

La dynamique des masses d'eaux et des matières en suspension en Manche orientale

Manche
Suspensions
Diatomées
Antimoine 125
Fronts

English Channel
Suspended matter
Diatoms
Antimony 125
Fronts

Jean-Paul DUPONT ^{a*}, Robert LAFITE ^{a*}, Marie-Françoise HUAULT ^{a*},
Pierre-Alain DUPEUBLE ^{a*}, Jean-Michel BRYLINSKI ^{b*}, Pierre
GUEGUENIAT ^{c*}, Michel LAMBOY ^{a*}, Louis CABIOCH ^{d*}

^a Laboratoire de Géologie, Université de Rouen, B.P. 118, 76134 Mont-Saint-Aignan Cedex, France.

^b Station Marine, B.P. 80, 62930 Wimereux, France.

^c Laboratoire de Radioécologie Marine, Commissariat à l'Énergie Atomique, La Hague, B.P. 270, 50107 Cherbourg, France.

^d Station de Biologie Marine, B.P. 74, 29282 Roscoff Cedex, France.

* Groupe de Recherche Manche, C.N.R.S.

RÉSUMÉ

La structuration entre les eaux côtières et les eaux du large, dans un système macrotidal tel que celui des côtes françaises de Manche orientale, est mise en évidence par l'exploitation de profils longitudinaux et verticaux de salinité, température, turbidité et fluorimétrie. L'étude des matières en suspension, des marqueurs dissous (¹²⁵Sb) et particulaires (notamment les cortèges de diatomées) souligne cette organisation côte-large.

Les cycles tidaux semi-diurnes et semi-lunaires influent sur l'existence et l'évolution de structures frontales longeant des littoraux avec ou sans débouché estuarien. Les conséquences hydrodynamiques en matière de transferts particulaires sont présentées.

Oceanologica Acta, 1991. Actes du Colloque International sur l'environnement des mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990, vol. sp. n° 11, 177-186.

ABSTRACT

Water masses and suspended matter dynamics in the Eastern Channel

The structuration between nearshore and offshore waters along the macrotidal French Eastern Channel coast is demonstrated by longitudinal and vertical continuous recordings of salinity, temperature, turbidity and fluorimetry. The distribution of suspended particulate matter, one dissolved marker (¹²⁵Sb) and particulate markers (such as diatoms) indicates the variability of the waters from coast to open sea.

Semidiurnal and semilunar tidal cycles induce the birth and the evolution of frontal structures along shore-lines with or without estuaries. The hydrodynamic consequences for suspended matter fluxes are presented.

Oceanologica Acta, 1991. Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas, Lille, 20-22 March, 1990, vol. sp. n° 11, 177-186.

INTRODUCTION

Les modèles mathématiques bidimensionnels des courants de marée et des courants résiduels en Manche (Salomon et Breton, 1990) permettent la prédiction à long terme des déplacements des masses d'eaux en fonction des conditions météorologiques. Ces modèles mettent en évidence l'existence d'un flux principal qualifié de «fleuve central» (Salomon et Breton, 1990), alimenté par l'entrée d'eau de l'Atlantique par l'Ouest et de mouvements tourbillonnaires plus ou moins marqués dans les secteurs latéraux des zones côtières françaises de Manche orientale.

Brylinski et Lagadeuc (1990) ont montré l'existence de structures frontales subparallèles à la côte dans le secteur du Pas-de-Calais. Ces discontinuités se traduisent dans la distribution du matériel particulaire en suspension, vivant, minéral ou biodétritique.

La réalisation de profils physico-chimiques horizontaux et verticaux dans l'ensemble du domaine de la Manche orientale des côtes françaises de régime macrotidal à hypertidal et la caractérisation des matières en suspension (MES) associées aux différentes masses d'eaux, ont pour but de rechercher la réalité physique *in situ* des circulations mises en évidence par les modèles bidimensionnels. L'influence de la dynamique tidale (Brylinski et Lagadeuc, 1990) sur la structuration entre les masses d'eaux côtières et les eaux du large ainsi que sur la distribution du matériel particulaire en Manche orientale, a été démontrée sur des radiales côte-large (Brylinski *et al.*, 1984 ; Dupont *et al.*, 1990 ; Brylinski *et al.*, 1990); le recoupement de l'ensemble des données recueillies à mésoéchelle permet de proposer des schémas de circulation des masses d'eaux et des flux particuliers.

MÉTHODOLOGIE

Enregistrements *in situ* et stratégie d'échantillonnage

La structuration des masses d'eaux depuis la côte vers le large a été abordée par les mesures salinité-température réalisées au cours de plusieurs campagnes :

- *Hydrocôte 86 et 87* comprennent des profils verticaux d'échantillonnage échelonnés le long de radiales côte-large, réalisées au flot et au jusant, en morte-eau et en vive-eau, et réparties depuis l'estuaire de la Seine jusqu'en baie de Somme ;

- *Explocôte*, réalisée en avril 1988, comprend l'enregistrement en continu de la température et de la salinité des eaux de surface dans la bande côtière des dix milles, depuis l'estuaire de la Seine jusqu'au Pas-de-Calais ;

- *Hydrocôte 88* comprend des radiales côte-large, de Fécamp à Boulogne, réalisées lors des pleines mers et basses mers de morte-eau et vive-eau, avec échantillonnage et enregistrement, en continu, de salinité-température-turbidité des eaux de surface et avec des profils verticaux salinité-température ;

- *Huxleyi*, réalisée fin avril 1988, comprend de grandes radiales trans-Manche d'échantillonnage et d'enregistrement, en continu, de salinité-température-turbidité-fluorimétrie des eaux de surface. Cette campagne permet de replacer les données précédentes dans le contexte des circulations des masses d'eaux à mésoéchelle.

Méthodes d'analyse des échantillons

Lors des campagnes *Hydrocôte 86* et *Hydrocôte 87*, les échantillons ont été prélevés au moyen de bouteilles Niskin. Au cours des campagnes *Explocôte*, *Hydrocôte 88* et *Huxleyi*, l'échantillonnage de surface a été réalisé par pompage à 1,5 m de profondeur pour obtenir un meilleur recalage avec les enregistrements, en continu, de salinité-température (sonde Seabird) et de turbidité (turbidimètre Hach)-fluorimétrie (fluorimètre Turner) le long des profils longitudinaux. Les prélèvements en profondeur ont alors été réalisés avec des bouteilles Niskin et recalés sur des profils verticaux de salinité-température (sonde CTD Guildline).

Paramètres généraux des M.E.S.

La quantification pondérale des M.E.S. a été réalisée sur filtres en ester de cellulose de 0,45 μm de diamètre des pores. Elle a été complétée par des mesures de turbidité (exprimées en NTU, avec un turbidimètre Hach) et de fluorimétrie (fluorimètre Turner avec filtres spécifiques pour mesure de chlorophylle *a*). Les fluctuations de concentration de la chlorophylle *a* permettent d'apprécier les variations de la biomasse phytoplanktonique.

Caractérisation des M.E.S.

Les analyses granulométriques ont été réalisées au moyen d'un compteur de particules type Coulter pour les échantillons recueillis lors des campagnes *Hydrocôte 86-87-88*. La nature des fractions particulières ainsi définies est déterminée par observation au microscope électronique à balayage (MEB) de filtrats séchés et métallisés. Ces observations ont été généralisées sur les échantillons de toutes les campagnes.

Identification et quantification du cortège de diatomées

Les diatomées sont isolées par filtration d'un volume calibré sur membrane en polycarbonates de 0,8 μm de diamètre des pores. Après plusieurs essais dans différents milieux de montage, la transparence des filtres a été réalisée dans le Naphrax à chaud. Ce produit possède un indice de réfraction élevé, facilitant l'observation au microscope optique. La transparence n'étant pas parfaite, les déterminations spécifiques n'ont pas pu être réalisées pour tous les taxons.

Les comptages spécifiques sont effectués sur l'ensemble du filtrat, et peuvent donc être exprimés en concentrations ou en pourcentages de l'ensemble de la population dénombrée. Compte tenu des problèmes de variabilité et de diversité spécifique, nous avons procédé à des

regroupements de cortèges d'espèces d'affinité écologique équivalente, réalisés en fonction des données bibliographiques (Aleem, 1950 ; Cupp, 1943 ; Germain, 1981 ; Hendey, 1964 ; Hustedt, 1957 ; Patrick et Reimer, 1966 et 1975 ; Ricard, 1987 ; Round, 1971 ; Simonsen, 1962 ; Van der Werff et Huls, 1957). Nous avons ainsi retenu la classification suivante :

- espèces planctoniques marines (1),
- espèces planctoniques marines facultatives (2), qui, comme *Paralia sulcata*, sont des espèces benthiques souvent retrouvées dans la fraction particulaire en suspension,
- espèces planctoniques d'eaux douces et saumâtres (3),
- espèces benthiques marines subtidales (4),
- espèces benthiques représentatives du domaine intertidal (5),
- espèces benthiques du domaine marin à saumâtre (6),
- espèces benthiques d'eaux douces à saumâtres (7).

Notre objectif étant l'utilisation du cortège de diatomées en tant que marqueur de la circulation des particules en

suspension et des échanges particulières entre masses d'eaux, la différenciation de la fraction vivante par rapport à la fraction morte n'a pas été réalisée.

Quantification des concentrations en ^{125}Sb

Le ^{125}Sb a une période de 2,76 ans. Il est présent dans les rejets liquides de l'émissaire en mer de l'usine atomique de La Hague. Compte tenu de sa période, l'analyse de ^{125}Sb dissous (Guéguéniat, 1986), dans le cadre de la campagne *Huxleyi*, fournit un marqueur isotopique des masses d'eaux que l'on peut suivre, à mésoéchelle, dans l'ensemble du secteur Manche orientale.

RÉSULTATS

Organisation des masses d'eaux à mésoéchelle

Les résultats recueillis lors de la campagne *Huxleyi*, réalisée en morte-eau par vent de secteur Nord-Est de 4 à 5

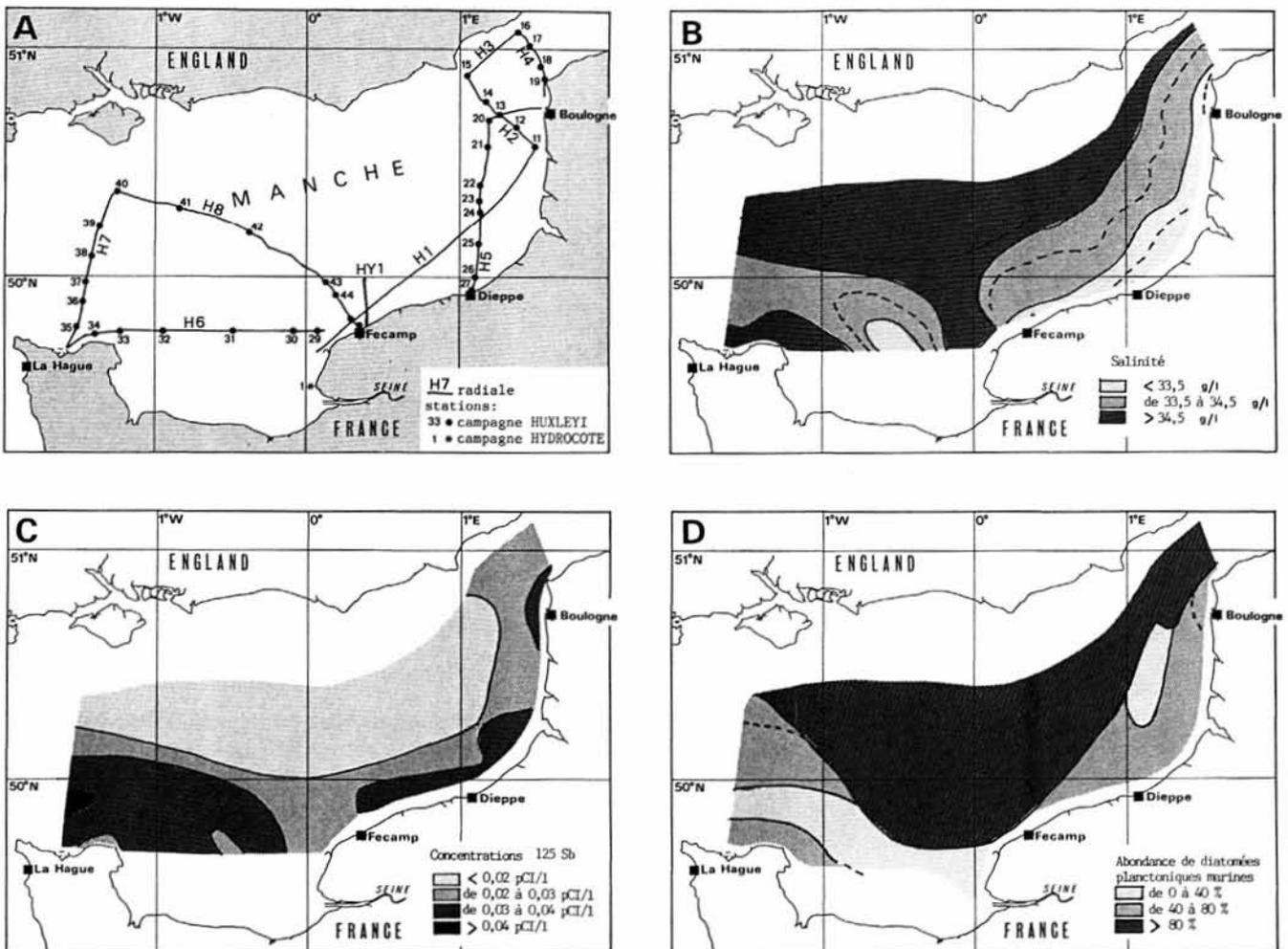


Figure 1

Répartition des marqueurs dissous et particuliers à mésoéchelle en Manche orientale lors de la campagne Huxleyi.

Dissolved and particulate markers distribution in the Eastern Channel on mesoscale during Huxleyi cruise.

noeuds, ont été reportés cartographiquement. Compte tenu du temps mis pour parcourir les radiales (fig. 1A), les cartographies des paramètres mesurés n'ont pas de signification instantanée et ne peuvent pas rendre compte des fluctuations tidales. La confrontation des cartes de distribution de salinité, de concentration en ^{125}Sb et des cortèges de diatomées (fig. 1B, 1C, 1D), permet de mettre en évidence des convergences entre la circulation des phases dissoutes et particulières, mais aussi des divergences liées aux processus spécifiques des transports particuliers en suspension.

Distribution des salinités (fig. 1B)

Les salinités les plus élevées, supérieures à 34,5 g/l, se rencontrent au large et caractérisent les eaux d'origine atlantique, conformément au modèle dynamique de Salomon et Breton (1990). Dans la partie orientale, la frange côtière est marquée par des eaux de salinité plus faible dont la dessalure est maximale dans le secteur Dieppe-baie de Somme (apports d'eaux douces continentales).

Les radiales H6 et H7 (fig. 1A), réalisées au jusant, montrent une vaste lentille de dessalure (fig. 1B), alimentée par les eaux douces provenant de l'estuaire et de la baie de Seine. Cette lentille peut être discontinue, mais l'importance et le sens d'écoulement général de ces eaux sont liés aux conditions hydrodynamiques de la campagne : période de fin de crue de la Seine avec persistance des vents de secteur NE qui favorise la migration vers l'Ouest des lentilles superficielles d'eaux dessalées.

Distribution de ^{125}Sb (fig. 1C)

La pénétration des eaux atlantiques, décrite dans le paragraphe précédent, isole les eaux côtières françaises. L'injection de ^{125}Sb dans le milieu marin, à partir de l'usine atomique de La Hague fournit un marquage de ces eaux côtières françaises de Manche orientale. Nous observons en effet un gradient décroissant de concentration de ^{125}Sb depuis les zones côtières vers le large, notamment dans la partie orientale de la zone étudiée. Cette distribution correspond au gradient de dilution des eaux côtières par les eaux atlantiques.

Dans la partie occidentale de la zone étudiée, les eaux dessalées provenant de l'estuaire et de la baie de Seine (cf. fig. 1B) présentent des concentrations supérieures à 0,04 pCi/l, ce qui est en accord avec le gradient précédemment décrit, mais la partie axiale de salinité plus faible est le siège d'une diminution localisée de concentration en ^{125}Sb , qui témoigne de l'influence de la crue de Seine, fournissant des eaux continentales non marquées (eaux n'ayant pas résidé un temps suffisamment long en domaine estuarien pour acquérir l'empreinte des eaux côtières).

Caractérisation des cortèges de diatomées en suspension (fig. 1D)

Conformément aux données de salinité, les eaux du large sont caractérisées par la dominance des diatomées

planctoniques marines. Il faut toutefois souligner que le caractère planctonique marin des associations de diatomées pénètre plus profondément la frange côtière dans les secteurs d'Antifer-Fécamp et du Pas-de-Calais. Le caractère planctonique marin dominant enregistré le long de la radiale H8 aboutissant à Fécamp témoigne de la pénétration jusqu'à la côte, au flot, des particules des eaux du large d'affinité atlantique. Ce résultat y est confirmé par les faibles concentrations en ^{125}Sb .

Entre Fécamp et Boulogne, les eaux côtières présentent une diminution du taux de diatomées planctoniques marines. Cette diminution est compensée par une forte augmentation des teneurs en diatomées benthiques marines (groupes 2 et 4). Dans le secteur oriental, les associations floristiques enregistrées dans le cadre de la radiale H5 présentent une nette diminution de la contribution planctonique, non conforme aux données de salinité et de concentration en ^{125}Sb . La signification de cet accroissement de la microflore benthique est discutée ultérieurement. En revanche, la lentille de dessalure provenant de la baie de Seine enregistre un accroissement des diatomées benthiques marines (groupe 4) et benthiques du domaine intertidal (groupe 5).

Structuration des masses d'eaux et de leurs charges particulières à l'échelle d'une radiale côte-large

L'étude des paramètres mesurés sur le profil longitudinal des eaux de surface de la radiale H5 (fig. 2) permet l'analyse des processus hydrosédimentaires de transport du matériel particulaire en suspension.

Profil bathymétrique

La radiale H5 recoupe les couloirs hydrodynamiques des courants de marée séparés par des corps sédimentaires: Ridens situés au Nord, prolongements des bancs de la Bassurelle, du Vergoyer et de la Bassure de Baas, ainsi que des Ridens de Dieppe et de Belleville à l'approche de Dieppe.

Profil de salinité

Le gradient décroissant de salinité, depuis le large vers la côte, est discontinu. Conformément aux observations dans le secteur de Boulogne (Brylinski et Lagadeuc, 1990 ; Brylinski *et al.*, 1990) et à celles dans le secteur de Dieppe (Dupont *et al.*, 1990), ces gradients forts, qui sont au nombre de quatre dans cette radiale H5, correspondent à des structures frontales. Dans les conditions de morte-eau, ces discontinuités sont le siège d'une stratification des masses d'eaux favorisant les échanges particuliers (Dupont *et al.*, 1990).

Profil de turbidité

Le profil de turbidité des eaux de surface est très irrégulier et témoigne d'une hétérogénéité de la distribution de la charge particulaire dans les masses d'eaux. Le gradient croissant à la côte correspond au panache turbide littoral. La zone turbide au large, située dans le secteur allant du banc du Vergoyer

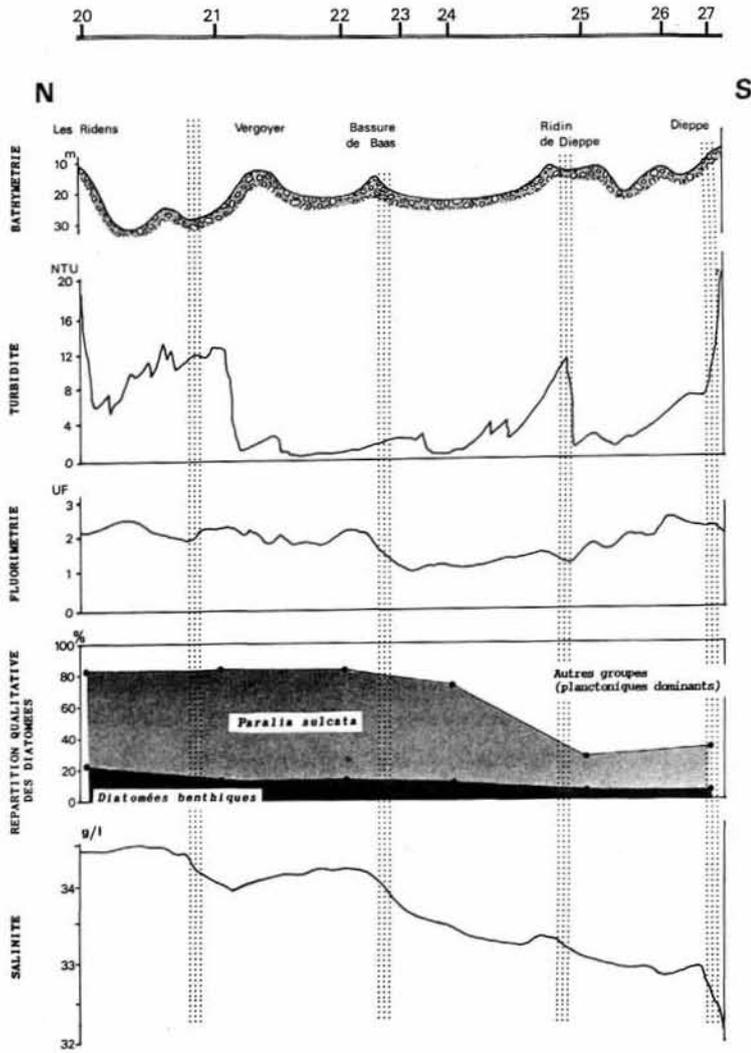


Figure 2

Évolution des paramètres physico-chimiques et particulaires dans les eaux de surface d'une radiale côte-large en Manche orientale.

Physico-chemical and particulate parameter evolution in surface waters from coast to open sea in the Eastern Channel.

aux Ridens, est superposable à la zone des plus forts courants de marée. Le pic très marqué observé au niveau des Ridens de Dieppe est associé à la frange externe de la structure frontale 33-33,5 g/l. La morphologie dissymétrique de ce pic de turbidité laisse supposer que la structure frontale joue le rôle d'une barrière hydrodynamique pour le flux turbide se déplaçant du large vers la côte. Le pic peu marqué, localisé au niveau de la Bassure de Baas, s'inscrit au Sud de la structure frontale 33,5-34 g/l.

Profil de concentration de la chlorophylle a en fluorimétrie

Le profil, très irrégulier, témoigne d'un développement discontinu, dans l'espace, de la production phytoplanctonique. Nous observons toutefois :

- une zone de concentration maximale associée aux eaux du large au-delà de la structure frontale 33,5-34 g/l de la Bassure de Baas ;

- un accroissement de concentration dans les eaux côtières comprises entre les Ridens de Dieppe et la côte, qui s'interrompt au niveau de la frange turbide littorale, siège d'un brassage plus important avec les eaux douces continentales ;

- une zone de concentration minimale dans le secteur de transition entre eaux côtières et eaux du large localisé entre les structures frontales 33-33,5 g/l et 33,5-34 g/l.

Distribution des associations de diatomées

Les prélèvements effectués sur la radiale H5 (fig. 2) montrent une concentration en diatomées qui peut aller de 2 000 valves/l à la station 20 au large de Boulogne, à plus de 50 000 valves/l à la station 27, à proximité du port de Dieppe.

L'étude écologique des cortèges révèle que les diatomées planctoniques sont plus abondantes à la côte et appartiennent aux genres *Rhizosolenia*, *Thalassiosira*, *Chaetoceros* et *Coscinodiscus* ; il s'y ajoute parfois *Thalassionema nitzschioides* et *Actinopterychus* spp. Ce cortège planctonique devient nettement minoritaire au large. Le ratio planctoniques/benthiques s'inverse donc de la côte vers le large au profit des diatomées benthiques.

Les diatomées benthiques atteignent près de 85 % des populations dénombrées aux stations 20, 21 et 22, situées au large dans la zone de concentration maximale de chlorophylle *a*. Ce cortège d'espèces benthiques est dominé par *Paralia sulcata*, qui représente à elle seule plus de 60 % de la population totale pour les stations 20, 21, 22 et 24. *Paralia sulcata* est une diatomée centrique polyhalobe, euryhaline (Simonsen, 1962), qui se retrouve assez fréquemment dans le plancton du domaine néritique après les tempêtes (Hendey, 1964). Sa période d'abondance maximale s'étend de septembre à décembre (Gros et Ryckaert, 1983). Sa morphologie favorise sa remise en suspension.

Les autres diatomées benthiques rencontrées sont : *Rhaphoneis ampiceros*, *Rhaphoneis surirella*, *Nitzschia panduriformis f. minor*, *Cocconeis scutellum*, *Pleurosigma* sp., *Diploneis* spp., *Trachyneis aspera*, *Navicula digitoradiata*, *Navicula* spp., *Cymbella* sp., *Amphora ovalis* et *Gomphonema* sp. *Cocconeis scutellum*, *Rhaphoneis ampiceros* et *Rhaphoneis surirella* sont des diatomées polyhalobes euryhalines (Simonsen, 1962). *Cocconeis scutellum* préfère les eaux peu profondes, entre 0 et - 15 m (Lortie, 1974), et sa zone de distribution maximale se situe entre les basses mers de morte-eau et de vive-eau (Aleem, 1950). *Rhaphoneis ampiceros* et *Rhaphoneis surirella* sont des diatomées pseudamphotrophes (Van der Werff et Huls, 1957 ; 1974), c'est-à-dire qu'elles peuvent supporter une exondation temporaire. Elles sont fréquemment signalées dans la zone intertidale (Denys *et al.*, 1983) où elles vivent fixées sur les grains de sable (Round, 1971) ; nous les trouvons

également au large, fixées sur des grains de quartz ou des bioclastes (fig. 6). *Nitzschia panduriformis f. minor* est une diatomée marine euryhaline très commune dans la Manche (Hendey, 1964).

La présence, et surtout l'abondance de ces diatomées benthiques dans les eaux de surface du large de cette radiale, témoignent d'une remise en suspension soulignée par une turbidité accrue dans le secteur correspondant. Ce mécanisme local de remise en suspension est lié aux forts courants de marée et à la présence de dunes hydrauliques sous-marines (bancs et ridens).

FLUCTUATIONS TIDALES DE LA STRUCTURATION DES MASSES D'EAUX DANS LE SECTEUR DE FÉCAMP

Les profils longitudinaux côte-large de salinité et température réalisés dans le secteur de Fécamp montrent, systématiquement, la présence de paliers subparallèles à la côte (Brylinski *et al.*, 1990) séparés par des gradients qui se renforcent lors des maxima des courants de flot et de jusant.

Structuration des masses d'eaux en vive-eau

L'enregistrement des profils verticaux de salinité-température révèle l'absence de stratification des masses d'eaux, y compris aux maxima de flot et de jusant. La

représentation bidimensionnelle de la radiale côte-large réalisée en fin de flot de vive-eau présente des isohalines subverticales (fig. 3). L'analyse granulométrique et qualitative du matériel en suspension dans les prélèvements de surface met en évidence une nette différenciation des contenus particulaires à la côte et au large.

Dans les eaux côtières, le spectre plurimodal des tailles des particules en suspension exprimées en concentrations volumiques est dominé par un matériel fin (< 10 µm), essentiellement minéral, riche en coccolithes de la craie et comprenant également des diatomées planctoniques isolées ; les classes de taille > 10 µm sont peu développées et constituées de matériel minéral, d'agrégats organominéraux (d'un diamètre équivalent sphérique de 18 à 27 µm) et de diatomées planctoniques isolées. A l'inverse, dans les eaux du large, le spectre granulométrique des particules en suspension est dominé par l'abondance de la fraction supérieure à 10 µm, constituée essentiellement de chaînes de cellules phytoplanctoniques.

L'étude quantitative du cortège de diatomées souligne cette opposition entre eaux côtières et eaux du large. Au large, nous observons une population abondante (18 160 valves/l), peu diversifiée (9 taxons), exclusivement marine, de diatomées planctoniques et benthiques. La fraction strictement planctonique (7 taxons) est très largement dominante (96,7 %), et principalement représentée par *Rhizosolenia imbricata var. shrubsolei* et *Chaetoceros* sp. qui constituent à elles seules 87 % du total dénombré. La fraction benthique est uniquement

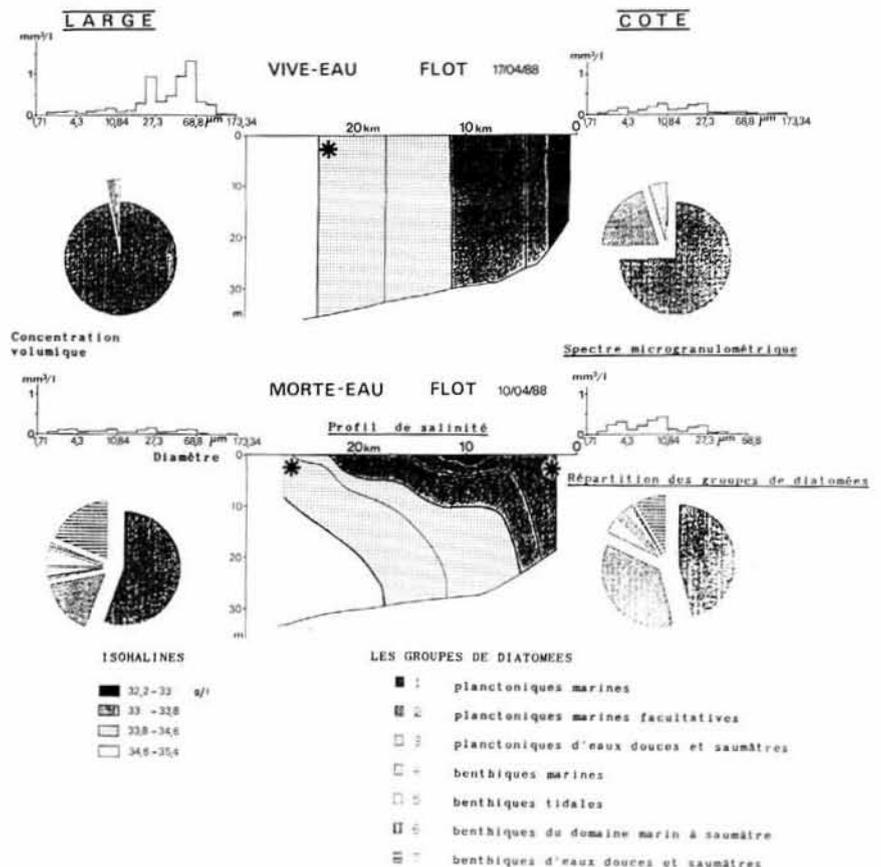


Figure 3 Influence du cycle semi-lunaire tidal sur la structure des masses d'eaux et la dispersion des matières en suspension. Radiales HY1 au nord de Fécamp localisées sur la figure 1 A, campagne Hydrocôte.

Tidal semilunar cycle effect on water structure and particulate matter dispersion.

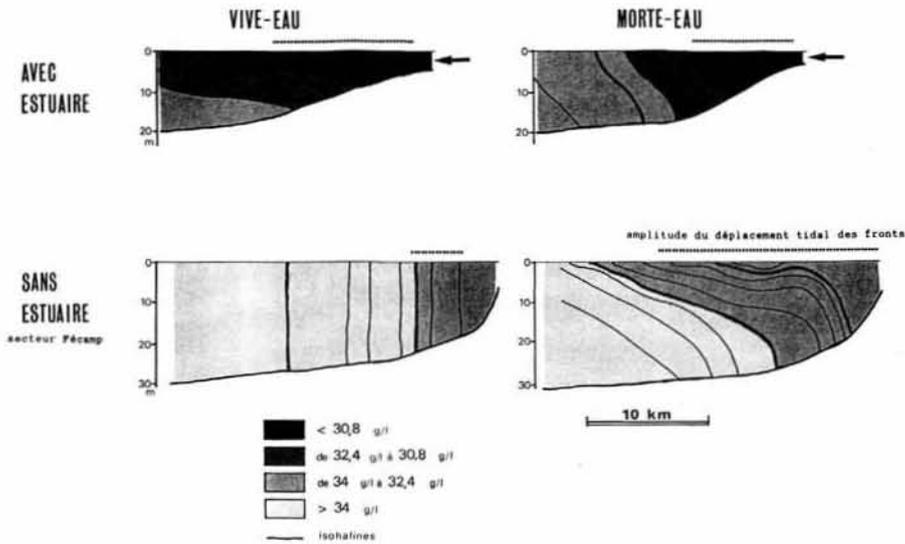


Figure 4

Structure des masses d'eaux dans un système macrotidal à basse mer.

Water structure of macrotidal system at low tide.

composée de *Pleurosigma* sp. et de *Paralia sulcata*. A la côte, la fraction marine strictement planctonique est encore dominante (74,9 %), mais le cortège correspondant est différent. *Thalassiosira nordenskioldii* et *Thalassiosira rotula* dominent ce cortège planctonique. Il s'y ajoute un ensemble très diversifié d'autres diatomées, notamment de taxons correspondant à des marqueurs particuliers des apports côtiers (planctoniques d'eaux douces à saumâtres, benthiques du domaine marin à saumâtre, benthiques tidales dites pseudamphotiphiles) qui représentent 480 valves/l, soit 1,9 % du total dénombré. Globalement, la diversité spécifique est nettement plus importante (21 taxons) pour une concentration (25 340 valves/l) peu supérieure à celle observée au large.

Structuration des masses d'eaux en morte-eau

Les profils verticaux de salinité-température réalisés en flot de morte-eau montrent une stratification des masses d'eaux (fig. 3). Des lentilles d'eaux dessalées sont expulsées vers le large au flot. Les eaux côtières de surface sont caractérisées par une charge particulière plus élevée qu'en vive-eau, constituée principalement de matériel fin (< 10 μ m) essentiellement minéral. Les eaux de surface du large sont relativement peu chargées mais la distribution granulométrique plurimodale est assez comparable à celle des eaux côtières.

Par rapport à la situation de vive-eau, les cortèges de diatomées sont plus diversifiés, tant à la côte (38 taxons) qu'au large (24 taxons), malgré des concentrations plus faibles (15 050 valves/l à la côte et 4 740 valves/l au large). Compte tenu de la variabilité temporelle du développement de la microflore, nous ne pouvons accorder de signification hydrodynamique à ces constatations quantitatives, notamment en matière de populations de diatomées planctoniques marines. Nous pouvons toutefois interpréter les différences de répartition des groupes écologiques.

En condition de morte-eau, les diatomées marqueurs des apports côtiers sont abondantes dans les eaux côtières, avec 2 440 valves/l, soit 16,3 % du total dénombré, et restent

très développées au large, avec 1 220 valves/l, soit plus de 25 % du total dénombré. Dans ce cadre, il faut souligner l'importance des diatomées benthiques et planctoniques d'eaux douces à saumâtres, qui correspondent à l'expulsion en domaine marin des eaux estuariennes. Cette origine est confirmée par la convergence taxonomique des cortèges de diatomées observés en morte-eau à Fécamp et, à la même époque, dans des eaux de salinité à 21 g/l liées au flux de l'estuaire de la Seine (station 1, fig. 1). A cette station, la microflore (47 taxons) est dominée par les espèces planctoniques d'eaux douces à saumâtres. Celles-ci atteignent 59 % du total dénombré, et sont représentées par des espèces comme *Melosira ambigua*, *Cyclotella meneghiniana*, *Cyclotella comta*, *Stephanodiscus hantzschii*, que nous retrouvons au large de Fécamp. Les diatomées benthiques d'eaux douces oligohalobes sont également représentées par de nombreux taxons communs : *Fragilaria* spp., *Gomphonema* spp., *Amphora pediculus*, *Achnantes lanceolata*, *Cymbella* spp., *Cocconeis placentula*, *Navicula* spp., *Rhoicosphenia curvata*... Ce dernier groupe constitue 9 % du total dénombré à la station 1, et jusqu'à 19 % du total dénombré au large de Fécamp.

INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Structuration côte-large et échanges particuliers le long du littoral français de Manche orientale (fig. 4)

La synthèse des données recueillies le long des radiales côte-large réalisées depuis l'estuaire de la Seine jusqu'au Pas-de-Calais montre l'existence constante, tout au long du littoral, de structures frontales dont l'évolution tidale est soulignée par le déplacement des isohalines, ce qui permet de classer les zones étudiées en fonction de deux principaux mécanismes, selon la présence ou non de domaines estuariens.

A proximité des estuaires (estuaire de la Seine et plaines maritimes picardes), les flux d'eaux douces sont à l'origine d'une dessalure importante des eaux côtières, qui dépend à la fois du débit des eaux continentales et de

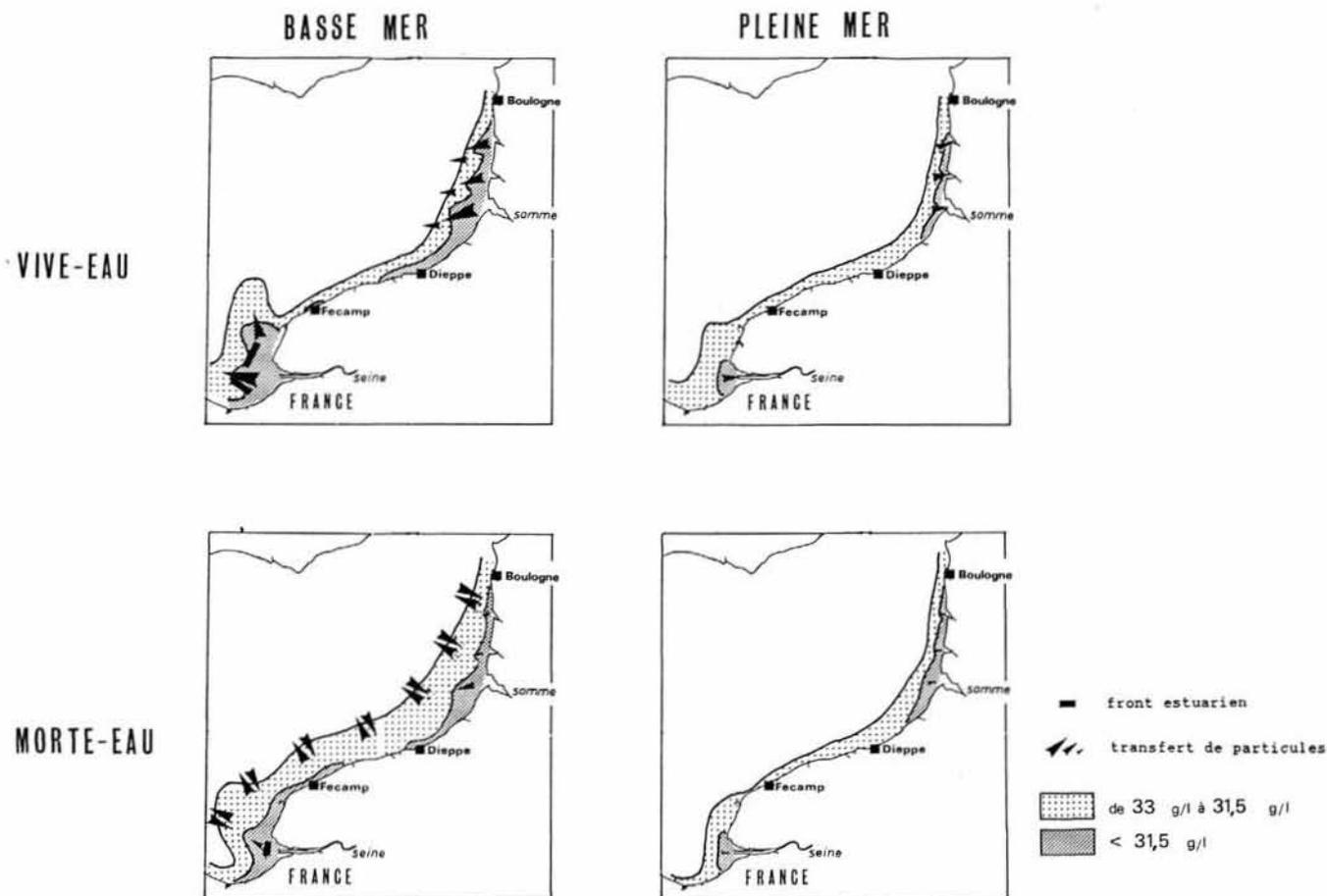


Figure 5

Évolution tidale des masses d'eaux et des transferts particulaires côte-large le long du littoral français de la Manche orientale.

Tidal evolution of waters and particulate fluxes from coast to open sea along the French coast in the eastern Channel.

l'importance des volumes oscillants liés aux surfaces exondables. Conformément au modèle de Bowman et Iverson (1978), la stratification des eaux y est permanente et maximale en vive-eau, tout comme le cycle tidal de déplacement des structures frontales. Les échanges particulaires sont alors maximaux pendant ces phases de vive-eau, qui constituent les périodes privilégiées d'exportation vers le large du matériel particulaire continental et estuarien.

Les littoraux dépourvus de véritables débouchés estuariens présentent une alternance marquée des situations observées en vive-eau et en morte-eau, conformément aux données antérieures (Brylinski et Lagadeuc, 1990 ; Brylinski *et al.*, 1990 ; Dupont *et al.*, 1990). En vive-eau, les structures frontales se redressent et isolent des couloirs de circulation dont les sections restent constantes, ce qui implique un déplacement tidal des isohalines proportionnel à l'amplitude des marées. Les échanges particulaires entre les masses d'eaux correspondantes sont alors minimaux compte-tenu du faible développement des interfaces. En morte-eau, les eaux sont stratifiées et les interfaces entre masses d'eaux sont de ce fait multipliées d'un facteur 10^2 à 10^3 (Lafite, 1990). Ce développement des surfaces de contact favorise les échanges particulaires entre les eaux côtières et les eaux du large. Par ailleurs, les déplacements

tidaux des isohalines sont plus importants qu'en vive-eau, et ce particulièrement dans le secteur de Fécamp, choisi comme exemple de domaine côtier sans estuaire (fig. 4). Le déplacement des isohalines peut atteindre une vitesse moyenne de 0,80 m/s au flot. Les eaux côtières dessalées

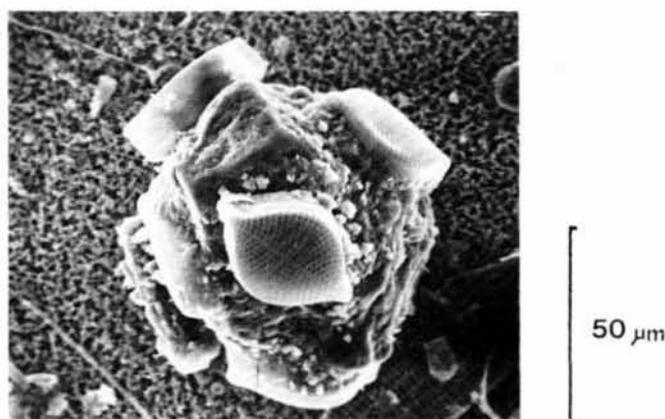


Figure 6

Rhaphoneis amphiceros fixés sur un grain de quartz (photographie au MEB).

Rhaphoneis amphiceros fixed on a quartz grain (SEM photograph).

sont alors partiellement expulsées vers le large, sous forme de lentilles superficielles, et vers l'Est le long du littoral à la faveur d'un courant côtier d'overflow. Ces déplacements importants des masses d'eaux favorisent les échanges particuliers et dissous dans le secteur de Fécamp. Ils sont plus limités dans le secteur de Boulogne, compte tenu du goulet géomorphologique du Pas-de-Calais.

En conclusion, la confrontation des données recueillies sur la structuration tidale des masses d'eaux côtières souligne la dualité des mécanismes en fonction de la présence ou non de débouchés estuariens : la stratification est maximale en vive-eau devant les estuaires et, en morte-eau, au large des côtes dépourvues de débouchés estuariens.

Évolution tidale des masses d'eaux et des transferts particuliers côte-large le long du littoral français de Manche orientale (fig. 5)

La synthèse des données recueillies permet de proposer des cartes de répartition des isohalines 33 et 31,5 g/l en fonction des situations extrêmes de basse mer et de pleine mer de morte-eau et de vive-eau. Il s'agit de cartes théoriques, puisqu'elles font abstraction de la vitesse de propagation de l'onde de marée. Le choix des isohalines est justifié par le fait qu'elles correspondent à la position des deux principales structures frontales séparant eaux côtières et eaux du large.

En vive-eau, la position des isohalines 33 g/l varie peu en fonction du cycle tidal, excepté à proximité des principales zones estuariennes (estuaire de la Seine et plaines maritimes picardes). Au niveau de ces dernières, l'extension, à basse mer, des eaux côtières dessalées est soulignée par le déplacement vers l'aval des eaux de salinité inférieure à 31,5 g/l alimentées par la vidange des domaines exondables.

Inversement, en morte-eau, la fluctuation spatiale de l'isohaline 33 g/l entre la pleine mer et la basse mer est très importante, notamment dans le secteur de Fécamp. Cette migration vers le large au cours du jusant reste toutefois moins marquée à proximité des zones estuariennes. Dans ces zones, le flux de dessalure, souligné par l'extension des eaux de salinité inférieure à 31,5 g/l, est plus limité en morte-eau qu'en vive-eau. Ceci est conforme aux différences des volumes oscillants concernés par l'alternance inondation-exondation de vive-eau et de morte-eau.

Dans le secteur de Fécamp, on observe en basse mer de morte-eau la présence le long du littoral d'eaux côtières de salinité inférieure à 31,5 g/l prolongeant le flux de l'estuaire de la Seine. Ce flux est inexistant en basse mer de vive-eau. Dans ce même secteur, les salinités enregistrées à la côte sont plus importantes en pleine mer de morte-eau qu'en pleine mer de vive-eau ; en outre, les résultats recueillis en matière de marqueurs dissous (^{125}Sb) lors de la campagne *Huxleyi* (fig. 1) y confirment la pénétration des eaux du large jusqu'à la côte en fin de flot de morte-eau.

Les échanges particuliers entre masses d'eaux côtières et masses d'eaux du large sont donc liés aux déplacements respectifs de ces masses d'eaux (fig. 5) et, plus encore, à l'importance de la stratification des masses d'eaux (fig. 4).

CONCLUSION

L'ensemble des observations réalisées le long du littoral français de Manche orientale révèle l'existence constante de structures frontales longeant le littoral depuis le secteur de Fécamp jusqu'au Pas-de-Calais. La confrontation des données des marqueurs particuliers (cortège floristique des diatomées) avec celles des marqueurs dissous (salinité et ^{125}Sb) permet d'illustrer la dynamique des masses d'eaux et leurs processus de transfert particulière.

Lors de la campagne *Huxleyi*, les salinités enregistrées dans les eaux de surface soulignent l'influence des apports continentaux d'eaux douces en baie de Seine et, dans le golfe normand-picard, entre le secteur de Fécamp et celui du Pas-de-Calais.

L'injection artificielle de ^{125}Sb à partir de La Hague permet de marquer les eaux côtières françaises de Manche orientale. Les concentrations de ^{125}Sb y diminuent depuis la côte vers le large, traduisant la dilution par les eaux atlantiques non marquées. Ce gradient est confirmé par la décroissance, du large vers la côte, du pourcentage de diatomées planctoniques marines. Globalement, les transferts des éléments dissous et particuliers sont alors en conformité, et confirment l'hypothèse d'un flux atlantique principal, qualifié de fleuve central par Salomon et Breton (1990).

La présence des discontinuités dans les gradients côte-large se traduit dans la distribution du matériel en suspension, tant quantitativement que qualitativement, en fonction de l'origine des particules. Du point de vue quantitatif, les enregistrements longitudinaux de turbidité et fluorimétrie montrent que les structures frontales peuvent jouer un rôle de barrières hydrodynamiques au contact desquelles le matériel en suspension est susceptible de se concentrer. Du point de vue qualitatif, la caractérisation du matériel en suspension permet de mettre en évidence une distribution liée aux sources de matériel particulière :

- l'érosion côtière, fournissant un matériel fin, riche en coccolithes de la craie, et des matériaux de la remise en suspension des sédiments du domaine littoral, caractérisés par la présence de diatomées benthiques intertidales ;
- les apports d'eaux douces et saumâtres, fournissant des silts fins détritiques et des diatomées planctoniques et benthiques spécifiques ;
- la production phytoplanctonique dans les eaux du large ;
- les mécanismes de remise en suspension des sédiments du large en fonction des paramètres hydrodynamiques et géomorphologiques locaux, mis en évidence par l'abondance des diatomées benthiques marines dans les eaux de surface.

L'exportation vers le large des matières en suspension estuariennes se réalise principalement en vive-eau, période pendant laquelle les eaux estuariennes sont plus fortement stratifiées. L'expulsion du matériel estuarien, caractérisé par son cortège de diatomées spécifiques est accentué après la crue (situation de la campagne *Huxleyi*).

Inversement, dans les eaux côtières sans débouché estuarien, les transferts particuliers entre eaux du large et eaux côtières sont maximaux en périodes de morte-eau, caractérisées par des eaux stratifiées, et, minimaux en périodes de vive-eau. En effet, durant ces périodes de vive-eau, le redressement des structures frontales entraîne une diminution de surface (d'un facteur 100 à 1 000) de l'interface d'échange eaux du large-eaux côtières. Cette réduction d'interface est responsable de la diminution des transferts particuliers côte-large et large-côte.

Dans le contexte d'une circulation résiduelle des masses d'eaux longeant un littoral sans débouché estuarien, ce processus d'individualisation des contenus particuliers, des eaux côtières d'une part, des eaux du large d'autre part, est spécifique des conditions de vive-eau dans un régime macrotidal à hypertidal.

Remerciements

Ces travaux ont vu leur aboutissement grâce aux résultats acquis à bord des navires océanographiques *Plutéus* et *N/O Côte de Normandie* du Centre National de la Recherche Scientifique, dans le cadre des programmes scientifiques du G.D.R. Manche (CNRS).

RÉFÉRENCES

- Aleem A.A.** (1950). Distribution and ecology of british marine littoral diatoms. *J. Ecol.*, **38**, 75-106.
- Avoine J.** (1981). L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Caen*, 270 pp.
- Bowman M.J. and R.L. Iverson** (1978). Estuarine and plume fronts, in: *Oceanic fronts in coastal processes*, M.J. Bowman and W.E. Esaias, éditeurs, Springer Verlag, Berlin, 87-104.
- Brylinski J.-M., J. Dupont et D. Bentley** (1984). Conditions hydrobiologiques au large du Cap Gris-Nez (France) : premiers résultats. *Oceanologica Acta*, **7**, 3, 315-322.
- Brylinski J.-M. et Y. Lagadeuc** (1990). L'interface eaux côtières/eaux du large dans le Pas de Calais (côte française) : une zone frontale. *C.r. Acad. Sci., Paris*, **311**, 2, 535-540.
- Brylinski J.-M., Y. Lagadeuc, V. Gentilhomme, J.-P. Dupont, R. Lafite, P.A. Dupeuble, M.-F. Huault, Y. Auger, E. Puskaric, M. Wartel et L. Cabioch** (1990). Le fleuve côtier : un phénomène hydrologique en Manche orientale (exemple du Pas de Calais). *Actes du Colloque International sur l'environnement des mers épicontinentales*, Lille, 20-22 mars 1990, *Oceanologica Acta*, n° sp. **11**, ce volume, 197-203.
- Cupp E.E.** (1943). Marine plankton diatoms of the west coast of North America. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr., Reprint 1977*, Otto Koeltz Science Publishers, Koenigstein, 237 pp.
- Denys L., L. Lebbe, B.C. Sliggers, G. Spaink, M. Van Strijdonck et C. Verbruggen** (1983). Litho- and biostratigraphical study of quaternary deep-marine deposits of the western Belgian coastal plain. *Bull. Soc. géol. Belg.*, **92**, 2, 125-154.
- Dupont J.-P., R. Lafite et D. Eisma** (1990). Comparaison de la dynamique du matériel en suspension dans les eaux côtières de la Manche orientale et de la baie méridionale de la Mer du Nord. *Volume spécial de la série "European marine Symposium"*, Éd. Olsen, Copenhague (à paraître).
- Germain H.** (1981). *Flore des diatomées*. Boubée Éd., Paris, 441 pp.
- Guéguéniat P.** (1986). Comportement chimique et géochimique des éléments à l'état de traces dans l'estuaire de la Seine : une synthèse des résultats. *Actes de Colloques IFREMER*, **4**, 247-272.
- Gros P. et M. Ryckaert** (1983). Étude de la production primaire phytoplanctonique dans les eaux littorales de la côte normande (Manche orientale). *Oceanologica Acta*, **6**, 4, 435-450.
- Hendey N.I.** (1964). An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. in : *Fisheries investigations, ser. IV, part V: Bacillariophyceae (diatoms)*, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London, 317 pp.
- Hustedt F.** (1957). Die diatomeenflora des Flusssystemes der Weser im Gebiet der Hansestadt Bremen. *Abh. Naturw. Verein Bremen*, **34**, 3, 181-440.
- Lafite R.** (1990). Caractérisation et dynamique des particules en suspension dans un domaine marin macrotidal influencé par un estuaire : l'exemple de la baie de Seine orientale (France). *Thèse de Doctorat, Université de Rouen*, 294 pp.
- Lortie G.** (1974). Les diatomées des dépôts quaternaires marins, tourbeux et lacustres de Rivière-du-Loup/Témiscouata (Québec) : taxonomie et paléocéologie. *Thèse de 3^{ème} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris*, 201 pp.
- Patrick R. and C. Reimer** (1966). *The diatoms of the United States, vol. I*. Academy of Natural Sciences, Philadelphia, 688 pp.
- Patrick R. and C. Reimer** (1975). *The diatoms of the United States, vol. II*. Academy of Natural Sciences, Philadelphia, 213 pp.
- Ricard M.** (1987). *Atlas du phytoplancton marin, Vol. 2 : Diatomophycées*. CNRS Éd., 297 pp.
- Round F.E.** (1971). Benthic marine diatoms. *Oceanogr. mar. Biol. a. Rev.*, **9**, 83-139.
- Salomon J.-C. et M. Breton** (1990). Courants de marée et courants résiduels dans la Manche. *Actes du Colloque International sur l'environnement des mers épicontinentales*, Lille, 20-22 mars 1990, *Oceanologica Acta*, n° sp. **11**, ce volume, 47-53.
- Simonsen R.** (1962). Untersuchungen zur Systematik und Okologie der Bodendiatomeen der weslichen Ostsee. *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, **1**, 1-144.
- Van der Werff A. and H. Huls** (1957-1974). *Diatomeenflora van Nederland. Reprint 1976*. Otto Koeltz Publ., Koenigstein.

Marine biology is advancing on a broad front and we have had presentations over the last two days relating to biochemistry, cellular and organ research, whole organisms and communities. Most appropriate has been the central theme of pollution and other anthropogenic effects on the environment. Aspects of marine pollution have attracted biological interest for more than two decades now and more recently have caught the attention of our political masters. In part that attention has been focused by awareness of the increasing blooms of algae, particularly *Phaeocystis*, in the North Sea and the potential vulnerability of some areas off the German Bight or the Nord-Pas-de-Calais to reduced oxygen levels. It happens that *Phaeocystis* has been favoured in recent years by conditions in the North Sea. Less fortunate have been those species affected by toxic effluents resulting from man's activities. The effects of one such effluent, oil, have been extensively studied since the Torrey Canyon disaster and have now, in part, passed beyond the level of the influence of gross contamination to the subtle effects involved in the response by organisms at the biochemical level to insult by oil components.

Study of pollution at the organ level was considered about the effects of tributyltin on imposex formation in *Stenoglossan* gastropods. One could wonder idly as to whether there might not be some level of TBT which might actually favour oysters by being too low to affect them directly whilst still influencing gastropod predators such as *Ocenebra*. But such fancies are perhaps for future study together with many of the other secondary and "knock-on" effects in environmental response to pollution. Secondary effects of a different nature, the transfer of substances within the food chain, have reached prominence through first the concentration of mercury or other metal distribution in organisms, and latterly to the finding of high concentrations of polychlorinated compounds in marine mammals.

Most commonly in environmental studies our concern lies with the effect of human activities on animals. Less frequently, except in toxicological work, is there interest in the reverse effect. Some years ago however concern was expressed that bioturbation in the Irish Sea off the reprocessing plant at Sellafield might be responsible for resuspending radio-nuclides which had been sedimented. Some interesting data have been presented at this Congress on the role of meiofauna in bioturbation. Our geological colleagues too are now becoming more aware of the significance of the biota in both stabilising and destabilising sediments so it seems probable that this will be a fruitful area for transdisciplinary studies in the future.

Pollution aspects have accounted for much of this resume but mention must also be made of fluctuations within unpolluted ecosystems. Without such careful, long-term ecological studies of annual and seasonal variation and of the research on coastal flow, we should be hard put to recognize the abnormal trend from natural fluctuation. Nor too must we forget how easy it is to undervalue significant elements in the biological energy web simply because they are not easy to sample. Interestingly, and most appropriately in a modern context, biology has also been appearing in the sessions of this conference primarily devoted to other disciplines, eg. the distribution of scallop larvae under marine physics, multifunctional oxidases under marine chemistry and bioturbation considerations, indicating the increasingly close interaction between biologists and specialists from other disciplines. Clearly the planning of this symposium has been forward looking, paying more than just lip-service to the oft repeated concept of the need to encourage interdisciplinary science.

So much for a summary of the present as illustrated by the current meeting. What of the future of biological studies in the epicontinental seas ? Speculation is obviously fraught and the individual has but a blinkered view. However, our peering into the crystal ball suggest that :

- There will be an increased emphasis on genetic studies in relation to: a) the differential ability to adapt to environmental constraints; b) the production of genetically engineered stocks with particular features appropriate to mariculture; c) the study of the separation of natural stocks due to the influence of water masses, fronts and other natural barriers to larval distribution.
- Coupled with an increased emphasis on mariculture and marine ranching there will be a greater need for information as to the influence of natural variables on the potential ability of commercially important species to resist disease and for a better awareness of the modes of transmission and epidemiology of the diseases of marine organisms.
- Pollution studies will remain important but, with the expected decline in over pollution of the continental seas, the emphasis of ecological studies may shift away from monitoring progressive decline of the habitat to recording the process of regeneration. In the area of benthic studies more emphasis seems likely on the direct and indirect effects of fishing on the environment, especially in relation to mechanical disruption of the sea bed. In the planktonic field long time series will be of particular importance in assessing the effects of gradual depletion of nutrients and in examining the effects of climatic change.
- Multidisciplinary interaction will become more important to the biologist but equally his expertise will impinge on the work in other fields, as for example in the effect of the biota on sediment stability.
- Greater marine construction, both in coastal management schemes and offshore is probable, offering the opportunity for engineering environmental change, a fruitful field for the experimental ecologist. An offshoot of such construction may involve the positive use of detoxified materials to form casitas, shelters and artificial reefs.
- With the extension of human activity in the shallow seas will come an ever greater need for the establishment of marine nature reserves as study sites and reservoirs from which larvae may be produced to recolonise damaged areas.
- A greater awareness of the biological energy flux and the factors governing it will be sought together with information on the pathways for carbon inputs, cycling within the continental seas and export from them.
- The current thrust in the microbiological field will continue with emphasis on the role of micro-organisms in production, phytoplankton succession, recycling and as disease organisms.

To single out a few fields in this way is invidious. In biology there is always, thankfully, the opportunity for individuals or small, low budget groups to work in maverick areas and to make significant discoveries, and all strength to their arm for often they are the life-blood of new ideas. The probability is however that we shall all, to our mutual benefit, be increasing international co-operation and interaction. This meeting has provided one more step towards the future in that respect

One further factor must not be forgotten when considering the directions of future research and that is the question of funding. When one peers into the crystal ball to ascertain the source of funds for research the globe grows markedly more opaque. It does however seem to highlight the message "public opinion and political expediency". Governance, as Wayne Bell has pointed out, has a large part to play in determining the direction of research by channelling the funds. It behoves the environmental scientist to remember this and direct his efforts, or at least part of them, to the service of his community. Equally it is important for local authorities and regions, as well as national funding agencies, to appreciate that they should be prepared to fund some projects with a longer perspective than that of the immediate need. Acting in concert the environmental scientist and the authorities can potentially help to preserve the natural heritage. It is good to see therefore such an excellent example of the interaction of science, national agencies and the regional authorities as is epitomised in this meeting.

