdot 10^{-5}$ . Par ailleurs, un échantillon analysé huit fois a donné le résultat suivant :  $x = 1,305$  mg/l,  $s = \pm 0,009$ .

La salinité a été mesurée à l'aide d'un salinomètre Guildline Autosol 8400 à la précision de  $\pm 0,005$  ‰.

### 5. Résultats et discussion

Les résultats présentés ont été obtenus au cours des trois campagnes suivantes : du 23 septembre au 5 octobre 1978, du 7 au 13 mars 1979, et du 7 au 20 octobre 1983.



La figure 2 présente les distributions des salinités de surface dans la baie au cours des trois campagnes. Quelle que soit l'époque on y retrouve une similitude : le principal gradient est orienté du sud-est au nord-ouest ; il est complété par une dessalure côtière faible au sud, mais très marquée à l'est du fait de l'écoulement des eaux de la Seine le long de la côte.

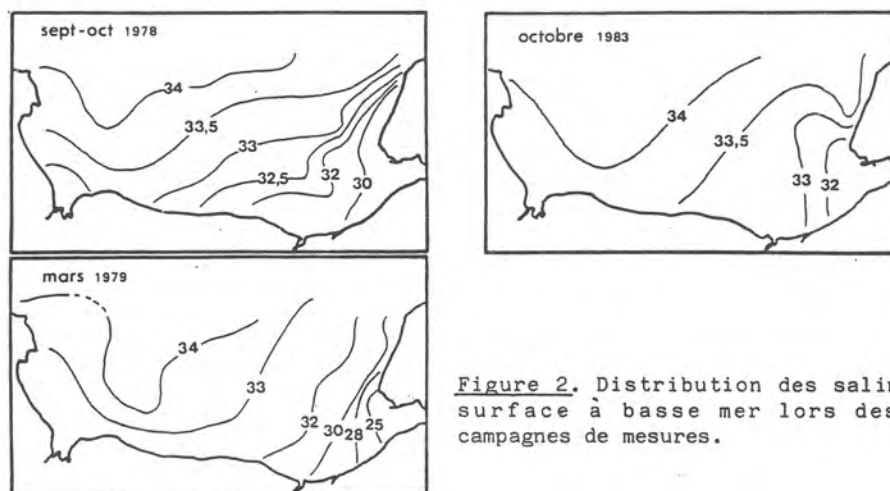


Figure 2. Distribution des salinités de surface à basse mer lors des trois campagnes de mesures.

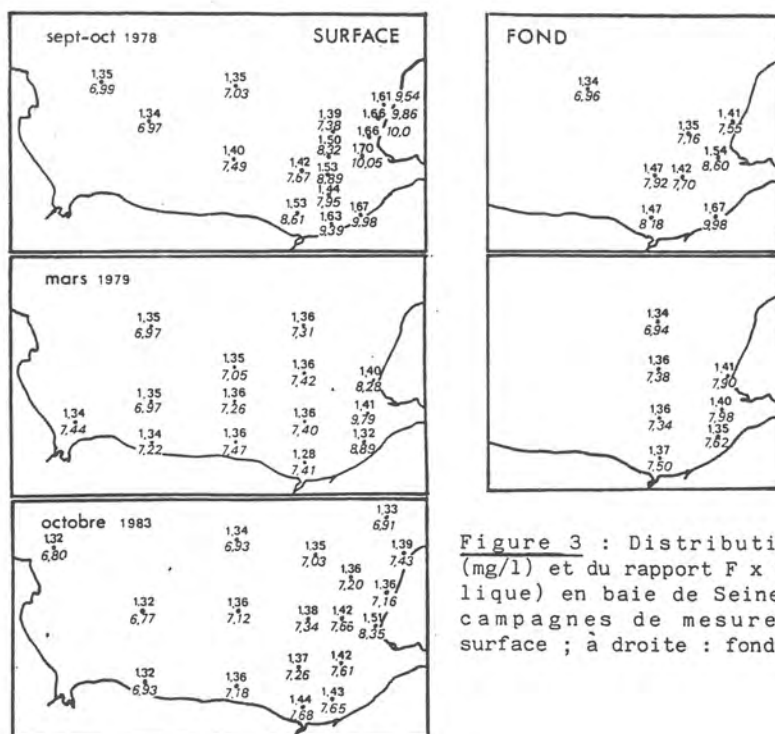


Figure 3 : Distribution du fluorure (mg/l) et du rapport  $F \times 10^5 / Cl$  (en italique) en baie de Seine lors des trois campagnes de mesures. A gauche : surface ; à droite : fond

La figure 3 présente les résultats de fluorure et du rapport  $F/Cl$ . Comme nous le constatons pour chaque campagne, les concentrations décroissent lorsque l'on s'éloigne de l'embouchure de la Seine. En l'absence de pollution, le gradient de concentration serait inversé (il pourrait également l'être avec une pollution plus faible).

Les concentrations maximales hors de l'estuaire ne dépassent pas 1,7 mg/l, soit à peine 30 % de plus que la teneur marine normale. Ces concentrations ne paraissent pas de nature à perturber sensiblement les équilibres biologiques (Martin *et al.*, 1982).

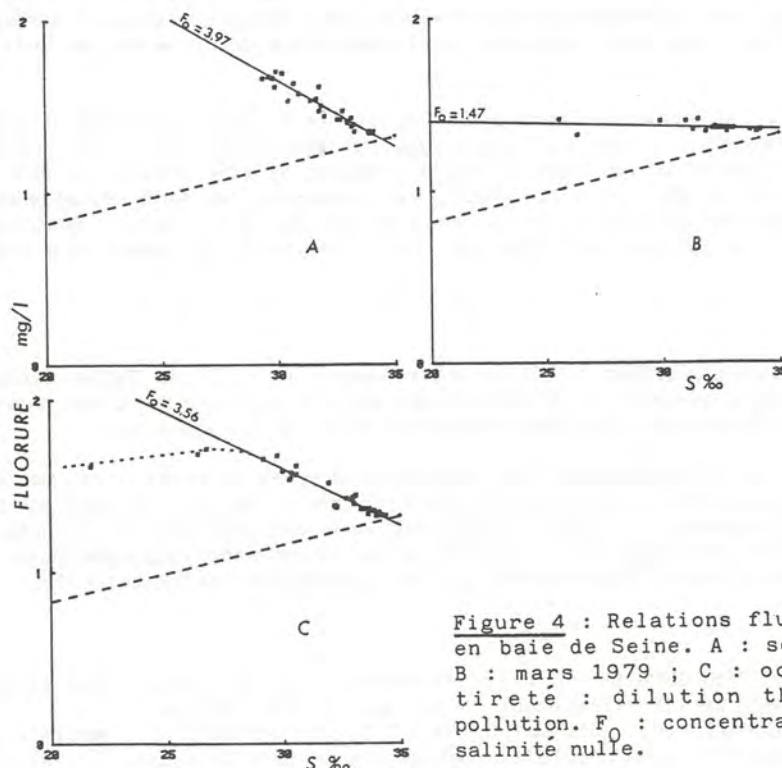


Figure 4 : Relations fluorure- salinité en baie de Seine. A : septembre 1978 ; B : mars 1979 ; C : octobre 1983. En tireté : dilution théorique hors pollution.  $F_0$  : concentration calculée à salinité nulle.

Les relations fluorure-salinité (fig. 4) illustrent la dilution du fluorure dans l'eau de mer. Si l'on extrapole ces relations à salinité nulle, on détermine des concentrations de fluorure de 1,5 à 4 mg/l, supérieures à celles couramment observées dans la Seine en aval de Rouen, soit 1 à 2 mg/l (Martin et Salvadori, 1983). Ces concentrations fictives résultent de l'anomalie due aux déversements de phosphogypses dans la zone marine de l'estuaire. La relation fluorure-salinité doit donc s'incurver aux salinités rencontrées au niveau des zones de déversement comme sur la figure 4C. Remarquons qu'en mars 1979, la baie est quasi homogène en concentration. Cette situation résulte des forts débits ayant précédé les mesures (de 1 400 m<sup>3</sup>/s trois semaines avant la campagne à 700 m<sup>3</sup>/s pendant celle-ci). Les rejets dans l'eau douce sont alors plus dilués et les concentrations plus faibles à salinité égale. La salinité diminue aussi sur la zone de déversements, ce qui entraîne un abaissement du gradient de fluorure et peut occasionnellement créer l'homogénéité observée. A



l'inverse, en septembre 1978 et octobre 1983, les faibles débits de fin d'étiage (200 m<sup>3</sup>/s) engendrent de forts gradients de concentration.

En ce qui concerne le rapport F/Cl, il est toujours supérieur à la valeur océanique de  $6,71 \cdot 10^{-5}$ . Même dans la partie ouest de la baie, où pénètrent les eaux de la Manche (S > 34 ‰), aucune valeur n'est aussi basse, tout au moins en surface. On note les minimums de 6,80 et  $6,77 \cdot 10^{-5}$  en octobre 1983 après un étiage prolongé. La confirmation de ces rapports plus élevés en baie de Seine est obtenue par des mesures sur trois échantillons de la rade de Brest, inclus dans les séries de mesures de la campagne de septembre 1978. Ces échantillons présentent un rapport F/Cl de  $(6,63 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$  indiquant soit une légère sous-estimation analytique, soit une eau de l'Atlantique à rapport F/Cl légèrement inférieur aux eaux du Pacifique précédemment analysées. Il existe donc bien un excès de fluorure même dans les eaux les plus marines de la baie de Seine, les plus éloignées de l'embouchure de la Seine, au voisinage du Cotentin.

Ainsi, par son caractère conservatif, le fluorure a permis un traçage de l'influence des eaux de la Seine dans la baie. La circulation générale résiduelle en Manche et en baie de Seine semblant dirigée d'ouest en est (voir Salomon, 1985 et Le Hir *et al.*, 1985), le transport des eaux estuariennes en sens opposé peut s'effectuer par la dispersion due à la marée, associée au contre-courant le long de la côte sud (où F/Cl prend également des valeurs élevées).

## 6. Conclusion

Les concentrations de fluorure relevées en baie de Seine dépassent rarement 1,5 mg/l au-delà de l'embouchure de l'estuaire. Hors des zones de rejets elles ne paraissent donc pas alarmantes pour la vie aquatique.

Grâce à sa caractéristique conservative, le fluorure s'est montré un excellent traceur de la dispersion des eaux de la Seine : on met ainsi en évidence leur présence, en faible proportion, dans les eaux proches du Cotentin. Cette influence lointaine de la Seine ne doit pas être négligée pour tout aménagement susceptible d'être affecté par des contaminations potentielles.

BREMOND R. et PERRODON C. (1979).- Paramètres de la qualité des eaux, 2e édition. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie. 259 p.

LE HIR P., SALOMON J.C., CHABERT D'HYERES G., LE PROVOST C., MAUVAIS J.L. (1985).- Approche de la circulation résiduelle en baie de Seine. Ce volume, N° 6.

MANGIN S. (1978).- Le phosphogypse en France. Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII. 144 p.

MARTIN J.L., LE GUELLEC A.M., COSSON R. (1982).- Effets du fluor et du phosphogypse chez les organismes marins - Létalité - Fonctions éthologiques - Bioaccumulation. Rapport CNEXO-COB, Brest. 68 p.

MARTIN J.M. and SALVADORI F. (1983).- Fluoride Pollution in french rivers and estuaries. *Estuar.coast. shelf Sci.* 17, p. 231-242.

SALOMON J.C. (1985).- Courantologie calculée en Baie de Seine. Ce volume, N° 2.

SPENCER H., OSIS D. and LENDER M. (1981).- Studies of fluoride metabolism in man : a review and report of original data. *The Science of the total Environment*, 17, p. 1-12.

WARNER T.B. (1971).- Normal fluoride content of sea water. *Deep-sea Res.*, 18, p. 1255-1263.

WARNER T.B., JONES M.M., MILLER G.R. and KESTER D.R. (1975).- Fluoride in sea water : intercalibration study based on electrometric and spectrophotometric methods. *Anal. Chim. Acta*, 77, p. 223-228.

LES ELEMENTS NUTRITIFS EN BAIE DE SEINE.

AMINOT A., KEROUEL R., MAUVAIS J.L.

### 1. Introduction

Au premier échelon de la chaîne alimentaire, le développement du phytoplancton est conditionné par la présence des éléments nutritifs, essentiellement l'azote et le phosphore nécessaires à toutes les espèces, mais également le silicium, indispensable aux algues à squelette siliceux, telles que les diatomées.

Dans les eaux côtières, les apports continentaux peuvent enrichir considérablement le milieu en azote et en phosphore (rejets industriels, urbains et agricoles). Un enrichissement excessif en un ou plusieurs éléments peut alors avoir des conséquences sur l'équilibre et la densité des populations naturelles.

La Baie de Seine représente un exemple de domaine côtier influencé par d'importants apports continentaux. Il était donc intéressant de connaître la répartition des différents éléments nutritifs à plusieurs époques de l'année. Nous nous intéresserons principalement aux éléments nutritifs minéraux à l'état dissous, qui représentent la majorité des espèces chimiques disponibles pour le phytoplancton.

Nous examinerons l'influence des eaux douces sur la baie d'une part en étudiant leur dilution, d'autre part en quantifiant les potentiels et les stocks nutritifs. Les relations avec le développement du plancton seront abordées.

### 2. Matériel et méthodes

Les résultats en baie de Seine ont été obtenus au cours de quatre campagnes : du 13 au 17 mai 1978, du 23 septembre au 5 octobre 1978, du 7 au 13 mars 1979, du 7 au 20 octobre 1983.

Les prélèvements ont été effectués à l'aide de bouteilles Niskin de 5 litres. Pour les sels nutritifs, les échantillons, préfiltrés à 50  $\mu$ m, sont conservés en flacons de polyéthylène de 125 ml à - 20°C jusqu'à l'analyse en laboratoire. Les analyses ont été réalisées selon les méthodes automatiques décrites par Tréguer et Le Corre (1975).

Les salinités ont été mesurées au salinomètre Guidline Autosol 8400.

---

\* IFREMER. Centre de Brest. Direction Environnement et Recherches Océaniques.  
Environnement Littoral, B.P. 337, 29273 Brest Cedex.



### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Les apports

Les apports annuels d'azote minéral dissous par la Seine sont représentés sur la figure 1 (données de la Cellule anti-pollution de Rouen). L'azote total peut être assimilé à la somme  $N-NO_3 + N-NH_4$ , l'azote des nitrites ne représentant que 2 % environ du total (Bessineton 1978 a). On note des fluctuations annuelles des apports avec une nette tendance à l'accroissement surtout après 1978. Simultanément l'azote ammoniacal a beaucoup diminué sans doute en raison d'une meilleure épuration des eaux usées. Au moment des campagnes de 1978-1979, l'apport moyen d'azote minéral dissous est de 66 000 t/an (Guillaud, 1983). Bessineton (1978 b) a estimé les apports supplémentaires des autres rivières se jetant dans la baie (Risle, Touques, Dives, Orne, Vire et Douve). Au total leur contribution est d'environ 15 % des apports de la Seine (# 10 000 t/an). En 1983, l'apport d'azote minéral dissous est d'environ 110 000 t (fig. 1), soit presque le double de l'année 1978. Guillaud (1983) a quantifié également les flux d'azote organique en 1978-1979. Il les estime à environ 10 000 t/an pour l'azote organique particulaire et 3 500 t/an pour l'azote organique dissous. L'azote organique représentait donc 17 % de l'azote total en 1978-1979. L'amélioration de la qualité de l'eau de la Seine (moins d'ammonium, plus d'oxygène) depuis 1976 n'ayant pu que favoriser la minéralisation de l'azote organique, on peut estimer que les flux ne se sont pas accrus en 1983. L'azote organique ne devrait donc alors pas dépasser 10 % de l'azote total.

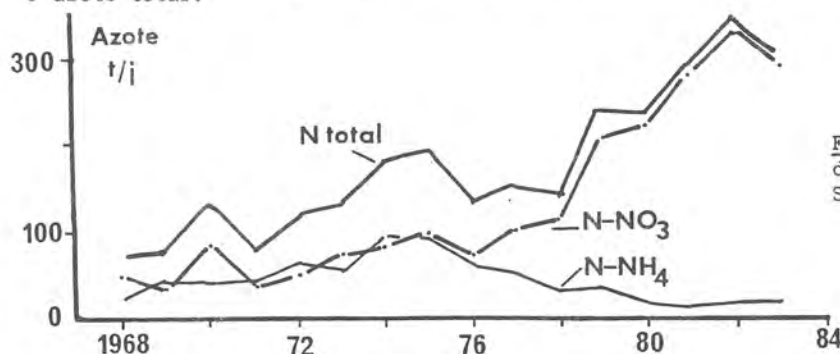


Figure 1. Flux d'azote de la Seine

Les apports de **phosphore** dissous (orthophosphate) par la Seine en 1975, 1976 et 1977 sont respectivement de 10 500, 10 700 et 11 600 t (Bessineton, 1978 c). Guillaud (1983) donne, pour moyenne annuelle 1975-1978, 10 300 t. En 1982, la Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine notait que les apports de phosphore étaient restés relativement constants contrairement à ceux d'azote. L'apport de phosphore particulaire par la Seine a été évalué à 3 200 t/an (Guillaud, 1983). Par ailleurs, les apports de phosphore par les phosphogypses sont, en fin 1977, d'environ 6 000 t/an (Bessineton, 1978 c). Toutefois ce phosphore n'est soluble qu'à 46 % (Commission "Baie de Seine", 1980), ce qui réduirait à 3 000 t/an les apports réels dus aux phosphogypses, soit 30 % de ceux de la Seine. Notons que ces apports se font localement, à la sortie de l'estuaire, en eau presque marine. Les apports de phosphore par les autres rivières de la baie représentent environ 4 % de ceux de la Seine (Bessineton, 1978 c).

Quant au flux de **silicium**, on l'estime à 38 000 t/an (Guillaud, 1983).

#### 3.2. Dilution des apports

L'influence des eaux douces sur la baie de Seine est importante. Les mesures de salinité ont permis de calculer qu'il y a en baie de Seine deux à

trois mois de stockage d'eau douce (limite nord de la baie : Barfleur-Etretat). Les incidences d'une crue, par exemple, seront donc encore sensibles bien après la chute des débits. En mai 78, fin de la période humide, le débit de la Seine était stable depuis plusieurs semaines à environ  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ . En septembre-octobre 1978 et en octobre 1983, fin de l'étiage, le débit était de  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ . En mars 79, période des crues, le débit était de l'ordre de  $700 \text{ m}^3/\text{s}$  mais avait été précédé, trois semaines auparavant, par une crue à  $1\,400 \text{ m}^3/\text{s}$ . En octobre 1983, le débit était de  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ces débits doivent être majorés de 30 % pour tenir compte de la totalité des apports d'eau douce à la baie.

La figure 2 présente les distributions spatiales de la salinité et des principaux éléments nutritifs en surface et à basse mer, au cours des différentes campagnes. La répartition des salinités montre l'influence prépondérante de la Seine. Les salinités décroissent en effet globalement du sud-est vers le nord-ouest. Cependant, il ne faut pas négliger les autres apports côtiers qui infléchissent les isohalines parallèlement aux côtes sud et ouest surtout pendant la période humide (noter l'isohaline 33 ‰ en mars 79). En fait, les eaux de la Seine semblent s'évacuer principalement par le nord-est de la baie, une partie longeant la côte Est en formant une bande d'eau dessalée et turbide. L'isohaline 33 ‰, du fait de sa relative stabilité, semble traduire l'influence des eaux douces à long terme : elle ne se rapproche significativement de l'estuaire qu'après un étiage prolongé tel que celui de 1983. L'isohaline 30 ‰ paraît traduire l'influence à court terme, s'éloignant ou se rapprochant de l'estuaire selon les débits.

En ce qui concerne la distribution globale des trois éléments nutritifs (N, P, Si), on constate qu'elle est très similaire à celle des salinités. La décroissance des concentrations s'effectue du sud-est vers le nord-ouest. Cette situation se retrouve en toute saison et montre l'effet prédominant de la Seine. En hiver, l'influence des eaux douces se fait sentir tout le long de la côte comme on peut le voir par l'allure des lignes d'isoconcentration, très semblable à celle de l'isohaline 33 ‰. La dilution des éléments nutritifs est traduite par leurs relations avec la salinité. Nous avons extrapolé la partie linéaire de ces relations à salinité nulle pour obtenir une approximation des concentrations en eau douce. Le tableau 1 donne les valeurs ainsi obtenues, comparées aux mesures directes en Seine (moyenne des stations 11 et 12 du Réseau National d'Observation).

|             | Mai 78 |      | Septembre 78 |      | Mars 79 |      | Octobre 83 |      |
|-------------|--------|------|--------------|------|---------|------|------------|------|
|             | Calc.  | Mes. | Calc.        | Mes. | Calc.   | Mes. | Calc.      | Mes. |
| Azote total | 340    | 300  | 430          | 300  | 410     | 405  | 510        | 450  |
| Phosphore   | 21     | 21   | 33           | 32   | 23      | 18   | 30         | 35   |
| Silicium    | 66     | 83   | 140          | 105  | 130     | 127  | 200        | -    |

Tableau 1. Concentrations d'azote, de phosphore et de silicium ( $\mu\text{mol/l}$ ) en eau douce calculées d'après les droites de dilution et mesurées par le RNO.

On constate que, dans l'ensemble, la concordance est assez bonne (+ 15 % environ), ce qui semble traduire un comportement grossièrement conservatif, comme l'a déjà mentionné Guillaud (1983) pour ces éléments sur tout l'estuaire. Ce résultat ne doit pas être interprété comme la preuve d'une absence d'activités biologiques, ce qui est infirmé par les conclusions de l'analyse des stocks décrite ci-dessous. En réalité, cela traduit une prédominance de l'intensité des phénomènes d'advection sur les activités biologiques. De fait, en mars, septembre et octobre, périodes d'activités biologiques très faibles ou réduites, les relations salinité-éléments nutritifs



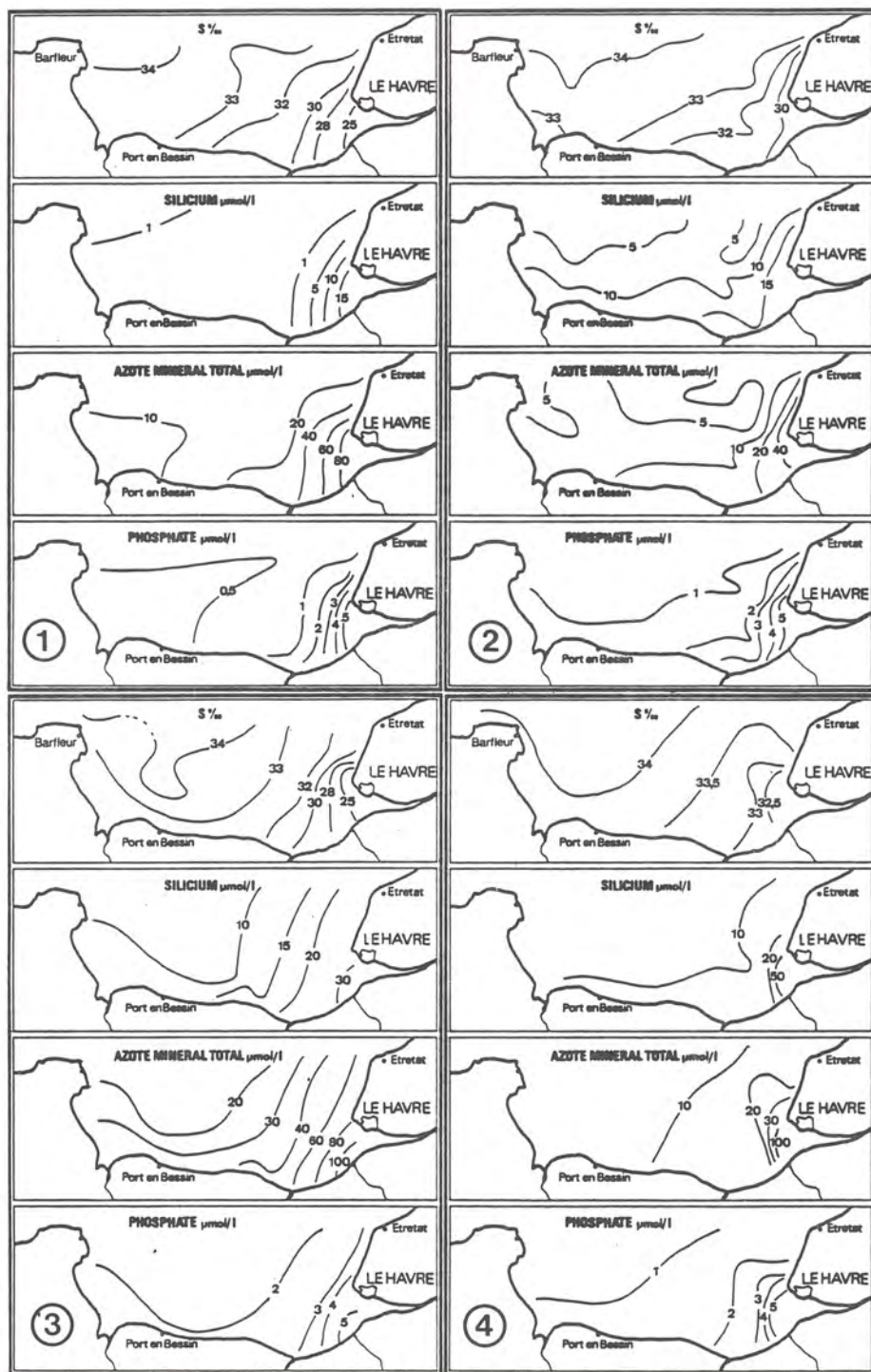


Figure 2. Distribution des salinités et éléments nutritifs en baie de Seine.  
1 : mai 1978 ; 2 : septembre 1978 ; 3 : mars 1979 ; 4 : octobre 1983.

sont linéaires sur toute la gamme des salinités rencontrées (25 à 35 ‰) tandis qu'en mai, période d'intense poussée phytoplanctonique seule la partie inférieure à 31 ‰ était linéaire.

L'estuaire (< 31 ‰) est en effet le siège des plus forts effets de mélange associés à une plus faible productivité (trop de matières en suspension), alors que la zone des "eaux côtières" (> 31 ‰), c'est-à-dire la grande majorité de la baie de Seine, est favorable au développement planctonique.

Le comportement grossièrement conservatif constaté en baie de Seine est donc normalement limité à l'estuaire mais peut s'étendre à une grande partie de la baie en dehors des périodes de forte activité biologique.

### 3.3. Éléments nutritifs et phytoplancton

La baie de Seine reçoit une quantité très importante de sels nutritifs. Toutefois en hiver les conditions sont défavorables au développement planctonique et, du fait du renouvellement de l'eau par les courants, un certain potentiel nutritif est perdu. Cette perte dépend de la durée du stockage des eaux douces et de la période non productive. Les temps de stockage ont été déterminés à l'aide des mesures de salinité et sont de 1,5 mois en mai 1978, 3,5 mois en septembre 1978, 1,5 mois en mars 1979 et 2,5 mois en octobre 1983. En admettant que la productivité est très faible de fin novembre à début avril, on peut alors considérer les apports de décembre, janvier et février comme perdus pour la baie de Seine : cela représente un quart à un tiers des apports annuels.

Nous avons par ailleurs déterminé les quantités potentiellement disponibles et les stocks présents dans la baie. Ces calculs sont fait en connaissant les volumes d'eau de mer et d'eau douce ainsi que les concentrations moyennes dans un certain nombre de mailles élémentaires de la baie. L'eau de mer de référence est prise à 34,5 ‰ et les concentrations marines de référence sont celles de l'hiver 1979 pour cette salinité ( $N = 12 \mu\text{mol/l}$ ,  $P = 1 \mu\text{mol/l}$ ,  $Si = 6 \mu\text{mol/l}$ ). Pour le phosphore la contribution des phosphogypses est incluse dans l'apport potentiel de l'eau douce, à raison de 3 000 t/an, au prorata du temps de stockage. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

| Epoque   | N         |    |       |      | P         |     |       |      | Si        |    |       |      |
|----------|-----------|----|-------|------|-----------|-----|-------|------|-----------|----|-------|------|
|          | Potentiel |    | Stock |      | Potentiel |     | Stock |      | Potentiel |    | Stock |      |
|          | TOT       | ED | TOT   | %Pot | TOT       | ED  | TOT   | %Pot | TOT       | ED | TOT   | %Pot |
| Mai 78   | 38        | 20 | 26    | 68   | 6,0       | 2,7 | 2,4   | 40   | 26        | 8  | 4     | 15   |
| Sept. 78 | 40        | 22 | 11    | 27   | 7,3       | 4,0 | 3,5   | 48   | 32        | 14 | 19    | 59   |
| Mars 79  | 41        | 23 | 40    | 98   | 6,2       | 2,9 | 6,1   | 98   | 33        | 15 | 35    | 104  |
| Oct. 83  | 31        | 14 | 17    | 55   | 5,4       | 2,1 | 4,1   | 76   | 29        | 11 | 28    | 97   |

Tableau 2. Comparaison des potentiels nutritifs et des stocks présents en baie de Seine (kt). ED : eau douce ; TOT : total eau douce + eau de mer.

On remarque tout d'abord que la contribution des eaux douces représente environ la moitié du potentiel nutritif de la baie pour les trois éléments considérés (N, P, Si). Il s'agit donc d'un milieu indéniablement eutrophe. En second lieu, nous pouvons comparer les potentiels nutritifs aux stocks. La différence de ces deux valeurs nous informe sur la partie consommée, donc passée sous forme particulière (vivante ou détritique). A la fin de l'hiver, les deux valeurs sont identiques : ce résultat important, obtenu avec les trois éléments, confirme la validité des estimations effectuées, car la faible productivité hivernale ne doit pas avoir significativement réduit le potentiel disponible.



En mai, on constate la disparition du tiers de l'azote, des deux tiers du phosphore et de presque tout le silicium : c'est le résultat des poussées planctoniques de printemps. Ces populations planctoniques printanières, constituées en majorité de diatomées (COB, 1978) ont consommé le silicium qui est réduit à moins de 1  $\mu\text{mol/l}$  dans les deux tiers de la baie (fig. 1). A ces concentrations, la plupart des diatomées ne peuvent plus l'utiliser (Paache, 1973 ; Tilman et Kilham, 1976) ce qui empêche leur développement ultérieur. Cependant le phosphore et l'azote sont encore présents en quantités suffisantes pour la croissance d'algues n'exigeant pas de silicium. En effet, en mai, après la poussée de diatomées, 40 % du phosphore et 70 % de l'azote sont encore disponibles.

Le rapport molaire N/P du potentiel nutritif de mai est voisin de 15, rapport moyen d'assimilation du phytoplancton (Redfield *et al.*, 1963), mais la consommation des éléments s'est faite avec un rapport de 7,5. Ce dernier rapport qui n'est pas nécessairement anormal (Ryther et Dunstan, 1971), peut aisément s'expliquer par une accumulation intracellulaire de phosphate non assimilé, phénomène classique lorsque la concentration n'est pas limitante (Tilman et Kilham, 1976). Le rapport N/P élevé du stock restant (24) ne serait pas alors nécessairement le signe d'un excès d'azote par rapport au phosphore pour le plancton, le phosphate accumulé devant en effet être rapidement libéré dans le milieu à la mort des diatomées.

L'étude du stock d'automne (sept. 78, oct. 83) traduit l'évolution très différente selon les éléments : l'azote a continué à diminuer et ne représente plus que 27 % du potentiel alors que le phosphore et le silicium se sont accrus. On entre en effet dans la phase de diminution de la productivité et la régénération des éléments sous leurs formes minérales peut devenir significative.

Pour le silicium la consommation estivale se trouve en effet réduite, les diatomées n'étant plus dominantes ; il n'y a donc pas réutilisation intense de la fraction régénérée. Les mesures faites en septembre 1978 montrent toutefois la présence de Diatomées, mais celles-ci sont largement concurrencées par des Cryptophycées et des Chlorophycées. Notons qu'en octobre 1983, le stock de silicium est égal au potentiel nutritif, ce qui peut signifier un retour précoce à la situation pré-printanière (régénération totale).

Quant au phosphore, après l'été (sept. 78), il a été consommé avec un rapport N/P de 17, ce qui est proche du rapport moyen. Bien qu'il soit admis que la régénération du phosphore soit plus rapide que celle de l'azote, ce résultat nous paraît confirmer l'hypothèse avancée précédemment d'une accumulation cellulaire de phosphate au printemps. Ce phosphore libéré ensuite dans le milieu a été réutilisé normalement par les populations qui ont succédé. Dans ces conditions, la conclusion que l'on peut tirer en considérant le stock restant après la saison productive, avec un N/P de 7, est qu'en baie de Seine les facteurs limitants seraient en fait successivement le silicium puis l'azote.

BESSINETON, C. (1978 a).— Les apports en azote dans l'estuaire de la Seine. Direction des Affaires Maritimes, Rapport de la commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine. 10 p + 22 fig.

BESSINETON, C. (1978 b).— Apports de sels nutritifs en baie de Seine par les rivières de Basse-Normandie. Direction des Affaires Maritimes, Rapport de la commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine. 6 p + 15 fig.

BESSINETON, C. (1978 c).— Les apports en phosphates de la Seine. Direction des Affaires Maritimes, Rapport de la commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine. 5 p + 14 fig.

COB (1978).— BAIE DE SEINE, Campagne Thalia mai 1978, présentation des résultats. CNEXO-COB Département Environnement Littoral, 189 p.

- Commission "Baie de Seine" (1980).- Note de synthèse sur les contrôles effectués dans les zones de rejets de phosphogypse depuis le début des déversements jusqu'en 1979. Direction des Affaires Maritimes, Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine.
- GUILLAUD, J.-F. (1983).- Les flux de sels nutritifs dans l'estuaire de la Seine (France) ; rôle et importance du bouchon vaseux au cours du mélange estuarien. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 40 (suppl. 1) : 180-187.
- PAASCHE, E. (1973).- Silicon and the ecology of marine planktonic diatoms. II. Silicate-uptake kinetics in five diatom species. Mar. Biol. 19, 262-269.
- REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H., et RICHARDS, F.A. (1963).- The influence of organisms on the composition of sea water, p. 26-77. In : M.N. Hill (ed.) *The Sea*, V.2, Interscience.
- RYTHER, J.H. et DUNSTAN, W.M. (1971).- Nitrogen, Phosphorus and Eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 171 (3975) : 1008-1013.
- TILMAN D., et KILHAM S.S. (1976). Phosphate and silicate growth and uptake kinetics of the diatoms Asterionella formosa and Cytotella meneghiniana in batch and semicontinuous culture. *J. Phycol.*, 12, p. 375-383.
- TREGUER P., LE CORRE P. (1975).- Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. L.O.C., U.B.O., Avenue Le Gorgeu, 29283 Brest Cedex, France.





MISE EN EVIDENCE DES PROFILS D'EVOLUTION PLURIANNUELLE ASSOCIES AUX SERIES DE MESURES DE PARAMETRES HYDROBIOLOGIQUES EFFECTUEES DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE DANS LE CADRE DU RESEAU NATIONAL D'OBSERVATION DE LA QUALITE DU MILIEU MARIN.

GALLET P.

## **1. Introduction**

La surveillance de l'évolution de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine, dans le cadre de l'une des orientations du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (RNO), a permis la constitution de longues séries de mesures mensuelles de paramètres hydrobiologiques. Ces séries ont fait l'objet d'une analyse spécifique orientée vers la mise en évidence des profils d'évolution pluriannuelle associés aux différents paramètres mesurés, et pouvant rendre compte de l'évolution moyenne de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine sur une période de 7 ans (1977 à 1983). Les résultats présentés ici concernent les séries de mesures de concentrations en ammonium, nitrates, azote total minéral dissous ( $\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3$ ), phosphates, silicates et oxygène dissous, effectuées chaque mois aux stations 10, 11 et 12 (fig. 1) à une profondeur de 1 m.

## **2. Caractéristiques des séries étudiées**

L'analyse de l'évolution pluriannuelle de ces paramètres à partir de séries de valeurs mensuelles suppose la souscription à l'hypothèse sur laquelle est fondée leur échantillonnage (en particulier la définition de l'intervalle de temps séparant deux mesures successives), et selon laquelle une suite de valeurs mensuelles est suffisante pour accéder à la connaissance de phénomènes pluriannuels. Cela revient à considérer qu'une mesure quelconque est représentative d'une situation moyenne associée à une période approximative d'un mois autour de la date de cette mesure. En d'autres termes, l'acceptation de cette hypothèse revient à considérer la variabilité des paramètres mesurés, sur une période d'un mois, comme étant négligeable par rapport aux variabilités saisonnières et pluriannuelles.

Or, la complexité du système représenté par l'estuaire de la Seine et celle des phénomènes physiques, chimiques et biologiques déterminant les caractéristiques de ces eaux, n'autorisent pas la formulation, a priori, d'une hypothèse aussi réductrice. Ainsi, le traitement que nous avons appliqué aux

---

\* Université de Bretagne Occidentale - Laboratoire d'Océanographie Biologique,  
29273 Brest Cedex.



séries de mesures, effectuées dans le cadre du RNO dans l'estuaire et la baie de Seine, démontre l'impossibilité d'estimer les tendances pluriannuelles à partir de certaines séries, du fait de la contamination exercée par la variabilité associée aux échelles de temps inférieures au mois.

Nous présentons ici les résultats des traitements ayant permis de mettre en évidence des schémas d'évolution pluriannuelle de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine. Ils concernent essentiellement les mesures effectuées à la station 12 (sauf pour ce qui concerne les mesures de concentrations en silicates) où les variations induites par les cycles de marée sont moins marquées qu'au niveau des stations 10 et 11 (donc la contamination exercée par la variabilité associée aux phénomènes liés à la marée est moindre).

### 3. Méthodologie de traitement des séries

#### 3.1. Technique de décomposition des informations contenues dans les séries

Notre démarche a consisté à décomposer l'information, contenue dans les séries de mesures dont nous disposons, en un cycle saisonnier moyen (12 termes mensuels moyens estimés à partir de 7 années de mesures) et une tendance discontinue ou profil d'évolution pluriannuelle (un coefficient par année), conformément à un mode de traitement devenu classique en analyse des séries chronologiques. Une attention particulière a été accordée à la formalisation mathématique de la relation unissant ces deux composantes ; nous avons considéré que le profil d'évolution pluriannuelle des paramètres étudiés pouvait se traduire soit par des amplifications successives du cycle saisonnier moyen (modèle multiplicatif), soit par de simples variations du niveau moyen des cycles saisonniers successifs n'affectant pas leur amplitude (modèle additif).

L'estimation d'un profil d'évolution pluriannuelle consiste donc à ajuster au sens des moindres carrés sur la série étudiée ( $x(t)$ ,  $t = 1, 84$ ) une série modélisée comportant un cycle saisonnier moyen ( $s(m)$ ,  $m = 1, 12$ ) sur lequel est appliqué un ensemble de coefficients ( $p(a)$ ,  $a = 1, 7$ ) rendant compte des fluctuations pluriannuelles moyennes, de sorte qu'une valeur quelconque  $x(t)$  de la série initiale puisse être approchée par :

$$\hat{x}(t) = s(m) \cdot p(a) \text{ à l'aide du modèle multiplicatif,}$$

ou

$$\hat{x}(t) = s(m) + p(a) \text{ en utilisant le modèle additif,}$$

avec :

$$\begin{cases} a = \text{INT}((t - 1)/12) + 1 \\ m = t - (12(a - 1)) \end{cases}$$

où INT représente la fonction partie entière.

Le programme informatique que nous avons utilisé a été conçu par A. Laurec (Laurec A. et J.Y Le Gall, 1975 ; Ménesguen A. et A. Laurec, 1984) d'après certains éléments de la théorie des séries temporelles (Kendall M.G., 1983). L'estimation des paramètres du modèle consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs de la série observée et celles prévues par le modèle soit :  $\sum_t (x(t) - \hat{x}(t))^2$

#### 3.2. Mise en oeuvre du traitement

Le découpage des séries analysées n'a pas été effectué en fonction des années "civiles" (de janvier à décembre), mais d'après la succession des cycles saisonniers. Les ajustements les plus performants ont été obtenus en faisant commencer l'année au moment du démarrage du cycle saisonnier plutôt qu'en janvier. Dans tous les cas et, a fortiori, lorsque l'estimation du cycle saisonnier n'était pas probante, nous avons procédé à plusieurs ajustements et retenu celui qui s'avérait le plus performant (% de variance résiduelle minimal). Ainsi, tous les ajustements présentés ci-dessous ont été réalisés sur la période comprise entre septembre 1976 et août 1983 (l'échantillonnage ayant

débuté en janvier 1977, la première année n'est représentée que par huit valeurs). Nous avons appliqué à chaque série une analyse comparative de l'adéquation des deux types de modèles (additif ou multiplicatif) afin de choisir le plus performant.

#### 4. Examen et interprétation des tendances pluriannuelles

Les figures 2 à 8 illustrent les résultats des ajustements réalisés sur les séries de mesures effectuées à la station 10, en ce qui concerne les silicates, et à la station 12 pour les autres paramètres. Les profils d'évolution pluriannuelle figurent sous forme de successions de barres verticales représentant les niveaux moyens des cycles saisonniers successifs. Le tableau 1 fournit pour chaque ajustement le pourcentage de variance résiduelle (variance des écarts entre la série observée et le modèle, rapportée à la variance de la série observée) et le pourcentage de variance de la série détendancialisée (variance de la série débarrassée de sa composante pluriannuelle, rapportée à la variance de la série brute).

|                                            | NH <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | ATMD *   | Oxygène dissous | PO <sub>4</sub> | SiOH     | Débit de la Seine   |
|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|---------------------|
| Type de modèle                             | Mult.           | Add.            | Add.     | Add.            | Mult.           | Add.     | Mult.               |
| % de variance résiduelle                   | 28,4            | 22,8            | 39,8     | 19,3            | 38,4            | 30,8     | 38,5                |
| % de variance de la série détendancialisée | 85,6            | 29,4            | 56,1     | 87,8            | 87,2            | 91,3     | 98,3                |
| Moyennes des cycles saisonniers successifs | (μmol/l)        | (μmol/l)        | (μmol/l) | (ml/l)          | (μmol/l)        | (μmol/l) | (m <sup>3</sup> /s) |
| 1976-77                                    | 117,9           | 234             | 355      | 1,56            | 42,5            | 84,7     | 371,5               |
| 1977-78                                    | 54,2            | 214             | 288      | 2,71            | 25,8            | 96,9     | 552,3               |
| 1978-79                                    | 56              | 288             | 363      | 2,12            | 26,5            | 101,8    | 409,2               |
| 1979-80                                    | 41,4            | 372             | 434      | 2,47            | 29,3            | 106,4    | 488                 |
| 1980-81                                    | 20,6            | 381             | 416      | 2,97            | 24,6            | 107,7    | 525,7               |
| 1981-82                                    | 16,6            | 373             | 403      | 3,56            | 20,4            | 81,4     | 571,1               |
| 1982-83                                    | 24,6            | 355             | 382      | 3,65            | 19,1            | 99,6     | 635,5               |

Tableau 1. Caractéristiques des ajustements illustrés respectivement par les figures 2 à 8. \* ATMD : azote total minéral dissous.

A titre de comparaison et d'aide à l'interprétation, nous avons appliqué l'analyse à une série de moyennes mensuelles du débit de la Seine, constituée à partir de mesures journalières effectuées à la station de Poses (située à environ 140 km de l'estuaire).

Les séries de mesures de concentration en ammonium effectuées à la station 12 présentent une très nette tendance décroissante entre 1977 et 1982 (fig. 2). Cette diminution de la charge moyenne des eaux de l'estuaire de la Seine en ammonium s'accompagne d'une augmentation des teneurs en nitrates entre 1978 et 1981 (fig. 3). L'évolution des teneurs moyennes en azote total minéral dissous, intégrant ces deux tendances contraires, présente une phase d'augmentation brutale entre 1978 et 1980, suivie d'une phase de diminution plus progressive à partir de 1981 (fig. 4). Cette évolution, sans doute liée à un effort d'épuration des rejets urbains et industriels dans le bassin versant, semble se traduire par une amélioration du degré d'oxygénation des eaux de l'estuaire de la Seine (fig. 5) conformément à une hypothèse émise par AVOINE et al. (1984).

L'interprétation du profil d'évolution pluriannuelle des teneurs moyennes en phosphates à la station 12 (fig. 6) nécessite le recours à l'examen du profil d'évolution du régime hydrologique moyen de la Seine (fig. 8). Nous remarquons d'une part que les fortes teneurs en phosphates mesurées en 76-77



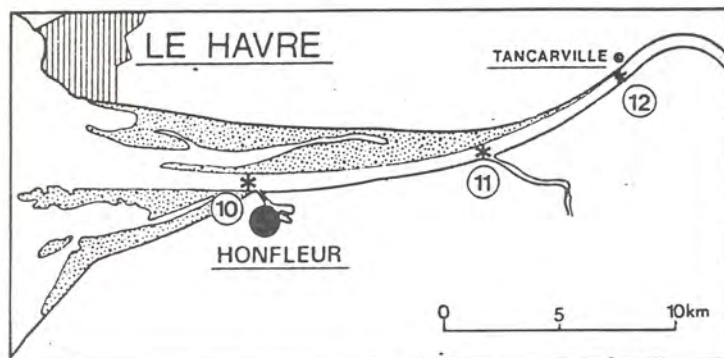


Figure 1. Localisation des stations du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin, utilisées pour la surveillance de l'estuaire de la Seine.

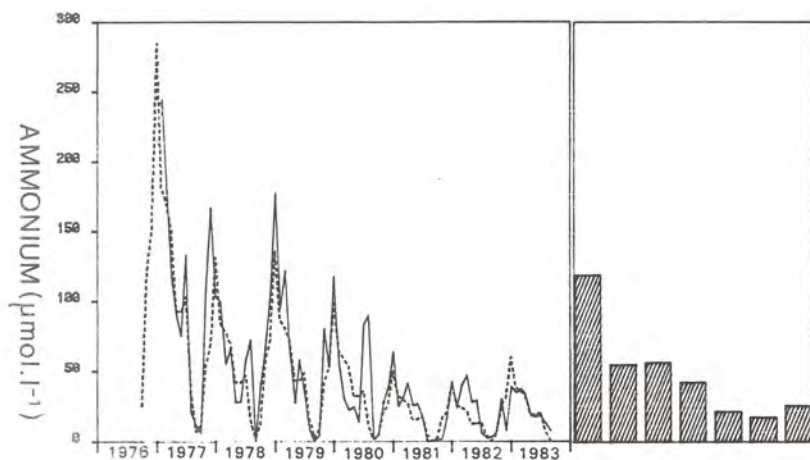


Figure 2. Illustration de l'ajustement réalisé sur la série de mesures de concentrations en ammonium, effectuées à la station 12 : — : série observée ; --- : série modélisée ; ▨ : profil d'évolution pluriannuelle.

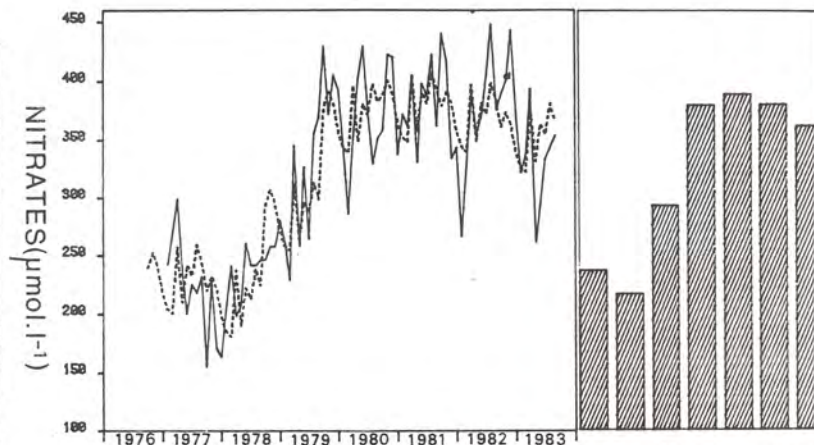


Figure 3. Illustration de l'ajustement réalisé sur la série de mesures de concentrations en nitrates, effectuées à la station 12 : — : série observée ; --- : série modélisée ; ▨ : profil d'évolution pluriannuelle.

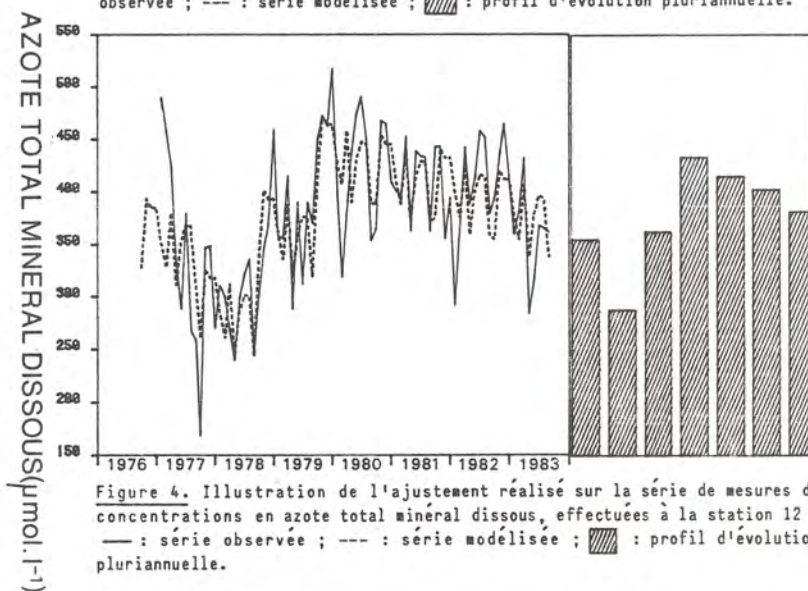


Figure 4. Illustration de l'ajustement réalisé sur la série de mesures de concentrations en azote total minéral dissous, effectuées à la station 12 : — : série observée ; --- : série modélisée ; ▨ : profil d'évolution pluriannuelle.

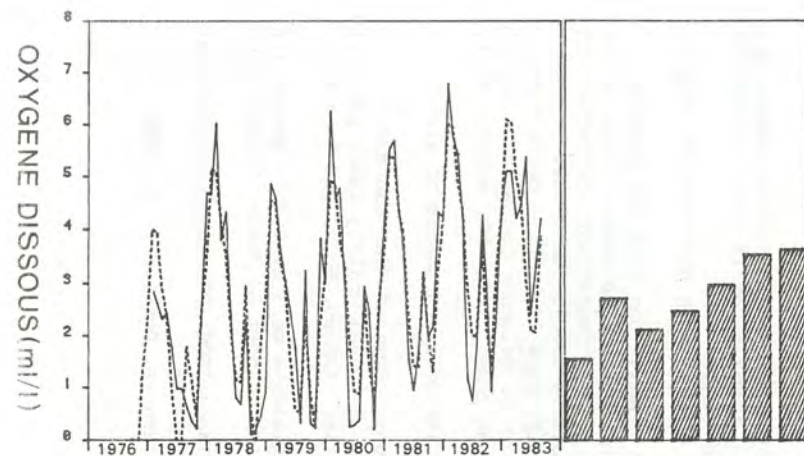


Figure 5. Illustration de l'ajustement réalisé sur la série de mesures de concentrations en oxygène dissous, effectuées à la station 12 : — : série observée ; - - : série modélisée ; ▨ : profil d'évolution pluriannuelle.

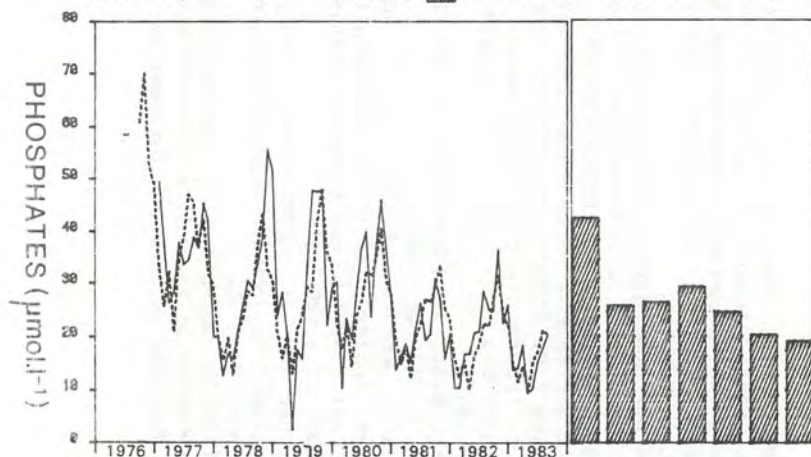


Figure 6. Illustration de l'ajustement réalisé sur la série de mesures de concentrations en phosphates, effectuées à la station 12 : — : série observée ; - - : série modélisée ; ▨ : profil d'évolution pluriannuelle.

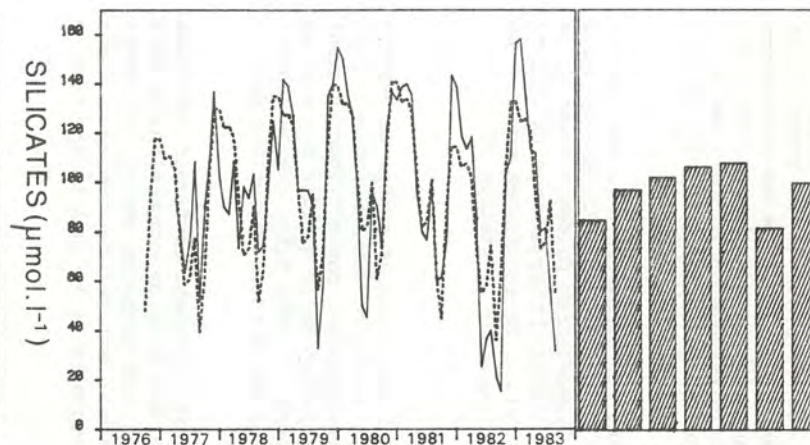


Figure 7. Illustration de l'ajustement réalisé sur la série de mesures de concentrations en silicates, effectuées à la station 10 : — : série observée ; - - : série modélisée ; ▨ : profil d'évolution pluriannuelle.

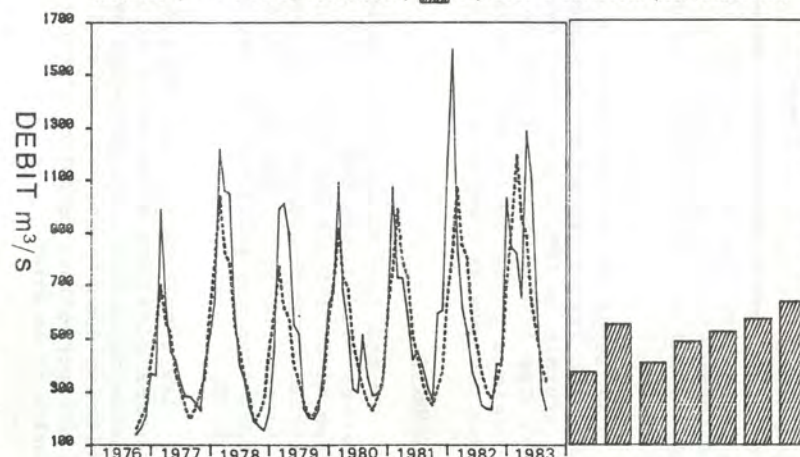


Figure 8. Illustration de l'ajustement réalisé sur la série de moyennes mensuelles du débit de la Seine à Poses : — : série observée ; - - : série modélisée ; ▨ : profil d'évolution pluriannuelle.



coïncident avec les faibles débits de la Seine enregistrés cette année là. D'autre part, la tendance à la diminution des concentrations moyennes en phosphates de 1980 à 1983 s'inscrit dans une phase d'augmentation du débit moyen de la Seine. Ces phénomènes peuvent être expliqués par la prépondérance des rejets constants d'origine urbaine et industrielle dans le déterminisme de la charge moyenne en phosphates des eaux de l'estuaire de la Seine (Avoine *et al.*, 1984).

La série de concentrations en silicates, enregistrées à la station 10, présente une légère tendance à l'augmentation entre 1977 et 1981, suivie d'une baisse brutale en 1982 (coïncidant avec une augmentation du débit moyen de la Seine). Ces éléments permettent de relativiser l'importance du régime hydrologique moyen de la Seine dans l'évolution de la charge moyenne en silicates des eaux de l'estuaire de la Seine, au niveau de la station 10.

## 5. Conclusion

Compte tenu du caractère exceptionnel des longues séries de mesures mensuelles effectuées depuis 1977 dans le cadre du RNO, il nous a paru intéressant de définir les contributions que leur analyse pouvait fournir quant à la connaissance des phénomènes régissant l'évolution de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine. On pourra donc considérer à juste titre que ce travail s'inscrit dans une politique de mise en valeur des données collectées dans le cadre du RNO.

Les résultats qui ont été présentés ici semblent confirmer certaines hypothèses établies à la suite de l'étude des flux de contaminants dans l'estuaire de la Seine. Des tendances évolutives très marquées ont pu être mises en évidence démontrant, s'il en était besoin, l'intérêt de disposer d'une structure permettant de suivre l'évolution temporelle de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine.

AVOINE J., D. BOUST et J.F. GUILLAUD (1984).— Flux et comportement des contaminants dissous et particuliers dans l'estuaire de la Seine. CIEM/CIES Symposium on contaminant fluxes through the coastal zone.

CNEXO-COB-ELGMM (1979).— Rapport scientifique. Les éléments nutritifs en baie de Seine. p. 187-193.

CNEXO-COB-ELGMM (1980).— Port Autonome du Havre. Qualité des eaux des bassins.

GUILLAUD J.F. et X. SANDRIN (1980).— Analyse critique des méthodes d'acquisition et de traitement des données du RNO. Début d'interprétation des résultats obtenus sur le site de la Seine (juin 1974 à décembre 1978). CNEXO-COB.

GUILLAUD J.F. (1983).— Les flux de sels nutritifs dans l'estuaire de la Seine ; rôle et importance du bouchon vaseux au cours du mélange estuarien. Journal Canadien des Sciences Halieutiques et Aquatiques, vol. 40, suppl. n° 1, p. 180-187.

KENDALL M.G., A. STUART et J.K. ORD (1983).— The advanced theory of statistics (3 vol.). Griffin, Londres.

LAUREC A. et J.Y. LE GALL (1975).— De-seasonalizing of the abundance of a species. Application to the albacore (*Thunnus alalunga*) monthly catch per unit of effort (CPUE) by the Atlantic Japanese Longline Fishery. Bull. Far Seas Fish. Res. Lab. 12 : 145-169.

MENESGUEN A. et A. LAUREC (1984).— Analyse statistique de l'évolution temporelle des paramètres hydrobiologiques dans les bassins du port du Havre. Oceanologica Acta, vol. 7, n° 1.

RNO (1981).— Synthèse des travaux de surveillance 1975-1979 du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin. CNEXO-COB.

SAUM. Estuaire de la Seine. Synthèse des connaissances. Dossier n° 8. 1980.

DISTRIBUTION DE 40 ELEMENTS A L'ETAT DE TRACES DANS LES SUSPENSIONS DE LA SEINE. UTILISATION DU LANTHANE POUR ETUDIER LES PROCESSUS SEDIMENTAIRES DANS L'ESTUAIRE ET DANS LA BAIE.

GUEGUENIAT P.\*, BOUST D.\*, HEMON G.\*\*, PHILIPPOT J.C.\*\*, LAGARDE G.\*\*\*, HEITZ C.\*\*\*.

Il est difficile d'étudier le comportement géochimique des éléments à l'état de traces dans l'estuaire de la Seine en raison, de la pénétration d'apports marins, de remises en suspensions, de la réinjection d'anciens apports fluviaux, (Avoine, 1985; Avoine & Crevel, 1985; Avoine *et al.*, 1985), de rejets industriels en aval, de la précipitation du fer qui revêt un caractère exceptionnel sur les plans qualitatifs et quantitatifs. (Guéguénat *et al.*, 1985), de rejets de dragages.

Des études à caractère géochimique (Boust, 1981; Avoine, 1981), menées depuis 1978, ont établi une base de données concernant le comportement de quelques éléments à l'état de traces (Fe, Zn, Ni, Cu, Cd, Pb). Elles ont également permis de constituer une bibliothèque précieuse d'échantillons. Ce travail aura plusieurs objectifs :

- a) établir la distribution de 40 éléments à l'état de traces (Ag, As, Au, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, Hg, K, La, Nd, Rb, Sb, Sc, Sr, Ta, Tb, Th, U, Yb, Zn, W, Br, Cd, Ti, Mn, Ni, Cu, Y, Nb, Sn, I, Ph, S, P, Zr) dans les suspensions et les sédiments de l'estuaire et de la baie de Seine.
- b) rechercher des traceurs géochimiques non réactifs des apports fluviaux;
- c) illustrer l'influence des processus sédimentaires sur la distribution des éléments dans la phase particulaire, en se référant au zinc classiquement étudié en milieu estuarien.

# 1. TECHNIQUES UTILISEES. ECHANTILLONS ANALYSES

On a dosé les éléments étudiés par activation neutronique et par fluorescence X induite par des protons accélérés à 1.5 MeV (PIXE). Parmi les éléments analysés certains le sont par les deux techniques (Fe, K, Rb, Br, Sr, Cd, Ba), d'autres sont spécifiques soit à l'activation (terres rares, Au, As, Co, Cs, Hf, Sb, Ta, Th, Y, W et parfois Se, Mo, Ga, Ir, Hg) soit à PIXE (Pb, Cu, Ni, S, P, Ti, Sn, V, Al, Cl, I, S, P).

Les analyses par activation neutronique et par PIXE ont été réalisées respectivement au Laboratoire de Radiométrie du C.E.A. à Orsay et au Laboratoire de Chimie Nucléaire du C.N.R.S. à Strasbourg-Cronenbourg. Les méthodes ont été décrites: Philippot (1970), Guéguénat *et al.* (1976) pour l'activation; Lagarde *et al.* (1983) pour PIXE. Les corrélations entre PIXE et activation pour les éléments communs sont: pour Zn de 0,966 (n = 9), pour Br de 0,965 (n = 8), pour Rb de 0,840 (n = 10), pour Sr de 0,482, pour Ba de 0,410 (n = 10).

\* C.E.A.-I.P.S.N.-DERS/SERE - Laboratoire de Radioécologie Marine - B.P. 270 50107 Cherbourg.

\*\* C.E.A.-I.P.S.N.-DERS/SERE - Laboratoire de Métrologie de l'Environnement et d'Intervention, Bois des Rames, Bât.501 - 91400 Orsay.

\*\*\* Centre de Recherches Nucléaires et Université Louis Pasteur - 67037 Strasbourg.



Echantillons analysés :

The map illustrates the coastal zone of the Seine estuary, divided into three main zones: Zone marine (left), Zone estuarienne (middle), and Zone fluviatile (right). Key locations and sampling stations are marked along the coastline:

- Zone marine:** Includes stations RNO1, RNO2, and RNO3. A dashed line indicates the boundary between the marine and estuarine zones.
- LE HAVRE:** The central urban area, marked with a large 'X'.
- Zone estuarienne:** Includes stations RNO10 and RNO11. A dashed line indicates the boundary between the estuarine and fluviatile zones.
- Zone fluviatile:** Includes stations RNO12, RNO13, and RNO14. A dashed line indicates the boundary between the fluviatile and marine zones.
- Other locations:** Tancarville, Cofre Tancarville - CTC, Bouée Ouilleville - ROL, Vieux-Port, Bouée Vieux-Port - BVF, Bouée 26 - B 26, Bouée 20 - B 20, Bouée 16 - B 16, Bouée 10 - B 10, Bouée 4 - B 4, Bouée 34 - B 34, Bouée 28 - B 28.
- Coordinates:** The map shows longitude from 0° to 0°30' E and latitude from 49°20' to 49°30' N.
- Scale:** A scale bar indicates distances of 0, 5, and 10 km.

Extractions partielles :

## 2. LES ELEMENTS A L'ETAT DE TRACES DANS LES SUSPENSIONS DE LA SEINE EN 1978-79.

On a reporté sur les figures 2 et 3 les évolutions du zinc extractible associé aux suspensions estuariennes, en fonction de la salinité, pour la crue 1979 et les étiages 1978-1979. Dans l'optique d'une sélection pour les analyses multi-éléments nous retenons :

a) que les apports fluviaux de crue sont nettement enrichis en zinc (800-900 ppm) par rapport à ceux de l'étiage (400-500 ppm);

- b) que la bouée 28 semble représenter une station intéressante pour étudier la désorption du zinc au contact du milieu salin en période de crue;  
 c) l'homogénéité des résultats dans l'estuaire en étiage;  
 d) les stations de Quillebeuf et du Vieux Port comme représentatives des apports fluviaux.

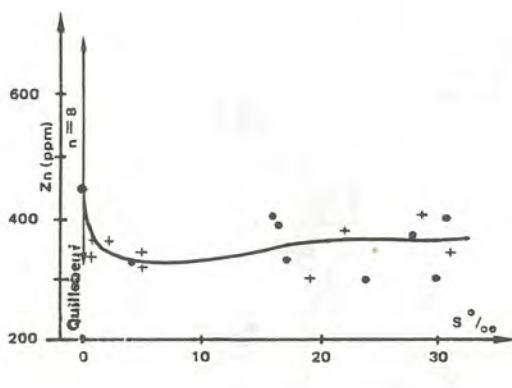


Figure n° 2 - Zinc extractible (ppm) dans les suspensions des étiages 1978 (+) 1979 (•)

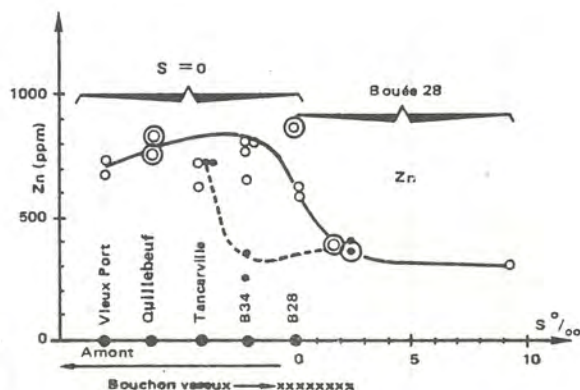


Figure n° 3 - Zinc extractible (ppm) dans les suspensions de la crue 1979

• : pleine mer de vives eaux ; ○ autres échantillons

○ : échantillons sélectionnés pour activation ; B : bouée

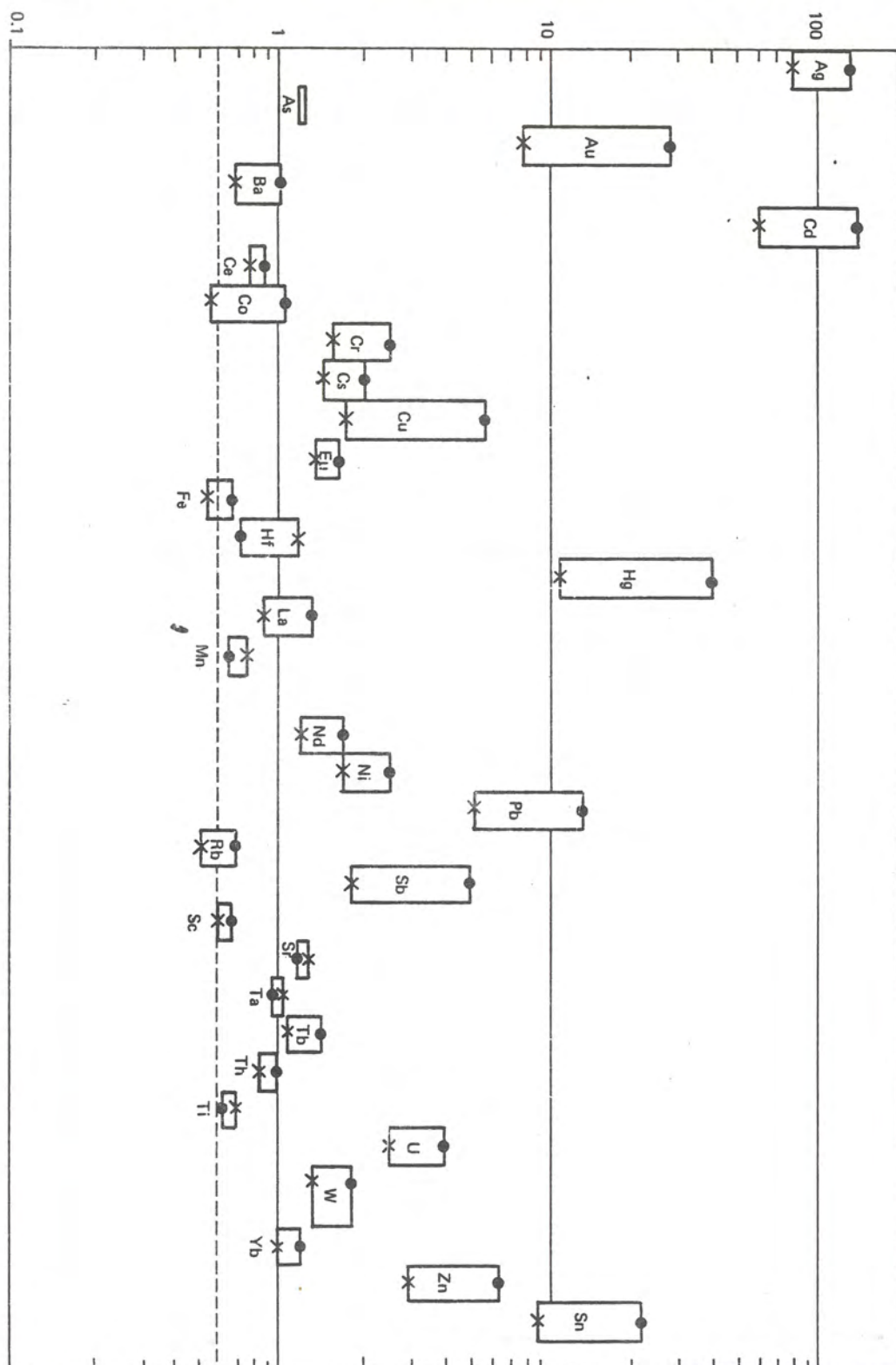
## 2.2. Les analyses multi-éléments :

Pour dresser un portrait des apports fluviaux 1979 nous avons analysé, à la station de Quillebeuf, deux échantillons de crue (surface - profondeur), deux échantillons d'étiage (surface - profondeur). Les techniques utilisées ont permis de mesurer, pour l'activation neutronique : Ag, As, Au, Ba, Ce, Ca, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, Hg, K, La, Nd, Rb, Sb, Sc, Sr, Ta, Tb, Th, U, Yb, Zn, Br, W, Cd; pour PIXE : Ti, Mn, Ni, Cu, Y, Nb, Sn, I, Pb, S, P, Zr, Rb, Sr, Zn, Cd. Les résultats bruts sont reportés dans le tableau 1. Ils ont été exploités en se référant d'une part, à la composition de la croûte terrestre décrite par Martin et Meybeck (1978) d'autre part, aux normalisations par rapport au scandium, bon indicateur de la présence d'argile.

### a) Référence croûte terrestre :

La composition de la croûte terrestre se rapproche de celle des suspensions des grands fleuves mondiaux non pollués. Par rapport à cette composition on a observé en Seine en amont, pour l'année 1979, des facteurs d'enrichissement reportés sur la fig. 4, qui dépendent des conditions de débit de la Seine. Les gammes de valeurs sont les suivantes: 60-100 pour Ag et Cd, 10-40 pour Au, Hg, Sn; 7-15 pour Pb; 2-7 pour Cu, Sb, Y, Zn; 2 pour Cs, Cr, Ni et 1 à 2 pour Eu, La, Ta, Sr. Des valeurs comparables ou inférieures à la croûte terrestre ont été trouvées pour Ba, Co, Sc (0,7), Ti, Hf. Les teneurs de la crue sont nettement supérieures à celles de l'étiage pour Ag, Cd, Au, Hg, Pb, Sn, Cu, Sb, U. Quelques valeurs d'étiage dépassent celles de la crue: As, Th, Ta, Mn.





| ACTIVATION |        |         |          |         |         | P I X E |        |       |       |       |       |
|------------|--------|---------|----------|---------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Elément    | Teneur | A       | B        | C       | D       | Elément | Teneur | A     | B     | C     | D     |
| Ag         | ppm    | 14+1    | 24+2     | 7+1     | 4,6+0,8 | Ti      | ppm    | 3 095 | 2 132 | 3 574 | 2 121 |
| As         | ppm    | 9,5+0,4 | 9,6+0,5  | 11+3    | 8,6+0,4 | Mn      | ppm    | 635   | 342   | 590   | 523   |
| Au         | ppb    | 300+10  | 250+10   | 78+4    | 77+4    | Ni      | ppm    | 125   | 134   | 96    | 77    |
| Ba         | ppm    | 410+20  | 460+20   | 320+30  | 290+20  | Cu      | ppm    | 180   | 197   | 52    | 64    |
| Ca         | %      | 14+1    | 14+1     | 13+1    | 13+1    | Y       | ppm    | 96    | 99    | 55    | 65    |
| Ce         | ppm    | 74+3    | 82+5     | 65+2    | 66+2    | Nb      | ppm    | 63    | -     | -     | 29    |
| Co         | ppm    | 12,9+4  | 14+1     | 7,2+0,3 | 7,3+0,3 | Sn      | ppm    | 58    | 15    | 27    | 20    |
| Cr         | ppm    | 174+7   | 188+8    | 113+5   | 115+5   | I       | ppm    | -     | 49    | 28    | -     |
| Cs         | ppm    | 7,4+0,3 | 8,0+0,2  | 5,6+0,2 | 5,2+0,3 | Pb      | ppm    | 225   | 213   | 85    | 92    |
| Eu         | ppm    | 1,8+0,2 | 2,3+0,2  | 1,6+0,4 | 1,7+0,1 | S       | ppm    | 2 686 | 3 518 | 2 597 | 3 034 |
| Fe         | %      | 2,4+0,1 | 2,4+0,1  | 2,1+0,1 | 1,9+0,1 | P       | %      | 1,18  | 1,11  | 1,13  | 1,09  |
| Hf         | ppm    | 3,9+0,1 | 3,5+0,1  | 5,5+0,2 | 6,4+0,2 | Zr      | ppm    | 129   | 138   | 86    | -     |
| Hg         | ppm    | 3,4+0,2 | 3,5+0,2  | 0,9+0,1 | 0,9+0,1 |         |        |       |       |       |       |
| K          | %      | 0,7+0,1 | 0,9+0,1  | 0,8+0,1 | 0,8+0,1 |         |        |       |       |       |       |
| La         | ppm    | 53+3    | 57+3     | 35+2    | 41+1    |         |        |       |       |       |       |
| Nd         | ppm    | 61+4    | 68+6     | 42+6    | 50+5    |         |        |       |       |       |       |
| Rb         | ppm    | 80+6    | 84+8     | 60+5    | 64+5    | Rb      | ppm    | 71    | 73    | 53    | 58    |
| Sb         | ppm    | 4,8+0,1 | 4,5+0,3  | 2,0+0,1 | 1,4+0,2 |         |        |       |       |       |       |
| Sc         | ppm    | 7,4+0,2 | 7,9+0,3  | 6,0+0,2 | 6,1+0,2 |         |        |       |       |       |       |
| Sr         | ppm    | 340+30  | 370+40   | 400+35  | 340+30  | Sr      | ppm    | 371   | 352   | 317   | 392   |
| Ta         | ppb    | 640+70  | 945+270  | 820+110 | 860+90  |         |        |       |       |       |       |
| Tb         | ppm    | 1,5+0,1 | 1,6+0,1  | 1,2+0,1 | 1,2+0,1 |         |        |       |       |       |       |
| Th         | ppm    | 9,4+0,4 | 10,5+0,5 | 8,7+0,7 | 9,9+0,4 |         |        |       |       |       |       |
| V          | ppm    | 12+1    | 13,8+0,6 | 7,3+0,9 | 9+2     |         |        |       |       |       |       |
| Yb         | ppm    | 4,2+1   | 4,5+0,2  | 3,5+0,3 | 3,5+0,3 |         |        |       |       |       |       |
| Zn         | ppm    | 800+30  | 900+20   | 390+20  | 390+20  | Zn      | ppm    | 684   | 778   | 248   | 277   |
| Br         | ppm    | 24+1    | 21+1     | 40+1    | 41+2    | Br      | ppm    | 12    | 24    | 33    | 41    |
| W          | ppm    | 2,6+0,2 | 2,4+0,2  | 1,8+0,1 | 1,6+0,1 |         |        |       |       |       |       |
| Cd         | ppm    | 31+2    | 25+3     | 12+1    | -       | Cd      | ppm    | 27    | 24    | 8     | 8     |

TABLEAU n° 1 - Teneurs des éléments à l'état de traces dans les suspensions de Quillebeuf en 1979. A = Crue, Surface (S), Mortes eaux (ME), Basse mer (BM), B = Crue, Fond (F) ME BM C Etiage S.ME.BM.D Etiage S.ME.PM.

#### b) Normalisations par rapport au scandium :

Les normalisations par rapport au scandium attirent l'attention sur une reconcentration intéressante de lanthane dans les suspensions de la Seine qui apparaît aussi bien en crue qu'en étiage. Les valeurs observées (5.4 - 7.2) dépassent en effet largement celles qui ont été obtenues, d'une part dans ce travail au large de la baie de Seine (2,6) et dans les deux autres exutoires de la baie de Seine, la Vire (3,2), l'Orne (2,6), d'autre part dans les autres grands fleuves français et mondiaux étudiés par Thomas et Martin (1982). Ces derniers indiquent des résultats normalisés de 3,5 en Loire, 3,5-3,7 en Dordogne, 2,6-3,1 pour le Mackenzie; 3,4-3,6 pour l'Orénoque, 2,5-2,6 pour le Parana, 2,2-2,4 pour le Yangsté, 2-2,1 pour l'Indus. Pour la Seine en étiage 1978, Thomas et Martin indiquent des résultats normalisés de 5,1 à 6 proches des nôtres (4,7 à 5,8).

Le lanthane sera utilisé comme marqueur des apports fluviaux : il est mesuré avec une grande précision (2 à 6%), il est non réactif dans un estuaire Cauwet *et al.* (1980), Martin *et al.* (1978), de Groot *et al.* (1976).

#### 3. EVOLUTION 1978/1979 à 1983/1984.

En 1983, en décembre, dans des conditions hydrodynamiques correspondant à un étiage, on confirme l'existence du signal terres rares dans les apports fluviaux ( $La/Sc = 5.5$ ); en crue 1984 ce signal a pratiquement disparu ( $La/Sc = 3.5$ ). Parallèlement "l'enrichissement" observé en 1978-1979 pour Ag et Au en



crue s'est maintenu en crue 1984. On tirera profit de cette observation dans les études à venir. Pour le moment on se contentera d'illustrer l'importance du marquage des suspensions de la Seine par ces éléments en établissant une comparaison avec les autres grands fleuves français étudiés par Thomas, Martin (1982).

|                       |             | Au/Sc         | Ag/Sc       | La/Sc       |
|-----------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| SEINE<br>(Quillebeuf) | étiage 1978 | 0.008         | 0.75        | 4.7 - 5.8   |
|                       | étiage 1979 | 0.013         | 0.75 - 1.12 | 5 - 5.9     |
|                       | crue 1979   | 0.032 - 0.041 | 1.89 - 3.04 | 7.16 - 7.22 |
|                       | étiage 1983 | 0.083         | 0.96        | 5.5         |
|                       | crue 1984   | 0.033         | 1.80        | 3.47        |
| LOIRE                 | 04/79       | 0.003         | NM          | 3.5         |
| DORDOGNE              | 03/10/78    | 0.002         | NM          | 3.45 - 3.72 |
| GARONNE               | 03/10/78    | 0.002         | NM          | 2.97 - 3.21 |
| RHONE                 | 02/78       | 0.003         | NM          | 2.99        |

Tableau 2.- Au, Ag, La (valeurs normalisées) dans les suspensions des grands fleuves français; N.M. = non mesuré.

#### 4. LES PROCESSUS SEDIMENTAIRES.

##### 4.1. Pénétration des apports marins dans l'estuaire:

##### 4.1.1. En crue 1979 :

La diminution des valeurs  $La/Sc$  de Quillebeuf (7.2) (référence amont) à la bouée 28 en crue, lors des basses mers de vives-eaux et de mortes-eaux alors que la salinité reste nulle ( $La/Sc = 6.2$ ) ou voisine de zéro ( $S = 0.1\text{‰}$  -  $La/Sc = 5.7$ ), s'expliquerait par une remise en suspension d'apports marins. Le phénomène s'amplifie en pleine mer de mortes-eaux et de vives-eaux ( $La/Sc = 5.7$  pour  $S = 1.6\text{‰}$ ,  $5.2$  pour  $S = 2.1\text{‰}$ ). En aval (bouées 10 et RN) l'influence fluviatile a encore diminué ( $4 < La/Sc < 4.9$ ). Les données reportées dans le tableau 3 résument les observations faites en amont de l'estuaire.

|          | QUILLEBEUF |         |         | BOUEE 28 |         |         |
|----------|------------|---------|---------|----------|---------|---------|
|          | BM.S.ME    | BM.F.ME | BM.S.VE | BM.S.ME  | PM.S.ME | PM.S.VE |
| S (‰)    | 0          | 0       | 0.11    | < 0.1    | 1.6     | 2.1     |
| La (ppm) | 53         | 57      | 45      | 26       | 31      | 43      |
| Sc (ppm) | 7.4        | 7.9     | 7.9     | 4.2      | 6.0     | 8.2     |
| La/Sc    | 7.16       | 7.22    | 5.70    | 6.20     | 5.17    | 5.27    |
| m (mg)   | 26         | 34      | 107     | 131      | 35      | 58      |

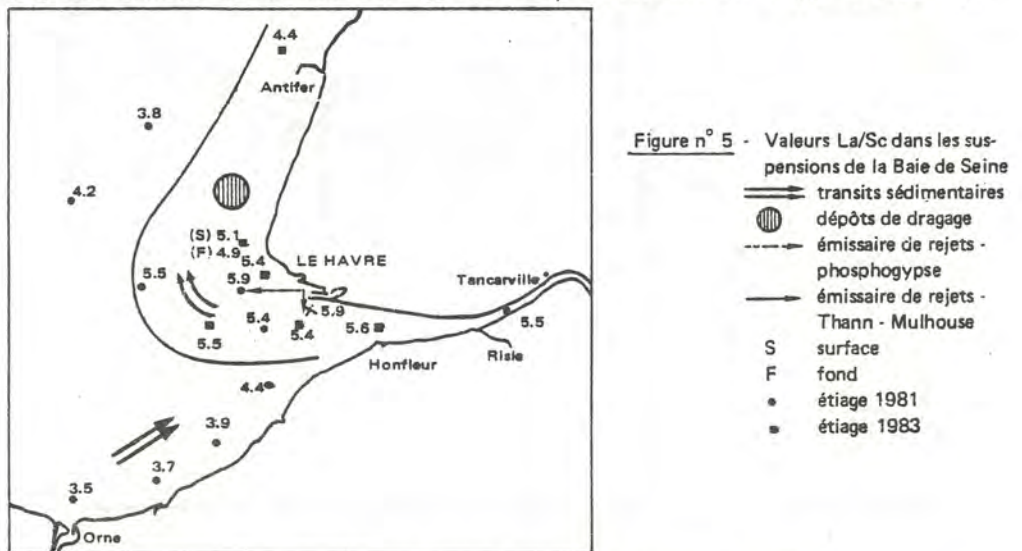
Tableau 3.- Evolution des teneurs en La (ppm) et Sc (ppm), des valeurs  $La/Sc$ , des teneurs en matières en suspensions dans l'estuaire en amont en période de crue (S= surface - F= fond, ME= mortes-eaux, VE= vives-eaux, BM= basse mer, PM= pleine mer).

##### 4.1.2. Etiages 1978-1983 :

En étiage il existerait dans l'estuaire une répartition constante entre les apports fluviatiles et marins, de la bouée 28 à la bouée 10, mais les valeurs  $La/Sc$  de 1983 (5.42 à 5.60) seraient supérieures à celles de 1978 (4.1 à 4.7).

#### 4.2. Dispersion des suspensions d'origine fluviatile dans la baie. Caractérisation des apports marins :

Les conditions d'étiage sont favorables à une recherche des éléments dans les apports marins dans la zone où les transits sédimentaires sont dirigés de la baie vers l'estuaire (Avoine, Crevel, 1985). Les données ( $La/S_c$ ) reportées sur la figure 5 résument les observations relatives à des suspensions de surface prélevées lors des étiages 1980-1981 à la sortie de l'estuaire et en Baie de Seine. On confirme avec le lanthane les directions opposées dans les transits sédimentaires affectant, d'une part le chenal sud ( $3.5 < La/S_c < 4.4$ ), d'autre part le chenal central et le chenal nord ( $5.4 < La/S_c < 5.9$  - influence fluviatile relayée par l'effet des rejets industriels de l'aval). La référence lanthane, pour les apports marins, serait comprise entre 3.5 et 3.7 mais il faudrait confirmer avec des sédiments de la baie, dans cette région où les transits sont dirigés vers l'estuaire. Selon cette même référence suspension ( $La/S_c = 3.5$ ) les teneurs de Au dans les apports marins seraient de 40 ppb ( $Au/S_c = 8$ ).



#### 4.3. Le lanthane dans les sédiments de l'estuaire et de la baie :

On a reporté sur la figure 6 les résultats  $La/S_c$  observés dans des sédiments de l'estuaire et de la baie de Seine prélevés entre mars et octobre 1978. Les valeurs  $La/S_c$  des suspensions de la crue 1978 n'ont pas été établies; en étiage 1978 elles étaient comprises entre 4.7 et 5.8.

Pour les échantillons 1 à 5, qui correspondent à la partie ouest de la baie, l'influence de la Seine n'est pas décelable: les résultats normalisés sont compris entre 2,6 et 3,1. Pour les échantillons de l'estuaire et de la partie est de la baie (références 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 15, 16) les résultats normalisés sont nettement supérieurs (3,9 à 7,5) aux précédents. Les valeurs les plus élevées correspondent aux échantillons de la baie 12 (7) et 16 (7,5) qui présentent en outre la particularité d'être enrichis en zirconium (610-940 ppm), en thorium, en tantale (2 ppm), en molybdène (10 ppm), en hafnium (15-24 ppm) alors que les valeurs en scandium (3-5,2 ppm) sont faibles. Les enrichissements signalés en métaux traces pourraient dans ce cas être dûs, non pas aux apports fluviaux de la Seine, mais à la présence du minéral lourd zircon auquel se trouvent généralement associés terres rares, thorium et hafnium (Nelson, 1979). L'origine de ce zircon serait soit naturelle soit industrielle.



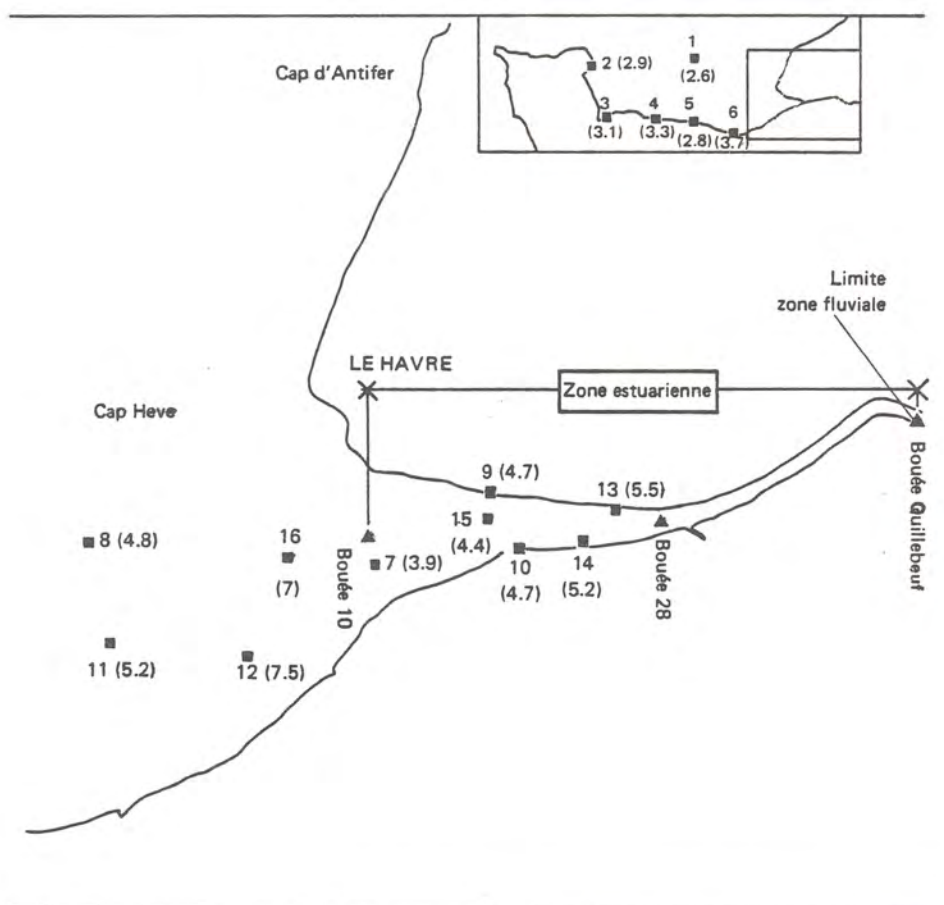


Figure N° 6 : Référence des sédiments de l'estuaire et de la baie de Seine, Rapport (La/sur essai).

Dans l'estuaire (échantillons 7, 15, 9, 10, 14, 13) on observe une décroissance des résultats normalisés en lanthane d'amont (5,5) en aval (3,9) qui illustre la prédominance croissante des apports marins.

## 5. COMPORTEMENT DES ELEMENTS DU FLEUVE A LA MER

### 5.1. Dans l'estuaire (Zn, Cu, Au, La, As, Sb, Co, Ag, V, W):

Pour suivre le comportement géochimique des éléments du fleuve à la mer, nous avons considéré les éléments analysés par activation neutronique (Zn, Cr, Au, La, As, Sb, Co, Ag, V, W) d'une part, la crue 1979 d'autre part. L'évolution des résultats normalisés par rapport au scandium, entre Quillebeuf et la bouée 28 est reportée sur la figure 7.

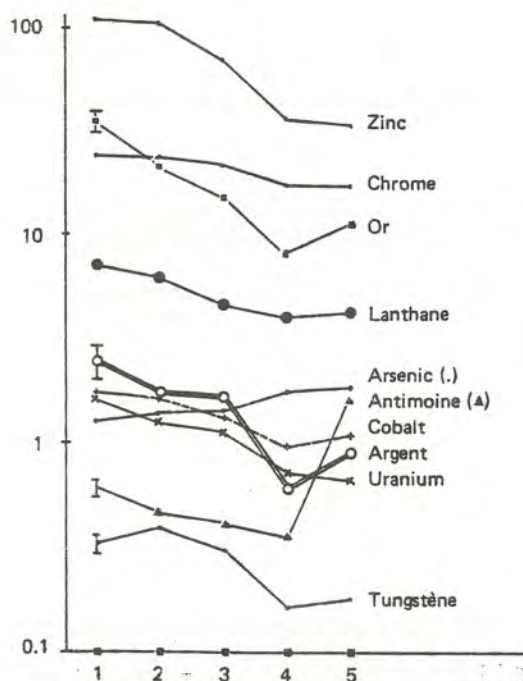


Figure n° 7. Evolution chimique des éléments du fleuve à la mer en crue 1979.

- 1) Quillebeuf ( $s=0$ )
- 2) bouée 28 ( $S < 0,1\%$ )
- 3) bouée 28  $s = 0,1$
- 4) bouée 28  $s = 1,6$
- 5) bouée 28  $s = 2,05$

Le comportement des éléments, As mis à part, dépend avant tout des processus sédimentaires révélés par le lanthane: dilution des apports fluviaux par des apports marins dont la composition élémentaire reste à établir. La diminution (2/3) des teneurs en zinc lorsque  $S$  passe de  $0\%$  à  $2,05\%$  ne correspondrait pas à une désorption au contact du milieu salin. Si cette dernière existe, elle est négligeable par rapport à l'influence des remises en suspensions. Les données relatives à l'évolution du zinc extractible (fig. 3) confirment cette hypothèse: à la bouée 34, alors que la salinité reste nulle, quelles que soient les conditions hydrodynamiques, les teneurs en zinc passent de 700-900 en basse mer de vives-eaux et mortes-eaux (surface et fond) à 380 ppm en pleine mer de vives-eaux (surface et fond).

## 5.2. Dans la Baie (Zn):

Les valeurs  $La/S_c$  de suspensions de la baie de Seine orientale prélevées en 1980 apparaissent sur la figure 5. On a reporté sur la figure 8 les valeurs  $Zn/F_e$  obtenues au cours de cette campagne. Les résultats ont été normalisés au fer :

- les relations fer/scandium sont bonnes dans l'estuaire et la baie de Seine ( $r^2 = 0,871 - n = 33$ );
- cette opération permet de passer en revue un plus grand nombre d'échantillons (analysés par absorption atomique).

L'existence de valeurs  $Zn/F_e$  ( $\times 10^3$ ) plus élevées au large (27-29) de l'estuaire qu'à la sortie (11-12) révèle la reconcentration d'éléments à l'état de traces au niveau de la matière organique vivante et inerte dont la présence a été discutée par Dupont *et al.* (1985). Les valeurs  $La/S_c$  de ce matériel (3.7-3.8) correspondent à celles des apports marins.



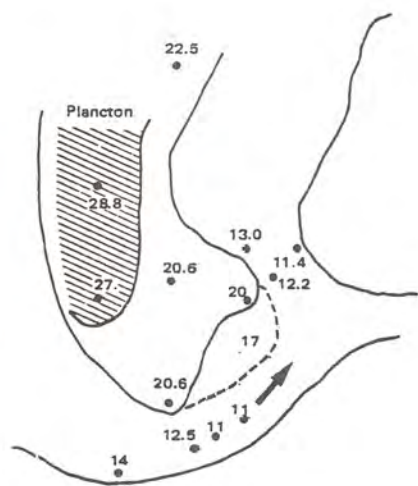


Figure n° 8.- Rapports  $Zn/Fe \times 10^3$  dans les suspensions de la baie de Seine

→ direction des transits sédimentaires.

## 6. DISCUSSION - CONCLUSION.

On dispose dans l'estuaire de la Seine de traceurs géochimiques intéressants pour étudier les processus sédimentaires et pour suivre la dispersion des suspensions de l'estuaire dans la baie. Les apports fluviaux sont marqués par quelques éléments: lanthane, or, argent, les apports marins par les radionucléides rejetés par l'usine de traitement de combustibles irradiés de la Hague installée dans le nord-ouest Cotentin. Les suspensions transitant dans un sens ou dans l'autre à la sortie de l'estuaire, sont marquées par le fer rejeté par l'usine de Thann et Mulhouse (Guéguéniat *et al.*, 1985).

L'exploitation des données relatives au lanthane indique :

- Une remise en suspension de matériaux en crue en amont de l'intrusion saline. Si on considère le spectre des éléments mesurés par activation neutronique, l'origine de ces matériaux serait marine. Cette observation est confirmée d'une part par les mesures de radioactivité artificielle, d'autre part par la mesure de fer associé aux enduits minéraux (Guéguéniat *et al.*, 1983).
- Une homogénéisation des valeurs  $La/S_c$  dans les MES sur l'ensemble de l'estuaire en étiage que l'on retrouve avec les teneurs, en zinc extractible, en zinc total (Boust 1981), en fer associé aux enduits minéraux;
- Une analogie entre les sédiments de Honfleur ( $La/S_c = 4.7$ ) du Havre ( $La/S_c = 4.7$ ), du bouchon vaseux de crue ( $La/S_c = 4.49$ ) des dépôts de dragage ( $La/S_c = 4.9$ ) d'Octeville;
- Un renforcement du signal lanthane pour la MES à la sortie de l'estuaire en raison des rejets industriels;
- Une différenciation très nette en étiage de la MES à la sortie de l'estuaire entre le chenal central et le chenal Nord ( $La/S_c = 5.4 - 5.9$ ) d'une part et le chenal Sud ( $La/S_c = 3.7 - 4.4$ ) d'autre part.

Le lanthane se révèle un traceur géochimique intéressant pour étudier les processus sédimentaires dans l'estuaire et la baie de Seine. Les données obtenues sont confirmées par les observations des sédimentologues, la distribution de 40 éléments à l'état de traces dans les suspensions et les sédiments, les résultats d'études particulières axés sur le fer et le zinc extractibles, l'utilisation des radionucléides artificiels (Guéguéniat *et al.*, 1985) comme marqueurs des apports marins en étiage. Cependant, alors que le

lanthane indique pour les sédiments de Honfleur, une influence fluviatile indéniable ( $La/Sc = 4.7$ ), les radionucléides montrent une influence marine à 100%. Les résultats de ce double marquage indiquent une expulsion des particules fluviales en mer suivie d'une réinjection partielle dans l'estuaire. En mesurant dans la matière organique les rapports entre isotopes du carbone ( $C^{13}-C^{12}$ ) Thomas, Martin (communication personnelle) aboutissent à un schéma analogue dans l'estuaire de la Seine. La technique utilisée exploite les différences qui existent dans la distribution isotopique du carbone dans la matière organique d'origine continentale ( $\delta^{13}C = -24 - 26$ ) et marine ( $\delta^{13}C = -15$ ). Ces apports terrigènes ont été également observés dans d'autres estuaires de la baie de Seine : l'Orne (Auffret *et al.*, 1985), la Vire (Dubrulle et Larsonneur, 1984).

On aurait pu espérer pousser plus loin l'interprétation des résultats  $La/Sc$  en quantifiant la part revenant aux apports fluviatiles (récents + anciens) dans les sédiments déposés et les matériaux remis en suspension dans l'estuaire. Cette démarche est pour le moment prématurée car en raison de la présence de scandium dans les enduits minéraux de fer, suite à une coprécipitation de ce dernier élément par  $Fe(OH)_3$  dans la colonne d'eau (Guéguénat *et al.*, 1985), il en résulterait une sous-estimation de l'importance des apports fluviatiles dans des proportions qui seront établies par la suite.

Sur le plan pollution métallique, les suspensions de la Seine en crue sont enrichies en de nombreux éléments : Au (250-300 ppb), Ag (15-25 ppm), Cd (25-30 ppm), Sb (4-5 ppm), U (12-15 ppm), Zn (800-1200 ppm), Hg (3-4 ppm) mais la dilution des apports fluviatiles par les apports marins vient diminuer très nettement les teneurs au niveau du bouchon vaseux. Cependant, dans la baie, la présence de matière organique vivante ou inerte, en reconcentrant des éléments comme le zinc, fait réapparaître et même renforce certains des indices de pollution observés en amont.

- 
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire Thèse Caen.
- Avoine J. (1985).- Evaluation des apports fluviatiles dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 9.
- Avoine J. & Crevel L. (1985).- Influence des apports fluviatiles en Baie de Seine. Ce volume, N° 10.
- Avoine J., Dubrulle L. & Larsonneur C. (1985).- La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la Seine - Conséquences sur l'environnement. Ce volume, N° 16.
- Avoine J., Crevel L., Dubrulle L., Boust D. & Guéguénat P. (1984).- Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. XVIIIe journées d'Hydraulique. Marseille 11-12-13 septembre 1984.
- Boust D. (1981).- Les métaux traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3ème cycle soutenue le 27/01/81 à l'Université de Caen. U.E.R. des Sciences de la terre et de l'aménagement régional.
- Cauwet G., Elbaz F., Jeandel C., Jouanneau J.M., Lapaquellerie Y., Martin J.M. & Thomas A. (1980).- Comportement géochimique des éléments stables et radioactifs dans l'estuaire de la Gironde en période de crue. Bulletin de l'Institut de Géologie du bassin d'aquitaine, n° 27.
- Crevel L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie Nord orientale de la baie de Seine. Thèse de 3ème cycle présentée le 12/12/83 à l'Université de Paris-Sud. Mention sédimentologie.
- De Groot A.J., Salomons W. & Allersma E. (1976).- Heavy metals in estuarine sediments. Processes affecting heavy metals in estuarine sediments. Estuarine Chemistry. Edited by Burton J.D., Liss P.S. Academic Press.



- Dupont J.P. & Lafite R. (1985).- Importance et rôle du matériel vivant et inerte dans les suspensions de la baie de Seine. Ce volume, N° 13.
- Guéguénat P., Gandon R., Hémon G. & Philippot J.C. (1976).- Méthode de mesure d'éléments traces dans l'eau de mer par activation neutronique. Cas particulier des isotopes stables de produits de fission. Measurement, detection and control of environmental pollutants. IAEA-SM. 206/28.
- Guéguénat P., Boust D., Gandon R., Hémon G., Philippot J.C., Sanchez J.P., Marin P. & Pierri J. (1985).- Etude du comportement géochimique du fer dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 29.
- Lagarde G., Cailleret J. & Heitz C. (1983).- Quantitative analysis of thick targets containing light elements ( $Z \leq 12$ ) by PIXE. Nuclear Instruments and Methods 205 (1983) 545-553.
- Martin J.M., Savaladori T. & Thomas A.J. (1978).- Le mercure et les oligoéléments dans le delta du Rhône. IVe journées Etudes pollutions (CIESM-Antalya) 197-202.
- Martin J.M. & Meybeck M. (1979).- Elemental Mass balance of material carried by major world Rivers. Marine Chemistry, 7, 1979, 173-206.
- Malo B.A. (1977).- Partial extraction of metals from aquatic sediments. Envir. Sc. Technol., 11, 277-282.
- Nelson (1979).- Minor elements in the sediments of the Thames estuary. Estuarine and coastal Marine Science, 9, 623-629.
- Philippot J.C. (1970).- Traitement automatique de résultats de spectrométrie de jonction. Nuclear Science, vol. NS 17, 3.
- Thomas A.J. & Martin J.M. (1982).- Chemical composition of River suspended sediments : Yangste, Mackenzie, Indus, Orinoco, Parana and Franch Rivers (Seine, Loire, Garonne, Dordogne, Rhône). Mitt. Geol. Palaont. Inst. Univ. Hambourg SCOPE/UNEP Sonderband Heft 52 - S 555-564.

POUVOIR COMPLEXANT DES EAUX DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

FISCHER J.C.\*, WARTEL M.\*\*, GUEGUENIAT P.\*\*\*, GANDON R.\*\*\*

1. - INTRODUCTION

Afin de contribuer à une meilleure connaissance des modes de transport et du devenir des métaux lourds au sortir d'un fleuve débouchant dans une mer soumise à un régime macrotidal, nous nous sommes intéressés dans ce travail à l'étude de la capacité complexante des eaux de l'estuaire de la Seine.

Le métal retenu a été le cuivre, en raison de sa faculté de former des complexes avec de nombreux ligands organiques présents dans les eaux naturelles. Ces complexes sont généralement plus stables que ceux formés par les autres métaux dont la teneur, dans le milieu naturel, est du même ordre de grandeur que celle du cuivre.

2. - PRINCIPE DE LA METHODE

La méthode de détermination de la capacité complexante apparente des eaux de l'estuaire de la Seine que nous avons utilisée, est dérivée de celles proposées dans la littérature (Hart, 1981 ; Chau, 1974 ; Van Den Berg, 1979).

En faisant l'hypothèse simplificatrice, de l'existence du seul équilibre :



( Les charges ont été omises pour plus de clarté) où Hu représente le complexant organique, Cu le cuivre "libre", Cu Hu le complexe 1-1 formé,

$$\frac{(\text{Cu})}{(\text{Cu})_T - (\text{Cu})} = \frac{(\text{Cu})}{(\text{Hu})_T} + \frac{1}{K' - \text{Hu}}_T \quad (\text{Plavsic, 1982})$$

\* Laboratoire de Chimie Analytique et Marine  
Université de Lille I - Bâtiment C8  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

\*\* Université de Lille I - Station Marine de Wimereux  
Bâtiment C8 - 59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

\*\*\* Laboratoire de Radioécologie Marine  
B.P. 270 - 50107 CHERBOURG



avec :

(Cu) : concentration du cuivre "libre"

(Cu)<sub>T</sub> : concentration totale en cuivre

(Hu)<sub>T</sub> : concentration totale en ligand organique

K' : constante apparente de stabilité du complexe Cu-Hu.

Ainsi, en suivant la concentration du cuivre "libre" (supposée directement accessible par la technique analytique utilisée : redissolution anodique en mode impulsif différentiel) lors d'ajouts connus de cuivre à différents échantillons provenant d'un même site de prélèvement, on peut atteindre la concentration totale en ligand organique ((Hu)<sub>T</sub>) et la constante apparente de stabilité (K') par l'étude mathématique des courbes obtenues en traçant :

$$\frac{(Cu)}{(Cu)_T - (Cu)} = f [(Cu)]$$

La concentration totale en ligand organique (Hu)<sub>T</sub>, est généralement retenue (Chau, 1974) comme estimation de la capacité complexante des eaux naturelles. Pour notre part, nous préférons utiliser un autre critère tenant compte de la concentration totale (Hu)<sub>T</sub> mais également de la constante apparente de stabilité K'. Nous proposons, comme grandeur caractérisant le "pouvoir complexant", le produit K' (Hu)<sub>T</sub>. On montre que K'(Hu)<sub>T</sub> ∼ (CuHu)/(Cu), la concentration totale en ligand organique étant généralement très grande par rapport à la concentration initiale en cuivre. Le produit K'(Hu)<sub>T</sub> nous renseigne donc dans la plupart des cas, sur la valeur du rapport : métal complexé/métal "libre".

### 3.- RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les prélèvements nécessaires à cette étude ont été effectués en septembre 1982 à 1m au-dessous de la surface. Les sites choisis ont été : 1 Cap de la Hève, 2 Honfleur, 3 Quillebeuf et 4 Saint Aubin (Fig. 1).

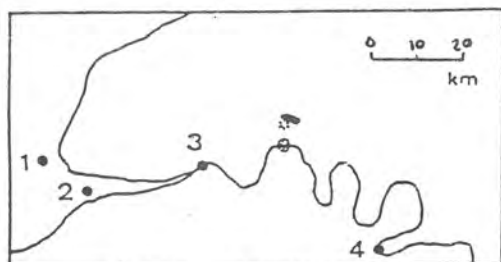


Figure 1 : Sites de prélèvement

\* : limite amont de l'intrusion saline.

Les échantillons ont été filtrés sur membrane Sartorius de porosité 0,45 μm. La conservation a été assurée par congélation. La détermination de la concentration totale initiale en cuivre a été effectuée par redissolution anodique en mode impulsif différentiel après acidification et irradiation ultraviolette (Gillain, 1980).

Nous avons reporté sur la figure 2, les courbes obtenues en portant la concentration de cuivre trouvée par analyse (redissolution anodique) en fonction de la concentration ajoutée de cuivre pour divers échantillons provenant des quatre sites de prélèvement. Toutes les courbes tendent vers une asymptote (droite dont la pente est égale à l'unité - droite en pointillés). Les points d'intersection des différentes asymptotes avec l'axe des abscisses sont les valeurs des concentrations totales de ligand organique (Hu)<sub>T</sub>. Ces dernières ainsi que les valeurs des différentes constantes apparentes de stabilité ont été calculées en étudiant les droites obtenues en traçant (Fig. 3) :

$$(Cu) / [(Cu)_T - (Cu)] = f [(Cu)]$$

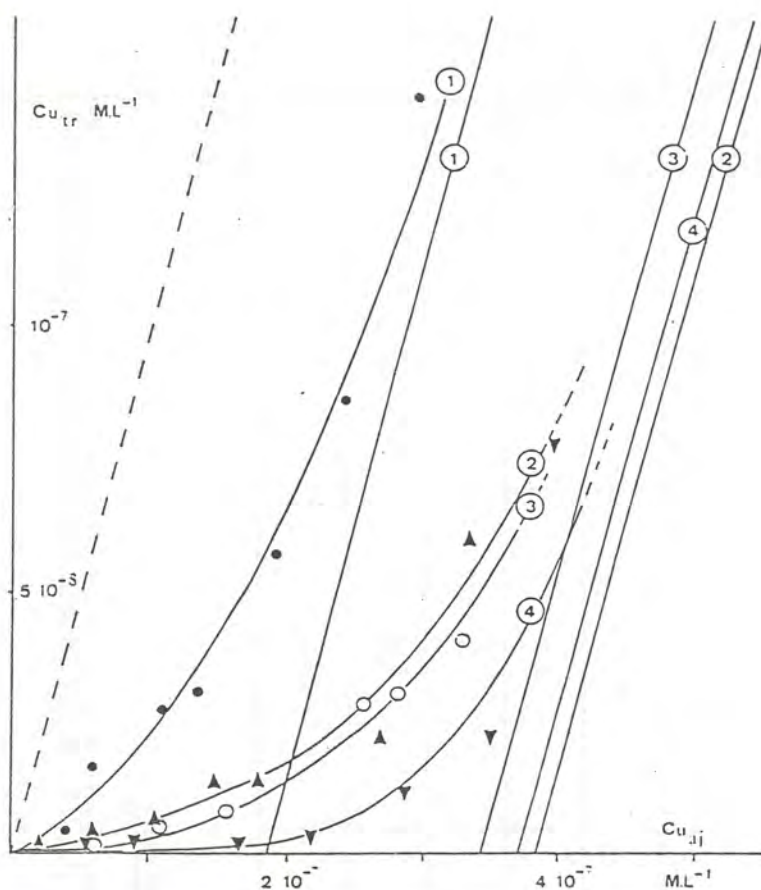


Figure 2.- Courbes obtenues en traçant : Cu trouvé en fonction de Cu ajouté. Les indices des courbes correspondent aux différents sites de prélèvement donnés dans le texte.

La valeur de la pente des droites permet de déterminer  $(Hu)_T$  et l'ordonnée à l'origine, le produit  $K' (Hu)_T$ . Les résultats obtenus sur la figure 2 semblent montrer que les eaux prélevées à Honfleur (site 2) sont, des eaux étudiées, les plus complexantes (concentration en ligand organique la plus élevée), ce qui est en désaccord avec des résultats antérieurs (Fischer *et al.*, 1984) concernant une ébauche de spéciation du cuivre. Cette constatation nous a conduit à tenir compte de la "nature" du complexant organique, en introduisant la constante apparente de stabilité du complexe, dans la définition du pouvoir complexant. Nous avons ainsi calculé le pouvoir complexant (produit  $K' (Hu)_T$  des eaux prélevées. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 1. Il faut noter que les valeurs des coefficients de corrélation (R) relatifs aux droites obtenues sur la figure 3 confortent l'hypothèse simplificatrice faite quant à la formation d'un complexe 1-1 du type Cu-Hu. Nous avons reporté également dans ce tableau, les valeurs concernant d'autres sites, calculées à partir de résultats relevés dans la bibliographie. Les concentrations de ligand et les constantes de stabilité relatives aux sites "Lac Huron" et "Onaping River" (Van Den Berg, 1979) ont été déterminées par une méthode basée sur l'adsorption



|                  | $(Hu)_T \cdot 10^7$ | $K' \cdot 10^{-7}$ | $K'(Hu)_T$ | R    |
|------------------|---------------------|--------------------|------------|------|
| Cap de la Hève   | $1,8 \pm 0,2$       | $5,5 \pm 0,2$      | 9,9        | 0,96 |
| Honfleur         | $3,8 \pm 0,4$       | $5,9 \pm 0,6$      | 22,4       | 0,95 |
| Quillebeuf       | $3,4 \pm 0,3$       | $12,7 \pm 2,7$     | 43,2       | 0,97 |
| Saint Aubin      | $3,7 \pm 0,2$       | $38 \pm 13$        | 140,6      | 0,80 |
| Manche Orientale | 1,6                 | 3,2                | 5,1        | 0,98 |
| Mer Adriatique   | 1,5                 | 6,4                | 9,6        | -    |
| Lac Huron        | 2,0                 | 160                | 320        | 0,70 |
| Onaping river    | 3,8                 | 40                 | 152        | 0,95 |

TABLEAU I

Concentration totale en matière organique, constante apparente de stabilité, pouvoir complexant (R = coefficient de corrélation) : comparaison des résultats obtenus dans la Seine, son estuaire et la Manche orientale avec trois autres sites à l'échelle mondiale.

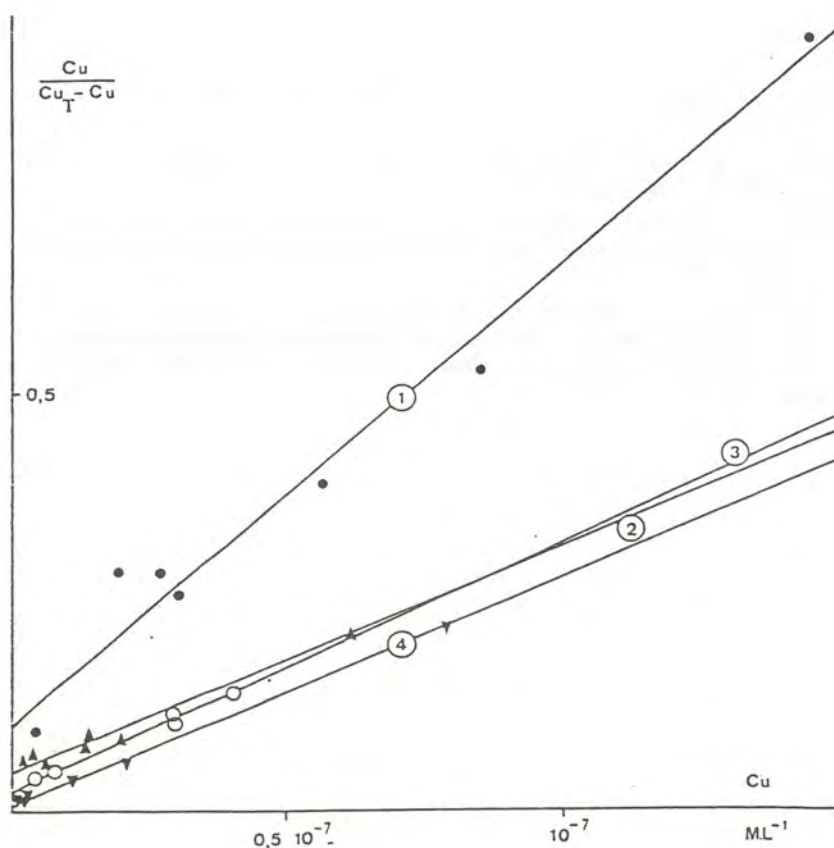


Figure 3.- Courbes obtenues en traçant :  
 $(Cu) / [(Cu)_T - (Cu)] = f[(Cu)]$  pour les différents sites étudiés.

des métaux par le dioxyde de manganèse. Les résultats relatifs au site "Mer Adriatique" sont ceux donnés par Plavsic, 1982. La méthode utilisée quant à la détermination de  $K'$  et  $(Hu)_T$  ne semble pas trop influencer sur les résultats, tout au moins en ce qui concerne les eaux de rivière: "Onaping River" et "Saint Aubin", les capacités complexantes obtenues sont comparables. Les premiers résultats obtenus pour différentes eaux de l'estuaire de la Seine (tableau I) montrent que l'évolution du pouvoir complexant dépend fortement de la salinité (Quillebeuf et Saint Aubin ‰ < 1, Honfleur ‰ = 4 et Cap de la Hève ‰ = 31).

Grâce aux techniques voltamétriques nous avons pu mesurer un pouvoir complexant de différentes eaux de l'estuaire de la Seine. Cette capacité complexante est une valeur moyenne puisque les composés organiques présentent différents sites de complexation qui peuvent avoir des propriétés variant avec la nature des groupements fonctionnels et des liaisons, et donc des constantes thermodynamiques différentes. Néanmoins, le pouvoir complexant moyen des eaux est une notion importante. Il peut en partie rendre compte de l'extraction ou de la remobilisation des métaux à partir des particules en suspension.



- Chau Y.K., Gachter R. & Lum-Shue-Chan K. (1974).- Determination of the Apparent Complexing Capacity of Lake Waters. J. Fish. Res. Board Can. 31 p. 1515-1519.
- Fischer J.C., Nganou R. & Wartel M. (1984).- Etude de la capacité complexante des eaux de l'estuaire et de la baie de Seine. Talanta 31 n° 12, p. 1057-1061.
- Gillain G. (1980).- Contribution au dosage des métaux dans les milieux marins. Thèse, Liège.
- Hart B.T. (1981).- Trace metal Complexing Capacity of natural Waters: a review. Environ. Technol. Lett. 2 p. 95-110.
- Plavsic M., Kaznaric D. & Branica M. (1982).- Determination of the Apparent Copper Complexing Capacity of Seawater by Anodic Stripping Voltammetry. Mar. Chem. 11 p. 17-31.
- Van Den Berg C.M.G. & Kramer J.R. (1979).- Determination of complexing Capacities of Ligands in natural Waters and Conditional Stability Constants of the Copper Complexes by means of Manganese dioxide. Anal. Chim. Acta. 106 p. 113-120.

EVOLUTION DE LA COMPLEXATION DES METAUX : Ca, Mg, Cd, Pb et Cu DANS  
L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

FISCHER J.C.\*; WARTEL M.\*

1. - INTRODUCTION

Dans les eaux naturelles, les métaux peuvent exister sous forme d'ions libres, de paires d'ions associées à des anions minéraux, de complexes organiques ou adsorbés sur des particules. La connaissance de leurs modes de transport, de la biodisponibilité... etc, implique une approche de la répartition métallique en les diverses formes solubles ou insolubles. Dans ce travail, nous avons abordé l'étude de la fraction dissoute.

Les interactions entre les ions métalliques et la fraction de matière organique dissoute ayant des propriétés chélatantes, jouent un grand rôle dans le cycle biogéochimique du métal dans le milieu aquatique. Dans ce qui suit, ce matériel organique, issu pour une part importante de la dégradation de la matière vivante, est symbolisé par Hu sans préjuger de sa nature. Une attention particulière est portée sur le comportement du cuivre, par l'étude de la capacité complexante des eaux de surface et proches du fond. L'analyse systématique des éléments majeurs des eaux naturelles a également permis de proposer une répartition des métaux: Ce, Mg, Cd et Pb. Exception faite des constantes de stabilité relatives aux complexes cuivre - matière organique, les constantes thermodynamiques nécessaires à cette étude ont été relevées dans la bibliographie récente.

Les prélèvements d'eau ont été effectués le 04 décembre 1983 lors de deux radiales aval-amont (points 1 à 7) et amont-aval (points 7' à 1') à haute et basse mer à bord du "Deo Gratias". Des échantillons d'eau de surface (S) et de fond (F) ont été prélevés dans les différents sites dont la localisation est donnée sur la figure 1.

2. - RESULTATS ET DISCUSSION

Les concentrations des métaux Cd, Pb, Cu, Ca, Mg, K ainsi que celles des anions  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Cl}^-$  ont été déterminées dans les différents échantillons préalablement filtrés sur membrane de positivité 0,45  $\mu\text{m}$ . Les métaux Cd, Pb et Cu ont été analysés par redissolution anodique en mode impulsif différentiel en milieu acide après irradiation ultraviolette (Gillain, 1980). Les métaux Ca, Mg et K ont été dosés par absorption atomique. La concentration totale des complexants organiques forts a été obtenue grâce au comportement particulier du cuivre lors de l'étude systématique du pouvoir

\* Laboratoire de Chimie Analytique et Marine - Université de Lille I,  
Station Marine de Wimereux - Bât. C8 - 59655 Villeneuve d'Ascq Cédex.



|    | (Hu)×10 <sup>7</sup> mole/l | K×10 <sup>7</sup> | $\frac{(Cu \cdot Hu)}{(Cu)}$ | R <sup>2</sup> | S‰    |        |
|----|-----------------------------|-------------------|------------------------------|----------------|-------|--------|
| 1  | surface                     | 2,86 ± 0,29       | 3,9 ± 1,1                    | 11,11          | 0,93  | 28, 04 |
|    | fond                        | 1,87 ± 0,34       | 3,2 ± 0,9                    | 5,91           | 0,84  | 29,6   |
| 1' | surface                     | 2,32 ± 0,21       | 6,2 ± 0,9                    | 14,36          | 0,96  | 26,76  |
|    | fond                        | 3,08 ± 0,44       | 3,5 ± 1,1                    | 10,8           | 0,89  | 27,21  |
| 3  | surface                     | 6,70 ± 0,99       | 2,8 ± 0,8                    | 18,69          | 0,90  | 24,05  |
|    | fond                        | 4,42 ± 0,31       | 3,4 ± 0,8                    | 14,97          | 0,98  | 28,17  |
| 3' | surface                     | 6,08 ± 0,60       | 6,8 ± 2,0                    | 41,7           | 0,97  | 9,46   |
|    | fond.                       | 7,66 ± 1,31       | 2,1 ± 0,6                    | 15,91          | 0,90  | 9,03   |
| 5  | surface                     | 4,84 ± 0,59       | 4,5 ± 1,6                    | 21,76          | 0,94  | 21,9   |
|    | fond                        | 5,42 ± 0,05       | 3,6 ± 0,8                    | 19,23          | 0,98  | 23,87  |
| 5' | surface                     | ----              | ----                         | ----           | ----  | ----   |
|    | fond                        | 8,32 ± 0,40       | 3,1 ± 0,6                    | 26,1           | 0,99  | 6,4    |
| 7  | surface                     | 10,5 ± 0,82       | 3,6 ± 0,9                    | 38,44          | 0,98  | 3,4    |
|    | fond                        | ----              | ----                         | ----           | ----  | ----   |
| 7' | surface                     | 7,0 ± 1,1         | 14,4 ± 1,9                   | 101,01         | 0,999 | 0,64   |
|    | fond                        | ----              | ----                         | ----           | ----  | ----   |

Tableau 1

Concentration totale en matière organique, constante apparente de stabilité, pouvoir complexant relatifs aux différents points de prélèvement dans l'estuaire de la Seine. (R<sup>2</sup> = coefficient de régression, S ‰ = salinité).



Figure 1.- Sites de prélèvements. Les points 1 à 7 correspondent à la radiale aval-amont. Les mêmes points sont désignés 1', 7' pour la radiale amont-aval.

(S) Points de surface.  
(F) Points de fond.

complexant des eaux prélevées.

## 2.1 - Détermination de la concentration de la matière organique et des constantes apparentes de stabilité des complexes Cu-Hu.

Les teneurs en matière organique, ainsi que les valeurs des constantes apparentes de stabilité des complexes Cu-Hu (Hu symbolise la matière organique dissoute) ont été déterminées grâce à la forte stabilité des complexes Cu-Hu. En effet, en suivant par redissolution anodique, la concentration du cuivre "libre" lors de différents ajouts de ce métal à des échantillons provenant d'un même site de prélèvement, il est possible, par l'étude de la fonction:

$$\frac{(Cu)}{(Cu)_T - (Cu)} = f(Cu)$$
 de déterminer les concentrations totales en ligand organique  $(Hu)_T$  et les constantes de stabilité apparentes  $K'$ , des complexes Cu-Hu (pour plus de détails : voir article précédent). Le tableau 1 regroupe les résultats obtenus. Les coefficients de régression et les salinités figurent également dans ce tableau. Les valeurs des constantes apparentes de stabilité ( $K'$ ) sont généralement voisines, exception faite de celles obtenues pour les points 1'S, 3'S et 7'S correspondant tous à une même radiale. Ce résultat pourrait indiquer une nature différente des composés organiques complexant le cuivre, composés se dégradant au contact des eaux de plus forte salinité, mais une étude en cours montre que ce phénomène est dû essentiellement aux ions  $Mg^{++}$  et  $Ca^{++}$  (ces ions donnent également des complexes stables avec Hu) dont les concentrations augmentent avec la salinité. Il est nécessaire, comme nous le verrons plus loin, de tenir compte de l'influence de la concentration de tels ions sur la valeur de la constante de stabilité apparente  $K'$ . Les teneurs en matière organique  $(Hu)_T$ , obtenues au cours de cette campagne sont comparables aux moyennes mondiales (Plavsic, 1982; Van Den Berg, 1984; Hart, 1981). Sur ce tableau figurent aussi les valeurs du rapport  $(Cu-Hu)/(Cu)$  que l'on peut assimiler au pouvoir complexant:  $K' (Hu)_T$  (voir article précédent). La figure 2 représente l'évolution du pouvoir complexant des eaux étudiées en fonction de la salinité. La diminution observée serait essentiellement due à la dilution de la matière organique par les eaux d'origine marine.



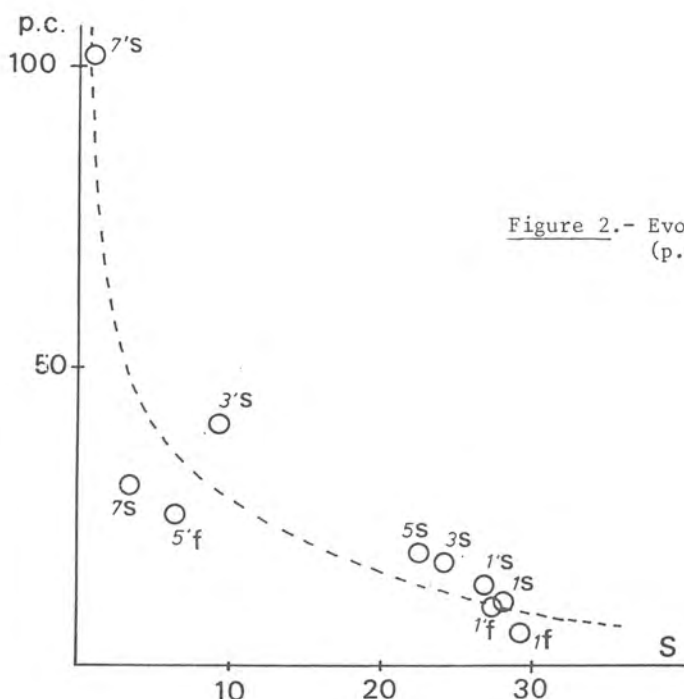


Figure 2.- Evolution du pouvoir complexant (p.c.) en fonction de la salinité.

## 2.2 - Choix et calcul des constantes thermodynamiques.

Les constantes thermodynamiques relatives aux complexes formés par les ligands minéraux et organiques suivants :  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$  et Hu ont été pour la plupart relevées dans la bibliographie récente (Mantoura, 1978; Van Den Berg, 1984; Whitfield, 1980). Les constantes relatives aux complexes Cu-Hu ont été calculées. Dans tous les cas, il a été tenu compte de l'effet de la force ionique par l'utilisation de la formule de Davies (Davies, 1962) préconisée par de nombreux auteurs (Mantoura, 1978; Whitfield, 1980; Zirino, 1972; Westall, 1976, etc...) :

$$\log g(x) = 0,5108 \frac{Z_x^2}{x} \left( 0,3 - \mu^{1/2} / (1 + \mu^{1/2}) \right)$$

avec :

$g(x)$  : coefficient d'activité relatif à l'espèce  $x$

$Z_x$  : charge de l'ion  $x$

$\mu$  : force ionique

Nous avons montré (Fischer, 1984) que la technique de détermination de constantes utilisée, permet d'atteindre les constantes de stabilité conditionnelle, c'est-à-dire que la constante de stabilité doit s'écrire :

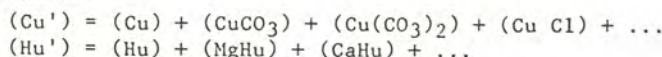
$$K' = \frac{(\text{Cu Hu})}{(\text{Cu}')(\text{Hu}')} \quad (\text{charges omises pour plus de clarté})$$

avec

$(\text{Cu}')$  : concentration totale du cuivre non complexé par la matière organique

$(\text{Hu}')$  : concentration totale de la matière organique non complexée par le cuivre

c'est-à-dire :



En posant :

$$\alpha_{\text{Cu}} = \frac{(\text{Cu}')}{(\text{Cu})} \quad \text{et} \quad \alpha_{\text{Hu}} = \frac{(\text{Hu}')}{(\text{Hu})} \quad (\text{Ringbom, 1967})$$

Il vient :

$$K' = \frac{(\text{Cu} - \text{Hu})}{(\text{Cu})(\text{Hu})} \frac{1}{\alpha_{\text{Cu}} \alpha_{\text{Hu}}}$$

d'où la valeur de la constante thermodynamique de stabilité :

$$\beta = \alpha_{\text{Cu}} \cdot \alpha_{\text{Hu}} \cdot K'$$

Ce sont ces valeurs de  $\beta$  ainsi obtenues qui ont été utilisées dans le programme de calcul permettant d'établir la répartition des métaux étudiés.

### 2.3- Spéciation des métaux

La détermination de la concentration totale des espèces :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cd}^{++}$ ,  $\text{Cu}^{++}$ ,  $\text{Pb}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$  et Hu a permis, à partir de la connaissance des constantes thermodynamiques de stabilité et de la force ionique de la solution, d'atteindre la répartition des métaux selon leurs différentes formes solubles. Le programme informatique mis au point au laboratoire est inspiré des travaux de Westall *et al.* (Westall, 1976). Le tableau 2 regroupe les résultats obtenus.

| S‰                                | < 1  | 3,4  | 6,4  | 9,0  | 21,9 | 24,0 | 28,0 | 29,6 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ca                                | 92,4 | 88,7 | 88,5 | 85,7 | 82,5 | 83,7 | 83,7 | 82,2 |
| CaSO <sub>4</sub>                 | 1,9  | 4,8  | 6,7  | 9,9  | 14,2 | 14,7 | 14,3 | 15,6 |
| CaHCO <sub>3</sub>                | 5,1  | 5,3  | 4,2  | 3,6  | 2,6  | 1,2  | 1,5  | 1,7  |
| CaCO <sub>3</sub>                 | -    | 1,4  | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Mg                                | 94,8 | 91,2 | 91   | 87,9 | 84,9 | 85,7 | 85,8 | 84,5 |
| MgSO <sub>4</sub>                 | 1,7  | 4,3  | 6,0  | 8,8  | 12,7 | 13,2 | 12,8 | 14,0 |
| MgHCO <sub>3</sub>                | 2,4  | 2,6  | 2,0  | 1,7  | 1,3  | -    | -    | -    |
| MgCO <sub>3</sub>                 | 1,4  | 2,3  | 1,6  | 1,6  | 1,1  | -    | -    | -    |
| Cd                                | 60,7 | 29,6 | 19,6 | 15,7 | 4,1  | 3,7  | 3,3  | 2,6  |
| CdCl                              | 16,7 | 47,3 | 56,4 | 57,0 | 45,1 | 43,6 | 41,9 | 38,5 |
| CdCl <sub>2</sub>                 | -    | 6,9  | 14,8 | 18,9 | 44,9 | 46,9 | 48,7 | 51,7 |
| CdCl <sub>3</sub>                 | -    | -    | -    | -    | 3,9  | 4,4  | 4,9  | 6,0  |
| CdSO <sub>4</sub>                 | 1,2  | 1,6  | 1,4  | 1,8  | -    | -    | -    | -    |
| CdHCO <sub>3</sub>                | 11,5 | 6,2  | 3,3  | 2,3  | -    | -    | -    | -    |
| CdCO <sub>3</sub>                 | 8,6  | 7,4  | 3,5  | 2,9  | -    | -    | -    | -    |
| CdOH                              | 1,3  | 1,0  | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Pb                                | 1,2  | -    | -    | -    | 1,1  | 2,0  | 1,6  | 1,4  |
| PbHu                              | 3,0  | 1,4  | 1,0  | -    | -    | -    | -    | -    |
| PbCl                              | -    | -    | -    | -    | 3,0  | 5,9  | 5,3  | 5,2  |
| PbCl <sub>2</sub>                 | -    | -    | -    | -    | 2,7  | 5,8  | 5,6  | 6,4  |
| PbCl <sub>3</sub>                 | -    | -    | -    | -    | -    | 1,6  | 1,7  | 2,3  |
| PbCO <sub>3</sub>                 | 87,0 | 82,8 | 84,7 | 83,7 | 76,1 | 70,0 | 70,5 | 68,1 |
| Pb(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 7,8  | 13,0 | 9,4  | 9,8  | 6,4  | 3,0  | 3,6  | 4,0  |
| PbOH                              | -    | -    | -    | -    | -    | 2,2  | 1,7  | 1,5  |
| PbClCO <sub>3</sub>               | -    | 1,3  | 2,4  | 3,0  | 8,3  | 8,3  | 9,0  | 10,0 |
| CuHu                              | 99,6 | 97,9 | 96,3 | 95,2 | 95,4 | 95,0 | 91,8 | 84,0 |
| CuCO <sub>3</sub>                 | -    | 1,9  | 3,1  | 4,0  | 4,3  | -    | 7,7  | 13,3 |
| Hu                                | 11,6 | 6,4  | 4,3  | 2,6  | 1,5  | 1,1  | 1,0  | 1,2  |
| CaHu                              | 62,4 | 42,9 | 34,7 | 27,6 | 22,1 | 19,7 | 19,6 | 2,3  |
| MgHu                              | 22,5 | 46,3 | 54,8 | 65,2 | 72,3 | 76,0 | 71,5 | 88,2 |
| CuHu                              | 3,5  | 4,3  | 6,2  | 4,7  | 4,2  | 3,3  | 8,0  | 8,3  |

Tableau 2

Répartition (pourcentage) des métaux dans la phase soluble en fonction de la salinité, dans l'estuaire de la Seine. Les teneurs inférieures à 1% n'ont pas été prises en compte.



Sur ce tableau figurent les pourcentages des différents complexes envisagés, en fonction de la salinité. Nous n'avons pas reporté les complexes dont les teneurs sont inférieures à 1%. L'évolution de la répartition des différents métaux est comparable à celle prévue par Mantoura et coll. (Mantoura, 1978) lors d'une étude théorique du comportement des métaux dans un estuaire, exception faite du cuivre. Pour ce dernier métal, nos conclusions sont à rapprocher de celles de Van Den Berg (1984) qui trouve dans la mer d'Irlande que 94 à 98% du cuivre dissous est complexé par la matière organique. De plus, les valeurs relatives au pouvoir complexant ( $K'(Hu)_T$ ) permettent de retrouver le pourcentage du cuivre engagé dans les complexes Cu-Hu. En effet :

$$\frac{(Cu - Hu)_T}{(Cu)_T} = \frac{K' (Hu)_T}{1 + K' (Hu)_T}$$

L'accord avec les valeurs (% Cu - Hu) figurant dans le tableau 2 est remarquable. La technique de redissolution anodique utilisée directement sur l'eau au pH naturel permettrait donc d'atteindre ( $Cu'$ ) et non (Cu) dans les conditions expérimentales (potentiel de dépôt -800 mV par rapport à l'électrode au calomel).

Davies C.W. (1962).- Ion Association - Butterworth.

Fischer J.C., Leman G. & Gandon R. (1984).- Complexation du cuivre par la matière organique dans l'estuaire de la Seine. J. Rech. océanogr. 9 n° 2, p. 63-65.

Gillain G. (1980).- Contribution au dosage des métaux dans les milieux marins. Thèse. Liège.

Hart B.T. & Davies S.H.R. (1981).- Trace Metal Speciation in the Freshwater and Estuarine Regions of the Yarra River, Victoria. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 12, p. 353-374.

Mantoura R.F.C., Dickson A. & Rilet J.P. (1978).- The complexation of metals with Humic Materials in Natural Waters. Estuarine and Coastal Marine Science 6 p. 387-408.

Plavsic M., Kaznaric D. & Branica M. (1982).- Determination of the Apparent Copper Complexing Capacity of Seawater by Anodic Stripping Voltammetry. Mar. Chem. 11 p. 17-31.

Ringbom A. (1967).- Les complexes en Chimie Analytique, Dunod, 370 p.

Van Den Berg C.M.G. (1984).- Organic and Inorganic Speciation of Copper in the Irish Sea. Mar. Chem. 14 p. 201-212.

Westall J.C., Zachary J.L. & Morel F.M.M. (1976).- MINEQL, a computer program for the calculation of chemical equilibrium composition of aqueous systems. Technical note n° 18. School of engineering Massachusetts Institute of Technology - Cambridge, Massachusetts 02139.

Whitfield M. & Turner D.R. (1980).- Lead in the Marine Environment, M. Branica and Z. Konrad (Eds.) Pergamon Press PP. 109-148.

Zirino A. & Yamamoto S. (1972).- A pH dependent model for the chemical speciation of copper, zinc, cadmium and lead in sea water. Limnology and Oceanography 17 pp. 661-671.

ETUDE DE LA DISTRIBUTION DES FORMES SOLUBLES MINÉRALES ET ORGANIQUES DU FER,  
DU ZINC ET DU CUIVRE DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

GANDON R.\*, GUEGUENIAT P.\*, FISCHER J.C.\*\*\*, WARTEL M.\*\*

Les auteurs qui se sont intéressés au comportement des éléments solubles en milieu aqueux ont le plus souvent utilisé des classifications empiriques qui traduisent la complexité de l'approche du problème.

En dehors des formes ioniques simples, Beatley, Florence (1976) ne distinguent pas moins de sept catégories de complexes organiques de stabilités croissantes caractérisés par leur réponse vis-à-vis de trois traitements élémentaires (échanges d'ions sur résine complexante, irradiation ultraviolette, redissolution anodique) (d'après Courtot-Coupez, 1979-1980). Figuera, Mc Dufflie (1980) utilisent les vocables de composés (inorganiques ou organiques) très labiles, modérément labiles, légèrement labiles et inertes (d'après Leppard, 1983). Fukai *et al.* 1975 différencient les formes minérales (cationiques ou associées à des composés inorganiques labiles) des formes complexées par la matière organique oxydable en milieu persulfate. Fischer, Wartel (1985) emploient la technique de redissolution anodique en mode impulsif différentiel pour déterminer dans les eaux de l'estuaire de la Seine :

- les métaux "libres" ou engagés dans des complexes très peu stables;
- les métaux liés à des complexes susceptibles d'être déplacés en milieu acide à pH 2;
- les associations complexes "stables" oxydés en milieu acide par irradiation ultraviolette.

Dans ce travail, une distinction est établie entre les formes minérales solubles de Fe, Zn et Cu coprécipitables avec le bioxyde de manganèse à pH supérieur à 7 (Gadde, Laitinen 1974, Guéguénat *et al.* 1975 et 1976, James, Mc Naughton 1977, Murray 1975 et Van Den Berg, 1984) et les complexes organiques dégradables (O.D.) non adsorbables dans ces conditions.

## 1. PROCESSUS EXPERIMENTAUX

### 1.1. Conditions générales de l'étude :

L'étude réalisée les 4,5 et 6 décembre 1983 dans l'estuaire de la Seine et ses abords correspond à une situation d'étiage du fleuve et à des

---

\* C.E.A.-I.P.S.N.-DERS/SERE - Laboratoire de Radioécologie Marine  
B.P. 270 - 50107 CHERBOURG.

\*\* Laboratoire de Chimie Analytique et Marine - Université de Lille 1,  
Station Marine de Wimereux - 59655 VILLENEUVE D'ASQ CEDEX.



marées de vives-eaux. Les heures de pleine mer (P.M.) et de basse mer (B.M.) sont évaluées par rapport au port du Havre. Les points de prélèvements sont répartis selon deux radiales (Fig. 1). L'une, orientée W.E., détermine le comportement des éléments à l'intérieur de l'estuaire. L'autre, orientée N.S., permet d'apprécier le mécanisme de diffusion du flux de la Seine dans les eaux de la Manche orientale.

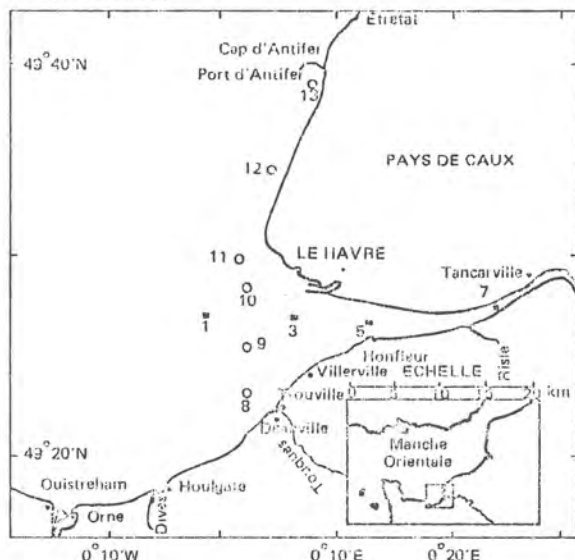


Figure N° 1 : Carte des points de prélèvements

#### 1.2. Echantillonnage et filtration :

L'eau est prélevée au dessous de la surface par un système d'aspiration dans une enceinte maintenue en dépression. Des échantillons de 5 litres sont filtrés à pression constante de 2 bars sur membranes Millipore type HA (0,45  $\mu$ m).

#### 1.3. Mesures des paramètres salinité, pH, turbidité et matière organique dissoute :

La conductivité et le pH des eaux prélevées sont déterminés sur l'eau brute non filtrée à la température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2$  à l'aide d'un conductivimètre TACUSSEL CD 75 et d'un pH mètre TACUSSEL ISIS 20 000. La salinité est calculée en se référant aux tables UNESCO (1981). La turbidité des échantillons est obtenue après filtration, séchage à  $50^{\circ}\text{C}$  et pesée des matières en suspensions. La matière organique dissoute (M.O.D.) est déterminée par la méthode de redissolution anodique en mode impulsif différentiel en ajoutant des quantités croissantes de cuivre "libre" dans différentes aliquotes de l'échantillon à analyser (Fischer, Wartel, 1985). Elle représente l'ensemble des molécules organiques susceptibles de former des complexes avec le cuivre (Fisher *et al.*, 1984).

#### 1.4. Détermination de Fe, Zn et Cu solubles sous formes minérales et à l'état de complexes organiques dégradables.

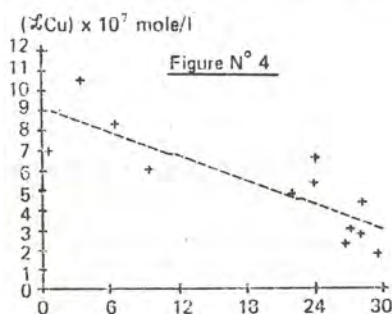
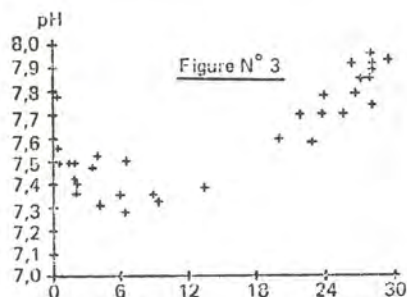
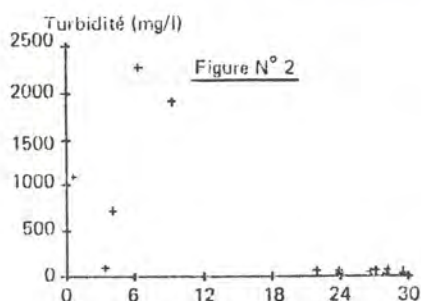
Dans une première étape, les échantillons de 5 litres d'eau filtrée sont traités directement sur le lieu de prélèvement par le bioxyde de manganèse formé par réduction de l'ion permanganate par l'eau oxygénée (Guégu-

niat *et al.*, 1976). Après 24 heures de contact entre la solution et l'adsorbant, la phase précipitée est séparée du surnageant. Dans ces conditions, les complexes organiques des métaux ne sont pas détruits et restent en solution (étude non publiée). On opère alors une nouvelle coprécipitation par  $MnO_2$ , le précipité formé étant maintenu en contact avec la phase liquide pendant 3 mois. On observe alors qu'une fraction des éléments solubles à l'état de traces se fixent sur le bioxyde; nous avons donné à ces composés la qualification de formes organiques dégradables (O.D.). Bien que cette définition s'appuie sur un constat expérimental empirique, l'existence réelle des composés organiques dégradables est véritablement démontrée; leur stabilité, en présence de  $MnO_2$ , est supérieure à 24 heures et inférieure à 3 mois.

La détermination des formes minérales et organiques dégradables de Fe, Zn et Cu est obtenue par la méthode d'absorption atomique en mode air-acétylène après solubilisation des précipités de bioxyde de manganèse en milieu réducteur acide.

## 2. EVOLUTIONS COMPARATIVES DE LA TURBIDITE, du pH, DE LA TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE DISSOUE ET DE LA SALINITE DU MILIEU.

Les figures 2, 3 et 4 expriment respectivement la turbidité (en mg/l), le pH et la teneur en matière organique dissoute ( $\Sigma Cu$ ) en fonction des conditions de salinité.



Evolution de la turbidité (fig. 2) du pH (fig. 3) et de la teneur en matière organique dissoute (fig. 4) en fonction de la salinité du milieu.

La turbidité maximale correspond à des eaux de salinité 6 à 10‰ (fig. 2). Elle met en évidence le phénomène de bouchon vaseux décrit par Avoine (1981) et Boust (1981). La relation pH/salinité (fig. 3) montre que les pH les plus faibles marquent les eaux de la partie moyenne de l'estuaire (5‰ < S < 12‰). Cette évolution différencie nettement la Seine de la rivière Tamar étudiée par Morris *et al.*, 1982, en Manche occidentale, puisque le mélange eau douce-eau de mer se traduit alors par un gradient de pH toujours positif.

La relation exprimant les teneurs en matière organique dissoute en fonction



de la salinité est de la forme  $y = -0,2x + 9,118$  et pour les 12 mesures considérées, le coefficient de corrélation est  $r^2 = 0,701$ .

### 3. EVOLUTION DES FORMES SOLUBLES DE Fe, Zn ET Cu DANS LES EAUX DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

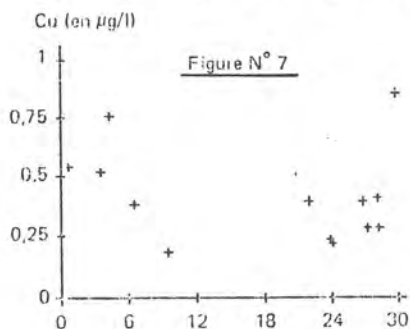
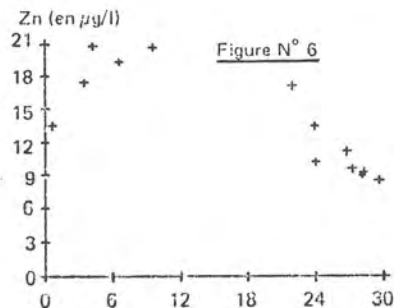
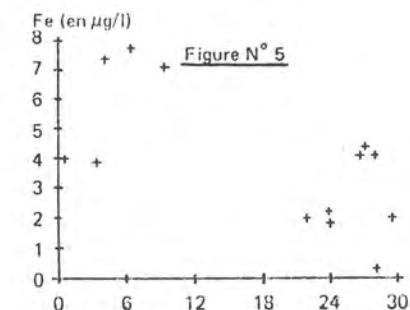
Les observations menées depuis 1980 montrent que les composés organiques du cuivre sont beaucoup plus stables que ceux du fer et du zinc. La fraction organique non dégradables du cuivre représente en moyenne 50% des formes solubles totales.

On se limitera dans ce travail à considérer uniquement les formes minérales (M.) et les formes organiques dégradables (O.D.).

#### 3.1. Evolution par rapport à la salinité :

##### 3.1.1. Les formes minérales (M.):

Les teneurs maximales en fer minéral (7 à 8  $\mu\text{g/l}$  - fig. 5) en zinc minéral (18 à 21  $\mu\text{g/l}$  - fig. 6) sont mesurées dans les eaux de salinité moyenne ( $5\text{‰} < S < 12\text{‰}$ ) où la turbidité est maximale (fig. 2). L'évolution du cuivre minéral (fig. 7) est indépendante de celles du fer et du zinc (sous formes minérales), les concentrations les plus élevées (0,7 à 0,8  $\mu\text{g/l}$ ) sont déterminées dans les eaux douces de la zone située en amont de l'estuaire et dans les eaux marines.

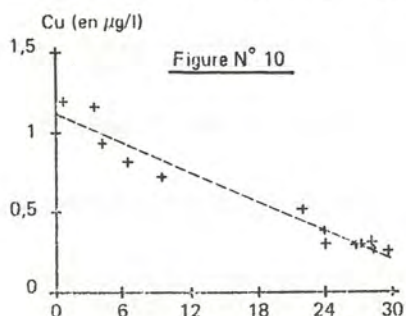
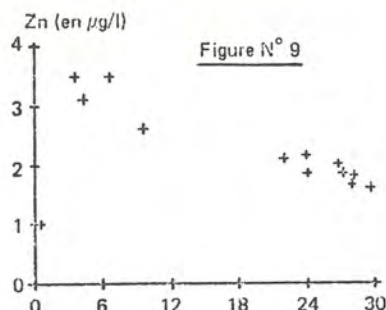
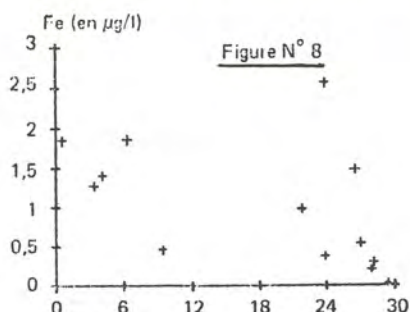


Evolution des formes minérales du fer (fig. 5) du zinc (fig. 6) et du cuivre (fig. 7) en fonction de la salinité.

##### 3.1.2. Les formes organiques dégradables (O.D.):

Les variations des teneurs en fer organique dégradable (1,8 à 0,1  $\mu\text{g/l}$ ) ne sont pas liées aux conditions de salinité (fig. 8). Les comportements des complexes dégradables du zinc (3,3 à 1  $\mu\text{g/l}$  - fig. 9) et surtout du cuivre (1,20 à 0,3  $\mu\text{g/l}$  - fig. 10) sont nettement conservatifs au cours du mélange eau douce - eau de mer. Le coefficient de corrélation, relatif à la droite exprimée sur la figure 10, est de 0,948; on peut donc considérer que

les formes organiques dégradables du cuivre soluble dans les eaux de la Seine subissent une simple dilution, à partir de l'amont du fleuve, sous l'effet du flux de marée entrant dans l'estuaire.



Evolution des formes organiques dégradables du fer (fig. 8), du zinc (fig. 9) et du cuivre (fig. 10) en fonction de la salinité.

Il est à noter que ces complexes dégradables sont également représentatifs de la matière organique soluble complexante dans le système estuarien de la Seine. A titre d'exemple, la relation entre la teneur en ligands organiques  $\text{Cu}$  et le cuivre organique dégradable est exprimée figure 11; pour 12 déterminations, le coefficient de corrélation  $r^2$  est de 0,652

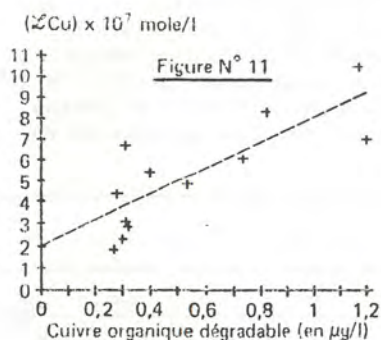


Figure 11

Evolution de la teneur en matière organique dissoute en fonction de la concentration en cuivre organique dégradable.

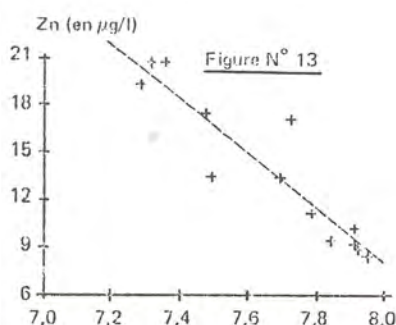
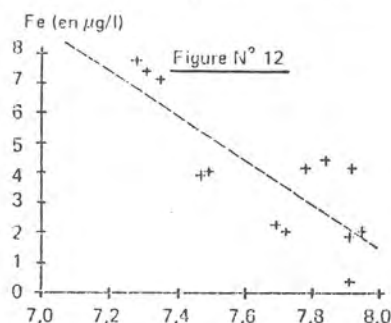
### 3.2.2. Evolution par rapport au pH :

Les comportements des formes minérales du fer (fig. 12) et du zinc (fig. 13) sont liés aux conditions de pH par une relation linéaire. Les



valeurs des coefficients de corrélation  $r^2$  sont respectivement de 0,654 pour le fer et de 0,861 pour le zinc. Aux pH les plus faibles correspondent les concentrations les plus élevées.

Les évolutions du cuivre minéral et de l'ensemble des complexes organiques dégradables sont indépendantes des conditions de pH.



Evolution des formes minérales du fer (figure 12) et du zinc (figure 13) en fonction du pH du milieu.

#### 4. DISTRIBUTION DU FER, DU ZINC ET DU CUIVRE SOLUBLES SOUS FORMES MINÉRALES ET COMPLEXES, A L'EXTÉRIEUR DE L'ESTUAIRE.

Les teneurs en formes minérales solubles varient, en fonction de la situation géographique des points de prélèvement (cf. fig. 1), entre 2,1 et 5,4  $\mu\text{g/l}$  pour Fe, 5,8 et 10  $\mu\text{g/l}$  pour Zn, 0,1 et 0,6  $\mu\text{g/l}$  pour Cu (tableau 1); les teneurs maximales étant généralement déterminées dans la zone sud de l'estuaire. Pour les formes organiques dégradables solubles, la fluctuation des valeurs en fer (0,3 à 1,7  $\mu\text{g/l}$ ), en zinc (1,1 à 2  $\mu\text{g/l}$ ) et en cuivre (0,1 à 0,3  $\mu\text{g/l}$ ) sont données tableau 2, les teneurs les plus élevées étant systématiquement mesurées dans les eaux du secteur Nord longeant le Pays de Caux.

Ce comportement peut s'interpréter en fonction de l'affinité des formes minérales pour les particules sédimentaires véhiculées dans l'estuaire et du caractère conservatif des composés organiques dégradables. Les masses provenant du fleuve, marquées par les composés organiques non échangeables avec les particules en suspension, se dispersent en même temps qu'elles se diluent avec les eaux marines le long des côtes du Pays de Caux. A l'inverse, les formes minérales d'origine marine sont piégées par les suspensions de la Seine.

|    | Points de prélèvements | 8   | 9     | 10  | 11   | 12  | 13  |
|----|------------------------|-----|-------|-----|------|-----|-----|
| Fe | PM                     | 3,8 | 2,4   | 3,4 | 5,4  | 2,2 | 2,4 |
|    | BM                     | 4,5 | 2,4   | 3,7 | 2,1  | 3,1 | 5,0 |
| Zn | PM                     | 9,3 | 8,9   | 5,8 | 10,0 | 6,9 | 7,3 |
|    | BM                     | 9,9 | 9,3   | 9,3 | 7,0  | 6,4 | 7,8 |
| Cu | PM                     | 0,2 | 0,2   | 0,3 | 0,6  | 0,1 | 0,3 |
|    | BM                     | 0,3 | ≤ 0,1 | 0,3 | 0,2  | 0,3 | 0,3 |

TABLEAU 1 — Teneurs en formes solubles minérales du fer, du zinc et du cuivre à l'extérieur de l'estuaire de la Seine à la pleine mer (PM) et à la basse mer (BM) du Havre.

|    | Points de prélèvements | 8     | 9     | 10    | 11    | 12  | 13  |
|----|------------------------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| Fe | PM                     | ≤ 0,3 | 0,3   | 0,3   | ≤ 0,3 | 1,4 | 1,7 |
|    | BM                     | 0,9   | 0,3   | ≤ 0,3 | 1,2   | 1,1 | 0,9 |
| Zn | PM                     | 1,1   | 1,4   | 1,1   | 1,3   | 2,0 | 1,8 |
|    | BM                     | 1,2   | 1,4   | 1,3   | 1,4   | 1,7 | 1,9 |
| Cu | PM                     | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | 0,2 | 0,2 |
|    | BM                     | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | 0,2   | 0,2 | 0,3 |

TABLEAU 2 — Teneurs en formes solubles organiques dégradables du fer, du zinc et du cuivre à l'extérieur de l'estuaire de la Seine à la pleine mer (PM) et à la basse mer (BM) du Havre.

##### 5. CONCLUSIONS GENERALES.

Une des caractéristiques fondamentales du système estuarien de la Seine concerne la remise en suspension du matériel sédimentaire liée à ses conditions hydrodynamiques propres. Ce phénomène de "bouchon vaseux", observé dans un grand nombre d'estuaires macrotidaux, particulièrement sur la façade Atlantique, est considéré comme essentiel dans le transport des métaux traces (Boust, 1981).

L'estuaire de la Seine est également soumis à l'influence des activités anthropiques qui se manifestent par une perturbation du gradient de pH par rapport à la salinité habituellement observée dans les estuaires non industrialisés.

Les comportements du fer et du zinc, sous formes solubles minérales, ont été étudiés par de nombreux auteurs en milieux estuariens (Boyle, Edmond, 1977; Coonley *et al.*, 1976; Holliday, Liss, 1976; Wilke, Dayal, 1982). Le fer tend à précipiter au contact des eaux salines. Le fleuve Zaïre est représentatif de ce comportement: à la salinité 6‰, la fraction soluble représente seulement 46% du fer mesuré en amont. On observe qu'à la même salinité la teneur en fer soluble de la Seine est deux fois plus importante qu'en situation amont. Le zinc minéral soluble a généralement un comportement conservatif dans les estuaires étudiés. Ce mécanisme est encore perturbé dans la Seine, particulièrement dans la partie moyenne de l'estuaire où la concentration mesurée est très supérieure à celle que l'on détecte en amont et en aval.

De tels comportements propres à l'estuaire de la Seine peuvent s'interpréter par une influence directe des apports industriels comme l'ont suggéré Brewer, Yeats (1978) sur le Saint-Laurent ainsi que Klinkammer, Bender (1981) en baie d'Hudson. Ils peuvent également être imputables à la présence du "bouchon vaseux" qui constitue un stock d'éléments adsorbés à la surface des particules, disponible pour d'éventuels échanges avec la phase soluble. Ce processus a été évoqué par Hem (1972) et Elderfield *et al.* (1979) dans le cas du zinc associé aux suspensions sous forme de carbonates. Dans cette hypothèse, les faibles pH des eaux de salinité moyenne pourraient jouer un rôle déterminant.

En ce qui concerne la matière organique soluble et les éléments qui lui sont associés, le modèle Seine a un comportement conservatif analogue à celui de la baie de la Delaware (New-Jersey) étudié par Eastman, Church (1983) ainsi que Fox (1983). Les évolutions des teneurs en composés organiques d'origine



fluviatile du Zn (fig. 9 et tableau 2) et du Cu (fig. 10 et tableau 2) confirment l'hypothèse hydrogéologique formulée par Crevel (1983) d'un flux de diffusion des eaux de la Seine le long des côtes du Pays de Caux, du sud vers le nord.

- 
- AVOINE J. (1981).- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3e cycle, Université de Caen.
- BOUST D. (1981).- Les métaux traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3e cycle, Université de Caen.
- BOYLE E.A. & EDMOND J.M. (1977).- The mechanism of iron removal in estuaries. Geochim. Cosmochim. Acta, 41, 1313-1324.
- BREWERS J.M. & YEATS P.A. (1978).- Trace metals in the waters of partially mixed Estuary. Estuar. Coast. Mar. Sci., 7, 147-162.
- CAUWET G., ELBAZ F., JEANDEL C., JOUANNEAU J.M., LAPAUQUERIE Y., MARTIN J.M. & THOMAS A. (1980).- Comportement géochimique des éléments stables et radioactifs dans l'estuaire de la Gironde en période de crue. Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, n° 27, 5-33.
- COONLEY L.S., BAKER E.B. & HOLLAND H.D. (1971).- Iron in the Mullica River and in Great Bay, New-Jersey. Chem. Geol., 7, 51-63.
- COURTOT-COUCPEZ J. (1979-1980).- Les métaux traces dans l'eau de mer, méthodes de dosage et formes chimiques. Oceanis, 5 (hors série), 455-567.
- CREVEL L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie Nord orientale de la baie de Seine. Thèse de 3e cycle, Université Orsay.
- DIANE L.G., MAGNUSSON B., WESTERLUND S. & ZHANG K. (1983).- Trace metals in the Göta River estuary. Est. Coast. Shelf Sci., 17, 73-85.
- EASTMON K.W. & CHURCH T.M. (1984).- Behaviour of Iron, Manganese, Phosphate and Humic acid during mixing in Delaware Salt Marsh Creek. Est. Coast. Shelf Sci., 18, 447-458.
- ELDERFIELD H., HEPWORTH A., EDWARDS P.N. & HOLLIDAY L.M. (1979).- Zinc in the Conway River and estuary. Est. Coast. Mar. Sci., 9, 403-422.
- FIGUERA G., MARTIN J.M. & MEYBECK M. (1978).- Iron behaviour in Zaïre estuary. Neth. J. Sea Res., 12, 329-337.
- FISCHER J.C., LEMAN G. & GANDON R. (1984).- Complexation du cuivre par la matière organique dans l'estuaire de la Seine. J. Rech. Oceanogr., 9, 2, 63-65.
- FISCHER J.C. & WARTEL M. (1985).- Evolution de la complexation des métaux : Cd, Mg, Cd, Pb et Cu dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 27.
- FOX L.E. (1983).- The removal of dissolved humic acid during estuarine mixing. Est. Coast. Shelf Sci., 16, 431-440.
- FUKAI R., MURRAY C.N. & HUYNH-NGOC L. (1975).- Variation of soluble zinc in the Var River and its estuary. Est. Coast. Mar. Sci., 3, 177-188.
- GADDE P.R. & LAITTINEN H.A. (1974).- Studies of heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese dioxides. Anal. Chem., 46, 13, 2022-2026.

- GUEGUENIAT P., GANDON R. & LUCAS Y. (1975).- Determination of radionuclides of Ce, Co, Fe, Ru, Zn and Zr in seawater by preconcentration on colloidal manganese dioxide. Technical Report Series n° 169, IAEA-Vienne, 137-145.
- GUEGUENIAT P., GANDON R., HEMON G. & PHILIPPOT J.Cl. (1976).- Méthodes de mesures d'éléments à l'état de traces dans l'eau de mer par activation neutronique et absorption atomique. IAEA, SM 206/28, 369-382.
- HEM J.D. (1972).- Chemistry and occurrence of cadmium and zinc in surface and ground water. Wat. Resour. Res., 8, 661-679.
- JAMES R.O. & Mac NAUGHTON M.G. (1977).- The adsorption of aqueous heavy metals on inorganic minerals. Geochim. Cosmochim. Acta, 41, 1549-1555.
- HOLLIDAY L.M. & LISS P.S. (1976).- The behaviour of dissolved Iron, Manganese and Zinc in the Beaulieu estuary. Est. Coast. Mar. Sci., 4, 349-353.
- KLINKHAMMER G.P. & BENDER M.L. (1981).- Trace metal distributions in the Hudson River estuary. Est. Coast. Shelf Sci., 12, 629-643.
- LEPPARD G.C. (1983).- Trace elements speciation in surface waters and its Ecological Implications. Plenum Press, New-York and London, 28-29.
- MORRIS A.W., BALE A.J. & HOWLAND R.J. (1982).- Chemical variability in the Tamar Estuary, South-West England. Est. Coast. Shelf Sci., 14, 649-661.
- MURRAY J.W. (1975).- The interaction of Cobalt with hydrous manganese dioxide. Geochim. Cosmochim. Acta, 39, 635-647.
- VAN DEN BERG C.M. (1984).- Organic and inorganic speciation of Copper in the Irish Sea. Mar. Chem. 14, 201-212.
- WILKE R.J. & DAYAL R. (1982).- The behavior of Iron, Manganese and Silicon in the Peconic River Estuary, New-York. Est. Coast. Shelf Sci., 15, 577-586.





ETUDE DU COMPORTEMENT GEOCHIMIQUE DU FER DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

GUEGUENIAT P.\*, BOUST D.\*, GANDON R.\*, HEAON G.\*\*\*, PHILIPPOT J.C.\*\*,  
SANCHEZ J.P.\*\*\*, MARIN P.\*\*\*\*, PIERI J.\*\*\*\*\*.

Les études axées sur le comportement chimique du fer en milieu estuarien sont aussi nombreuses que variées dans les objectifs à atteindre. Parmi ces derniers on peut évoquer les interactions avec la matière organique, formation de colloïdes, sorptions et désorptions sur les suspensions, phénomènes d'oxydo-réduction notamment dans les eaux interstitielles, coprécipitation d'éléments à l'état de traces,... Dans l'estuaire de la Seine, le cas du fer prend un relief supplémentaire vu l'importance des rejets industriels (en sulfate ferreux) en aval (fig. 1) qui ont atteint 160 tonnes/jour jusqu'en 1978, 60 tonnes/jour à partir de 1979. Ces rejets viennent s'ajouter aux 100 tonnes de fer quotidiennement apportées par la Seine (Boust, 1981).

Ce travail a pour objectif d'étudier le comportement géochimique du fer en mesurant le fer total, le fer associé aux enduits minéraux, les rapports FeII/FeIII. Les résultats en fer total seront exploités par normalisation par rapport à l'aluminium et au scandium. Ces deux derniers éléments sont de bons indicateurs de la présence de matériaux argileux, qui constituent la phase à laquelle sont associés de nombreux métaux. Les normalisations par rapport à Al ou Sc utilisées en géochimie (teneur de l'élément en ppm/teneur de Al ou Sc en ppm) offrent un grand intérêt, car elles permettent de fournir des résultats indépendants de la granulométrie. Le scandium peut être mesuré avec une très grande précision (moins de 5% d'erreur sur le résultat) par activation neutronique; c'est la raison pour laquelle les spécialistes de cette technique ont utilisé, pour les métaux qu'ils ont analysés, les normalisations par rapport au scandium Spencer *et al.* (1972), Martin *et al.* (1978), Nelson (1979), Cauwet *et al.* (1980), Thomas et Martin (1982), Guéguénat *et al.* (1985).

1. TECHNIQUES ANALYTIQUES

On a mesuré le fer associé aux enduits minéraux par des techniques d'extraction, le fer total et l'aluminium par absorption atomique, le fer total et le scandium par activation neutronique, les rapports Fe II/Fe III par effet Mössbauer. Les analyses par activation neutronique ont été effectuées au

\* C.E.A.- I.P.S.N.- DERS/SERE - Laboratoire de Radioécologie Marine - B.P. 270 - 50107 CHERBOURG.

\*\* C.E.A. - I.P.S.N.- DERS/SERE - Laboratoire de Métrologie de l'Environnement et d'Intervention, Bois des Rames, Bâtiment 501 - 91400 ORSAY.

\*\*\* Laboratoire de Chimie Nucléaire, 23 rue du Loess - B.P. 20 - 67037 STRASBOURG CEDEX.

\*\*\*\* Département de Géologie - Université de Caen - Esplanade de la Paix - 14032 CAEN CEDEX.

\*\*\*\*\* Université de Nantes - 44072 NANTES CEDEX.



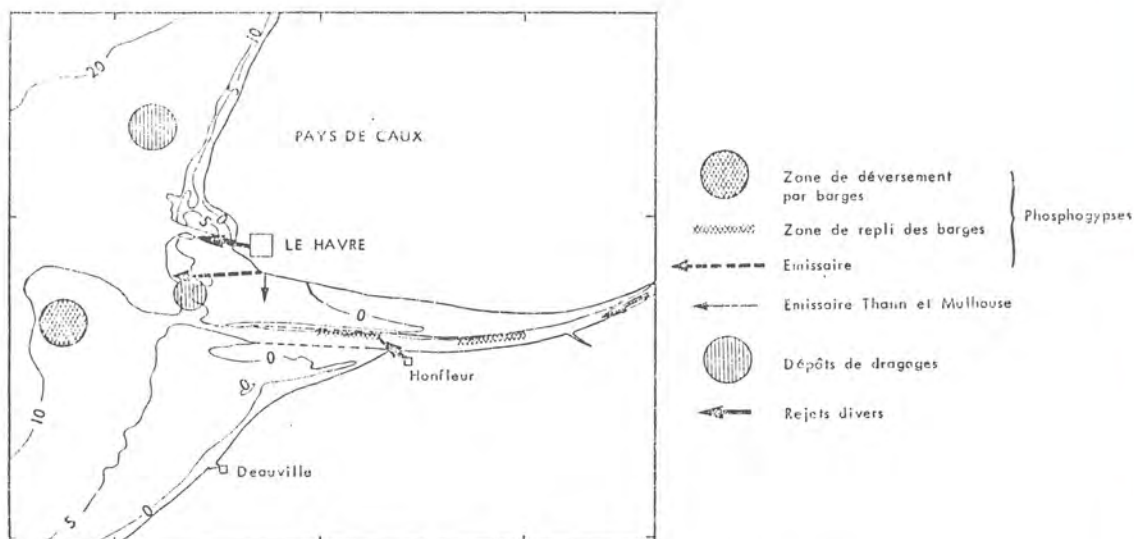


Figure 1.- Nature et localisation des rejets affectant l'estuaire et la baie de Seine orientale.

laboratoire de radiométrie d'Orsay (C.E.A.), les analyses par effet Mössbauer au laboratoire de chimie nucléaire de l'Université de Strasbourg (C.N.R.S.).

L'efficacité des extractants à l'égard des enduits minéraux de fer ayant partiellement cristallisé se classerait comme suit : 1 N HCl = oxalate > acide acétique + hydroxylamine > acide acétique > hydroxylamine (Luoma, 1981).

Dans ce travail une autre méthode (A) HCl 0.3 N 95°C (MALO, 1977) a été employée en 1979; à partir de 1983 nous avons comparé les résultats de cette technique A à ceux des techniques préconisées par LUOMA, acide oxalique - oxalate d'ammonium à pH 3.5 (B), 1 N HCl (C). On se basera sur A pour suivre l'évolution du fer extractible car il n'est plus possible de reprendre maintenant les échantillons de 1979 par B et C en raison d'une baisse de 1/3 dans les rendements d'extraction du fer par A entre 1979 et 1985. Cette influence du vieillissement du fer a déjà été signalée par LUOMA (1981).

Les coefficients de corrélation entre les trois techniques d'extraction sont les suivants :

$$C/A \ r^2 = 0.81 \quad Y \ (C) = -191 + 0.845 \ X \ (A) \text{ résultats en ppm}$$

$$C/B \ r^2 = 0.86 \quad Y \ (C) = 1018 + 0.900 \ X \ (B) \quad " \quad "$$

$$B/A \ r^2 = 0.74 \quad Y \ (B) = -340 + 0.828 \ X \ (A) \quad " \quad "$$

La méthode de référence (A) se trouve relativement bien corrélée avec les deux autres mais donne des rendements plus élevés en raison d'une meilleure extraction du fer d'origine industrielle ayant plus ou moins cristallisé et d'une légère attaque de la maille cristalline.

## 2. LES SUSPENSIONS DE L'ESTUAIRE

### 2.1. Le fer associé aux enduits minéraux :

En crue 1979 l'évolution des teneurs en fer associé aux enduits minéraux des suspensions, en fonction de la salinité, est représentée sur la figure 2 par une courbe en cloche avec une valeur maximale de 20 000 ppm dans une gam-

me de salinité allant de 1‰ à 6‰ et une charge en suspension pouvant atteindre 7 g/l. De part et d'autre de cette valeur maximale on a observé 9000 à 10 000 ppm dans les apports fluviaux, 10 000-14 000 ppm pour les salinités supérieures à 10‰.

En étiage 1979 les teneurs en fer associé aux enduits minéraux sont de 12 000 à 14 000 dans les apports fluviaux, de 20 000 ppm dès l'apparition des premiers signes de l'intrusion saline; elles se maintiennent ensuite (fig. 3) à un niveau de 17 000-20 000 ppm sur l'ensemble de l'estuaire ( $0.25 < S < 30‰$ )

L'enrichissement en fer extractible observé, en crue et en étiage, à la limite et parfois en amont de l'intrusion saline (crue de vives-eaux, au fond lors de la pleine mer) s'expliquerait par une remontée de sédiments vers l'amont. Ce phénomène prendrait toute son ampleur en étiage, lorsque l'influence des marées est maximum en raison de la nette prédominance du flot sur le jusant dans la partie aval et moyenne de l'estuaire (Avoine *et al.* (1985).

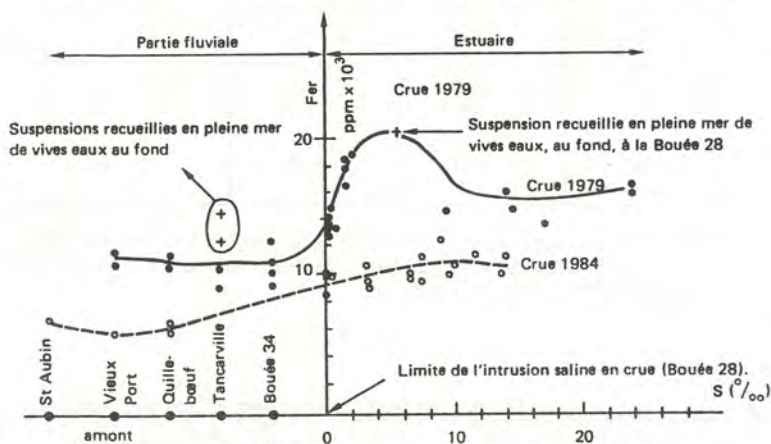


Figure N° 2 : Distribution du fer associé aux enduits minéraux dans les suspensions de crue. Comparaison entre les stations 1979 (●) ; (+) = fond, pleine mer, de vives eaux et 1984 (○).

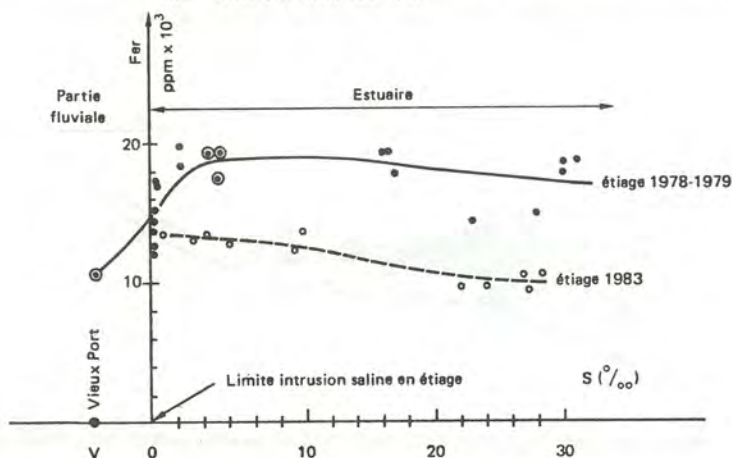


Figure N° 3 : Distribution du fer associé aux enduits minéraux dans les suspensions d'étiage. Comparaison entre les situations 1978 ● ; 1979 (●) et 1983 (○)

En décembre 1983 (étiage) et novembre 1984 (crue), les teneurs en fer associé aux enduits minéraux ont nettement diminué par rapport à 1978-1979 : 5 000 ppm de moins en étiage, 5 000-10 000 ppm de moins en crue. Cette évolution reflète celle des rejets industriels de sulfate ferreux (160 tonnes/pur jusqu'en 1978,



60 tonnes/jour à partir de 1979) avec un effet de décalage dû aux remises en suspensions en 1979 de matériaux soumis aux rejets industriels de 1978.

## 2.2. Fer total:

Dans les suspensions de l'estuaire de la Seine on observe, entre 1979 et 1983-1984, une évolution des teneurs en fer total qui est similaire à celle qui a été observée pour le fer associé aux enduits minéraux : 5000ppm de moins en fer total pour la crue de 1984, 8500 ppm en moins pour l'étiage de 1983 (tableau 1).

|        | Fer total (ppm)  |                  |                     | Fer extractible     |
|--------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|
|        | 1978-1979<br>(1) | 1983-1984<br>(2) | Différence<br>1 - 2 | Différence<br>1 - 2 |
| Crue   | 38 500<br>(n= 5) | 33 000<br>(n= 6) | 5 000               | Difficile à évaluer |
| Etiage | 35 000           | 26 500           | 8 500               | 5 000               |

Tableau 1.- Comparaison entre les évolutions du fer total et du fer associé aux enduits minéraux dans les suspensions de l'estuaire de la Seine de 1978-1979 à 1983-1984.

## 3. LES SEDIMENTS

### 3.1. Fer total. Fer associé aux enduits minéraux - Normalisations Fer/Al :

#### 3.1.1. En 1979 :

On a cartographié, pour les sédiments de l'estuaire et de la Baie de Seine, recueillis en 1979, la répartition du fer total (fig. 4), les valeurs normalisées Fe total/Al (fig. 5), les teneurs en fer associé aux enduits minéraux (fig. 6).

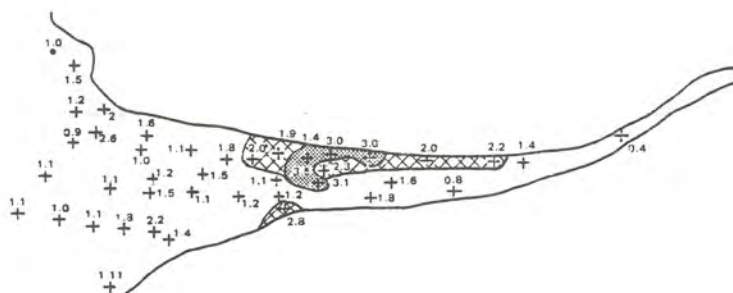
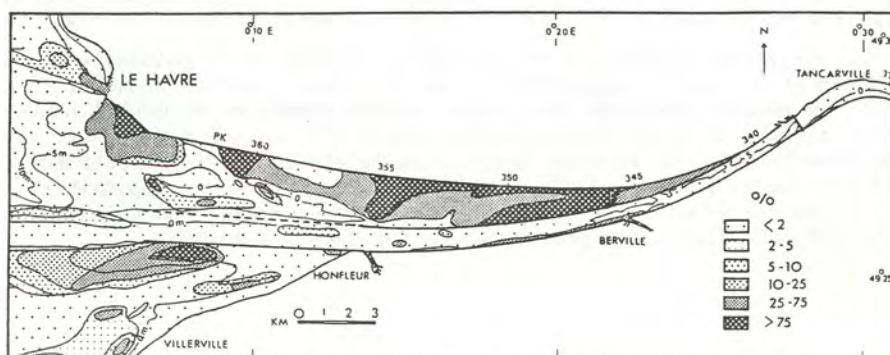
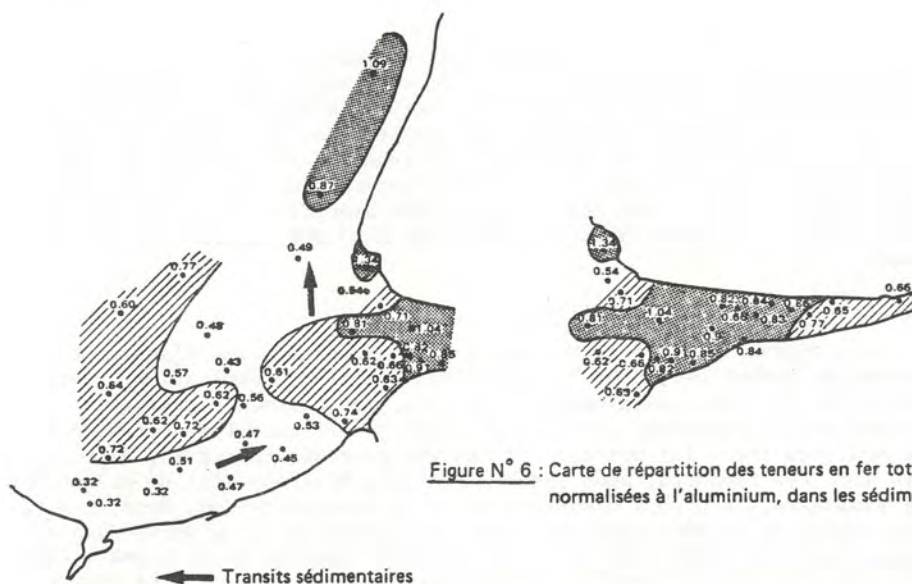
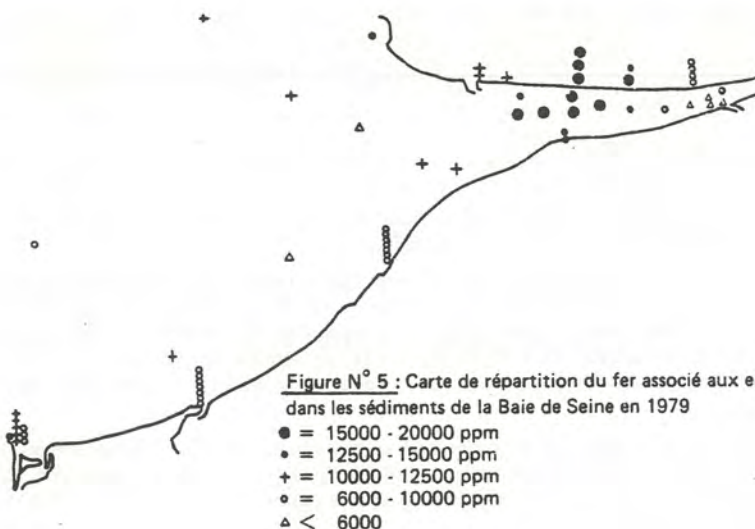


Figure N° 4 : Carte de répartition des teneurs en fer total (%) dans les sédiments de l'estuaire de la Seine en 1979

La comparaison entre les cartes de Fer total et la carte de répartition (fig. 7) de la fraction inférieure à 50 µm montre que la zone de sédimentation fine, qui se situe sur la rive droite face à Honfleur, est la plus riche en fer (3-3,5%).





La carte des valeurs normalisées par rapport à l'aluminium fait état de résultats allant de 0.3 à 1.34. Les sédiments enrichis en fer ( $0.8 < \text{Fe}/\text{Al} < 1.34$ ) se rencontrent essentiellement dans l'estuaire; on observe cependant une autre zone ( $0.87 < \text{Fe}/\text{Al} < 1.09$ ) au nord du cap de la Hève qui coïncide avec le dépôt de dragage du port du Havre au niveau duquel une valeur  $\text{Fe}/\text{Al}$  de 1.34 a été observée.

La carte des teneurs en fer associé aux enduits minéraux de la figure 6 fait état de résultats compris entre 4 000 et 20 000 ppm, la zone où la précipitation du fer est maximum (12500-25000 ppm) coïncide bien avec celle définie par les fortes valeurs normalisées à l'aluminium.

Au large des côtes du Calvados on trouve les valeurs normalisées les plus faibles  $0.32 < \text{Fe}/\text{Al} < 0.60$  avec une moyenne de 0.45. En utilisant cette dernière référence comme caractéristique des apports naturels, on peut estimer qu'il y a dans l'estuaire ( $0.8 < \text{Fe}/\text{Al} < 1$ ) un excès de fer de 100% ce qui représente 15 000 à 18 000 ppm en fer associé aux enduits minéraux pour les sédiments fins.

On observe par conséquent un bon accord entre les données normalisées et les valeurs en fer extractible (technique MALO) aussi bien en ce qui concerne la définition des zones de précipitation que l'estimation des quantités de fer ayant précipité ( $\mu\text{g/g}$ ).

### 3.1.2. En 1984 :

En 1984 on a étudié la répartition verticale du fer (total, associé aux enduits minéraux, présent dans l'eau interstitielle) sur des carottes de 15 cm prélevées en 5 endroits différents. choisis en fonction des données précédentes. Les résultats obtenus seront publiés dans le cadre d'une thèse (P. Marin, en préparation). Notons qu'au voisinage de l'émissaire de rejet de Thann et Mulhouse, on observe des valeurs normalisées ( $\text{Fe}/\text{Al}$ ) moyennes de 0.95 en août 1984, de 1.02 en novembre 1984 avec des teneurs en fer total nettement plus élevées en novembre (17 000 à 47 000) qu'en août (12 000 à 33 000).

### 3.2. Les rapports $\text{Fe II}/\text{Fe III}$ :

Les analyses par effet Mossbauer ont trouvé un champ d'application intéressant en permettant, dans le milieu naturel, la détermination des rapports  $\text{Fe II}/\text{Fe III}$  dans les minéraux, les sols, les sédiments marins. Des suspensions et sédiments ( $n = 30$ ) prélevés sur l'ensemble de la Manche ont été analysés (tab. II) par cette technique pour déterminer les rapports  $\text{Fe II}/\text{Fe III}$ . Ces rapports, pour les échantillons étudiés, sont de 0.28-0.56 dans le Finistère, de 0.28 à 0.45 dans le golfe Normand-Breton, de 0.10-0.26 dans les havres de la côte ouest du N-W du Cotentin, de 0.69 en rade de Cherbourg, de 0.19 à 0.23 dans les zones de sédimentation de la bande littorale de la pointe est du Cotentin. Dans l'estuaire de la Seine, les rapports  $\text{Fe II}/\text{Fe III}$  sont faibles et très homogènes: 0.17-0.23 ( $n = 10$ ), les apports fluviaux ne présenteraient pas d'originalité particulière (0.17-0.21).

Pour une suspension recueillie aux environs immédiats de l'émissaire de rejets Thann et Mulhouse (caractérisée par des teneurs en fer total et en fer associé aux enduits minéraux atteignant respectivement de 64 000 et 51 000 ppm) le rapport  $\text{Fe}/\text{Fe III}$  devient très faible (7%) ce qui indique une oxydation immédiate du fer ferreux rejeté. Les rejets industriels contribuent à diminuer les rapports  $\text{Fe II}/\text{Fe III}$  mais ces derniers sont trop faibles dans les apports amont de la Seine (0.17 - 0.21) pour que l'on puisse d'une manière générale établir la provenance du fer dans l'estuaire.

#### 4. DISCUSSION SUR LES TENEURS EN FER ASSOCIE AUX ENDUITS MINERAUX

Il est encore trop tôt pour établir un bilan géochimique des flux, d'entrée et de sortie du fer dans l'estuaire. Pour les suspensions, en particulier, la situation est fortement perturbée par les rejets industriels en aval, par les remises en suspension au sein du bouchon vaseux de crue de matériaux déposés, par la dilution des matériaux fluviaux par des apports marins (Guéguénat *et al.* 1985). Dans l'état actuel des connaissances nous retiendrons :

- a) que nous avons mis en évidence d'une part au sein du bouchon vaseux, d'autre part dans une zone sédimentaire importante, des teneurs en fer extractible pouvant atteindre 16 000 à 21 000 ppm, soit 50 à 55% du fer total;
- b) que la diminution en fer extractible observée actuellement dans les suspensions, par rapport à la situation de référence antérieure (1979) pourrait être imputable aux modifications apportées récemment dans les rejets industriels du fer en aval.

Que signifient 20 000 ppm en fer extractible dans un sédiment ? Les données reportées dans le tableau 2 indiquent qu'il s'agit d'un enrichissement en fer tout à fait inhabituel tout au moins à l'échelle des côtes françaises.

|                             |        | Fer non lié<br>(ppm) | %<br>Fer non lié/Fer total |                         | Fer non lié<br>(ppm) | %<br>Fer non lié/Fer total |
|-----------------------------|--------|----------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| Méditerranée                | n = 33 | 1 700 - 6 700        |                            | Cotentin                |                      |                            |
| De la Loire à la Garonne    |        |                      |                            | Sud-Ouest n = 8         | 4 700 - 12 300       | 24 - 37 %                  |
| Gironde n = 10              |        | 7 500 - 13 800       |                            | Nord-Ouest n = 22       | 2 450 - 15 400       | 20 - 50 %                  |
| Loire. St Nazaire n = 1     |        | 13 400               |                            | Baie des Veys n = 10    | 4 200 - 11 480       |                            |
| Loire. Baie Bourgneuf n = 4 |        | 5 800 - 10 200       |                            | Mer du Nord             |                      |                            |
| Bretagne Sud                |        |                      |                            | Embouchure Aa n = 3     | 5 700 - 15 800       | 40 - 60 %                  |
| Morbihan n = 2              |        | 10 800 - 12 000      |                            | Port de Dunkerque n = 1 | 6 150                | 30 %                       |
| Bretagne Nord               |        |                      |                            | Ouest Baie de Seine     |                      |                            |
| Baie Brest n = 3            |        | 10 700 - 19 600      | 25 - 37 %                  | St vaast - Barfleur     | 2 900 - 15 400       |                            |
| Abers n = 10                |        | 4 200 - 10 600       | 17,5 - 32 %                | Baie des Veys           | 4 200 - 11 400       |                            |
| Yaudet n = 4                |        | 7 200 - 13 600       |                            | Orne                    | 8 000 - 10 000       |                            |
| Falmopol n = 2              |        | 3 000 - 8 000        |                            |                         |                      |                            |
| Baie St Briec n = 6         |        | 2 700 - 7 200        |                            |                         |                      |                            |
| " " n = 1                   |        | 17 500               |                            |                         |                      |                            |
| Golfe Normand Breton n = 22 |        | 2 680 - 8 400        | 16 - 40 %                  |                         |                      |                            |

Tableau 2.- Le fer non lié à la maille cristalline dans les sédiments littoraux français.

#### 5. ETUDE DES RELATIONS ENTRE FER ET SCANDIUM

Des analyses d'échantillons sélectionnés de l'estuaire ont été faites par activation neutronique afin de mesurer un maximum d'éléments à l'état de traces dont le fer et le scandium. Le choix des échantillons analysés a reposé en grande partie sur les résultats de teneurs en fer extractible.

Les relations entre le fer et le scandium sont très bonnes dans l'estuaire de la Seine :  $r^2 = 0.871$  pour 33 échantillons de suspensions ( $n = 26$ ) et de sédiments ( $n = 7$ ) recueillis entre 1978 et 1984.

Les valeurs moyennes suivantes (Fe/Sc ont été observées):

- 3595 : suspensions de l'étiage 1978 ( $n = 6$ );
- 3620 : suspensions de la crue 1979 ( $n = 8$ );
- 3400 : suspensions de l'étiage 1981 ( $n = 5$ );
- 3083 : suspensions de l'étiage 1983 ( $n = 3$ );
- 3300 : suspensions de la crue 1984 ( $n = 6$ );
- 3520 : sédiments de 1979 prélevés ( $n = 6$ ) dans la zone enrichie en fer ( $0.8 < Fe < 1.34$ ).

L'estuaire de la Seine peut être caractérisé par une valeur moyenne Fe/Sc de



3400, on trouve des résultats comparables dans les suspensions de la partie fluviatile ( $\text{Fe/Sc} = 3300-3350$ ), dans les autres estuaires (suspensions) de la baie de Seine: la Vire (3050-3500) d'une part, l'Orne (3125-3630) d'autre part. En période d'étiage les transits sédimentaires en suspension s'effectuent de la baie vers l'intérieur de l'estuaire (Avoine-Crevel, 1985). Des analyses des suspensions effectuées dans ces conditions ont permis de caractériser les rapports  $\text{Fe/Sc}$  dans les apports marins : 3040 ( $n = 4$ ).

Dans les sédiments de la partie ouest de la Baie de Seine, les valeurs  $\text{Fe/Sc}$  sont en moyenne de 2900 ( $n = 6$ ).

Dans les autres estuaires des grands fleuves français, étudiés par Thomas et Martin (1982), on constate des résultats normalisés en fer comparables à ceux de la Seine : 3270 en Loire, 3380-3930 en Dordogne, 2780-3110 dans la Garonne, 2780 dans le Rhône. Dans une étude portant sur la Garonne Cauwet *et al.* constatent que le rapport  $\text{Fe/Sc}$  varie peu depuis le fleuve (3020) jusqu'à l'embouchure (2970).

## 6. DISCUSSION - CONCLUSION

Il est étonnant de constater que la normalisation, par le scandium, des teneurs en fer total dans les sédiments et les suspensions de l'estuaire de la Seine ne permet pas de mettre en évidence :

- a) la zone de précipitation du fer;
- b) l'augmentation des teneurs en fer associé aux enduits minéraux qui se manifeste d'amont en aval;
- c) l'enrichissement inhabituel en fer associé aux enduits minéraux;
- d) l'évolution des rejets industriels dans l'estuaire.

Pour expliquer ce manque de variations dans les valeurs en fer, normalisées par rapport au scandium, nous émettons l'hypothèse que ce dernier élément se trouve partiellement associé aux enduits minéraux. Ces normalisations par rapport au scandium seraient par conséquent à utiliser avec précaution tout du moins dans l'estuaire de la Seine. Sur ce sujet d'intérêt fondamental se greffe un problème, propre à l'estuaire de la Seine, qui concerne la nature même des rejets industriels de fer effectués en aval. Ces derniers sont constitués de fer ferreux qui a un rayon ionique de  $0.74 \text{ \AA}$  très proche de celui du  $\text{Sc}^{3+}$  ( $0.81 \text{ \AA}$ ); la présence de ce dernier élément est très probable dans les composés ferreux (Norman *et al.*, 1968) donc dans les rejets industriels. Les hydroxydes  $\text{Fe}^{3+}$  (oxydation immédiate du  $\text{Fe}^{2+}$  dans le milieu marin) et de  $\text{Sc}^{3+}$  étant très insolubles, on peut s'attendre à ce que le scandium soit coprecipité par l'hydroxyde ferrique. Il convient par conséquent dans les futures recherches de déterminer si la présence de scandium dans les enduits minéraux représente un phénomène général ou particulier à l'estuaire de la Seine.

Avoine J., Dubrulle L. & Larssonneur C. (1985). - La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la baie de Seine. Conséquences sur l'environnement. Ce volume, N° 16.

Boust D. (1981). - Les métaux traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3e cycle, Université de Caen. 207 pp.

Brewer P.G., Spencer D.W. & Roberston D.E. (1972). - Earth Planet Sci. Letters, 16, 111.

Cauwet G., Elbaz F., Jeandel C., Jouanneau J.M., Lapaquellerie Y., Martin J.M. & Thomas A. (1980). - Comportement géochimique des éléments stables et radioactifs dans l'estuaire de la Gironde en période de crue. Bull. I. G.B.A., 27, 5-33.

- Darras R., May S. & Engelmann C. (1978).- Applications récentes de l'analyse par activation dans le domaine de la pollution. Measurement, Detection and control of environmental pollutants. IAEA-SM-206/28, pp. 339-354.
- Gandon R. (1983).- Les mécanismes d'adsorption des espèces minérales cationiques et anioniques sur les hydroxydes polymères du fer ferrique et les produits d'oxydation du fer ferreux en milieu aqueux. Rapport CEA-R-5238, 187 pp.
- Guéguénat P., Gandon R., Hémon G. & Philippot J.C. (1976).- Méthodes de mesure d'éléments à l'état de traces dans l'eau de mer par activation neutronique et absorption atomique. Measurement, Detection and control of environmental pollutants. IAEA-SM-206/28, pp. 369-382.
- Guéguénat P., Boust D., Hémon C., Philippot J.C., Lagarde G. & Heitz C. (1985).- Comportement géochimique du lanthane et de 40 éléments à l'état de traces dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 25.
- Luoma S.N. (1981).- A statistical assessment of the form of trace metals in oxidized estuarine sediments employing chemical extractants. The Science of the Total Environment, 17, 165-196.
- Malo B.A. (1977).- Partial extraction of metals from aquatic sediments. Environ. Sc. Technol., 11, 277-282.
- Martin J.M. & Meybeck M. (1979).- Elemental mass balance of material carried by major world rivers. Mar. Chem., 7, 173-206.
- Martin J.M., Salvadori R. & Thomas A.J. (1978).- Le mercure et les oligoéléments dans le delta du Rhône. IVE Journées Etude Pollutions (CIESM-Antalya), 197-202.
- Nelson L.A. (1979).- Minor elements in the sediments of the Thames Estuary. Est. Coast. Mar. Sci., 9, 623-629.
- Norman J.C. & Haskin L. (1968).- The geochemistry of Sc : a comparison to the rare earths and Fe. Geochim. Cosmochim. acta, 32, 93-108.
- Spencer D.W. & Brewer P.G. (1970).- Crit. Rev. Solid. State Sci., 1409.
- Spencer D.W., Brewer P.G. & Sachs P.L. (1972).- Aspects of the distribution and trace element composition of suspended matter in the Black Sea. Geochim. Cosmochim. Acta, 36, 71-86.
- Thomas A.J. & Martin J.M. (1982).- Chemical composition of River suspended sediments : Yangtze, Mackenzie, Indus, Orinoco, Parana and Franch Rivers (Seine, Loire, Garonne, Dordogne, Rhône). Mittl. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hambourg SCOPE/UNEP Sonderband Heft, 52 S, 555-564.





30

BIOLOGICAL AVAILABILITY OF SEDIMENT-BOUND TRACE METALS.

*LUOMA S.N.\**

**ABSTRACT.** The impacts of trace contaminants in aquatic environments cannot be assessed realistically without a greater understanding of the factors controlling the biological availability of the concentrated pool of metals associated with sediments. It has been established that direct uptake of (at least some) trace metals from sediments contributes to metal concentrations in benthic organisms. Important controls on metal uptake from sediment are the concentration of the exposure, the partitioning of the metals among components of the sediment, and the redox potential of the sediment. Important problems in ecology, physiology, geochemistry and biogeochemistry remain unresolved, however, and a concentrated interdisciplinary research effort will be necessary before a complete understanding of the fate and impact of sediment-bound metals will be possible.

INTRODUCTION

One important objective of studying trace metal biogeochemistry is to develop means of predicting or understanding the biological impact of these contaminants, based upon their concentrations in the environment. This will require understanding both biological and geochemical aspects of trace metal behavior.

When a metal is released in an aquatic system it immediately distributes between particles and solution. Concentrations bound to particles (sediments or suspended particulates) are usually orders of magnitude higher than concentrations in solution. This paper is a summary of some of the work we have done studying the processes that determine the extent of transfer to food webs of metals within this concentrated particulate-associated metal reservoir.

\*U. S. Geological Survey, Mail Stop 465, 345 Middlefield Road, Menlo Park, California 94025, USA



## 1. SEDIMENT GEOCHEMISTRY OF METALS

Particles in estuarine environments are composed of a number of components capable of strongly binding trace metals. In oxidized sediments (which will be considered exclusively in this paper) these include oxides of iron, oxides of manganese, various forms of organic metals and clays. Most particles are aggregates of all these components (Jenne 1977). Most of the organic materials, iron oxides and manganese oxides occur as coatings often covering clay surfaces. By themselves, clays also bind metals less strongly than the other components (Davies-Colley et al 1985). The combination of a lower binding intensity and a loss of binding sites to interactions with other components suggests clays are much less important than other types of components in binding metals in sediments (Jenne, 1977, Davis-Colley et al., 1984).

The distribution of a metal among the components of the sediments is determined by three factors: (1) The intensity of metal binding to each component; (2) the number of available binding sites per unit mass of each component; and (3) the mass of each component per unit mass of sediment. By quantitatively characterizing each of the above a mathematical description of metal distribution within a given sediment should be possible (Oakley et al., 1982; Luoma and Davis, 1983; Davies-Colley 1984; Tessier et al., 1984). However, a number of the prerequisites for an accurate model are poorly known. Poorly understood factors include (1) measures of binding intensity that are comparable among components; (2) the effect of component interactions within aggregates upon the number of binding sites; (3) the constancy of binding intensity at different metal concentrations per unit component; and (4) how to convert measures of component concentrations to number of component binding sites per unit mass of sediment (Luoma and Davis 1983). Thus, model calculations of metal partitioning (Davis-Colley, et al, 1984; Tessier, et al., 1984, Luoma, in press) must be considered simplistic approximations.

In lieu of a technique for precisely modeling metal partitioning in sediments, operational techniques have been developed. A large number of leaching techniques have been applied to aquatic sediments (Gibbs, 1973; Forestner 1979; Tessier, 1979). Nearly all suffer from a lack of chemical specificity (Luoma and Jenne, 1976; Guy, et al., 1978); and few, if any, efficiently extract metal from a single component of the sediment.

Statistical techniques also are employed to assess partitioning (Luoma and Bryan 1981) but these are qualitative and subject to the errors of any correlative approach, especially those associated with confounding variables.

Despite their inadequacies, some consistent conclusions emerge from the different approaches to studying metal partitioning. The clearest is that most metals distribute among several components or types of binding sites in oxidized sediments. It also appears that this distribution can change if the chemical characteristics of the sediments change. Leaching studies consistently show that several metal fractions of different extractability occur in almost all sediments. A

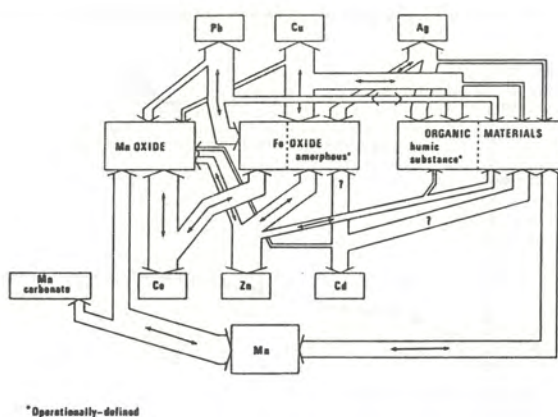


Figure 1. Partitioning of Ag, Cd, Co, Cu, Pb and Zn among binding components important in oxidized sediments, as indicated by statistical associations (from Luoma and Bryan, 1981).

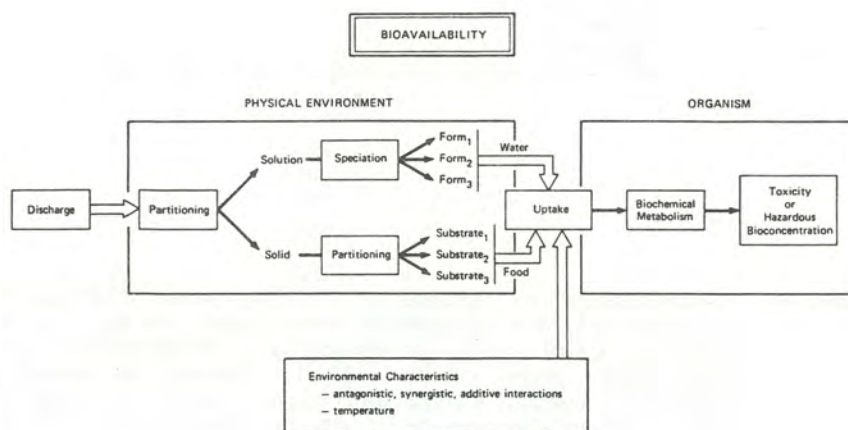


Figure 2. A simplified schematic illustration of the various processes which affect the availability of trace contaminants to organisms.



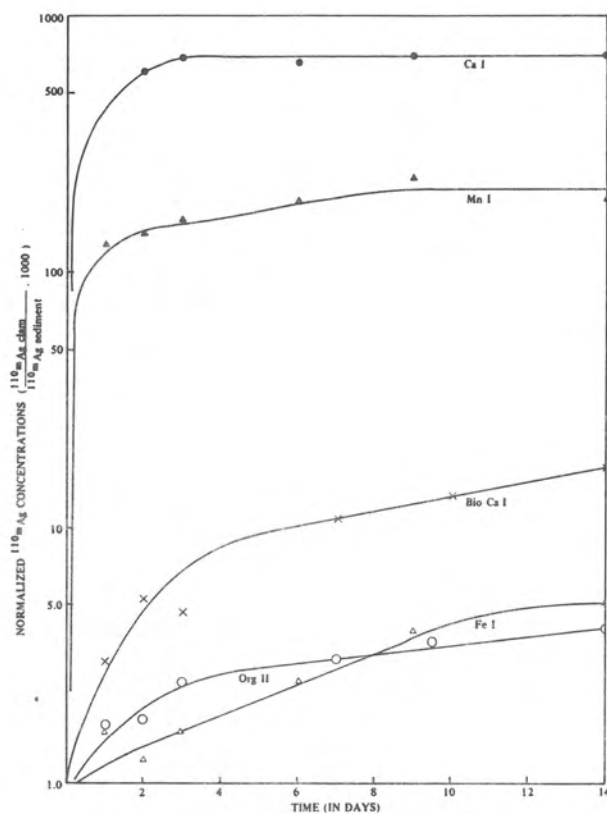


Figure 3. Differences in uptake of  $^{110m}\text{Ag}$  when different types of well-defined sediments were ingested by the deposit-feeding clam *Macoma baltica*. Sediment-types are amorphous iron oxides (Fe), decaying marsh grass fragments (org), manganese oxides (Mn), crushed bivalve shells (BioCa), and calcium carbonate (Ca) (from Luoma and Jenne, 1977).

statistical study, assessing correlations of metal concentrations with component concentrations among nearly 50 geochemically diverse sediments strongly indicated the multi-component nature of metal binding (Fig. 1; Luoma and Bryan). More recently, attempts to calculate theoretical metal distributions have shown that at least Cu is mainly distributed between iron oxide and organic materials in sediments, but the relative importance of each differs among sediments (Davies-Colley 1985; Luoma, in press). This means that no single component dominates the partitioning of a metal; and that partitioning may change from place to place or time to time.

## 2. BIOLOGICAL IMPACT OF VARIABLE METAL PARTITIONING.

If metals partition among a number of components, then organisms that ingest or contact sediments are not exposed to the sediment-bound metal as a single entity. Rather, each metal is encountered in a variety of metal-ligand associations (Fig. 2); and that variety is not constant in time or space. Laboratory studies clearly show that each metal-component association has a distinctly different biological availability. Cadmium is accumulated rapidly by deposit feeding organisms (the clam Macoma balthica) from sediments containing organic materials such as the polysaccharide exopolymer secreted extracellularly by some bacteria (Harvey and Luoma, 1985). However, Cd is not accumulated from sediments stripped of organic materials or from particulates that are either purely iron oxides or are composed of iron oxide coated with living bacteria (Luoma and Jenne 1976; Harvey and Luoma, 1985). The rate of uptake of Zn, Ag and Co may differ by orders of magnitude when these metals are bound to different specific components of the sediment (Luoma and Jenne, 1977). For example, Fig. 3 shows that uptake of Ag by M. balthica was 10 fold greater when manganese oxide-bound Ag was ingested as compared to ingestion of Ag associated with iron oxides or organic materials (marsh grass detritus).

Thus, geochemical studies show that the distribution of a metal among components may vary from sediment to sediment, and laboratory biological studies show that a difference in component association of a metal may cause a difference in metal bioavailability. Therefore, in nature metal concentrations in organisms should vary among sediments of differing component concentrations.

## 3. COMPARISONS OF METALS IN ORGANISMS AND SEDIMENTS.

In natural systems organisms are directly exposed to sediment-bound metals through surface contact, and accidental or intentional ingestion during feeding. Sediments also may control solute metal concentrations in waters in contact with the sediment bed sufficiently long to approach equilibrium, thus affecting biological exposures through the solute vector of uptake. Thus, metal tissue burdens in deposit and suspension feeding organisms should directly reflect the biological availability of sediment-bound metals. These organisms are exposed to all components of the sediment in their quest for nutrition. Most choose their food only on the basis of particle size, or particle density (Newell, 1965, Whitlatch, 1974; Bubnova, 1974, Self and Jumars, 1978), although particle-size selectivity may differ among species. For example the clam, Macoma balthica,



digests various types of particles less than 80  $\mu\text{m}$  in size (Yonge, 1949). The average particle size in the digestive gland of *Macoma inguinata* is 10  $\mu\text{m}$ , while particles in the gut of *Macoma secta* average 300  $\mu\text{m}$  (Reid and Reid, 1969). The more selective feeder, *Pectinaria gouldii* (a polychaete worm), ingests particles <75  $\mu\text{m}$ , and >25  $\mu\text{m}$ , but employs no detectable chemical selection (Whitlatch, 1974). Selective suspension-feeding organisms also may inadvertently ingest a variety of metal-binding substrates when heavy concentrations of re-suspended materials are mixed with phytoplankton in the water column, or may employ some suspended sediment as an essential source of nutrition.

Most benthic organisms also are exposed primarily to metals associated with oxidized particles (Luoma and Davis, 1983). In oxygenated waters, reducing conditions occur in sediments below the sediment-water interface, but a thin layer of oxidized sediment is left at the sediment water interface. Many infaunal organisms feed at the oxidized sediment-water interface, or irrigate borrows with water from the oxidized surface. Meiofauna live exclusively above the redox interface (Coull, 1979), and epibenthic organisms are in contact, almost exclusively, with the oxidized environment at the surface of the sediment. Where reducing conditions occur, they undoubtedly affect the availability of sediment-bound metals; but in general the oxidized surface layer of sediments is much more important biologically than indicated by its mass.

If exposures to sediments control bioaccumulation by benthos, then metal concentrations in organisms in nature might correlate with concentrations in sediments. Strong correlations are most commonly not observed, however. Poor correlations between marine or estuarine benthic organisms and their sedimentary habitat have been reported by Cross et al., (1970), Halcrow, et al., (1973), Valiela et al., (1974), Huggett et al., (1975), Luoma (1977b), and Schnell and Nevessi (1977). The poor correlations between metal concentrations in benthic organisms and sediments could mean that metal in benthos are not derived from sediments, or sources coupled to sediments. However, they could also result from statistical problems in the comparison or from the influence of variables other than sedimentary metal concentrations upon metal bioavailability.

Two especially important problems have characterized statistical comparisons of metal concentrations in benthos and their food: (1) the actual food of the organisms has not always been used in the comparison; and (2) an adequate data range has not always been employed.

Obviously, metal concentrations in filter-feeding organisms such as oysters, mussels and some species of clams (that are dependent primarily upon phytoplankton for food) or in herbivorous grazing animals, would not necessarily correlate with metal concentrations in sediments, even if food were the primary vector of metal uptake. For example, concentrations of most metals in grazing snails follow concentrations in algae, but not sediments, where sediments and algae are not correlated (Bryan and Hummerstone, 1977; Young, 1975). Even among deposit-feeding

organisms, differences in food sources may affect metal exposure. For example, Phelps (1967) and Phelps, et al., (1969) reported consistent differences in Zn concentrations among benthic polychaetes from different feeding guilds (surface feeders vs. subsurface feeders; selective vs. non-selective feeders).

Most correlation studies also have been conducted within a single body of water, including only narrow concentration gradients in the comparison. Comparisons which have considered wider data ranges have shown some significant correlations between metal concentrations in deposit feeders and concentrations in sediments. Bryan (1974) found that concentrations of Cu, Pb, and Cd in the polychaete N. diversicolor correlated strongly with concentrations in sediments from the sediment-water interface when data were collected from several estuaries. Packer et al (1980) found that Cd and Zn concentrations in the polychaete Arenicola marina followed Cd and Zn in sediments from 24 stations on the coast of Wales. Significant correlations were not observed for Pb, Cu, and Mn, however. In an extensive survey, Luoma and Bryan (1978, 1979, 1982) compared concentrations of Ag, Cd, Co, Cu, Pb and Zn in two deposit feeders, the burrowing clam Scrobicularia plana and the polychaete N. diversicolor, to concentrations in sediments over a wide range of conditions among 50 stations in 17 estuaries. The data range for all metals was two to three orders of magnitude. Statistically significant (but weak) correlations between total metals in sediments and the tissues of S. plana were observed for Pb (Fig. 4), and for all other metals except Cu. Stronger

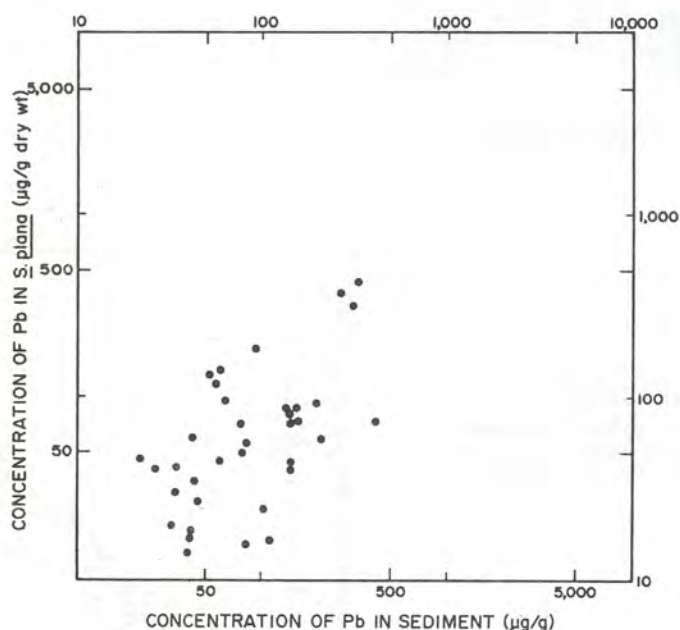


Figure 4. Correlation of Pb in surficial estuarine sediments with Pb in the deposit-feeding bivalve Scrobicularia plana.  $r = 0.69$  for power function fit. Data from 17 estuaries (from Luoma and Bryan, 1978).



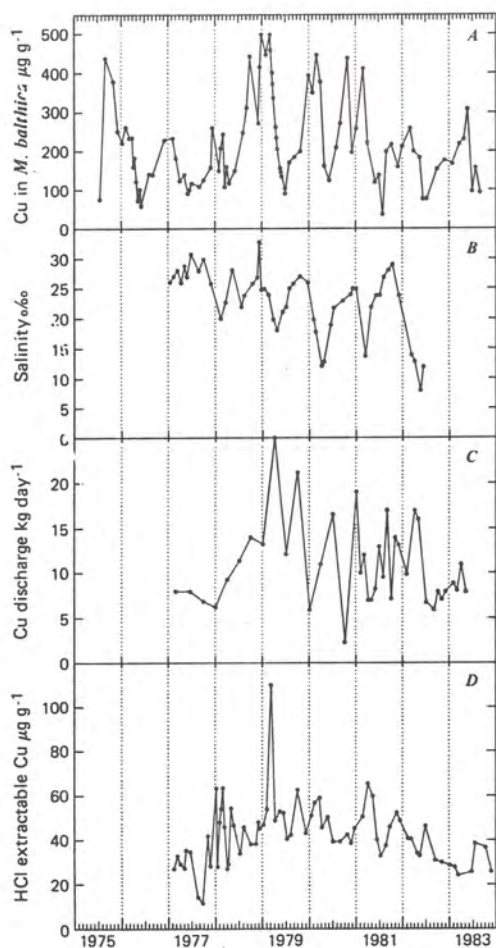
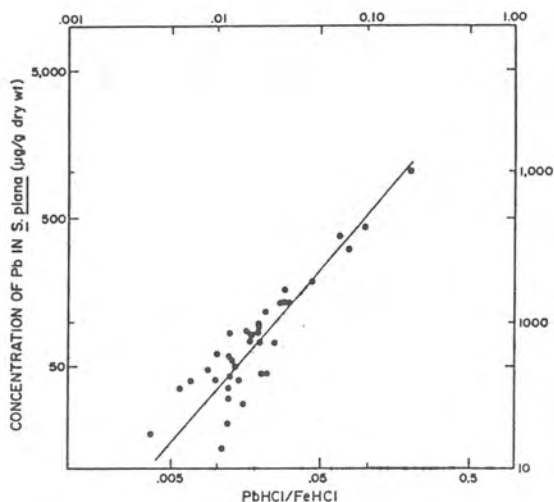


Figure 5.

- A) Concentrations of Cu observed in the soft tissues of *M. balthica* in South San Francisco Bay between June 1975 and June 1983. Representative errors bars (one SEM) are shown in 1979.
- B) Salinity observed at same station in water in the mantle cavity of *M. balthica*.
- C) Cu discharge from the sewage treatment works located 1 km south of above station.
- D) HCL-extractable Cu in surficial sediments (<100µm grain size) at same station.

Figure 6.

Correlation of Pb in *S. plana* with ratio of Pb/Fe (both extracted by 1N HCl) in surficial estuarine sediments.  $r = 0.95$ . Data from 17 estuaries (from Luoma and Bryan, 1978).



correlations were observed between sediments and N. diversicolor for Cu and Pb. However, over the broader data set, these correlations were not as strong as observed by Bryan (1974.) In general, the data suggested that total concentrations contributed to metal concentrations in the deposit feeders, but that an understanding of other contributing variables would be necessary to predict metal concentrations in organisms from concentrations in the environment.

Sediments need not be the only source of metal exposure for benthic organisms. Deviations in correlations between organisms and sediments could result from uptake from solution. However, even where the source of exposure which controls both the food and solute vectors is well-defined, deviations of bioaccumulation from dependence upon exposure alone are evident. For example, Bryan and Hummerstone (1977) observed differences in Ag and Cu concentrations in S. plana from two estuaries that could not be explained by Ag and Cu either in water or in sediment. In San Francisco Bay, spatial variations in Cu concentration indicated a sewage outfall was the primary source of the metal for the burrowing clam M. balthica (Thomson et al., 1984). However comparisons of nine years of near-monthly analyses of plant effluent, and clams from this site showed that, although Cu levels in M. balthica were occasionally coupled to Cu discharges, large fluctuations in concentrations occurred in the clam which could not be explained by changes in exposure (Fig. 5). Again, a general dependence upon exposure was evident, but other variables were also obviously important in controlling bioaccumulation.

Recent studies strongly indicate that one of the most important of those factors is the chemical characteristics of the sediment. The importance of such characteristics was first clearly demonstrated by Luoma and Bryan (1978). As previously mentioned, concentrations of Pb in the deposit feeding bivalve Scrobicularia plana were significantly correlated with concentrations of Pb in sediments from 37 stations in 17 estuaries in southwest England (Fig. 4) in that study. However, the correlation was characterized by substantial variability. It was noticed that the stations with unusually high Pb concentrations were stations where the ratio between Pb and extractable Fe\* was also high. Among all stations concentrations of Pb in S. Plana were very closely correlated ( $R^2 = 0.89$ ) with Pb/Fe in sediments (where Fe was measured by HCl extraction, Fig. 6).

Luoma and Bryan (1978) suggested that the availability of Pb was enhanced at low concentrations of Fe in sediment because less Pb was strongly bound to iron oxides as the Pb/Fe ratio in sediments increased making more Pb biologically available in the digestive tract. Whatever the cause, the ratio Pb/Fe, in sediments was an accurate predictor of Pb in S. plana in estuaries not included in the original regression calculation

---

\*Fe extracted either with 1NHCl for two hours or 0.4N acid ammonium oxalate for two hours--presumably an amorphous fraction of iron oxide.



| Estuary | HCl-soluble<br>Pb (ug/g) | Pb observed<br>in <u>S. plana</u><br>(ug/g) | Pb predicted in<br><u>S. plana</u> from<br>Pb/Fe in sediment |
|---------|--------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Axe     | 25                       | 8                                           | 9                                                            |
| Thames  | 57                       | 25                                          | 36                                                           |
| Elorn   | 71                       | 31                                          | 34                                                           |
| E. Looe | 93                       | 104                                         | 128                                                          |
| Gannel  | 417                      | 327                                         | 330                                                          |
| Humber  | 191                      | 22                                          | 28                                                           |

Table 1. The concentration of Pb observed in sediments (HCl extraction) and soft tissues of Scrobicularia plana from six estuaries compared with the concentration of Pb predicted for S. plana from the Pb/Fe ratio in the sediments. Data from Luoma and Bryan (1978).

|    | Best<br>Extraction<br>Method  | Vector                              | Inhibits<br>Availability          | Enhances<br>Availability          |
|----|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Ag | HCl                           | sediment<br>(interstitial<br>water) | Cu<br>extractable Fe?             | sewage factor                     |
| As | Total                         | sediment<br>solute (polychaetes)    | extractable Fe                    |                                   |
| Cd | HCl                           | solute<br>sediment                  | anoxia (S=)                       | sewage factor?                    |
| Co | HCl                           | sediment<br>(solute?)               | organic carbon                    |                                   |
| Cu | Total<br>HCl                  | sediment<br>(polychaetes)           | extractable Fe<br>organic carbon? | anoxia (molluscs)                 |
| Hg |                               | sediment                            | organic carbon<br>extractable Fe  | moderate Eh<br>low organic carbon |
| Pb | Total<br>HCl                  | sediment                            | extractable Fe<br>organic carbon  |                                   |
| Zn | 1N ammonium<br>acetate<br>HCl | sediment<br>solute                  | organic carbon                    |                                   |

Table 2. Summary of various factors which appear to inhibit or enhance the availability of sediment-bound trace metals to benthic organisms.

(Table 1). In estuaries such as the Looe, Pb in S. plana was greater than in estuaries such as L'Elorn in France, although Pb concentrations in sediment were similar, because extractable Fe was lower in the Looe. The most dramatic example was the Humber, which includes the industrial Midlands of England in its watershed. Although sediments were highly contaminated with Pb, the statistical model predicted little Pb should occur in S. plana in the Humber because of the very high Fe concentrations in the sediment. Observations proved this to be the case.

Similar to Pb, Langston (1980; 1982) has shown that levels of As in S. plana and M. balthica are also best related to the As:Fe ratio in a 1N HCl extract of surface sediment. Mercury, on the other hand, has a high affinity for organic particles and concentrations in S. plana and M. balthica are related to the total (HNO<sub>3</sub> extractable) Hg:total organic matter ratios in the <100  $\mu$ m fraction of surface sediments (Langston, 1982). This agrees with the work of Breteler et al. (1981) which showed that the highest concentration of Hg in mussels (Modiolus demissus) and crabs (Uca pugnax) occurred in animals exposed to sediments having low levels of organic matter.

Physiochemical conditions other than sediment component concentrations also appear to influence metal bioavailability from sediment. For example, the availability of Ag (which appears in the sediments of the Seine in concentrations higher than reported anywhere in the world) to deposit feeding bivalves is strongly reduced when high concentrations of Cu appear in sediments (Luoma and Bryan, 1982). Increased pH appears to increase availability of Hg (perhaps by stimulating conversion of Hg<sup>+2</sup> to Hg<sup>0</sup>), but not Cu and Pb to marsh plants (Gambrell et al., 1977). Unpublished data from the study of Luoma and Bryan also suggested Cd was of lower availability in highly anoxic mudflats (e.g., inner Poole Harbor). The availability of Cu to the polychaete Neanthes arenaeodentata also is less from subsurface than from surface sediments (Pesch, 1979), presumably due to differences in redox potential. In contrast, certain types of reducing conditions enhanced the bioavailability of Cu to the clams S. plana and M. balthica (Luoma and Bryan, 1982). Exceptionally high concentrations of Cu were observed in these animals in seven anoxic mudflats, and during an unusual period of anoxia on one mudflat. Greater enhancements of Cu availability generally accompanied lower concentrations of Fe in sediments, but the precise cause of the enhancement was not identified.

In a recent review, Bryan (1985) summarized, for a number of trace metals, the results of his extensive experience, and that of others, with processes controlling metal availability from sediments to aquatic organisms. It must be emphasized that these conclusions are preliminary. Results sometimes differed among species, and definitive studies have only been conducted with a few species, mostly in estuarine environments. From Bryan's summarization and our experience, the following conclusions appear: (1) High concentrations of organic matter and/or Fe (probably as amorphous iron oxide) inhibit the availability of Hg, Pb, As, Zn, and possibly Ag and Cu. Sediments high in total organic carbon or extractable Fe may contain high concentrations of trace metals, but the metals do not appear to pass on to most biota. (2) Under some circumstances or for some species, the



solute vector of uptake is an especially important source of Cd, Zn, and possibly As and Ag. (3) Total concentrations in sediments control Cu availability to polychaetes, but the controls on Cu availability to molluscs are not clear. Anoxia may enhance Cu availability to mulluscs, under some circumstances. (4) Zn availability is controlled by readily exchangeable Zn in sediment, uptake from the solute vector, and a negative influence of organic carbon. (5) Most metals (especially Hg, Pb, Zn, As, Cu, and Ag) would be expected to be of high bioavailability in coarser grained sediments enriched by anthropogenic metal input and in wastes (such as smelter wastes or mine wastes) low in organic material or Fe. Some unknown attribute of sewage sludge enhances the availability of Ag and possibly Cd. Table 2 summarizes the conclusions presented to date on factors controlling metal availability from sediments to benthos.

#### 4. RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING BIOLOGICAL RELEVANCE OF SEDIMENT TREATMENTS.

It must be re-emphasized that our knowledge of metal bioavailability from sediments is, at best, fragmentary. Definitive studies are less than five years old, have been conducted by only a few research groups, consider only a few species, and nearly all have been conducted in estuaries. Nearly all conclusions rest upon statistical evidence which has not yet been mechanistically clarified by definitive laboratory studies. Additional comparative studies among estuaries, rivers or coastal environments are needed, as are controlled studies, testing some of the hypotheses generated by the statistical work.

Within the limitations of our present knowledge, it is possible to recommend a few practical procedures which could enhance the biological relevance of sediment treatment. However, it must be accepted that these recommendations are preliminary and could change as our knowledge grows. Furthermore, the objective is to recommend the simplest possible procedures, so as to maximize their utility in an operational program.

The simplest, biologically relevant measurements of sediments could include:

- (1) Measurement of total concentrations (or near-total using an  $\text{HNO}_3$ -reflux) of trace metals.
- (2) A simple extraction of sediments with a 0.5N HCl, and analysis of trace metals in the extract.
- (3) Measurement of major sediment components which affect bioavailability.

These include:

- (a) Total organic carbon.
- (b) Concentrations of Fe extracted by HCl. (Acid ammonium oxalate is a more widely accepted alternative for estimating amorphous Fe oxide. However, HCl and oxalate extractions of estuarine sediments usually yield similar results. For the sake of simplicity, measurement of Fe in the same HCl extract used for metals would not result in much loss of information.)
- (c) Total Mn.

Collection of such samples should be from microenvironments of most relevance to organisms of interest in the systems involved. In estuaries such as the Seine, this usually means sediments should be collected carefully from the thin oxidized layer at the sediment-water interface. Sediments should be sieved prior to storage. We employ a 100  $\mu$ m sieve, others suggest 60  $\mu$ m. Sediments also should be frozen as soon as possible if they are to be stored prior to extractions, so as to prevent redox changes which could affect extraction results.

This simple program would provide information about the major constituents that appear to affect metal bioavailability, and concentrations of metals that may competitively inhibit availability. From such a program, general assessments of the vulnerability of different sedimentary environments to accumulation of biologically significant concentrations of trace metals could begin to be possible.

- Breteler R. J., Valiela I & Teal J. M. (1981). - Bioavailability of mercury in several north-eastern U.S. Spartina ecosystems. Estuarine, Coastal Shelf Sci. 12:155-166.
- Bryan G. W. (1974). - Adaptation of an estuarine polychaete to sediments containing high concentrations of heavy metals, In: Pollution and Physiology of Marine Organisms, J. Vernberg and W. Vernberg (eds.), Academic Press, London, 123-136.
- Bryan G. W., and Hummerstone L. G. (1977). - Indicators of heavy-metal contamination in the Looe estuary (Cornwall) with particular regard to silver and lead, Jour. Mar. Biol. Ass. U.K. 57, 75-92.
- Bryan G. W. (1985). - The biological availability and effects of heavy metals in marine deposits. Wastes in the Sea Vol. 6, Near Shore Waste Disposal (in press).
- Bubnova N. P. (1974). - Consumption and assimilation of carbohydrates from marine sediments by the detritus-feeding mollusks Macoma balthica (L.) and Portlandia arctica (Gray), Oceanography 14, 743-747.
- Coull B. C. (1979). - Aspects of benthic-pelagic coupling in estuarine systems, Presented at Fifth Biennial International Estuarine Res. Conf., Jekyll Island, Georgia.
- Cross F. A., Hardy L. H., Jones F. Y. & Barber R. T. (1973). - Relation between total body weight and concentrations of manganese, copper, zinc and mercury in white muscle of bluefish (Pomatomus saltatrix) and a bathyl demersal fish Antimora rostrata, Jour. Fish. Res. Bd. Can. 30, 1287-1291.
- Davies-Colley R. J., Nelson P.O., & Williamson K. J. (1984). - Copper and cadmium uptake by estuarine sedimentary phases. Environ. Sci. Technol. 18:491-502.



- Forstner U. & Wittmann G. T. W. (1979). - Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin. 486 pp.
- Gambrell R. P., Collard V. R., Reddy C. N., & Patrick W. N. (1977). - Trace and toxic metal uptake by marsh plants as affected by Eh, pH and salinity, Tech. Rept. D-77, Dept. of Army, Washington, D. C., 123 pp.
- Gibbs R. J. (1973). - Mechanisms of trace metal transport in rivers. Science 180, 71-73.
- Guy R. D., Chakrabarti C. L., & McBain D. C., (1978). - An evaluation of extraction techniques for the fractionation of copper and lead in model sediment systems, Water Res., 12, 21-24.
- Halcrow W., MacKay D. W., & Thornton I. (1973). - The distribution of trace metals and fauna in the Firth of Clyde in relation to the disposal of sewage sludge, Jour. Mar. Biol. Ass. U. K. 53, 721-739.
- Harvey R.W. & Luoma S. N. (1985). - Effect of adherent bacteria and bacterial extracellular polymer upon assimilation by Macoma balthica of sediment-bound Cd, Zn, and Ag. Mar. Ecol. Prog. Ser. 22, 281-292.
- Huggett R. J., Cross R. A., & Bender M. E. (1975). - Distribution of copper and zinc in oysters and sediments from three coastal plain estuaries, In: Symposium on Mineral Cycling in Southeastern Ecosystems, F. G. Howell, J. B. Gentry and M. H. Smith (eds.), Augusta, GA, Proc., U. S. Environ. Res. Dev. Admin. Symp. Series (CONF-740513), 224-238.
- Jenne E. A. (1977). - Trace element sorption by sediments and soils-sites and processes, In: Symposium on Molybdenum in the Environment, W. Chappel and K. Petersen (eds.), M. Kekker, Inc., New York, 415-511.
- Langston W. J. (1980). - Arsenic in U. K. estuarine sediments and its availability to benthic organisms. J. Mar. Biol. Assn. U. K. 60, 868-881.
- Langston W. J. (1982). - The distribution of mercury in British estuarine sediments and its availability to deposit-feeding bivalves. J. Mar. Biol. Assn. U. K. 62, 667-684.
- Luoma S. N. (1985). - A comparison of methods for determining copper partitioning in oxidized sediments. Mar. Chem. (in press).
- Luoma S. N. & Bryan G. W. (1981). - A statistical assessment of the form trace metals in oxidized estuarine sediments employing chemical extractants, Sci. Total Environ. 17, 165-196.
- Luoma S. N. & Bryan G. W. (1982). - A statistical study of environmental factors controlling concentrations of heavy metals in the burrowing bivalve Scrobicularia plana and the polychaete Nereis diversicolor, Estuarine Coastal and Shelf Science 15, 95-108.

- Luoma S. N. & Davis J. A. (1983). - Requirements for modeling trace metal partitioning in oxidized estuarine sediments, Mar. Chem. 12, 159-181.
- Luoma S. N. & Jenne E. A. (1976b). - Estimating bioavailability of sediment-bound trace metals with chemical extractants, In: Trace Substances in Environmental Health, X, D. D. Hemphill (ed.), Univ. of Missouri Press, Columbia, 343-353.
- Luoma S. N. (1977b). - The dynamics of biologically available mercury in a small estuary, Est. Coast. Mar. Sci., 5, 653-652.
- Luoma S. N. & Davis J. A. (1983). - Modeling trace metal partitioning in oxidized estuarine sediments, Mar. Chem. 12:159-181.
- Luoma S. N. & Bryan G. W. (1979). - Trace metal bioavailability: Modeling chemical and biological interactions of sediment-bound zinc, In: Chemical Modeling--Speciation, Sorption, Solubility, and Kinetics in Aqueous Systems, E. A. Jenne (ed.), Amer. Chem. Soc., 577-611.
- Newell R. (1965). The role of detritus in the nutrition of two marine deposit feeders, the prosobranch Hydrobia ulvae and the bivalve Macoma balthica, Proc. Zool. Soc. London, 144, 25-45.
- Oakley S. M., Nelson P. O., & Williamson K. J. (1981). - Model of trace-metal partitioning in marine sediments, Env. Sci. Tech., 15, 474-480.
- Packer D. M., Ireland M. P., & Wootton R. J. (1980). - Cadmium, copper, lead, zinc and manganese in the polychaete Arenicola marina from sediments around the coast of Wales, Environ. Poll., 22, 309-321.
- Pesch C. E. (1979). Influence of three sediment types on copper toxicity to the polychaete Neanthes arenaceodentata, Mar. Biol. 52, 237-245.
- Phelps D. K. (1967). - Partitioning of the stable elements Fe, Zn, Se and Sm within a benthic community, Anasco Bay, Puerto Rico, In: Radioecological Concentration Processes, E. B. Aberg and F. P. Hungate, (eds.), Pergamon Press, London, 721-734.
- Phelps D. K., Santiago R. J., Luciano D., & Irigarny N. (1969). - Trace element composition of inshore and offshore benthic populations, In: Radioecology, D. J. Nelson and F. C. Evans (eds.), AEC CONF-070503. 413-425.
- Reid R. C. B., & Reid A. (1969). - Feeding processes of members of the genus Macoma (Mollusca: Bivalvia), Can. Jour. Zool., 47, 649-657.
- Schell W. R. & Nevissi A. (1977). - Heavy metals from waste disposal in central Puget Sound, Environ. Sci. Tech., 11, 887-893.



- Self R. F. L., & Jumars P. A. (1978). - New resource axes for deposit feeders, Jour. Mar. Res. 36, 627-641.
- Tessier A., Campbell P. G. C., & Bisson M. (1979). - Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem. 51, 844-851.
- Tessier A., Rapin R. & Carignan G. (1985). - Trace metals in oxic lake sediments: Possible adsorption onto iron oxyhydroxides. Geochim. Cosmochim. ACTA 49, 183 - 194.
- Thomson E. A., Luoma S. N., Cain D. J. & Johansson C. (1984). - Comparison of sediments and organisms in identifying sources of biologically available trace metal contamination. Water Res. 18, 755 -767.
- Valiela I., Banus M. B., & Teal J. M. (1974). - Response of salt marsh bivalves to enrichment with metal-containing sewage sludge and retention to lead, zinc and cadmium by marsh sediments, Environ. Poll. 7, 149-157.
- Whitlatch R. B. (1974). - Food-resource partitioning in the deposit-feeding polychaete, Pectinaria gouldii, Biol. Bull., 147, 227-235.
- Yonge M. L. (1975). - The transfer of  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{59}\text{Fe}$  along a Fucus sematus (L.) Littornia obtusata (L.) food chain, Jour. Mar. Biol. Ass. U. K. 55, 583-610.

## SYNTHESE DES DISCUSSIONS.

GUEGUENIAT P. \*

Dans la synthèse des communications de chimie du colloque, l'accent a été mis sur le comportement des éléments à l'état de traces dans l'estuaire. Ceci nous a conduits, dans un souci de cohérence, à ne pas y développer l'analyse de certaines des communications (fluorure, P.C.B., sels nutritifs); elle trouve d'autant mieux sa place dans la synthèse des discussions, que ces questions ont fait l'objet de nombreuses interventions. Les problèmes sérieux rencontrés avec les P.C.B. ont notamment été évoqués, alors qu'au plan des éléments métalliques, les résultats obtenus sont satisfaisants sauf en ce qui concerne d'une part, des pollutions accidentelles rencontrées au niveau de certaines suspensions de l'estuaire, d'autre part, des reconcentrations par la matière organique vivante dans la baie. Par ailleurs, on doit souligner la nette diminution pour le fer de l'influence industrielle entre 1978/1979 et 1983/1984 en liaison avec la diminution des rejets.

Avant de faire le point sur les résultats de fluorures, sels nutritifs, P.C.B...., on évoquera les difficultés rencontrées pour définir une référence naturelle pour les apports particuliers de la Seine en réponse aux questions de Mme Garnier (Association EURATOM-CEA) et de M. Chamley (Université de Lille).

### 1. Les références naturelles :

- Quels sont les niveaux de référence permettant de caractériser les pollutions chimiques et biologiques ? (question de Mme Garnier).
- Possède-t-on des références sur la composition et les teneurs des divers éléments chimiques en amont de l'estuaire de la Seine? Quelles sont les variabilités? Peut-on distinguer la part continentale et naturelle de la part industrielle? (questions posées par M. Chamley).

Ce problème doit en effet être posé quelle que soit la zone étudiée. Dans l'estuaire de la Seine, Avoine *et al.*, Guéguénat *et al.* utilisent des références différentes pour établir la contribution anthropique en oligo-éléments dans les sédiments et les suspensions. Les premiers se basent sur les sédiments de l'ère pré-industrielle de Rouen, les seconds sur la croûte terrestre.

Il en résulte des appréciations différentes de cette contribution anthropique notamment pour le cuivre : 99% par rapport aux sédiments de Rouen qui ont une teneur exceptionnellement faible (5 ppm), 87% par rapport à la croûte terrestre qui en contient 32 ppm. Le choix de cette dernière référence (Martin et Meybeck, 1979) semble préférable pour l'étude de l'estuaire, objectif de travail, en raison de la dilution des apports fluviaux par des apports marins.

Les travaux en cours par analyses par activation neutronique et effet Mossbauer doivent permettre de faire avancer la discussion. Les premiers résultats obtenus pour la référence Rouen indiquent, d'une part, les teneurs suivantes As (5ppm), Au (4.8ppm), Co (4.4ppm), Cr (34ppm), Fe (12000ppm), Hf (4.2ppm), Sb (0.4ppm), Sc (3.8ppm), La/Sc (3.95), Zn (42ppm), d'autre part, des rapports  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  de 0.47.

---

\* Laboratoire de Radioécologie Marine, C.E.A., B.P. 270, 50107 Cherbourg.



Ces rapports  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  sont nettement moins élevés dans les M.E.S. de la Seine (0.16-0.17) et il s'agit maintenant de déterminer si la contribution industrielle, (précipitation de l'hydroxyde ferrique) peut expliquer une telle diminution. Dans le cas contraire, il faudra abandonner cette référence des sédiments de 1<sup>ère</sup> pré-industrielle de Rouen dans la partie fluviale.

## 2. Les fluorures :

L'ion fluorure est reconnu comme toxique pour la vie aquatique. De ce fait, il a été l'objet d'études d'accumulation et de toxicité chez divers organismes marins et estuariens: Algues, Mollusques, Crustacés, Poissons. L'accumulation dans des organismes de consommation courante pourrait représenter un risque pour la santé humaine du fait de la rétention dans les tissus. Il est donc important de rester attentif aux concentrations de fluorure dans les eaux et de contrôler les apports.

En Seine et en Baie de Seine, la pollution fluorée provient des rejets industriels de phosphogypse. Ce dernier est un sulfate de calcium di-hydraté, sous-produit de la fabrication d'acide phosphorique destiné à la production d'engrais. Il se forme lors de l'attaque du minerai naturel (mélange de fluorapatite  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $3\text{CaF}_2$  et de  $\text{CaCO}_3$  par l'acide sulfurique, et contient donc du fluorure comme impurété.

Malgré son caractère polluant, le fluorure n'en existe pas moins dans les eaux naturelles et en particulier dans l'eau de mer où sa concentration avoisine 1,3 mg/l. Les concentrations de fluorure relevées en Baie de Seine dépassent rarement 1,5 mg/l au-delà de l'embouchure de l'estuaire. Hors des zones de rejets elles ne paraissent donc pas alarmantes pour la vie aquatique (Aminot *et al.*).

Grâce à sa caractéristique conservative, le fluorure s'est montré un excellent traceur de la dispersion des eaux de la Seine: on met ainsi en évidence sa présence, en faible proportion, dans les eaux proches du Cotentin.

## 3. Les sels nutritifs :

Au premier échelon de la chaîne alimentaire, le développement du phytoplancton est conditionné par la présence des éléments nutritifs, essentiellement l'azote et le phosphore nécessaires à toutes les espèces, mais également le silicium, indispensable aux algues à squelette siliceux, telles que les Diatomées.

Dans les eaux côtières, les apports continentaux peuvent enrichir considérablement le milieu en azote et en phosphore (rejets industriels, urbains et agricoles). Un enrichissement excessif en un ou plusieurs éléments peut alors avoir des conséquences sur l'équilibre et la densité des populations naturelles.

On note en 1983 (Aminot *et al.*) une très nette tendance à l'accroissement (110 000 t.) en azote minéral total ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) par rapport à 1978 (66 000 t/an). Simultanément l'azote ammoniacal a beaucoup diminué, sans doute en raison d'une meilleure épuration des eaux usées. L'azote organique ne devrait pas dépasser 10% de l'azote total en 1983.

Les apports en phosphore dissous (orthophosphate) par la Seine sont relativement constants (10 000-12 000 t/an). Quant au flux de silicium, on l'estime à 38 000 t/an (Guillaud, 1983, cité par Aminot *et al.*).

## 4. Les P.C.B. (communication Abarnou et Simon) :

Les P.C.B. (polychlorobiphényles) sont classés parmi les polluants prioritaires, ils font partie des paramètres systématiquement analysés dans les programmes de surveillance tels que le Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (R.N.O.). Les résultats obtenus dans l'estuaire de

la Seine sont inquiétants: en effet, la contamination des moules, la plus élevée de notre littoral, y atteint l'ordre de grandeur des limites de tolérance admises pour ces polluants. Des analyses dans la chair de poisson ont révélé des niveaux de contamination supérieurs à 1 mg/Kg de poids frais, atteignant même 18 mg/Kg à Bonnières. (Données communiquées par l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie). Les concentrations mesurées dans l'eau et les sédiments superficiels, comparables à celles observées par ailleurs, ne permettent pas d'expliquer ces résultats. Les phénomènes de transport de matériel en suspension, propres à l'estuaire de la Seine, conditionnent vraisemblablement la disponibilité des polluants pour les Bivalves (Abarnou et Simon). L'importance de cette contamination pose le problème de l'origine des polluants, les interventions de MM. M. Marchand, de A. Lesouef et de S. Simon permettent d'apporter des informations complémentaires.

a) Comparaison des estuaires Seine, Loire, Gironde (M. Marchand, IFREMER).

Sur quatre années de surveillance R.N.O., prises entre 1976 et 1982 on s'aperçoit que les niveaux moyens annuels en P.C.B. chez des Mollusques restent relativement constants dans les trois estuaires ainsi que leurs rapports d'un site à l'autre :

$$\frac{\text{Loire}}{\text{Gironde}} = 2.4 \pm 0.7$$

$$\frac{\text{Seine}}{\text{Gironde}} = 9.4 \pm 1.5$$

Par ailleurs, si l'on prend en compte les populations bordant estuaires et fleuves, les rapports démographiques sont dans le même ordre :

$$\frac{\text{Loire}}{\text{Gironde}} = 2.7$$

$$\frac{\text{Seine}}{\text{Gironde}} = 8.9$$

Ceci tendrait à accréditer comme origine des apports de P.C.B. véhiculés par la Seine une contamination chronique et diffuse liée aux activités humaines sur le bassin versant de ce fleuve.

b) Evolution dans ce fleuve, Agence de Bassin Seine-Normandie (A. Lesouef).

La cartographie des teneurs en P.C.B. dans les poissons d'eau douce indique une contamination de la Seine dès l'agglomération parisienne.

c) Précision sur les teneurs en P.C.B. des sédiments au niveau de Oissel (S. Simon, Affaires Maritimes, Le Havre).

Des valeurs accidentellement élevées en P.C.B. ont été enregistrées par Abarnou et Simon au niveau de Oissel en 1982. Des analyses récentes indiquent que la teneur de ces sédiments en P.C.B. a atteint fin 1984 plus de 400 ppm (au lieu de 5-6 ppm en 1983).

## 5. Les éléments métalliques :

Des problèmes de pollution (relativement importants) par éléments à l'état de traces ont été parfois observés au niveau, d'une part, des particules dans l'estuaire, d'autre part, de la matière organique vivante dans la baie. Par contre, dans les eaux les teneurs des principaux éléments dissous sont restées faibles (Pb, Cu, Zn, Fe, Cd), sauf dans certaines zones où les remises en suspension sont importantes.

### 5.1. Les particules dans l'estuaire :

Il faut distinguer dans l'estuaire entre les pollutions chroniques et accidentelles. Les premières se rencontrent régulièrement dans le fleuve en période de crue et concernent essentiellement l'argent (20-25 ppm), le cadmium (30 ppm), le zinc (1000-1500 ppm); les secondes sont observées dans l'estuaire pour le cadmium (jusqu'à 150 ppm), le chrome (600 ppm), l'antimoine (15 ppm) le cobalt (60 ppm). Dans le dernier cas, il s'agit de pro-



blèmes de pollution, accidents ponctuels analogues à ceux rencontrés pour les P.C.B. par Abarnou et Simon. Pour le cadmium cependant, la pollution était généralisée en décembre 1984 sur l'ensemble de l'estuaire.

### 5.2. Les particules dans la baie :

La décroissance amont-aval des concentrations métalliques particulières sous l'influence de mélange avec des sédiments pauvres en métaux issus de la partie aval des estuaires a été constatée dans certains estuaires nord-européens par Müller et Förstner (1975), Dunker et Nolting (1976). Dans l'estuaire de la Seine, cette décroissance paraît en certains cas être spectaculaire, les teneurs en zinc peuvent chuter de 1000 ppm (partie fluviale) à 200 ppm en amont de l'intrusion saline. Dans cet estuaire de la Seine, le matériel provenant de l'aval est constitué en partie par d'anciens apports fluviaux qui ont perdu la fraction métallique réactive. Il ressort de ces processus sédimentaires une dissimulation des indices de pollution, laquelle réapparaît dans la baie au niveau de la matière organique vivante, avec des teneurs en zinc pouvant atteindre 1500 ppm. On ne peut s'empêcher de relier cet enrichissement en zinc avec d'une part la présence, dans la zone de prélèvement, de Diatomées du genre *Chaetoceros*, de Dinoflagellés, de Tintinnoides et de larves d'Ostracodes constatées par Dupont *et al.*, avec d'autre part, les redissolutions de zinc consécutives aux dépôts de dragages (des teneurs de 72 µg/l en zinc ont été observées (Chauvin *et al.*)).

### 5.3. Le cas de l'étain :

A juste titre, M. Horn (Laboratoire du Service Régional d'Aménagement des Eaux de Basse Normandie) a posé le problème de l'étain dans les sédiments des dépôts de dragage à Octeville. L'étain est en effet un élément toxique très important, nuisible au développement des huîtres. Ce n'est en effet que récemment que l'on a découvert les problèmes de toxicité posés par l'emploi croissant d'organostanniques dans les peintures antisalissures. Celles-ci diffusent dans l'eau et relarguent leurs éléments biocides: il y aurait malformation de coquilles d'huîtres et il se produirait un enrichissement des tissus en étain interférant avec le métabolisme du cuivre et du zinc. Dans la liste des 40 éléments à l'état de traces mesurés dans les suspensions de la Seine (Guégueniat *et al.*), l'étain figure à des teneurs de 15 à 50 ppm. Aucun commentaire n'a été fait à ce sujet car cet élément a été mesuré par fluorescence X (PIXE) au laboratoire de Chimie Nucléaire de Strasbourg-Cronenbourg et nous n'avons pas encore pu, uniquement dans ce cas, établir des comparaisons avec d'autres techniques de mesure.

## 6. CONCLUSION

Quelques suggestions exprimées en séance résument très bien les conclusions que l'on peut tirer du colloque sur les transferts des divers polluants dans les différents compartiments de l'écosystème.

- Il semble illusoire de rechercher les effets d'un seul polluant (ex : P.C.B.) il faut plutôt considérer les effets de l'ensemble des polluants présents dans l'environnement (P.C.B., hydrocarbures, métaux...) (M. Marchand).

- Pour lutter contre la pollution, les décideurs ont besoin de connaître les niveaux qu'il serait souhaitable d'atteindre, tant pour la protection de la santé publique, que la préservation du milieu vivant. Déterminer ces niveaux nécessite des études prenant en compte les différents maillons d'une chaîne reliant les sources de pollution, les êtres vivants et l'homme, et peut donc constituer un objectif interdisciplinaire (Mme Garnier).

- L'excellente qualité des travaux présentés au cours du colloque est évidente, il apparaît cependant que le lien entre les études de dynamique côtière et les études sédimentologiques et surtout biologiques, reste très ténu. Afin de résoudre certaines questions, comme par exemple la genèse des blooms planctoniques, le transfert des polluants dans les divers compartiments de

l'écosystème, il paraît souhaitable de développer des modèles de transport adaptés à des questions spécifiques, ce qui supposerait la constitution d'équipes pluridisciplinaires dans lesquelles les physiciens auraient un rôle déterminant: un exemple en est donné par la communication de P. Gallet sur l'interprétation des résultats de mesures de paramètres hydrobiologiques effectuées dans le cadre du R.N.O. (M. Khalanski, Etudes et Recherches, E.D.F.).

Les remarques précédentes relatives à la nécessité des études multidisciplinaires se retrouvent dans la synthèse des publications de chimie-géochimie du GRECO Manche.

La reconcentration des métaux par la matière organique vivante pose le problème des transferts dans les chaînes trophiques. Malheureusement, on ne dispose pas, pour le moment, des données quantitatives sur les teneurs des principaux polluants métalliques dans les divers maillons des chaînes. Il manque, par conséquent, un lien entre les données de chimie-géochimie et les résultats de bioaccumulation obtenus par Chassard-Bouchaud *et al.*, à l'aide de la microscopie analytique.

---

Dunker J.C. & Nolting R.F. (1976).- Distribution model for particulate trace metals in the Rhine estuary, the Southern Bight and the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., 10, 78-102.

Martin J.M. & Meybeck M. (1979).- Elemental Mass. balance of material carried by major world Rivers. Marine Chemistry, 7, 1979, 173-206.

Müller G. & Förstner U. (1975).- Heavy metals in sediments of the Rhine and Elbe estuaries: mobilisation or mixing effect? Environ. Geol., 1, 33-39.

Les références sans indication de date se rapportent au Colloque Baie de Seine.





## THEME 4



### MILIEU VIVANT



La Baie de Seine : peuplements et espèces benthiques en régime perturbé  
CABIOCH L. et RETIERE C.

- 31 - CHASSARD-BOUCHAUD C., NOEL P., HUBERT M. et HALLEGOT P. Intérêt de la microscopie analytique pour l'étude d'impact de métaux traces et de terres rares sur le milieu vivant, application à l'étude d'une zone polluée: la Baie de Seine
- 32 - SYLVESTRE C., BATREL Y. et LE GAL Y. La détection des effets sublétaux des pollutions : utilisation *in situ* d'un indice biochimique, la charge énergétique
- 33 - MERLIN J.C., NOEL P., LAFAGE-SZYDLOWSKI N., PETIT-COSSE G. et WALLART F. Dosage des caroténoïdes de la macrofaune benthique par spectrométrie Raman de résonance - comparaison avec les dosages par spectrométrie d'absorption visible
- 34 - NOEL P., MERLIN J.C., LAFAGE-SZYDLOWSKI N., HUBERT M. et CHASSARD-BOUCHAUD C. Les variations quantitatives des caroténoïdes de la macrofaune benthique en Baie de Seine ont-elles des relations avec la pollution ou l'écologie des espèces ?
- 35 - GENTIL F., IRLINGER J.P., ELKAIM B. et PRONIEWSKI F. Premières données sur la dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés à *Abra alba* de la Baie de Seine orientale
- \*36 - LOCKWOOD A.P.M. Southampton water and the Solent : biological effects of the multi-use of an estuarine system

Synthèse des discussions

RETIERE C.

LA BAIE DE SEINE : PEUPLEMENTS ET ESPECES BENTHIQUES EN REGIME PERTURBE.

CABIOCH L. \*, RETIERE C. \*\*.

Les écosystèmes côtiers de la baie de Seine, largement ouverts, soumis à un régime macrotidal, subissent l'influence d'apports fluviaux importants, entraînant des agents polluants d'origine industrielle, agricole et urbaine. Distinguer et mesurer les effets perturbants des polluants à travers la variabilité naturelle des systèmes vivants est une entreprise difficile, surtout si l'on veut prendre en compte, ce qui est idéalement souhaitable, tous les maillons de l'écosystème, analyser les relations entre les diverses composantes et surtout cerner les mécanismes qui en régulent le fonctionnement (contraintes physiques de l'environnement et/ou facteurs biotiques).

En raison des effectifs engagés dans le programme Baie de Seine et des spécialités disponibles il n'a pas été possible de procéder à une telle étude intégrale et il est apparu judicieux de concentrer les efforts de recherche sur le benthos, compartiment de l'écosystème qui s'avère le témoin le plus permanent des modifications du milieu.

Au sein même de cette entité l'analyse des mécanismes fonctionnels et la détection d'impacts (d'apports polluants par exemple) peuvent être envisagées à des niveaux structuraux différents: le peuplement, la population et l'individu. Le "bon fonctionnement" de chacun d'eux peut être évalué au travers de la variabilité du ou des paramètres qui en caractérisent le mieux "l'état physiologique" par comparaison à des états de référence intégrant les fluctuations spatio-temporelles (variations saisonnières, annuelles, pluriannuelles...) le long d'un gradient de perturbation ou dans un site considéré comme sain.

Mais à cet égard, il convient de remarquer dès à présent que la mortalité sous effet de pollutions chroniques n'intervient souvent que sous l'influence à long terme de stress ou de déviations métaboliques apparemment sans effet à court terme. Il importe donc de disposer d'un certain nombre de techniques permettant d'apprécier des niveaux de pollution suffisamment faibles pour ne pas entraîner de mortalité immédiate mais cependant susceptibles de conduire à des modifications des équilibres écologiques.

Le souci de tenir compte du décalage temporel des réponses du milieu vivant aux altérations de l'environnement a guidé la double approche des recherches entreprises en Baie de Seine :

- la définition d'indices et/ou l'évaluation quantitative de paramètres reflétant l'état physiologique d'une espèce ou d'une population et leur utilisation pour détecter les effets de stress dans les gradients de pollution, sans omettre les phénomènes de bioaccumulation des éléments polluants au sein des organes, tissus et cellules de l'individu;
- l'étude de la cinétique d'un peuplement et de ses populations dominantes en s'efforçant de faire la part des fluctuations naturelles et de celles liées aux actions anthropiques.

Confrontés entre eux et interprétés à la lumière des données apportées par

\* Station Biologique, 29211 Roscoff.

\*\* Laboratoire Maritime, M.N.H.N., 17, Avenue Georges V, 35801 Dinard.



les autres disciplines les résultats acquis permettent de dissocier certains enseignements relatifs à une unité de peuplement benthique qui sont propres à la baie de Seine et ceux qui ont une portée scientifique plus générale.

## 1.- LE PEUPELEMENT A ABRA ALBA.

### 1.1. Choix du peuplement :

Il est classiquement admis que la communauté des sédiments fins à *Abra alba* étudiée dans la plupart des mers nord-européennes et présentant une forte richesse en espèces et en individus associée à une production élevée, joue un rôle déterminant dans l'économie de ces mers.

Un peuplement de ce type a été décrit en Baie de Seine lors de la phase d'exploration biocénotique de la Manche dans le cadre de la RCP 378 et du GRECO 19 (Cabioch & Gentil, 1975; Gentil, 1976 et 1980); il y revêt, de par son extension, une importance toute particulière.

Confiné en fond de baie en raison de la distribution sédimentaire dépendante de l'intensité des courants de marée, il jouxte l'estuaire de la Seine et constitue, de ce fait, le peuplement benthique marin le plus directement soumis aux apports fluviaux polluants.

### 1.2. Caractéristiques générales du peuplement :

La communauté à *Abra alba* - *Pectinaria koreni*, la plus riche en espèces et en individus de la baie de Seine (Gentil, 1975) est une des plus vastes enclaves de peuplement de sédiments fins, localisées en Manche dans les baies : baie de Morlaix (Cabioch, 1968), baies de Saint-Brieuc et du Mont Saint-Michel (Rétière, 1979), baie de Somme (Cabioch & Glaçon, 1975), baies de la côte anglaise (Holme, 1961, 1966). Le caractère insulaire de cette distribution pose immédiatement le problème de la dissémination des larves pélagiques (transport advectif et dispersion turbulente) et du maintien de la communauté; en Baie de Seine il soulève avec une grande acuité celui de la reconstitution du peuplement en cas d'altération profonde.

A l'est d'une ligne joignant le port du Havre à Deauville le peuplement est relayé par un ensemble faunistique appauvri au caractère estuarien affirmé (Gentil, 1975; Proniewski & Elkaïm, 1980).

### 1.3. Peuplement du secteur d'étude :

A la limite de l'estuaire trois stations, bien que proches les unes des autres (1 millé), se répartissent le long d'un gradient édaphique naturel et à une distance croissante des sources de dessalure et d'apports polluants. Une station de référence en régime côtier, à l'écart de l'estuaire, a été retenue dans le port d'Antifer.

L'analyse des paramètres qui caractérisent leur peuplement révèle leur appartenance à trois faciès se succédant vers l'estuaire : un faciès sableux (station B, voir Gentil *et al.*, ce colloque, un faciès sablo-vaseux (station A) et un faciès vaseux (stations E et N). La composition spécifique du faciès sableux est comparable à celle du faciès sablo-vaseux, mais seulement moins riche en individus; le faciès vaseux apparaît comme un faciès d'appauvrissement (richesse spécifique et densité moyenne plus faibles). Ces trois faciès présentent un noyau commun de 12 espèces constantes et sont sur le plan trophique dominés par les suspensivores et dépositivores de surface.

Enfin on constate qu'un nombre limité d'espèces développent des populations denses dont la dynamique contrôle celle du peuplement. Dans toute la mesure du possible, l'étude des effets subléthaux des "polluants" et les phénomènes de bioaccumulation ont porté sur des représentants de populations dominantes. Cependant des espèces appartenant à d'autres communautés et étudiées en divers secteurs des côtes françaises ont été testées en Baie de Seine; à titre comparatif elles constituent en effet de précieux témoins.

## 2.- LES POLLUANTS ET LE MILIEU VIVANT.

### 2.1. Les effets subléthaux :

Pour évaluer les effets subléthaux des polluants rejetés dans le milieu naturel une première méthode d'approche consiste à utiliser un certain nombre d'indices biochimiques susceptibles de traduire à un instant donné l'état physiologique général d'un organisme ou d'une population. C'est ainsi que des altérations du fonctionnement de certaines enzymes peuvent être décelées pour des niveaux nuls de toxicité directe.

#### 2.1.1. Les mesures d'activité des systèmes enzymatiques étudiés (ATPases branchiales; système LDH - ODH; GDH).

Des résultats concluants ont été obtenus avec la G.D.H., enzyme reliée au métabolisme excréteur qui fait preuve d'une sensibilité particulière aux pollutions organiques à fort pourcentage de matière azotée (Batreil & Le Gal, 1982). En Baie de Seine, à la limite de l'estuaire, les effets de la charge organique sur ce système enzymatique disparaissent rapidement dès que l'on s'écarte de quelques milles; la faible distribution spatiale de cet effet témoigne probablement du rôle important du renouvellement d'eau par convergence des courants résiduels de fond en direction de l'estuaire.

Toutefois la diversité des conditions de mesure des activités enzymatiques selon les groupes zoologiques d'une part et l'extrême variété des modes d'action des polluants (métaux, hydrocarbures, substances organiques) sur les systèmes enzymatiques ou les structures cellulaires d'autre part, constituent un obstacle majeur à l'utilisation de cette méthode.

L'attention s'est donc portée sur un type d'indice indépendant du niveau évolutif ou écologique des organismes et susceptible de refléter le statut métabolique général quels que soient les agents extérieurs mis en jeu : la charge énergétique adénylique (C.E.) semblait répondre à ces critères.

#### 2.1.2. La charge énergétique adénylique.

Les mesures de nucléotides sont extrêmement délicates et ont nécessité au cours de la première phase de recherches la mise au point de la technique de récolte et de préparation du matériel biologique et l'affinement de la méthode d'analyse.

Il aurait été préférable d'effectuer les mesures de C.E. sur les hôtes les plus permanents de la communauté benthique, spécialement sur les représentants dominants de la faune endogée, suspensivores ou dépositivores de surface ou de sub-surface (*Owenia fusiformis*, *Pectinaria koreni*, *Abra alba*). Cependant il a fallu concilier les contraintes d'échantillonnage liées aux faibles densités des populations à la station la plus interne (E) et les quantités de matériel nécessaire au biochimiste. De ce fait il n'a pas été possible d'établir de comparaisons statistiques valables pour ces espèces entre les résultats correspondant aux stations jalonnant la radiale face à l'estuaire. Les analyses ont, de ce fait, été effectuées sur des échantillons de populations d'autres espèces. Le Mollusque Gastéropode nécrophage *Nassarius reticulatus* et le Crustacé Décapode Natantia prédateur *Crangon crangon* (crevette grise).

A travers ces deux espèces il apparaît clairement qu'en Baie de Seine, les valeurs de la C.E. sont significativement inférieures à celles que l'on détermine dans un système de référence non pollué (Baie de Concarneau) (Sylvestre *et al.*, ce colloque); toutefois il se peut que l'altération métabolique n'affecte qu'une fraction de la population.

En raison de la brièveté du cycle biologique de *Crangon crangon* et du changement de localisation, maintenant bien établi, des populations entre estuaires interne et externe selon les saisons, les périodes de crues et d'étiage (Marchand, 1981), il est à peu près certain que les résultats obtenus en mai et septembre en Baie de Seine ne se rapportent pas à la même population. Au sud



du banc du Ratier les conditions environnementales engendreraient rapidement un déséquilibre du métabolisme général de ce Crustacé, qui, en raison de la succession rapide des générations sur le site présenterait un caractère permanent.

L'absence de différence significative entre les échantillons de *Nassarius reticulatus* provenant des trois stations A, B et E n'est sans doute pas sans relation avec le degré de mobilité de ces organismes, capables d'effectuer des déplacements d'amplitude non négligeable au cours de migrations saisonnières ou sous l'influence des stimuli chimiques des proies (Tallmark, 1980). Même faible la probabilité de mélange des populations analysées existe.

Mais les travaux poursuivis en ce domaine ont une portée qui dépasse largement la baie de Seine. Ils ont en effet démontré que l'évolution du rapport de la charge énergétique aux nucléotides totaux représente un signal de déséquilibre encore plus sensible que la charge énergétique elle-même. Les résultats permettent donc d'envisager favorablement la réalisation des suivis réguliers de zones sensibles basés sur la mesure des nucléotides adényliques et la détermination de la charge énergétique. Il conviendra soit de préciser le point de référence le mieux adapté à l'établissement d'une comparaison avec le site étudié ou de sélectionner judicieusement les stations le long d'un gradient de perturbation. En outre, il faudra choisir des espèces fixes ou endogées du peuplement à durée de vie plus ou moins longue et définir l'échelle temporelle d'observation en fonction des modifications, cycliques ou non, de l'environnement (périodicité des rejets, crues...).

### 2.1.3. Les anomalies pigmentaires.

Chez les animaux, les caroténoïdes sont d'origine alimentaire. Outre le fait que l'évaluation de leur teneur peut apporter des informations sur l'alimentation et l'état trophique des individus, il semblerait selon Karnaukov *et al.* (1977) que certains Mollusques Lamellibranches et Gastéropodes des fonds littoraux de la Mer Noire auraient une résistance à la pollution et à l'anoxie d'autant plus grande qu'ils seraient plus riches en caroténoïdes.

Mais les méthodes généralement utilisées pour les dosages des caroténoïdes extraits d'un milieu naturel, basées sur la spectrométrie d'absorption visible, nécessitent une préparation longue de l'échantillon à analyser. Il importait donc de mettre au point un outil méthodologique permettant leur dosage rapide en milieu marin. Cet objectif a été pleinement atteint, la spectrométrie Raman de résonance autorisant des analyses quantitatives des caroténoïdes d'une solution non purifiée sans interférence avec les autres constituants du mélange (Merlin *et al.*, ce colloque).

La seconde étape consistait à appliquer cette nouvelle méthodologie à la macrofaune d'invertébrés benthiques de la baie de Seine et à comparer les résultats à ceux obtenus sur des échantillons de référence provenant des sédiments subtidiaux de même nature de la région de Roscoff. En fait, il n'apparaît aucune variation quantitative significative entre les organismes des zones supposées les plus polluées et le secteur de référence, quel que soit leur régime alimentaire (suspensivore, dépositivore ou prédateur-nécrophage) (Merlin *et al.*, ce colloque). Il est vrai que la teneur en caroténoïdes des sédiments où vivent ces populations, qui a pour origine les microphytes du film superficiel et les bactéries anaérobies, est en général relativement faible.

Aussi, avant de proposer l'utilisation de cette méthode maintenant parfaitement maîtrisée au plan technique en vue de suivis écologiques, il paraît souhaitable d'envisager :

- l'analyse de la variabilité des taux de caroténoïdes au sein du matériel biologique en fonction de l'espèce, de l'âge, de l'état physiologique des individus, de la présence de pigments exogènes...
- L'étude des effets de la nature de la pollution et de son intensité en

travaillant sur des systèmes "témoin et perturbé" plus tranchés (aux conditions d'anoxie importantes par exemple).

Enfin, il pourrait être intéressant de transposer et de tester ce type de recherches sur des organismes de substrats durs dont la teneur en caroténoïdes, dépendante du couvert végétal, est nettement plus élevée.

## 2.2. Les phénomènes de bioaccumulation :

Les organismes vivant en Baie de Seine subissent une contamination permanente par des éléments stables et radioactifs. A cet égard les travaux entrepris sur un certain nombre d'espèces d'Invertébrés benthiques ont eu pour objet d'une part de détecter les éléments chimiques responsables, d'autre part d'en déterminer le métabolisme. Les méthodes de microanalyse (spectrographie des rayons X et analyse par émission ionique secondaire) sont bien adaptées à ce type de recherche.

Parmi la masse importante des résultats acquis, seuls ceux relatifs à un petit nombre d'éléments intéressant conjointement les chimistes et les sédimentologues sont exposés ici (Chassard-Bouchaud *et al.*, ce colloque).

### 2.2.1. Situation de la baie de Seine par rapport à l'ensemble du littoral français.

Les analyses ont porté sur le Mollusque Lamellibranche *Mytilus edulis* à très grande capacité de filtration. De l'ensemble des données il ressort que :

- les valeurs les plus élevées en argent, élément particulièrement toxique, sont celles relevées en Baie de Seine même si toutes les eaux côtières apparaissent contaminées par ce métal. Cette observation n'est sans doute pas sans rapport avec le fait que l'argent est l'un des métaux présentant dans les suspensions de l'estuaire de la Seine (Quillebeuf) le plus fort facteur d'enrichissement par rapport à la croûte terrestre (Guéguénat *et al.*, ce colloque).

- Les valeurs en La sont deux fois plus élevées entre le nord Cotentin et le Pas-de-Calais que dans les autres secteurs côtiers. Guéguénat *et al.* (op. cit.) signalent d'ailleurs que vis-à-vis de cet élément, la baie de Seine s'avère un système perturbé en comparaison d'autres systèmes marins (baie du Mont-Saint-Michel par exemple), les valeurs normalisées au scandium étant très élevées pour les suspensions et les sédiments du secteur oriental de la baie. Il est fort probable que le La accumulé par les organismes a une double origine: naturelle et dépendante des rejets (phosphogypses).

- Les plus fortes valeurs en uranium sont détectées sur les échantillons de la baie de Seine.

### 2.2.2. Bioaccumulation en Baie de Seine le long du gradient de perturbation étudié, face à l'estuaire de la Seine.

Les résultats concernant le fer, le cuivre, l'argent et le lanthane démontrent que :

- a) les teneurs en Fe et Cu sont toujours plus élevées à la station E qu'à la station A tant chez les organismes filtreurs endogés (*Abra alba* et *Cultellus pellucidus*) que chez le dépositivore de surface *Owenia fusiformis*;
- b) les valeurs en Ag et La sont équivalentes aux deux stations de la radiale sauf pour *Owenia fusiformis* présentant des teneurs plus fortes à la station la plus interne;
- c) l'uranium n'a été mis en évidence que chez *Cultellus pellucidus* et *Crangon crangon*.

Pour progresser dans l'interprétation des phénomènes de bioaccumulation il faudrait, semble-t-il, travailler simultanément sur les eaux, les suspensions, les sédiments et les organismes et tenir compte de l'activité de bio-



turbation de la faune endogée (ingestion et rejet particuliers, creusement de galeries) susceptible d'entraîner une migration des éléments vers les couches sédimentaires profondes (in Cockran, 1984).

### 2.2.3. Le métabolisme des éléments.

Les analyses entreprises sur le matériel biologique de la baie de Seine montrent que les voies d'absorption sont transtégumentaire, branchiale et digestive. Les sites principaux de rétention sont toujours la glande digestive et la branchie, auxquelles s'ajoutent chez les Crustacés, le muscle (partie comestible) et l'exosquelette qui participe, lors des mues, à une détoxification partielle de l'individu. Chez les Annélides uniquement, l'épithélium tant tégumentaire que digestif est un site électif de rétention. La comparaison des teneurs de tous les éléments relevés au point A et au point E fait ressortir qu'en A les bioaccumulations sont toujours plus importantes dans l'épithélium tégumentaire alors qu'en E les teneurs de l'épithélium digestif sont toujours les plus élevées en lanthanides. Dans tous les organismes les macrophages, cellules douées de mouvements amiboïdes et d'une activité phagocytaire intense, jouent un rôle fondamental dans la capture, le stockage et le transport des éléments contaminants. Enfin lysosomes et sphérocristaux se révèlent les principaux organites cibles de concentration des métaux, qui, associés au phosphore, se présentent sous forme de phosphates. Ces résultats contribuent de façon tout à fait significative à une meilleure connaissance du métabolisme de nombreux éléments qui n'avaient jusqu'alors été étudiés que chez les Vertébrés. Mais peut-être conviendrait-il par des expérimentations de contamination métallique de quantifier plus précisément les données acquises et de déterminer le seuil d'accumulation que peuvent tolérer organes, tissus et cellules.

## 3.- CINETIQUE DU PEUPLEMENT ET DES POPULATIONS PRINCIPALES DU PEUPLEMENT A ABRA ALBA - PECTINARIA KORENI.

### 3.1. L'analyse quantitative numérique du peuplement à *Abra alba* - *Pectinaria koreni*.

Poursuivie pendant deux ans et demi, elle souligne plusieurs faits majeurs (Gentil *et al.*, ce colloque) :

- la densité moyenne à la station A, comparable aux valeurs les plus élevées obtenues pour les peuplements du même type à l'échelon mondial (Dauvin, 1984), traduit vraisemblablement un apport en matière organique important mais cependant insuffisant pour modifier l'activité du système enzymatique G.D.H. des espèces testées;
- la densité moyenne à la station A, beaucoup plus élevée qu'en N et E qui sont en fait des faciès d'appauvrissement, est sous le contrôle principal des populations de deux espèces, *Tharyx marioni* et *Mysella bidentata*; alors qu'un remaniement hiérarchique intéresse les autres composantes du peuplement, ces deux espèces sont dominantes tout au long de l'année;
- l'évolution de la richesse spécifique du peuplement de la station A se caractérise par un minimum hivernal et un maximum estival-automnal qui correspondent classiquement dans les mers des régions tempérées aux intrusions sur les fonds côtiers de certaines espèces lors du réchauffement des eaux et au recrutement d'espèces qui disparaissent en fin d'automne ou durant l'hiver, les conditions écologiques ne satisfaisant pas aux tolérances ou exigences des populations adultes;
- l'évolution de l'abondance qui suit celle de la richesse spécifique est cependant plus nette et itérative en A qu'en N et E, dont les biotopes sont affectés, naturellement ou par l'intermédiaire des activités humaines, de variations plus amples et moins régulières de l'environnement. Mais, de ce

point de vue il importe de signaler le rôle que revêt le type de distribution spatiale des organismes (variable dans le temps) pour l'échantillonnage et par voie de conséquence l'évaluation de la densité des populations et des peuplements.

### 3.2. Les fluctuations d'abondance des populations :

La tendance de l'évolution annuelle de la densité du peuplement est imprimée, en Baie de Seine, par les fluctuations d'abondance d'un nombre très limité d'espèces qui sont pour la plupart communes aux différents faciès.

#### 3.2.1. Caractéristiques biologiques des populations dominantes :

Dans les mers boréales et particulièrement en Manche, la plupart des espèces des peuplements côtiers se reproduisent et recrutent au printemps et (ou) en été. En Baie de Seine les espèces dominantes du peuplement à *Abra alba* ont pour la majorité une période de reproduction unique (ou au moins une période très largement prépondérante) et un cycle de développement indirect. En effet, à l'exception de *Tharyx marioni* et *Chaetozone setosa* uniquement présentes à la station A dont le développement est direct ou à phase pélagique très brève, toutes les espèces dominantes de la station la plus interne ont une vie larvaire pélagique relativement longue (entre 1 et 2 mois). Or, c'est l'hydrodynamisme qui est le moteur de la dissémination des populations méroplanctoniques et si, en Baie de Seine, on admet pour la circulation résiduelle au voisinage du fond un ordre de grandeur de 5 cm/sec face à l'estuaire de la Seine (Le Hir *et al.*, ce colloque) la distance théorique que peut parcourir une larve est de l'ordre de 120 à 250 km sans tenir compte de la dispersion turbulente. Bien évidemment, cette évaluation est maximale, les larves pouvant occuper différents niveaux de la colonne d'eau et ne se comportant pas comme des particules d'eau. Du fait que le flux de circulation résiduelle de fond, dans ce secteur de la baie, se dirige vers l'estuaire (Le Hir *et al.*, ce colloque), l'eau de mer venant "saler" les eaux de la Seine, il est quasiment certain que l'approvisionnement des fonds proches de l'estuaire peut se réaliser aux dépens de populations larvaires issues de toute l'unité de peuplement, y compris sa frange la plus externe. Encore faut-il que les conditions météorologiques (tempêtes par exemple) n'interviennent pas pour chasser temporairement les eaux hors de la baie (une réintrusion ultérieure étant d'ailleurs toujours possible). Arrivées à la limite de l'estuaire, les larves doivent en outre trouver des conditions favorables à leur établissement, à leur recrutement sur le fond. Or, il s'avère que c'est au printemps et en été, époque préférentielle du recrutement des post-larves que la stabilité du substrat est maximale; c'est également durant la saison d'étiage que le niveau de rejet des polluants (métaux lourds, PCB...) est le plus bas dans les eaux et les sédiments (Avoine, ce colloque).

La cinétique du peuplement, sans anomalies apparentes à l'échelle de temps d'observation (2-3 ans) et par comparaison avec les peuplements du même type des régions ou mers voisines, tient donc non seulement à la très grande extension du peuplement dans la partie orientale de la baie et à la "sélection" d'espèces à développement indirect en limite d'estuaire mais surtout à la discordance de phase à effets positifs tout à fait remarquable rencontrée dans ce secteur entre les processus perturbateurs (crues, tempêtes, apports polluants...) et les étapes fondamentales du déroulement des événements biologiques. Ce constat incite à contrôler en continu l'évolution des principaux paramètres physico-chimiques afin d'identifier avec finesse leur périodicité.

Enfin, il faut bien voir qu'une telle extension d'un peuplement aussi riche, diversifié et abondant face à l'estuaire d'un grand fleuve n'est possible que grâce à l'intensité du régime macrotidal qui contrebalance les influences des apports fluviaux dispersant les particules et les polluants



potentiels et permettant l'existence d'un milieu hypertrophique sans phénomène d'anoxie du sédiment.

### 3.2.2. Cinétique démographique comparée le long du gradient d'étude :

Elle concerne deux espèces, l'Annélide Polychète *Pectinaria koreni* et le Mollusque Lamellibranche *Abra alba* dont les populations ont été suivies respectivement aux stations A et E en 1982 (Gentil *et al.*, ce colloque).

Bien que les densités soient beaucoup plus élevées à la station A (valeurs moyenne et maximale) l'évolution de la structure démographique des populations de *Pectinaria koreni*, basée sur la mesure du diamètre du disque céphalique montre clairement que le cycle biologique, de type univoltin, se déroule globalement de manière identique dans les deux sites. Le ponte se produit quasi simultanément et le recrutement principal des juvéniles (sur maille de 1 mm) se produit en mai-juin, suivi d'une seconde vague, d'amplitude beaucoup plus limitée, observée en été, à la station A (juillet-septembre) et plus tardivement à la station E. L'espèce dont les individus ont une croissance printanière et estivale plus forte dans les fonds côtiers très envasés (sans doute en raison du mode d'alimentation) a une durée de vie comprise entre 15 et 18 mois.

Elle apparaît donc, comparée à nombre d'espèces principales du peuplement pour lesquelles nous disposons à ce sujet d'informations précises grâce aux données recueillies au sein du GRECO par les biologistes des Stations Marines de Roscoff, Dinard, Luc-sur-Mer et Wimereux qui constituent des observatoires privilégiés le long du littoral français, comme une espèce à durée de vie brève (au même titre par exemple que l'Annélide Polychète *Ampharete acutifrons* en Rance). Toutefois, la valeur de ce paramètre qui entre dans la définition des stratégies démographiques des populations (stratégies r-k) est du même ordre de grandeur que celui trouvé par les chercheurs ayant travaillé ailleurs en Europe sur la même espèce. Par contre, la longévité de cette espèce contraste nettement avec celle du Lamellibranche *Abra alba* dont les histogrammes de distribution de fréquence de taille, polymodaux, laissent présager, à la même station E, une durée de vie de plusieurs années (2 à 3 ans), longévité intermédiaire entre celles des populations nordiques et méridionales de la même espèce. Mais il va de soi que la durée de vie d'une espèce et la structure démographique de sa population en un biotope déterminé ne sont pas sous le seul contrôle des paramètres physiques, mais peuvent être contrôlées par des relations de type densité-dépendance ou de nature trophique. Il faut d'ailleurs remarquer que les prédateurs potentiels (poissons nectobenthiques) sont présents à l'état de juvéniles sur les nurseries littorales de la baie de Seine et il est bien connu que d'une manière générale ils s'alimentent, *pro parte*, sur le méiobenthos permanent et temporaire mais aussi sur les juvéniles d'espèces benthiques. Quoiqu'il en soit coexistent, sur le même site, en limite d'estuaire, là où les conditions de l'environnement fluctuent abondamment, des populations de longévité quelque peu différente.

Comme nous l'avons déjà souligné, la nature des cycles biologiques des espèces dominantes, avec longue phase pélagique, dont l'aire de répartition en Baie de Seine orientale est vaste, est un élément favorable au maintien des populations malgré les effets perturbateurs de l'estuaire (et des polluants qui s'y déversent).

On ne doit cependant pas oublier qu'un événement majeur (climatique ou pollution accidentelle à grande échelle) pourrait avoir des conséquences drastiques sur certaines composantes du peuplement et mettre en cause la régularité de son fonctionnement.

### DISCUSSION - CONCLUSION

La composition faunistique des faciès du peuplement à *Abra alba* - *Pectinaria koreni* ne reflète pas un état de déséquilibre profond de la communauté



semblable à celui observé en Baltique et en Mer du Nord. Bien qu'en limite de l'estuaire, la richesse spécifique diminue, le stade de pollution extrême avec disparition presque totale de la macrofaune et prolifération d'espèces "opportunistes indicatrices" n'est pas atteint (Pearson *et al.*, 1978).

Pourtant certaines populations d'invertébrés qui accumulent dans leurs organes ou leurs tissus des éléments métalliques dont quelques uns comme l'Ag sont particulièrement toxiques, présentent des caractéristiques physiologiques amoindries, les valeurs de la C.E. devenant proches de celles d'un état subléthal. A cet égard, il convient de rappeler que les faibles valeurs de la C.E. peuvent ne concerner que certains individus d'une population. De plus, le déroulement de la maturation des gamètes et le déclenchement de la ponte apparemment normaux ne signifient pas pour autant, que la reproduction s'effectue avec une totale efficacité, les larves qui alimentent le biotope étudié n'étant pas toutes issues de la population qui l'occupe.

L'analyse dynamique de la structure numérique du peuplement à l'aide des diagrammes "Rang-Fréquence" de Frontier (1976) tend à accorder à la communauté un caractère pionnier, juvénile. Il semble intéressant à ce propos de souligner qu'à partir d'observations relatives à des peuplements planctoniques, Amblard (1978) et Romano (1981) suggèrent que les faibles valeurs de C.E. pourraient correspondre à ces écosystèmes immatures. La C.E. servirait alors à évaluer les contraintes d'adaptation d'une population aux conditions du milieu.

Généralement on admet que les peuplements qualifiés de pionniers sont sous prédominance des actions de "contrôle physique" (Sanders, 1968; Frontier 1976 et 1977). Toutefois, personne de nos jours n'accorde plus aux seules contraintes de l'environnement ou aux interactions biotiques un rôle exclusif dans la régulation des populations: depuis longtemps déjà une approche systématique du couple population-environnement s'est développée.

Pour leur part, les variations du milieu interviennent sur les populations par leur intensité, leur amplitude, mais aussi, lorsqu'elles ont un caractère périodique par leur concordance ou discordance de phase avec les processus biologiques. Sur l'exemple de la baie de Seine, à l'échelle de temps (quelques années), d'espace et d'observation il est bien certain qu'une discordance à effets positifs entre les processus physiques et biologiques saisonniers contribue largement à assurer la pérennité d'un peuplement soumis à perturbations en limite estuarienne; de fait, la communauté analysée pendant le suivi (1981-1983) ne semble pas différer sensiblement de celle identifiée au début de la précédente décennie (1971-1973) bien qu'à cette époque, les débits de la Seine fussent nettement plus faibles (Avoine, ce colloque).

Récemment Silvert (1983) a rappelé que pour comprendre l'incidence d'un facteur particulier sur un écosystème il ne suffit pas seulement de connaître son importance par rapport aux composantes biologiques mais également la vitesse à laquelle cet écosystème réagit. En effet, il semble bien que certains écosystèmes ont des fréquences de résonance caractéristiques, c'est-à-dire qu'une perturbation même légère de l'environnement, à l'une de ces fréquences, peut entraîner des changements considérables dans le développement des populations.

On voit donc que les premiers résultats des recherches engagées en Baie de Seine s'inscrivent pleinement dans le récent courant d'idées selon lesquelles les processus hydrodynamiques et les réponses biologiques sont interactifs à différentes échelles de temps et d'espaces (Legendre et Demers, 1984) et illustrent parfaitement tout l'intérêt qui doit être porté aux plans d'échantillonnage, spécialement au pas de temps, afin d'explorer des variations significatives.

Mais pour essentielle que soit la mise en évidence de ces niveaux de corréla-



tions, l'interprétation des mécanismes écologiques intégrant les interactions biotiques qui contribuent à réguler les populations et à structurer les peuplements, doit être entreprise conjointement.

En conclusion, il apparaît qu'en Baie de Seine les réponses des différents niveaux de structuration du benthos (individu, population, peuplement) aux perturbations naturelles ou anthropiques de l'environnement sont extrêmement complexes et par certains côtés contradictoires. Ainsi, la structure du peuplement des sédiments fins de la partie orientale de la baie et sa cinétique reflètent un fonctionnement apparemment normal mais de fait, largement dépendant des modalités de circulation résiduelle de fond au débouché de l'estuaire. Cependant, les faibles valeurs de C.E., les fortes accumulations d'éléments nocifs au sein des tissus et organes de plusieurs espèces se révèlent de véritables signaux d'alarme, témoins d'une altération plus ou moins profonde du métabolisme de certains individus.

Pour continuer de progresser dans le domaine du fonctionnement des écosystèmes côtiers perturbés, il semble donc qu'il faille simultanément :

- cerner les étapes les plus critiques du cycle de vie des principales espèces, phases qui sont responsables de la variabilité temporelle quantitative des populations;
- rechercher les tests biochimiques, qui, traduisant un statut métabolique général indépendant de la nature des agents extérieurs, aient le caractère le plus universel possible;
- enfin, suivre le cheminement des éléments polluants rejetés (métaux, radio-nucléides artificiels) à travers le milieu vivant (cycles biogéochimiques).

A l'égard des problèmes soulevés et compte tenu de son originalité (régime macrotidal), la Manche constitue, pour les équipes du GRECO, en raison de l'expérience pluridisciplinaire et des connaissances acquises, un champ d'observations tout à fait exemplaire.

- 
- Amblard C., 1978.- Application du dosage des Adénosines 5'phosphate à l'étude d'un phytoplancton lacustre (lac Pavin). Thèse Doct. Univ. Clermont-Ferrand, 1-192.
- Cabioch L., 1968.- Contribution à la connaissance des peuplements benthiques de la Manche occidentale. Cah. Biol. Mar., 9, 5, 493-720.
- Cabioch L. & Gentil G., 1975.- Distribution des peuplements benthiques dans la partie orientale de la baie de Seine. C.R. Ac. Sci., Paris, t; 280 D, 571-574.
- Cabioch L. & Glaçon R., 1975.- Distribution des peuplements benthiques en Manche orientale, de la baie de Seine au Pas-de-Calais. C.R. Acad. Sci., Paris, 280, 491-494.
- Cockran J.K., 1984.- The fates of Uranium and Thorium Decay Sciences Nuclides in the estuarine environment. In : The estuary as a filter. Edt. V.S. Kennedy, Academic Press, 179-220.
- Dauvin J.C., 1984.- Dynamique d'écosystèmes macrobenthiques des fonds sédimentaires de la baie de Morlaix et leur perturbation par les hydrocarbures de l'Amoco-Cadiz. Thèse Doct. Etat, Univ. P. & M. Curie, Paris 6, 1-469.
- Frontier S., 1976.- Utilisation des diagrammes rang-fréquence dans l'analyse des systèmes. J. Rech. océanogr., 1,3, 35-48.
- Frontier S., 1977.- Réflexions pour une théorie des écosystèmes. Bull. Ecol., 8, 4, 445-464.

- Gentil F., 1976.- Distribution des peuplements benthiques en Baie de Seine. Thèse 3ème cycle en océanographie biologique, Univ. Paris 6, 1-70.
- Gentil F., 1980.- Les peuplements benthiques de la baie de Seine : Caractères généraux et liaisons biogéographiques. C.R. 105ème Congrès Nat. Soc. Sav., Caen, Sci., 3, 125-238.
- Holme, N.A., 1961.- The bottom fauna of the English Channel. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 41, 397-461.
- Holme, N.A., 1966.- The bottom fauna of the English Channel. Part II. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 46, 401-493.
- Karnaikov V.N., Milovidoua N.Y. & Kargopolova I.N., 1977.- On a role of carotenoids in tolerance of sea molluscs to environment pollution. Comp. Biochem. Physiol., 56A, 189-193.
- Legendre L. & Demers S., 1984.- Towards dynamic biological oceanography and limnology. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 41, 2-19.
- Lewis J.R., 1980.- Options and problems in environmental management and evaluation. Helgoländer Meeresunters., 33, 452-466.
- Marchand J., 1981.- Observations sur l'écologie de *Crangon crangon* (Linné) et *Palaemon longirostris* H. et Milne Edwards (Crustacea, Decapoda, Natantia) dans l'estuaire interne de la Loire (France). Vie et Milieu, 31, 1, 83-92.
- Pearson T.H., Rosenberg R., 1978.- Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 16, 229-311.
- Proniewski F. & Elkaïm B., 1980.- Benthos subtidal de l'estuaire de la Seine. Résultats préliminaires. C.R. Acad. Sci. Paris, t 291D, 545-547.
- Retière C., 1979.- Contribution à la connaissance des peuplements benthiques du golfe normano-breton. Thèse Doct. Etat., Univ. Rennes, 1-431.
- Romano J.C., 1981.- Aperçu sur la notion de "charge énergétique" et sur son utilisation en écologie planctonique. Oceanis, 7, 7, 827-843.
- Sanders, H.L., 1968.- Marine benthic diversity. A comparative study. American Naturalist, 102 (925), 243-282.
- Silvert W., 1983.- Amplification of environmental fluctuations by marine ecosystems. Oceanol. Acta. Actes 17ème Symposium Européen de Biologie Marine, Brest, 27 septembre-1er octobre 1982, vol. spéc., 183-186.
- Tallmark, B., 1980.- Population dynamics of *Nassarius reticulatus* (Gastropoda, Prosobranchia) in Gullmar Fjord, Sweden. Mar. Ecol. Prog. Ser., 3, 51-62.





INTERET DE LA MICROSCOPIE ANALYTIQUE POUR L'ETUDE D'IMPACT DE METAUX TRACES ET DE TERRES RARES SUR LE MILIEU VIVANT, APPLICATION A L'ETUDE D'UNE ZONE POLLUEE: LA BAIE DE SEINE.

CHASSARD-BOUCHAUD C.\*, \*\*, NOEL P.\*, HUBERT M.\*, HALLEGOT P.\*\*.

Les organismes vivant dans la baie de Seine, où se déversent les eaux d'un bassin fluvial important, drainant de nombreux agents toxiques d'origine industrielle (en particulier phosphogypses et  $TiO_2$ ), agricole et urbaine, subissent une contamination permanente dont l'impact est actuellement peu ou mal connu. Pour déterminer les éléments bioaccumulés par les animaux, on utilise généralement des méthodes d'analyse globale qui nécessitent de longs temps d'investigation et des quantités de matériel biologique d'autant plus importantes que l'élément recherché n'existe qu'à l'état de traces. En outre, les résultats ne renseignent pas sur le métabolisme minéral propre à chaque espèce (simplement adsorption ou absorption, stockage, excrétion et détoxification) et différent selon les éléments.

Pour détecter et visualiser les éléments et en connaître le métabolisme, seules les méthodes de microanalyse ponctuelle, ne nécessitant que peu de matériel, permettent de répondre, rapidement et sans ambiguïté, aux questions posées. Les analyses se font "*in situ*" sur coupe fine ou ultrafine à l'aide de microanalyseurs associés à un microscope photonique ou électronique; on peut ainsi déterminer l'organe, le tissu, la cellule ou l'organe cible de bioaccumulation.

## 1. MODELES BIOLOGIQUES ET METHODES

### 1.1. Modèles biologiques :

Ils sont constitués par les Invertébrés benthiques choisis pour l'ensemble du programme, comme organismes indicateurs faisant l'objet d'un suivi écologique :

Crustacés Décapodes : *Crangon crangon* (crevette grise), prédateur et omnivore, vivant dans le sable.

Mollusques lamellibranches : *Mytilus edulis*, filtreur, vivant en faciès essentiellement rocheux. *Abra alba* et *Cultellus pellucidus*, filtreurs et vivant dans les sédiments.

Annélides polychètes : *Owenia fusiformis*, lécheur et filtreur, vivant dans les sédiments. Ces trois dernières espèces ont été prélevées au point "A" très envasé et au point "E", plus proche de l'estuaire, très perturbé et appauvri du point de vue faunistique puisque on y assiste à la disparition totale de certaines espèces (Gentil *et al.*, 1985). En outre, des *Mytilus sp.* ont été récoltées en d'autres stations des côtes de France pour comparer leur contamination avec celle de la baie de Seine.

\* Laboratoire de Biologie et Physiologie des Organismes marins. Université P. et M. Curie, 4, Place Jussieu, 75230 PARIS CEDEX 05.

\*\* Centre de Microanalyse appliquée à la Biologie, Laboratoire de Biophysique de la Faculté de Médecine, 6, rue du Gl. Sarrail, 94000 CRETEIL.



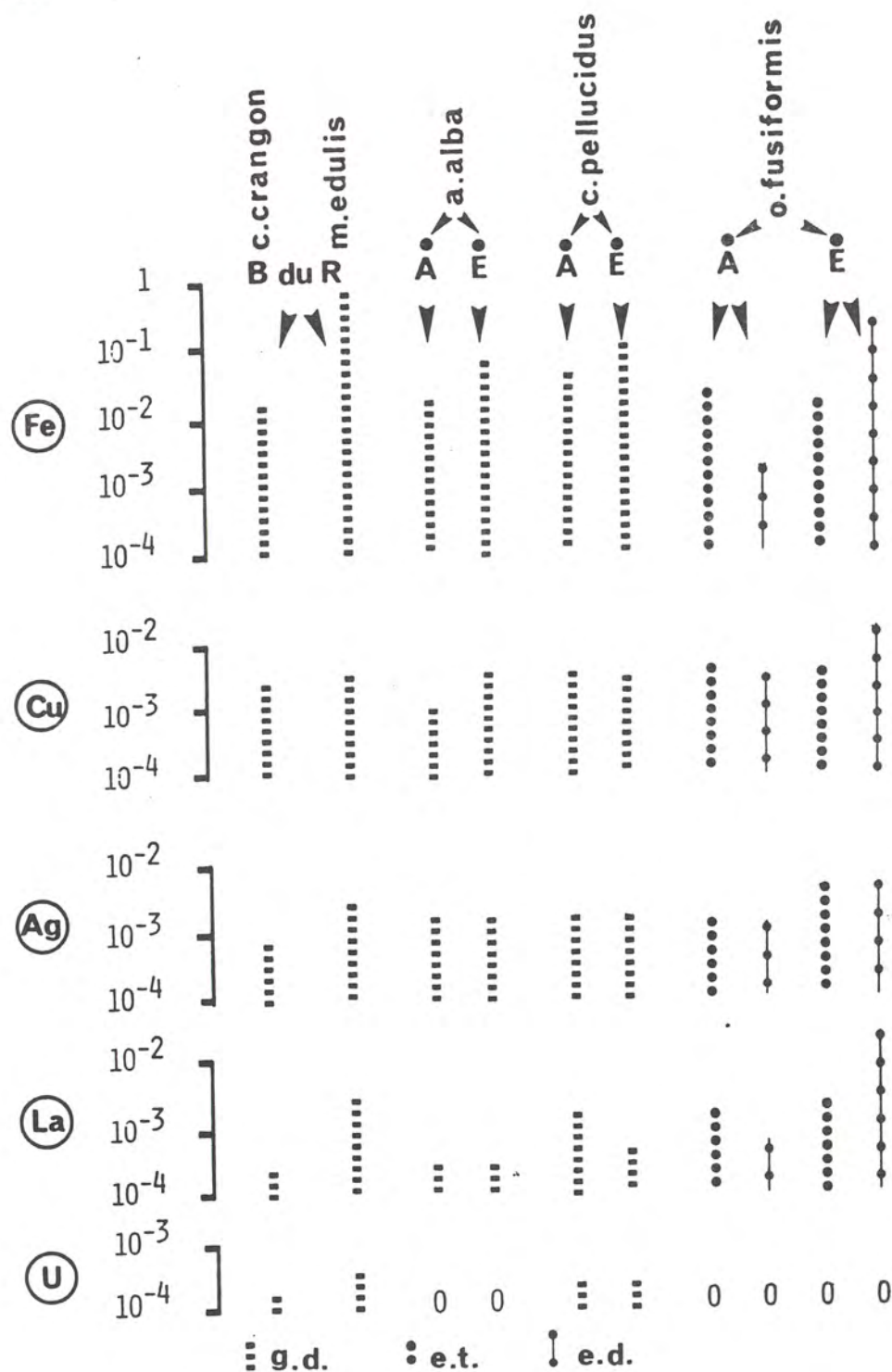


Figure 1.- Intensités d'émission ionique des différents éléments, normalisées au calcium et mesurées sur des organismes provenant du Banc de Ratier (B du R) ainsi que des points A et E de la baie de Seine.  
g.d. : glande digestive, e.t. : epithelium tégumentaire, e.d. : epithelium digestif.

## 1.2. Méthodes. (tableau 1).

Les échantillons subissent soit une fixation chimique (mélange de Carnoy ou glutaraldéhyde), soit une cryofixation (qui donne des résultats analogues). Les coupes sont déposées sur terphane ou sur grille pour la microanalyse X, sur lame d'or pour l'analyse ionique. La microanalyse X est effectuée sur MS 46 et sur CAMEBAX (Cameca), l'analyse ionique est effectuée sur SMI 300 (Cameca) équipé d'un secteur électrostatique. Parmi les possibilités offertes par la microscopie analytique on doit signaler notamment la grande sensibilité, de l'ordre de la ppm pour la microanalyse X et de l'ordre de la ppb pour la microanalyse ionique, qui permet en outre d'obtenir des images de répartition des isotopes de tous les éléments de la classification périodique.

| Microanalyse par                                         | Système d'analyse          | Visualisation de la coupe                                                | Obtention d'images analytiques | Eléments Analysables                                                                            | Sensibilité                                                      | Plus petit volume Analysable |
|----------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Microsonde Electronique (Castaing, 1951).                | Spectrométrie des rayons X | Microscope optique ou Microscope Electronique à transmission à balayage. | OUI par balayage uniquement    | Eléments de n° atomique > 9                                                                     | De l'ordre de $10^{-17}$ g pour les éléments de n° atomique > 10 | Diamètre : 0,05 $\mu$ m      |
| Emission Ionique Secondaire (Castaing et Slodzian, 1962) | Spectrométrie de Masse     | Optique Ionique ou Balayage par sonde ionique                            | OUI                            | Tous les éléments avec distinction entre les isotopes stables ou radioactifs d'un même élément. | Atteint $10^{-20}$ g pour un grand nombre d'éléments.            | Diamètre : 0,05 $\mu$ m      |

Tableau 1.- Principales caractéristiques des méthodes de microanalyse.

## 2. RESULTATS. (\*)

### 2.1. Baie de Seine.

Les éléments suivants ont été détectés : Li, F, Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Sr, Ag, Cd, Cs, Ba, les trois lanthanides : La, Ce, et Tm ainsi que Tl, Pb et U. Pour chaque espèce, nous avons pu déterminer les sites électifs d'accumulation, différents selon l'élément considéré. Par exemple, les lanthanides et actinides se concentrent essentiellement dans la glande digestive et dans les tissus squelettiques; ainsi, les Crustacés se détachent en rejetant leur exosquelette à chaque mue.

Dans la multiplicité des résultats obtenus, nous avons choisi d'exposer, au cours de ce Colloque "Baie de Seine", les résultats convergents obtenus sur les éléments qui ont retenu notre attention et celle des participants des thèmes "Chimie des Eaux et des Sédiments" et "Dynamique des suspensions et des dépôts".

La figure 1 résume les résultats relatifs à Fe, Cu, Ag, La et U qui sont les suivants :

\* Recherches effectuées avec le support financier du CNRS et de l'INSERM (SC 27) et avec la collaboration scientifique et technique de D. Calmet, F. Escaig et P. Boumati.



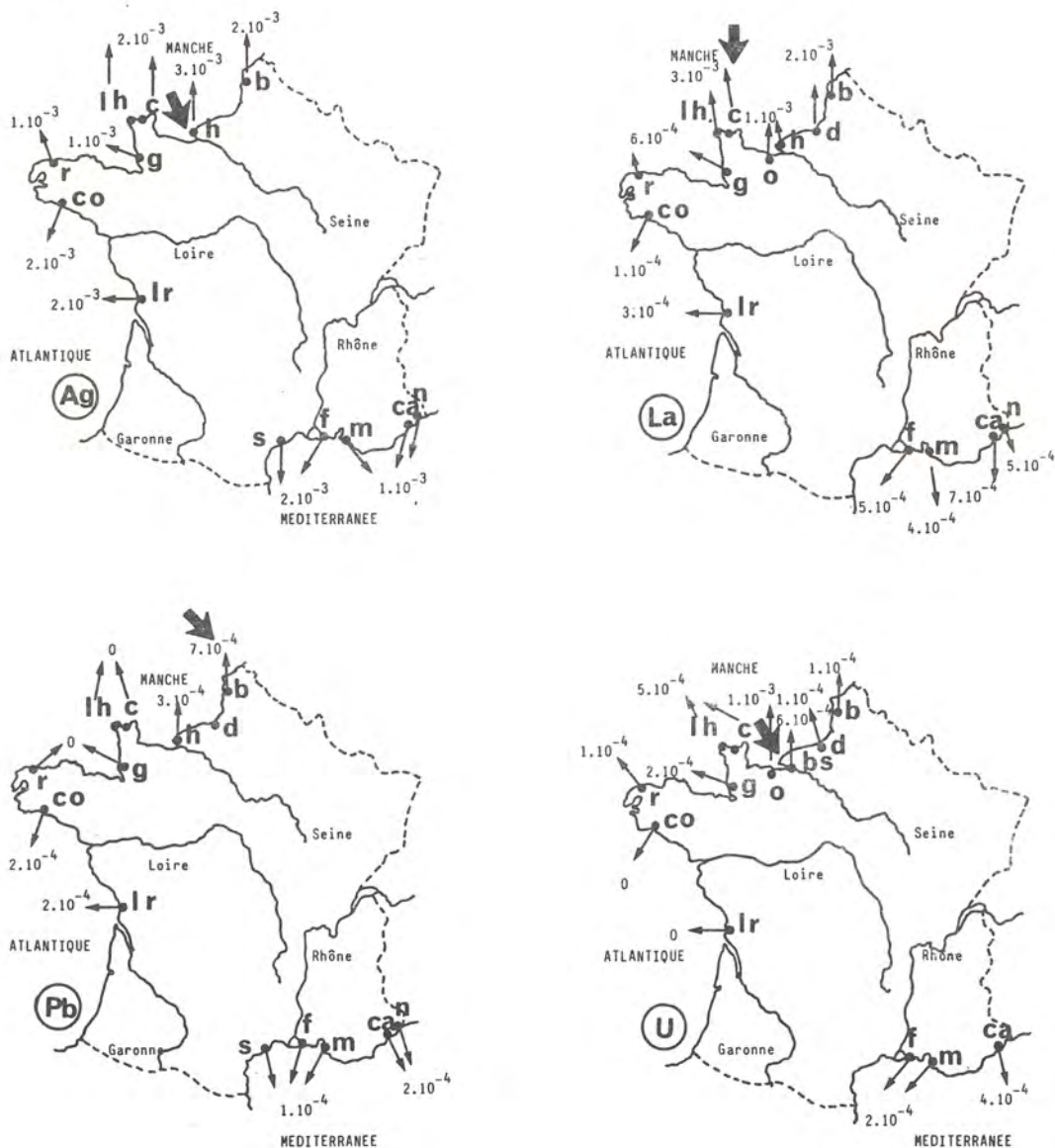


Figure 2.- Répartition géographique de la contamination de *Mytilus* sp. par l'argent (Ag), le plomb (Pb), le lanthane (La) et l'uranium (U). Résultats obtenus sur la glande digestive par émission ionique secondaire. Les intensités d'émission de chaque élément sont normalisées au calcium.

On remarque que les sites les plus contaminés (grosses flèches) par chaque métal sont les suivants :

Ag et U : Baie de Seine; La: zone comprise entre la côte Nord du Cotentin et le Pas de Calais; Pb: Le Pas de Calais.

b: Boulogne, b s: Baie de Seine, c: Cherbourg, ca: Cannes, co: Concarneau, d: Dieppe, f: Fos, g: Granville, h: Le Havre, l h: La Hague, l r: La Rochelle, m: Marseille, n: Nice, o: Ouistreham, r: Roscoff, s: Sète.

Fer : les plus hautes valeurs sont détectées chez *Mytilus edulis*. Chez les autres espèces, les teneurs sont toujours plus élevées au point "E" qu'au point "A".

Cuivre : résultats analogues à ceux obtenus pour le fer.

Argent : il montre des valeurs équivalentes aux deux points sauf pour *Owenia fusiformis* dont les teneurs relatives sont plus élevées au point "E".

Lanthane : résultats analogues à ceux obtenus pour l'argent.

Uranium : il est détecté chez *Crangon crangon*, *Mytilus edulis* et *Cultellus pellucidus* uniquement.

Des images ioniques (fig. 3) visualisent la localisation de certains des éléments précités, en microscopie photonique; en microscopie électronique on démontre, grâce à la microsonde X, que lysosomes et sphérocristaux sont les principaux organites cibles de concentration des métaux qui, associés au phosphore, se présentent sous forme de phosphates. (Fig. 3).

## 2.2. Eaux côtières de la Manche, de l'Atlantique et de la Méditerranée (fig.2).

Les résultats concernent *Mytilus* sp. (glande digestive).

Argent : les plus hautes valeurs se situent en Baie de Seine, mais les moules de toutes les eaux côtières françaises sont contaminées par ce métal.

Plomb : les plus hautes valeurs se situent dans la région du Pas-de-Calais et décroissent en Baie de Seine; elles sont en dessous du seuil de détection au large du Cotentin et du Finistère Nord mais notables sur l'Atlantique et la Méditerranée.

Lanthane : les valeurs sont dix fois plus élevées dans la zone comprise entre le Nord du Cotentin et le Pas-de-Calais, que dans les autres eaux côtières.

Uranium : les valeurs les plus hautes sont détectées en Baie de Seine; le métal est aussi présent dans les moules en Méditerranée, mais n'a pas été mis en évidence dans les échantillons de l'Atlantique.

## 3. DISCUSSION ET CONCLUSION

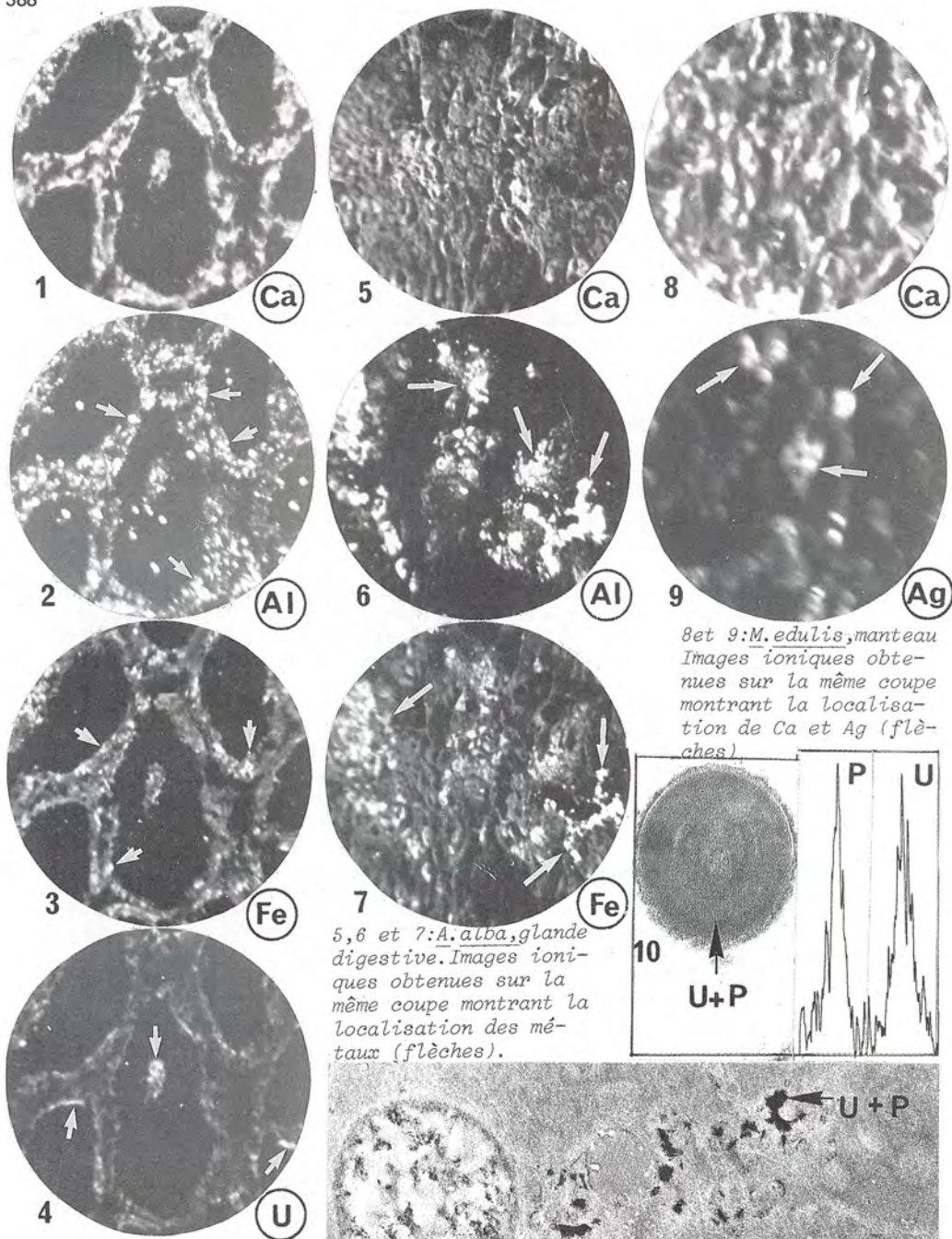
D'une façon générale, les bioaccumulations métalliques sont plus importantes au point "E", proche de l'estuaire, zone plus perturbée qu'au point "A". Ces faits pourraient expliquer en partie, d'une part l'appauvrissement faunistique constaté (Gentil *et al.*, 1985) et d'autre part l'observation d'indices biochimiques annonçant l'approche de conditions léthales (Batreil *et al.*, 1985).

En ce qui concerne le lanthane, nous avons mis en évidence sa bioaccumulation dans les moules (Chassard-Bouchaud et Hallégot, 1984) avec des teneurs en Baie de Seine plus élevées qu'à l'embouchure du Rhône : faits en accord avec les valeurs citées par Guéguénat (1984). En outre, selon ce même auteur (Guéguénat *et al.*, 1985a), si l'on compare la Seine à l'échelle mondiale, à d'autres grands fleuves, seule la Seine paraîtrait totalement perturbée (rapports La/Sc). L'intérêt de l'étude des terres rares, et notamment du lanthane, réside dans le fait que les lanthanides sont les homologues des transuraniens : l'étude du lanthane permettrait de prévoir le comportement à long terme de l'americium, plutonium, etc...

L'argent, très toxique pour les animaux marins, présent dans les suspensions, serait un des éléments les plus caractéristiques et les plus préoccupants de la pollution en Baie de Seine, au même titre que le cadmium (Guéguénat *et al.*, 1985a). Rappelons que l'argent contamine aussi les autres eaux côtières françaises (Chassard-Bouchaud, Galle et Escaig, 1985).

Le fer, présent dans les sédiments, les suspensions et les eaux, proviendrait d'apports estuariens se superposant à un apport amont; la question qui se pose est celle de l'éventuelle responsabilité des rejets industriels, dans l'apport de ce métal, qui retient actuellement l'attention des géochimistes (Guéguénat *et al.*, 1985b) et dans l'apport de nombreux autres métaux





1, 2, 3 et 4: *M. edulis*, glande digestive. Images ioniques obtenues sur la même coupe montrant la localisation des métaux (flèches)

Fig. 3. Micrographies ioniques et électroniques.

5, 6 et 7: *A. alba*, glande digestive. Images ioniques obtenues sur la même coupe montrant la localisation des métaux (flèches).

8 et 9: *M. edulis*, manteau. Images ioniques obtenues sur la même coupe montrant la localisation de Ca et Ag (flèches).

10 et 11: *M. edulis*. Micrographies électroniques (matériel non osmié et non coloré) montrant un spherocrystal (10) et des lysosomes (11) contenant U ou Fe associés à P.

en période de crue (Avoine, 1985). L'uranium détecté dans le plancton de la baie de Seine (Guéguénat, 1984), contamine aussi les moules (Chassard-Bouchaud *et al.*, 1983) et les crabes : le transfert du métal dans les maillons des chaînes alimentaires a été observé (Chassard-Bouchaud, 1983).

Nombreux sont encore les problèmes à aborder : citons par exemple celui de l'or dont les valeurs en Baie de Seine (275 ppb en crue) dépassent celles avancées pour les grands fleuves mondiaux (Guéguénat, 1984). En outre, grâce aux meilleures performances techniques d'appareils de nouvelle génération, tels que l'analyseur ionique IMS 3F (Cameca), il sera possible d'apporter encore de meilleures réponses aux questions posées. Enfin, la numérisation et le traitement informatique des images en microscopie ionique (Cavellier *et al.*, 1985), devrait permettre, sur des surfaces de l'ordre du  $\mu\text{m}$ , d'aborder la microanalyse quantitative locale à l'échelle cellulaire.

- 
- AVOINE J. (1985).- Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 9.
- CASTAING R. (1951).- Application des sondes électroniques à une méthode d'analyse ponctuelle chimique et cristallographique. Thèse de Doctorat d'Etat. ONERA éd. Paris.
- CASTAING R. & SLODZIAN G. (1962).- Microanalyse par émission ionique secondaire. *J. de Microscopie*, 1, p. 395-410.
- CAVELLIER J.F., HALLEGOT P., ESCAIG F., GAUME P. & BOUMATI P. (1985).- Numérisation et traitement informatique des images en microscopie par émission ionique secondaire. *Biol. of the Cell*, 53, p. 19a.
- CHASSARD-BOUCHAUD C. (1983).- Cellular and subcellular localization of uranium in the Crab *Carcinus maenas* : a microanalytical study. *Mar. Poll. Bull.* 14, 4, p. 133-136.
- CHASSARD-BOUCHAUD C., CALMET D., ESCAIG F. & KLEINBAUER F. (1983).- Bioaccumulation d'uranium par des moules *Mytilus edulis* récoltées sur les côtes françaises de la Manche et contamination expérimentale. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 296, III, p. 1095-1100.
- CHASSARD-BOUCHAUD C., GALLE P. & ESCAIG F. (1985).- Mise en évidence d'une contamination par l'argent et le plomb de l'huître *Crassostrea gigas* et de la moule *Mytilus edulis* dans les eaux côtières françaises. Etude microanalytique par émission ionique secondaire. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 300, III, p. 3-8;
- CHASSARD-BOUCHAUD C. & HALLEGOT P. (1984).- Bioaccumulation de lanthane par des moules *Mytilus edulis* récoltées sur les côtes françaises. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 298, 3, p. 567-572.
- GENTIL F., IRLINGER J.P., ELKAIM B. & PRONIEWSKI F. (1985).- Première données sur la dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés à *Abra alba* de la Baie de Seine orientale. Ce volume, N° 35.
- GUEGUENIAT P. (1984).- GRECO MANCHE, rapport d'activité n° 3, p. 61-84.
- GUEGUENIAT P., BOUST D., HEMON G., PHILIPPOT J.C., LAGARDE G. & HEITZ C. (1985).- Distribution de 40 éléments à l'état de traces dans les suspensions de la Seine. Utilisation du lanthane pour étudier les processus sédimentaires dans l'estuaire et dans la baie. Ce volume, N° 25.



GUEGUENIAT P., BOUST D., GANDON R., HEMON G., PHILIPPOT J.C., SANCHEZ J.P.,  
MARIN P. & PIERI J. (1985).- Etude du comportement géochimique du  
fer dans l'estuaire de la Seine. Ce volume, N° 29.

SYLVESTRE C., BATREL Y. & LE GAL Y. (1985).- La détection des effets sublé-  
thaux des pollutions. Utilisation *in situ* d'un indice biochimique,  
la charge énergétique. Ce volume, N° 32.

LA DETECTION DES EFFETS SUBLETAUX DES POLLUTIONS : UTILISATION *IN SITU*  
D'UN INDICE BIOCHIMIQUE, LA CHARGE ENERGETIQUE.

SYLVESTRE C.\*, BATREL Y.\*, LE GAL Y.\*.

1. INTRODUCTION .

En dehors de quelques cas dramatiques concernant des rejets accidentels, la préoccupation principale en matière de protection et de gestion du milieu marin est donc de savoir si les niveaux de polluants réellement présents dans le milieu sont susceptibles d'entraîner des effets négatifs sur les individus, les populations ou les écosystèmes (Warren, 1971).

Très schématiquement, on peut considérer qu'il existe deux grandes méthodes d'évaluation des effets toxiques des polluants. La première recouvre des expérimentations en laboratoire et conduit à la détermination des doses létales (toxicité aigüe). Les essais sont réalisés sur 96 heures et leurs résultats ne préjugent pas des effets différés qui, même pour des doses faibles, pourraient entraîner une mortalité au terme de plusieurs semaines.

Une seconde approche consiste à observer, *in situ*, les populations animales ou végétales et à distinguer les modifications pouvant intervenir dans leur abondance et leur distribution.

La surveillance et, surtout, la gestion des eaux marines côtières suppose, cependant, que l'on soit capable, non plus de constater, mais de prévoir l'évolution d'un milieu. Ceci peut être réalisé si l'on dispose de tests suffisamment sensibles et précis renseignant en particulier sur l'état général des organismes vivants en un point donné.

De nombreux tests biochimiques ont été décrits. Ils portent en général sur la mesure d'activités enzymatiques (Lee et coll., 1980 ; Livingstone, 1982) et renseignent sur des réponses particulières comme par exemple celles qui sont liées à la présence de matériel biodégradable (Payne, 1977 ; Blackstock 1980 ; Batrel et Le Gal 1982). Deux inconvénients majeurs sont cependant attachés à ces mesures. D'une part, les activités enzymatiques testées correspondent souvent plus à des systèmes choisis en raison des facilités de mesure que pour leur intérêt métabolique. D'autre part, l'extrême diversité des modes d'action des différents polluants conduit à une infinité de solutions en ce qui concerne le choix des enzymes susceptibles d'être utilisées dans le cadre d'un test. Pour résoudre cette difficulté, on a recherché des indices indépendants du niveau

\* Laboratoire de Biologie Marine - Collège de France - 29110 Concarneau.



évolutif ou écologique des organismes et susceptibles de refléter un statut métabolique général quels que soient les agents extérieurs mis en jeu.

Depuis plusieurs années (Atkinson, 1977 ; Ivanovici, 1980), l'attention s'est portée sur la charge énergétique adénylique (AEC) dont la valeur est déterminée par :

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

D'une manière générale, quel que soit l'organisme ou le tissu étudié, la valeur de la charge énergétique se situe aux alentours de 0.7 - 0.85 en conditions physiologiques optimales. Des valeurs inférieures, en revanche, illustrent des problèmes globaux ou des effets de stress pouvant affecter la capacité de survie d'un organisme.

Nous avons réalisé, dans le cadre des campagnes "Baie de Seine" des mesures de charge énergétique sur des organismes présents dans une zone globalement perturbée.

Nos données indiquent, qu'en Baie de Seine, un effet de stress est ressenti par plusieurs types d'organismes (Crustacés, Mollusques) et correspond à une diminution de la charge énergétique moyenne.

## 2. METHODOLOGIE ET ECHANTILLONNAGE

Ce point revêt, en ce qui concerne les mesures de nucléotides, une importance extrême et une attention toute particulière y a été portée. A la suite de plusieurs séries d'échantillonnages, la procédure suivante a été adoptée.

Dès capture, les organismes prélevés sont plongés dans l'azote liquide et transportés au laboratoire où ils sont conservés à - 80°C. Les organismes sont ensuite broyés (Broyeur Danguemeau) à la température de l'azote liquide. Le broyat est extrait à l'acide perchlorique à 6 % (10 ml par individu) ajusté à pH 6.5 (K2 CO3 0,5 M) et centrifugé. Cette procédure comportant le maintien de très basses températures, dès les premières secondes du prélèvement et pendant toute la durée de l'extraction, s'est avérée absolument indispensable pour le succès des expérimentations, en raison notamment de l'importance des activités ATPasiques parasites.

Les déterminations de nucléotides sont réalisées par voie enzymatique selon Pradet (1967). L'AMP est transformé en ADP en présence de myokinase ; l'ADP est transformé en ATP en présence de pyruvate kinase. Enfin, l'ATP est dosé en présence d'un système luciférine-luciférase. La quantité de photons produite est mesurée à l'aide d'un compteur à scintillation liquide après 40 sec d'incubation. Dans ces conditions, la réponse est linéaire de  $10^{-8}M$  à  $2 \times 10^{-6}M$  d'ATP. Il convient, dans cet ensemble, d'accorder toute son importance à la rigueur de manipulation : respect des temps et température d'extraction, d'incubation et de mesure de la production de photons.

Les standards (AMP, ADP, ATP) sont des produits Serva. Les enzymes (myokinase, pyruvate kinase) et la préparation de luciférine-luciférase sont des produits Sigma.

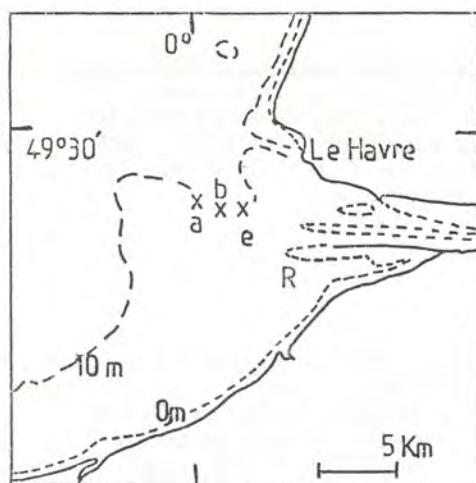


Fig. 1.- Localisation des prélèvements en Baie de Seine.

Les points de prélèvement (Fig. 1) pour les tests de charge énergétique ont été choisis de manière à pouvoir apprécier les effets de frontière : le point E constitue pour certains organismes une limite extrême de présence dans l'estuaire de la Seine. Les points A et B constituent une référence relative située plus au large. Le problème principal en ce qui concerne le point E provient d'une part du très petit nombre d'organismes présents et d'autre part de la mobilité du bouchon vaseux qui rend, dans certains cas, tout prélèvement impossible.

En ce qui concerne la faune vagile (*Crangon crangon*), les prélèvements sont réalisés au sud du Banc du Ratier (R).

### 3. RESULTATS

Le tableau présente un exemple des résultats obtenus *in situ* pour *Nassarius reticulatus*. L'étude effectuée sur une radiale ABE indique très nettement une modification progressive du classement. Au point E, aucun organisme ne peut être classé en I. Les autres espèces testées (*Abra alba*, *Owenia fusiformis*, *Pectinaria koreni*) ne peuvent donner lieu à comparaison statistiquement valable en raison du trop petit nombre d'individus récoltés au point E.

Tableau 1.- Répartition des valeurs de charge énergétique de *Nassarius reticulatus* prélevés en différents points de la baie de Seine.

| Groupe | Point A | Point B | Point E |
|--------|---------|---------|---------|
| (I)    | 26,7 %  | 14,3 %  | 0 %     |
| (II)   | 20,0 %  | 28,6 %  | 44,5 %  |
| (III)  | 53,3 %  | 57,1 %  | 55,5 %  |

Les valeurs obtenues individuellement pour la charge énergétique sont classées en 3 groupes selon Atkinson (1977) : I : conditions normales ( $AEC \geq 0.70$ ); II: conditions limitantes ( $0.70 > AEC \geq 0.50$ ); III: conditions létales ( $AEC < 0.50$ ).



### La comparaison des valeurs.

Pour ce qui est de *Crangon crangon* (Fig. 2a), les prélèvements réalisés à deux saisons différentes se révèlent significativement différents quant à la charge énergétique moyenne, tout au moins dans les valeurs les plus élevées. Les valeurs moyennes sont significativement plus faibles et plus dispersées que celles que l'on obtient chez des animaux prélevés en baie de Concarneau (Référence).

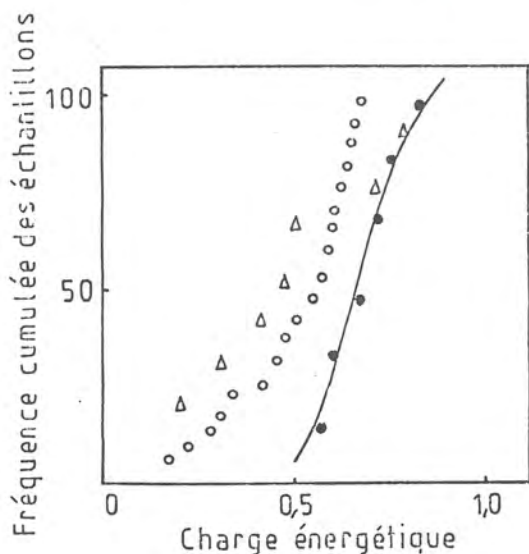


Fig. 2a.— La charge énergétique de *Crangon crangon*.

a) Répartition des valeurs au niveau du banc du Ratier.  
(o: mai 83; Δ: septembre 83).

Les pourcentages cumulés des échantillons ont été exprimés en fonction de leur charge énergétique préalablement classée. La courbe de référence (●) est obtenue à l'aide de dosages réalisés sur des organismes récoltés en eaux saines (Baie de Concarneau) et maintenus à l'abri de tout stress ou pollution.

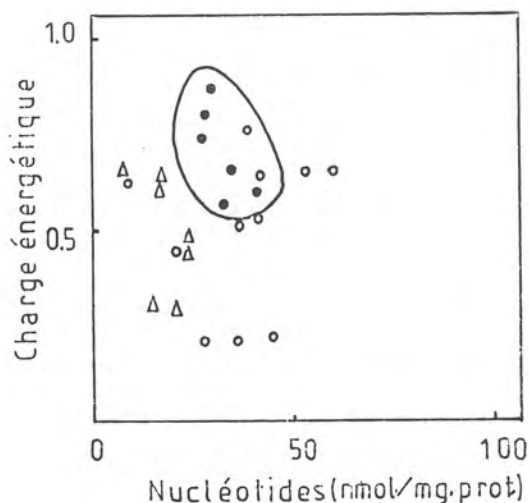


Fig. 2b.— Relation entre la charge énergétique et la concentration intracellulaire en nucléotides.

#### 4. DISCUSSION

Cet ensemble de résultats indique qu'en Baie de Seine, pour deux populations au moins, les valeurs de charge énergétique sont significativement inférieures à celles que l'on détermine sur des populations vivant dans un système de référence peu pollué. La comparaison des valeurs mesurées pour une même espèce en différents points de la baie montre que les différences sont mineures sauf en ce qui concerne les valeurs élevées de charge énergétique (Groupe I du Tableau I). Les tests statistiques réalisés confirment cette interprétation. Il ressort de ceci que la proportion d'animaux susceptibles de maintenir une charge énergétique optimale est plus faible en milieu pollué qu'en milieu sain. Il convient toutefois de noter qu'une valeur élevée de charge énergétique peut être obtenue de plusieurs manières différentes. Nous avons antérieurement montré qu'en cas de stress lié à une contamination expérimentale, une charge énergétique élevée pouvait être maintenue temporairement grâce à l'intervention d'une enzyme spécifique, l'AMP désaminase, catalysant l'élimination de l'AMP.

Les données de la figure 2a ont été reproduites en fonction de la concentration intracellulaire en nucléotides adényliques (ATP + ADP + AMP) (Fig. 2b). On constate effectivement que selon les individus, une charge énergétique élevée (0.7 - 0.8) correspond soit à une perte, soit à un gain en nucléotides.

En pratique, il semble donc que l'évolution du rapport de la charge énergétique aux nucléotides totaux représente un signal de déséquilibre encore plus sensible que la charge énergétique elle-même. Ces résultats permettent donc d'envisager favorablement la réalisation d'une surveillance régulière de zones sensibles, basés sur la mesure des nucléotides adényliques et la détermination de la charge énergétique. Il conviendra toutefois de préciser la localisation du point de référence le mieux adapté à l'établissement d'une comparaison de site à site.

---

ATKINSON D.E. (1977). - Cellular energy metabolism and its regulation, Acad. Press New York, 293 p.

BLACKSTOCK J. (1980). - The Loch Eil project. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., t. 46, 197-217.

BATREL Y. et LE GAL Y. (1982). - La glutamate déshydrogénase d'Arenicole, un indicateur du niveau d'eutrophisation du milieu et de sa pollution, C.R. Soc. Biol., t. 176, 619-623.

IVANOVICI A. (1980). - Adenylate energy charge. An evaluation of applicability to assessment of pollution. Rapp. P.V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer, t. 179, 23-28.

LEE R., DAVIES J.M., FREEMAN H.C., IVANOVICI A., MOORE M.N., STEGEMAN J. et UTHE J.F. (1980). - Biochemical techniques for monitoring biological effects of pollution in the sea. Rapp. P.V. Réun. Cons. int. Explor. Mer., t. 179, 48-55.



- LIVINGSTONE D.R. (1982). General biochemical indices of sublethal stress. Marine Poll. Bulletin , t. 13, 261-263.
- PAYNE J.F. (1977). - Mixed-function oxidases in marine organisms in relation to petroleum hydrocarbon metabolism and detection. Mar. Poll. Bull. , t. 8, 112-116.
- PRADET A. (1967). - Etude des AMP, ADP, ATP dans les tissus végétaux. 1. Dosage enzymatique. Physiol. Végét. , t. 5, 209-221.
- RAFFIN J.P. (1984). - J. Comp. Physiol. Biochem. 154 , 55-63.
- SYLVESTRE C., BEAUPOIL C., BATREL Y., et LE GAL Y. (1984). - Evolution de la charge énergétique adénylique sous l'effet d'une pollution expérimentale. C.R. Sc. Soc. Biol. , t. 178, 512-517.
- WARREN C.E. (1971). - Biology and water pollution control. W.B. Saunders C° , Philadelphia, 434 p.

DOSAGE DES CAROTENOIDES DE LA MACROFAUNE BENTHIQUE PAR SPECTROMETRIE RAMAN DE  
RESONANCE - COMPARAISON AVEC LES DOSAGES PAR SPECTROMETRIE D'ABSORPTION VISIBLE.

MERLIN J.C.\*, NOEL P.\*\*, LAFAGE-SZYDLOWSKI N.\*, PETIT-COSSI G.\*, WALLART F.\*

1. INTRODUCTION

Les méthodes généralement utilisées pour le dosage des caroténoïdes extraits d'un milieu naturel sont basées sur la spectrophotométrie d'absorption visible (1). Ces méthodes peuvent être relativement précises mais nécessitent alors une préparation relativement longue de l'échantillon à analyser. En effet, à cause des autres pigments souvent présents dans les échantillons analysés et extraits en même temps que les caroténoïdes, l'analyse est peu précise sur l'extrait acétonique brut, les chlorophylles en particulier sont souvent gênantes. Une saponification et différents modes d'extraction sont alors nécessaires pour purifier la solution, ce qui amène inévitablement une perte de caroténoïdes donc une erreur dans le dosage.

La spectrométrie Raman de résonance a été utilisée avec succès pour la détection et l'identification d'algues ou de bactéries dans l'eau (2-3) et pour déterminer la concentration en caroténoïdes dans le phytoplancton marin (4). Nous nous proposons de généraliser cette méthode à d'autres espèces, en particulier des espèces de la macrofaune benthique et de comparer les résultats à ceux obtenus à partir de la spectrométrie d'absorption.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

En excitant le spectre Raman d'un caroténoïde à l'intérieur de sa bande d'absorption visible (transition  $\pi \rightarrow \pi^*$  de la chaîne polyénique), une très forte augmentation de l'intensité des raies attribuables à la chaîne polyénique est observée; elle peut être de  $10^6$ . Le spectre Raman ainsi obtenu est caractéristique des seuls caroténoïdes présents dans la solution. En effet dans ces conditions l'intensité des raies Raman caractéristiques des espèces non absorbantes ou des autres pigments sont beaucoup trop faibles pour être détectées. L'analyse directe et spécifique des caroténoïdes à l'intérieur d'un système aussi complexe qu'une solution obtenue après extraction est alors possible.

L'intensité des raies Raman de résonance est, pour une longueur d'onde d'excitation donnée, proportionnelle à la concentration du pigment. Une substance de référence en solution avec les caroténoïdes (ou le solvant lui-même) sert

\* Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman. C.N.R.S. - Université de Lille I - Bât. C5 - 59655 Villeneuve d'Ascq Cédex - France.

\*\* Laboratoire de Zoologie, Université de Paris 6 - Place Jussieu - 75230 Paris Cédex 05 - France.



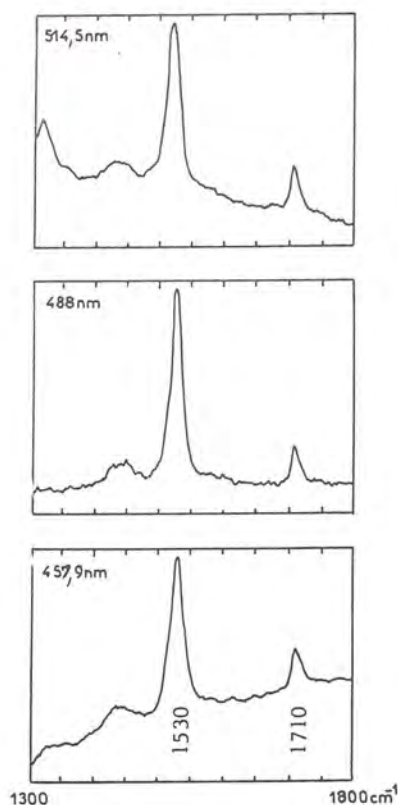


Fig.1: Spectres Raman de résonance des caroténoïdes extraits de *Carcinus maenas*. Influence de la radiation excitatrice

d'étalon interne. Le rapport de l'intensité d'une raie de caroténoïde à l'intensité d'une raie du solvant conduit par l'intermédiaire d'un étalonnage préalable à la concentration en caroténoïde dans la solution.

Nous présentons sur la Figure 1 les spectres Raman de résonance de l'extrait acétonique de *Carcinus maenas* enregistrés avec trois radiations excitatrices différentes; ils sont caractéristiques des seuls caroténoïdes présents dans la solution. La bande intense observée vers  $1530\text{ cm}^{-1}$  est attribuée à l'élongation des doubles liaisons  $\text{C}=\text{C}$  de la chaîne polyénique (5). Les raies caractéristiques des groupements terminaux sont faibles et les différents caroténoïdes possèdent donc des spectres Raman très voisins, souvent indiscernables. On utilise l'intensité de la raie  $1530\text{ cm}^{-1}$  rapportée à celle de l'acétone à  $1710\text{ cm}^{-1}$  pour déterminer la concentration.

Les spectres d'absorption visible des extraits acétoniques sont représentés sur la Figure 2. La densité optique mesurée à  $450\text{ nm}$  est utilisée pour calculer la concentration. En considérant que chacune des mesures (Intensité Raman et densité optique) est proportionnelle à la concentration, une relation linéaire doit exister entre les résultats de ces deux techniques. Or en portant, pour cette série d'échantillons, la densité optique en fonction de l'intensité relative de la raie  $1530\text{ cm}^{-1}$  (Fig.3) une forte disparité des points est relevée. Elle ne provient pas seulement des erreurs sur les mesures mais peut être expliquée par les deux phénomènes suivants :

- l'absorption visible n'est pas suffisamment sélective et des pigments autres que les caroténoïdes peuvent modifier la densité optique mesurée;
- chaque caroténoïde possède son propre profil d'excitation (variation du coefficient d'excitation en fonction de la longueur d'onde d'excitation) et, dans le cas d'un mélange de concentration donnée l'intensité mesurée varie en fonction de la proportion relative des constituants.

La même mesure a été effectuée pour le  $\beta$ -carotène et l'astaxanthine (Fig.3): nous voyons donc que si la méthode de dosage par Raman de résonance donne de bons résultats, conformes à ceux obtenus par absorption visible pour des caroténoïdes purs en solution, de grandes disparités entre les deux méthodes apparaissent si on étudie des mélanges.

### 3. ETUDE D'UN MELANGE SYNTHETIQUE

Afin de mieux comprendre les différents facteurs influençant les mesures, des mélanges binaires de  $\beta$ -carotène et d'astaxanthine ont été étudiés simultanément en absorption visible et en Raman de résonance. Notre choix s'est porté sur ces deux caroténoïdes car ils sont représentatifs des pigments présents dans la macrofaune et possèdent des spectres d'absorption et des profils d'excitation suffisamment différents (Fig. 4).

#### 3.1. Quantification des erreurs

En absorption visible, la densité optique d'un mélange binaire est donnée

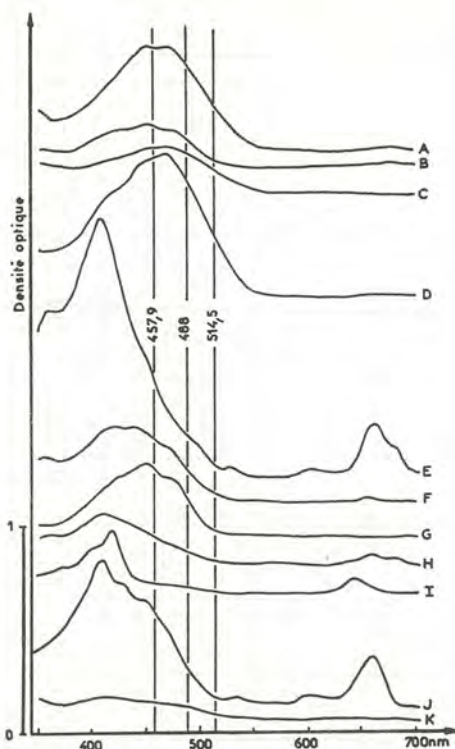


Fig.2: Spectres d'absorption visible d'extraits acétoniques des espèces répertoriées dans le tableau 1

gramme de la Figure 4 montre que l'erreur commise en spectrométrie Raman de résonance est très grande par rapport à celle obtenue en spectrométrie d'absorption et peut même conduire à des résultats totalement erronés. Nous voyons que les choix du composé de référence et de la radiation excitatrice sont de très grande importance.

### 3.2. Dosage d'un mélange de carétonoïdes

Le profil d'excitation propre à chaque caroténoïde, qui est la source d'erreur principale de cette méthode, peut être mis à profit pour déterminer le composé majoritaire dans un mélange et ainsi réduire considérablement l'erreur occasionnée par un mauvais choix de référence. Dans le tableau 1 sont présentés les résultats obtenus à partir de mélanges synthétiques de  $\beta$ -carotène et d'astaxanthine dans des proportions variables. Trois radiations excitatrices différentes encadrant la bande d'absorption ont été utilisées et les concentrations sont calculées en prenant le

par  $D.O. = (\epsilon_1 c_1 + \epsilon_2 c_2) \cdot l$ . Pour calculer une concentration totale ( $c_t$ ) en prenant l'un des composés comme référence on utilise les relations  $D.O. = \epsilon_1 \cdot c_t \cdot l$  ou  $D.O. = \epsilon_2 \cdot c_t \cdot l$ . La formulation de l'erreur commise en fonction de la fraction molaire  $x_1$  :

$$\left(1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right) - x_1 \left(1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right) \text{ si } 1 \text{ est pris}$$

comme référence

$$x_1 \left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \text{ si } 2 \text{ est pris comme référence}$$

montre qu'elle est d'autant plus importante que les coefficients d'extinction molaire  $\epsilon$  sont différents. Dans le cas d'un mélange  $\beta$ -carotène - astaxanthine, elle ne dépasse pas 20%.

En spectrométrie Raman de résonance, des équations analogues peuvent être obtenues en considérant que l'intensité relative d'une raie est égale à  $I = \alpha \cdot c$ ;  $\alpha$  fait intervenir la section efficace du caroténoïde à la longueur d'onde utilisée et les conditions expérimentales (solvant, chaîne de mesure). Ces équations appliquées au système  $\beta$ -carotène, astaxanthine montrent qu'avec les radiations excitatrices 488 et 457,9 nm la concentration calculée ( $c_t$ ) est sous estimée avec le  $\beta$ -carotène comme référence et surestimée avec l'astaxanthine. La situation est inversée avec la radiation 514,5 nm. Le dia-

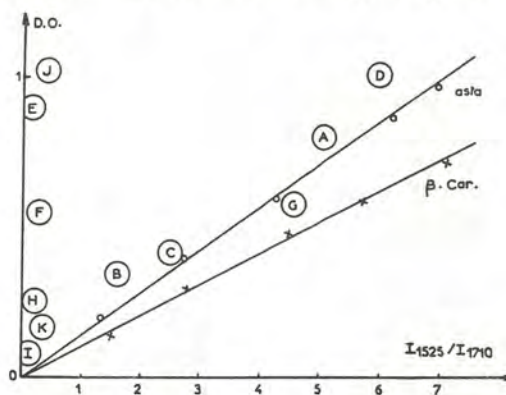


Fig.3 : Relation entre densité optique et intensité relative (exc. 488 nm) pour des solutions acétoniques de caroténoïdes. A à C extractions à partir des espèces mentionnées dans le tableau 1



TABLEAU 1.- Présentation des mesures et du calcul des concentrations.

| Les intensités relatives $I_{1530}/I_{1710}$ mesurées pour trois longueurs d'onde d'excitation différentes.<br>Les concentrations sont calculées en prenant le $\beta$ -carotène ( $\beta$ -car.) puis l'astaxanthine (asta) comme référence. |   |      |      | Volume total d'extraction (ml) | D.O. à 450 nm | 514,5 nm            |                                |                          | 488,0 nm            |                                 |                          | 457,9 nm            |                                 |                          | $C(10^{-6}M)$ Réf. $\beta$ car. | $C(10^{-6}M)$ Réf. asta. | Concentra-tions cal-culées( $10^{-6}M$ ) |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|------|------|--------------------------------|---------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------|
|                                                                                                                                                                                                                                               |   |      |      |                                |               | $I_{1530}/I_{1710}$ | $C(10^{-6}M)$ Réf. $\beta$ ar. | $C(10^{-6}M)$ Réf. Asta. | $I_{1530}/I_{1710}$ | $C(10^{-6}M)$ Réf. $\beta$ Car. | $C(10^{-6}M)$ Réf. Asta. | $I_{1530}/I_{1710}$ | $C(10^{-6}M)$ Réf. $\beta$ Car. | $C(10^{-6}M)$ Réf. Asta. |                                 |                          | Raman                                    | Visible |
| MELANGES SYNTHETIQUES                                                                                                                                                                                                                         |   |      |      |                                |               |                     |                                |                          |                     |                                 |                          |                     |                                 |                          |                                 |                          |                                          |         |
| $\beta$ Car. + asta.= $4,5 \cdot 10^{-6}M$ (3 : 1)                                                                                                                                                                                            |   |      |      | 0,56                           | 1,5           | <u>6,2</u>          | 2                              | 4,9                      | <u>3,9</u>          | 5,6                             | 3,2                      | <u>4,1</u>          | 5,4                             | <u>4,7</u>               | 4,3                             | 4,7                      | 4                                        |         |
| $\beta$ Car. + asta.= $5,1 \cdot 10^{-6}M$ (1 : 1)                                                                                                                                                                                            |   |      |      | 0,61                           | 2,5           | 10,4                | <u>3,2</u>                     | 5,5                      | 4,5                 | <u>6,3</u>                      | 3,5                      | 4,7                 | <u>5,9</u>                      | 6,5                      | <u>5,1</u>                      | 5,1                      | 4,4                                      |         |
| $\beta$ Car. + asta.= $4,8 \cdot 10^{-6}M$ (1 : 3)                                                                                                                                                                                            |   |      |      | 0,56                           | 3             | 12,5                | <u>3,8</u>                     | 4,6                      | 3,8                 | <u>5,3</u>                      | 3                        | 4                   | <u>5,1</u>                      | 6,8                      | <u>4,7</u>                      | 4,7                      | 4                                        |         |
| ESPECES                                                                                                                                                                                                                                       |   |      |      |                                |               |                     |                                |                          |                     |                                 |                          |                     |                                 |                          |                                 |                          |                                          |         |
| <i>Carcinus maenas</i> (crustacé)                                                                                                                                                                                                             | A | 66   | 0,80 | 3,75                           | 15,6          | <u>4,8</u>          | 5,15                           | 4,15                     | <u>5,9</u>          | 3,9                             | 5                        | <u>6,6</u>          | 8,3                             | <u>5,8</u>               | 6,67                            | 6,34                     |                                          |         |
| <i>Crepidula fornicata</i> (gastéropode)                                                                                                                                                                                                      | B | 52   | 0,35 | 0,6                            | <u>2,5</u>    | 0,78                | 1,6                            | <u>1,3</u>               | 1,8                 | 0,94                            | <u>1,2</u>               | 1,6                 | <u>1,7</u>                      | 1,4                      | 1,72                            | 2,77                     |                                          |         |
| <i>Pisidia longicornis</i> (crustacé)                                                                                                                                                                                                         | C | 9    | 0,42 | 1,6                            | 6,5           | <u>2</u>            | 2,5                            | 2                        | <u>2,8</u>          | 1,4                             | 1,7                      | <u>2,3</u>          | 3,4                             | <u>2,4</u>               | 2,42                            | 3,33                     |                                          |         |
| <i>Pagurus bernhardus</i> (crustacé)                                                                                                                                                                                                          | D | 18   | 1,02 | 6                              | 25            | <u>7,7</u>          | 6,3                            | 5,1                      | <u>7,3</u>          | 4,7                             | 6                        | <u>8</u>            | 12                              | <u>7,7</u>               | 8,11                            | 8,72                     |                                          |         |
| <i>Littorina littorea</i> (gastéropode)                                                                                                                                                                                                       | E | 27   | 0,90 | 0,1                            | 0,45          | <u>0,14</u>         | 0,18                           | 0,14                     | <u>0,2</u>          | 0,08                            | 0,1                      | <u>0,14</u>         | 0,23                            | <u>0,16</u>              | 0,16                            | 7,13                     |                                          |         |
| <i>Mytilus edulis</i> (lamellibranche)                                                                                                                                                                                                        | F | 94   | 0,55 | 0,13                           | 0,53          | <u>0,16</u>         | 0,25                           | 0,20                     | <u>0,29</u>         | 0,05                            | 0,06                     | <u>0,09</u>         | 0,26                            | <u>0,18</u>              | 0,19                            | 4,35                     |                                          |         |
| <i>Pinnotheres pisum</i> (crustacé)                                                                                                                                                                                                           | G | 22   | 0,58 | 0,8                            | <u>3,3</u>    | 1                   | 4,4                            | <u>3,5</u>               | 5                   | 2,5                             | <u>3,2</u>               | 4,2                 | <u>3,3</u>                      | 3,4                      | 3,4                             | 4,59                     |                                          |         |
| <i>Cultellus pellucidus</i> (lamelli-branche)                                                                                                                                                                                                 | H | 19   | 0,26 | 0,11                           | 0,48          | <u>0,15</u>         | 0,14                           | 0,11                     | <u>0,16</u>         | 0,25                            | 0,31                     | <u>0,42</u>         | 1,3                             | <u>0,24</u>              | 0,24                            | 2,06                     |                                          |         |
| <i>Owenia fusiformis</i> (Annélide)                                                                                                                                                                                                           | I | 7,5  | 0,08 | 0,05                           | 0,22          | <u>0,07</u>         | 0,05                           | 0,04                     | <u>0,06</u>         | 0,05                            | 0,06                     | <u>0,09</u>         | 1,11                            | <u>0,07</u>              | 0,07                            | 0,63                     |                                          |         |
| <i>Abra alba</i> (lamellibranche)                                                                                                                                                                                                             | J | 28,5 | 1,03 | 0,15                           | 0,6           | <u>0,19</u>         | 0,21                           | 0,17                     | <u>0,24</u>         | 0,26                            | 0,33                     | <u>0,44</u>         | 0,37                            | <u>0,29</u>              | 0,32                            | 8,16                     |                                          |         |
| <i>Nassarius reticulatus</i> (gastéro-pode)                                                                                                                                                                                                   | K | 13   | 0,16 | 0,11                           | <u>0,45</u>   | 0,14                | 0,23                           | <u>0,18</u>              | 0,26                | 0,23                            | <u>0,29</u>              | 0,38                | <u>0,31</u>                     | 0,26                     | 0,32                            | 1,27                     |                                          |         |

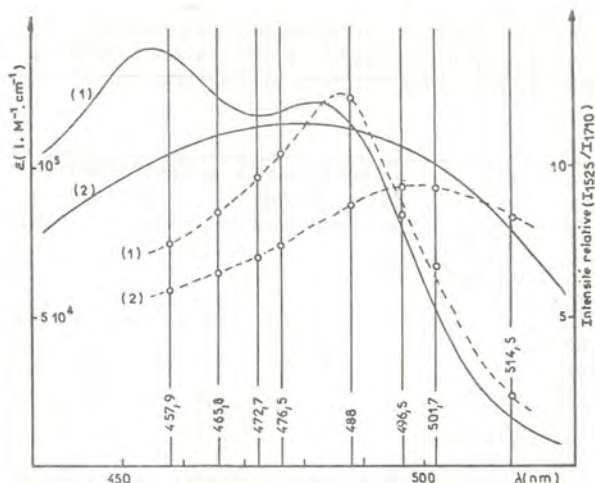


Fig. 4 : Spectres d'absorption visible (-) et profils d'excitation (...) du  $\beta$ -carotène (1) et de l'astaxanthine (2). ( $c = 10^{-6} \text{M}$ ) d'après (6)

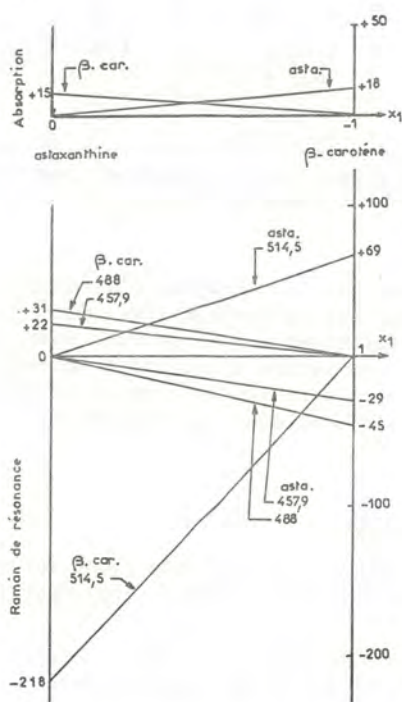


Fig. 5: Erreur relative  $\frac{(c_1 + c_2) - c_t}{c_1 + c_2}$  (%) obtenue pour le dosage d'un mélange binaire  $\beta$ -carotène et astaxanthine, d'après (6)

$\beta$ -carotène puis l'astaxanthine comme référence. Nous pouvons remarquer une grande disparité des résultats pour les concentrations calculées, mais la moyenne des résultats présentant la plus faible disparité (donc en accord avec le profil d'excitation de l'un des composants) est très proche de la concentration initialement introduite. Cette approximation semble donc justifiée et peut être utilisée dans cette méthode de dosage.

#### 4. APPLICATION A DES ESPECES DE LA MACROFAUNE BENTHIQUE

Cette méthode a été appliquée à différentes espèces présentes en Baie de Seine. Les spécimens prélevés en novembre 84 ont été débarassés le cas échéant de leur tube ou de leur coquille, puis broyés dans l'acétone. Le résidu a été repris plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'un surnageant incolore. Les différents surnageants ont été réunis; les solutions ainsi obtenues ont été étudiées par absorption visible et par Raman de résonance; les résultats sont regroupés dans le tableau 1. Comme pour les mélanges synthétiques on observe une dispersion des concentrations calculées à partir de différentes longueurs d'onde excitatrices et à l'aide de différentes références. N'ont été prises en considération pour le calcul de la concentration globale en caroténoïdes que les valeurs présentant la plus faible dispersion (chiffres soulignés); pour ceci nous avons considéré le rapport de la concentration la plus élevée sur la concentration la plus faible. Dans le calcul de la concentration globale nous avons pris en compte la correction due à l'existence d'une certaine quantité d'eau dans la solution, eau provenant du matériel humide lorsqu'il a été placé dans l'acétone.

La comparaison avec les mesures par absorption visible montre qu'un accord satisfaisant existe pour cinq espèces (A, B, C, D et G); pour les six autres (E, F, H, I, J et K) la spectrophotométrie d'absorption donne des résultats beaucoup plus élevés. Ces écarts s'expliquent facilement en considérant le spectre d'absorption visible des solutions (Fig. 2), en effet l'observation de bandes d'absorption vers 410-420 nm et vers 675 nm dans les spectres E, F, H, I, J et K indique la présence d'autres pigments que les caroténoïdes, ce qui augmente considérablement la densité optique mesurée. La spectrométrie Raman de résonance qui ne met en évidence que les caroténoïdes avec les longueurs d'onde d'excitation utilisées est insensible à ce phénomène.



La disparité des mesures entre l'intensité Raman de résonance et la densité optique relevée dans la Figure 3 peut être ainsi expliquée. Nous résumons dans le tableau 2 l'origine des erreurs commises par l'application de chacune des méthodes.

|                  | Causes d'erreur                                                                | Spectrométrie Raman                             | Spectrométrie visible                         |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| INITIALES        | Caroténoïdes non extractibles à l'acétone                                      | 0 - 10%                                         |                                               |
|                  | Erreurs sur les volumes et pertes lors des préparations de la solution à doser | 0 - 1%                                          |                                               |
| LORS DES MESURES | Influence des pigments autres que les caroténoïdes avant saponification        | 0%                                              | 0 - 200%                                      |
|                  | après saponification                                                           | 0%                                              | 0 - 10%                                       |
|                  | Caroténoïdes exogènes (parasites, épibiontes, contenu du tube digestif ...)    | 0 - 5%                                          |                                               |
|                  | Teneur en H <sub>2</sub> O de la solution acétonique                           | 5 - 12%                                         | 0 - 1%                                        |
|                  | Coefficients d'extinction molaire                                              | 0 - 20%                                         |                                               |
|                  | Profils d'excitation des caroténoïdes                                          | 0 - 200%                                        | 0 - 20%                                       |
|                  | Corrections d'absorption pour les solutions trop concentrées                   | 0 - 20%                                         | 1%                                            |
|                  | Volumes et concentrations possibles pour le dosage                             | 0,01ml<br>10 <sup>-5</sup> à 10 <sup>-7</sup> M | 1 ml<br>10 <sup>-5</sup> à 10 <sup>-6</sup> M |
|                  | Influence de la radiation d'analyse                                            | dégradation possible                            | nulle                                         |

Tableau 2.: Estimation comparative des causes d'erreur lors des dosages quantitatifs des caroténoïdes en spectrométries visible et Raman de résonance

## 5. CONCLUSION

La spectrométrie Raman de résonance, comme la spectrométrie d'absorption visible, permet de réaliser des analyses quantitatives de caroténoïdes. Cette méthode possède certains avantages dont le plus important est de pouvoir analyser une solution non purifiée sans interférence avec les autres constituants du mélange. Cependant les choix de la longueur d'onde d'excitation et du composé de référence sont très importants et peuvent conduire, s'ils ne sont pas adaptés au problème, à des valeurs arbitraires.

- (1) ISLER O. (1971) - Caroténoïds, Birkhauser Verlag
- (2) HOWARD JR W.F., NELSON W.H. and SPERRY J.F. (1980) - A resonance Raman method for the rapid detection and identification of bacteria in water, Appl.Spectrosc. 34 (1), p.72- 75
- (3) BRAHMA S.K., HARGRAVES P.E., HOWARD JR W.F. and NELSON W.H. (1983)- A resonance Raman method for the rapid detection and identification of algae in water, Appl.Spectrosc. 37 (1), p.55- 58
- (4) HOSKINS L.C. and ALEXANDER V. (1977)- Determination of carotenoïd concentrations in marine phytoplankton by resonance Raman spectrometry, Anal.Chem., 49 (6), p.695- 697
- (5) RIMAIL L., HEYDE M.E. and GILL D. (1973)- Vibrational spectra of some caroténoïds and related linear polyenes. A Raman spectroscopic study, J.Amer.Chem. Soc., 95 (14), p.4493- 4501
- (6) LAFAGE- SZYDLOWSKI N. (1984).- Apport de la spectrométrie Raman de résonance à l'étude qualitative et quantitative de mélange de caroténoïdes. Thèse Docteur - Ingénieur, Université de Lille I

LES VARIATIONS QUANTITATIVES DES CAROTENOÏDES DE LA MACROFAUNE BENTHIQUE EN  
BAIE DE SEINE ONT-ELLES DES RELATIONS AVEC LA POLLUTION OU L'ÉCOLOGIE DES  
ESPÈCES ?

NOEL P.\*, MERLIN J.C.\*\*, LAFAGE-SZYDLOWSKI N.\*\*, HUBERT M.\* & CHASSARD-  
BOUCHAUD C.\*

1. INTRODUCTION

Les caroténoïdes des animaux ont une origine alimentaire. Ils peuvent donc, dans une certaine mesure, donner des indications sur l'alimentation des espèces et l'état trophique des individus. Par ailleurs, certains Mollusques présenteraient une résistance à la pollution et à l'anoxie d'autant plus grande qu'ils seraient plus riches en caroténoïdes (Karnaukhov *et al.*, 1977).

Nous présentons dans ce travail les résultats obtenus en spectrométrie visible concernant l'analyse de 1301 individus appartenant à 25 espèces communes sur les côtes françaises de la Manche. Des dosages en spectrométrie Raman de résonance ont été faits en parallèle sur certains échantillons. L'accord satisfaisant des mesures réalisées à l'aide de deux processus physiques différents nous conduit à penser que les résultats obtenus concernent les caroténoïdes totaux et que l'une ou l'autre des méthodes ne privilégie pas de manière significative le dosage de caroténoïdes particuliers. Une comparaison des deux méthodes de dosage et les résultats obtenus sont exposés séparément (Merlin *et al.*, 1986).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

N'ont été étudiées en détail que les espèces les plus communes dans les biotopes considérés: les bivalves *Mytilus edulis*, *Abra alba* et *Cultellus pellioides*, le gastéropode *Nassarius reticulatus* et les annélides *Owenia fusiformis* et *Pectinaria koreni* (tableau 1). D'autres espèces ont été étudiées en complément (tableau 2), ainsi que quelques échantillons de sédiments pour évaluer l'erreur qu'entraîne la présence de sédiment dans le tube digestif des animaux analysés. Les extractions et les dosages quantitatifs des caroténoïdes totaux ont été effectués selon des méthodes classiques voisines de celles utilisées précédemment (Noël, 1979). Les teneurs sont exprimées ci-après en µg/g, par rapport au poids frais. Lorsque les pigments étaient en quantité suffisante, les animaux ont été considérés individuellement; dans le cas contraire, plusieurs individus ont dû être regroupés pour analyse.

Les animaux étudiés proviennent d'une région témoin supposée non polluée: Roscoff ou Baie de Morlaix (Pierre Noire, Beg an Fry, St Efflam) et de plusieurs stations en Baie de Seine, stations présentant potentiellement des degrés divers de pollution (port du Havre, point "A" (49°27'N, 0°1'E), point "E" (49°27'N, 0°4'E), bancs du Ratier et de Trouville). La collecte des spécimens a été faite par dragage en mer ou par récolte à basse mer pour les stations de l'estran.

\* Laboratoire Biologie et Physiologie des organismes marins, Université  
Pierre et Marie Curie, 4, Place Jussieu, F-75252 Paris Cédex 05, France.

\*\* Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman, C.N.R.S., Université  
de Lille I, F-59655 Villeneuve d'Ascq, Cédex, France.



## 3. RESULTATS (Tableaux 1 et 2).

| Espèces                      | ( N ) | Baie de Seine | Baie de Morlaix |
|------------------------------|-------|---------------|-----------------|
| <i>Abra alba</i>             | (261) | 4.68 à 35.11  | 4.92 à 16.23    |
| <i>Cultellus pellucidus</i>  | (157) | 5.21 à 44.68  | 4.58 à 39.95    |
| <i>Mytilus edulis</i>        | ( 39) | 22.88 à 52.44 | 29.77 à 35.59   |
| <i>Nassarius reticulatus</i> | ( 53) | 10.17 à 15.38 | 7.20 à 33.78    |
| <i>Owenia fusiformis</i>     | (419) | 7.02 à 36.64  | 5.89 à 40.09    |
| <i>Pectinaria koreni</i>     | (142) | 0.97 à 11.64  | /               |

Tableau 1: Teneurs en caroténoïdes des espèces principales étudiées.

(N) = nombre d'individus analysés.

3.1. Sédiments (23 échantillons analysés) :

Les sédiments recueillis ont une teneur en caroténoïdes variable, comprise entre 0.09 et 6.14  $\mu\text{g/g}$  pour les sables vaseux de Baie de Seine, de 0.12 à 0.44 pour des sédiments comparables en Baie de Morlaix, de 0.15 à 2.54 pour des sables vaseux du port de Roscoff, et de 62.43 à 74.09 pour la vase noire du port du Havre. Il a été constaté que la teneur en pigments variait avec la profondeur dans le sédiment, les couches sédimentaires les plus superficielles étant presque toujours les moins riches. Il semblerait donc qu'en milieu réducteur et par unité de surface, les bactéries anaérobies produisent plus de caroténoïdes que les organismes phototrophes du film superficiel. Les phénomènes de bioturbation des sédiments peuvent être responsables également d'une certaine variabilité des résultats.

3.2. Mytilus edulis :

Les moules témoins étudiées (St Eflam) montrent une teneur assez élevée qui varie de 29.7 à 35.6  $\mu\text{g/g}$  tandis que dans le port du Havre, cette teneur se situe entre 22,9 et 52,4  $\mu\text{g/g}$ .

3.3. Abra alba :

La teneur en caroténoïdes de ces petits Bivalves blancs est relativement peu élevée: 4.68 à 35.11  $\mu\text{g/g}$  pour les échantillons de Baie de Seine, et 4.92 à 16.23  $\mu\text{g/g}$  pour les échantillons de Baie de Morlaix.

3.4. Cultellus pellucidus :

Ce petit Bivalve à coquille pellucide présente une grande variabilité de la teneur en caroténoïdes; les valeurs observées sont de 5.21 à 44.68  $\mu\text{g/g}$  pour les échantillons de Baie de Seine et 4.58 à 39.95 pour les échantillons de Baie de Morlaix.

3.5. Nassarius reticulatus :

Les nasses étudiées ont une teneur moyenne: 10.17 à 15.38 pour les échantillons de Baie de Seine, et de 7.20 à 33.8  $\mu\text{g/g}$  pour les échantillons de Baie de Morlaix.

3.6. Owenia fusiformis :

Ces petites Annélides tubicoles ont une teneur assez variable, comprise entre 7.02 et 36.64 pour les échantillons de Baie de Seine, et 5.89 et 42.09 pour les échantillons de la Baie de Morlaix. Les tubes de cette espèce ont une teneur entre 1.07 et 5.85, ce qui est sensiblement dans les limites des sédiments où sont trouvés ces Annélides.

3.7. Pectinaria koreni :

Les Pectinaires sont peu pigmentées, avec des teneurs comprises entre

0.97 et 11.64  $\mu\text{g/g}$  en Baie de Seine. Les tubes ont des teneurs plus faibles, comprises entre 1.13 et 3.62.

| GROUPES et espèces           | Lieu de récolte | (N)    | Rochers       | Sable/vase  |
|------------------------------|-----------------|--------|---------------|-------------|
| <b>GASTEROPODA</b>           |                 |        |               |             |
| <i>Littorina littorea</i>    | (port du Havre) | ( 9 )  | 39.15 à 248.9 |             |
| <i>Natica</i> sp.            | (Baie de Seine) | ( 3 )  |               | 10.72       |
| <i>Crepidula fornicata</i>   | (port du Havre) | ( 6 )  | 20.93 à 40.76 |             |
| <b>PELECYPODA</b>            |                 |        |               |             |
| <i>Mya truncata</i>          | (Baie de Seine) | ( 1 )  |               | 2.97        |
| <b>CRUSTACEA</b>             |                 |        |               |             |
| <i>Carcinus maenas</i>       | (port du Havre) | ( 5 )  | 12.28 à 58.05 |             |
| <i>Liocarcinus depurator</i> | (Baie de Seine) | ( 2 )  |               | 3.79        |
| <i>Liocarcinus arcuatus</i>  | ( Roscoff )     | ( 5 )  |               | 26.30       |
| <i>Pilumnus hirtellus</i>    | (port du Havre) | ( 1 )  | 17.00         |             |
| <i>Pinnotheres pisum</i>     | (port du Havre) | ( 6 )  | 20.4 à 70.52  |             |
| <i>Pisidia longicornis</i>   | (port du Havre) | ( 4 )  | 57.45         |             |
| <i>Pagurus bernhardus</i>    | (port du Havre) | ( 7 )  | 64.52 à 64.81 |             |
| <i>Hippolyte varians</i>     | ( Roscoff )     | ( 86 ) | 70 à 101      |             |
| <i>Palaemon serratus</i>     | ( Roscoff )     | ( 1 )  | 34.31         |             |
| <i>Palaemon elegans</i>      | ( Roscoff )     | ( 1 )  | 39.71         |             |
| <i>Palaemon longirostris</i> | (Baie de Seine) | ( 72 ) |               | 2.22        |
| <i>Crangon crangon</i>       | (Baie de Seine) | ( 28 ) |               | 2.54 à 4.28 |
| <b>ANNELIDA</b>              |                 |        |               |             |
| <i>Amphitrite edwardsi</i>   | (Baie de Seine) | ( 1 )  |               | 15.25       |
| <i>Nereis longissima</i>     | (Baie de Seine) | ( 1 )  |               | 2.80        |
| <b>ECHINODERMATA</b>         |                 |        |               |             |
| <i>Ophiura texturata</i>     | (Baie de Seine) | ( 1 )  |               | 19.40       |

Tableau 2.- Comparaison des teneurs en caroténoïdes d'espèces de zone rocheuse et d'espèces de zone sableuse (exprimées en  $\mu\text{g/g}$  poids frais).  
(N) = nombre d'individus analysés.

### 3.8. *Varia species* :

Des informations concernant la teneur en caroténoïdes d'autres espèces ont été obtenues plus sporadiquement; les teneurs observées sont présentées dans le tableau 2.

### 3.9. Variabilité des teneurs :

Chez certaines espèces telles *Abra alba*, *Pectinaria koreni* ou *Nassarius reticulatus*, les teneurs semblent plus ou moins indépendantes de la taille des individus. Par contre, les petits individus d'autres espèces auraient des teneurs proportionnellement plus élevées que les grands (*Cultellus pellucidus*, *Carcinus maenas*). Ainsi, dans certains cas, la teneur moyenne d'une population dépendrait de la structure de celle-ci, ce qui pourrait justifier certaines variations saisonnières. Par ailleurs, la variation individuelle est forte chez certaines espèces (*Cultellus pellucidus*, *Littorina littorea*) alors qu'elle semble moins élevée chez d'autres (*Mytilus edulis*). Certaines variations semblent dues au sexe: chez *Pinnotheres pisum*, la teneur des mâles est trois à quatre fois inférieure à celle des femelles; inversement, chez *Crepidula fornicata*, les mâles ont une teneur deux fois plus forte que les femelles.



#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La variabilité des valeurs trouvées est due aux conditions d'analyse et à une variabilité intrinsèque des échantillons considérés. L'analyse par spectrométrie visible conduit à certaines approximations qui peuvent conduire à des erreurs importantes si elles ne sont pas corrigées. Ces approximations sont cependant tout à fait mineures par rapport à la variabilité du matériel biologique lui-même. En effet, dans des conditions d'analyses strictement comparables, les variations quantitatives d'un échantillon à un autre sont de l'ordre de 150 à 700%, et la variation maximale observée atteint environ 1200% dans le cas de *Pectinaria koreni*. Les causes de ces variations sont sans doute multiples. Il est possible d'invoquer de façon non exclusive la taille, le sexe et l'état sexuel, la saison, l'état nutritionnel (peut varier en fonction de l'heure de la journée ou des marées), le régime alimentaire (microphage, macrophage à dominante végétarienne ou carnivore), les biotopes fréquentés, la présence de pigments exogènes dans les organismes (sédiments, parasites, commensaux), et pour les crustacés, l'étape du cycle d'intermue. Un plus grand nombre d'analyses permettrait de confirmer et d'affiner les premiers résultats mentionnés dans ce travail. Une étude beaucoup plus approfondie serait nécessaire pour déterminer dans le cas de chaque espèce, les parts prises par les nombreux facteurs pouvant induire des modifications pigmentaires quantitatives.

Il n'a pas été possible jusqu'à présent de mettre en évidence de variations quantitatives significatives entre les zones supposées les plus polluées, et les autres. Cependant, nos résultats montrent clairement que les espèces vivant sur des fonds meubles à microphytes (sable plus ou moins vaseux) sont moins riches en caroténoïdes que les espèces de zones à macrophytes (blocs, rochers).

Etant donnée la densité nettement plus élevée des sédiments par rapport au matériel biologique, la teneur des sédiments en caroténoïdes est en général, relativement faible; il s'ensuit que les restes de sédiment pouvant se trouver dans le tube digestif des animaux étudiés, n'influent pas significativement sur les résultats.

Cette étude améliore notre connaissance auparavant très fragmentaire, sur les variations quantitatives des pigments caroténoïdes de la macrofaune benthique marine. Nous montrons que les résultats de Karnaukhov *et al.* (1977) ne semblent pas généralisables à d'autres espèces et à d'autres écosystèmes peu pollués ou sans conditions d'anoxie. Cela est en accord avec le travail récent de Raines *et al.* (1984). Il reste toutefois possible que la pollution soit trop faible ou soit d'un type différent de celle analysée par Karnaukhov pour pouvoir produire des variations quantitatives significatives au niveau des pigments caroténoïdes.

En conclusion, il faut remarquer qu'il est bien difficile de se prononcer sur d'éventuels effets subléthaux provoqués par les pollutions en Baie de Seine en ce qui concerne la pigmentation. Aucune anomalie pigmentaire évidente n'a été constatée dans le cadre de cette étude et il n'a pas été retrouvé de modifications pigmentaires attribuables avec certitude aux pollutions. Par contre, nous avons pu mettre en évidence pour la première fois semble-t-il, le fait que les animaux des zones rocheuses sont plus riches en caroténoïdes que ceux des zones vaso-sableuses. Cela n'est point surprenant, dans la mesure où la production algale est surtout développée en substrat dur. Les éléments nutritionnels disponibles au niveau de la faune des sédiments ne sont sans doute pas suffisamment riches en pigments pour pouvoir atteindre un niveau comparable à celui des espèces de substrat dur.

Ce travail a fait l'objet d'une communication au dernier Symposium International sur les Caroténoïdes (Noël *et al.* 1984).

- Karnaukhov V.N, Milovidova N.Y. & Kargopolova I.N. (1977).- On a role of carotenoids in tolerance of sea molluscs to environment pollution. Comp. Biochem. Physiol., 56A, p. 189-193.
- Merlin J.C., Noël P.Y., Lafage-Szydlowski N., Petit-Cossi G. & Wallart F. (1986).- Dosage des caroténoïdes de la macrofaune benthique par spectrométrie Raman de résonance. Comparaison avec les dosages par spectrométrie d'absorption visible. Ce volume, N° 33.
- Noël P. (1979).- Contribution à l'étude de la fonction chromatique de *Processa edulis* (Crustacé Natantia). Thèse de doctorat d'Etat es-sciences naturelles, Université P. & M. Curie, Paris VI, p. 1-273.
- Noël P.Y., Merlin J.D., Lafage-Szydlowski N., Hubert M. & Chassard-Bouchaud C. (1984).- Variations in benthic macrofauna carotenoids according to ecology and pollution in the english channel: quantitative analysis. 7th International Symposium on carotenoids, Munich, abstract p. 38.
- Raines P.S. & Davies B.H. (1984).- Carotenoids of the common mussel, *Mytilus edulis* : their hypothetical role in ATP production during anoxia. 7th International Symposium on carotenoids, Munich, 27-31 sept. 1984, abstract, p. 15.





GENTIL F. \*, IRLINGER J.P. \*\*, ELKAÏM B. \*\*, PRONIEWSKI F. \*\*\*

## INTRODUCTION

Le peuplement des sables fins envasés à *Abra alba* de la partie orientale de la baie de Seine a été décrit et délimité au cours du programme d'exploration biocénotique de la Manche (RCP 378 et GRECO 19 : Cabioch et Gentil, 1975; Gentil, 1976 et 1980). Il présente plusieurs particularités :

- c'est la surface la plus importante pour ce type de peuplement en considérant les côtes françaises de la Manche. Son confinement dans les fonds de baie est dû aux distributions sédimentaires étroitement dépendantes des intensités des courants de marée (Larsonneur, 1971; Larsonneur et coll., 1979).

- Ces fonds meubles envasés constituent en Baie de Seine à la fois une zone importante pour une grande partie du cycle biologique de nombreux poissons et un lieu privilégié pour leur pêche (notamment celle des poissons plats (Crézé, 1980). La macrofaune benthique de peuplements analogues qui représente une source potentielle de nourriture pour les poissons (Blegvad, 1914; Cushing, 1975;...) a été très étudiée dans la plupart des mers nord-européennes et montre généralement une forte richesse en espèces et en individus associée à une productivité importante. En Baie de Seine, aucune donnée quantitative sur la dynamique de ce peuplement n'était jusqu'à présent disponible alors que sa diversité spécifique a été reconnue comme élevée par rapport à l'aspect très appauvri du peuplement estuarien de la Seine (Gentil, 1976; Proniewski & Elkaïm, 1980).

- Situé au débouché de la Seine, quatrième fleuve français (avec un bassin versant qui héberge 40% de l'activité économique, 30% de la population et 20% de l'agriculture françaises), ce peuplement est donc soumis à des apports fluviaux polluants transitant par l'estuaire (Allen et coll., 1977; ce colloque). En mer du Nord et en Baltique, de telles situations ont suscité, en parallèle avec le développement industriel et urbain, des modifications dramatiques des peuplements benthiques liées aux périodes d'anoxie sédimentaire provoquées par les forts apports organiques (Pearson & Rosenberg, 1978).

Nous avons entrepris une étude de la cinétique du peuplement des sables fins envasés, proche de l'estuaire de la Seine, à la fois pour acquérir des bases quantitatives pour la compréhension de son fonctionnement et pour obtenir une première appréciation de sa sensibilité et de sa réactivité aux fluctuations et aux perturbations de l'environnement à proximité immédiate de l'embouchure de la Seine, dans les conditions particulières du régime macrotidal (Avoine, 1981; ce colloque).

\* Université P. & M. Curie et L.P. 4601-CNRS - Station Biologique, 29211 Roscoff.

\*\* Université P & M. Curie, Laboratoire d'Hydrobiologie, 12, rue Cuvier,  
75230 Paris Cédex 05.

\*\*\* Laboratoire Municipal, 5, rue R. Guénot, 76600 Le Havre.



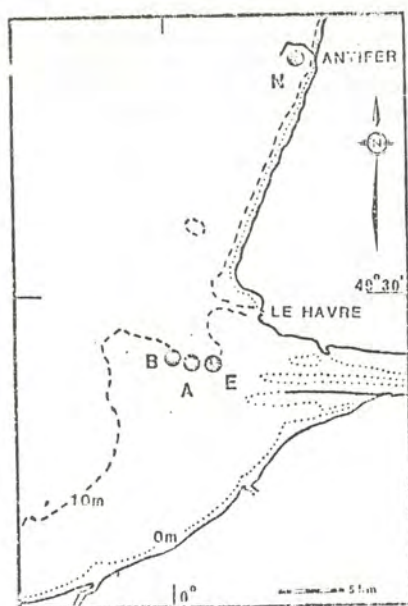
| Stations                                                                                                  | A                                                                                                                                                                                                | B                                                                                                                   | E                                                                                                    | N                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coordonnées géographiques                                                                                 | 49°27,2'N<br>0° 1,5'E                                                                                                                                                                            | 49°27,3'N<br>0° 0,2'E                                                                                               | 49°27,1'N<br>0° 2,9'E                                                                                | 49°39,6'N<br>0° 7,9'E                                                                                |
| Profondeur (m)                                                                                            | 10                                                                                                                                                                                               | 9                                                                                                                   | 11                                                                                                   | 26                                                                                                   |
| Données eaux (au fond)<br>(RNO, Monbet, Avoine, Crevel, personnelles)<br>. Salinité ‰<br>. Température °C | Gamme moyenne annuelle de 27,0 à 33,4 pour cette zone, pouvant être dépassée; au cours d'un cycle de marée, variation du même ordre (surtout en crue et vive-eau).<br>5,2 à 19,5 pour cette zone |                                                                                                                     |                                                                                                      | 30,0 à 34,5<br>variation plus faible<br><br>6,5 à 18,5                                               |
| Sédiments (coll. Avoine)<br>. Type sédimentaire<br>. % fraction <200µm<br>. % fraction < 50µm             | Sables vaseux<br><br>51<br>12                                                                                                                                                                    | Sables peu envasés<br><br>40<br>4                                                                                   | Vases sableuses<br><br>97<br>65                                                                      | Vases sableuses<br><br>90<br>59                                                                      |
| Echantillonnage :<br>. Engin utilisé<br>. Surface<br>. Rythme<br>. Période de suivi<br>. Maille du tamis  | Benne Smith-Mac Intyre<br>1m <sup>2</sup> = 10x0,1<br><br>au moins bimestriel<br>05/81-09/83<br>maille ronde<br>1mm                                                                              | Benne Smith-Mac Intyre<br>1m <sup>2</sup> = 10x0,1<br><br>au moins bimestriel<br>05/81-09/83<br>maille ronde<br>1mm | Suceuse en plongée<br>1m <sup>2</sup> = 6x0,16<br><br>mensuel<br>02/82-02/84<br>maille carrée<br>1mm | Suceuse en plongée<br>1m <sup>2</sup> = 6x0,16<br><br>mensuel<br>02/82-02/84<br>maille carrée<br>1mm |

Tableau 1.- Caractéristiques générales du milieu étudié, des stations d'étude et de l'échantillonnage.

| Stations                                                       | A                       |    | E   |    | N   |    |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------|----|-----|----|-----|----|
| Nombre total d'espèces récoltées                               | 163                     |    | 60  |    | 60  |    |
| Nombre total d'espèces rares<br>(récoltées 1 fois avec 1 ind.) | 34                      |    | 16  |    | 9   |    |
| Nombre d'espèces constantes :                                  |                         |    |     |    |     |    |
| . 100% des prélèvements                                        | 25                      |    | 2   |    | 4   |    |
| . ≥50% des prélèvements                                        | 70                      |    | 14  |    | 18  |    |
| Nombre moyen d'espèces par m <sup>2</sup>                      | 77                      |    | 17  |    | 21  |    |
| Nombre moyen d'individus<br>pour 0,1 m <sup>2</sup>            | 2700<br>(Tharyx = 1200) |    | 140 |    | 220 |    |
| Répartition par groupes<br>zoologiques et trophiques           | a                       | b  | a   | b  | a   | b  |
| . Annélides                                                    | 41                      | 63 | 27  | 39 | 31  | 32 |
| . Mollusques                                                   | 18                      | 30 | 39  | 53 | 35  | 45 |
| . Crustacés                                                    | 32                      | 2  | 18  | 2  | 20  | 3  |
| . Echinodermes                                                 | 4                       | 4  | 9   | 5  | 8   | 19 |
| . Divers                                                       | 5                       | 1  | 7   | 1  | 6   | 1  |
| . Suspensivores et dépositivores<br>de surface                 | 44                      | 86 | 54  | 63 | 49  | 75 |
| . Dépositivores de subsurface                                  | 12                      | 4  | 6   | 14 | 13  | 9  |
| . Carnivores et nécrophages                                    | 44                      | 10 | 40  | 23 | 38  | 16 |

Tableau 2.- Richesse spécifique, densité et répartition selon les groupes zoologiques et trophiques dans les stations A, E, N (a = % espèces non-rares, b = % individus).

## 1. CARACTERES GENERAUX DES STATIONS D'ETUDE



Quatre stations d'échantillonnage ont été réparties en deux zones :

- une radiale depuis la limite de l'estuaire en direction O-N-O, avec trois stations (E, A, B), équidistantes de moins d'1 mille et représentant trois faciès distincts du peuplement (tabl.1).
- Un point de comparaison en régime côtier, à l'écart de l'estuaire: la station N dans le port d'Antifer, construit en 1974, au pied de la falaise du pays de Caux, et abritant un fond d'envasement récent, conséquence de cet aménagement (Monbet & Crézé, 1975; Monbet, 1980).

Les caractéristiques des eaux et des sédiments dans cette partie orientale de la baie de Seine ont déjà fait l'objet de nombreux travaux (notamment: Allen et coll., 1977; Avoine, 1981, Crevel, 1984; ce colloque) et sont résumées dans le tableau 1.

Figure 1.- Carte des stations de prélèvements pour le suivi de la dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés à *Abra alba* de la baie de Seine orientale.

## 2. MATERIEL ET METHODES

La méthodologie utilisée est décrite brièvement dans le tableau 1; la fixation du refus de tamis a été pratiquée à bord avec du formol salé neutre à 10% et le tri au laboratoire a été effectué après coloration au rose Bengale.

Les prélèvements ont été réalisés à partir de différents navires et selon deux modalités distinctes, benne ou suceuse manipulée en plongée (Proniewski et coll., 1978), qui n'entraînent pas de conséquences notables vis-à-vis de la comparaison des résultats.



### 3. RESULTATS

Les résultats exposés ici constituent une mise au point préliminaire à partir des données numériques (richesse spécifique, densité) obtenues pour les stations A et B (Gentil, 1984) et E et N (Irlinger, 1985). Les résultats de la station B (en cours de dépouillement et représentant un faciès sableux de composition spécifique comparable à A mais moins riche en individus) ne seront pas exploités ici en totalité.

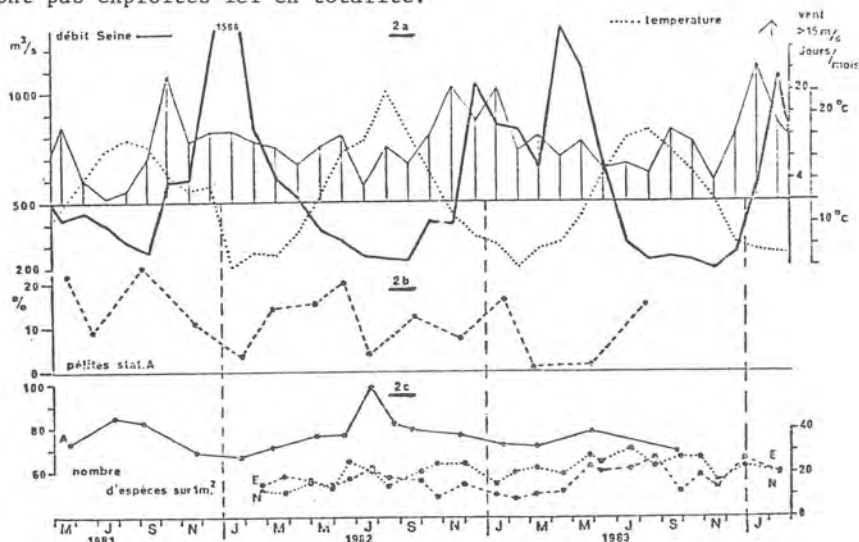


Figure 2a.- Débit de la Seine (moyennes mensuelles; données Port Autonome de Rouen), force des vents (nombre de jours de vent supérieur à 16 m/s : données Météorologie Nationale), température de l'eau au fond (données R.N.O.- point 2 : 49° 26' N/0° 2'E), de mai 1981 à février 1984.

Figure 2b.- Taux de pélites (< 50 µm) dans le sédiment pour la station A, au cours de l'étude : données personnelles en collaboration avec J. Avoine).

Figure 2c.- Richesse spécifique totale pour les stations A, E, N, au cours de l'étude. (échelles 60 à 100 espèces : station A; 0 à 40 espèces: stations E et N).

#### 3.1. Richesse et composition spécifique

Le tableau 2 résume les caractéristiques des stations A, E et N vis-à-vis des espèces recueillies durant l'étude.

La richesse spécifique et la répartition en groupes zoologiques et trophiques différencient clairement la station A de E et N. Toutefois, si l'on considère les espèces les plus constantes (présentes au moins dans la moitié des prélèvements) 12 sont communes aux trois stations; ainsi la quasi-totalité des espèces constantes dans E et N sont constantes également à la station A. Ce sont : *Pectinaria koreni*, *Nephtys hombergii*, *Owenia fusiformis*, *Abra alba*, *Cultellus pellucidus*, *Tellina fabula*, *Mysella bidentata*, *Nucula turgida*, *Nassarius reticulatus*, *Diastylis bradyi*, *Acrocnida brachiata*, *Ophiura texturata*.

Les variations saisonnières du nombre d'espèces pour 1 m<sup>2</sup> (fig. 2c) montrent un maximum estival-automnal et un minimum hivernal; le maximum s'explique en grande partie par l'augmentation de la densité de nombreuses espèces après leur recrutement larvaire sur le fond en printemps-été, phénomène habituel en climat tempéré, ce qui renforce statistiquement, à surface d'échantillonnage égale, la capture des espèces peu abondantes en hiver.

Les Annélides et les Mollusques forment la majorité des espèces récoltées, avec le groupe des Crustacés lequel présente de fortes variations saisonnières.

### 3.2. Densité numérique

Le tableau 2 expose les répartitions des individus par groupes zoologiques et trophiques ainsi que les valeurs moyennes des densités, au cours de l'étude.

Les stations E et N apparaissent encore dominées par les Mollusques tandis que les Annélides sont les plus abondantes en A, où *Tharyx marioni* représente près de 50% de la densité totale. D'une façon générale, les suspensivores et dépositivores de surface dominent largement le peuplement et l'importance numérique des dépositivores de subsurface semble s'accroître avec le taux de pélites dans les sédiments.

Les variations saisonnières des densités (fig. 3a) s'observent parallèlement à celles de la richesse en espèces; un petit nombre d'espèces, soit constamment dominantes (comme *Tharyx marioni*, *Mysella bidentata* dont l'importance numérique est précisée pour A sur la fig. 3a), soit présentant des pics de fortes abondances limités dans le temps (*Pectinaria koreni*, *Cultellus pellucidus*, fig. 3b et c) contribuent largement aux fluctuations de la densité totale (exemple de juillet 1982).

### 3.3. Diversité et structure numérique

#### 3.3.1. Indice de diversité :

Les résultats obtenus en considérant l'indice de diversité  $H'$  de Shannon-Weaver couramment utilisé en écologie (Daget, 1976) n'apparaissent pas significatifs en raison de la dominance de certaines espèces. Pour les stations E et N, malgré quelques irrégularités imputables aux recrutements importants d'une ou deux espèces, la saisonnalité de la diversité est conservée. Minimales en hiver et maximales en été-automne, les valeurs varient de 1,5 à 3,2.

Pour la station A,  $H'$  ne traduit pas de phénomène saisonnier particulièrement net du fait de la dominance constante de *Tharyx marioni* et *Mysella bidentata* (fig. 3a). En ne considérant pas ces deux espèces, la diversité présente alors une certaine saisonnalité avec des valeurs minimales au printemps (3,2) et maximales en été-automne (4,3).

#### 3.3.2. Structure numérique :

a) diagrammes rang-fréquence: la représentation graphique par les diagrammes rang-fréquence (DRF) permet de visualiser la hiérarchie numérique entre les espèces d'un peuplement (Frontier, 1976). Seules les 10 premières espèces (représentant au moins 90% des individus) ont été retenues dans les courbes choisies comme illustrations des situations rencontrées (fig. 4).

Les DRF obtenus pour la station E (allure plus ou moins rectiligne) traduisent un peuplement avec peu d'espèces et d'individus, dont la structure est fortement influencée par les recrutements de quelques espèces.

La stabilité relative de la station N est marquée par une tendance des DRF à la formation d'un plateau qui s'explique par un groupe de 5 espèces dominantes, caractéristiques du peuplement.

L'allure des courbes à la station A permet de discerner deux cas extrêmes:

- une situation hivernale (03/82) avec une ou deux espèces très dominantes (*Tharyx marioni* et *Mysella bidentata*) correspondant au stade 1 (début de succession) de Frontier (1976);
- une situation de fin de printemps et d'été (07/82) avec quatre à cinq espèces dont les forts recrutements (fig. 3b et c) les rapprochent des valeurs des deux espèces dominantes. Cette allure similaire du stade 2 (maturité du système) de Frontier (1976) est constituée essentiellement par l'abondance de formes juvéniles et jeunes de quelques espèces; elle persistera jusqu'à l'automne pour revenir ensuite à un stade 1, en même temps que les populations de ces espèces sub-dominantes déclineront en vieillissant (fig. 3b et c).



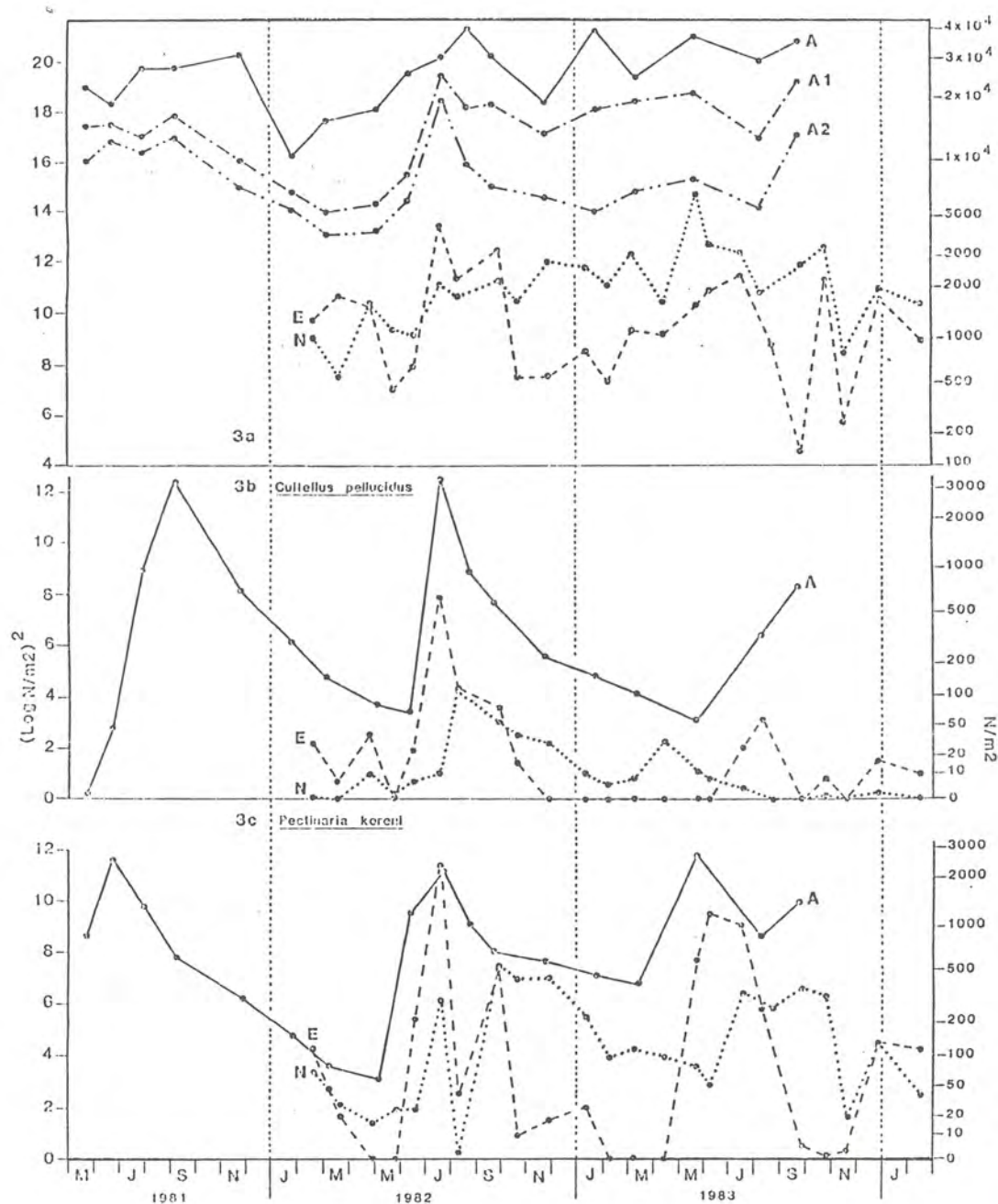


Figure 3.- Evolution au cours de l'étude des densités (nombre d'individus pour  $1 \text{ m}^2$ ) exprimées en logarithme décimal au carré.

Figure 3a.- Densités totales: A, E, N pour les stations A, E et N; A1 et A2 correspondent à la densité totale pour la station A diminuée respectivement de la densité de *Tharyx marioni*, et des densités de *Tharyx marioni* et *Mysella bidentata*.

Figure 3b.- Densités de *Cultellus pellucidus* pour les stations A, E et N.

Figure 3c.- Densités de *Pectinaria koreni* pour les stations A, E et N.

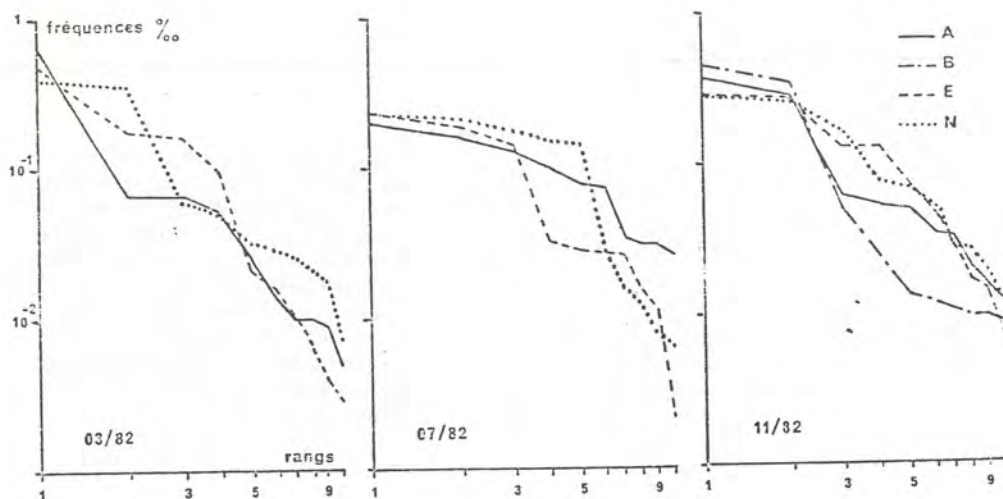


Figure 4.- Diagrammes rang-fréquence des 10 premières espèces pour les stations A, B, E, N, en mars, juillet, novembre 1982 (fréquences en ‰ de l'effectif total).

b) Coefficient de rang de Spearman: afin d'analyser les modifications dans l'ordre hiérarchique des principales espèces au cours de l'étude, les prélèvements ont été comparés entre eux pour chacune des stations, à l'aide du coefficient de rang de Spearman (Daget, 1976). Les résultats de cette analyse sont représentés (fig. 5) par la méthode des polygones inscrits appliquée à la station A.

Les fortes affinités (supérieures à 0,75) sont plus nombreuses en A (48% des relations possibles) qu'en N (8%) et E (4%), démontrant une plus grande constance des rapports hiérarchiques pour A. Dans cette station, on note entre les périodes mars-mai et juin-juillet 1981, 1982 et 1983 (fig. 5), un changement net, observé également entre mai et juin 1982 et entre avril et mai 1983 pour les stations E et N. Ces remaniements hiérarchiques correspondent aux forts recrutements (sur tamis 1 mm) des espèces principales durant le printemps (fig. 4).

Une individualisation plus nette des situations hivernales par rapport à l'été s'établit pour E traduisant certainement des états minimaux particulièrement accusés pour le peuplement en relation avec les conditions du milieu les plus sévères à proximité immédiate de l'estuaire, amplifiant les mortalités habituelles d'automne et d'hiver.

La station N présente une dissymétrie des affinités entre 1982 et 1983 qui illustre la tendance à l'établissement d'un peuplement plus structuré à partir de la situation de l'hiver 1982-1983 et des recrutements printaniers suivants.



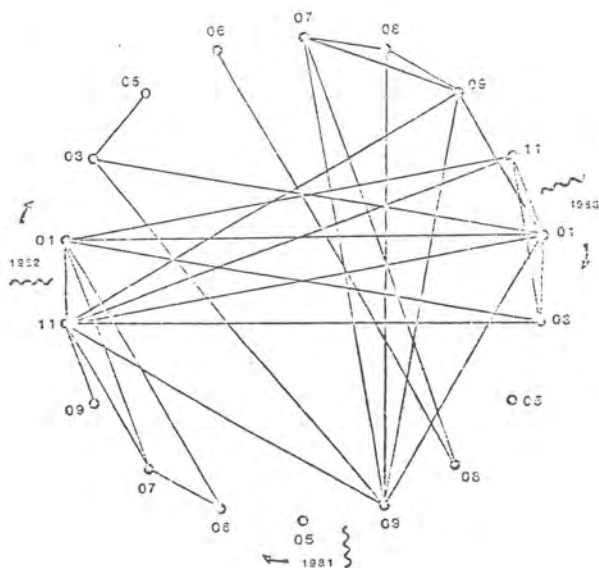


Fig. 5.- Représentation par la méthode des polygones inscrits des corrélations de rang de Spearman (supérieures à 0,80) entre les relevés de la station A, de mai 1981 (05) à septembre 1983 (09) (calculs avec 38 espèces principales dont la densité a dépassé au moins une fois 50 individus pour 1 m<sup>2</sup>).

#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Il apparaît d'abord que le peuplement des sables fins envasés à *Abra alba* de la baie de Seine orientale est comparable à ceux de même type connus en Manche ou dans les mers européennes; il se rattache de par ses caractéristiques qualitatives (composition et richesse spécifique) à la "*Syndosmya (Abra)alba* community" de Petersen (Thorson, 1957), et présente un cycle annuel selon les aspects saisonniers habituels en région tempérée avec des valeurs de richesse en espèces et en individus minimales en hiver et maximales en été-automne.

Si l'on compare les résultats de densité obtenus avec l'estimation d'une moyenne annuelle de 400 individus récoltés sur 0,1 m<sup>2</sup>, admise pour ce type de peuplement (Gerlach, 1978; Dauvin, 1984), on note que la densité observée à la station A (2700 individus pour 0,1 m<sup>2</sup>) est particulièrement élevée se rapprochant sensiblement de celles trouvées aux débouchés de l'Hudson (New-York) avec 4640 individus pour 0,1 m<sup>2</sup> (Sanders, 1956), ou du Pô avec 10.000 individus pour 0,1 m<sup>2</sup> (Ambrogi et coll., 1983). Par contre, les stations N et E présentent des effectifs réduits d'un facteur 2 et 3, par rapport à la moyenne pour ce type de peuplement, traduisant un état d'appauvrissement.

Au total, l'étude sur deux ans de ces 3 stations permet de dégager les grands traits de la cinétique du peuplement.

La station A représente un faciès enrichi du peuplement avec des caractéristiques qualitatives typiques mais avec des particularités numériques (densité totale et dominance de quelques espèces) traduisant vraisemblablement un apport organique important.

Sa structure hiérarchique caractérisée par la forte dominance d'une ou deux espèces, reste assez constante au cours de l'année, excepté durant le remaniement printanier provoqué par les importants recrutements de quelques espèces. Ces arrivées larvaires en coïncidence avec le changement saisonnier d'action des principaux paramètres du milieu, correspondent aux conditions optimales pour leur installation et leur développement: dépôt de particules fines sous dominance d'influence marine, température, étiage, taux relativement faible de métaux lourds dans les eaux et les sédiments, ... (Avoine et coll., 1984 et 1985).

La majorité des espèces concernées par ce processus peuvent être qualifiées, au point de vue de leur stratégie démographique, de "stratégues-r" (Barbault, 1976) avec notamment une durée de vie benthique courte, une forte croissance estivale, une reproduction précoce et unique, et une phase larvaire planctonique de longue durée (au moins un mois); ce sont ces espèces qui influent le plus sur la dynamique quantitative du peuplement. On constate en effet que, sur les 14 espèces principales du point E, 11 ont une phase larvaire planctonique longue (les 3 autres possédant des facultés de déplacement à l'état adulte). De par la durée de leur phase larvaire planctonique, elles sont soumises dans leur dissémination à la dispersion turbulente et à la dynamique à mésoéchelle intenses dans l'ensemble de la région marine. Ainsi le peuplement, et notamment les différents termes du gradient baie-estuaire fonctionnent vraisemblablement en systèmes ouverts, le repeuplement estival des zones les plus sujettes à perturbation faisant appel à un potentiel d'adultes reproducteurs bien plus largement réparti. Ce caractère paraît plus accentué à la station E, à proximité immédiate de l'estuaire, qu'à la station A où l'on rencontre parmi les dominantes deux espèces à phase larvaire planctonique réduite (*Tharyx marioni* et *Chaetozone setosa*) absentes en E malgré un substrat favorable.

Enfin, il faut remarquer que, même en E, malgré d'importantes fluctuations de courtes durées en relation probable avec les perturbations naturelles ou anthropogéniques, la limite extrême de pollution avant la disparition de la macrofaune (dominance de *Capitella capitata* avec un nombre très réduit d'espèces: Pearson et Rosenberg, 1978) n'est pas atteinte.

La station N constitue un faciès en dynamique d'envasement qui présente, comparativement à la station E, un nombre d'espèces et d'individus plus important, ainsi que des fluctuations temporelles moindres. L'arrêt des dragages à l'intérieur du port d'Antifer depuis 1981 (Guyader, comm. pers.) semble pouvoir être mis en relation avec la tendance générale à l'accroissement du nombre d'espèces et d'individus observé à cette station.

La cinétique du peuplement des sables fins envasés à *Abra alba*, à proximité de l'estuaire de la Seine peut être appréhendée selon les deux aspects complémentaires du fonctionnement de cet environnement: influence des apports fluviaux contrebalancée par l'intense régime macrotidal qui permet la dispersion des particules et des polluants potentiels et donc l'existence d'un milieu hypertrophique sans phénomène d'anoxie du sédiment.

Ce peuplement subissant des perturbations cycliques et qui néanmoins paraît se reconstituer rapidement peut être qualifié de peuplement de caractère robuste, pionnier ou juvénile selon Frontier (1976, 1977), avec notamment prédominance des actions de "contrôle physique" par les paramètres du milieu sur les interactions biotiques (ou "contrôle biologique"). De ceci pourrait découler le caractère de persistance du peuplement, comparable à ce qui existe en général dans les milieux perturbés en permanence (Frontier, 1977).

Enfin, quoique présentant des cycles biologiques non altérés au moins pour le faciès envasé, les espèces principales qui parviennent à se développer dans ce milieu à fortes instabilités et perturbations, peuvent présenter des caractéristiques physiologiques amoindries en comparaison avec celles d'individus vivant dans un milieu moins perturbé (Sylvestre et coll., 1985).

- 
- Allen G.P., Guillaud J.F. & Avoine J. (1977).- SAUM estuaire de la Seine. Bilan des connaissances sur le milieu marin. Dossier n° 1, MEBS/MABN/CNEXO Ed., 173 p.
- Ambroggi R., Bedulli D., Matricardi G., Parisi V. & Rellini G. (1983).- Le macrobenthos de la lagune "Sacca del Canarin" (Delta du Pô). Rapp. Comm. int. Mer Médit., 28, 6, 297-301.



- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle en Géologie, Univ. Caen, 236 p.
- Avoine, J., Boust D., Crevel L., Dubrulle L. & Guéguénat P. (1984).- Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. XVIIIe journ. Hydraulique, Marseille, 11-13 sept. 1984, (résumé).
- Avoine J. & Crevel L. (1985).- Influence des apports fluviaux en Baie de Seine. Ce volume, N° 10.
- Barbault R. (1976).- La notion de stratégie démographique en écologie. Bull. Ecol., t 7, 4, 373-390.
- Blegvad H. (1914).- Food and conditions of nourishment among the communities of invertebrate animals found on or in the sea bottom in Danish waters. Rep. Danish biol. Stat., 24, 17-22.
- Cabioch L. & Gentil F. (1975).- Distribution des peuplements benthiques dans la partie orientale de la baie de Seine. C.R. Ac. Sci., Paris, t.280D, 571-574.
- Crevel L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse 3ème cycle en Géologie, Univ. Caen, 173 p.
- Créze J.Y. (1980).- La pêche: étude géographique des pêches dans l'estuaire de la Seine et ses parages immédiats. SAUM estuaire de la Seine. CNEXO/COB, Ed., Brest, 183 p.
- Cushing D.H. (1975).- Marine ecology and fisheries. Cambridge University Press, 278 p.
- Daget J. (1976).- Les modèles mathématiques en écologie. Masson Ed., Paris, 172p.
- Dauvin J.C. (1984).- Dynamique d'écosystèmes macrobenthiques des fonds sédimentaires de la baie de Morlaix et leur perturbation par les hydrocarbures de l'Amoco Cadiz. Thèse doct. d'Etat, Univ. P. & M. Curie, Paris 6, 469 p.
- Frontier S. (1976).- Utilisation des diagrammes rang-fréquence dans l'analyse des systèmes. J. Rech. océanogr., 1, 3, 35-48.
- Gentil F. (1976).- Distribution des peuplements benthiques en Baie de Seine. Thèse 3ème cycle en Océanographie biologique, Univ. Paris 6, 70 p.
- Gentil F. (1980).- Les peuplements benthiques de la baie de Seine: caractères généraux et liaisons biogéographiques. C.R. 105è congrès nat. Soc. Sav., Caen, Sci. III, 125-138.
- Gentil F. (1984).- Etude de la dynamique du peuplement benthique à *Abra alba-Pectinaria koreni* de la baie de Seine. Rapport de contrats CNEXO 81/6534 et 82/6915. 55 p.
- Gerlach S.A. (1978).- Food chain relationships in subtidal silty sand marine sediments and the role of meiofauna in stimulating bacterial productivity. Oecologia, 33, 55-69.
- Irlinger J.P. (1985).- Dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés de la baie de Seine orientale. Thèse 3ème cycle en Ecologie, Univ. Paris 6, 286 p.
- Larsonneur C. (1971).- Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse Doct. Etat, Univ. Caen, 394 p.
- Larsonneur C., Auffret J.P. & Vaslet D. (1979).- Carte des sédiments superficiels de la Manche (1: 500.000). B.R.G.M. Ed., Orléans.

- Monbet Y. & Creze J.Y. (1975).- Incidences écologiques de la construction du port terminal d'Antifer. CNEXO/COB Ed., Brest, 124 p.
- Monbet Y. (1980).- Evolution des peuplements benthiques dans le port terminal d'Antifer. CNEXO/COB Ed., Brest, 111 p.
- Pearson T.H. & Rosenberg R. (1978).- Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. Oceanogr. mar. Biol., ann. Rev., 16, 229-311.
- Proniewski F., Delalande P. & Elkaim B. (1978).- Utilisation d'un nouveau modèle de suceuse à macrobenthos sur des fonds estuariens. J. Rech. océanogr., 3, 4, 3-7.
- Proniewski F. & Elkaim B. (1980).- Benthos subtidal de l'estuaire de la Seine. Résultats préliminaires. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 291 D, 545-547.
- Sanders H.L. (1956).- Oceanography of Long Island Sound, 1952-1954. X. Biology of marine bottom communities. Bull. Bingham Oceanogr. Coll., 15, 345-414.
- Sylvestre C., Batrel Y. & Le Gal Y. (1985).- La détection des effets sublétaux des pollutions. Utilisation *in situ* d'un indice biochimique, la charge énergétique. Ce volume, N° 32.
- Thorson G. (1957).- Bottom communities (sublittoral and shallow shelf): 461-534. In : Treatise on marine ecology and paleocology, Hedgpeth J.W. Ed., Geological Soc. Amer. Mem., 67, 1.





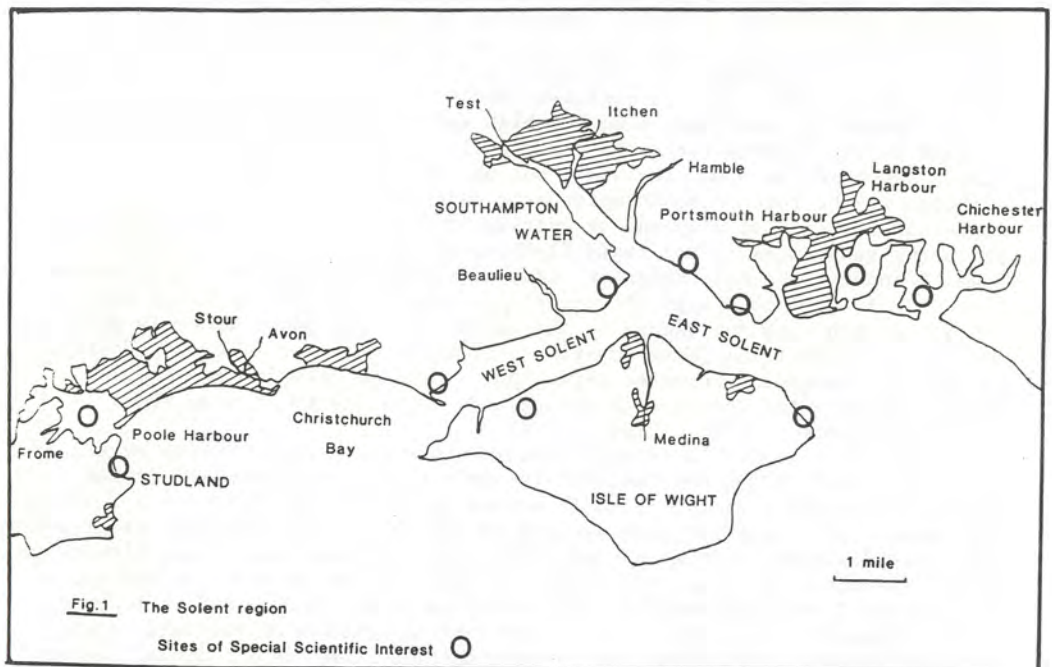
36

SOUTHAMPTON WATER AND THE SOLENT : BIOLOGICAL EFFECTS OF THE MULTI-USE OF AN ESTUARINE SYSTEM.

LOCKWOOD A.P.M. \*.

**ABSTRACT.** An outline is provided of (1) some factors which have influenced the clam and oyster populations of the area (2) the effect of nutrient load on phytoplankton production (3) the correlation between *Mesodinium* blooms and the summer oxygen levels in the stratified part of the estuary and (4) a description of the fauna and flora in regions adjacent to some industrial inputs.

Southampton Water and the Solent, with their associated river inputs, form a complex waterway interesting scientifically both in its own right and from what may be learnt of the effects of human influence. In both respects the area parallels the baie de Seine. The region contains a number of locations which have been designated sites of special scientific interest (SSSIs) because of the presence of rare species or of uncommon communities or threatened habitats (fig. 1). It is also subject to intense human activity of a variety of kinds.



\* Department of Oceanography : University of Southampton, SO9 5NH, U.K.



Principal amongst these are :

- 1) civic and domestic inputs via a number of sewage outlets,
- 2) industrial effluents, particularly along the western shore of Southampton Water,
- 3) river inputs with their associated nutrient load from agricultural land, trout farm etc...,
- 4) dredging for gravel and the maintenance of shipping lanes,
- 5) sport sailing, and
- 6) commercial fishing for Oysters (*Ostrea edulis*), American Clam (*Mercenaria mercenaria*) and Bass (*Dicentrarchus labrax*) together with semi-commercial or sport fishing for Cod (*Gadus morhua*), Mackerel (*Scomber scomber*) Plaice (*Pleuronectes platessa*) and other species. In addition the Test is an important salmon river.

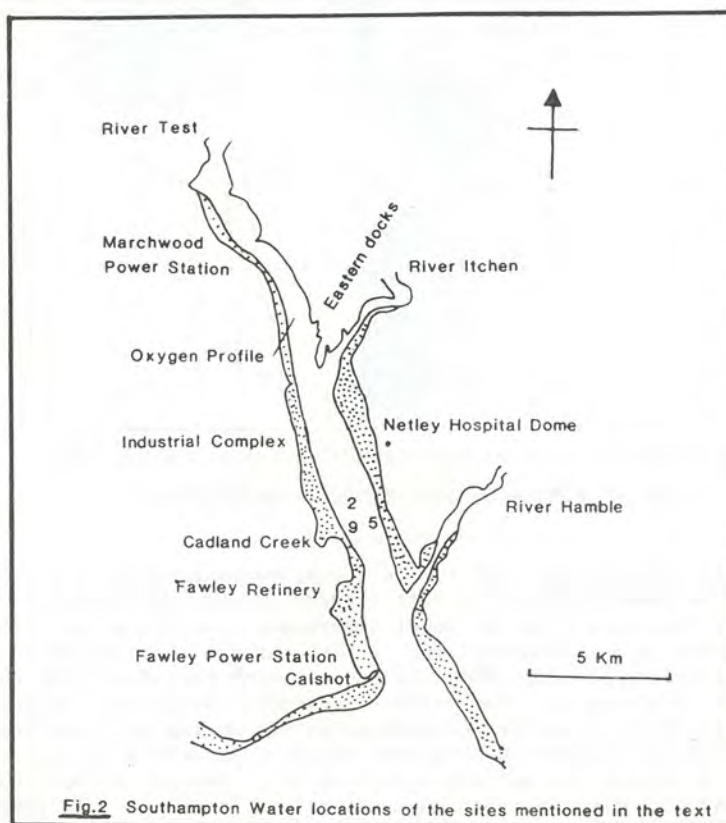
The recent issue of licences for oil exploration in Christchurch Bay, Poole Bay and Solent seems likely to add another dimension to the anthropogenic effects. Many of these factors impinge in one way or another on the fauna and flora of the region, but before discussing their effects, it is perhaps appropriate to outline briefly the history and physical features of the region.

Originally the Solent was a river system draining the output of the Stour, Avon and Frome rivers to the west, the Test, Itchen, Beaulieu, Hamble and Medina centrally and Portsmouth, Langstone and Chichester Harbours to the east. However, some 5000 years ago, during the Flandrian Transgression, the sea broke through the ridge joining the region south of Poole Harbour to the Isle of Wight and the rapid erosion of the tertiary rocks in the vicinity resulted in the formation of Christchurch Bay and the westerly opening of the Solent. (See West, 1980 for a detailed geological history of the area). The advent of this westerly opening, taken together with the hydrodynamics of the Channel, has resulted in a complex current regime a feature of which is that slack water does not coincide with high water and low water. Interaction between the geographical features and the constraints imposed on the natural period of oscillation in Channel waters by the constriction of the Channel width by the protrusion of the Cherbourg Peninsular and Isle of Wight are thought to be responsible for the unusual tidal regime in Southampton Water. (Webber 1973, 1980). This is characterised by a slow rising phase, usually with a "stand" at mid-tide, a double high water with a short and minor fall in tide height between the peaks and finally a rapid ebb. The long rise and stand, amounting to some nine hours out of the 12hr 25 minute cycle, has contributed to the role of Southampton as a major port.

Important in terms of disposal of introduced nutrients and other potentially polluting substances is the rapid flushing of the Solent relative to the volume of inputs. The net change in tidal volume for the Solent, is estimated to be  $540 \times 10^6 \text{ m}^3$  on a typical spring tide and  $270 \times 10^6 \text{ m}^3$  on neaps (Blain, 1979). In each case the change in the volume of Southampton Water is about one fifth of the total. More important, from the point of view of flushing, is the net change in the water throughput. The flow entering and leaving the Solent at Hurst Castle on a spring tide is estimated at some  $900 \times 10^6 \text{ m}^3$  and on neaps  $550 \times 10^6 \text{ m}^3$ . (Blain, 1979).

The catchment area for the rivers draining into the present Solent system is relatively small (3000 km<sup>2</sup>) and the two main rivers, the Test and Itchen, between them have a flow of some 23 cumecs in winter and 13.5 cumecs in summer (Collins, 1978). Together this amounts to less than 2% of the Neap tidal prism and hence Southampton Water is very much a marine dominated system with salinities in excess of 30‰ extending, at least in the sub-surface waters, up to and beyond the confluence of the estuaries of the Test and Itchen (Dyer, 1973). Typically the water column is well mixed below this juncture except under exceptional conditions such as the melting snow run off during January/February 1985 when some stratification was observed in both temperature and salinity as far south as Calshot (Boxall, S. person. comm.) (fig. 2). Stra-

tification does occur in the Test estuary and, at least during the summer months may involve temperature, salinity, oxygen and nutrient load (Rees & Williams, 1982; Crawford, 1985 person. comm.). Traditionnaly the Solent and Southampton Water have been the site of substantial fisheries for the European Oyster and in the early part of the last century there were significant beds underlying the present site of the Eastern Docks and near Netley Hospital.



Commercial fishing for *Ostrea* is however now restricted to the Solent. This fishery was severely curtailed following the 1962/63 winter which eliminated much of the stock. Recovery was initiated by a major spatfall in Stanswood Bay in 1969, perhaps from larvae originating in the Beaulieu River. Extension of the stock to include the Lepe Middle Ground (Central Solent) and Newtown Bank (West Solent) occurred in 1971 followed by still more successful spawning a few years later which recruited to the 35 mm size range in 1976. Minor recruitment has occurred in subsequent years but as a result of lack of major year class successes since the 1976 recruitment, continued fishing has resulted in a decline in stock and in some areas the stock index is lower than it was in 1973/74. The severity of the 1962/63 winter also had the effects of diminishing the numbers of the Neogastropod, *Ocenebra* (the Oyster Tingle) which *inter alia* drills *Ostrea*. Stocks of this animal have also recovered so that in the early 1980's it was estimated that some 60% of the oysters were being drilled. Previously this gastropod had been thought to have direct development like *Urosalpinx* (Carriker, 1957) a feature which places restrictions on the speed of recolonization after loss from an area. Recently however



it has been reported (Hawkins, 1985) that the local stock of *Ocenebra* can hatch as veliger larvae both in the field and in the laboratory. It also appears that local *Ocenebra* are attracted preferentially to oysters showing high metabolic activity rather than individuals in poor conditions (Hampfrey, 1955, Person. Comm.).

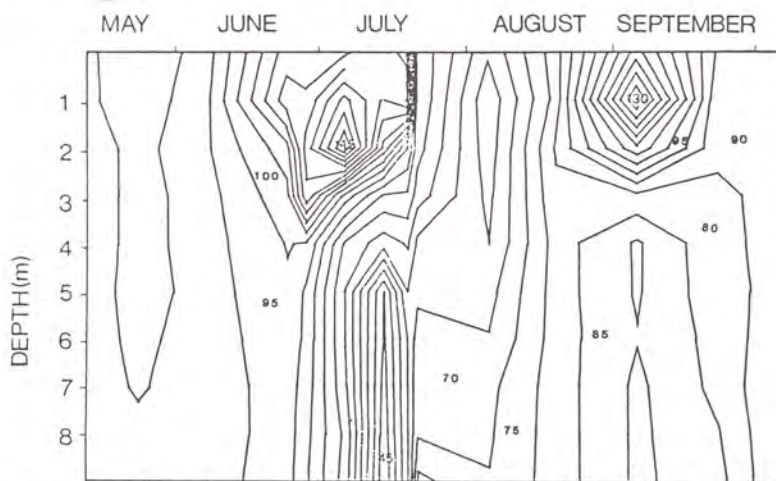


FIG 3 Oxygen contours at Cracknore (T3). Contour lines at 5% saturation intervals. Marks on bottom axis indicate sampling times

From Rees and Williams (1982)

The complexity of problems involved in estuarine management is rather neatly exemplified by conditions in the Test estuary during the summer. As mentioned earlier, the Test is a river of major importance from the point of salmon angling and there is a substantial run of fish through the estuary in the summer months (Soulsby *et al.*, 1985). It is important therefore that the quality of the water remains high. Observations indicate however that oxygen can become substantially depleted in the sub-surface waters during July and August. Values as low as 30% saturation have been observed at depths greater than 5m during July even though the surface waters at this time may be more than 95% saturated and occasionally reach supersaturation levels of 130% (Rees & Williams, 1982). (fig. 3) The period of the major oxygen sag in the deeper water is correlated with the bloom of the holotrich ciliate *Mesodinium rubrum*, an organism which can reach densities in excess of 5000 cells ml<sup>-1</sup> at 1 metre in the region near the docks (Crawford, D. 1985 person. comm.). *Mesodinium* contains a symbiotic photosynthetic cryptomonad. The ciliate is a rapid swimmer and is observed to concentrate at about two metres depth at around noon but to disperse through the water column at night (Soulsby *et al.*, 1985). Significantly when a model predicting O<sub>2</sub> levels in terms of input values for biological activity is run, the observed and predicted values only approximate to one another when this downward dispersion of *Mesodinium* is taken into account (Soulsby *et al.*, 1985).

Typically the *Mesodinium* bloom peaks in mid July and generally the population has crashed by mid-August. As might be anticipated from the cell density, rather high chlorophyll levels may be observed during the bloom, a value of 240 µg l<sup>-1</sup> chlorophyll *a* having been noted in July 1979 (Soulsby *et al.*, 1985). These values compare with annual maxima usually in the range 10-20 µg l<sup>-1</sup> at N.W. Netley (a kilometre to the south of the juncture of the Test and Itchen) though with peaks exceeding 40 µg l<sup>-1</sup> during blooms (Williams, 1980). Typically there is a decrease in chlorophyll *a* levels from mid-estuary seawards.



Associated with the high chlorophyll levels, carbon fixation is substantial and Bryan (1979) estimates the annual phytoplankton productivity at some  $150 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  in the upper part of the estuary, declining to somewhat less than  $100 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  at the lower end of Southampton Water. The average productivity is circa  $120 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ , a value not untypical of temperate estuaries (Williams, 1979).

Much of the photosynthesis in the region is attributable to the microplankton. Savage (1967) noted that over an 18 month period the percentage of the total chlorophyll *a* associated with algae retained by a  $60 \mu\text{m}$  mesh net averaged only 7% and that in the period February to June some 73% of carbon fixation was due to cells passing through a  $20 \mu\text{m}$  mesh.

Comparison of gross oxygen production by photosynthesis and plankton respiration for the estuary over a two year period suggests that there is a net excess production of  $\text{O}_2$  in the water column during July, August and September but that there is typically a small deficit at other times (Williams, 1980). It seems likely that the deficit during the winter months is too large to be attributable solely to the endogenous element in the estuary and that anthropogenic discharges contribute significantly to the B.O.D. load (de Souza Lima & Williams, 1978). Values given by Collins (1978) for B.O.D. inputs from the Test and Itchen, sewage and industrial sources in 1974/75 suggest that the last was then the largest of the contributing sources to non-endogenous B.O.D. though additional input from local salt marshes also contributes to the total. The annual B.O.D. inputs (tonnes  $\text{O}_2$  demand) quoted by Collins are respectively, Rivers (Test & Itchen) 1537, Sewage 341, Industrial 13 461.

In the seventies industry also contributed significantly to nutrient inputs sustaining the phytoplankton, particularly in respect of ammonia. Ammonia input via the rivers and sewage inputs was relatively small at 3.0 and 515 tonnes N per annum. Estimated industrial input (1974/5 values) was however a little over 2700 tonnes N as  $\text{NH}_4$  and a further 420 tonnes N as nitrate. Nitrate at this time from sewage was 118 tonnes N and via the rivers 2360 tonnes (Collins, 1978). All told, on the basis of these figures, industry was contributing significantly to the total nitrogen input in 1974/75. Other industrial inputs considered to influence the fauna and flora include hydrocarbons and heavy metal ions and there is speculation about the possible effects of dredging for clams, tributyl tin release from antifouling paints and thermal inputs.

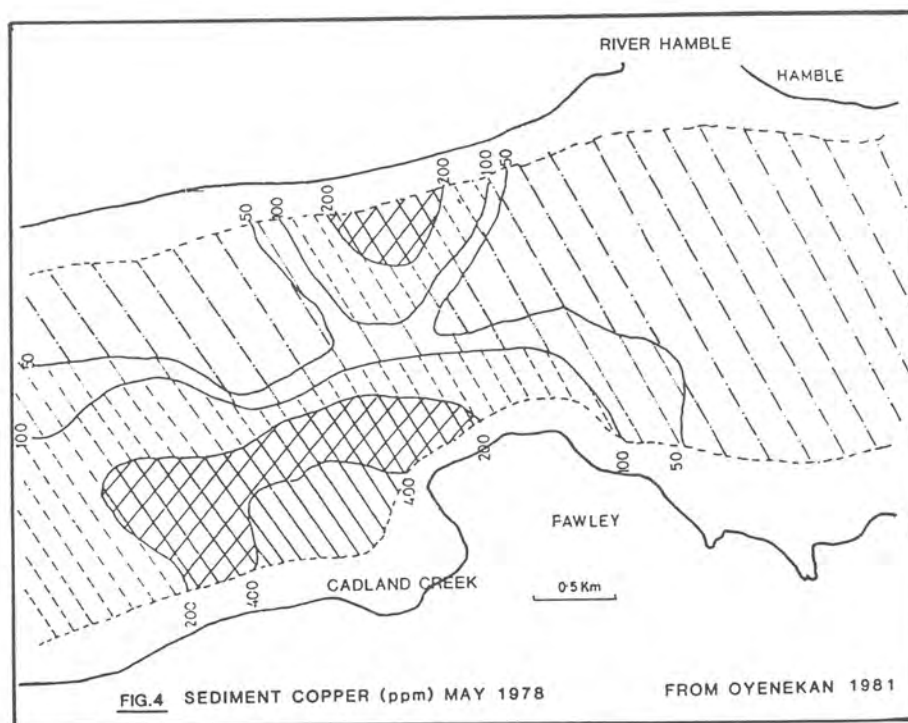
The Fawley refinery, situated on the Western Shore of Southampton Water, is one of the larger refineries in Europe with a (1981) capacity of just under 20 million tonnes per year. It was designed as a once through system with water extracted from the estuary being used in cooling and processing prior to discharge across a salt marsh.

Effluent hydrocarbon levels in the mid-sixties were some  $40\text{--}50 \text{ mg l}^{-1}$  and at times earlier may have been higher (Dicks, 1981). A ten year programme to reduce the oil output in the effluent water cut the concentration from circa 31 ppm (1963-70) to 10 ppm by 1980 whilst over the same period the water flow was reduced from  $28000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  to  $21000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (Lemlin, in Dicks, 1980).

By 1970 an area of marsh about  $1000 \text{ m} \times 600 \text{ m}$  in the region of Cadland Creek close to the outfalls had been devegetated (Dicks and Hartley, 1982). However, since 1970 the reduction in oil effluent has been associated with a significant regrowth of both *Spartina anglica* and *Salicornia* spp. into the damaged area. Natural seeding of *Spartina* in 1977 and successful "takes" of transplanted *Spartina* in some areas has also contributed to the process (Dicks, 1981). Recovery of the flora seems to have been correlated with reduction in the formation of surface oil films (Dicks & Hartley, 1982). Dicks (1981) suggests that the effect of aliphatics on the fauna of the marsh is greater than that on the flora, and this conclusion is reflected in the fact that in the sublittoral region off the industrialised coast-line the fauna also differs significantly from that in other parts of Southampton Water. In part this is



due to the finer nature of the sediments on the western side of Southampton Water but it is probable that the presence of hydrocarbons and heavy metals is also of importance. Dicks designates sediments containing < 1000 ppm hydrocarbon as highly polluted. A number of the offshore stations established by Oyenekan (1981) fall into this category including four out of the five stations on the western side of the shipping channel. Sediments on the eastern side of Southampton Water generally have a lower hydrocarbon burden (Oyenekan, 1981). The highest level of hydrocarbon (mainly aliphatics) was adjacent to Cadland Creek. In this region too the level of copper in the sediment was also high (c. 400 ppm) declining to less than 50 ppm on the eastern shore and southern end of the region away from the industrial discharges (fig. 4). Consideration of the species diversity and secondary production of the macrobenthos in stations in zones adjacent to sources of effluent input and on the eastern side of the estuary suggests that the fauna is influenced by the anthropogenic inputs. The point is exemplified by three selected stations : Station 2 (600 m north east of Cadland Creek). Characterised by a high silt clay fraction (90% silt clay) & moderately rich benthic macro fauna (23 species). The number of species decreased throughout the 20 month study period



declining from 17 m<sup>-2</sup> in sept. 1978 to 3 m<sup>-2</sup> in November 1979. The number of individuals also declined markedly in the same period. The polychaete *Caulle-riella caputesocis* was initially dominant but declined and virtually disappeared during 1978 and early 1979, being replaced initially by *Sabella pavonina* and subsequently by the adventitious forms *Nereis diversicolor* and *Capitella*

*capitata*. *Eteone longa* was generally also well represented. Molluscs and crustacea were only rarely found between July 1978 and the end of the survey in 1979.

Station 5 (600 m south west of Netley Dome) lies on the eastern side of Southampton Water. The substratum is sandy mud with gravel and coarse sand. The macro-benthos was the most varied of the four stations (59 species) and though, polychaetes were still the major group (42.4% of species), crustaceans 38.9% and molluscs 13.6% were well represented. In terms of biomass the molluscs dominated through the presence of the American Clam *Mercenaria mercenaria*. Polychaetes dominated in numbers of individuals (94% of total abundance). Throughout the period *Caulleriella caputesocis* was by far the most abundant species present.

Station 9 (400 m east of Cadland Creek) has a silty sediment but contains the lowest species diversity of the stations examined (21 species) and the maximum number of species at any one time was 14. Except during March 1980, when *Nereis diversicolor* marginally surpassed it in numbers, *Capitella capitata* dominated suggesting that this environment is limited in its capability to support forms other than those which are essentially opportunistic. The generally low condition of Station 9 as a biological environment is also indicated by the mean annual secondary production of the main species of the macrobenthos. For the period July 1978 to March 1980 the mean annual production (mg ash free dry weight,  $m^{-2}y^{-1}$ ) was, Station 2 : 4930; Station 5 : 99310; Station 9 : 2780; Station 20 : 6230. The station closest to the industrial outfalls at Cadland Creek thus showed the lowest secondary production as well as the lowest species diversity (Oyenekan, 1981).

The large production at Station 5 is due essentially to the presence of the American Clam *Mercenaria mercenaria*. This animal is widespread through Southampton Water and has formed the basis of a significant clam fishery since the early 1960's and particularly over the last 10 years.

The origins of this animal are uncertain, its presence in Southampton Water being variously attributed to seeding by fisherman in the 1930's and disposal overboard from vessels in the docks. Individuals have been caught in the region which were spat in the early 1940s but it seems that there was no significant breeding of the stock until the mid-1950s more or less co-incident with the opening of the power station at Marchwood. This power-station is now closed and spat-fall for the last few years, apart from that in the warm summer of 1984, has been limited. Attribution is uncertain but it would appear that the power station may have contributed to the reproductive success of the clam. Other non-endemic species forming substantial components in the fauna include : the copepods *Acartia tonsa* and *A. grani*, the isopods *Limmoria tripunctata* and *L. quadripunctata*, the barnacle *Elminius modestus*, the molluscs *Crepidula formicata* and *Petricola pholadiformis* and the tunicate *Styela clava*. The macro alga *Sargassum muticum*, though not invasive in the Solent, has colonised regions on the Isle of Wight. Because of the relatively large size and success of some of the organisms it has been suggested that more than half the benthic biomass in Southampton Water may be accounted for by non-endemic forms (Sheader, M. unpub.).

Smart (1972) reported that some 15200 yachts were using the Solent and that additional moorings for a further nine thousand were projected. The potential for damage to the fauna from antifouling paint has therefore been raised, particularly since attention has been drawn to the possible effects of tri-butyl tin on molluscs.

One of the features attributed to the effect of tri-butyl tin is the inducing of the development of a non-functional penis in female *Ocenebra erinacea* (Feral and Le Gall, 1982). Working with Solent and Torquay animals (Hawkins, 1985) has confirmed that low concentrations of tin ( $0.25 \text{ mg l}^{-1}$  phenyl tin trichloride (which is believed to speciate like tri-butyl tin)) cause both disruption of hydromineral balance and penile morphogenesis. However, he believes that the development of penes in females is a natural event but exacerbated by tin since



the occurrence of penile vestiges was reported in drills (Griffiths & Castagna, 1962) before the development of tri-butyl tin paints. Inadequate data is yet available for the Solent to indicate whether the releases from antifouling paint are at levels which may influence the fauna though this subject is likely to receive further attention.

#### SUMMARY

An outline is provided of some of the major factors affecting the biological populations in Southampton Water and the Solent. Emphasis is placed (1) on the influence of nutrient load on phytoplankton production and the effects of *Mesodinium* blooms on the oxygen levels in the stratified part of the estuary (2) on floral and faunal systems in the region adjacent to industrial inputs.

- Blain, W.R. (1980).- Tidal Hydraulics of the Western Solent. Ph. D. Thesis, University of Southampton.
- Bryan J.R. (1979).- The Production and Decomposition of Organic Material in an Estuary-Southampton Water. Ph. D. Thesis, University of Southampton.
- Carriker M.R. (1957).- Preliminary study of behaviour of newly hatched oyster drill *Urosalpinx cinerea*. Say. J. Elisha Mitchel Sci. Soc. 73, 328-351.
- Collins, K.J. (1978).- The Fluxes of Organic Carbon and Nutrients in Southampton Water. Ph. D. Thesis, University of Southampton.
- De Souza Lima H. & Williams P.J.L. (1978).- Oxygen consumption by the planktonic populations of an estuary, Southampton Water. Est. Coastal. Mar. Sci. 6, 515-521.
- Dicks B. & Hartley J.P. (1982).- The effects of repeated small oil spillages and chronic discharges. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. B. 297, 285-307.
- Dicks B. (1981).- Ten years of salt-marsh monitoring - the Case History of a Southampton Water saltmarsh and a changing refinery effluent discharge. Proceedings of the 1981 Oil Spill Conference (Prevention, Behaviour, Control, Clean-up). March 2-, 18 Atlanta Georgia.
- Dyer K.R. (1973).- Estuaries - a Physical Introduction. Wiley, 57-63.
- Feral C. & Le Gall S. (1982).- Induction expérimentale par un polluant marin (le tributylétain), de l'activité neuro-endocrine contrôlant la morphogenèse du pénis chez les femelles d'*Ocenebra erinacea* (Mollusque, Prosobranchie gonochorique). C.R. Acad. Sci. Paris. 295. pp. 627-630.
- Griffith G.W. & Castagna M. (1962).- Sexual dimorphism in oyster drills of Chincoteague Bay, Maryland, Virginia. Chesapeake Science 3, 215-217.
- Hawkins L.E. (1985).- Ecophysiological Studies of the European Oyster Drill *Ocenebra erinacea* (Linnaeus, 1758). Ph. D. Thesis, University of Southampton.
- Oyenekan J.A. (1981).- Community Structure and Production of the Benthic Macro-Infauna of Southampton Water. Ph. D. Thesis, University of Southampton.
- Rees T.A.V. & Williams P.J.L. & B. (1982).- The role of phytoplankton in the Test Estuary. pp. 21. Report on a study for the Southern Water Authority.
- Savage P.D.V. (1967).- Some features of the phytoplankton and its production in Southampton Water. Challenger Reports 19, 41.
- Soulsby P.G., Mollowney M., Marsh G. & Lowthion D. (1985).- The role of phytoplankton in the dissolved oxygen budget of a stratified estuary. Water Science Technology 17, 745-756.

- Webber N.B. (1973).- The tidal hydraulics of the Solent and its estuaries. In Pollution Criteria for Estuaries. Department of Civil Engineering, University of Southampton.
- Webber N.B. (1980).- Hydrography and Water Circulation in the Solent. pp. 25-35 In The Solent Estuarine System. NERC Publications Series C. N° 22 November 1980.
- West I.M. (1980).- Geology of the Solent Estuarine system pp. 6-18 In The Solent Estuarine System. NERC Publications Series C. N°. 22 November 1980.
- Williams P.J. le B. (1979).- Primary Productivity and Heterotrophic Activity in Estuaries. River Inputs into Ocean Systems, Rome, 1979.
- Williams P.J. le B. (1980).- Phytoplankton in Southampton Water. p. 73-75 In The Solent Estuarine System. The Natural Environment Research Council Publications Series C. N° 22 November 1980.





MILIEU VIVANT : SYNTHESE DES DISCUSSIONS.

RETIERE C.\*

A part une remarque d'ordre général, les différentes interventions concernent essentiellement les effets des polluants sur les organismes.

Remarque d'ordre général :

Après avoir rappelé l'excellente qualité des travaux présentés dans chaque discipline au cours du colloque, M. Khalanski souligne, qu'à ses yeux, les liens entre les études de dynamique côtière, de sédimentologie et surtout de biologie lui apparaissent bien ténus. Afin d'aider à la résolution de certains problèmes comme la genèse des blooms planctoniques, le transfert des polluants dans les différents compartiments de l'écosystème, M. Khalanski suggère de développer des modèles de transport adaptés à ces questions spécifiques. Une telle approche supposerait la constitution d'une équipe pluridisciplinaire dans laquelle les physiciens auraient un rôle déterminant.

Intervention se rapportant aux effets des polluants sur le milieu vivant :

Un accent particulier est mis sur les effets subléthaux et les phénomènes de bioaccumulation.

A la question de B. Elkaïm sur la signification des valeurs de la charge énergétique (C.E.), Y. Le Gal répond en soulignant que l'intérêt d'une telle mesure réside justement dans le fait qu'elle révèle le statut métabolique général d'un organisme et correspond, par nature, au résultat de tout un ensemble de fonctions métaboliques et physiologiques. Il s'avère dès lors bien difficile d'attribuer une variation de charge à une cause précise. Il apparaît également que le choix des espèces à étudier est essentiel. Présentement il est certain qu'il a été guidé plus par des questions pragmatiques que zoologiques et écologiques. Il serait sans doute opportun, comme l'a proposé C. Monniot, de tester les espèces à caractère opportuniste, dont le développement rapide dans le milieu est généralement interprété en terme d'instabilité et donc de perturbation de l'environnement.

En tout état de cause, les modifications de C.E. enregistrées chez certains organismes de la baie de Seine traduisent à la fois une baisse de la valeur moyenne et une grande dispersion des mesures. Tout se passe donc comme si une pression des facteurs du milieu s'exerçait avec plus de vigueur sur une fraction seulement des populations.

Selon B. Elkaïm, les phénomènes de bioaccumulation ne sont pas toujours liés à la pollution mais dépendent du métabolisme des organismes qui peuvent développer des structures et mécanismes régulateurs. C. Chassard-Bouchaud se range évidemment à cet avis et cite quelques éléments tels le chrome (Cr), le manganèse (Mn), le cuivre (Cu) ou le zinc (Zn) qui sont en effet impliqués, à l'état de trace, dans les réactions du métabolisme enzymatique. Cependant C. Chassard-Bouchaud souligne que ces éléments sous certaines formes chimiques et à un certain niveau de concentration deviennent toxiques, par exemple le Cr; mais l'analyse ionique permet précisément de faire la distinction entre le Cr constitutif présent à l'état de trace chez tous les organismes et le Cr bioaccumulé d'origine exogène. De plus, il faut savoir que des éléments

---

\* Laboratoire Maritime, 17, Avenue George V, 35800 Dinard.



tels le lithium (Li) ou le lanthane (La) n'ont pas de fonction métabolique connue et enfin que d'autres comme l'argent (Ag), le cadmium (Cd), le plomb (Pb) ou l'uranium (U) sont toujours radio ou chimiotoxiques. Parmi les éléments précédemment cités, C. Larssonneur s'inquiète de savoir si le lanthane est retrouvé dans les organismes ailleurs qu'en Baie de Seine. C. Chassard-Bouchaud indique que par des méthodes de microanalyse (analyse ionique), le lanthane a, de fait, été détecté dans des Moules (*Mytilus edulis*) sur les côtes atlantiques et méditerranéennes mais à des concentrations 10 à 20 fois plus faibles. Pour terminer, des précisions souhaitées par B. Elkaïm sont apportées sur la sensibilité des appareils de mesure qui est respectivement de l'ordre de la ppb et la ppm pour l'analyseur ionique et la microsonde.

## UTILISATION, ENVIRONNEMENT

### LA BAIE DE SEINE :



THEME 5



*Les aménagements dans l'estuaire de la Seine*

MAUVAIS J.L.

- \*37 - RAMBAUD B. et HAUVILLE S. Evolution des moyens d'investigation hydrosédimentaire dans l'estuaire de la Seine
- \*38 - DESPREZ M. et DUPONT J.P. Impact biosédimentologique d'aménagements portuaires en estuaire de Seine
- \*39 - PRONIEWSKI F. Influence sur les peuplements estuariens des rejets industriels et aménagements portuaires
- \*40 - CHAUVIN P., FREGER G. et GUYADER J. Synthèse des connaissances sur les effets du dépôt de dragage d'Octeville
- \*41 - ABARNOU A. et SIMON S. Contamination de l'estuaire et de la Baie de Seine par les P.C.B. - bilan des études
- \*42 - PAULMIER G. et JOLY J.P. Les phénomènes d'eaux colorées en Baie de Seine
- \*43 - DUVAL P. Impact du milieu sur les nourriceries de poissons plats de la Baie de Seine

*Synthèse des discussions*

MAUVAIS J.L.

ANNEXE : Le Programme d'action du Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI) en Basse Seine

## LES AMENAGEMENTS DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

MAUVAIS J.L.\*

### INTRODUCTION

Depuis quelques années, il y a, dans les pays industrialisés, une prise de conscience sur l'importance de l'environnement. De nombreuses associations sont créées et l'on voit un peu partout surgir des conflits entre aménageurs et protecteurs de la nature.

Par ailleurs, la crise économique fait sentir ses effets et la tentation est grande de négliger les problèmes d'environnement pour favoriser le développement économique.

Il importe donc de trouver un moyen terme. Cela doit être d'autant plus facile qu'il apparaît à l'évidence que la protection d'une certaine qualité de l'environnement n'est pas sans conséquences économiques : conchyliculture, pêche, tourisme,...

La Baie de Seine et, en particulier, l'estuaire de la Seine est une des régions françaises les plus aménagées et donc une des régions où les conflits d'activités sont les plus aigus. Ce sont ces conflits d'activités qui ont contribué à la mise en place du S.A.U.M. de l'estuaire de la Seine. Les études se sont déroulées de 1978 à 1981, et ont apporté quelques réponses aux problèmes qui se posaient. Elles ont également permis d'établir certaines recommandations.

La définition des programmes scientifiques à élaborer dans le cadre du S.A.U.M. a montré l'absence d'études générales de l'estuaire de la Seine (contrairement à la Loire et à la Gironde). Il a donc fallu développer des études qui n'avaient d'autre but que d'acquérir des connaissances indispensables, ce qui a considérablement gonflé le budget du S.A.U.M.

Fallait-il, à la fin du S.A.U.M., arrêter les études et s'intéresser à d'autres zones ? De nombreux problèmes avaient été soulevés : comblement de l'estuaire, migration du bouchon vaseux vers l'aval avec comme conséquences l'envasement de la partie Est de la baie et le piégeage des polluants sur les particules fines, déficit en oxygène dans l'estuaire, apport important de sels nutritifs,...

---

\* IFREMER, Centre de Brest, B.P. 337, 29273 Brest Cedex.



Il était donc logique de continuer les études et d'entreprendre une étude globale de la Baie de Seine. Cette étude pourrait d'ailleurs servir de base scientifique à l'élaboration d'un S.A.U.M. de la Baie de Seine (actuellement Schéma de Mise en Valeur de la Mer).

#### Intérêt du programme "Baie de Seine" pour les aménageurs

Les études entreprises sont-elles exploitables immédiatement par les aménageurs ? C'est une question difficile, et il conviendrait de consulter les principaux d'aménageurs pour avoir leur point de vue.

Une grande partie des études dynamiques sont directement exploitables. La mise en place de modèles locaux peut se faire aisément.

Le schéma de circulation résiduelle demande à être affiné, mais peut, d'ores et déjà, apporter des renseignements importants sur les déplacements à moyen terme des masses d'eau : ces informations s'avèrent très utiles pour les biologistes. En cas d'accident (pétrolier ou autre), les résultats présentés peuvent apporter une aide précieuse. On peut considérer qu'actuellement la courantologie de la Baie de Seine est relativement bien connue. Il ne servira à rien (sauf peut être très près des côtes) de faire des mesures de courants de 13 h : les modèles utilisés sont satisfaisants et donnent des résultats cohérents, peut être plus cohérents que ceux donnés par une mesure ponctuelle entachée d'erreurs (précision de l'appareil, houle, météo,...).

Par contre, l'intérêt de mesures de longue durée persiste. (> 1 mois). Ces mesures doivent être corrélées à la météo ou à l'hydrologie.

Les modèles et les mesures réalisés en Baie de Seine peuvent servir de conditions aux limites à des modèles très côtiers permettant d'étudier un phénomène particulier (rejet par exemple). On devrait donc pouvoir étudier un certain nombre de "scénarios" à des coûts relativement acceptables.

L'intérêt des études sédimentologiques apparaît également très grand pour un futur schéma de gestion de la Baie. On a maintenant de bonnes notions de la géomorphologie et de la couverture sédimentaire d'une partie de la Baie de Seine. On a également acquis des informations très importantes sur les transports en suspension et par charriage.

Ces informations viennent utilement compléter les données très nombreuses collectées par les laboratoires d'hydraulique depuis de nombreuses années. Elles permettent d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes généraux de transport. Lorsque l'état de la science permettra de réaliser des modèles de transports sédimentaires à l'échelle de la Baie de Seine, les résultats obtenus prendront toute leur importance.

Pour les aménageurs les résultats des études chimiques ont tout d'abord une valeur de référence (polluants). Les couvertures spatiales réalisées viennent utilement compléter les séries chronologiques obtenues dans le cadre du R.N.O. L'augmentation de la teneur en certains polluants pourra se comparer à la situation "des années 1980". Il est certain que la partie Est de la Baie de Seine devra être particulièrement surveillée. Compte tenu de la migration du bouchon vaseux vers l'aval, cette zone se trouve en effet en première ligne pour réceptionner les polluants fixés au matériel particulaire.

L'étude des radionucléides devrait, dans l'avenir, être un complément indispensable à toutes les études de dynamique sédimentaire (voire de dynamique des eaux à long terme).

L'augmentation des teneurs en "nutrients" depuis une trentaine d'années pose de réels problèmes en eau douce. Les travaux du S.A.U.M. ont permis de mettre en évidence la responsabilité de l'ammonium dans les déficits en oxygène dans la zone estuarienne.

Les apports élevés de "nutrients" provoquent-ils des déséquilibres dans le milieu marin ? C'est possible, voire probable, mais cela n'est pas encore démontré.



L'intérêt des études biologiques est peut être plus difficile à mettre en évidence en ce qui concerne les préoccupations des aménageurs. La cartographie des peuplements benthiques est actuellement connue et son évolution pourra être suivie dans les décennies qui viennent. C'est aussi un élément de base qui sera très utile lorsque l'on voudra déterminer l'impact d'un aménagement dans la baie.

La principale difficulté consiste à relier la production biologique (pélagique ou benthique) aux conséquences sur la pêche. Il faut noter que les travaux sur la charge énergétique, encore très fondamentaux, pourront demain être un outil très précieux à la disposition des aménageurs.

En résumé, on peut donc dire que le programme "Baie de Seine", bien qu'il ne soit pas un programme de "recherche appliquée" apporte pour la gestion de la Baie, des informations très importantes.

Les publications présentées dans le thème 5 sont bien représentatives des "problèmes" qui se posent en estuaire et en Baie de Seine.

- L'exposé de Messieurs RAMBAUD et HAUVILLE décrit les moyens informatiques mis en place pour avoir une cartographie rapide des fonds. L'accès aux ports est, depuis deux siècles, la préoccupation majeure des aménageurs. Le coût des dragages est tel qu'il faut optimiser au maximum les travaux.

Les aménagements (dragage, endiguage,...) ont profondément modifié la physionomie de l'estuaire. Mais, comme le disent les auteurs, sans eux, le port de Rouen n'existerait plus.

- L'exposé de Messieurs DESPREZ et DUPONT tente de déterminer quelles sont les conséquences des aménagements précédemment décrits. On s'intéresse aux conséquences des aménagements : conséquences sédimentologiques, évolution de la granulométrie, pourcentage de fines,... Conséquences biologiques : évolution faunistique.

Les estuaires sont des zones biologiquement sensibles. Le nombre d'espèces pouvant supporter des variations importantes de salinité est limité et les aménagements peuvent encore réduire ce nombre d'espèces. Il importe donc de surveiller le milieu et d'en tirer des relations qui permettront de prédire l'évolution pour de futurs aménagements (compte tenu des résultats donnés par les modèles sédimentaires).

- L'exposé de Monsieur PRONIENWSKI traite le problème des rejets industriels :

- . rejet d'un effluent acide,
- . rejet de quantité importante de phosphogypse.

C'est tout le problème du développement économique et de la protection de l'environnement qui est posé.

Que peut-on rejeter ? en quelles quantités ?

Il importe d'abord : - de surveiller le milieu,

- de mettre au point des tests appropriés,
- de découvrir des lois qui permettront, par la suite, de prédire les conséquences des rejets, pour arriver à un optimum :  
épuration à mettre en place / conséquences sur l'environnement.

- L'exposé de Monsieur CHAUVIN, Melle FREGER et Monsieur GUYADER présente une synthèse sur les effets du dépôt de dragage d'Octeville. Voilà 35 ans que l'on dépose plus de deux millions de m<sup>3</sup> par an : c'est dire l'importance du phénomène, même si en terme "marin" quelques millions de m<sup>3</sup> peuvent paraître "dérisoires".

Les conséquences sont décrites très clairement :

. Le problème le plus important est celui de la contamination du sédiment. Les métaux lourds fixés au sédiment peuvent se désorber et contaminer l'eau et la faune avoisinante.

. Le devenir des sédiments déposés :

Il importe que les sédiments ne reviennent pas très rapidement à l'endroit où ils ont été dragués.

. La richesse biologique de la zone de dépôt :

Les espèces ont du mal à se maintenir : elles sont enfouies sous les rejets, et l'augmentation de la turbidité peut entraîner en colmatage des branchies.

Des études extrêmement importantes ont été menées, à ce sujet, aux U.S.A. En France, on n'a développé jusqu'à présent que des études beaucoup plus limitées et ponctuelles. La surveillance doit être d'autant plus poussée que le sédiment rejeté est pollué. De nombreuses études concernant les phénomènes d'absorption / désorption des polluants restent à faire.



- L'exposé de Messieurs ABARNOU et SIMON traite du problème de la pollution par les polychlorobiphényles polluants de type industriel amenés par la Seine.

La mise en évidence de cette pollution est à mettre à l'actif du R.N.O. qui a donc bien joué son rôle "d'alerte". Les concentrations observées ne dépassent pas, pour l'instant, les normes en vigueur aux U.S.A. Mais l'écart entre les valeurs observées en Baie de Seine et les teneurs moyennes rencontrées le long des côtes françaises mérite qu'on analyse le phénomène avec attention :

- . origine de la pollution, moyens de la réduire (adaptation de la législation,...),
- . devenir des P.C.B. dans le milieu marin,
- . conséquences éventuelles sur la commercialisation de certains produits.

- L'exposé de Messieurs PAULMIER et JOLY traite du problème très important des eaux colorées. Les eaux colorées (rouges, brunes,... voire sans couleur) proviennent d'une prolifération bactérienne ou planctonique. C'est un phénomène naturel qui est constaté sur les côtes mondiales depuis de nombreuses années. Ce qui est nouveau, c'est la fréquence d'apparition de ces phénomènes qui semble devoir être liée au développement industriel et (ou) agricole.

Pour l'instant, il n'y a pas eu sur les côtes françaises d'accidents mortels. Mais les conséquences économiques sont importantes : fermeture des installations conchyliques,...

L'IFREMER va développer, dans les prochaines années, un programme important pour tenter de :

- . prévoir quelques jours à l'avance l'apparition d'eaux colorées et leur caractère de gravité,
- . comprendre les mécanismes amenant la formation d'eaux colorées,
- . identifier les causes "profondes" d'apparition de ces phénomènes, et essayer de les combattre.

Mais force est de constater que nous sommes bien démunis, actuellement, pour aborder ces problèmes et que les indices sont bien peu nombreux.

- Le dernier exposé, de Monsieur DUVAL, traite des relations entre l'environnement et la pêche. La gestion des stocks est un problème en soi qui n'a rien de commun avec l'environnement. Mais l'étude des conséquences sur la pêche de la pollution, des aménagements (dragages, extraction d'agrégats, comblement de zones humides,...) est un problème extrêmement important et difficile.

"Quelles sont les conséquences sur la pêcherie d'une extraction d'agrégats marins qui va amputer une zone biologiquement productive ?"

On ne peut, actuellement, répondre à cette question. Pour pouvoir y répondre dans quelques années, il faut développer des études extrêmement sophistiquées de transferts énergétiques entre différents échelons biologiques.



## CONCLUSION

La Baie de Seine est une des régions françaises les plus aménagées. Il est donc normal que les conflits d'activité prennent une place importante. Les problèmes soulevés dans le thème 5 :

- . dragages - rejets de dragage,
- . rejets industriels,
- . pollution apportée par un grand bassin versant,
- . eaux colorées,
- . influence, sur la pêche, des pollutions et des aménagements,

résument bien l'ensemble des problèmes rencontrés sur les côtes françaises.

Si l'on veut, dans l'avenir, arriver à un développement harmonieux des activités sur le littoral, il est impératif de pouvoir prédire les conséquences d'un aménagement. On évitera de réaliser des aménagements dont le coût global dépasse largement le bénéfice que l'on pouvait en attendre.

Mais, dans le milieu marin, prédire les conséquences d'un aménagement est une opération qui peut s'avérer extrêmement délicate.

Il est même parfois très difficile de constater, a posteriori, les conséquences d'un aménagement compte tenu de la variabilité naturelle.

Si, dans les années à venir, la communauté scientifique veut avoir une crédibilité vis à vis de la nation, elle doit se donner les moyens d'apporter des réponses concrètes aux questions qui se posent actuellement sur le littoral.

Il y a du travail pour tous les laboratoires existants. Mais il convient, si l'on veut réussir, d'être très rigoureux sur les priorités à fixer et la définition des programmes à mettre en oeuvre.

37

EVOLUTION DES MOYENS D'INVESTIGATION HYDROSEDIMENTAIRE DANS  
L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

RAMBAUD B. \*, HAUVILLE S. \*.

1- GENERALITES

- 1 a - Sans la Seine, le Port de Rouen n'existerait pas, de même que sans ses aménagements il n'existerait pas non plus.

Rouen, implanté à 120 km de la mer, aux portes de la région parisienne a ainsi aménagé ses accès portuaires, et en particulier l'estuaire de la Seine, lui permettant de s'adapter à l'évolution de la taille des navires, développer et diversifier son trafic.

Les aménagements de l'estuaire de la Seine ont fait l'objet d'études préalables approfondies et extrêmement complètes sur modèle réduit physique et sur modèle mathématique. Ces outils ont permis de prédire l'impact des ouvrages de calibrage Sud (digue du Ratier achevée en 1962) puis Nord (digue basse nord et seuil submersible achevés en 1980) du chenal, sur les profondeurs de l'estuaire.

---

\* Port autonome de Rouen - Direction des Accès, 34, Boulevard de Boisguilbert,  
76 037 Rouen Cedex.



## CONNAISSANCE HYDROGRAPHIQUE

Au 31 Octobre 1984

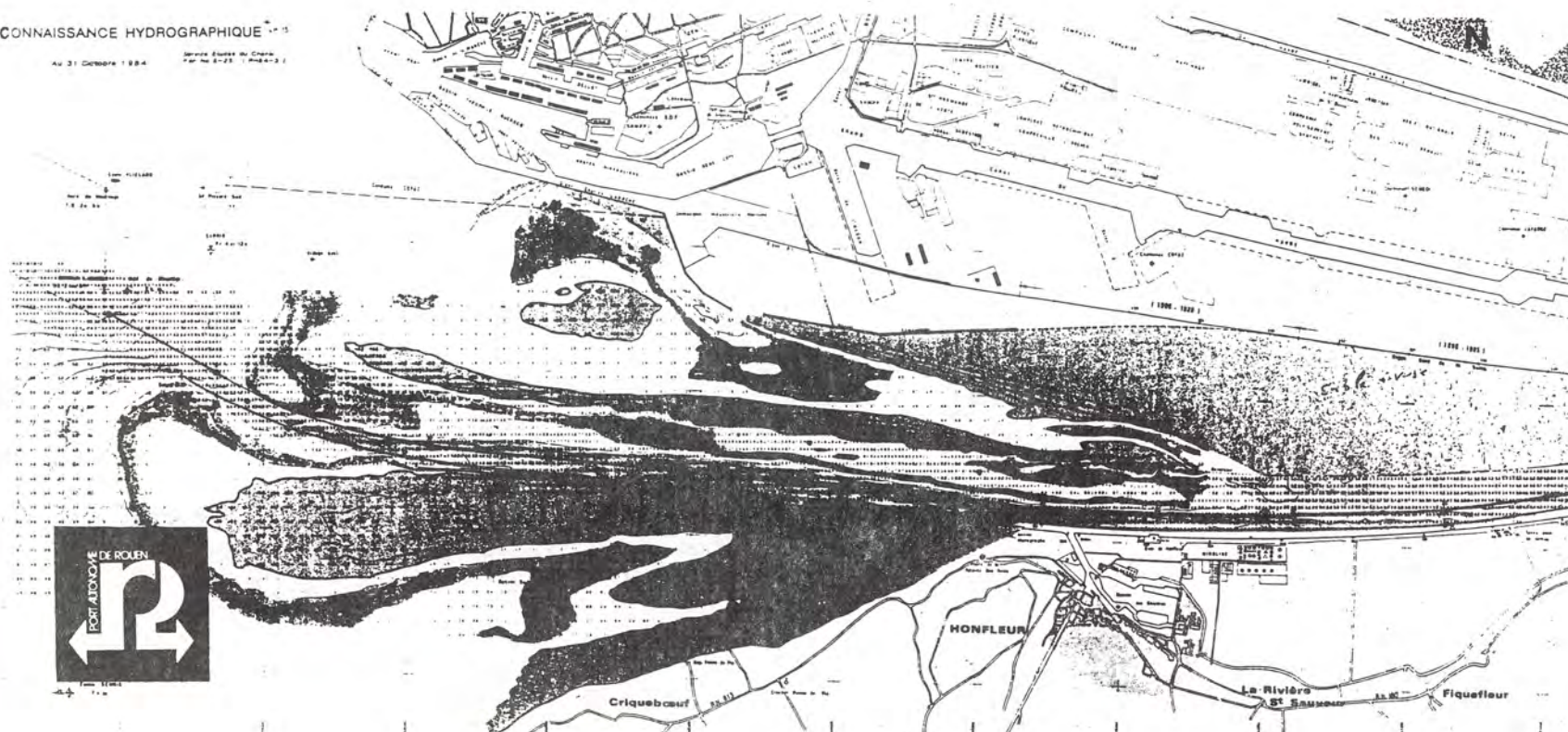
Service Études du Centre  
Plan No 8-23 (Inde-2)

Figure 1.- Estuaire de la Seine : plan général de sondage.

Et c'est ainsi que le simple guidage des courants par les digues submersibles réalisées a favorisé la stabilisation et l'approfondissement quasi naturel de l'ordre de 4.00 m du chenal de navigation au voisinage de la barre d'embouchure, à volume de dragage annuel constant, malgré la tendance au comblement naturel de l'estuaire.

Le résultat de ces aménagements a permis :

- de tripler le tonnage annuel du trafic transitant par le port de Rouen en 30 ans,
- de tripler le port en lourd des navires reçus à Rouen au cours des dix dernières années. ( 125/140 000 tpl)

1 b - La sévérité de la conjoncture économique, rencontrée depuis les 5/10 dernières années, a conduit à pousser encore plus loin la recherche du coût de transport optimal : unitarisation et homogénéisation des cargaisons, homogénéisation des tailles de navires au voisinage, pour chaque catégorie, du maximum actuel.

Dans ce contexte et pour satisfaire aux besoins de la navigation maritime, la solution consiste à utiliser et à tirer le meilleur parti des possibilités existantes, en apportant aux accès et installations portuaires les adaptations strictement nécessaires conduisant, au moindre coût, à leur exploitation optimale.

Après avoir tiré le plus grand parti des modèles physiques et mathématiques existants pour aménager l'estuaire de la Seine, et les améliorations des accès recherchés étant de l'ordre de grandeur de précision des modèles, il y avait lieu de développer de nouvelles méthodes d'investigation.

## 2- METHODE D'OPTIMISATION - OBJECTIFS

La méthode d'optimisation consiste, en fait, à isoler et cerner l'impact hydrosédimentaire des différents paramètres à partir des données observées en nature, puis d'utiliser ces paramètres explicatifs afin de tirer le meilleur parti possible de la situation existante.

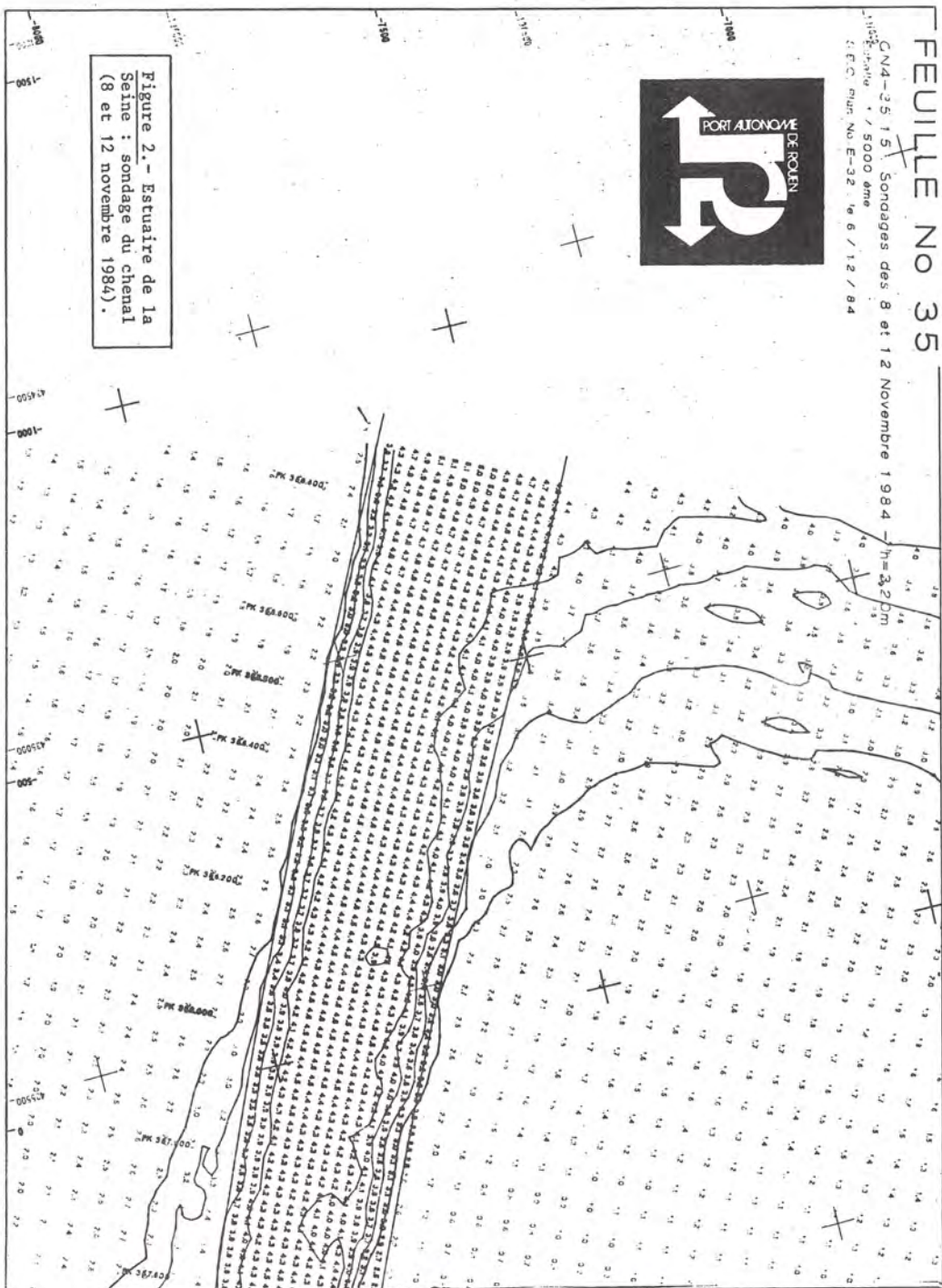


# FEUILLE NO 35

CNA-35 15 Sondages des 8 et 12 Novembre 1984 - h=3,22m  
 Échelle : 1/5000ème  
 D.F.C. Plan No E-32 - 6/6/12/84



Figure 2.- Estuaire de la  
 Seine : sondage du chenal  
 (8 et 12 novembre 1984).



Le Port de Rouen a donc porté ses efforts sur la mise en oeuvre de moyens particulièrement efficace pour mieux connaître les données physiques et les mécanismes de fonctionnement de l'estuaire et du chenal de navigation :

- à la fois dans un but scientifique, en particulier pour mieux cerner le phénomène de comblement et de colmatage naturels de l'estuaire constaté depuis plus d'un siècle,
- à la fois dans un but économique : une bonne connaissance du chenal de navigation et des informations précises et rapides sur les transits sédimentaires permettent d'orienter et d'optimiser les dragages.

### 3- LES MOYENS D'INVESTIGATION HYDROSEDIMENTAIRE

Les moyens de saisie et traitement automatisé des informations nécessaires aux investigations hydrosédimentaires du site de l'estuaire sont constitués de micro-systèmes informatiques compatibles : embarqués à bord des engins nautiques (vedettes, hydrographiques, dragues) pour l'acquisition des données, à terre (centre du calcul) pour la partie traitement.

Les programmes de traitement ont été élaborés en vue d'aider à l'analyse fine des informations relatives au sondage et au dragage afin d'expliquer les évolutions sédimentaires de l'estuaire.

Après avoir décomposé l'estuaire en zones caractéristiques prédéfinies (chenal de navigation, fosses de flot) et organisé l'archivage des données selon un maillage adapté<sup>1</sup> (mailles de 100 X 100 m sur l'ensemble de l'estuaire, de 25 X 100 m sur l'emprise du chenal de navigation), les programmes permettent, à titre d'exemple, d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- détermination des cubatures par zones d'intérêt et bilans sédimentaires globaux annuels
- recherche, après ventilation des volumes de matériaux extraits en chacune des mailles du chenal de navigation, de l'impact des opérations de dragage sur les profondeurs



- recherche, enfin, de la répartition spatio-temporelle des volumes sédimentaires, sous l'impact d'événements naturels.

#### 4- PREMIERS RESULTATS D'ETUDE

Les premiers résultats d'analyse des observations et données enregistrées relatives à l'évolution en nature du chenal de navigation ont confirmé l'intérêt d'un suivi permanent et précis des différents phénomènes pour bien cerner et expliquer l'impact de chacun des paramètres naturels (marées, débit fluvial, vent, volume de dragage) et leur corrélation avec les variations de profondeurs.

Ils ont montré, par ailleurs, les limites dans les possibilités d'explication des phénomènes hydrosédimentaires à moins de mettre au point une méthode de sélection et d'échantillonnage des informations améliorant de façon significative les corrélations entre les divers paramètres.

IMPACT BIOSÉDIMENTOLOGIQUE D'AMÉNAGEMENTS PORTUAIRES EN ESTUAIRE DE SEINE.

DESPREZ M. \*, DUPONT J.P. \*\*.

1. INTRODUCTION.

Alors qu'au début du siècle dernier l'estuaire de la Seine possédait une vaste zone intertidale parcourue de chenaux de flot et de jusant peu profonds (Fig. 1A), il présente, depuis 1970, des contours rectilignes (Fig. 1B), qui sont le résultat des nombreux aménagements réalisés sur le fleuve pour améliorer les conditions de navigation entre Rouen et la mer, mais également des travaux d'extension du complexe industriel et portuaire du Havre.

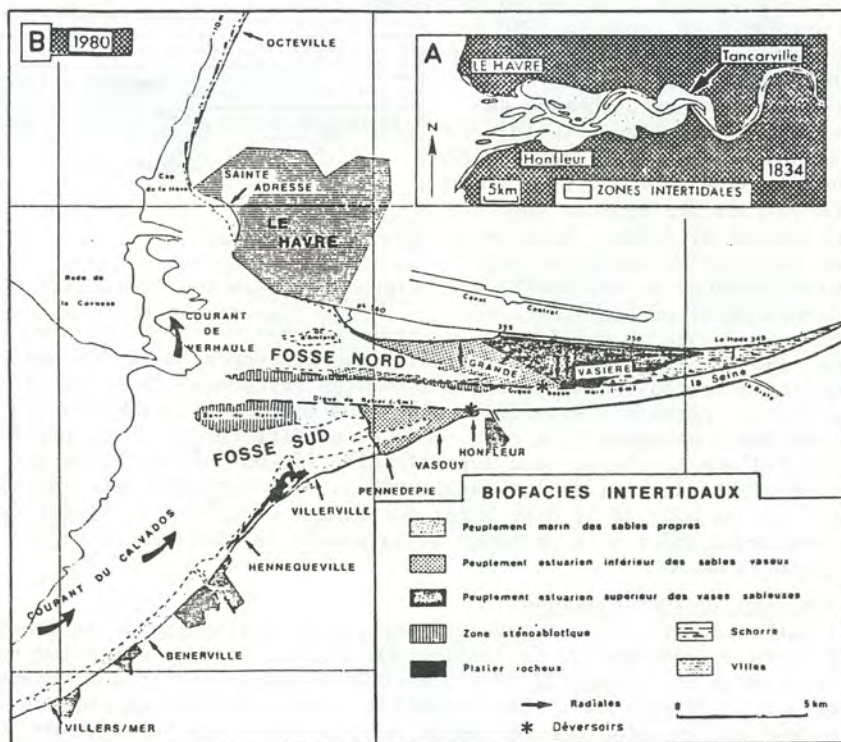


FIGURE 1 A : Cadre morphologique de l'estuaire en 1834 (d'après AVOINE)  
B : Cadre morphologique et biosédimentologique en 1980.

\* G.E.M.E.L. Faculté des Sciences - 76130 Mt St Aignan

\*\* Laboratoire de Géologie ) " " "

G.E.M.E.L.)



La réduction de la surface des zones intertidales, de 130 km<sup>2</sup> en 1834 à moins de 30 km<sup>2</sup> en 1985 (Avoine, 1985), est la conséquence la plus spectaculaire de ces aménagements qui ont accéléré le phénomène naturel de colmatage de l'estuaire par des sédiments d'origine essentiellement marine.

En 1980, des préoccupations en matière d'environnement sont à l'origine de la création de déversoirs dans les digues de calibrage du chenal de navigation; en effet, devant l'inquiétude des pêcheurs de voir se remblayer les fosses de flot nord et sud de l'estuaire, ces aménagements ont été réalisés respectivement dans la digue basse nord et celle du Ratier.

Aujourd'hui, après quatre années de fonctionnement de ces déversoirs, il est possible de dresser un premier bilan de leur impact sur l'environnement, plus particulièrement en ce qui concerne l'évolution biosédimentologique des secteurs concernés.

## 2. RESULTATS DE LA FOSSE SUD

### 2.1. Présentation de l'étude :

Les études réalisées au cours du S.A.U.M. de l'estuaire de la Seine (Desprez, 1983) ont servi de point zéro au suivi biosédimentologique de deux stations respectivement situées à 150 m (HON 5) et 250 m (HON 4) du déversoir. Ce dernier, aménagé en 1980, est de dimensions restreintes avec une longueur de 100 m et un seuil situé à la cote +4m (la digue du Ratier cotant +5m).

La station HON 5 se situe en 1980 à la cote +2m50 et présente un substrat de sables envasés (25-30 %F\*) colonisés par un peuplement benthique de type estuarien inférieur (Fig 1B). Ce peuplement, riche de 14\*\* espèces, présente une densité de 4.835\*\*\* individus par mètre-carré; les espèces dominantes sont *Macoma balthica*, *Tharyx marmorata* et *Tubificoides benedini* les principales espèces accompagnatrices étant *Cerastoderma edule*, *Nereis diversicolor* et *Corophium volutator*.

(Desprez, 1981). Cette association faunistique correspond à la "Macoma community" telle qu'on la retrouve dans tous les estuaires européens (Thorson, 1957).

L'essentiel des résultats biosédimentologiques concernent cette station.

La station HON 4 se situe à la cote +4m50 et se différencie de la précédente par la présence d'une couche de vase superficielle (50-60 %F\*) reposant sur un sable vaseux comparable à celui de la station HON 5. Son peuplement est identique au précédent sur le plan de la diversité; par contre *Corophium volutator* devient l'espèce dominante grâce à la présence de la couche de vase superficielle qui permet sa prolifération.

### 2.2. Evolution sédimentologique :

La réalisation du déversoir a provoqué une rapide diminution de la teneur en particules fines du sédiment de la station HON 5 (Fig. 3A); on est passé de sables vaseux contenant en moyenne 32 %F (1978-1980) à des sables très faiblement envasés avec 3,6 %F (1982-1984). Les nouvelles conditions hydrodynamiques (courants, turbulences) ont entraîné les sédiments les plus fins dans un rayon de 200 m, créant une auréole de désenvasement dans laquelle se situe la station HON 5 (Ducrotoy et coll. 1985).

La station HON 4, plus éloignée, n'a pas connu une telle évolution de son substrat. Par contre, le comblement naturel du secteur (d'importants apports sableux caractérisent cette fosse de flot) a contribué à faire disparaître progressivement la couche de vase superficielle qui caractérisait cette station.

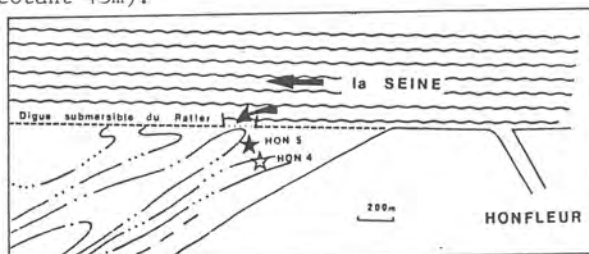


FIGURE 2 : Rive sud. Localisation du déversoir et des stations étudiées.

\* %F : teneur en particules fines (inférieures à 50 µm).

\*\* : valeurs moyennes établies sur un cycle annuel.

### 2.3. Evolution faunistique :

#### 2.3.1. Evolution du peuplement

La réalisation du déversoir a profondément modifié le peuplement de la station HON 5, tant sur le plan qualitatif (nombre et nature des espèces) que quantitatif (densités/m<sup>2</sup>).

La richesse spécifique du peuplement décroît sensiblement (-22%) et on passe, en moyenne, de 14,1 espèces (1979-1980) à 11 espèces (1981-1982). Ce sont en fait plus de trois espèces qui ont disparu, mais de nouvelles ont en revanche fait apparition; elles sont caractéristiques des sables propres ou légèrement vaseux des transects marins situés en aval de Pennedepie (Fig. 1B).

En l'espace de neuf mois, les densités chutent brutalement (-87%) de 4.835 individus/m<sup>2</sup> à 640 ind./m<sup>2</sup> (valeurs moyennes pour un cycle annuel). Cette spectaculaire chute des densités illustre la richesse nutritive des substrats envasés qui sont capables d'abriter des peuplements benthiques extrêmement denses.

Depuis 1982, le peuplement de cette station semble avoir retrouvé un nouvel équilibre dont témoignent la légère augmentation des densités (1.850 ind./m<sup>2</sup>) et surtout le retour à la diversité initiale (16 espèces).

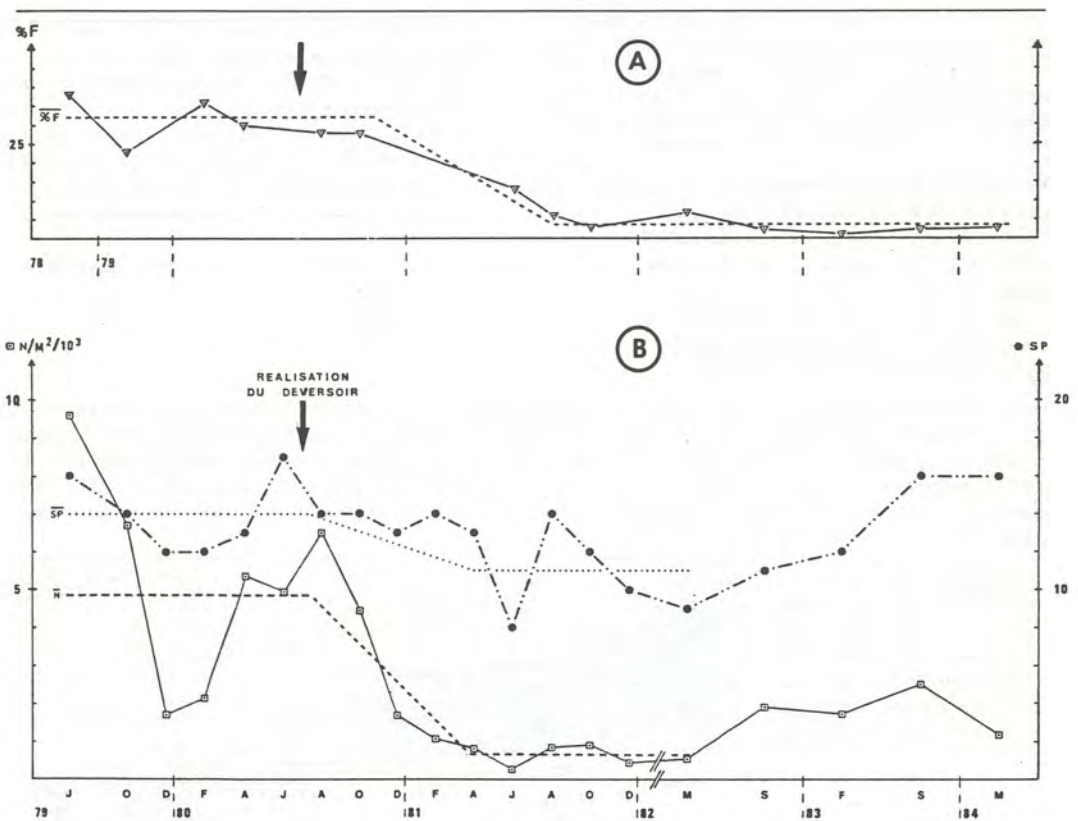


FIGURE 3 A : Evolution de la teneur en particules fines (%F) du sédiment de la station HON 5 entre 1978 et 1984.  $\overline{\%F}$  = teneur moyenne.

B : Evolution de deux paramètres du peuplement macrobenthique de la station HON 5 : la densité (N/m<sup>2</sup>) et la richesse spécifique (SP).



### 2.3.2. Interprétation physiologique: l'exemple de *Macoma balthica*.

Localement, les nouvelles conditions hydrodynamiques et hydrosédimentaires ont perturbé le développement des espèces benthiques comme nous avons pu le mettre en évidence sur le bivalve *Macoma balthica*.

La croissance de cette espèce est ralentie, sinon bloquée, dès l'ouverture du déversoir; ce phénomène est particulièrement visible chez les jeunes individus de l'année (classe  $0^+$ ) et de 1979 (classe  $1^+$ ). La croissance est moins perturbée à HON 4 qu'à HON 5, elle redevient normale au printemps 1981 (Fig. 4).

Les jeunes individus de l'année sont particulièrement sensibles à l'évolution hydrosédimentologique et disparaissent dès le mois de décembre à HON 5.

Le recrutement est lui-aussi affecté par l'évolution hydrosédimentaire du secteur. En 1979, la classe  $0^+$  représente 60-80 % de la population de la station HON 5; en 1981 elle ne représente plus que 17 % de cette population alors que, dans le même temps, le recrutement est normal à HON 4 (cl.  $0^+$  = 78 % de la population).

Le léger ralentissement de croissance observé à HON 4, malgré l'absence d'évolution sédimentologique, témoigne de la sensibilité des espèces benthiques à toute modification des conditions hydrodynamiques locales.

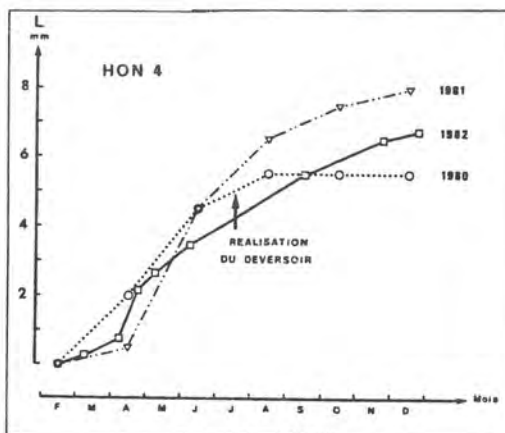


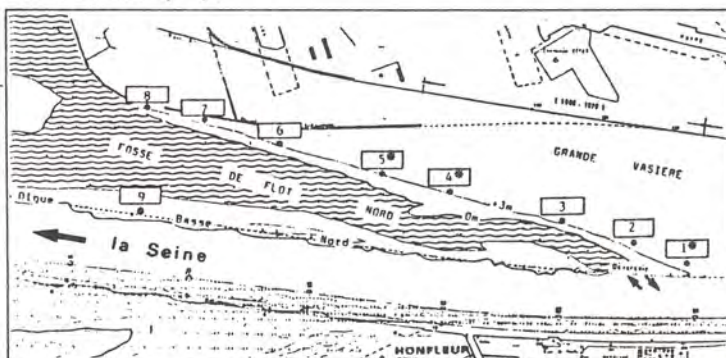
FIGURE 4 : Rythme de croissance du bivalve *Macoma balthica* sur trois cycles annuels. Mise en évidence de la perturbation liée à l'ouverture du déversoir. L = accroissement en longueur de la coquille des individus de la cl.  $1^+$ .

## 3. RESULTATS DE LA FOSSE NORD.

### 3.1. Présentation de l'étude :

Quelques mois avant la réalisation du déversoir, une étude biosédimentologique (\*) de la Grande Vasière a fourni les données de référence qui nous permettent aujourd'hui de juger de l'évolution de ce secteur de l'estuaire après quatre années de fonctionnement du déversoir. En effet, trois des stations prospectées à cette occasion l'ont été à nouveau en 1984 (Fig. 5) à la faveur d'une étude du même type dans le secteur de la fosse de flot (\*\*).

FIGURE 5 : Rive nord. Localisation du déversoir et des stations étudiées en 1984. L'astérisque (\*) signale celles ayant déjà été prospectées en 1980.



- (\*) Impact écologique du second franchissement de l'estuaire de la Seine sur le plan de la microbiologie et de la macrofaune benthique (Contrat C.C.I. Le Havre - Université de Rouen)
- (\*\*) Suivi biosédimentaire de la fosse de flot nord de l'estuaire de la Seine. (Contrat Port Autonome de Rouen - G.E.M.E.L.)

Du point de vue bathymétrique, ces stations se situent légèrement au-dessus du niveau des basses mers de morte eau (+3m). Sur le plan sédimentologique, elles sont constituées, en 1980, de sables très envasés (>50 %F). Sur le plan faunistique (Fig 1B), elles appartiennent à un faciès oligospcifique du peuplement estuarien inférieur, faciès vraisemblablement lié aux basses salinités de ce secteur qui correspond à un ancien chenal de jusant de l'estuaire (Desprez, 1981). Quant au déversoir, il est de dimensions beaucoup plus conséquentes que celui de la rive sud puisqu'il est long de 1 km, avec un seuil se situant à la cote +1m.

### 3.2. Evolution sédimentologique :

Alors qu'en 1980 la teneur en particules fines des sédiments était relativement constante tout le long de la fosse de flot (50-60 %F), on observe quatre ans plus tard une différence dans les conditions d'envasement selon que l'on considère des stations situées en amont (40-70 %F) ou en aval (10-33 %F) de la fosse. La figure 6A illustre cette stabilité des conditions d'envasement observée en amont, qui contraste avec le désenvasement que connaissent les stations aval.

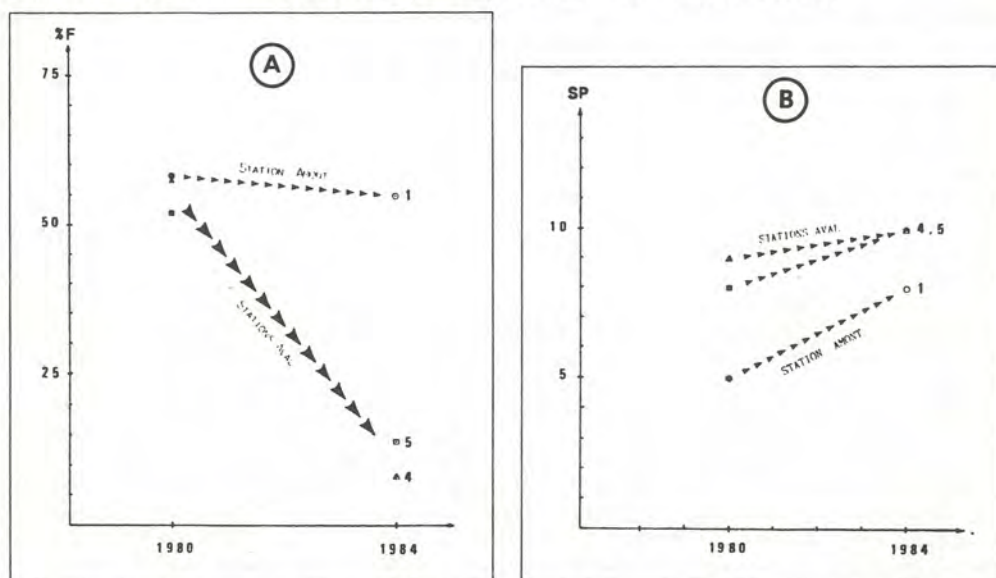


FIGURE 6 : Evolution, entre 1980 et 1984, de deux caractéristiques biosédimentologiques de trois stations situées à proximité de la fosse de flot nord de l'estuaire de la Seine :

- A. Teneur en particules fines (%F) du sédiment.  
B. Richesse spécifique (SP) du peuplement.

### 3.3. Evolution faunistique :

- Richesse spécifique : entre 1980 et 1984 s'est produite une diversification des peuplements tout le long de la fosse de flot (Fig. 6B) :

|                | 1980     | 1984       | Evolution |
|----------------|----------|------------|-----------|
| Stations Amont | 5 à 6 sp | 6 à 8 sp   | + 27%     |
| Stations Aval  | 8 à 9 sp | 10 à 13 sp | + 35%     |

- Densité : l'évolution de ce paramètre permet d'individualiser quatre groupes d'espèces :  
+ des espèces dont les densités n'ont pas évolué : *Macoma balthica*, *Nereis diversicolor*, *Corophium volutator*, *Tubificoides benedeni*.  
+ des espèces dont les densités ont fortement diminué : *Manayunkia estuarina* et *Tubifex costatus* (qui caractérisent les vases de l'amont).



- + des espèces dont les densités ont augmenté : *Nephtys hombergii*, *Eteone longa*.
- + des espèces nouvelles : *Tharyx marioni*, *Capitomastus minimus* et quelques très jeunes *Cerastoderma edule*.

#### 3.4. Cartographie biosédimentaire.

L'évolution biosédimentaire se traduit par une remontée vers l'amont du peuplement estuarien inférieur aux dépens du peuplement estuarien supérieur (Fig. 1B). Le phénomène est donc inverse de celui que l'on observe en amont de l'estuaire, plus spécialement entre le déversoir et Le Hode, où se produit un glissement vers l'aval des faciès.

#### 4. DISCUSSION

##### 4.1. Rive sud.

L'évolution biosédimentologique que nous avons observée est la conséquence locale, rapide, de l'aménagement du déversoir. Ces travaux n'ont cependant fait qu'accélérer les effets de l'évolution naturelle qui conduit elle-aussi au désenvasement du substrat sous l'influence des importants apports sableux qui caractérisent cette fosse de flot.

L'exhaussement de ce secteur de l'estuaire (Fig. 7) illustre l'importance de ces apports; ainsi la station HON 5 a subi en 5 ans une élévation de 1 mètre (2m50 en 1979, 3m50 en 1984) malgré l'intensité des conditions hydrodynamiques liées à la proximité du déversoir.

Par contre, les conditions de salinité n'ont pas été modifiées par la réalisation du déversoir : l'eau interstitielle de la station HON 5 présente depuis 1979 une salinité stable de 23,5‰ (en conditions d'étiage). Conformément aux résultats de Desprezet coll.(1983) qui ont classé par ordre d'importance les principaux facteurs du milieu responsables de la distribution de la macrofaune benthique de l'estuaire, il ressort que l'évolution faunistique de la station HON 5 est essentiellement la conséquence de l'évolution sédimentologique qui a affecté cette station dans les mois qui ont suivi l'ouverture du déversoir. Cependant, nous avons également observé à la station HON 4 que les espèces benthiques réagissent directement à toute modification des conditions hydrodynamiques locales, ce qui est en accord avec les études de Lammens (1967) sur l'interprétation des stries de croissance des bivalves.

A HON 5, le retour à la diversité initiale (16 sp), quatre ans après la réalisation du déversoir, permet de penser que le peuplement de cette station a retrouvé une certaine stabilité, en équilibre avec les nouvelles conditions hydrodynamiques. Depuis le peuplement initial jusqu'à ce nouvel équilibre biosédimentaire, nous pouvons distinguer successivement :

- une étape de déstabilisation du peuplement initial (août 1980-avril 1981) avec chute de la densité et stabilité de la richesse spécifique.
- une étape de transition (avril 1981-mars 1982) avec stabilisation de la densité et chute de la richesse spécifique.
- une étape de restructuration (mars 1982-sept.1983) avec augmentation de la densité et de la richesse spécifique.

L'intérêt d'une telle étude, outre de préciser les limites et modalités de l'impact de l'aménagement sur l'environnement, réside dans la définition d'espèces-témoins de l'évolution du milieu. Ainsi le désenvasement de la station HON 5 s'est-il accompagné de la disparition de *Scrobicularia plana*, *Corophium volutator*, *Tubificoides benedini* et de l'arrivée de *Capitomastus minimus*, *Spio filicornis*, *Bathyporeia sarsi*, *Nephtys cirrosa*, *Nerine cirratulus* et *Mysella bidentata*, espèces pour lesquelles la teneur en particules fines représente le facteur limitant de leur installation plus en amont dans l'estuaire.

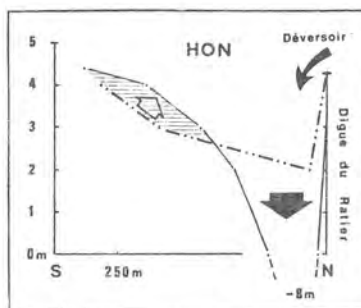


FIGURE 7 : Evolution bathymétrique de la radiale HON-FLEUR entre 1980 (tireté) et 1984 (trait plein).

#### 4.2. Rive nord :

Si l'impact local du déversoir n'a pu être mis en évidence, nous avons par contre observé une évolution biosédimentaire des fonds bordant la fosse sur plusieurs kilomètres en aval de cet ouvrage.

Le désenvasement observé s'explique par l'amplification des courants de la fosse liée à sa chenalisation, ces courants contribuant à éroder la Grande Vasière (Fig. 8). Ce phénomène d'érosion est favorisé par le déplacement de la fosse vers le nord du fait d'une forte sédimentation sableuse s'appuyant sur la digue basse nord depuis son achèvement en 1980.

L'enrichissement spécifique ne peut pas être corrélé avec la diminution de la teneur en particules fines comme l'atteste l'évolution biosédimentaire de la station 1 (enrichissement spécifique, mais stabilité de la teneur en fines).

Par contre, nous avons vu précédemment que le facteur salinité joue un rôle essentiel dans la diversité des peuplements; or, les conditions de salinité des eaux de la fosse ont augmenté d'environ 5‰ depuis 1980. Cette évolution s'explique par la réduction des apports d'eau douce depuis le chenal principal, consécutive à l'achèvement de la digue.

L'évolution sédimentologique serait ainsi la conséquence du fonctionnement du déversoir, tandis que l'évolution faunistique serait essentiellement celle de l'achèvement de la digue basse nord.

Ces constatations nous amènent à définir certaines espèces témoins de l'évolution des conditions de salinité du milieu :

- *Tharyx marioni* était absente de la rive nord en 1980 malgré la présence de sédiments comparables à ceux où elle abondait sur la rive sud.
- *Tubifex costatus* et *Manayunkia estuarina* ont régressé depuis 1980 malgré la stabilité des conditions d'envasement des stations amont de la fosse.

#### 4.3. Comparaison de l'évolution des deux fosses de flot :

S'il n'est pas possible de comparer l'impact biosédimentaire de ces deux déversoirs aux caractéristiques si différentes (longueur, profondeur du seuil), l'observation des profils longitudinaux des fosses permet cependant d'apprécier leur efficacité respective et de mettre ainsi en évidence l'importance du comblement naturel. La fosse sud a subi un exhaussement général de 25 cm à 1 m entre Villerville et Honfleur (Fig. 9A).

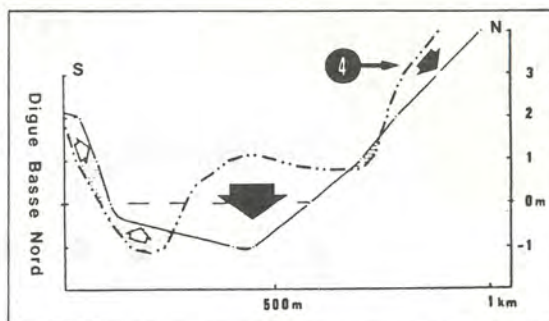


FIGURE 8 : Evolution bathymétrique de la fosse de flot nord. Profils transversaux de 1980 (tireté) et 1984 (trait plein).

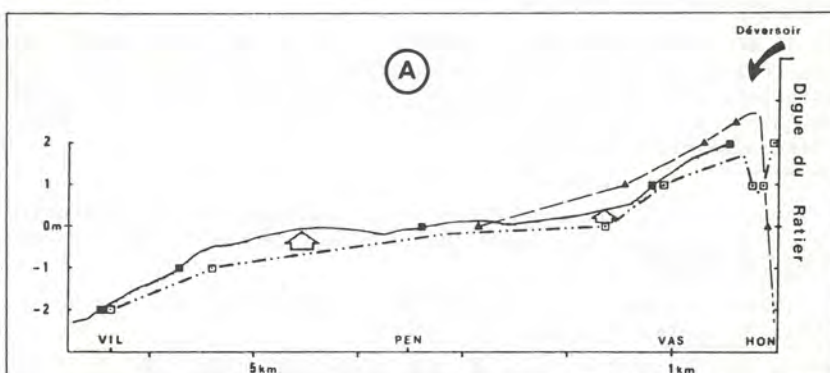


FIGURE 9A : Evolution bathymétrique de la fosse de flot sud de l'estuaire de la Seine. Profils longitudinaux de 1980 (pointillé) et 1984 (trait plein = printemps; tireté = automne).



La fosse nord s'est creusée dans sa moitié amont et comblée dans sa partie aval, ce qui a complètement modifié son profil bathymétrique (Fig. 9B) :

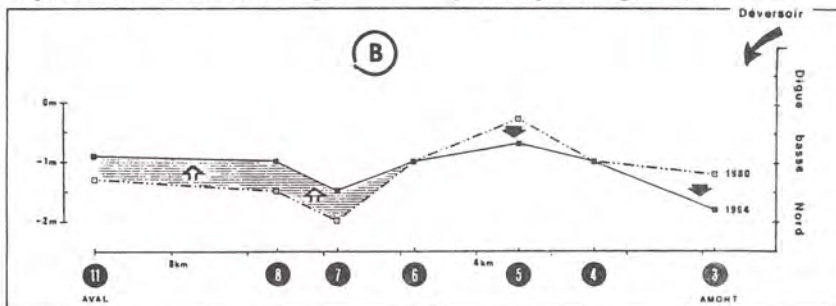


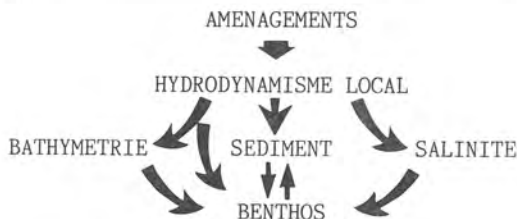
FIGURE 9B : Evolution bathymétrique de la fosse de flot nord de l'estuaire de la Seine. Profils longitudinaux de 1980 (pointillé) et 1984 (trait plein).

Une telle évolution justifierait un suivi des peuplements benthiques subtidiaux pour actualiser les données de Proniewski (1980) obtenues lors du SAUM et connaître l'évolution faunistique de ces fonds (avec mise en évidence d'espèces-témoins) en cours de comblement malgré les efforts consentis en matière d'environnement.

##### 5. CONCLUSION.

Ces études sur l'impact biosédimentologique d'aménagements portuaires en estuaire de Seine ont permis :

- d'une part de préciser l'influence de ces aménagements sur l'équilibre des bio-faciès estuariens :



- d'autre part de mettre en évidence des espèces-témoins de l'évolution du milieu, espèces qui devront faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre du suivi biologique d'aménagements.

L'estuaire de la Seine représente aujourd'hui un domaine "privilégié" pour la réalisation de telles études d'impact d'aménagements. Il est souhaitable que celles-ci se multiplient afin de pouvoir disposer des meilleurs atouts en matière de prévention de catastrophes écologiques, mais aussi dans la perspective d'amélioration de la qualité biologique du milieu.

Avoine J. (1985).- Evolution hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Actes du Colloque "L'estuaire de la Seine, enjeux écologiques et économiques". GEMEL-DRAE-CIQV. p. 53-67.

Desprez M. (1981).- Etude du macrozoobenthos intertidal de l'estuaire de la Seine. Thèse 3è cycle. Université de Rouen.

Desprez M. et coll. (1983).- Etude des biofaciès intertidaux de l'estuaire de la Seine. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 296, séri. III, p. 521-526.

- Desprez M. (1985).- Conséquences biologiques de l'atterrissement de l'estuaire de la Seine. Importance et devenir des vasières nues. Actes du Colloque. "L'estuaire de la Seine, enjeux écologiques et économiques". GEMEL-DRAE-CIQV. P. 89-92.
- Ducrotoy J.P. et coll. (1985).- Short and long term biosedimentary evolution of two *Macoma balthica*. Neth. J. Sea Research, t. 3, sér. 3, p. 315-382.
- Proniewski F. et coll. (1980).- Benthos subtidal de l'estuaire de la Seine. Résultats préliminaires. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 291, sér. D, p.545-547.
- Thorson G. (1957).- Bottom communities (sublittoral or shallow shelf). Geol. Soc. Amer. Memoir 67, vol. 1, p. 461-534.





INFLUENCE SUR LES PEUPELEMENTS ESTUARIENS DES REJETS INDUSTRIELS ET AMENAGEMENTS PORTUAIRES.

PRONIEWSKI F.\*

I.- IMPACT DES GRANDS TRAVAUX SUR LES PEUPELEMENTS.

L'actuel estuaire est le résultat d'une série de grands travaux d'endiguages qui ont été nécessaires pour améliorer la navigation sur le fleuve, en supprimant le phénomène du mascaret, en fixant définitivement le chenal et en approfondissant le lit du fleuve. Ces modifications ont entraîné un formidable bouleversement non seulement de la physionomie de l'estuaire mais également de son fonctionnement.

1) Historique

On a peu de données précises sur les peuplements benthiques de l'estuaire de Seine. Les travaux les plus anciens sur ce sujet sont dus à Gustave Lenniers et Gadeau de Kerville, qui ont rassemblé leurs observations dans une publication de 1885 : "l'estuaire de la Seine, mémoires, notes et documents"

De Kerville s'est plus particulièrement intéressé aux invertébrés qu'il a étudié du Havre à Rouen. Il distingue trois zones principales dans l'estuaire de l'époque qui compte encore 130 km<sup>2</sup> de domaine intertidal :

- une zone limnique, en amont d'Aizier, limite extrême de la pénétration des espèces dulcaquicoles.

- une zone saumâtre qu'il divise en deux parties, une zone oligo-haline d'Aizier à la pointe de la Roque et une zone meso-haline de la pointe de la Roque à Honfleur.

- une zone marine, en aval d'Honfleur.

2) Impact des travaux

Les travaux d'endiguage ont entraîné un déplacement de tout le système estuarien vers l'Ouest, tout en modifiant son fonctionnement. La réduction des zones intertidales ainsi que l'augmentation de "l'effet de chasse" ont fortement modifié les processus sédimentaires à l'intérieur de l'estuaire et par conséquent la nature et la distribution des peuplements benthiques.

En utilisant les mêmes critères biologiques que de Kerville, nous pouvons redéfinir la zonation qu'il avait établie :

- une zone limnique qui descend jusqu'à Tancarville,
- une zone oligohaline entre Tancarville et Honfleur,
- une zone mesohaline de Honfleur à l'extrémité de la digue-du Ratier (fosse nord et chenal de navigation,
- une zone polyhaline qui borde l'estuaire.

---

\* Laboratoire Municipal du Havre - 5, rue Raymond Guénot - 76600 Le Havre.



### 3) Evolution biologique de chaque zone

#### 3.1. Zone limnique

C'est dans la zone fluviale que l'impact de la qualité des eaux apparaît le plus nettement, car il semble seul en cause. De Kerville dénombrerait au moins 25 espèces d'invertébrés d'eau douce dont 7 gastéropodes et 10 lamellibranches. Il notait en outre la rareté de l'isopode détritivore *Asellus aquaticus*. C'est pourtant ce dernier qui a constitué l'essentiel de nos récoltes jusqu'à l'ancerville, le reste étant constitué par des sangsues *Glossosiphonia* sp. et des vers de vases tubificidés. Toutes ces espèces affectionnent les eaux chargées en matières organiques et sont très tolérantes vis-à-vis des faibles teneurs en oxygène dissous.

#### 3.2. Zone saumâtre

La zone oligohaline déjà considérée comme peu peuplée par De Kerville est ici totalement abiotique mis à part quelques mysidacées apportées par les courants.

La zone mesohaline, à l'époque riche d'environ 25 espèces présente actuellement trois aspects différents :

- le chenal de navigation abiotique, ceci étant dû à l'action hydrodynamique des eaux et aux dragages réguliers d'entretien.
- La fosse nord, hydrologiquement très proche du chenal de navigation, très pauvre avec peu d'espèces (maximum 9) et en individus (souvent moins de 10/m<sup>2</sup>)
- La fosse sud-Ratier qui semble plus indépendante des eaux du chenal de navigation et qui, tout en ayant une richesse spécifique voisine de celle de la fosse nord, possède une richesse numérique beaucoup plus grande. Son caractère légèrement plus marin explique cette différence.

#### 3.3. Zone marine

La zone marine qui s'intègre dans la zone subestuarienne doit être plutôt qualifiée de polyhaline. Remontant jusqu'à Honfleur il y a une centaine d'années, elle est actuellement rejetée plus à l'Ouest. Les phénomènes de dessalure qui progressent vers le large, s'accompagnent d'un envasement progressif des fonds sableux de la baie. Il s'ensuit une profonde modification des peuplements benthiques qui après être passé par une maximum de densité et de diversité subissent une chute importante de leur richesse spécifique. Après l'explosion de populations d'espèces opportunes tolérantes, les effectifs chutent définitivement. Les premiers organismes qui par leur disparition témoignent de cette évolution sont des espèces sensibles d'amphipodes et de mollusques gastéropodes.

### II.- LES REJETS D'EFFLUENT DE FABRICATION DE BIOXYDE DE TITANE.

Depuis 1982, les rejets d'acide sulfurique dilué et de sulfate de fer par l'usine Thann et Mulhouse au Havre (15 600 m<sup>3</sup>/j.), se font au moyen d'un émissaire modifié afin d'améliorer la diffusion et la neutralisation de l'effluent. L'ensemble consiste en une canalisation munie en son extrémité d'un diffuseur multiporé de 300 mètres. Le rejet, piloté par un courantomètre installé sur le site, ne s'effectue que pour des courants supérieurs à 0.20 m/s et des coefficients de marée supérieurs à 40.

#### 1) Les peuplements benthiques subtidaux

Nous avons déjà montré durant les études du SAUM (Proniewski et Elkaïm 1980), que la zone de la fosse Nord dans laquelle s'effectue le rejet est très pauvre. L'étude de deux radiales Est-Ouest et Nord-Sud montre qu'il n'existe pas de relation entre le nombre d'espèces et d'individus et la proximité du rejet (Proniewski 1980).

## 2) Le plancton

Les effluents de l'usine Thann et Mulhouse ont souvent été accusés de détruire la faune, certains parlant même de stérilisation complète de l'estuaire. Une conclusion un peu hâtive d'un travail de laboratoire (Lassus et Maggi 1977) affirmait que l'ensemble des organismes contenus dans la masse d'eau utilisée durant la neutralisation étaient "voués à une mort certaine". Or, ces études portaient sur une exposition à différentes dilutions de l'effluent pendant des durées dépassant de loin celles observées sur le terrain. Nous avons donc réalisé une étude ayant pour objectif de connaître l'impact réel du choc acide subi par les organismes qui traversent passivement le panache du rejet durant sa neutralisation (Proniewski, Lassus : publication en cours).

### 2.1. Méthodologie

Les organismes testés, épinoches, civelles et crevettes grises sont mises à dériver dans des sacs de nylon de maille de 500 microns de porosité (fig.1.). Cette taille de maille permet une homogénéisation instantanée entre le milieu extérieur et l'intérieur des sacs. L'ensemble suit la masse d'eau et traverse le panache à sa sortie du diffuseur. Une électrode immergée dans un des sacs permet de mesurer l'intensité et la durée du choc acide. Dès que le pH revient à des valeurs voisines du pH d'origine, les organismes sont transvasés dans de l'eau de mer filtrée et aérée pour observation des mortalités. Des témoins subissent les mêmes manipulations sur une zone non affectée par le rejet.

Des essais en laboratoire simulant la cinétique de neutralisation observée sur le terrain, et portant sur du phytoplancton (deux diatomées et un flagellé), ainsi que sur un copépode, la crevette grise et l'épinoche ont permis de confirmer les résultats obtenus. Après exposition aux pH bas, les organismes planctoniques sont mis en milieu neutralisé et leur croissance régulièrement observée. Pour les copépodes, la survie et la production de larves sont suivies.

### 2.2. Résultats expérimentaux

#### 2.2.1. Mesures de pH *in situ*.

Les mesures de la cinétique de neutralisation font apparaître qu'après une baisse rapide du pH à des valeurs minimales comprises entre 2 et 3, le retour aux valeurs voisines de celles de l'environnement se fait en moins de 3 minutes. La figure n° 2 rassemble en une courbe théorique le schéma de la cinétique de neutralisation. Cette courbe est obtenue en compilant les valeurs de pH les plus basses avec leurs durées les plus longues à partir des enregistrements de terrain. On constate que la durée totale de contact avec des pH plus petits que 5 est brève et toujours inférieure à la minute.

#### 2.2.2. Tests *in situ*

Pour l'ensemble des tests réalisés sur le terrain, on constate peu de mortalités (inférieures à 5 %) et en quantité comparable chez les témoins et chez les organismes tests. Ces mortalités sont en fait dues au choc expérimental (manipulation à la récolte, changement de milieu, manipulation durant les tests, arrêt de l'alimentation etc....)

#### 2.2.3. Tests en laboratoire

Les espèces phytoplanctoniques mises en expérience ont une croissance sensiblement égale à celle des témoins. Suite à un faible temps de latence, les densités cellulaires des essais rejoignent après quelques jours de culture celles des témoins.

Les copépodes se comportent également bien durant les essais en laboratoire. Les mortalités ne sont pas significativement différentes entre essais et témoins ainsi que la production larvaire.



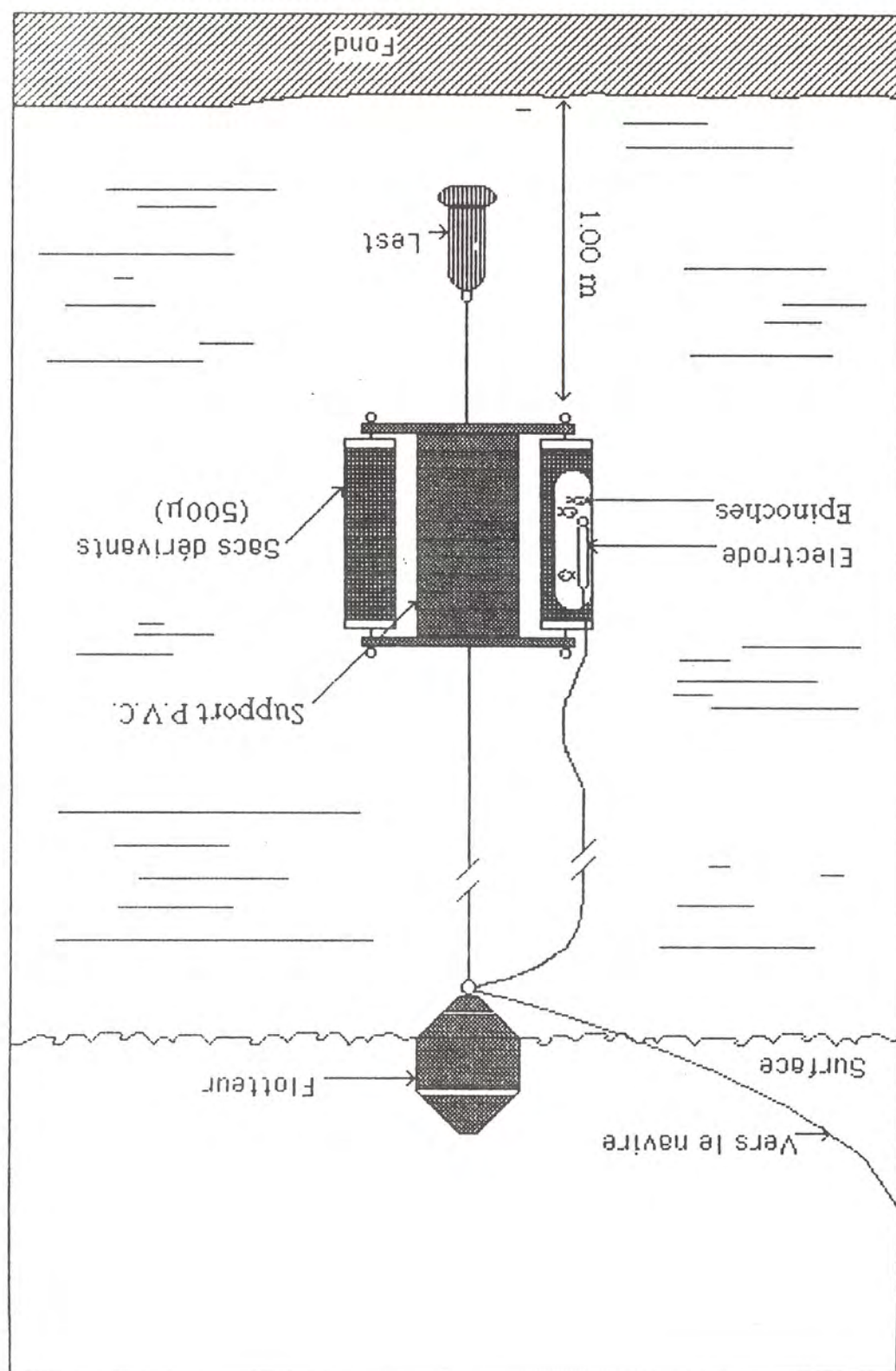


Fig.1 : Schéma du dispositif expérimental utilisé "in situ"

Les épinoches supportent en laboratoire des durées de chocs acides plus longues que celles existant sur le terrain sans subir de dommage ni de mortalité.

Les tests de laboratoire sur la crevette confirment également les essais sur le terrain.

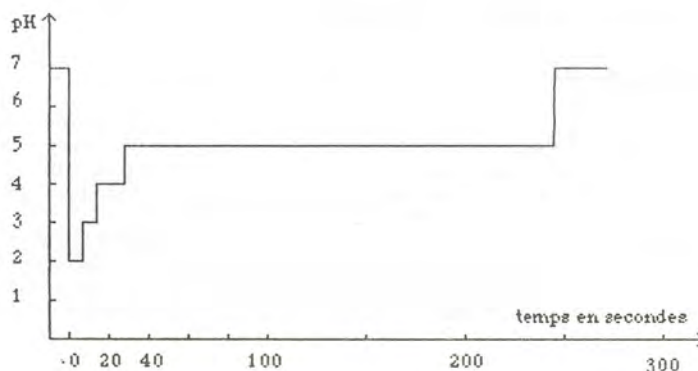


Figure 2 : Schéma théorique de la cinétique de neutralisation

En conclusion, les tests d'écotoxicité, tant au laboratoire que sur le terrain, montrent que la durée du choc acide subi par les organismes planctoniques ou prisonniers de la masse d'eau est très brève et démontrent que ce choc acide n'entraîne pas de mortalité pour ces organismes

### 3) La faune halieutique

Les rejets acides ont souvent été mis en cause dans le phénomène pathologique des nécroses de poissons. Les études menées par notre laboratoire (Charrière 1982) en Baie de Seine dans le cadre des recherches sur les phénomènes d'ulcération chez les poissons et mammifères marins, ainsi que les contrôles annuels auxquels nous procédons lors de pêches autour de l'émissaire pour études de contaminations des poissons, nous amènent aux constatations suivantes : les poissons capturés aux alentours de l'émissaire, toutes espèces confondues, n'ont jamais présenté de lésions ulcéraires de l'épiderme. Le phénomène des nécroses concerne essentiellement les poissons plats, et parmi ceux-ci les limandes (1 à 2 % d'individus) capturés dans une zone située entre 3 et 6 milles au large des côtes entre le Havre et Antifer.

### III.- LES REJETS DE PHOSPHOGYPSES.

Sous-produits de la fabrication des engrais phosphatés, les phosphogypses sont principalement constitués de sulfate de calcium hydraté, des matières terreuses, de la silice (0 à 7 %) des fluorures (0.1 à 1.8 %), de l'alumine (0 à 0.4 %), de l'acide phosphorique résiduel (0.2 à 1.4 %) et des impuretés métalliques (Pb, Cd, Zn, Cu, Co, V, Cr, Hg, Ni entres autres). Ils sont rejetés dans l'estuaire de la Seine par une canalisation, et en Baie de Seine par des barges à fond ouvrant.



### 1) Les rejets par canalisation

Ils se font à la frontière des peuplements des sables envasés à Pectinaires et *Abra alba* et du peuplement de la fosse nord à *Macoma balthica*, c'était une région relativement riche, qui s'appauvrit lentement avec la progression des envasements estuariens. Sur ce site, les phosphogypses ont formé des dépôts qui colmatent les fonds entraînant la disparition totale de la faune à cet endroit. La zone ainsi touchée n'a pas cessé de s'étendre et couvre actuellement environ 10 hectares. Au-delà du tas proprement dit, les peuplements subsistent.

### 2) Les rejets par barge

La zone de rejet par barge est située un peu plus au large, dans l'axe de la digue du Ratier au Sud de la zone d'attente de Rouen. Nous avons réalisé une étude benthos selon des radiales, des examens visuels en plongée ainsi que des analyses sur les sédiments (Proniewski et al 1980). Nos résultats et mesures qui concordent avec elles faites sous l'égide de l'IFREMER (Maggi et al 1975-84) montrent que les peuplements ne sont pas perturbés par les apports de phosphogypses. La dynamique sédimentaire du site, par des remaniements drastiques du sédiment de surface évite toute accumulation nocive pour le benthos en place. Les seules variations de richesses mises en évidence sur un axe Ouest-Est sont dues aux envasements d'origine estuarienne.

### CONCLUSION

Les modifications morphologiques de l'estuaire apparaissent comme le facteur le plus important dans la distribution et la nature des peuplements estuariens. Les déplacements de la zonation biologique suivront les modifications du sédiment et particulièrement la distribution des vases. On peut prévoir une extension vers l'Ouest des zones envasées et donc des peuplements perturbés. Mais ce phénomène sera certainement limité par le caractère plus marin du site concerné qui est soumis à l'action des houles et dans lequel les apports seront plus largement dispersés.

Charrière G. (1982).- Contribution à l'étude des ulcérations des poissons et mammifères marins. Rapport de synthèse 29 avril 1982, 27 p.

Lassus, Maggi P. (1977).- Etudes des effets d'effluents de fabrication de dioxyde de titane sur le développement larvaire d'un crustacé décapode : *Palaemon serratus* (Prenant). Rev. Trav. Inst. Pêches Marit. 41, (4) p. 325-374.

Maggi P. & al. (1975-1984).- Surveillance des rejets de phosphogypses en Baie de Seine "Résultats faune benthique". Rapports ISTPM/IFREMER n° 1 à 39.

Proniewski F., Elkaïm B. (1980).- Benthos subtidal de l'estuaire de Seine. Résultats préliminaires. C.R. Ac. Sc., Paris, T 291, sér. D, p. 545-547.

Proniewski F., Elkaïm B. (1979).- Les peuplements benthiques subtidaux de l'estuaire de Seine. Campagne 1978. Rapport SAUM 1979, p. 30-34.

Proniewski F., Elkaïm B., Quesney A. & Jeannot R. (1980).- Etudes des peuplements benthiques dans la zone de rejet de phosphogypses par barge. Rapport SAUM 1980 58 p.

Proniewski F., Lassus P. (1985).- Acid-iron wastes effects upon estuarine organisms : recent field and laboratory experiments. (Publication en cours).

40

SYNTHESE DES CONNAISSANCES SUR LES EFFETS DU DEPOT DE DRAGAGE D'OCTEVILLE.

CHAUVIN P., FREGER G., GUYADER J. \*

## I - PRESENTATION GENERALE DU DEPOT

Les produits de dragage issus du Port du Havre - aménagement et entretien des bassins, approfondissement de l'avant-port et creusement du nouveau chenal - sont déposés depuis 1949 en une zone située à 8 km du Havre, au large d'Octeville.

L'avantage de ce site résulte de sa proximité du Havre et des courants privilégiés qui y règnent.

Les dépôts effectués représentent une moyenne annuelle de 2 400 000 m<sup>3</sup> de sédiments constitués de vases, sables et galets.

## 2 - CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS DEPOSES

Depuis 1973, les produits déposés sont essentiellement des vases d'origine tellurique issues des dragages d'entretien et pouvant présenter des concentrations significatives en micropolluants minéraux.

Une campagne de reconnaissance, effectuée en 1980 sur les sédiments superficiels des bassins de marée dont sont extraites ces vases, avait permis de mettre en évidence les concentrations suivantes :

| PARAMETRE              | As   | Hg  | Pb | Zn  | Cd  | Cu | Cr | Ni | Fe    | Al    | HC   | CN   | F   |
|------------------------|------|-----|----|-----|-----|----|----|----|-------|-------|------|------|-----|
| Concentration<br>mg/kg | 14,5 | 0,8 | 82 | 198 | 1,6 | 43 | 70 | 31 | 26300 | 30300 | 42,8 | 0,13 | 642 |

Les teneurs en organochlorés étaient, sauf exception ponctuelle, inférieures au seuil de détection. On relevait par contre des teneurs en PCB de l'ordre de 130 mg/kg.

---

\* Laboratoire d'Essais et de Contrôle - Port Autonome du Havre, Terre-Plein de la Barre, 76067 Le Havre Cedex.



Globalement, les concentrations en micropolluants des sédiments dragués, normalisées à l'aluminium pour s'affranchir du paramètre granulométrique, sont identiques à celles rencontrées dans la vaseière nord de l'estuaire (rapport sensiblement égal à 1) :

| MICROPOLLUANTS | Hg | Pb  | Zn  | Cu  | Cr  | Ni  | Fe  |
|----------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| RAPPORT        | 1  | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 1,3 | 1,1 |

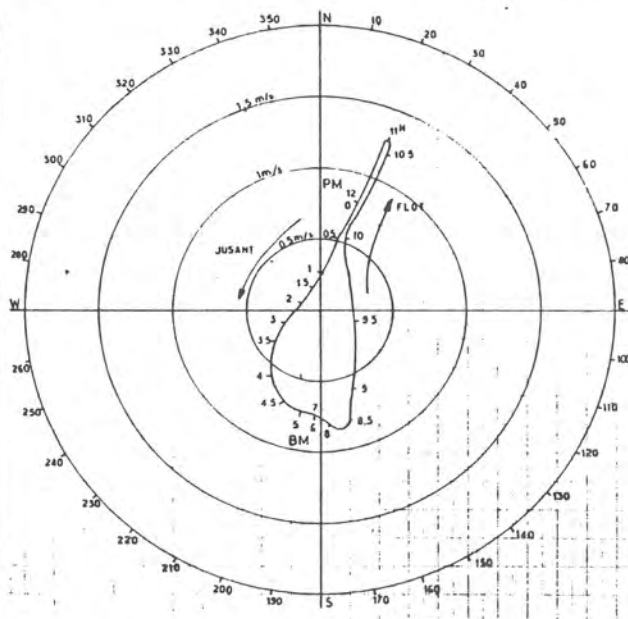
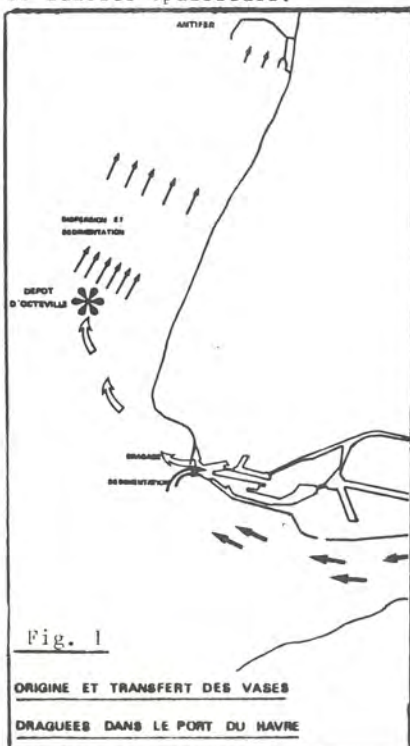
Les vases déposées sur le site d'OCTEVILLE sont donc d'une qualité comparable à celles issues du bouchon vaseux de la Seine. Ce point très important semble indiquer que les vases draguées dans l'avant-port ne sont apparemment pas contaminées par les activités portuaires.

### 3 - DEVENIR DES SEDIMENTS DEPOSES

Une étude sédimentologique par traceurs radioactifs du littoral cachois réalisée en 1973, en collaboration avec le L.C.H.F., le C.E.A. et la Faculté des Sciences de CAEN, a montré que les sédiments déposés à OCTEVILLE subissent d'importants déplacements sous l'action des courants, principalement vers le nord/nord-est (fig. 1 et 2).

En effet, environ 70 % des produits dragués (galets exceptés) se trouvent entraînés hors du site de dépôt.

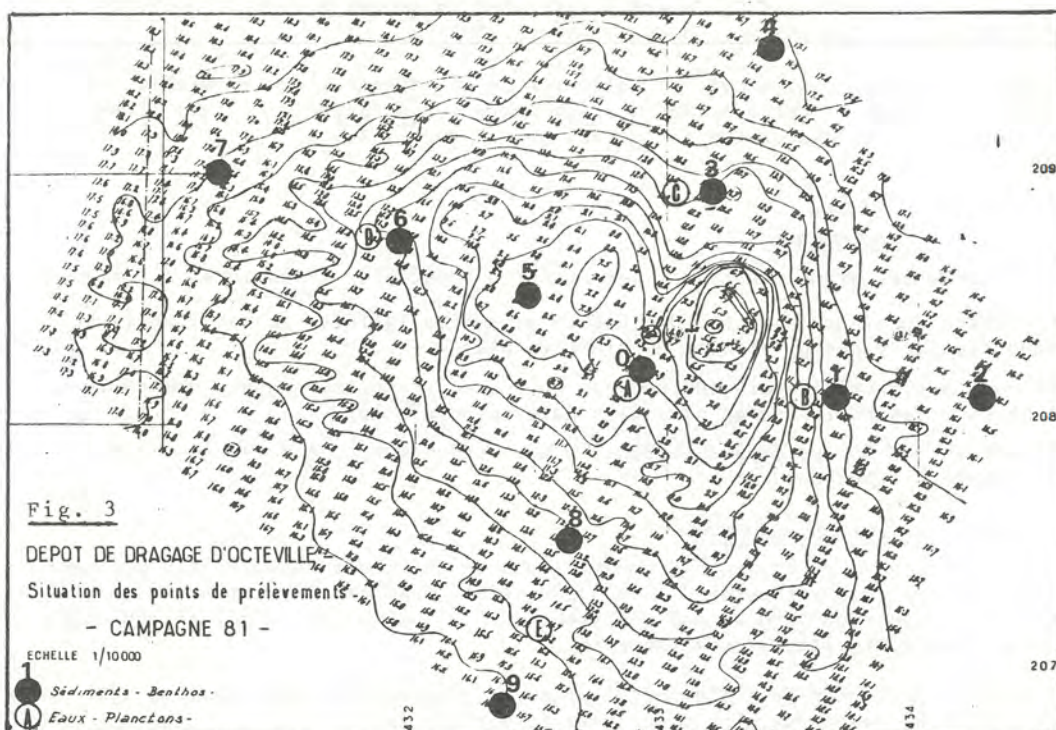
Des relevés bathymétriques montrent que les fonds situés au-delà de 2 km du centre de dépôt ne sont presque pas affectés par les produits de dragage. On peut donc penser que les sédiments déposés, particulièrement les plus fins d'entre eux, se dispersent sur de grandes distances et ne sédimentent que sur de faibles épaisseurs.



P12 ZONE OCTEVILLE - 2 Km cote -15 m coef. 98 -

19-1-1973 - houle 1 m - vent 160, 16 n - 1 m/s = 5 cm

Résultats L.C.H.F.



#### 4.1. Qualité de l'eau

Une investigation réalisée en 1981 en 5 stations (A, B, C, D, E) situées sur la zone de dépôt (figure 3) a permis d'effectuer les observations suivantes quant à la qualité de l'eau.

La colonne d'eau présente une qualité tout à fait acceptable et, de manière générale, ne semble pas affectée par l'exploitation du dépôt, si ce n'est de façon très momentanée.

Les teneurs en métaux sur eau filtrée sont faibles sur toutes les stations, sauf celle située dans la zone où les clapages s'effectuent préférentiellement, et pour laquelle les teneurs en Hg, Zn, Fe et Cd sont fortes (Station E,

Tab. 1 - Concentration en métaux dans l'eau filtrée à 0,45  $\mu$  ( $\mu\text{g/l}$ )

| M E T A U X     | STATION A | STATION B | STATION C | STATION D | STATION E | MOYENNE DU SITE D'OCTEVILLE | VALEURS MOYENNES MINI ET MAXI RELEVÉES EN BÂTE DE SEINE |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| Cadmium .....   | 0,4       | 0,38      | 0,85      | 0,8       | 4,7       | 1,4                         | 0,5 à 1,5                                               |
| Plomb .....     | 1,3       | 2,3       | 2,3       | 0,8       | 2,6       | 1,9                         | 2,8 à 3,9                                               |
| Zinc .....      | 41,6      | 17,4      | 15        | 18,5      | 71,9      | 32,9                        | 36 à 50                                                 |
| Fer .....       | 19,5      | 24,4      | 19,5      | 19,5      | 29,2      | 22,4                        | 9,2 à 21,0                                              |
| Manganèse ..... | 4,8       | 2,7       | 3,2       | 5,4       | 4,8       | 4,2                         | 7,2 à 11,3                                              |
| Chrome .....    | <0,5      | <0,5      | <0,5      | <0,5      | <0,5      | <0,5                        | 1,0 à 1,2                                               |
| Nickel .....    | <1        | <1        | <1        | <1        | <1        | <1                          | 2,8 à 4,1                                               |
| Mercurie .....  | 0,04      | 0,03      | 0,04      | 0,04      | 0,08      | 0,05                        | 0,02 à 0,03                                             |
| Cuivre .....    | 6,9       | 3,4       | 3,0       | 3,3       | 7,4       | 4,8                         | 4,0 à 8,5                                               |



Les m.e.s. présentent également des teneurs en métaux normales, toujours inférieures à celles relevées dans la baie de Seine.

Cette absence quasi totale de pollution de la colonne d'eau imputable au dépôt de dragage est certainement due aux forts courants présents dans cette zone, assurant une dispersion rapide des nuages turbides.

#### 4.2. Qualité des fonds

##### 4.2.1. Granulométrie

Les analyses granulométriques permettent d'identifier trois zones distinctes :

- Le centre du dépôt constitué d'éléments grossiers (galets, sables), quelques lentilles de vases persistant de place en place.
- La zone périphérique caractérisée par un fuseau granulométrique à dominante sableuse, les sables étant plus fins dans la partie nord.
- La partie sud où les dépôts se font le plus fréquemment, avec 70 % d'éléments de diamètre inférieur à 50  $\mu$ .

##### 4.2.2. Qualité des sédiments

L'analyse physico-chimique d'échantillons de sédiments superficiels prélevés en 10 stations (numérotées de 0 à 9) a permis de constater l'existence d'un gradient décroissant du nord au sud des teneurs en Al, bien que la partie sud soit la zone préférentielle des déversements.

Cette répartition de l'aluminium, principal constituant des argiles, confirme l'entraînement des particules fines vers le nord/nord-est.

En valeurs brutes, c'est la station 3, située au Nord du dépôt, qui présente les concentrations les plus fortes en certains métaux : Cd Pb, Cu, Zn et Cr.

Mais, après normalisation à l'aluminium, c'est la station 8 située au sud du dépôt qui apparaît la plus chargée. (tableau 2).

Tab. 2 - Micropolluants normalisés à l'aluminium dans les sédiments

| STATIONS<br>mg/kg<br>PARAMETRES | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | MOYENNE |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Mercurie/Al .....               | 0,06  | 0,74  | 0,06  | 0,05  | 0,06  | 0,03  | 0,04  | 0,13  | 0,16  | 0,15    |
| Cadmium/Al .....                | 0,9   | 0,15  | 2,0   | 0,15  | 0,2   | 0,1   | 0,6   | 0,6   | 0,35  | 0,57    |
| Plomb/Al .....                  | 3,5   | 4,3   | 50,8  | 5,8   | 6,2   | 3,1   | 7,3   | 4,1   | 7,6   | 10,3    |
| Cuivre/Al .....                 | 7,0   | 8,0   | 6,8   | 6,2   | 6,3   | 3,7   | 5,1   | 11,1  | 10,0  | 7,1     |
| Zinc/Al .....                   | 20,1  | 26,2  | 23,5  | 9,5   | 18,3  | 25,7  | 25,5  | 28,5  | 24,7  | 22,5    |
| Manganèse/Al .....              | 134,3 | 137,8 | 115,4 | 108,0 | 172,0 | 138,4 | 125   | 221,2 | 168,5 | 146     |
| Chrome/Al .....                 | 26,6  | 30,5  | 27,5  | 25,6  | 29,5  | 23,1  | 23,9  | 43,7  | 36,7  | 29,7    |
| Nickel/Al .....                 | 10,5  | 12,0  | 10,7  | 10,9  | 11,6  | 9,2   | 10,2  | 20,1  | 13,8  | 12,1    |
| Titane/Al .....                 | 358,6 | 479,7 | 473,8 | 592,7 | 391   | 246,5 | 334,2 | 662,5 | 896,6 | 492,8   |
| Fer/Al .....                    | 0,85  | 0,97  | 0,74  | 0,72  | 0,82  | 0,66  | 0,74  | 0,93  | 0,96  | 0,82    |

##### 4.2.3 - Comparaison avec d'autres sites de la Baie de Seine

Il a semblé intéressant de comparer ces niveaux de concentration avec ceux mesurés sur d'autres sites tels que la vasière nord, le Caux, le Parfond et les bassins du port du Havre, étudiés par Boust dans le cadre du S.A.U.M., et avec ceux relevés sur le site d'Antifer, soumis à l'influence directe des remontées de sédiments en provenance de l'Estuaire et du dépôt de dragage.

On constate que les concentrations en micropolluants minéraux des sédiments déposés sont inférieures à celles relevées dans les bassins du port du Havre, dans la vasière nord et au large du Caux. (tableau 3).

Tab. 3 - Teneurs moyennes brutes en micropolluants dans divers sites de la Baie de Seine (mg/kg)

|          | BASSIN DU PORT<br>DU HAVRE | ZONE DU DEPOT<br>D'OCTEVILLE | C A U X | VASIERE NORD | ANTIFER | PARFOND |
|----------|----------------------------|------------------------------|---------|--------------|---------|---------|
| Hg ..... | 0,80                       | 0,13                         | 0,13    | 0,82         | 0,15    | 0,05    |
| Pb ..... | 82                         | 12                           | 31      | 112          | 10      | 29      |
| Zn ..... | 198                        | 21                           | 65      | 257          | 30      | 36      |
| Cd ..... | 1,6                        | 0,6                          |         |              | 0,63    |         |
| Cu ..... | 43                         | 10                           | 14      | 57           | 16      | 6       |
| Cr ..... | 70                         | 28                           | 38      | 97           | 64      | 20      |
| Ni ..... | 31                         | 11,5                         | 22      | 52           | 21      | 8       |
| Ti ..... |                            | 481                          | 1 166   | 1 455        | 1 074   | 400     |
| Mn ..... |                            | 138                          | 264     | 499          | 209     | 155     |

Elles sont comparables à celles du port d'Antifer, sauf pour Cr et Ti.

Pour affiner ces comparaisons, les facteurs de concentration ont été calculés par référence au Parfond, zone où les valeurs normalisées apparaissent les plus faibles. Il apparaît alors que le dépôt de dragage présente des facteurs de concentration plus faibles que ceux des bassins du port du Havre et de la vasière nord, pour Pb, Zn, Cu et Hg.

Cet appauvrissement est probablement dû à une redissolution des micropolluants lors des dragages ou des opérations annexes.

La surconcentration observée pour Ni confirme les observations de Boust faites sur les sédiments de la baie de Seine orientale, mais ne semble pas responsable de la contamination du Caux et d'Antifer où les facteurs de concentration sont encore plus importants.

En réalité, il existe d'autres sources de pollution, notamment les eaux turbides estuariennes qui remontent jusqu'à Antifer, ou le lessivage des décharges sauvages, nombreuses le long du Caux.

##### 5 - CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DE LA ZONE DE DEPOT

Les dépôts de dragage se font dans une zone qui se situe à la limite nord des peuplements à *Abra alba* - *Pectinaria koreni* décrits par Gentil (1976). Dans les zones où les conditions hydrodynamiques le permettent, la sédimentation des vases entraîne une modification des peuplements. La richesse spécifique diminue avec l'augmentation de l'envasement. Elle passe de 25 à 23 espèces pour les stations les plus riches, à 9 espèces pour la station la plus pauvre. Bien plus que les teneurs résiduelles en fines, se sont surtout les répétitions de dépôts sur un même point qui perturbent le plus les peuplements.



6 - CONCLUSION

La mise en dépôt des produits de dragage sur la zone d'Octeville, ne semble pas entraîner de perturbations sensibles sur la qualité de l'eau. Il conviendrait néanmoins, pour confirmer ce point, de procéder à une étude systématique étalée sur une longue période.

Les sédiments déposés se dispersent sur une vaste zone et sont entraînés préférentiellement vers le Nord/Nord-Est.

Les observations physico-chimiques des sédiments en place, mettent en évidence un envasement des fonds. Ces sédiments présentent des teneurs en micropolluants minéraux relativement faibles ; on note un enrichissement en nickel qui confirme les conclusions de Boust dans son étude sur les sédiments de la baie de Seine orientale. On remarque également un appauvrissement en plomb, zinc, cuivre et mercure, par rapport aux sédiments du port du Havre ; ceci est certainement dû à une redissolution des micropolluants lors des dragages ou des opérations annexes.

L'étude biologique met en évidence une diminution sensible de richesse spécifique due à l'envasement des fonds. Cependant, cet impact reste limité à la zone du dépôt.

Afin de compléter nos connaissances sur le dépôt de dragage, il conviendrait d'effectuer :

- . une campagne de mesures sur l'eau durant une longue durée (1 an),
- . une étude approfondie sur les phénomènes de redissolution des micropolluants durant toutes les phases d'un dragage,
- . une cartographie générale des fonds entre Octeville et Antifer par mesures radioactives, afin d'apprécier l'étendue réelle des zones touchées par la sédimentation des vases déposées sur le site d'Octeville.

- 
- AVOINE J. (1981) - L'Estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, CAEN, 236 p.
  - BOUST D. (1981) - Les métaux-traces dans l'Estuaire de la Seine et ses abords. Thèse 3ème cycle, CAEN, 187 p.
  - COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE (1973) - Etude de l'évolution dans le temps des produits de dragages déposés au large d'Octeville, 14 p.
  - COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE (1973) - Etude du rejet des produits de dragage au large d'Octeville, 40 p.
  - GENTIL F. (1976) - Distribution des peuplements benthiques en Baie de Seine. Thèse 3ème cycle, PARIS VI, 70 p.
  - LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE (1973-2) - Etude du littoral entre LE HAVRE et ANTIFER : mesures en nature, sédimentologie et géomorphologie. PORT AUTONOME DU HAVRE, rap. ronéot. 38 p.
  - LARSONNEUR C. (1971) - Manche centrale et Baie de Seine, géologie du substratum et dépôts meubles. Thèse, CAEN, 394 p.
  - MONBET Y. (1975) - Incidences écologiques de la construction du Port d'ANTIFER. PORT AUTONOME DU HAVRE, rap. ronéot. 189 p.
  - S.A.U.M. (1980) - Dos. n° 4 : a - eau et sédiments - M.E.B.S. - M.A.B.N., rap. ronéot.

ABARNOU A. \*, SIMON S. \*\*.

## 1. Introduction

Les polychlorobiphényles (PCB) sont obtenus par chloration du biphényle et forment un mélange de plusieurs dizaines de constituants. L'importance de leurs usages, actuellement réglementés, s'explique par leurs propriétés diélectriques et leur grande stabilité thermique et chimique. En contrepartie, ces propriétés sont également synonymes de persistance dans l'environnement. Comme la plupart des composés organochlorés, les PCB sont peu solubles dans l'eau, fortement adsorbés sur les matières en suspension et largement bioaccumulables. Les risques toxiques que ces polluants présentent à long terme sont le fait de certains chlorohomologues, ou de leurs métabolites. Les préoccupations concernent plus particulièrement les altérations de la capacité de reproduction (poissons), les transferts de polluants entre les mères et leurs jeunes (mammifères marins), le caractère carcinogène.

Pour ces raisons, les PCB, classés parmi les polluants prioritaires, font partie des paramètres systématiquement analysés dans les programmes de surveillance tels que le Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (RNO) ou des surveillances hydrologiques de la Seine, de Poses à Honfleur. C'est le bilan de ces analyses que nous présentons, analyses réalisées sur l'eau, les sédiments et la matière vivante dans l'estuaire et la baie de Seine.

## 2. Les niveaux de contamination dans l'eau

La mesure des PCB se fait généralement dans l'eau brute par extraction par solvant, et analyse par chromatographie en phase gazeuse et détection par capture d'électrons de l'extrait préalablement concentré et purifié. Les concentrations très faibles dans l'eau de mer du large ( $< 1 \text{ ng/l}$ ) peuvent dépasser la centaine de nanogrammes par litre en zone estuarienne ou à la proximité de rejets d'eaux résiduelles.

Depuis 1978, les PCB sont systématiquement recherchés dans les eaux marines (point d'appui n° 1 du RNO) et dans la Seine (Etude des Pollutions en

---

\* IFREMER. Centre de Brest. Direction Environnement et Recherches Océaniques.  
Environnement Littoral. B.P. 337, 29273 Brest Cedex.

\*\* Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et la baie de Seine. Direction des Affaires Maritimes. 170, Boulevard Clémenceau, 76085 Le Havre Cedex.



Seine à l'aval de Poses). Ce sont ainsi près de 400 analyses qui ont été réalisées sur l'eau prélevée principalement en sept stations (fig. 1).

|                            |                                       | Gamme de concentration (ng/l) |               |              | Nombre de mesures |
|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------|--------------|-------------------|
|                            |                                       | < 20                          | > 20 et < 100 | > 100        |                   |
| INNO<br>Eau                | ( Station 1 (1978-1979)               | 12<br>(52,1)                  | 4<br>(17,4)   | 7<br>(30,4)  | 23                |
|                            | ( Station 13 (1980-1984)              | 38<br>(84,4)                  | 4<br>( 8,9)   | 3<br>( 6,7)  | 45                |
|                            | ( Station 2 (1978-1984)               | 59<br>(64,1)                  | 20<br>(21,7)  | 13<br>(14,1) | 92                |
|                            | ( Station 5 (1978-1984)               | 37<br>(61,6)                  | 13<br>(21,7)  | 10<br>(16,7) | 60                |
|                            | ( Station 10 (1977-1984)              | 56<br>(60,2)                  | 21<br>(22,6)  | 16<br>(17,2) | 93                |
| Surveil-<br>lance<br>Seine | ( Honfleur (1979-1984)                |                               |               |              |                   |
|                            | ( La Bouille (1979-1984)              | 27<br>(71,0)                  | 10<br>(26,3)  | 1<br>( 2,6)  | 38                |
|                            | ( Oissel (1979-1984)<br>(Poses en 84) | 25<br>(64,1)                  | 7<br>(17,9)   | 7<br>(17,9)  | 39                |
|                            |                                       | 254<br>(65,1)                 | 79<br>(20,3)  | 57<br>(14,6) | 390               |

Tableau 1. Distribution des concentrations en PCB dans l'eau en estuaire et en baie de Seine. (Fréquence des observations dans la gamme de concentrations).

On constate ainsi (tableau 1) que deux analyses sur trois produisent des résultats inférieurs au seuil analytique qui, pour ces mesures, a été fixé à 20 ng/l. Un abaissement de ce seuil analytique, au prix d'une réduction de la fréquence des mesures ou de l'augmentation de leur coût aurait vraisemblablement permis une meilleure interprétation des résultats. Une concentration en PCB de 20 ng/l dans l'eau est déjà caractéristique de pollution.

Sur la période 1979-1983, la prise en compte des seules valeurs supérieures à ce seuil analytique ne permet pas de distinguer des niveaux de contamination aux différentes stations. Pour chaque site de la partie fluviale, la fréquence des observations significatives, de même que la concentration moyenne de ces seules valeurs sont comparables et augmentent légèrement de l'amont vers l'estuaire. Ces pointes de pollution sont le plus souvent observées en automne, en relation probable avec l'augmentation des débits du fleuve. Enfin cette surveillance ne révèle pas une quelconque évolution de la qualité des eaux dans l'estuaire de la Seine.

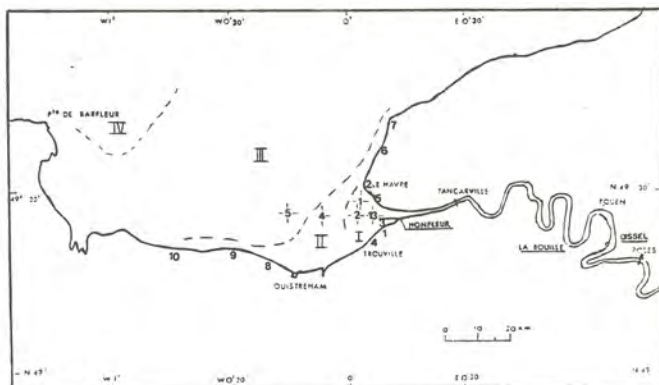


Figure 1. Carte de la contamination en baie de Seine et stations de prélèvement.

La répartition de la pollution en baie de Seine a pu être décrite par les mesures effectuées lors des campagnes Thalia 78 (COB-ELGMM, 1978) et Intersite I 1983 (Marchand et Caprais, 1985). On a ainsi pu réaliser une carte de la contamination (fig. 1), dont les différentes zones coïncident avec celles définies pour des paramètres comme les sels nutritifs ou les MES (Cabioch, 1984). De façon évidente, la Seine joue un rôle prépondérant dans la distribution des polluants dans la baie. Les concentrations maximales sont mesurées dans la zone estuarienne et à un degré moindre dans les panaches d'eau turbide s'écoulant vers le nord contre le Pays de Caux et l'ouest le long de la côte du Calvados (tableau 2).

|                          | THALIA 1978             | INTERSITE I. 1983      |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| I. Estuaire aval         | 11,5 + 2,6 (7,7 - 13,2) | 29 + 12,2 ( 14 - 39 )  |
| II. Zone sub-estuarienne | 7,6 + 2,1 (4,6 - 9,2 )  | 6,5 + 3,7 (3,2 - 12,2) |
| III. Zone intermédiaire  | 4,1 + 1,5 (2,2 - 6,6 )  | 2,9 + 0,6 (< 2 - 3,5 ) |
| IV. Zone marine          | 3,4                     | 2,1                    |

Tableau 2. Niveaux de concentrations (ng/l) en PCB dans l'eau en baie de Seine (moyenne + écart-type, gamme).

### 3. Les niveaux de contamination dans les sédiments

Les PCB, adsorbés sur le matériel en suspension, sont stockés dans les sédiments superficiels. L'analyse des PCB dans ce matériel permet l'évaluation des apports polluants sur une période de temps plus grande.

|                       | Thalia 1978 | RNO 1979   | RNO 1982 |
|-----------------------|-------------|------------|----------|
| Concentration moyenne | 7,0 + 4,9   | 14,9 + 7,6 |          |
| Minimum               | 0,9         | 4          | < 20     |
| Maximum               | 14,5        | 26         | 1 000    |

Tableau 3. Niveaux de contamination dans les sédiments (ng/g poids sec).

Les sédiments (tableau 3) de la partie orientale de la baie de Seine se situent, suivant les critères proposés par Marchand, (1983), dans la gamme des sédiments modérément contaminés (5-40 ng/g poids sec). Les zones proches de l'estuaire (zone sub-estuarienne) sont sensiblement plus contaminées (13 + 1 ng/g poids sec) que la partie plus centrale de la baie (3,6 + 1,8 ng/g) (fig. 2).

Les données de la surveillance 1982 confirment que les stations voisines de l'estuaire, le long de la côte du Calvados sont les plus contaminées. La concentration maximale (1 000 ng/g poids sec) mesurée en 1982 signifierait une contamination accidentelle très élevée.

Pour sa part, la cellule anti-pollution de Rouen a réalisé deux campagnes d'analyses des sédiments dans la partie fluviale (fig. 3). Il apparaît ainsi que, à l'aval de la section étudiée, les sédiments sont modérément à fortement contaminés (< 150 ng/g poids sec). Les très fortes concentrations mesurées au niveau d'Oissel en 1982 (600 ng/g poids sec) et 1983 (5 600 ng/g) révèlent l'existence de rejets accidentels de PCB. Enfin, cette surveillance a mis en évidence la présence de teneurs en PCB élevées dans les sédiments en amont de la section (300-600 ng/g).



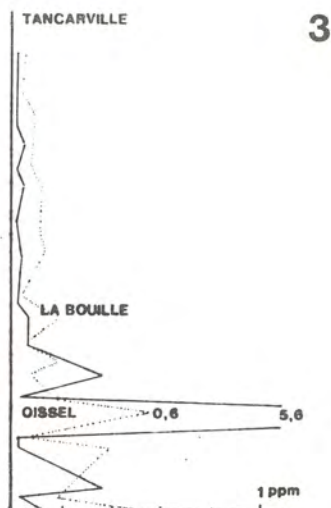
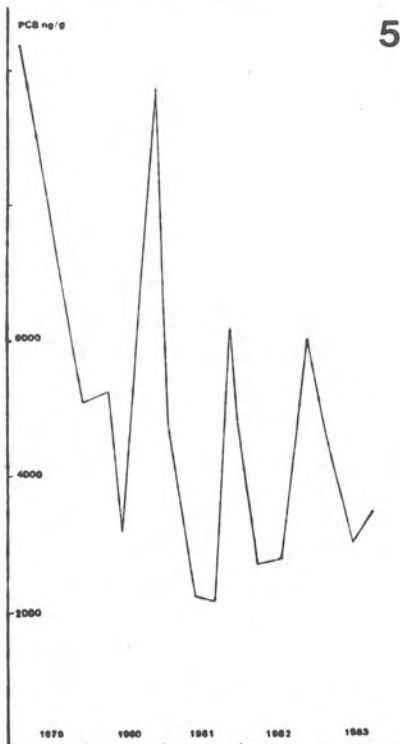
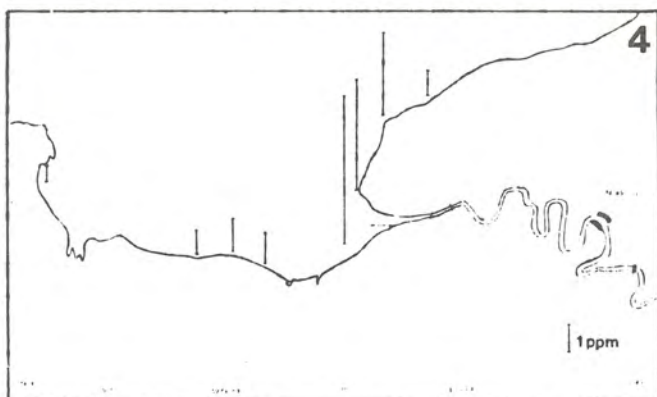
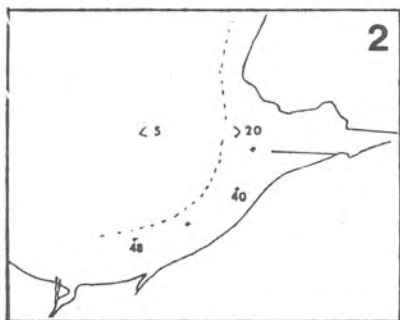


Figure 2. Carte de la contamination mesurée dans les sédiments (concentration en PCB en ng/g sédiment sec).

Figure 3. Contamination des sédiments superficiels dans la partie fluviale de la Seine.

Figure 4. Carte de la contamination mesurée dans les moules (poids sec).

Figure 5. Variation au cours du temps de la contamination dans les moules (Villerville).

Depuis 1979, les moules prélevées et analysées trimestriellement dans le cadre du RNO fournissent une information sur la qualité de l'environnement littoral.

Les moules de la baie de Seine sont les plus contaminées de la côte française (Michel et Abarnou, 1983). La concentration en PCB, voisine de 5 000 ng/g (poids sec), supérieure à celle mesurée dans les bivalves provenant de sites réputés contaminés, est d'un ordre de grandeur supérieur à celui communément trouvé dans les moules (200-500 ng/g). Les niveaux de contamination atteints sont proches de la norme de 2 ppm poids frais (soit 10 000 ng/g poids sec) récemment proposée par l'administration américaine (FDA) souvent citée en référence dans le domaine de la qualité des produits.

Les concentrations, maximales à proximité de l'estuaire, décroissent quand on s'en éloigne mais restent supérieures aux valeurs moyennes mesurées sur le littoral. La contamination est encore bien sensible dans le secteur de Fécamp (fig. 4). Sur la période 1979-83, une tendance à une diminution des concentrations moyennes semble se dessiner. La variabilité de ces mesures est trop importante pour conclure à une amélioration de la qualité des eaux de l'estuaire de Seine. La variation des concentrations sur la période de surveillance (fig. 5) est caractérisée par des maximums de niveaux de contamination en automne-hiver. En période de crue, les apports de polluants augmentent par remise en suspension des sédiments superficiels et une expulsion du bouchon vaseux de l'estuaire.

Les moules procurent une information sur la contamination de la zone côtière intertidale. Pour témoigner de la qualité des eaux de la baie de Seine, ALZIEU (1981) a proposé l'utilisation de la coquille Saint-Jacques. Les concentrations mesurées dans l'hépatopancréas de ces bivalves, prélevés en 1978 et 1979, sont en moyenne ( $830 \pm 460$  ng/g poids sec) nettement supérieures à celles trouvées sur des prélèvements provenant de régions exemptes de contamination comme la baie de Saint-Brieuc ( $230 \pm 136$  ng/g poids sec). Les teneurs maximales se rencontrent chez les individus vivant à proximité de l'estuaire ( $1\,200 \pm 330$  ng/g poids sec). D'autres espèces comme les poissons plats, les crevettes ont également été utilisés dans divers programmes de surveillance.

L'ensemble des données est présenté de façon schématique (tableau 4) mettant en évidence l'importance de la contamination en baie de Seine révélée surtout par les données relatives à la matière vivante.

|               | Eau       | Sédiments | Moules    | Crevettes (chair) | Poissons plats | Huîtres creuses |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|----------------|-----------------|
| Baie de Seine | 5-40 (25) | 10-1000   | 3000-5000 | $500 \pm 300$     | 900            |                 |
| Rade de Brest | 1-20 (10) | 0,4-2000  | 400       |                   |                |                 |
| Loire         | 2-20 (10) | 1-25      | 1000      |                   | 350            |                 |
| Gironde       |           |           |           | 200               | 300            | 550             |

Tableau 4. Comparaison des niveaux de contamination dans les différents compartiments (eau : ng/l ; sédiment et matière vivante : ng/g poids sec).

### Conclusion

Ce bilan de la contamination par les PCB dans l'estuaire et la baie de Seine a largement fait appel aux données acquises au cours de travaux de surveillance. L'objectif de tels programmes est en tout premier lieu de mettre en évidence les foyers de contamination élevée.

C'est le cas en baie de Seine, où la situation apparaît exceptionnelle et unique. La contamination des moules, la plus élevée de notre littoral, y



atteint l'ordre de grandeur des limites de tolérance admises pour ces polluants. Les concentrations mesurées dans l'eau et les sédiments superficiels, comparables à celles observées par ailleurs (tableau 4), ne permettent pas d'expliquer les très fortes valeurs trouvées dans les moules. Les phénomènes de transport du matériel en suspension, propres à l'estuaire de la Seine, conditionnent vraisemblablement la disponibilité des polluants pour les bivalves.

L'importance de cette contamination pose le problème de l'origine des polluants, de la quantité qui parvient au milieu marin, de leur distribution dans la baie, de leurs effets à long terme sur les organismes vivants.

Les PCB constituent un exemple type de polluants rejetés de manière diffuse dans l'environnement. Si quelques rejets accidentels ont pu être détectés dans la partie aval de la Seine, la plus grosse part des polluants provient de l'ensemble du bassin versant. Effectivement la surveillance de la qualité des eaux de surface a fréquemment signalé des concentrations significatives de PCB dans l'eau de la Seine ou de ses affluents. Des analyses dans la chair des poissons ont également révélé des niveaux de contamination supérieurs à 1 mg/kg de poids frais, atteignant même 18 mg/kg à BONNIERES (données communiquées par l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie).

Dans le cas d'une semblable pollution chronique les apports au milieu marin sont liés à l'activité urbaine et industrielle du bassin versant. Sur la base des données du RNO, et compte tenu de la population riveraine des deux estuaires, MARCHAND (com. pers.) extrapole l'estimation des flux de polluants en Loire (MARCHAND et al., 1985) et estime à environ 400 kg/an la quantité de PCB parvenant à l'estuaire. Une autre estimation, basée sur le flux de MES de 0,5 Mt/an (AVOINE, 1981) conduit à une quantité de PCB de l'ordre de 500 kg/an, en prenant pour concentrations moyennes 30 ng/l en PCB et 30 mg/l en MES.

Ce sont ces chiffres qu'il convient d'affiner dans le cadre du projet d'étude PCB-Baie de Seine. La précision de cette estimation dépend largement d'une meilleure connaissance de la nature de l'association polluant - matière en suspension. Une telle approche géochimique des problèmes de la contamination de la baie de Seine ne doit pas faire perdre de vue les problèmes concernant les effets des polluants pour la vie marine. On aborde là les préoccupations telles que la bioaccumulation des PCB et les niveaux de contamination acceptables dans les produits destinés à la consommation.

---

ALZIEU C. (1981).- La coquille St Jacques, témoin de la contamination des eaux littorales par les PCB. *Sci. Pêche*. 309 : 11 p.

ANONYME (1978).- Baie de Seine. Campagne Thalia - Rap. COB-ELGMM. 189 p.

AVOINE J. (1981).- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. 236 p. Univ. Caen.

CABIOCH L. (1984).- Etude intégrée de la baie de Seine. GRECO "Manche". Rapports d'activité n° 9.

MARCHAND M., CAPRAIS J.C., TRONCZYNSKI J., MARTY J.C., SCRIBE P., SALIOT A. (1984).- Processus de transport et flux des hydrocarbures et hydrocarbures halogénés dans l'estuaire de la Loire. Symp. CIEM. Flux de Contaminants. Nantes, 14-16/5/1984.

MARCHAND M. (1985).- Interprétation du contrôle RNO (1975-1982) des polluants chimiques organiques (hydrocarbures, organochlorés, détergents) dans l'eau, les sédiments et la matière vivante. Rapport IFREMER - DERO/EL/Chimie, Brest.

MARCHAND M. et CAPRAIS J.C. (1985).- Hydrocarbons and halogenated hydrocarbons in coastal waters of the English channel and the North Sea. Mar. Pol. Bull. (sous presse).

MICHEL P. et ABARNOU A. (1983).- Pollution marine par les composés organiques de synthèse. p. 35-42. Acad. de Med. Bull. n° 5. Tome 167.

LES PHENOMENES D'EAUX COLOREES EN BAIE DE SEINE

PAULMIER G. \*, JOLY J.P. \*\*.

1. - INTRODUCTION

Des phénomènes d'eaux colorées d'origine bactérienne ou planctonique sont signalées depuis plusieurs années sur les côtes françaises (Deveze et Fauvel, 1966, Grall et Lefevre 1967, Marteil et Paulmier 1970, Paulmier 1977), mais leur fréquence semble être en sensible augmentation.

Ainsi, l'année 1978 a été remarquable par l'ampleur de ces eaux colorées et la variété des espèces impliquées sur les côtes de France (Lassus 1978, Lassus *et al.*, 1980, notamment sur la façade maritime normande et picarde (Breton 1978, Kopp 1978). Depuis, et chaque année en Manche, le milieu marin est affecté, jusque sur le littoral, par des phénomènes d'eaux colorées dues aux efflorescences phytoplanctoniques, d'amplitude variable selon les années, les époques ou les endroits.

Parmi les causes hypothétiques de ces phénomènes, la pression anthropique sur le milieu marin semble importante : rejets industriels, agricoles et domestiques, urbanisation littorale et accroissement de la population estivale riveraine (eutrophisation du milieu). La répartition mondiale du phénomène pourrait également suggérer l'existence d'une évolution climatique de grande période.

Quelque soit la cause profonde de leur multiplication, ces phénomènes parfois spectaculaires (eaux colorées) ou plus discrets (développement d'espèces toxiques), semblent nécessiter la conjonction de plusieurs facteurs favorables :

- la nébulosité ou l'ensoleillement,
- les précipitations entraînant des apports terrigènes,
- la température,
- les nutriments azotés et phosphatés, oligo-éléments et substances biogènes (Lassus *et al.*, 1980, Maggi et Soulard 1984, Maggi *et al.*, 1984), la stratification des eaux et le régime des vents (Barber 1973).

2. - ZONES D'INTERVENTION ET METHODOLOGIE

Les zones prospectées, en routine ou après observations de perturbations, s'étendent sur les côtes de Haute et Basse-Normandie encadrant la Baie de Seine, du Tréport à Barfleur.

Les prélèvements sont effectués en surface (20 à 50 cm de profondeur), fixés au lugol ou non, avant examen sous microscope photonique direct, à l'aide

\* Laboratoire Ressources Aquacoles, IFREMER - Vieux Port - 20200 Bastia.

\*\* Laboratoire C.S.R.U., IFREMER - Station de Ouistreham - 65-67, rue Gambetta - 14150 Ouistreham.



d'une technique adaptée (Lassus *et al.*, 1982). Les résultats sont exprimés en unités biologiques (cell./l.) ou unités morphologiques (u.m./l.) par litre.

### 3. - ORGANISMES RESPONSABLES DES PERTURBATIONS DE MILIEU

Le terme de "perturbation" s'applique en réalité à des phénomènes naturels ou provoqués dont les répercussions sur les activités humaines sont sensibles. Ces perturbations peuvent prendre un caractère visuel spectaculaire (eaux "colorées" par des proliférations de phytoplanctons) ou passer inaperçues dans le milieu mais avoir des conséquences dramatiques pour les consommateurs de coquillages filtreurs (développement d'organismes phytoplanctoniques toxicogènes). Dans la Manche, ces agents microplanctoniques appartiennent à plusieurs catégories : les phytoflagellés (Cryptophycées, Haptophycées, Chrysophycées, Prasinophycées, Chlorophycées) (Butcher 1959, 1967, Parke et Dixon 1964), les diatomées (constituants essentiels du phytoplancton et du microphytobenthos), les dino-flagellés avec une espèce toxique, reconnue et confirmée pour les côtes de la Manche (Kat 1983) et les ciliés ou infusoires marins.

On s'aperçoit qu'en Manche les perturbations monospécifiques sont rares : les eaux colorées sont attribuées à deux ou trois espèces phytoplanctoniques dominantes (parfois beaucoup plus).

Certaines espèces équipées d'un matériel pigmentaire particulier peuvent, en nombre relativement restreint, provoquer des eaux colorées : *Gonyaulax*, *Dinophysis*, *Mesodinium*. La densité de ces espèces support de coloration est souvent beaucoup moins forte que celle des autres composants phytoplanctoniques.

Les résultats des comptages des quatre dernières années sont regroupés dans le tableau 1.

Le tableau 2 montre quelques espèces facilement identifiables en routine.

On remarque la prédominance au printemps de *Phaeocystis pouchetii*, *Rhizosolenia delicatula*, quelques espèces de *Chaetoceros* et *Mesodinium rubrum* dans l'estuaire de la Seine. En été, les espèces dominantes des eaux colorées sont *Chaetoceros armatus*, *Thalassiosira* sp., *Eucampia zoodiacus*, *Prorocentrum triestinum* et *Dinophysis acuminata* dont la responsabilité évidente dans les intoxications alimentaires, consécutives à l'ingestion de moules, rend obligatoire une surveillance attentive (Kat et Speur 1982, Alzieu *et al.*, 1983).

### 4. - CONCLUSION

Les phénomènes d'eaux colorées observés dans les eaux françaises de la Manche sont dus à une assez grande variété de micro-organismes planctoniques vrais ou occasionnels et seraient le fait de populations paucispécifiques ou plurispécifiques très denses évoluant dans des conditions particulièrement favorables. C'est ce qui a pu être constaté en 1980, 1983 et 1984. La liste des espèces responsables d'eaux colorées ne cesse de s'allonger d'année en année, ce qui rend plausible l'idée que toute espèce commune de nos eaux peut rencontrer à un moment ou un autre des conditions propices à un développement inaccoutumé modifiant l'aspect normal de la couleur des eaux ou pouvant avoir, si cette espèce est toxicogène, des conséquences sanitaires et économiques inquiétantes.

---

ALZIEU Cl., LASSUS P., MAGGI P., POGGI R. ET RAVOUX G. (1983). - Contamination des coquillages des côtes bretonnes et normandes par une algue unicellulaire toxique, *Dinophysis acuminata*. *Rapp. Techn. ISTPM*, n° 4.

BARBER R.T. (1973).- Organic ligands and phytoplankton growth in nutrient rich seawater. In "SINGER, P.C., (ed.) : Trace metals and metal-organic interactions in natural waters. Ann. Arbor. Sci. Publ., : 321-338.

BRETON G., JEANNOT R. et PRONIEWSKI F. (1978).- Les phénomènes d'eaux rouges à Prorocentrum et à Pseudopedinella et Pyramimonas dans les bassins du port du Havre au cours de l'été 1978. Bull. Soc. Geol. Normandie, 65, 4.

BUTCHER R.W. (1959).- An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. Part. I. - Introduction and chlorophyceae. - Fish. Invest., Londres, ser. 4, 74 p.

BUTCHER R.W. (1967).- Ibid. - Part. IV. - Cryptophyceae. Fish. Invest., Londres, ser. 4, 54 p.

DEVEZE L. et FAUVEL Y. (1966).- Un phénomène bactérien d'eaux rouges dans l'étang d'Ingril (Hérault). Rev. Trav. Inst. Pêches Marit., 30 (4) : 365-374.

GRALL J.R. et LEFEVRE J. (1967).- Une "eau rouge" à Noctiluques au large des côtes de Bretagne. Penn ar bed, n° 51 : 153-163.

KAT M. (1983).- Dinophysis acuminata blooms in the Dutch coastal area related to diarrhetic mussel poisoning in the Dutch Waddensea. Sarsia 68 : 81-84.

KAT M., SPEUR J. et OTTE P.F. (1982).- Diarrhetic mussel poisoning in the Netherlands related to the occurrence of Dinophysis acuminata september-october 1981. ICES C.M. 1982/E : 24. Mar. environm. Qual. Com. 12 p.

KOPP J. (1978).- Les phénomènes d'eaux colorées ayant affecté le littoral bas-normand au cours du mois de juin 1978. Rapp. ISTPM, 30 p.

LASSUS P. (1978).- Observations effectuées sur des échantillons prélevés lors "d'eaux rouges" survenues en mai et juin 1978. Rapp. ISTPM, 6 p., 1 p.

LASSUS P., MAGGI P. et BESSINETON C. (1980).- Les phénomènes d'eaux colorées de la Baie de Seine en 1978. Science et Pêche, Bull. Inst. Pêches Marit., 298 : 1-28.

LASSUS P., PAULMIER G. et LE BAUT C. (1982).- Rôle du phytoplancton dans les perturbations des écosystèmes côtiers et estuariens. Rapp. St. ISTPM, 60 p.

MAGGI P. et SOULARD L. (1984).- Facteurs hydroclimatiques et apparitions d'eaux colorées en Baie de Vilaine, durant l'année 1983. 1. Les facteurs hydroclimatiques. Rapp. Techn. ISTPM, n° 8 : 3-20.

MAGGI P., TRUQUET I. et CHAUVIN J. (1984).- Ibid. 2. Les facteurs hydrologiques. Rapp. Techn. ISTPM, n° 8 : 20-45.

MARTEIL L. et PAULMIER G. (1970).- Le phytoplancton des "eaux rouges" sur les côtes européennes de l'Atlantique. Cons. Int. Explor. Mer., Com. Plancton, C.M. 1970/L : 13, 3 p.

PARKE M. et DIXON P.S. (1964).- A revised check-list of British marine algae. J. mar. biol. Ass. U.K., 44 : 499-542.

PAULMIER G. (1977).- Note sur les organismes responsables d'eaux rouges. Rapp. ISTPM.



Tableau 1.- Eaux colorées , Normandie  
1980 - 1984

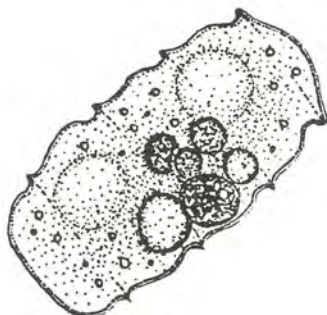
| Années | Dates                          | Secteurs                                               | Espèces en cause                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Observations                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1980   | Mai - Juin<br>(20.05 au 15.06) | Baie de Seine<br>Calvados<br>Région du Havre           | <i>Phaeocystis pouchetii</i>                                                                                                                                                                                                                                                                        | Température des eaux de 12°6 à 18°5 selon éloignement du littoral.<br>Plusieurs millions de cellules ou unités morphologiques par litre. Agrégats côtiers.                                                                                                                                                                                                               |
|        | 19.05                          | Calvados (Grandcamp à Vierville)                       | <i>Phaeocystis</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|        | 20.05                          | Trouville                                              | <i>Phaeocystis</i> ( $7,9 \cdot 10^4$ ) + <i>Gonyaulax spinifera</i> ( $7 \cdot 10^4$ )                                                                                                                                                                                                             | Diatomées pélagiques, tychoflagelliques et benthiques nombreuses.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|        | 19/20.05                       | Ouistreham                                             | <i>Phaeocystis</i> ( $1 \cdot 10^3$ à $1 \cdot 10^4$ um)                                                                                                                                                                                                                                            | Phytoplancton varié et abondant<br>T = 13° Salinité = 29,4                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|        | 19/20.05                       | Le Havre                                               | <i>Mesodinium rubrum</i> + <i>Chaetoceros didymus</i>                                                                                                                                                                                                                                               | T = 11° - 14° - Oxygène dissous à saturation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|        | 04.06                          | Ouistreham<br>Zone Portuaire                           | <i>Phaeocystis</i> ( $4,5 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Rhizosolenia delicatula</i> ( $8 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Nitzschia delicatissima</i> ( $8 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Scenedesmus quadricauda</i> ( $1 \cdot 10^6$ )                                                                                        | Diatomées total = $23 \cdot 10^6$ cell./l.,<br>Dinoflagellés = $1,2 \cdot 10^6$ cell./l.,<br>Phytoflagellés (autres que <i>Phaeocystis</i> ) = $1,5 \cdot 10^6$ cell./l.<br>Pigments = Chlorophylle a = 95,95 µgtr./l.<br>Pheopigments = 28,07 "<br>Chlorophylle c = 77,27 "<br>β Carotenoides = 98,67 "<br>Diversité pigmentaire = 2,77                                 |
|        | 04.06                          | Le Havre                                               | <i>Mesodinium rubrum</i> ( $6,3 \cdot 10^5$ à $1 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Polykrikos schwartzii</i> ( $6,7 \cdot 10^4$ )<br>+ <i>Heterocapsa triquetra</i> ( $2 \cdot 10^5$ )<br>+ <i>Protoperdinium bipes</i> ( $1 \cdot 10^5$ )                                                                      | En fin d'évolution, <i>Scrippsiella trochoidea</i> = $2 \cdot 10^6$ cell./l.<br><i>Rhizosolenia delicatula</i> = $7 \cdot 10^6$ cell./l.<br>Pigments : Chlorophylle a = 101,96 µgtr./l.<br>Pheopigments = 22,21 "<br>Chlorophylle c = 49,86 "<br>β Carotenoides = 73,11 "<br>Diversité pigmentaire = 1,62                                                                |
|        | 06.06                          | Le Havre<br>(Ste Adresse)                              | <i>Mesodinium rubrum</i><br>+ <i>Dinophysis acuminata</i>                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|        | 08.06                          | Baie de Seine<br>(Ratier)                              | <i>Mesodinium rubrum</i> ( $1,2 \cdot 10^5$ )                                                                                                                                                                                                                                                       | Dinoflagellés divers = $1,17 \cdot 10^5$ cell./l.<br>Phytoflagellés = $9,7 \cdot 10^5$ cell./l.<br>Diatomées = $5,2 \cdot 10^6$ cell./l. dont<br><i>Rhizosolenia delicatula</i> = $4,8 \cdot 10^5$ cell./l.                                                                                                                                                              |
|        | 08.06                          | Calvados entre Cabourg et Dives/Mer                    | <i>Phaeocystis</i> ( $2 \cdot 10^6$ à $26,9 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Rhizosolenia delicatula</i> ( $80 \cdot 10^5$ à $723 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Thalassiosira rotula</i> ( $5,7 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Dictyocha speculum</i> ( $11,5 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Dinophysis acuminata</i> ( $1 \cdot 10^5$ ) | Accumulations localisées.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|        | 11.06                          | Barfleur - Gatteville                                  | <i>Phaeocystis</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                  | T = 24,5° - Oxygène dissous = 76 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|        | 24.06                          | Ouistreham<br>Zone Portuaire                           | <i>Plagioselmis cf. prolonga</i> ? ( $1,8 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Pyramimonas sp.</i> ( $2,4 \cdot 10^6$ )<br>+ <i>Pseudopedinella</i>                                                                                                                                                                | Phytoflagellés total = $5,28 \cdot 10^6$ cell./l.<br>Dinoflagellés = $1,23 \cdot 10^6$ "<br>Heterocapsa triquetra<br>Diatomées = $7,8 \cdot 10^5$ "<br>Oxyrrhis marina<br>Microalgues = $8 \cdot 10^3$ "<br>Pigments = Chlorophylle a = 98,46 µgtr./l.<br>Pheopigments = 42,42 "<br>Chlorophylle c = 72,05 "<br>β Carotenoides = 51,72 "<br>Diversité pigmentaire = 2,61 |
|        | 06.08                          | Ouistreham<br>Zone Portuaire<br>Canal de Caen à la mer | <i>Plagioselmis cf. prolonga</i> ? ( $10 \cdot 10^6$ )<br>+ Phytoflagellés ( $3,8 \cdot 10^5$ )<br>+ <i>Prorocentrum minimum</i> ( $3,5 \cdot 10^4$ )                                                                                                                                               | Pigments = Chlorophylle a = 38,08 µgtr./l.<br>Pheopigments = 4,22 "<br>Chlorophylle c = 10,30 "<br>β Carotenoides = 32,34 "<br>Diversité pigmentaire = 2,24                                                                                                                                                                                                              |
| 1981   | 20.05                          | Courseulles Bassin ostréicole fermé                    | <i>Prorocentrum minimum</i> ( $5,44 \cdot 10^6$ )                                                                                                                                                                                                                                                   | Salinité = 25,8‰ - pH = 9,4 -<br>Oxygène dissous = 25% -<br>Pigments = Chlorophylle a = 45,63 µgtr./l.<br>Pheopigments = 156,67 "<br>Chlorophylle c = 137,26 "<br>β Carotenoides = 88,98 "<br>Diversité pigmentaire = 3,64                                                                                                                                               |

| Années               | Dates | Secteurs                                                                     | Espèces en cause                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Observations                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Tabl.1 (suite)                                                                                                                                                                                                                                                   |  |
|----------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 1981<br>(suite)      | 29-05 | Le Havre<br>Digue Nord                                                       | Diatomées<br>- Rhizosolenia delicatula<br>- Thalassiosira spp.<br>- Ditylum brightwellii                                                                                                                                                                                                                                               | T° = 15°7 - Nitrates = 153,6 µatgr./l.<br>Nitrites = 10,9 "<br>Orthophosphates = 0,2 "<br>Ammonium = 2,8 "<br>Silicates = 31,7 "                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|                      | 09-06 | Est Cotentin<br>Iles St Marcouf                                              | Phaeocystis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|                      | 15-06 | Le Havre - Antifer                                                           | Diatomées                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | T° = 19°                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|                      | 12-08 | Ouistreham<br>Zone côtière                                                   | Prorocentrum triestinum<br>(114.10 <sup>6</sup> )<br>+ Prorocentrum minimum<br>(9.10 <sup>6</sup> )<br>+ Dinophysis acuminata<br>(1,5.10 <sup>5</sup> )<br>+ Phaeocystis<br>(1,8.10 <sup>6</sup> )<br>+ Rhizosolenia delicatula<br>(306.10 <sup>6</sup> )<br>+ Chaetoceros sp.<br>(12.10 <sup>6</sup> )                                | Dinophycées total = 134.10 <sup>6</sup> cell./l.<br>Diatomées = 381.10 <sup>6</sup> "<br>Phytoflagellés = 12.10 <sup>6</sup> "<br>(moins Phaeocystis)<br>Tintinnides = 7,2.10 <sup>6</sup> "<br>Pigments = Chlorophylle a = 331,65 µatgr./l.<br>Pheopigments = 52,60 "<br>Chlorophylle c = 548,60 "<br>Carotenoides = 822,79 "<br>Diversité pigmentaire = 4,85 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|                      | 27-08 | Ouistreham<br>Canal de Caen<br>à la mer                                      | Prorocentrum minimum<br>+ Heterocapsa triquetra                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|                      | 04-09 | Baie de Seine<br>Bouée RN<br>Nord Cap de la<br>Hève jusqu'à<br>Antifer       | Mesodinium rubrum<br>+ Asterionella blackeylei<br>+ Chaetoceros curvisetus<br>socialis<br>+ Melosira crenulata<br>+ Rhizosolenia delicatula<br>+ Prorocentrum micans                                                                                                                                                                   | Eaux colorées jusqu'à 4 milles vers le large<br>T° = 17°                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|                      | 07-09 | Le Havre<br>Avant Port<br>Partie orientale<br>de l'embouchure<br>de la Seine | Mesodinium rubrum<br>+ Diatomées<br>+ Prorocentrum micans<br>+ Scrippsiella trochoidea<br>+ Gonyaulax spinifera<br>+ Pyramimonas disomata                                                                                                                                                                                              | T° = 19° - 20°                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|                      | 1982  | 11-08                                                                        | Villers/mer<br>Littoral                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Katodinium rotundatum<br>(8.10 <sup>4</sup> )<br>+ Dinoflagellés<br>+ Phytoflagellés (2.10 <sup>5</sup> )<br>+ Mesodinium rubrum                                                                                                                                                                                                                               | Eaux faiblement colorées<br>T° = 21°, salinité = 26,7‰                                                                                                                                                                                                           |  |
|                      |       | 21-08<br>22-08                                                               | Villers/mer<br>Littoral                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Chaetoceros armatus<br>(2,75.10 <sup>6</sup> à 3,31.10 <sup>6</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Eaux faiblement colorées. Matières en<br>suspension. T° = 17°.                                                                                                                                                                                                   |  |
|                      | 1983  | 02-06                                                                        | Calvados<br>Ouistreham                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Phaeocystis (2.10 <sup>5</sup> )<br>+ Rhizosolenia delicatula<br>(359.10 <sup>6</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                        | Tâches parallèles à la côte, jusqu'à 3 milles<br>au large<br>Diatomées = 467,6.10 <sup>6</sup> cell./l.<br>Dinoflagellés = 8.10 <sup>5</sup> "<br>Tintinnides = 6.10 <sup>5</sup> "<br>Pigments = Chlorophylle a = 1272,24 µatgr./l.<br>Pheopigments = 3750,87 " |  |
| 05-06<br>au<br>07-06 |       | Le Havre<br>Bassins<br>Portuaires                                            | Rhizosolenia delicatula<br>+ Skeletonema costatum<br>+ Thalassiosira spp.<br>+ Dinoflagellés                                                                                                                                                                                                                                           | T° = 18° - 20°                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| 09-06<br>au<br>12-06 |       | Antifer<br>Ste Adresse                                                       | Katodinium rotundatum<br>(86.10 <sup>6</sup> )<br>+ Gonyaulax spinifera<br>(2,2.10 <sup>6</sup> )<br>+ Scrippsiella trochoidea<br>(6,7.10 <sup>5</sup> )<br>+ Gyrodinium spirale<br>(2,3.10 <sup>5</sup> )<br>+ Gymnodinium catenatum<br>+ Chaetoceros socialis<br>(2,8.10 <sup>6</sup> )<br>+ C. curvisetus<br>(2,3.10 <sup>6</sup> ) | T° = 16°<br>Dinoflagellés total = 90.10 <sup>6</sup> cell./l.<br>Présence de Mesodinium rubrum                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| 20-06                |       | Le Havre<br>Zone Portuaire                                                   | Scrippsiella sp.<br>+ Rhizosolenia delicatula                                                                                                                                                                                                                                                                                          | T° = 18° - 20°<br>Présence possible de Gymnodinium catenatum ?                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |



| Années          | Dates                | Secteurs                        | Espèces en cause                                                                                                                                                                                         | Observations <span style="float: right;">Tabl. 1 (suite)</span>                                                                                                                            |
|-----------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1983<br>(suite) | 01-07                | Antifer                         | Mesodinium rubrum ( $8.10^5$ )<br>+ Phytoflagellés ( $6.8.10^6$ )                                                                                                                                        | $T^\circ = 18^\circ$<br>Nombreuses diatomées (Chaetoceros)                                                                                                                                 |
|                 | 06-07<br>au<br>08-07 | Antifer                         | Mesodinium rubrum ( $1.10^6$ )<br>+ Dinophysis acuminata ( $5.10^5$ )                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                            |
|                 | 18-07                | Antifer                         | Dinophysis acuminata ( $1.21.10^6$ )<br>+ Scrippsiella trochoidea ( $5.10^4$ )                                                                                                                           | $T^\circ = 20^\circ - 21^\circ$                                                                                                                                                            |
|                 | 21-07                | Ouistreham<br>Calvados          | Thalassiosira (weissflogii?)<br>( $12.2.10^6$ à $129.6.10^6$ )<br>+ Chaetoceros socialis ( $3.6.10^6$ à $8.10^6$ )                                                                                       | Zone portuaire et chenal d'accès au port.<br>$T^\circ = 22^\circ$<br>Diatomées total = $17.2.10^6$ à $142.3.10^6$ cell./l.                                                                 |
|                 | 22-08                | Le Havre                        | Prorocentrum micans ( $9.7.10^6$ )                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                            |
|                 |                      |                                 |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                            |
| 1984            | 03-05                | Calvados<br>Deauville           | Mesodinium rubrum ( $8.10^5$ )<br>+ Gymnodinium simplex ( $1.3.10^5$ )<br>+ Gyrodinium britannicum ( $3.3.10^4$ )<br>+ Nematopsis vigilans ( $3.3.10^4$ )<br>+ Phytoflagellés ( $6.10^5$ )               | $T^\circ = 14^\circ 5$ - pH = 7,3<br>Eaux rouges à tons violacés.<br>Dinoflagellés total = $1.75.10^6$ cell./l.                                                                            |
|                 | 24-05                | Antifer                         | Phytoflagellés divers ( $17.8.10^6$ )<br>Mesodinium rubrum ( $4.5.10^5$ )<br>+ Katodinium rotundatum ( $1.1.10^6$ )<br>+ Rhizosolenia fragilissima ( $1.8.10^6$ )                                        |                                                                                                                                                                                            |
|                 | 04-06                | Le Havre                        | Phaeocystis ( $3.7.10^6$ )<br>+ Nitzschia delicatissima ( $19.7.10^6$ )<br>+ Thalassiosira decipiens ( $1.07.10^6$ )<br>+ Plagiogramma staurophorum ( $1.10^6$ )                                         | $T^\circ = 12^\circ 6$                                                                                                                                                                     |
|                 | 18-06<br>au<br>20-06 | Ouistreham<br>Franceville       | Gonyaulax spinifera ( $5.1.10^5$ à $1.5.10^6$ )<br>+ Chaetoceros debilis ( $2.2.10^5$ )<br>+ Thalassiosira rotunda ( $2.1.10^7$ )<br>+ Scrippsiella trochoidea ( $2.1.10^4$ )<br>+ Heterocapsa triquetra | $T^\circ =$ de $18^\circ$ à $20^\circ 5$<br>Salinité = 25,9 à 29,7‰<br>pH = 7,3 - 8,7                                                                                                      |
|                 | 05-07                | Calvados Ouest<br>Baie des Veys | Licmophora lyngbyei ( $182.10^6$ )<br>+ Skeletonema costatum ( $39.5.10^6$ )<br>+ Gymnodinium minor ( $5.10^5$ )                                                                                         | Tâches parallèles à la côte plus ou moins étendus.<br>Diatomées total = $265.6.10^6$ cell./l.<br>Phytoflagellés = $12.5.10^6$ "<br>Dinoflagellés = $7.75.10^5$ "                           |
|                 | 10-07                | Antifer                         | Eucampia zodiacus ( $78.10^6$ )<br>Rhizosolenia delicatula ( $18.8.10^6$ )<br>Pyramimonas sp. ( $13.5.10^6$ )<br>Polykrikos schwartzii ( $1.4.10^6$ )                                                    | $T^\circ = 23^\circ$ - Salinité = 32,65‰ - pH = 8,3<br>Diatomées total = $106.1.10^6$ cell./l.<br>Phytoflagellés = $30.25.10^6$ "<br>Dinoflagellés = $20.35.10^6$ "<br>ciliés = $5.10^6$ " |
|                 |                      |                                 |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                            |
|                 |                      |                                 |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                            |
|                 |                      |                                 |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                            |
|                 |                      |                                 |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                            |

Tabl. 2 - Quelques espèces phytoplanctoniques observées dans les eaux colorées de la Baie de Seine.



*Polykrikos schwartzi*  
(printemps - été occasionnel)



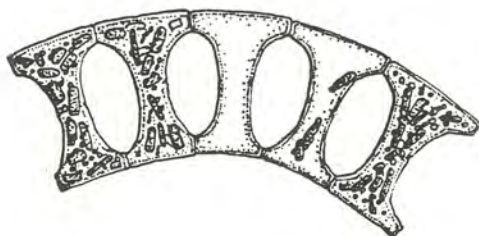
*Gymnodinium splendens*  
(été, occasionnel)



*Dinophysis acuminata*  
(été, fréquent)



*Gonyaulax spinifera*  
(printemps - été, occasionnel)



*Eucampia zoodiacus*  
(printemps - été, fréquent)



*Proocentrum micans*  
(été, fréquent)





IMPACT DU MILIEU SUR LES NOURRICERIES DE POISSONS PLATS DE LA BAIE DE SEINE.

DUVAL P. \*

La Baie de Seine représente un écosystème favorable pour le développement des juvéniles de nombreuses espèces marines, en particulier les poissons plats, ceci en raison essentiellement de la richesse des chaînes trophiques. Une étude entreprise en 1981 par le Groupement Régional des Pêches et Cultures Marines de Basse-Normandie (G.R.P.C.M.), avec l'appui scientifique de l'IFREMER, a apporté les premiers éléments d'une meilleure connaissance de cette partie du littoral. Elle sert aussi de référence pour l'aménagement des pêcheries de la région, les nourriceries bas-normandes contribuant au renouvellement et à l'entretien des stocks adultes exploités.

Cette étude avait pour premier objectif de repérer dans l'espace et dans le temps les zones de concentration de juvéniles, et de déterminer leur importance. La connaissance de ces zones a en effet un intérêt capital dans la gestion des pêcheries. Dans un deuxième temps, on a tenté un recensement des facteurs qui peuvent influencer sur le développement des nourriceries, facteurs d'origine naturelle (hydrodynamique, sédiments, prédation, compétition) et artificielle (qualité des eaux, pollution, activités humaines); en effet, la Baie de Seine se trouve au débouché d'une concentration urbaine et industrielle parmi les plus importantes d'Europe.

Pour prospecter la zone d'étude, nous avons sollicité le concours des pêcheurs de la région. L'engin utilisé était un chalut à perche de 3 m d'ouverture horizontale, conçu spécialement pour l'échantillonnage des juvéniles de poissons plats. Les prélèvements ont débuté fin mai et se sont déroulés jusqu'en novembre.

La zone prospectée s'étend du cap d'Antifer à l'embouchure de l'Orne, jusqu'à une profondeur de 20 mètres.

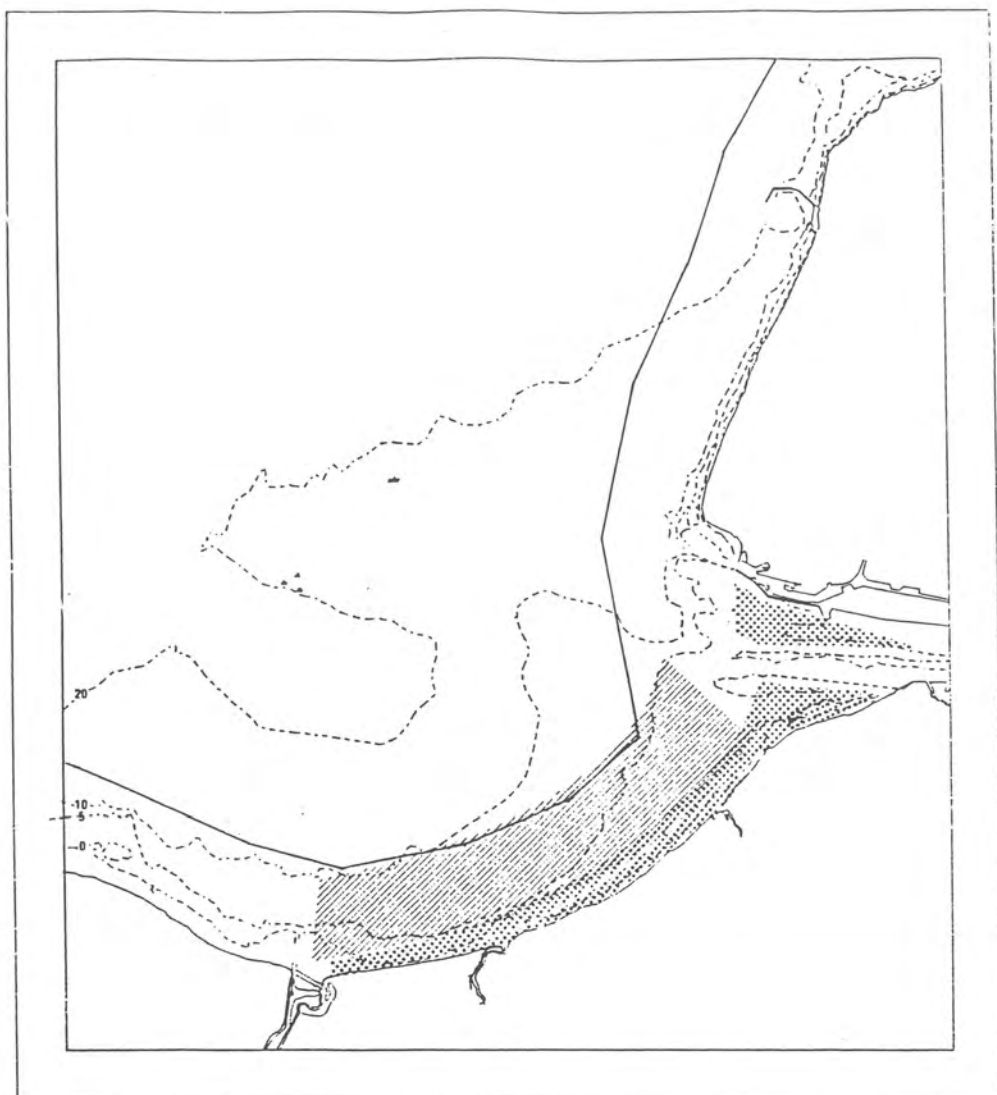
Nous avons ainsi dégagé l'existence de nourriceries importantes entre Ouistreham et Villerville (carte), dont la caractéristique principale est la bathymétrie. En effet, on observe que les jeunes limandes (groupes d'âge 0 et 1) se tiennent dans une zone comprise entre -2 et -7 mètres, alors que la plie et la sole colonisent le domaine intertidal. On note également des abondances plus fortes aux abords des petits estuaires (Touques et Dives) et dans la fosse sud de l'estuaire. La fosse nord n'est fréquentée que par la sole, mais c'est une nourricerie importante de flet, espèce à faible valeur marchande.

La présence des juvéniles de poissons plats dans les zones estuariennes s'explique en partie par la sédimentologie particulière de ces zones, fortement décalée vers les particules fines et par la richesse en micro-organismes, principale source de nourriture des jeunes poissons. Un deuxième facteur est la température plus élevée en été des eaux estuariennes, ce qui favorise la croissance et l'activité métabolique.

Les concentrations de juvéniles se déplacent au cours de la saison vers le large et on observe une dispersion des individus dans la zone prospectée; en novembre, les densités observées sur les nourriceries baissent significativement.

\* IFREMER, Station de Ouistreham, 65-67, rue Gambetta, 14150 Ouistreham.





- /// nurseries de limandes  
... nurseries de soles et de plies  
— limites de la zone des 3 milles (chalutage interdit)

LOCALISATION DES NOURRICERIES DE  
LA BAIE DE SEINE ORIENTALE

Les facteurs qui interviennent sur les nourriceries sont de deux ordres :

- les effets du milieu;
- les activités humaines.

Les effets du milieu sont de deux types:

- biologique, d'abord; la prédation naturelle exercée sur la crevette est importante, en particulier par les Gadidés (merlan, tacaud, lieu,...). Les poissons plats interviennent surtout à l'âge adulte, comme l'a montré l'analyse des contenus stomacaux;

- physique, ensuite; l'impact sans doute le plus important vient des modifications morphologiques de l'estuaire. Qu'elles soient d'origine naturelle (comblement) ou artificielle (endiguements et remblaiements), elles ont entraîné une réduction des zones intertidales (Avoine, 1981), lieux privilégiés de nourrissage des juvéniles. Le déplacement du bouchon vaseux vers l'aval, par la modification de la nature du substrat, a provoqué une altération des chaînes alimentaires (en particulier un appauvrissement spécifique), cause de la migration hors de l'estuaire de certaines espèces sensibles (par exemple, la limande). Il faut aussi noter une modification de la salinité des eaux estuariennes, qui affecte les espèces les plus exigeantes.

Les travaux des biologistes du S.A.U.M. et mes propres observations ont bien montré une baisse de la richesse spécifique de l'aval vers l'amont; seules quelques espèces bien adaptées aux nouvelles conditions se sont maintenues dans l'estuaire interne (le flet pour les Poissons, les Oligochètes pour les Invertébrés).

Quant à la pollution, les modifications de l'estuaire ont entraîné une surcharge en micro-polluants d'origines diverses, dont l'action n'est pas encore claire sur les organismes vivants, mais qui ne doit pas être négligée (Elkaïm, 1980).

L'action des activités humaines se situe aussi à deux niveaux:

- une action directe, par la pêche côtière; en effet, un effort de pêche important est développé par les ports de Honfleur, Trouville et Dives sur la crevette grise (*Crangon crangon*), en particulier au printemps et au début de l'été. Cette activité, dérogatoire, se pratique dans la zone des trois milles (théoriquement interdite à toute activité de pêche) et avec des chaluts de fond à petit maillage. Ceci entraîne la capture des juvéniles de poissons plats qui résistent mal à l'émersion même très temporaire. Cette mortalité n'a pas encore fait l'objet d'une étude complète, mais dans l'optique d'une protection et d'une valorisation des stocks, il faut considérer son examen comme indispensable. La fermeture de la pêche crevettière au printemps pourrait être un moyen de réduire cette mortalité juvénile mais cette mesure présente des impacts socio-économiques non négligeables (redéploiement des activités de pêche, en particulier pour Honfleur, modification des caractéristiques des flottilles, diversification des métiers). La pêche d'automne a sur les nourriceries une conséquence moindre en raison des migrations des jeunes vers le large à partir du mois d'octobre et de leur dilution dans le milieu, d'où une capturabilité moindre.

- Une action indirecte, mise en évidence par les travaux du S.A.U.M.: elle concerne essentiellement les pollutions industrielles et domestiques issues du bassin versant de la Seine dont nous avons vu plus haut l'impact au niveau des sédiments. Les modifications morphologiques de l'estuaire à la suite des travaux d'aménagement ont changé les conditions physico-chimiques des eaux estuariennes et ceci peut expliquer la raréfaction, voire la disparition, de certaines espèces qui faisaient l'objet il y a quelques années encore d'une exploitation par les flottilles de cette région (pie, sprat, anguille, par exemple). La faible richesse spécifique (nombre des espèces) observée au niveau des vasières de l'estuaire, dûe aux conditions



particulièrement difficiles de ces milieux a entraîné un déséquilibre faunistique en faveur d'espèces résistantes telles le flet et le tacaud. On observe en effet une baisse de la diversité spécifique associée à une équitabilité de plus en plus faible alors que l'on pénètre dans l'estuaire (Duval, 1982).

En conclusion, on peut retenir que la préservation des nourriceries de la baie de Seine repose essentiellement sur deux points :

- l'aménagement des pêcheries et un meilleur respect de la réglementation actuelle; ceci passe par une information des professionnels quant aux risques qu'ils font courir aux stocks en capturant (bien malgré eux) les juvéniles. Il faut donc envisager tout ce qui pourrait faciliter une réorientation des flottilles vers des métiers moins destructeurs.

- L'étude préalable de tous les impacts (travaux d'aménagement, assainissements, rejets de déchets,...), qui, on l'a vu ces dernières années, ont un effet quasi-immédiat sur la faune. Il s'agit donc d'une redéfinition des politiques économiques en cours ou à venir, si l'on ne veut pas sacrifier une activité bas-normande encore importante (à savoir la pêche) et aussi le tourisme.

Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse Géologie, Caen.

Duval P. (1982).- Etude des nurseries littorales de l'estuaire de la Seine. Tome I et II. Rapport ISTPM/GRPCM.

Duval P. (1985).- Impact du milieu et des activités humaines sur les populations de poissons plats et de crevettes de l'estuaire de la Seine. Actes du Colloque "Estuaire de la Seine - Enjeux écologiques et économiques". Le Havre 1984. (à paraître).

Elkaïm B. (1980).- L'étude de l'accumulation de métaux chez *Cardium edule*, *Littorina littorea* et *Crangon crangon*. Rapport final SAUM Estuaire de la Seine. MABN/MEBS.

Laniesz F. (1982).- Etude des relations entre la pollution, la pêche et la biologie de la crevette grise *Crangon crangon* dans l'estuaire et en Baie de Seine. Rapport GRPCM/ISTPM.

LA BAIE DE SEINE : UTILISATION, ENVIRONNEMENT.  
SYNTHESE DES DISCUSSIONS.

MAUVAIS J.L. \*

Le sujet abordé "Aménagement et Pollution" en Baie de Seine ne laisse pas les auditeurs indifférents. Les discussions ont duré plusieurs heures et elles étaient parfois passionnées. Il a été impossible de reprendre l'ensemble des interventions.

On peut néanmoins les classer en trois grandes catégories :

- Interventions se rapportant aux problèmes de la pêche en Baie de Seine :
  - . Liaisons pêches - pollutions
  - . Liaisons pêches - aménagements
- Interventions se rapportant à la pollution et aux eaux colorées
  - . Liaisons pollution - aménagement
- Interventions se rapportant aux aménagements.

---

\* IFREMER, Centre de Brest, B.P. 337, 29273 Brest Cedex.



Texte rédigé à partir des interventions de :

- M. A. ABARNOU : IFREMER BREST.
- M. J. AVOINE : Université de CAEN.
- M. BELLAN : Station Marine d'Endoume.
- Mme ? : (CREPAN).
- M. G. CHABERT-D'HIERES : Institut de Mécanique de GRENOBLE.
- M. C. CHASSARD-BOUCHAUD :
- M. J.C. CLEMENT : Chargé d'Etudes "Baie de Seine".
- M. J. COSSON : Université de CAEN.
- M. G. DESPREZ :
- M. J.P. DUPONT :
- M. GANDON : CEA-LA HAGUE.
- Mme GAYRAL : Université de CAEN.
- M. Y. GERVAISE : Laboratoire Municipal de ROUEN.
- M. P. GUEGUENIAT : CEA-LA HAGUE.
- M. GIRET : IFREMER OUISTREHAM.
- M. M. HORN : Service Régional d'Aménagement des Eaux de Basse-Normandie.
- M. M. JOLY : IFREMER OUISTREHAM.
- Mme G. LEFEVRE-LEHOERFF : IFREMER BREST.
- M. Y. LE GAL : CONCARNEAU Collège de France.
- M. A. LESOUF : Agence de Bassin Seine-Normandie.
- M. J. LORILLU : Comité Régional des Pêches et Cultures Marines.
- M. M. MARCHAND : IFREMER BREST.
- M. G. PERRIN : Adjoint au Directeur Département des Affaires Maritimes du Calvados.
- M. SIMON : SPPPI LE HAVRE.

## PROBLEMES DE LA PECHE

La pêche en Baie de Seine est un problème important qui a monopolisé une grande partie du temps de discussion.

### Problèmes liés à l'effort de pêche

Le sentiment général est que, depuis un certain nombre d'années, il y a augmentation de l'effort de pêche qui, dans certains cas, peut se traduire par une surcapacité.

Des mesures d'aménagement doivent être prise en compte (M. GIRET) :

- aménagement intégré du littoral portant sur l'ensemble des activités,
- aménagement interne des pêches et des cultures marines associant tous les partenaires concernés,

Il y a cependant un certain nombre de difficultés pour une gestion rationnelle des pêcheries (G. PERRIN) :

- problèmes liés à une méconnaissance de l'effort de pêche. La pêche en Baie de Seine est une "petite pêche". Les informations sont donc difficiles à obtenir ;
- problèmes liés à la définition des mesures techniques à appliquer à l'élaboration d'une réglementation.

Cela est dû au déplacement du centre de décision vers Bruxelles.

- problèmes liés à l'amputation de ces mesures par les professionnels.

La pêche en Baie de Seine représente 150 navires, 300 marins, 30 millions de francs de chiffre d'affaires (1984). Les revenus, voire les emplois, sont en jeu.



- problèmes liés à l'application de ces mesures et à la surveillance des pêcheries :

- . Moyens nautiques basés au Havre et à Cherbourg,
- . 7 agents des affaires maritimes sur le littoral,
- . 1 gendarme maritime.

Tous les intervenants s'accordent à reconnaître l'insuffisance des moyens. La grande majorité des pêcheurs admet la réglementation et la respecte. Une minorité triche ; il faudrait :

- . augmenter les moyens de contrôle,
- . sensibiliser la profession à l'autodiscipline (exemple : les petites soles dont la commercialisation est interdite en France, sont exportées vers l'Italie),
- . faire intervenir le consommateur.

#### Problèmes liés aux aménagements

Les modifications de la compétence du milieu vis à vis de son rôle d'abri et de nourricerie des espèces pêchées (crevettes, poissons plats) ont-elles une influence sur les captures ?

La réponse est difficile, voire impossible. De même, on peut penser que le développement d'autres activités sur le littoral (industrie, tourisme) ou sur le bassin versant ne sont pas sans conséquences sur les ressources marines. Mais ces actions sont difficilement quantifiables.

#### Problèmes liés à la pollution

Les pêcheurs se plaignent de la mauvaise image de marque que peuvent apporter toutes les discussions portant sur la pollution de la Baie de Seine.

Un intervenant fait remarquer que la position de "retrait" qu'ont les professionnels de la mer vis à vis des problèmes de pollution est peut être préjudiciable aux professionnels eux-mêmes. Il serait sans doute préférable, plutôt que de tenter de masquer certains problèmes, d'avoir une position moins défensive et plus positive : création de labels de qualité, contrôles, actions contre les pollueurs,...

Les associations de protection ont ce type d'action. Pourquoi pas les professionnels ?

PROBLEMES LIES A LA POLLUTION  
ET AUX EAUX COLOREES

A) Pollution

Le sujet est très vaste. Il y a de nombreuses interventions. Certaines sont très techniques et se rapportent à un point particulier d'un exposé.

1) Questions Techniques

Y-a-t-il eu des mesures d'étain sur le dépôt de dragage d'Octeville (influence des organo-étains sur les huitres) ?

- Les teneurs en argent mesurées dans les suspensions de la Baie de Seine atteignent 25 ppm, ce qui est très élevé par rapport à ce qui est observé à l'échelle mondiale. L'argent est un élément très toxique qui se concentre fortement au niveau des mollusques. Il serait souhaitable de suivre son évolution au titre de la surveillance en Baie de Seine.

- En contradiction avec l'exposé de Monsieur PRONIENWSKY, Madame CHASSARD- BOUCHAUD affirme que, dans le cadre d'un contrat CNEXO auquel participaient de nombreux laboratoires, il a été mis en évidence que la pollution avait de nombreuses conséquences sur les organismes marins (poissons et crustacés) :

. accumulation de certains constituants (terres rares, uranium, titane, chrome, fluor entraînant des fluoroses,...),

. stress d'ordre physiologique.



2) Deux types de pollution suscitent un intérêt particulier :

a) P.C.B.

Monsieur LESOUËF de l'Agence de Bassin Seine-Normandie présente les résultats d'une cartographie des teneurs en P.C.B. dans les poissons d'eau douce du bassin de la Seine.

Cette cartographie indique une contamination de la Seine dès l'agglomération parisienne. Une campagne d'analyse du sédiment entre Paris et Poses s'est révélée difficile à interpréter du fait de la variabilité des sédiments disponibles en Seine.

Une campagne est prévue en juin-juillet sur les mousses aquatiques entre l'agglomération parisienne et la mer. Une discussion a ensuite lieu pour savoir si la Baie de Seine peut être considérée comme polluée en P.C.B. Deux notions sont possibles :

- par rapport à la protection de l'environnement,
- par rapport à la protection de la santé humaine

La prise en compte de la toxicité des produits sur le milieu marin est difficile à prendre en compte dans le cas d'action simultanée de plusieurs polluants. Il faudrait plutôt prendre en considération les effets conjoints d'un ensemble de polluants.

L'impact d'une pollution sur les ressources marines non commercialisées est, dans l'état actuel des connaissances, pratiquement impossible à chiffrer (exemple de l'"Amoco Cadiz").

En ce qui concerne la protection de la santé humaine, les niveaux de P.C.B. en Baie de Seine sont en moyenne inférieurs d'un facteur 2 à la norme établie par la F.D.A.(\*) aux U.S.A. (2 ppm de poids frais).

Toutefois compte tenu des différences de concentrations rencontrées avec les autres régions françaises, il convient d'être très prudent. Sur quatre années de surveillance RNO (1975-1982) on s'aperçoit que les niveaux moyens annuels restent relativement constants. Les rapports des P.C.B. dans les mollusques

$$\frac{\text{Loire}}{\text{Gironde}} = 2,4 \pm 0,7 \quad \text{et} \quad \frac{\text{Seine}}{\text{Gironde}} = 9,4 \pm 1,5$$

sont voisins des rapports démographiques (population bordant estuaires et fleuves). Ceci tendrait à accréditer comme origine des apports de P.C.B. véhiculés par la Seine une origine de contamination chronique et diffuse liée aux activités humaines générales sur le bassin versant de ce fleuve (M. MARCHAND).

Certains intervenants s'étonnent de l'absence de normes. L'adaptation de normes ne peut être valable que si la norme est admise à l'échelle internationale. Il faut tenir compte :

- des différences de régime alimentaire (certaines populations mangent beaucoup plus de poissons que d'autres),
- des aspects analytiques : identification des résidus, quantification, dosages par méthodes "normalisées",
- de l'adoption d'accords internationaux pour la définition de normes.
- ...

Ce ne sont là que les difficultés principales, ce qui fait comprendre la lenteur avec laquelle les normes internationales se mettent en place.

---

(\*) : Food and Drug Administration



b) Les nutriments (en particulier l'azote)

Monsieur LESOUEF présente un graphique montrant l'évolution des apports en nitrate au cours des vingt dernières années. L'extrapolation des résultats a quelque chose d'inquiétant, mais, heureusement, est irréaliste. Il convient cependant d'être prudent.

Il y a actuellement une prise de conscience du milieu agricole sur la nécessité de mieux gérer les stocks d'azote. Différentes expériences sont actuellement en cours.

L'élimination de l'ammonium rejeté par l'agglomération parisienne est une notion bien admise au niveau des principes. Mais il existe des problèmes de finances et de délais. La nécessité de dénitrifier les effluents de la région parisienne n'est pas forcément encore admise. Les indications en provenance de la Baie de Seine en montrant la nécessité, ou, au contraire, l'inutilité seront les bienvenues.

En ce qui concerne l'évolution des teneurs en oxygène en Baie de Seine entre 1977 et 1983, Monsieur LESOUEF donne les explications suivantes :

a) L'amélioration de 1 à 2 mg/l d'oxygène mise en évidence entre 1975 et 1983 (à débit et température comparables) peut être attribuée à :

- une réduction importante, de l'ordre de 50 à 60 % des matières organiques rejetées par les industries et collectivités de l'agglomération rouennaise. Les résultats observés sont bien ceux qui étaient attendus.

- une réduction des matières organiques rejetées par l'agglomération parisienne mais dont l'influence sur la Basse-Seine est nettement plus faible du fait de la distance. Il n'y a pas eu de réduction majeure des rejets d'ammonium de l'agglomération parisienne pendant la période 1975 - 1983, rejets responsables de façon importante de la désoxygénation en Basse-Seine.

b) L'amélioration sensible des teneurs en oxygène entre 1977 et 1983 est également due à une augmentation du débit d'étiage.

De nombreux intervenants mettent en cause les "nutrients" dans l'apparition d'eaux colorées. .

#### B) Eaux colorées

Plusieurs intervenants font état du caractère "ancien" de l'apparition des eaux colorées. Ce phénomène, fréquent en eau douce, est étudié depuis de nombreuses années.

En eau douce, l'importance des "nutrients" et de l'eutrophisation semble prouvée. De même que les variations rapides de température : ces variations, en effet, sélectionnent les espèces. Certaines s'adaptent très vite à ces nouvelles conditions et se développent au détriment des autres espèces. Du fait des aménagements des bassins versants, les eaux s'écoulent de plus en plus vite vers l'aval. L'inertie thermique du système est en diminution : le régime thermique des rivières suit de plus en plus celui de l'air (M. HORN).

En mer, un certain nombre d'intervenants sont persuadés de l'importance des "nutrients" (nitrates et phosphates). Mais le seuil favorable au déclenchement n'est atteint qu'avec la concordance de certains facteurs (température et salinité par exemple). Ce point de vue est contesté par un certain nombre de personnes. L'importance de la connaissance systématique des organismes est soulignée: des espèces différentes ne peuvent donner des résultats identiques en ce qui concerne leur pouvoir toxique. Les divergences de résultats qui peuvent être constatés dans ce domaine tiennent (et risquent de tenir de plus en plus) à des négligences concernant la simple identification des organismes.



Peut-on mettre en place, en France, un modèle prédictif d'apparition d'eaux colorées tel que celui tenté par les japonais ? Les conditions rencontrées au Japon sont très différentes (rencontre d'eaux chaudes et d'eaux froides) et il convient d'être très prudent. Néanmoins, la courantologie résiduelle peut permettre certains espoirs : Dinophysis acuminata apparaît début juillet à Antifer, à la mi-juillet sur les côtes du Calvados et début août à Barfleur (M. JOLY).

Mme LEFEVRE fait remarquer que l'apparition des eaux colorées dépend assez étroitement de la stratification. L'augmentation des fréquences d'apparition des eaux colorées en Baie de Seine pourrait-elle être due à une augmentation de la stratification, elle-même induite par le comblement de l'estuaire ?

Le dernier volet de la discussion sur les problèmes de pollution concerne des aspects très généraux.

Madame A. GARNIER fait remarquer que le retour à un état "naturel" nécessiterait des efforts très coûteux et n'apparaît pas comme une démarche très satisfaisante.

Il faut que les décideurs connaissent les niveaux qu'il serait souhaitable d'atteindre, tant pour la protection de la santé publique que pour la préservation du milieu marin. Déterminer ces niveaux nécessite des études prenant en compte les différents maillons d'une chaîne reliant les sources de pollution, les êtres vivants et l'homme et peut donc constituer un objectif interdisciplinaire.

D'autres interventions se rapportent aux aspects psychologiques de la pollution et de la contamination. Peut-on trouver d'autres termes ?

Un intervenant lie la survie de l'humanité à la mer. Dans ces conditions, comment tolérer des déversements de polluants industriels ? Les dangers d'apparition de nouveaux produits dont l'action sur le milieu marin sont insuffisamment testés sont évoqués.

## PROBLEMES LIES AUX AMENAGEMENTS

Monsieur BELLAN fait remarquer qu'en matière d'environnement marin, les aménagements sur le littoral peuvent avoir beaucoup plus d'impact que les pollutions. L'exemple du littoral méditerranéen est, à cet égard, très significatif.

Monsieur LE GAL pose le problème du bilan économique final : compte tenu de l'ampleur des travaux réalisés depuis cent ans pour maintenir le port de Rouen, n'aurait-il pas été plus judicieux de privilégier le développement d'un port hors estuaire ?

Les autres interventions traitant des problèmes des aménagements sont très ponctuelles :

- Nécessité, pour les études sédimentaires d'avoir des sondages en aval de l'estuaire (jusqu'à la rade de la Carosse).

- Vasière nord : problème de son évolution (réduction...). Son rôle "biologique" est-il modifié ?

- Si l'heure des rejets de dragage est quelconque, il y en a une partie qui revient dans le port ou le chenal.

- Les diapositives présentées par Monsieur GUYADER montrant le bouchon vaseux dans l'estuaire sont très appréciées. Il est regrettable que l'heure de prise de vue ne soit pas indiquée. Un intervenant souhaite la mise en place d'une "campagne photographique".

- Les bilans sédimentaires doivent distinguer :

- . le bilan du matériel sédimentaire décanté en amont (hautes slikkes et schores),

- . le bilan des matériaux apportés par transit sur le fond ou à proximité du fond (quantifiables à partir des données du P.A. de Rouen).

Ce sont là deux stocks différenciés au niveau de leur dynamique (J.P. DUPONT).





LE PROGRAMME D'ACTION  
DU SECRETARIAT PERMANENT POUR LA PREVENTION DES POLLUTIONS INDUSTRIELLES (SPPPI)  
EN BASSE SEINE

Le souci de préserver à la fois la qualité de l'environnement et le développement d'une importante activité industrielle a suscité dès décembre 1978 la création en Basse-Seine du Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles.

Coprésidé par les Commissaires de la République des Régions de Haute et Basse Normandie, le S.P.P.P.I regroupe au sein d'un conseil d'orientation et de plusieurs commissions spécialisées les représentants des collectivités locales et territoriales, des activités socio-économiques, des associations de protection de la nature et des services de l'Etat. L'aire de compétence du S.P.P.P.I s'étend du barrage de POSES (Eure) à la mer et comprend la partie de la Baie de Seine située entre Villers-sur-Mer (Calvados) et le cap de la Hève (Seine-Maritime).

Le S.P.P.P.I. vise trois objectifs :

- COORDONNER l'action des organismes chargés de la protection de l'environnement de la Basse-Seine face aux atteintes pouvant résulter de l'activité industrielle et favoriser la concertation entre tous les intervenants (élus, associations).
- PROPOSER des programmes de réduction de la pollution de l'eau et de l'air et en vérifier l'application.
- INFORMER le public des actions engagées et de leur impact sur la qualité du milieu naturel.

Le secrétariat général du S.P.P.P.I. est confié à la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche de Haute-Normandie qui, en tant que service administratif chargé de l'inspection des installations classées, assure l'instruction technique des dossiers et le suivi réglementaire des programmes d'action.

La réduction de la pollution de l'eau est un thème majeur des travaux du S.P.P.P.I. depuis sa création. Les efforts portent principalement sur les points suivants :



## 1 - Réduction de la pollution oxydable :

Pour s'en tenir aux rejets de DCO, le tableau ci-dessous résume les évolutions des rejets moyens des principales branches industrielles de 1978 à 1984 ainsi que les objectifs de réduction pour 1987 retenus par le Conseil d'Orientation et sur lesquels de nombreux engagements ont déjà été recueillis :

| DCO t/j     | 1.1.1978 | 1.1.1984 | 1987<br>(Objectifs) | Abattement<br>1.1.1984/<br>1978 | Abattement<br>attendu<br>1987/1984 |
|-------------|----------|----------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Raffineries | 31       | 15,3     | < 10                | 51%                             | > 35%                              |
| Caoutchouc  | 16       | 6,3      | 2,5                 | 61%                             | 60%                                |
| Pétrochimie | 18       | 7,5      | 4                   | 59%                             | 47%                                |
| Chimie      | 49       | 41       | < 20                | 16%                             | > 51%                              |
| Papeteries  | 148      | 35,5     | < 34,3              | 76%                             | > 4%                               |
| Divers      | 22       | 6,6      | 4,2                 | 70%                             | 36%                                |
| TOTAL       | 284      | 112,2    | 75,0                | 60%                             | > 33%                              |

La réduction de 60% entre 1978 et 1984 a été obtenue au prix d'un effort financier évalué à 300 MF.

Parallèlement à la réduction des flux moyens de pollution oxydable de chaque usine, un effort particulier a également été engagé à l'encontre des pointes de pollution et des déversements accidentels dont la fréquence et l'importance peuvent remettre en cause les progrès obtenus sur le milieu naturel.

De même une attention particulière a été développée à l'égard des rejets industriels effectués dans les affluents de la Basse-Seine : l'Iton, l'Andelle, le Cailly, l'Austreberthe, la Risle, la Charentonne et le Commerce.

## 2 - Les rejets industriels azotés

Les flux globaux d'azote total (NTK) rejetés par l'Industrie en Basse-Seine sont évalués à 17 t/j dont :

Industrie des engrais : 8,4 t/j  
 Chimie : 3,9 t/j  
 Raffinage : 1,8 t/j

Ce premier inventaire publié par le S.P.P.P.I en avril 1984 a mis en lumière les opérations de résorption portant sur des quantités très significatives (6 t/j). Les études actuellement en cours visent à définir les moyens de prévention des rejets à partir du bilan détaillé de leurs origines de façon à mettre en oeuvre un programme de réduction des flux azotés d'ici 1987.

### 3 - Les rejets de l'usine THANN et MULHOUSE du HAVRE

La suppression totale des rejets de sulfate de fer cristallisable (boues rouges) est effective depuis le début de 1980, le sulfate étant valorisé en agriculture et commercialisé sous forme de chlorosulfate pour le traitement des eaux.

D'autre part, pour satisfaire la condition d'acidité par mélange avec l'eau de l'estuaire, la Société a installé durant l'hiver 1980-1981 un émissaire de 1 000 mètres prolongé par un diffuseur de 300 mètres. Le dispositif a été complété en 1982 par un système d'asservissement du rejet aux marées fondé sur la mesure en continu de la vitesse du courant.

En outre, le S.P.P.P.I. suit les recherches de THANN et MULHOUSE pour la mise en oeuvre d'un nouveau procédé d'attaque du minerai en continu afin de réduire les quantités spécifiques d'acide mis en oeuvre et rejeté au cours des opérations de production.

### 4 - Le stockage à terre du PHOSPHOGYPSE

Les projets des trois sociétés concernées font l'objet d'un suivi constant par le S.P.P.P.I.

#### - CdF Chimie AZF - Usine de GRAND-QUEVILLY

La totalité des phosphogypses de l'usine est stockée à terre dans d'anciennes carrières de la Boucle d'ANNEVILLE depuis août 1984 permettant ainsi la suppression définitive des rejets en mer par barges de cette usine ( 800 000 t/an).

Le gypse est transporté par pipe-line à partir de Grand-Quevilly et déversé dans des cellules de décantation et de stockage. Le site est entièrement étanche pour assurer la protection des eaux souterraines contre des infiltrations et toutes les eaux provenant des aires de décantation et de stockage sont collectées et renvoyées à l'usine. En fin d'exploitation (dans environ 30 ans) le dépôt paysagé devrait avoir une surface de l'ordre de 100 ha pour une hauteur moyenne de 30 mètres. Le coût des travaux nécessaires pour cette opération est supérieur à 106 MF.



- CdF Chimie AZF GRAND-COURONNE

Après quelques retards liés à la restructuration de l'entreprise et la difficulté de trouver des terrains à proximité, l'usine de Grand-Couronne s'est engagée le 24 janvier 1985 devant le S.P.P.P.I. sur la réalisation d'un stockage partiel (33%) de ses rejets (900 000 t/an) d'ici 1985 et sur la suppression définitive des rejets en mer avant la fin de 1988.

- COFAZ au HAVRE

Après des retards successifs, la société havraise a entrepris la réalisation d'un stockage partiel de ses rejets de phosphogypse (700 000 t/an) sur un terrain argileux de 30 ha situé au sud immédiat de l'usine. Le dépôt prévu, d'une hauteur finale de 25 m, pourra recevoir 25% de la production de phosphogypse préalablement lavé, filtré et neutralisé à la chaux.

La Société COFAZ a confirmé la mise en service du dépôt d'ici l'été 1985 devant le S.P.P.P.I. qui a néanmoins émis le voeu que la société havraise étudie la possibilité de réduire son rejet au-delà du seuil de 25% annoncé.

La réalisation de ces trois projets permet donc d'espérer une réduction de plus de moitié des rejets en mer avant la fin 1985.

5 - Mise en oeuvre d'une stratégie pour enrayer la dispersion des P.C.B (polychlorobiphényles) en Basse Seine.

La Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche a entrepris un inventaire systématique des sources potentielles de P.C.B. en Basse Seine auprès des fabricants, utilisateurs, réparateurs de matériels électriques. Les premiers résultats de cette enquête ont été examinés par la Commission "Eau" du Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles en mai 1985.

Ce recensement révèle un nombre important d'utilisateurs d'équipements contenant des PCB et met en évidence les principales causes de perte de PCB dans l'environnement :

- déficiences des conditions de stockage et de manipulation,
- défaillance au niveau de l'élimination des appareils réformés,
- apparition de PCB au niveau des réactions secondaires dans la fabrication de certains produits spécifiques.

L'action engagée par le S.P.P.P.I. vise à renforcer très rapidement les contrôles au niveau de l'évacuation des équipements souillés de PCB et au niveau des stockages. Par ailleurs une étude méthodique est en cours pour définir une stratégie à l'encontre de la formation de PCB liée à certaines fabrications.

# POSTERS





- P.1 - CHABERT D'HIERES G. Modèle de la Manche au 1/50.000 sur la plaque tournante de l'Institut de Mécanique de Grenoble
- P.2 - ELECTRICITE DE FRANCE. Etude des surcotes
- P.3 - LE BAS J. et BELORGEY M. Analyse du frottement turbulent induit par la houle sur les fonds marins
- P.4 - LARSONNEUR C. Carte des sédiments superficiels de la Baie de Seine
- P.5 - ALDUC D., AUFFRET J.P. et LARSONNEUR C. De la Baie de Seine au Nord-Cotentin : paléovallées et bancs sableux
- P.6 - MARIN P. Etude de la répartition du fer et du manganèse dans les eaux interstitielles à l'embouchure de la Seine
- P.7 - MOCEKL. et VANDORPE B. Adsorption des métaux par les sables intertidaux
- P.8 - AMIARD J.C. et AMIARD-TRIQUET C. Bioaccumulation de quelques éléments traces (Cd, Pb, Cu, Zn) en milieux estuarien et néritique
- P.9 - COSSON J. et THOUIN F. Répartition des champs de Laminaires en Baie de Seine
- P.10 - DAMERVAL M., CATANIA R. et LUBET P. Les inclusions pigmentées du système nerveux de Mollusques intercotidaux (*Mytilus edulis* L. et *Crepidula fornicata* L.) de la Baie de Seine : leur rôle dans la résistance aux conditions défavorables du milieu
- P.11 - G.E.M.E.L. Etude comparative de trois estuaires de Manche : Baie des Veys, estuaire de la Seine, Baie de Somme
- P.12 - GENTIL F. Distribution et composition des peuplements macrobenthiques en Baie de Seine
- P.13 - IRLINGER J.P., QUINTINO V., ELKAÏM B. et GENTIL F. Dynamique de population et cycle biologique d'*Abra alba* (bivalve) et de *Pectinaria koreni* (Polychète) du peuplement des sables fins envasés de la Baie de Seine orientale
- P.14 - LE GALL P. Peuplements benthiques à l'ouest de l'estuaire de l'Orne
- P.15 - LE GALL P. Structure et évolution des populations de *Owenia fusiformis* en Baie de Seine
- P.16 - ROSSET-MOULINIER M. Les Foraminifères benthiques de la Baie de Seine

P.1

MODELE DE LA MANCHE AU 1/50.000

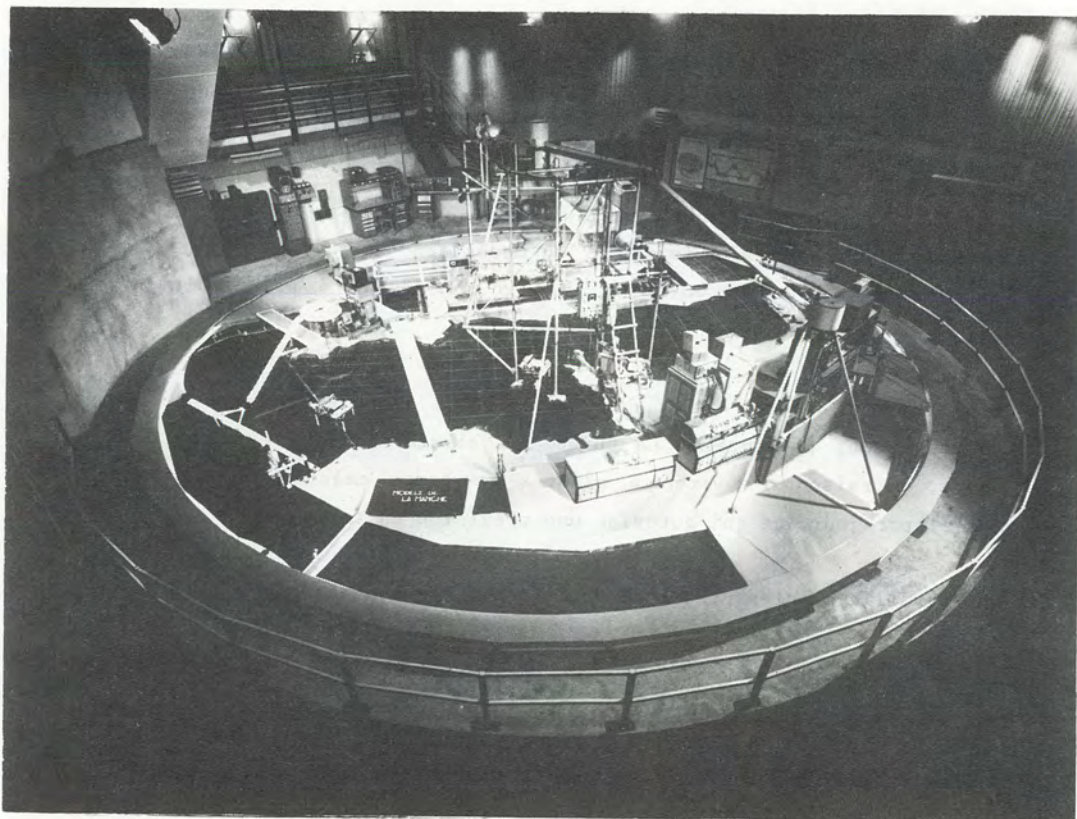
Sur la plaque tournante de l'Institut de Mécanique de Grenoble.

CHABERT D'HIERES G. \*

Le modèle de la Manche a permis pour la première fois de déterminer très précisément les dénivellations et les courants dus à la marée. Il a permis la mise au point de modèles numériques également précis.

Plus particulièrement, il a donné les conditions aux limites des modèles de la baie de Seine. Il a donné une représentation des courants résiduels en Baie de Seine.

Il rappelle quelques résultats obtenus dans ce même laboratoire dans d'autres domaines liés à l'océanographie.



\* Institut de Mécanique de Grenoble, B.P. 68, 38402 Saint Martin d'Hères.



## P.2

### ETUDE DES SURCOTES

#### *ELECTRICITE DE FRANCE\**

L'étude se situe dans le cadre des aides à la navigation. Elle consiste à étudier le phénomène de surcotes en mer. Afin de simuler la propagation de l'onde de surcote, on utilise un modèle numérique basé sur les équations de Saint Venant. Le code de calcul utilise une méthode d'éléments finis qui, par sa souplesse, permet de décrire avec précision les limites du domaine modélisé, avec la possibilité de raffiner le maillage dans une zone d'intérêt particulier

Compte tenu du caractère dynamique du phénomène de propagation d'ondes, et de l'étendue sur laquelle agissent les perturbations météorologiques, une modélisation complète du plateau continental européen, comprenant la Manche, la mer du Nord et la mer d'Irlande, a été jugée nécessaire. Un maillage éléments finis comptant 642 éléments et 1.435 noeuds a été réalisé sur cette zone.

L'étude a consisté à quantifier les effets de la météorologie sur les surcotes dans les ports français, en modélisant une tempête réelle, ayant eu lieu du 17 au 20 novembre 1973 en mer du Nord principalement, et quatre tempêtes survenues dans l'année 1982.

Pour chacune d'entre elles, des comparaisons avec les niveaux réellement observés sont présentées. La durée des simulations varie entre 6 et 10 jours, à raison d'environ 4 minutes de temps calcul sur l'ordinateur CRAY 1 par jour, ce qui autorise une prévision en temps réel.

On travaille maintenant à l'étude de l'interaction avec la marée.

Cette étude a été réalisée pour la Mission de la Recherche du Secrétariat d'Etat chargé de la mer.

---

\* Laboratoire National d'Hydraulique - 6, Quai Watier - 78400 Chatou.

### P.3

#### ANALYSE DU FROTTEMENT TURBULENT INDUIT PAR LA HOULE SUR LES FONDS MARINS.

LE BAS J., BELORGEY M.

L'Etude de l'action de la houle sur les fonds marins est un des axes de recherche du Laboratoire de Mécanique des Fluides dont le thème général est " onde et turbulence " .

En eau peu profonde, l'analyse de la contrainte de frottement et de la turbulence au voisinage des fonds marins, sous les vagues, permet de connaître le mécanisme dominant, déterminant le transport des sédiments, l'affouillement au voisinage des obstacles ou l'enfouissement d'objets posant sur les fonds marins. Le mouvement des vagues est le mécanisme générateur du mouvement oscillatoire de la "couche limite" créée au voisinage du fond et contrôlée par celui-ci. Il est donc indispensable de connaître aussi finement que possible l'évolution du champ des vitesses, au voisinage du fond pour les différentes phases de la houle.

La vélocimétrie Doppler Laser permet actuellement une mesure fine des vitesses instantanées et de la turbulence dans les écoulements fluides. C'est cette technique que nous avons adaptée aux conditions particulières du mouvement orbital des particules fluides dans le cas des ondes de gravités. Pour ce faire nous avons créé une interface permettant le pilotage de la mesure par la houle elle-même.

Les expériences sont réalisées en canal à houle. Les résultats obtenus montrent l'évolution du profil des vitesses horizontales ( $U$ ) dans une section du canal, en fonction de la phase de la houle. De ces résultats expérimentaux nous déduisons la contrainte de frottement sur le fond et son évolution en fonction de la phase de la houle.

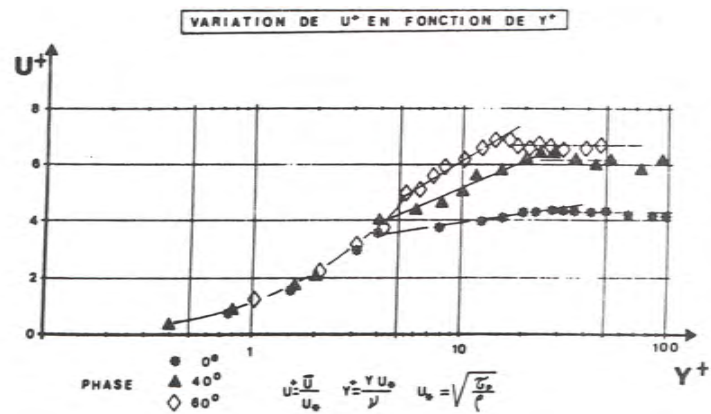
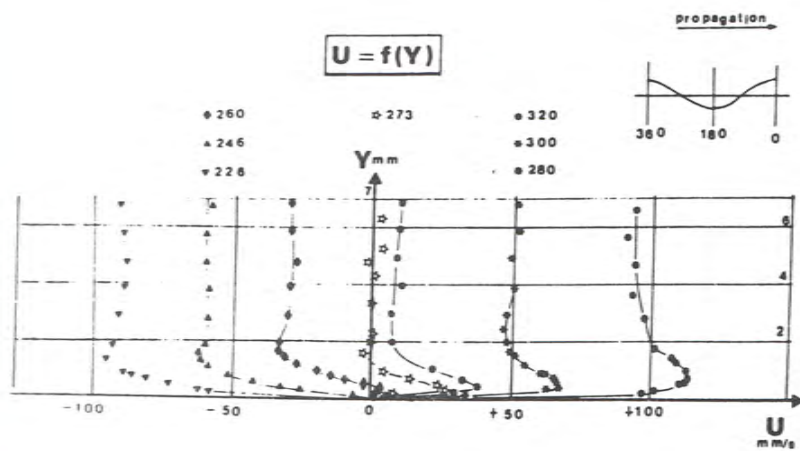
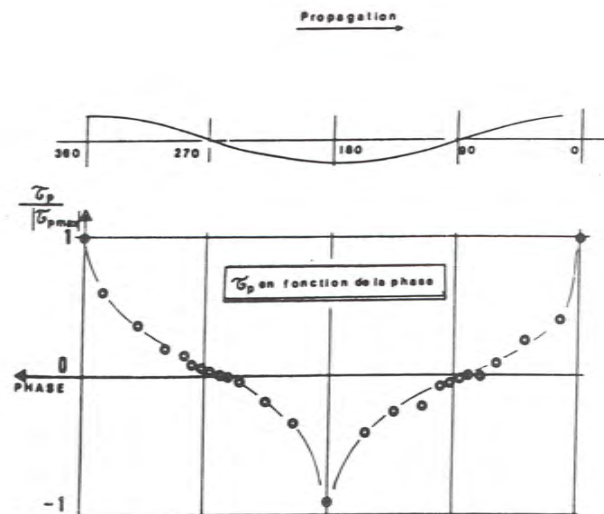
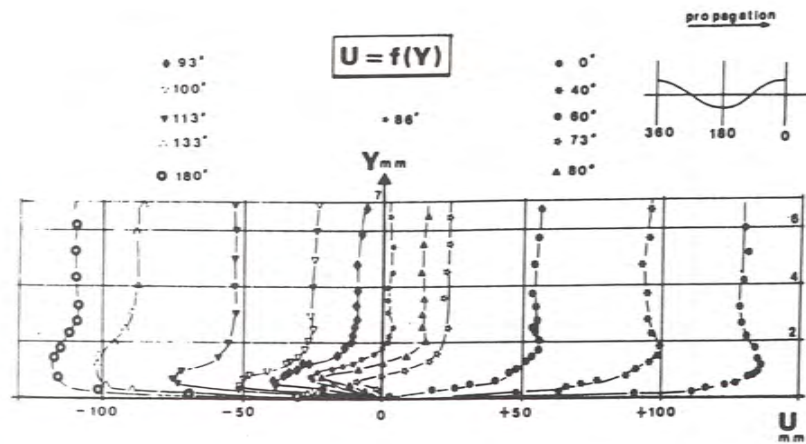
L'analyse des résultats en variables adimensionnelles met en évidence :

- la nature turbulente de la couche limite oscillatoire créée par la houle sur le fond,
- l'existence de trois couches : une sous couche de régénérescence, qui est le domaine privilégié des échanges (Sweeps et burst) entre la zone turbulente et la paroi; une couche intermédiaire dans laquelle le mouvement turbulent du fluide est régi par la paroi; une dernière couche correspondant au mouvement du fluide non visqueux.

---

\* Laboratoire de Mécanique des Fluides - U.E.R. Sciences et Techniques -  
Place R. Schuman - B.P. 4006 - 76077 Le Havre.





P.4

CARTE DES SEDIMENTS SUPERFICIELS DE LA BAIE DE SEINE.

LARSONNEUR C. \*.

La Baie de Seine est occupée par des dépôts à dominante sablo-graveleuse : sables litho-bioclastiques et bio-lithoclastiques graveleux ( $SL_2b$  et  $SB_1b$ ) principalement.

Ces derniers couvrent une large bande sur la rive gauche de l'ancienne vallée de la Seine entre la région de Saint-Vaast-La-Hougue et les rochers du Calvados. On trouve même localement des sables bioclastiques graveleux ( $SB_2b$ ), en l'occurrence phycogènes. Vers les extrémités de la baie, ces dépôts passent à des sédiments plus fins et un peu moins riches en calcaire, litho-bioclastiques voire lithoclastiques. On trouve successivement des sables fins ( $SB_1d$ ,  $SL_2d$ ,  $SL_1d$ ), des sablons ( $SL_2e$ ,  $SL_1e$ ) et des sablons vaseux ( $VL2a$ ,  $VL1a$ ) qui se localisent généralement à quelques mètres de profondeur (vers - 6 à - 7 m par rapport au 0 des cartes marines). Plus près de la côte le matériel redevient sablonneux puis sableux formant notamment les grandes plages du Calvados et de l'Est du Cotentin. Des dépôts fins, vaseux ( $VL1a$ ,  $VL2a$ ), apparaissent dans les zones de plus faibles énergies : extrémités de la baie, estuaires de la Seine, de l'Orne, et baie des Veys principalement. Des sédiments grossiers (cailloutis, graviers) couvrent de larges surfaces au large des caps d'Antifer et de Barfleur, ils constituent là une mince couverture sédimentaire laissant fréquemment affleurer le substrat rocheux. Dans son ensemble, la répartition des sédiments en Baie de Seine répond à des enchaînements progressifs allant des cailloutis lithoclastiques ( $CL1a$ ) aux sédiments vaseux litho ou litho-bioclastiques ( $VL1a$  ou  $VL2a$ ) en passant par des sables graveleux bio-lithoclastiques, voire bioclastiques ( $SB_1b$ ,  $SB_2b$ ), c'est-à-dire très coquilliers. Ce type de séquence traduit une contamination assez avancée du matériel terrigène par les bioclastes, s'exerçant principalement entre 1 et 3 mm. Les sédiments bio-lithoclastiques ( $SB_1b$ , et  $SB_1c$ ) que l'on rencontre au niveau des ridens de Barfleur ou d'Antifer passent au contraire sans transition aux cailloutis ou aux graviers sur lesquels ils reposent.

Cette distribution générale des dépôts, illustrée par une série de photographies sous-marines, est contrôlée par les courants de marée ; les houles n'exercent un rôle dominant que sur la fange côtière en dehors des couloirs estuariens.

---

VASLET D., LARSONNEUR C., AUFFRET J.P. (1979). Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000 et notice, B.R.G.M. éd.

---

\* Laboratoire de Géologie Marine, Université de Caen, 14 032 Caen Cedex.



P.5

DE LA BAIE DE SEINE AU NORD-COTENTIN : PALEOVALLEES ET BANCS SABLEUX.

ALDUC D., AUFFRET J.P. & LARSONNEUR C.\*.

L'interprétation d'enregistrements de sismique réflexion a permis de reconstituer l'ancien réseau hydrographique de la Seine entre Le Havre et le Nord-Cotentin et de déterminer l'épaisseur de la couverture de dépôts meubles. Cette dernière est généralement mince en dehors des paléovallées et des bancs sableux des extrémités de la baie de Seine.

#### 1 - L'ANCIEN RESEAU FLUVIATILE

Ce paléo-réseau est dominé par l'ancienne vallée de la Seine orientée SE - NW en direction du Nord-Cotentin où elle conflue avec des rivières venues de l'Est. Les affluents viennent surtout de la rive gauche avec la Touques, la Dives, l'Orne, la Seulles et la Vire.

L'auge entaillée par la paléo-Seine a une quinzaine de kilomètres de large pour une profondeur faible de 10 à 20 m. De la région havraise à celle de Barfleur la pente moyenne est de 0,4 ‰, pente largement supérieure à celle de la Seine actuelle (environ 0,03 ‰). Cette forte inclinaison du paléolit souligne la puissante énergie de l'ancien fleuve.

En baie de Seine, le remblaiement fluvial a une épaisseur moyenne de 10 à 15 m ; il est beaucoup plus important au Nord du Cotentin où il atteint 60 à 70 m, voire davantage au niveau des fosses. Dans la paléo-Seine, 2 nappes étagées ont été reconnues séparées par une dénivellation de 10 à 15 m.

La nature des alluvions est dans l'ensemble assez mal connue. Dans la région havraise où le remblaiement atteint une trentaine de mètres d'épaisseur on distingue une nappe de cailloutis de fond (5 à 15 m) recouverte de dépôts holocènes : silts tourbeux post-glaciaires (5 à 10 m), sédiments sablo-vaseux finement coquilliers flandriens (10 à 15 m). Les alluvions caillouteuses de base existent dans les basses vallées de la région et ont été traversées sur 10 à 12 m d'épaisseur par les sondages réalisés au Parfond, à l'extrémité du banc de Seine. Leur âge est rapporté au Pléni-glaciaire supérieur. La nappe supérieure est plus ancienne datant au moins du début du Würm.

\* Laboratoire de Géologie Marine, Université de Caen, 14 032 Caen Cedex.

## 2 - LES BANCS SABLEUX

Aux extrémités de la Baie de Seine des bancs sableux se détachent dans la morphologie sous-marine actuelle, il s'agit du banc de Seine à l'Est, des bancs de Saint-Marcouf et du Cardonnet à l'Ouest, ancrés sur les îles St Marcouf. Ce sont des bancs de sable fin, quartzeux, légèrement bioclastique (20 à 35 % de débris coquilliers), bien triés, dont la médiane varie entre 0,27 et 0,40 mm. Leur épaisseur est en moyenne d'une dizaine de mètres, atteignant 15 m au NW de St Marcouf ; une description détaillée en est donnée par Auffret et d'Ozouville (ce colloque). La présence de silts et de tourbes post-glaciaires à la base de ces corps sableux (sondages de l'extrémité du banc de Seine) prouve leur âge flandrien.

Aux marges septentrionales de la Baie de Seine, dans le prolongement des caps d'Antifer et de Barfleur se trouvent de grands ridens de sable grossier bioclastique (50 à 70 % de calcaire). L'épaisseur de ces dépôts est de 5 à 10 m, ils reposent sur des sédiments graveleux à caillouteux dans un environnement de haute énergie où la stabilité des accumulations sableuses est due à l'existence d'un piège hydraulique.

---

AUFFRET J.P., ALDUC D., LARSONNEUR C. et SMITH A.J. (1980).  
Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche orientale.  
Ann. Inst. Océan., N.S., t. 56, p. 21 - 35 et carte et notice  
éditées par B.R.G.M., 1982.



P.6

ETUDE DE LA REPARTITION DU FER ET DU MANGANESE DANS LES EAUX INTERSTITIELLES  
A L'EMBOUCHURE DE LA SEINE.

MARIN P.\*.

Le fer et plus encore le manganèse contenus dans la colonne sédimentaire et l'eau interstitielle ont été l'objet de nombreux travaux, ces dernières années surtout. Cela s'explique principalement par l'importance des phénomènes d'adsorption ou de coprécipitation de divers métaux avec les oxydes de fer et de manganèse (Jenne, 1968) mais aussi par la participation directe ou indirecte de ces deux éléments dans les activités métaboliques et biogéochimiques des organismes marins (Aller, 1980). Dans les environnements pré littoraux où les sédiments sont réduits dès les premiers centimètres, on peut s'interroger sur le comportement du fer et du manganèse à proximité de l'interface eau-sédiments. Ce problème est particulièrement intéressant dans le cadre de l'estuaire de la Seine où des rejets riches en fer sont effectués.

Au cours de deux saisons différentes (juillet 1984, novembre 1984), nous avons procédé au prélèvement en plongée de 4 carottes d'une dizaine de centimètres de long, dans deux environnements typiques de l'embouchure de la Seine. Immédiatement après le prélèvement, les carottes ont été découpées sous atmosphère inerte, en tranche de 0,5 à 1 m. Chaque échantillon a été soumis à une centrifugation afin de permettre le prélèvement du surnageant au moyen de seringues plastiques. Les eaux interstitielles ainsi recueillies ont été filtrées à 0,45  $\mu$ m puis stabilisées par HCl à pH 1.2. Elles ont fait l'objet d'une analyse en  $Fe^{++}$  et  $Mn^{++}$ . Parallèlement, les paramètres granulométriques ont été déterminés.

Les teneurs en  $Fe^{++}$  et  $Mn^{++}$  contenues dans les eaux interstitielles sont présentées pour chaque carotte sous forme d'un profil vertical. Les eaux riches en éléments dissous apparaissent comme une source en espèce dissoute pour le milieu susjacent. Deux mécanismes sont envisageables :

- d'une part, à partir d'une diffusion des éléments de la colonne d'eau interstitielle se crée, à l'interface eau-sédiment, un flux d'espèce dissoute (Evans, 1977 ; Sundby, 1981 ; Aller, 1980)
- d'autre part, à partir de la remise en suspension des sédiments au cours des cycles de marées, se produit un mélange des eaux interstitielles dans la colonne d'eau.

L'importance de ces deux mécanismes dans un milieu macrotidal comme l'estuaire de la Seine est discutée.

\* Laboratoire de Géologie Marine, Université de Caen, 14 032 Caen Cedex.

- 
- ALLER R.C. (1980). Diagenetic processes near the sediment-water interface of long island sound II. Fe and Mn. *Advances in geoph.* 22, 351 - 415.
  - BERNER (1980). Early diagenesis, a theoretical approach. Princeton series in geochemistry. Heinrich D Holland, Editor.
  - EVANS D.W., CUSTHALL N.H., CROSS F.A., and D.A. WOLFE (1977). Manganese cycling in the NewPort river estuary, North Carolina. *Estuar. and Coastal Mar. Sci.* 5, 71 - 80.
  - JENNE E.A. (1968). Controls of Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, concentrations in soils and water : the significant role of hydrous Mn and Fe oxides. In trace inorganics in water. *Advances in chemistry series*, 73, Am. Chem. Society New-York, 337 - 387.
  - LYNN and BONATTI (1965). Mobility of manganese in diagenesis of deep sea-sediments. *Mar. Geol.*, 3, 457 - 474.
  - SUNDBY B., SILVERBERG N. and CHESSELET R. (1981). Pathways of manganese in an open estuarine system. *Geoch. and Cosmoch. Acta*, 45, 293 - 307.



P.7

ADSORPTION DES METAUX PAR LES SABLES INTERTIDEAUX

MOCEK L. & VANDORPE B.\*

La silice présente dans les eaux littorales génère des dépôts amorphes sur les quartz détritiques en position intertidale. Fer, calcium, potassium et titane se retrouvent piégés au sein de cette matrice siliceuse néoformée, surtout dans les dépôts amorphes qui remplissent les cavités creusées à la périphérie des grains de quartz. Des observations en microsonde de Castaing montrent que Fe, Ca, K et Ti se succèdent de manière étagée dans ces remplissages, depuis le fond jusqu'à l'ouverture des cavités.

Une étude néphélométrique montre que l'attaque d'un sédiment par ultrasons progresse en trois phases bien marquées. Les dépôts amorphes sont extraits dès les toutes premières minutes d'attaque ; ils laissent alors une empreinte sur la paroi des cavités sous la forme de cations métalliques fortement liés au quartz et ordonnés en zones. On y retrouve la même succession Fe, Ca, K et Ti reproduite deux ou trois fois depuis le fond jusqu'à l'ouverture des cavités. Cet ordre Fe, Ca, K, Ti constitue la séquence géochimique élémentaire qui correspond à des précipitations sélectives et successives intervenues pendant une phase d'émersion, grâce à l'évaporation de l'eau résiduelle mouillant les grains. La répétition de cette séquence dans le dépôt amorphe et dans son empreinte montre que le remplissage des cavités s'effectue progressivement à l'occasion d'émersions successives.

---

\* Laboratoire de Chimie Minérale et Méthodologique Analytique -  
59655 Villeneuve d'Ascq.

P.8

BIOACCUMULATION DE QUELQUES ELEMENTS TRACES (Cd, Pb, Cu, Zn) EN MILIEUX ESTUARIEN ET NERITIQUE.

AMIARD J.C. et AMIARD-TRIQUET C.

Parmi les caractéristiques écologiques et biologiques susceptibles d'affecter la bioaccumulation, nous avons pris en considération le degré de pollution du milieu, les variations saisonnières, le niveau trophique des organismes et leur position dans l'échelle zoologique.

Deux sites, l'un estuarien (estuaire de la Loire), l'autre néritique (baie de Bourgneuf) se distinguent nettement par les concentrations métalliques dans les sédiments superficiel et anoxique. Pour le cadmium et le plomb, éléments non essentiels, la pollution du milieu estuarien détectée dans le compartiment sédimentaire se retrouve chez les organismes fouisseurs, Scrobiculaire et *Nereis*. Par contre, pour les éléments essentiels, aucune différence significative n'est observée pour le cuivre chez la Scrobiculaire et pour le zinc chez les deux espèces.

Les variations saisonnières des concentrations de Cd, Cu et Zn ont pu être particulièrement bien mises en évidence dans des populations contrôlées de moules et d'huîtres. Pour chaque espèce, les variations sont très similaires pour les trois métaux et sont corrélées négativement avec le poids des tissus mous. Par contre, les fluctuations ne sont pas synchrones chez les deux espèces, la maturité sexuelle (responsable en grande partie des fluctuations du poids) s'étendant sur une période plus courte chez l'Huître que chez la Moule.

---

\* Centre de dosage des éléments traces, Université de Nantes, U.E.R. des Sciences Pharmaceutiques, 1, rue Gaston Veil - 44035 Nantes Cédex.



Le niveau de concentration des métaux dans les organismes ne dépend pratiquement pas de leur niveau trophique mais plutôt de leurs caractéristiques zoologiques. C'est ainsi que l'on observe 1) une opposition Vertébrés - Invertébrés en ce qui concerne la bioaccumulation du cadmium et du plomb; 2) une accumulation préférentielle du cuivre chez les organismes ressortissant des embranchements des Mollusques et des Crustacés; 3) des teneurs en zinc assez similaires chez tous les organismes étudiés à l'exception très marquée des Néogastéropodes et de l'Huître *C. gigas*.

De ces diverses observations, il ressort que la bioaccumulation des éléments traces Cd, Pb, Cu et Zn dépend principalement de paramètres biologiques tels que le rôle métabolique des métaux, la maturité sexuelle, les caractéristiques d'un embranchement ou d'une classe zoologique voire même les caractéristiques spécifiques.

P.9

# REPARTITION DES CHAMPS DE LAMINAIRES EN BAIE DE SEINE.

COSSON J. & THOUIN F.\*

La carte des Laminaires a été obtenue en utilisant d'une part la photographie aérienne, soit en couleur naturelle, soit en infra-rouge, effectuée à une altitude de 900 à 1 200 m, et d'autre part les prospections sur l'estran lors des marées basses de vive eau ou la plongée pour l'étage infralittoral.

Les résultats montrent qu'il existe deux grands ensembles en baie de Seine :

1) Côtes du Calvados (de Luc/mer à la baie des Veys) : de très grands champs de Laminaires constitués par la seule espèce *L. digitata* (accompagnée parfois de *L. sacchirina*) s'étendent sur une bande parallèle à la côte et large de 2 à 2,5 km, à une profondeur de 0 à -4 m.

Les deux principaux ensembles sont localisés, l'un sur le plateau du Calvados et l'autre sur les roches de Grandcamp, séparés par une zone peu peuplée car très sableuse entre Arromanches et Vierville.

2) Côte orientale du Cotentin (de St-Vaast-La Hougue à Barfleur, y compris les îles St-Marcouf) : les populations, beaucoup moins étendues que dans la zone précédente, sont composées par deux espèces : *L. digitata* (accompagnée parfois par *L. sacchirina*) et *L. hyperborea*. Les champs de *L. digitata* constituent un cordon étroit situé entre + 1 m et - 1 m (localement jusqu'à - 3 à - 4 m). Par contre, *L. hyperborea* forme des populations importantes depuis le 0 des cartes marines jusqu'à -12 à - 13 m, sauf là où les fonds sont sableux (devant Tatihou par exemple, les algues ne descendent pas au-dessous de -5 à - 6 m). Les îles St-Marcouf constituent la limite de pénétration de cette espèce en baie de Seine.

Les mesures de densité et de biomasse conduisent aux chiffres suivants :

|                                       | RESERVES POTENTIELLES |                 |                      |           | STOCK EXPLOITABLE<br>PAR AN | QUANTITE D'ACIDE<br>ALGINIQUE |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------|
|                                       | CALVADOS              | COTENTIN<br>EST | RESTE DU<br>COTENTIN | TOTAL     |                             |                               |
| <i>L. digitata</i><br>(poids frais)   | 90 000 t              | 13 000 t        | 8 000 t              | 111 000 t | 30 000 t                    | 1 500 t                       |
| <i>L. hyperborea</i><br>(poids frais) | 0                     | 30 000 t        | 184 000 t            | 214 000 t | 35 000 t                    | 1 300 t                       |
| TOTAL                                 | 325 000 t             |                 |                      |           | 65 000 t                    | 2 800 t                       |

\* Laboratoire d'Algologie fondamentale et appliquée  
Université de Caen, 39, rue Desmouëux, 14000 Caen.



P.10

LES INCLUSIONS PIGMENTÉES DU SYSTÈME NERVEUX DE MOLLUSQUES INTERCOTIDEAUX (*Mytilus edulis* L. et *Crepidula fornicata* L.) DE LA BAIE DE SEINE : LEUR RÔLE DANS LA RÉSISTANCE AUX CONDITIONS DÉFAVORABLES DU MILIEU.

DAMERVAL M., CATANIA R., LUBET P. \*

Nous avons montré que les moules et les crépidules de différentes stations de la baie de Seine, polluées ou non polluées, présentaient des cycles biologiques superposables; elles possèdent donc une grande capacité d'adaptation aux conditions défavorables du milieu, en particulier à l'hypoxie. Nous avons étudié l'ultrastructure et la cytochimie du tissu nerveux qui est très sensible aux variations de concentration en oxygène.

Station non polluée (St Vaast, Barfleur). Les deux espèces possèdent dans les neurones et dans le tissu glial des inclusions pigmentaires, distinctes des granules de neurosécrétion et riches en lipides associés à des pigments caroténoïdiens ( $\alpha$  et  $\beta$  carotène, mytiloxanthine, canthaxanthine, astaxanthine et des xanthophylles complexes).

Stations polluées (port du Havre). Les mêmes inclusions s'observent, mais on note des formes de dégradation: corps multilamellaires, corps résiduels. L'étude biochimique révèle une augmentation significative des formes réduites de caroténoïdes.

Recherches expérimentales: deux séries expérimentales ont été réalisées en soumettant des animaux provenant de stations non polluées à une hypoxie progressive en milieu confiné. Dans tous les cas, il a été possible de reproduire fidèlement les images ultrastructurales et les données cytochimiques obtenues chez les animaux des stations polluées. La limite létale correspond à une proportion de 60 à 70% de formes dégradées. Enfin, une pollution par hydrocarbures, diminuant les échanges gazeux à l'interface eau-air conduit à des résultats similaires. La présence, chez la Crépidule, d'une catégorie spéciale de cellules gliales riches en caroténoïdes pourrait expliquer une résistance à l'hypoxie plus importante que celle observée chez la moule. Des hypothèses sont formulées quant au rôle de ces granulations.

\* Laboratoire de Zoologie et U.A. - 497 CNRS - Université de Caen.

Contrat CNEOX : 905 650 11 - Travail effectué dans le cadre de la Coopération Franco-Soviétique en océanologie.

P.11

ETUDE COMPARATIVE DE TROIS ESTUAIRES DE MANCHE : BAIE DES VEYS, ESTUAIRE DE LA SEINE, BAIE DE SOMME.

G.E.M.E.L.\*

Les chercheurs du GEMEL contribuent depuis plusieurs années à la connaissance des caractéristiques physiques et biologiques de trois estuaires de Manche centrale (baie des Veys, Seine) et orientale (baie de Somme). Leurs études concernent plus particulièrement les relations qui unissent macrofaune benthique endogée et sédiment.

La confrontation des résultats obtenus sur ces trois estuaires a permis de dégager certaines conclusions concernant :

- l'état coenotique de ces trois estuaires,
- l'évolution pluriannuelle de leurs biocoenoses,
- les conséquences des aménagements (endiguements, poldérisation),
- l'utilisation potentielle de ces milieux (aquaculture).

1. ETAT COENOTIQUE.

Les trois estuaires présentent des états coenotiques comparables avec une dissymétrie des biofaciès qui a son origine dans la dissymétrie de leurs conditions hydrodynamiques locales respectives.

L'application aux résultats de l'analyse factorielle des correspondances met clairement en évidence ce rôle primordial de l'hydrodynamisme local qui se traduit par l'influence prépondérante qu'exercent sur la répartition des peuplements benthiques des facteurs comme la teneur en particules fines et en matière organique du sédiment, le degré d'exposition ou les conditions de salinité.

Ces facteurs expliquent l'existence de faciès diversifiés et appauvris, tant dans le secteur marin qu'estuarien des trois sites.

Le facteur "qualité de l'eau" (salinité mais aussi teneur en polluants) ne joue un rôle déterminant sur le benthos que dans l'estuaire de la Seine; les faibles débits de la Vire et de la Somme minimisent l'influence de ce facteur et justifient ainsi l'appellation de baie réservée à ces deux estuaires (ainsi en baie des Veys, la salinité est toujours supérieure à 25 ‰).

2. EVOLUTION DES BIOCOENOSSES.

L'état coenotique de ces estuaires n'est pas figé mais en constante évolution.

- En baie des Veys, l'évolution des biocoenoses est suivie depuis dix ans; elle se traduit par la migration vers l'aval de certaines espèces (*Pygospio elegans*, *Abra tenuis*), la régression et le changement de rive d'autres espèces (*Macoma balthica*), enfin par l'installation d'espèces marines (*Lanice conchilega*, *Urothoe grimaldii*). Ces modifications des biocoenoses sont la conséquence directe de l'évolution sédimentologique liée à la poldérisation (§3).

- Dans l'estuaire de la Seine, l'évolution des biocoenoses est la conséquence des nombreux aménagements industriels et portuaires (§3 et communic. Desprez-Dupont).

- En baie de Somme, l'évolution "naturelle" des biocoenoses est liée à l'exhaussement général de la baie; comme dans l'estuaire de la Seine, on assiste à une migration vers l'aval des faciès, avec notamment une forte progression du schorre au détriment des biofaciès estuariens typiques (communauté à *Macoma*, faciès à *Nereis* et *Scrobicularia*).

\* Association : Groupe d'Etude des Milieux Estuariens et Littoraux - Faculté des Sciences, B.P. 67, 76130 Mont-Saint-Aignan.



Ces biocoenoses évoluent également de façon artificielle sous l'influence d'importants apports en nitrates et phosphates provenant du ressuyage des terrains agricoles. La principale conséquence est la prolifération des Polychètes, essentiellement aux dépens des Bivalves. Un exemple intéressant de cette explosion des Polychètes est fournie par le Spionidé *Pygospio elegans* dont les colonies erratiques constituent des banquettes qui accélèrent l'exhaussement de la baie, permettent l'implantation d'une plante pionnière (la Spartine) et contribuent à la disparition de biofaciès originaux tels les sables envasés à *Cerastoderma*.

### 3. ENSEIGNEMENTS DES AMENAGEMENTS.

Une évolution des biofaciès liée à des aménagements a pu être étudiée tant en baie des Veys (poldérisation) qu'en baie de Somme et dans l'estuaire de la Seine (endiguements).

- En baie des Veys, la poldérisation qui se poursuit actuellement provoque la suppression d'importantes surfaces de piégeage des particules fines en fond d'estuaire. L'envasement se trouve par conséquent reporté vers l'aval, plus particulièrement au niveau de la corne du chenal d'Isigny, secteur qui a connu en 10 ans (1970-1980) un exhaussement supérieur à 4 mètres! C'est dans ces faciès vaseux que s'est installée la communauté à *Macoma balthica* qui avait disparu du flanc ouest de la Baie à cause de l'induration du sédiment par le *Pygospio*.

- Dans l'estuaire de la Seine et la baie de la Somme, des digues submersibles ont été construites pour stabiliser les chenaux de navigation. Ces aménagements ont eu pour conséquences annexes de servir de support à la sédimentation et permettre l'extension des schorres, et de provoquer le comblement des anciens chenaux.

Dans l'estuaire de la Seine, la création récente de déversoirs a pour but de minimiser ces conséquences secondaires négatives des digues submersibles.

En modifiant les conditions hydrodynamiques locales, les aménagements réalisés ont une profonde répercussion sur les biofaciès voisins : modification des conditions de salinité, modification de la texture des sédiments, modification de l'équilibre des peuplements benthiques qui intègrent les variations de tous les paramètres du milieu, modification de la physiologie des espèces...

L'ampleur des conséquences biosédimentologiques de ce type d'aménagements confirme le rôle primordial des conditions hydrodynamiques locales dans la répartition des biofaciès estuariens (§1).

### 4. RECOMMANDATIONS AUX UTILISATEURS POTENTIELS DU MILIEU.

Ces études de base permettent aujourd'hui de mettre à la disposition des aménageurs et autres utilisateurs potentiels du milieu (notamment dans le domaine de l'aquaculture), une quantité de renseignements utiles en matière de :

- stabilité du milieu : en baie des Veys, l'application de l'analyse en composantes principales aux résultats du suivi saisonnier, permet de mettre en évidence, dans certains secteurs de la baie, l'existence de profondes perturbations des peuplements benthiques, liées à des conditions météorologiques exceptionnelles (tempêtes de nord-est).

- qualité du milieu : en Baie de la Somme et estuaire de la Seine, un indice de qualité biologique et un indice de charge de pollution ont permis de "noter" la qualité de ces deux estuaires. Il ressort de ces deux indices que la charge polluante de l'estuaire de la Seine est environ le double de celle de la Somme et que les teneurs en hydrocarbures et en phosphates sont problématiques dans les deux sites.

- productivité du milieu : les études de biomasses réalisées en baie des Veys et en baie de Somme ont permis de quantifier la productivité naturelle de ces estuaires et de la comparer à celle d'autres estuaires européens. Si les biomasses enregistrées en baie de Somme sont comparables à celles de la mer des Wadden ou de l'estuaire de la Gironde (25-30 g/m<sup>2</sup>/an), celles de la baie des Veys sont inférieures (10-28 g/m<sup>2</sup>/an); ces dernières valeurs restent cependant nettement supérieures à celles des peuplements subtidiaux (< 2 g/m<sup>2</sup>/an en Mer du Nord)

Etant donné l'intérêt croissant que suscitent les projets aquacoles en milieu estuarien (programmes IFREMER en baie de Somme) l'importance de cette recherche de base se fait plus évidente encore.

P. 12

DISTRIBUTION ET COMPOSITION DES PEUPELEMENTS MACROBENTHIQUES EN BAIE DE SEINE.

GENTIL F. \*

Dans le cadre de l'exploration biocénotique de la Manche (groupe d'études du benthos de la Manche: RCP378 et GRECO 19), l'analyse de plus de 300 dragages effectués dans toute la Baie de Seine permet de décrire la répartition et la composition faunistique de quatre unités majeures de peuplements macrobenthiques, en liaison avec un double gradient sédimentaire et hydrologique caractérisant cette baie. Ce sont depuis la Manche centrale jusqu'aux extrémités méridionales de la baie:

- .le peuplement des fonds grossiers à *Glycymeris glycymeris* - *Echinocyamus pusillus*,
- .le peuplement des sables moyens, propres, dunaires à *Ophelia borealis* - *Spisula ovalis*,
- .le peuplement des sables fins plus ou moins envasés à *Abra alba* - *Pectinaria koreni*,

.le peuplement des vases à *Macoma balthica* de l'estuaire de la Seine.

A l'intérieur du gradient général édapho-climatique de la Manche, la Baie de Seine subit globalement des influences nettement continentales en comparaison des conditions régnant dans la Manche occidentale; cet état se traduit notamment par un appauvrissement de la richesse spécifique dans chacun des peuplements comparé à son analogue en Manche occidentale. Les compositions faunistiques des peuplements reconnus présentent les affinités les plus fortes avec les peuplements de même type décrits de la Manche orientale.

---

\* Université P. & M. Curie et L.P. 4601-CNRS, Station Biologique, 29211 Roscoff.



P.13

DYNAMIQUE DE POPULATION ET CYCLE BIOLOGIQUE D'*ABRA ALBA* (BIVALVE) ET DE *PECTINARIA KORENI* (POLYCHETE) DU PEUPLEMENT DES SABLES FINS EN VASES DE LA BAIE DE SEINE ORIENTALE.

IRLINGER J.P.\*, QUINTINO V.\*\*\*, ELKAIM B.\*, GENTIL F.\*\*.

Le suivi de la dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés à *Abra alba* de la partie orientale de la Baie de Seine, a permis d'acquérir des données sur le cycle de vie et la dynamique de deux espèces principales de ce peuplement: *Abra alba* (Mollusque Bivalve) et *Pectinaria koreni* (Annélide Polychète).

Le matériel étudié provient de séries de prélèvements mensuels ou bimestriels effectués entre 1981 et 1984, en trois stations distinctes: deux situées devant l'embouchure de la Seine (une en limite estuarienne, l'autre en faciès envasé à 1 mille plus au large) et une située dans le port d'Antifer.

L'étude des effectifs et des biomasses, des histogrammes de fréquence de taille, et de l'état de maturité sexuelle permet de replacer les deux espèces par rapport aux données déjà connues en Manche et dans les mers européennes, en illustrant les caractéristiques de ce peuplement en Baie de Seine.

#### 1. population d'*Abra alba* :

L'espèce présente un cycle biologique à une génération par an formée par trois cohortes; la reproduction est étalée du printemps à l'automne, avec individualisation plus ou moins nette de trois périodes de ponte. Les recrutements sur tamis de 1mm., bien qu'étalés sur toute l'année, montrent trois périodes de fixation maximales dans les stations côtières. La croissance est rapide au printemps et en été, et les longueurs maximales et la longévité placent cette population entre les populations nordiques et méridionales.

#### 2. population de *Pectinaria koreni* :

Le cycle biologique est de type univoltin avec une longévité de 12 à 16 mois et une reproduction unique. La période principale de recrutement sur tamis de 1mm. est étalée de mai à juillet avec possibilité d'un deuxième recrutement autumnal réduit. Durant les premiers mois de vie benthique correspondant à la phase estivale de croissance maximale, on observe une mortalité importante; on a ainsi, en plus des variations notables du fait de la distribution spatiale des individus (surtout dans les stations côtières), une forte fluctuation des densités entre les juvéniles recrutés et les adultes reproducteurs.

Il semble exister également une différence entre les vitesses de croissance au niveau des stations étudiées; ceci provient vraisemblablement du régime alimentaire de type "dépositivore de sub-surface", caractéristique de cette espèce et mieux adapté aux sédiments très envasés des stations côtières.

\* Laboratoire d'Hydrobiologie, Université P. & M. Curie, 12 rue Cuvier, 75230 Paris Cédex.

\*\* Université P. & M. Curie et L.P. 4601-CNRS, Station Biologique, 29211 Roscoff.

P.14

PEUPLEMENTS BENTHIQUES A L'OUEST DE L'ESTUAIRE DE L'ORNE.

LE GALL P.\*.

La zone concernée correspond à une surface sur laquelle est établi un gradient sédimentaire passant des graviers et galets au large des Essarts, à des vases fines à proximité de l'embouchure de l'Orne (Larsonneur, 1971).

Cette zone littorale correspond aussi au contact de trois peuplements caractéristiques des fonds sédimentaires du large (Gentil, 1980), avec la frange côtière.

La connaissance de la répartition des peuplements sur cet ensemble constitue une base indispensable à toute analyse des phénomènes fondamentaux permettant d'approfondir nos connaissances dans le domaine littoral, particulièrement sensible aux perturbations de toute nature.

#### 1.- PEUPLEMENTS DES FONDS GROSSIERS

Les espèces *Glycymeris glycymeris* et *Echinocyamus pusillus* sont peu ou pas représentées dans le secteur prospecté.

Par contre, de nombreuses espèces caractéristiques, définissant ce peuplement, sont présentes dans toute la partie nord-ouest de la zone, au large de la pointe des Essarts. La répartition des jeunes est parfois plus large que celle des adultes, démontrant ainsi un potentiel de dispersion important pour certaines des espèces (ex. *Ebalia tuberosa*).

#### 2.- PEUPLEMENTS DES FONDS DE SABLES MOYENS A FINS.

Caractérisé par *Ophelia borealis*, ce peuplement se rencontre sur toutes les formations dunaires sableuses. Sa répartition dans la partie est du secteur prospecté correspond à une zone où les cordons sableux parallèles sont abondants (Auffret, Colloque Baie de Seine, 1985).

*Corymorpha nutans* et *Thyone fusus*, qui atteignent des densités de 650 individus au m<sup>2</sup>, reflètent des conditions de forts déplacements d'eau chargée en particules vaseuses.

#### 3.- PEUPLEMENTS DES FONDS DE SABLES FINS A TRES FINS, ENVASES.

Les espèces pilotes *Abra alba* et *Pectinaria koreni*, ainsi que de nombreuses espèces caractéristiques sont localisées vers la côte et à proximité de l'estuaire de l'Orne. Les densités les plus fortes sont situées vers l'estuaire. La répartition des juvéniles sur toute la zone (*Pectinaria*, *Owenia*) ou sur une bande parallèle à la côte (*Abra*), indique des voies d'échanges entre les masses d'eau de la région.

---

\* Laboratoire Maritime - 14530 Luc-Sur-Mer.



P.15

STRUCTURE ET EVOLUTION DES POPULATIONS DE *OWENIA FUSIFORMIS* EN BAIE DE SEINE.

LE GALL P.\*

Dans toute la partie orientale de la baie de Seine, *Owenia fusiformis* constitue une importante composante des peuplements à *Abra alba*, caractérisant les sables fins et très fins plus ou moins envasés.

Les stations de nos prélèvements sont situées soit au large (point A, face à l'estuaire de la Seine et secteur de Ouistreham), soit en zone côtière (plage du Home Varaville).

Le plus grand diamètre extérieur des tubes, mesuré sur du matériel formolé, a été utilisé comme paramètre représentatif de la taille des animaux, car il est étroitement corrélé aux diverses caractéristiques du ver lui-même (longueur, diamètre, poids, etc...).

L'analyse des histogrammes de fréquence des diamètres montre que leur répartition est bimodale, ce qui implique que les populations d'*Owenia*, en Baie de Seine orientale, sont constituées de deux cohortes distinctes.

L'évolution temporelle de ces cohortes permet de préciser le taux de croissance, la durée de vie, les périodes de recrutement, pour chacune des composantes des populations.

Dans les stations côtières, le diamètre extérieur moyen des tubes est de  $4,5^{+}0,5$  mm à la fin de la première année et de  $5,2 \pm 0,7$  mm à deux ans. Par contre, dans les stations du large, les diamètres moyens correspondants sont de 4 et de 4,8 mm. Le taux de croissance des animaux en zone côtière est supérieur à celui des populations du large.

Les *Owenia* de la baie de Seine vivent deux années. La maturation des cellules sexuelles ne se produit que durant la seconde année de vie, et les animaux se reproduisent une seule fois avant de disparaître.

Les périodes de ponte et les recrutements qui en résultent, se produisent en février-mars au niveau des populations côtières, alors qu'ils ne se produisent qu'en mai-juin pour les populations du large.

L'analyse comparative des compositions des populations de la côte et de celles du large, permet de mettre en évidence une composante côtière dans les prélèvements effectués au large. En mai 1984, 10% des individus de la population du point A sont du type côtier.

Ces constatations posent le problème fondamental de l'isolement de populations voisines, au sein d'un même système littoral, en relation avec les possibilités d'échanges entre les masses d'eaux différentes.

\* GRECO Manche, Laboratoire Maritime - 14530 Luc-Sur-Mer.

P.16

LES FORAMINIFERES BENTHIQUES DE LA BAIE DE SEINE.

ROSSET-MOULINIER M.\*

Les principaux résultats ont été présentés sous forme d'un poster qui illustre :

- 1) La répartition des Foraminifères en fonction de la profondeur. La majorité des variations faunistiques se produisent vers 20 à 30 m avec un maximum à 20 m. Cette limite pourrait marquer le passage de l'infra - au circalittoral.
- 2) La répartition des Foraminifères en fonction du sédiment. Un transect entre Brighton et la Baie des Veys montre l'importance des gradients sédimentologiques, qui se superposent au gradient bathymétrique. La nature du sédiment influe sur la répartition des espèces infralittorales qui sont plus abondantes dans les sablons et sables vaseux que dans les sables grossiers, à profondeur comparable.

3) La répartition des populations.

On distingue :

- La population à Nonion depressulum, dans la Baie des Veys et au Nord de l'estuaire de la Seine, intermédiaire avec les populations plus typiquement estuariennes.
- La population à Eggerella scabra et Elphidium excavatum, infralittorale, qui se trouve ici dans des sédiments sablo-graveleux à l'Est et au Sud de la Baie.
- La population à Deuterammia ochracea et Remaneica plicata, sur sables mobiles, en particulier ceux du Banc de Barfleur et du Banc de Seine.
- La population à Textularia truncata et Ammonia beccarii, sur sédiments grossiers, principalement à l'Ouest et au Nord de la Baie. Les espèces gravellicoles sont électives ou préférantes de cette population.

L'influence de la Seine se fait sentir dans l'Est de la Baie : absence de certaines espèces très répandues ailleurs (Cibicides lobatulus, Planorbulina mediterraneensis) bien que sédiment et profondeur leur conviennent.

Dès que l'on dépasse vers l'Est la Baie de Seine, la population à Textularia truncata s'appauvrit en espèces, à cause des températures hivernales trop basses dans la plupart des cas.

\* Ecole Normale Supérieure de Jeunes Filles. Laboratoire de Biologie-Géologie - 1, Rue Maurice Arnoux - 92120 Montrouge, France.





## COLLOQUE BAIE DE SEINE

24-25-26 AVRIL 1985

### PARTICIPANTS

ABARNOU Alain, IFREMER Brest  
AGOUMI Ali, E.D.F. Chatou  
AMIARD Jean-Claude, Univ. Nantes  
AMIARD-TRIQUET Claude, Univ. Nantes  
AMINOT Alain, IFREMER Brest  
AUFFRET Jean-Paul, Univ. Caen  
AVOINE Jacques, Univ. Caen  
BADELON Bernard, Le Normandy - Granville  
BARAILLER Lucien, SOGREAH Grenoble  
BARBIER Georges, IFREMER Paris  
BARON Yves, E.A.M.E.A. Cherbourg  
BASSOULET Philippe, IFREMER Brest  
BATREL Yves, Lab. Biologie Marine, Collège de France Concarneau  
BAUVOIS Françoise, Ag. Fin. de Bassin Seine-Normandie Nanterre  
BECK Christian, Univ. Lille I  
BELLAN Gérard, Station Marine d'Endoume, Univ. Marseille CNRS  
BELORGEY Michel, Univ. Le Havre  
BENARD Francis, Univ. Caen  
BENARD Josette, FFSPN - CREPAN Caen  
BENTLEY Daniel, INTM/CNAM Cherbourg  
BETENCOURT André, Sénateur Neuilly-sur-Seine  
BONNOT Chantal, Lab. Géomorphologie Littorale EPHE CNRS Dinard  
BOURGAIN Jean-Luc, Station Marine Univ. Lille I Wimereux  
BOUST Dominique, CEA La Hague  
BRAUD Georges, IUT Colmar  
BROCHE Pierre, LSEET Univ. Toulon  
CABIOCH Louis, Station Biologique CNRS Univ. P. & M. Curie Roscoff  
CACHELOU Josette, ANVAR Caen  
CASTAING Patrice, Univ. Bordeaux I  
CHABERT d'HIERES Gabriel, IMG Univ. Grenoble  
CHAMLEY Hervé, Univ. Lille I  
CHASSARD-BOUCHAUD Colette, Univ. P. & M. Curie Paris  
CHESSELET Roger, PIROCEAN CNRS Paris  
CLABAUT Philippe, Univ. Lille I  
CLET Martine, Centre de Géomorphologie CNRS Caen  
CLEMENT Jean-Claude, Affaires Maritimes Vannes  
COLLINS Michael, Univ. College Swansea  
COSSON Joël, Univ. Caen  
COTTET Jacky, Dir. Dé- Equipement du Calvados Caen  
CREVEL Laurent, Univ. Caen  
DAUGUET Simone, Conseil municipal Caen  
DAUVIN Jean-Claude, Station Biologique CNRS Univ. P. & M. Curie Roscoff  
DAVOULT Dominique, Station Marine Univ. Lille I. Wimereux



DESPEYROUX Yves, Univ. Lille I  
 DESPREZ Michel, GEMEL Pont-Audemer  
 DEVENON Jean-Luc, LSEET Univ. Toulon  
 DEWARUMEZ Jean-Marie, Station Marine Univ. Lille I Wimereux  
 DEWEZ Stéphane, Univ. Lille I  
 DIAZ-CASTANEDA Victoria, Station Marine Univ. Lille I Wimereux  
 DJENIDI Salim, Univ. Liège  
 DUCROTOY Jean-Paul, GEMEL Saint-Valéry-sur-Somme  
 DUJARDIN Jacques, Mairie Honfleur  
 DURANT Monique, Univ. Paris VII  
 DUPONT Jean-Paul, Univ. Rouen  
 DUPONT Willy, Préfecture de la Seine-Maritime  
 DUPRE Michel, Ministère de l'Environnement  
 ELKAIM Bernard, Univ. P. & M. Curie Paris  
 FICHT André, Serv. Marit. de la Seine-Maritime Rouen  
 FIGUET Maurice, Soc. Thann et Mulhouse Le Havre  
 FISCHER Jean-Claude, Univ. Lille I  
 FOUCHER Jean, Dir. Rég. Equipement de Basse-Normandie Caen  
 FREGER Geneviève, Port Autonome du Havre  
 GALICHON Pascal, ENTPE Paris  
 GANDON Rémy, CEA La Hague  
 GARNIER Arlette, CEA Fontenay-aux-Roses  
 GENDREAU Andrée, GRAPE Ranville  
 GENTIL Franck, Station Biologique Univ. P. & M. Curie CNRS Roscoff  
 GERMAIN Pierre, CEA La Hague  
 GLACON René, Station Marine Univ. Lille I Wimereux  
 GLASS Michel, TOAE PIREN CNRS Paris  
 GOULEAU Dominique, Univ. Nantes  
 GRESSENT Philippe, Secr. Perm. Prév. Poll. Indust. Baie de Seine Rouen  
 GUEGUENIAT Pierre, CEA La Hague  
 GUYADER Jean, Port Autonome du Havre  
 HAUVILLE Sylvain, Port Autonome de Rouen  
 HEITZ Charles, Lab. Chimie Nucléaire CNRS Strasbourg  
 HEMON Gilbert, CEA Saclay Gif-sur-Yvette  
 HINSCHBERGER Félix, Univ. Caen  
 IRLINGER Jean-Pierre, Univ. P. & M. Curie Paris  
 JOUANNEAU Jean-Marie, Univ. Bordeaux I  
 KHALANSKI Michel, EDF Chatou  
 LABEY Marie-Paule, CES Basse-Normandie Condé-sur-Noireau  
 LAFITE Robert, Univ. Rouen  
 LAFOND Louis-Robert, Univ. Paris-Sud Orsay  
 LALOU Claude, CFR-CNRS Gif-sur-Yvette  
 LAMBOY Michel, Univ. Rouen  
 LAMY Jean-Louis, CREO La Rochelle  
 LANG François, Lab. Maritime Muséum Nat. Histoire Naturelle Dinard  
 LARROUS Thierry, Dir. Dép. Equipement Calvados Caen  
 LARSONNEUR Claude, Univ. Caen  
 LATOUCHE Claude, Univ. Bordeaux I  
 LATTEUX Bernard, EDF Chatou  
 LE BAS Jacques, Univ. Le Havre  
 LE CALVEZ Jean-Charles, Lab. Maritime Muséum Nat. Histoire Naturelle Dinard  
 LEFEBVRE Dominique, Univ. Rouen  
 LE FEVRE Geneviève, IFREMER Brest  
 LE GAL Yves, Lab. Biologie Marine Collège de France Concarneau  
 LE GALL Pierre, Station Marine Univ. Caen Luc-sur-Mer  
 LE HIR Pierre, IFREMER Brest  
 LE PROVOST Christian, IMG Univ. Grenoble  
 LESOUF André, Ag. Fin. de Bassin Seine-Normandie Nanterre  
 LEVASSEUR Louis-Marie, Service Maritime Seine-Maritime Rouen  
 LOCKWOOD A.P.M., Univ. Southampton

LORGERE Jean-Claude, Station Biologique et Univ. P. & M. Curie Roscoff  
 LORILLU Jean, CES Basse-Normandie Port-en-Bessin  
 LUBET Pierre, Univ. Caen  
 LUOMA Samuel, Geological Survey Menlo Park Californie  
 MANOHA Christian, Dir. Dép. Equipement du Calvados Caen  
 MANOUJIAN Solange, LCHF Maison-Alfort  
 MARCHAND Jocelyne, Univ. Nantes  
 MARCHAND Michel, IFREMER Brest  
 MARIN Pascale, Univ. Caen  
 MARTIN Pierre, GEA Cherbourg  
 MASSON Michel, CEA La Hague  
 MAUVAIS Jean-Louis, IFREMER Brest  
 MEHU Daniel, Ag. Fin. de Bassin Caen  
 MERLIN Jean-Claude, Univ. Lille  
 MIGNIOT Claude, LCHF Maison-Alfort  
 MIRAMAND Pierre, INTM/CNAM Cherbourg  
 MOCEK Louis, Univ. Lille I  
 MOLLO Jean, Base littorale estuaire de l'Orne Sallenelles  
 MONNIOT Claude, Muséum Nat. Histoire Naturelle Paris  
 MORIN Jocelyne, Com. Local des Pêches St-Vaast-la-Hougue  
 NIHOUL Jacques, Univ. Liège  
 NOEL Pierre, Univ. P. & M. Curie Paris  
 OBATON Jean, Lab. Dép. et Rég. Biol. et Hyg. Caen  
 OURADOU-DESERCES Renée, Ministère de l'Environnement, Mathieu  
 PAREYN Claude, Univ. Caen  
 PERRIN Guillaume, Dir. Dép. Affaires Maritimes du Calvados Caen  
 POUPINET Pierre, Préfecture du Calvados  
 PRIMAUT Elisabeth, Direction de l'Equipement Rouen  
 PRONIEWSKI Frédéric, Lab. municipal Le Havre  
 PRYGIEL Jean, Station Marine Univ. Lille I Wimereux  
 QUISTHOUDT Chantal, Station Marine Univ. Lille I Wimereux  
 RAMBAUD Bruno, Port Autonome de Rouen  
 RENAN Jean-Noël, Conseil Régional de Basse-Normandie Caen  
 RETIERE Christian, Lab. Maritime Muséum Nat. Histoire Naturelle Dinard  
 RICHARD Alain, Station Maritime Univ. Lille I Wimereux  
 RINCE Brigitte, Dir. Dép. Equipement du Calvados Caen  
 ROMBAUT Jacques, Agence de Bassin Seine-Normandie Caen  
 ROSSET Marie, Ecole Normale Sup. Montrouge  
 SAFRAN Patrick, Station Marine Univ. Lille I Wimereux  
 SALOMON Jean-Claude, Centre Océanol. Univ. Marseille  
 SCHWARTZ-BENEZETH Sylvie, SOGREAH Grenoble  
 SIMON Serge, Dir. Rég. Affaires Maritimes Le Havre  
 SYLVAND Bernard, GEMEL Luc-sur-Mer  
 TEMPERVILLE André, I.M.G. Univ. Grenoble  
 TETARD Alain, IFREMER Ouistreham  
 THOMAS Yves, Ecole Normale Sup. Montrouge  
 TROUDE Pierre, E.P.B.S. Rouen  
 VANDORPE Bernard, Univ. Lille I  
 WALKER Patrice, Univ. Caen  
 WARTEL Michel, Univ. Lille I  
 WEBER Olivier, Univ. Bordeaux I



Reproduit par INSTAPRINT S.A.  
264-268, rue d'Entrailles - B.P. 5927 - 37059 TOURS CEDEX  
Tél. 47 38 16 04

Dépôt légal 3<sup>ème</sup> trimestre 1986

# STRUCTURES SEDIMENTAIRES

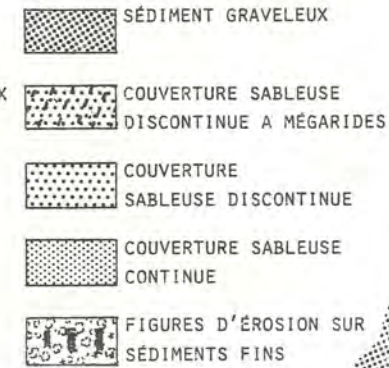
## TRANSVERSES



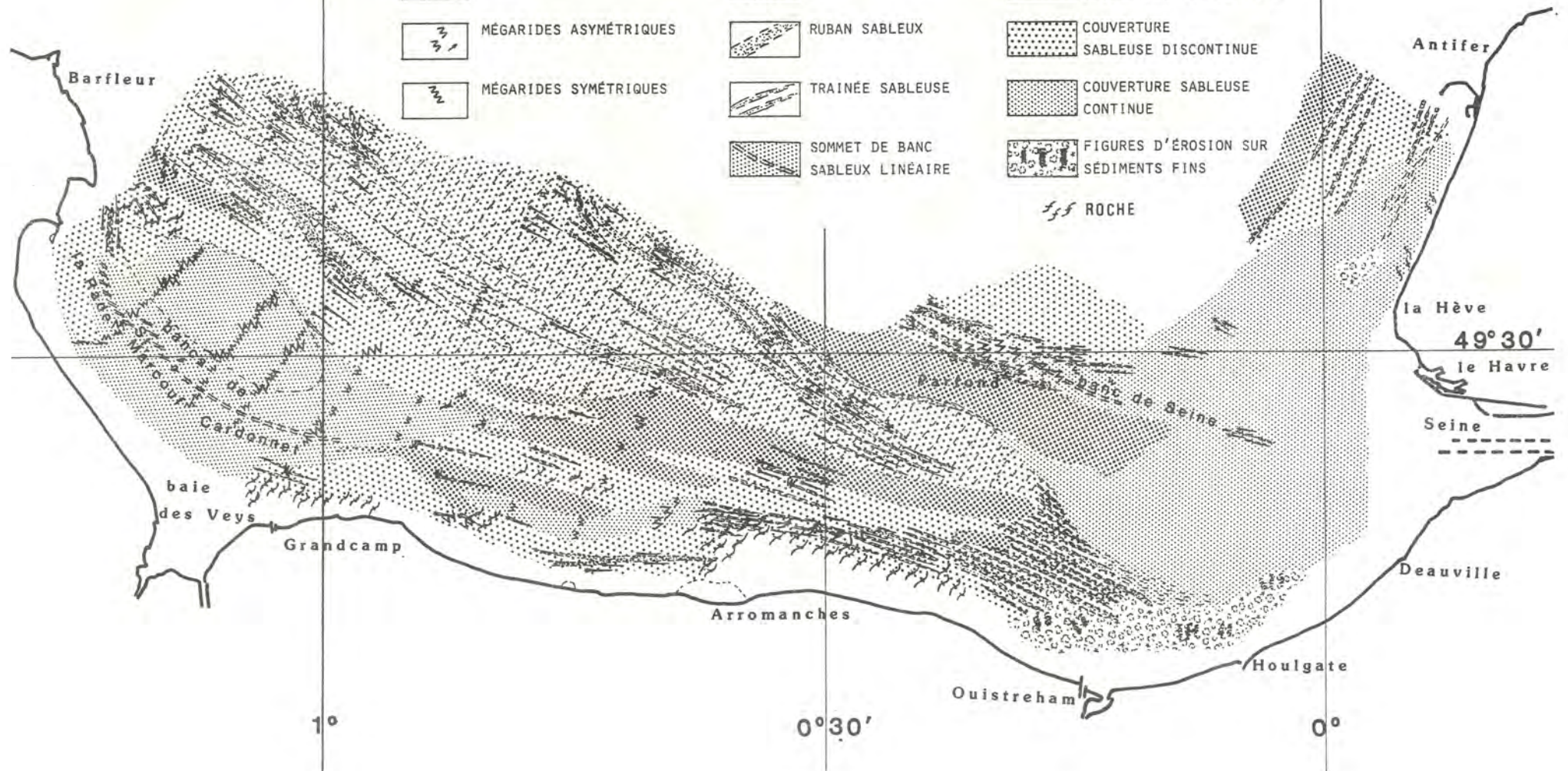
## LONGITUDINALES



# FACIES SEDIMENTAIRES



ROCHE





# ACTES DE COLLOQUES

|    |      |                                                                                                                                            |                                        |            |       |
|----|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------|-------|
| 1  | 1974 | <b>L'AQUACULTURE</b> _ . . . . .                                                                                                           | BREST, 22-24 octobre 1973              | 472 p.     | 200 F |
| 2  | 1974 | <b>OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE DE LA MER ROUGE</b> _ . . . . .                                                                                  | PARIS, 9-10 octobre 1972               | 472 p.     | 200 F |
| 4  | 1977 | <b>TROISIÈME RÉUNION DU C.I.E.M.</b> _ . . . . .                                                                                           | BREST, 10-13 mai 1977                  | 305 p.     | 250 F |
| 5  | 1978 | <b>UTILISATION POUR L'OCÉANOGRAPHE DES SATELLITES D'OBSERVATION DE LA TERRE</b><br>Journées Nationales d'Études _ . . . . .                | BREST, 6-8 février 1978 - CNES - CNEXO | 422 p.     | 290 F |
| 7  | 1979 | <b>ECOTRON - Mécanisme et contrôle de la production biologique marine - Système clos</b><br>artificiels, écosystèmes littoraux _ . . . . . | BREST, 3-6 juillet 1973                | 778 p.     | 320 F |
| 8  | 1979 | <b>LE THON ROUGE EN MÉDITERRANÉE, biologie, pêche, aquaculture</b> SETE, 9-12 mai 1979                                                     |                                        | 200 p.     | 100 F |
| 9  | 1979 | <b>LES COTES ATLANTIQUES DE L'EUROPE (U.G.I.)</b> _ . . . . .                                                                              | BREST, 15-16 mai 1979                  | 303 p.     | 150 F |
| 10 | 1980 | <b>PRODUCTION PRIMAIRE ET SECONDAIRE</b> _ . . . . .                                                                                       | SETE, 9-12 mai 1979                    | 202 p.     | 100 F |
| 11 | 1981 | <b>TENUE DES OUVRAGES EN BÉTON A LA MER (ARBEM)</b> . . . . .                                                                              | BREST, 8-10 octobre 1980               | pag. mult. | 100 F |
| 12 | 1981 | <b>AQUACULTURE EXTENSIVE ET REPEUPLEMENT</b> _ . . . . .                                                                                   | BREST, 29-31 mai 1979                  | 198 p.     | 120 F |
| 13 | 1982 | <b>DEUXIÈME COLLOQUE DE MICROBIOLOGIE MARINE</b> _ . . . . .                                                                               | MARSEILLE, juin 1971                   | 181 p.     | 50 F  |
| 14 | 1982 | <b>INDICES BIOCHIMIQUES ET MILIEUX MARINS, Journées du GABIM</b> _ . . . . .                                                               | BREST<br>18-20 novembre 1982           | 434 p.     | 90 F  |
| 15 | 1983 | <b>TENUE DES OUVRAGES EN BÉTON EN MER (ARBEM/IST)</b> . . . . .                                                                            | PARIS, octobre 1982                    | 557 p.     | 220 F |

## Nouvelle série : IFREMER

|   |      |                                                                      |                  |            |       |
|---|------|----------------------------------------------------------------------|------------------|------------|-------|
| 1 | 1985 | <b>BASES BIOLOGIQUES DE L'AQUACULTURE</b> _ . . . . .                | MONTPELLIER 1983 | 538 p.     | 150 F |
| 2 | 1985 | <b>MATÉRIAUX COMPOSITES ET TECHNOLOGIE NAVALE</b> _ . . . . .        | BREST, 1984      | 192 p.     | 150 F |
| 3 | 1986 | <b>2e COLLOQUE INTERNATIONAL DE BACTÉRIOLOGIE MARINE</b> _ . . . . . | BREST 1984       | à paraître |       |

## 4 1986 LA BAIE DE LA SEINE COLLOQUE NATIONAL DU CNRS \_ . . . . CAEN 1985

Les eaux de la Seine sont polluées par les effluents industriels urbains et agricoles : son bassin fluvial supporte en effet 20% des surfaces cultivées, 30% de la population et 40% des activités économiques de la France. Aux apports du fleuve s'ajoutent dans l'estuaire des rejets industriels directs. Enfin, divers polluants sont introduits en Baie de Seine par des dépôts de dragages portuaires, accumulés en mer à proximité de l'estuaire. L'ensemble de ces apports anthropiques aboutit dans une mer à fortes marées.

Une étude pluridisciplinaire de l'estuaire de la Seine et de la Baie de Seine a permis de mettre en évidence les principaux phénomènes physiques et sédimentologiques gouvernés par ce régime de marée et leurs conséquences en matière de dynamique des polluants et de fonctionnement d'un témoin biologique : les peuplement benthiques soumis à l'influence immédiate de l'estuaire.

La Baie de Seine est une des régions de France les plus aménagées et donc une des régions où les conflits sont les plus aigus entre les nécessités du développement industriel, de l'urbanisme, de la pêche et du tourisme. La connaissance scientifique du fonctionnement de l'estuaire et de la baie fournit un état de référence du site au début des années 1980 et apporte un certain nombre de réponses en matière d'importance relative des perturbations d'origine anthropique, compte tenu des particularités du régime de marée.

1 volume 16 x 24, broché, 532 pages

ISSN 0761-3962

PRIX : 300 F

Service de la Documentation  
et des Publications (S.D.P.)

**IFREMER - Centre de Brest**  
**B.P. 337 - 29273 BREST CEDEX**  
**Tél. : 98.22.40.13 - Téléc. : 940 627 F**



Siège social : 66, avenue d'Iéna - 75116  
Tél. 47.23.55.28