

**CARACTERISTIQUES ECOHYDRODYNAMIQUES
DE LA BAIE SUD DE LA MER DU NORD
EN REGIME D'ETE**

62490

Jean-Henri HECQ^{1,2}, Marc MINGELBIER^{2,3}, Anne GOFFART²,
Jean-Michel BRYLINSKY⁴ et Salim DJENIDI²

¹ Chercheur qualifié du FNRS

² Ecohydrodynamique, GHER, Institut de Physique B5, Université de Liège

³ Adresse actuelle Département de Biologie, GIROQ Université Laval, Québec

⁴ Station Marine de Wimereux, Université de Lille

**ECOHYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE SOUTHERN
BIGHT OF THE NORTH SEA IN SUMMER CONDITIONS**

SUMMARY

On the basis of the hydrological context, an optimal sampling network has been set up to obtain a synoptic picture of temperature, salinity, nutrients, chlorophyll and zooplankton distributions in the Southern Bight of the North Sea. The data confirm the general tendency of isolines to be parallel to the coast. The plankton distribution shows the influence of Scheldt water farther to the south-west than proposed by previous models and observations.

Mots clefs: Mer du Nord, Baie Sud, Chlorophylle, Nutriments.

Keywords: North Sea, Southern Bight, Chlorophyll, Nutrients.

INTRODUCTION

La Baie Sud de la Mer du Nord est limitée au sud par le Pas de Calais. Sa limite Nord, moins précise se situe aux environs du Dogger Bank (53° Nord). Aux échelles caractéristiques de la distribution des communautés planctoniques (mésos-échelle et l'échelle synoptique), deux types de circulation sont importantes.

D'une part, la circulation transitoire est due essentiellement aux marées et aux tempêtes. Les courants de marée ont une direction variable, comme représentée par les ellipses de marée de la fig.1. Leur forme est largement liée aux gradients de profondeur et à la proximité de la côte. Malgré des vitesses de l'ordre du m sec⁻¹, le transport d'eau lors

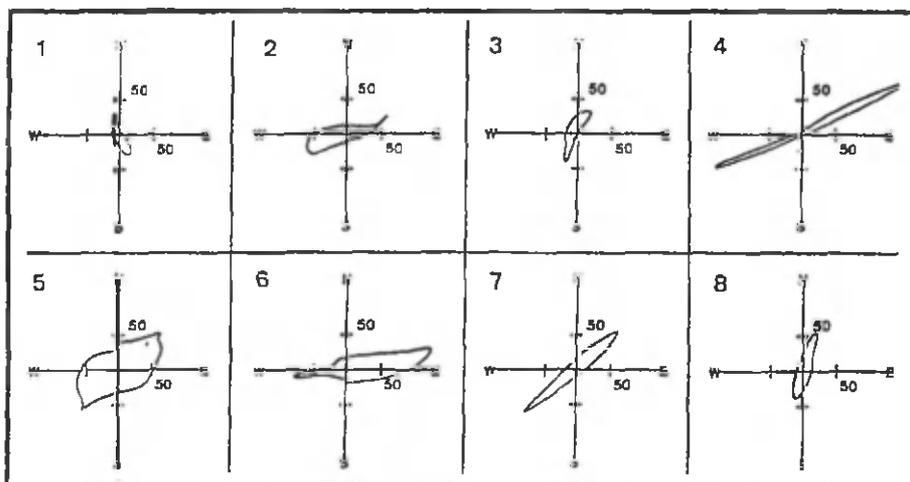
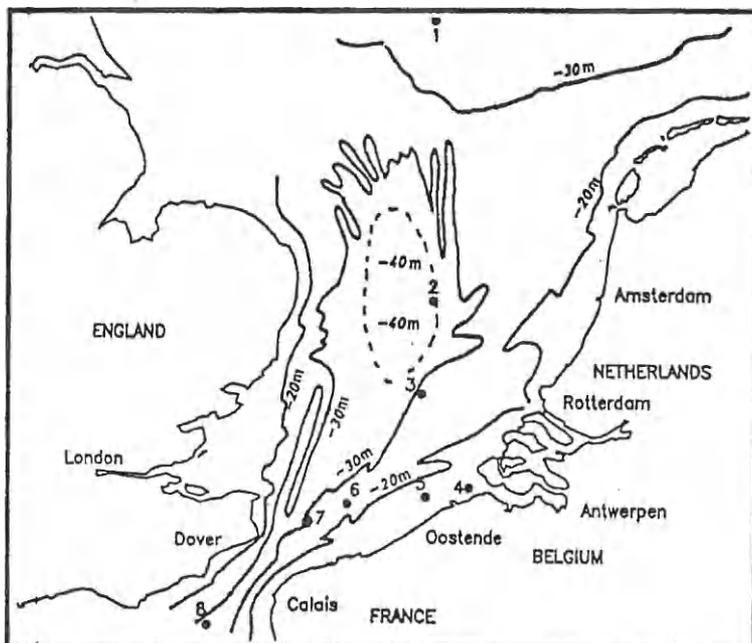


Figure 1.- Bathymétrie et ellipses de marées en différents points de la Baie Sud de la mer du Nord. Les vitesses des courants de marée sont exprimées en $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$. (d'après Nihoul et Roday 1976).

d'un cycle de marée se fait à des distances relativement faibles (une dizaine de kilomètres). En baie sud, l'effet essentiel des courants de marée est l'homogénéisation de la colonne d'eau à cause de la turbulence engendrée par dissipation de l'énergie sur le fond. Cet effet est fonction du cycle des marées et il est négligeable en eaux profondes. Ainsi, en été, au sud du Dogger Bank, un front tidal sépare les eaux de la Baie Sud peu profondes (40m) et bien mélangées verticalement, des eaux stratifiées plus profondes du bassin central de la Mer du Nord (front du Flamborough Head, Djenidi, 1990). La signature biologique de tels fronts est très nette à travers la distribution spatiale du phytoplancton (Pingree et al, 1979).

D'autre part, la circulation résiduelle qui résulte d'une branche du Courant Nord Atlantique s'oriente vers le nord-est, parallèlement aux côtes. Sa vitesse est de l'ordre de 10^{-1} à 10^{-2} m.sec⁻¹ et atteint des valeurs maximales le long de la côte belge. Son temps caractéristique est de quelques semaines à quelques mois. Elle conditionne le déplacement à long terme des masses d'eau et de leurs constituants et détermine la structure des masses d'eaux à l'échelle synoptique (Djenidi, 1987).

A cause des interactions entre les phénomènes transitoires, des structures résiduelles secondaires telles que des fronts, des contre-courants et des gyres apparaissent en Baie Sud (Nihoul et Runday 1976, Nihoul et al.1989) et exhibent une nette variabilité saisonnière (Djenidi, 1987).

Ces informations ont permis de délimiter, en Baie Sud, trois zones correspondant à des masses d'eau caractéristiques.

- Une zone située en mer ouverte (Zone 2), comprend des eaux en continuité avec la Manche et subit peu d'influence côtière. La salinité y est toujours élevée (33.5 à 34.5‰).

- Une zone parallèle à la côte (zone 1N), située au nord du delta, est surtout influencée par les eaux de la Meuse et du Rhin. La salinité y varie de 30 à 34‰.

- La zone 1S est le domaine de la côte belge. Elle est surtout influencée par l'eau de l'Escaut et dépend de son débit. Cette influence est renforcée par l'existence d'un gyre résiduel, qui allonge probablement le temps de résidence (inférieur au mois) des masses d'eau dans cette zone. La zone de contact des eaux estuariennes avec les eaux marines est caractérisée par de forts gradients physico-chimiques.

La mise en place de telles structures a des conséquences écologiques importantes telles que l'étalement des niveaux trophiques planctoniques ainsi que l'hétérogénéité spatiale de la composition du plancton et de la matière organique (Hecq, 1982; Nihoul et Hecq, 1984, Nihoul et al.,1989). L'image de cette répartition spatiale de l'écosystème planctonique avait été construite sur base des résultats des modèles et de l'interprétation de données éparées récoltées de 1970 à 1985. Pour valider ces modèles, une approche synoptique de la distribution des paramètres hydrologiques et biologiques a été utilisée lors de la campagne océanographique LIPIDS 89.

STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

En fonction des contraintes hydrodynamiques locales, un réseau optimal, adapté à l'hétérogénéité physique, chimique et biologique de la Baie Sud, a été parcouru pendant la campagne LIPIDS 89, à bord NO "BELGICA", en Baie Sud de la Mer du Nord, du 2 au 14 juillet 1989. Le tracé du parcours de 1100 Milles nautiques et la position des 20 stations (fig 2), permet caractériser les trois zones d'influence en relation avec la circulation résiduelle locale.

Les prélèvements d'eau ont été réalisés, en station, à des profondeurs de 0, 5, 10, 15, 20... mètres de profondeur, au moyen de la rosette munie de bouteilles NISKIN, d'une contenance de 8 litres, pour le dosage des nutriments et de la chlorophylle et par pompage pour les mesures de fluorescence. En dehors des stations, les prélèvements d'eau ont été réalisés par pompage uniquement.

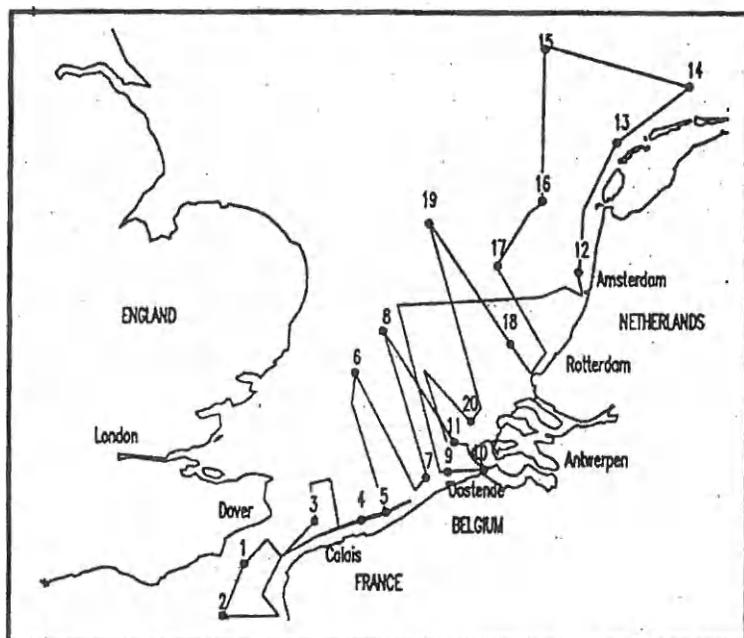


Figure 2.- Tracé du parcours et position des stations de la campagne

Une sonde CTD Seacat SBE 19/ Dual Mode (Sea-bird Electronics) a permis l'enregistrement de la profondeur, la température, la conductivité et le calcul de la salinité et de la densité de l'eau pendant les profils verticaux et pendant les trajets séparant les stations. Durant ceux-ci, la sonde est immergée dans une cuve alimentée par de l'eau pompée à la surface. Des mesures de contrôle de température, salinité et densité ont été réalisées.

Les pigments sont dosés par une technique chromatographie HPLC (Hecq et al., 1992) sur de l'eau filtrée sous vide sur des filtres GF/C. Les prélèvements de zooplancton ont été réalisés à l'aide d'un filet caréné et trainé à une vitesse de 5 noeuds et la biomasse a été évaluée. Les nutriments sont dosés, à bord, par autoanalyseur TECHNICON.

Les champs de données de surface obtenues lors des profils horizontaux, ont été traités par le logiciel d'interpolation SURFER™. Cette méthode permet de tracer des isocourbes à partir de fichiers de données 2D (X, Y et une valeur associée). Les options du logiciel permettent de réaliser des cartes d'un réseau des stations qui n'est pas nécessairement régulier dans l'espace. Les données sont d'abord organisées spatialement sous la forme d'une grille numérique à pas régulier et le calcul des valeurs aux noeuds des mailles tient compte des données situées dans le voisinage. La méthode

d'interpolation consiste à pondérer chacune des observations par un facteur proportionnel à l'inverse du carré de la distance qui les sépare du point de calcul. Cette méthode est à rapprocher de l'analyse objective puisqu'elle repose sur l'hypothèse d'une fonction de corrélation isotrope et homogène horizontalement. La grille numérique utilisée a une extension sud-nord comprise entre 50.°30'N et 54°N et entre 1°W et 6°E. Le choix de la maille dépend surtout de la topographie locale; une maille carrée de 6.5 kilomètres de côté a été utilisée. Les contraintes physiques d'advection, de diffusion, etc... ne sont cependant pas prises en compte car elles nécessiteraient des méthodes plus sophistiquées (Brasseur and Haus, 1991).

EXPOSE ET DISCUSSION DES RESULTATS.

Les salinités les plus élevées ($> 34.5\%$) sont mesurées dans le voisinage de la Manche (stations 1, 2 et 4), au large, en zone 2 (stations 6, 8, 16 et 17) et dans le nord (stations 15 et 19). Les valeurs les plus faibles ($< 32.5\%$) sont relevées le long des côtes, aux points 7, 9, 10, 11, 12 et 20 (en zone 1S et 1N). Les températures les plus élevées ($\geq 17^{\circ}\text{C}$) sont relevées le long des côtes (stations 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18 et 20) et les plus basses ($\leq 15^{\circ}\text{C}$) aux stations 1, 2 et 5 situées aux extrémités de la Baie Sud. Les densités les plus fortes ($\sigma_t > 25$) se trouvent aux stations 1, 2, 3, 4, 6, 8, 15, 16, 17 et 19; les plus faibles ($\sigma_t < 22.5$) aux stations 7, 10 et 12.

A toutes les stations, sauf la station 15, les profils verticaux de température et de salinité sont homogènes sur la colonne d'eau (fig 3) et confirment l'idée que la Baie Sud n'est stratifiée qu'exceptionnellement. Par contre, à la station 15, une thermocline apparaît entre 20 et 25 m de profondeur. En effet, cette station correspond à un important seuil bathymétrique et à l'amorce du front tidal séparant les eaux de la Baie Sud des eaux stratifiées plus au nord.

Sur le plan horizontal, les isothermes sont parallèles au continent (fig 4). Le gradient thermique est dirigé positivement vers la côte. En effet, à cette période de l'année, les effets du réchauffement sont d'autant plus marqués que la profondeur est faible, c'est à dire à mesure qu'on se rapproche des terres. Sur les cartes tracées avec les résultats des 20 stations, l'influence côtière des fleuves se marque par une disposition concentrique des isothermes à proximité de l'embouchure de l'Escaut et celle de la Meuse et du Rhin. Le gradient de salinité (fig 5) est dirigé positivement vers le large et la distribution des isohalines se superpose à celle des isothermes. Les zones subissant l'influence côtière sont le siège de gradients halins importants (salinité $< 33\%$). Sur les cartes tracées à partir des profils en continu, une langue d'eau de faible salinité ($< 32.5\%$) est observée depuis l'embouchure de l'Escaut en direction de la frontière française. Sa présence confirme l'idée d'un courant résiduel dirigé localement vers l'ouest son extension est d'ailleurs plus grande encore que celle prévue par les modèles (Nihoul et al 1989). La densité est contrôlée essentiellement par le paramètre de salinité (fig 6.). Les gradients de densité sont conditionnés par l'apport d'eau douce des fleuves et en surface par le stress dû au vent.

De manière générale, les cartes de distribution horizontale des divers paramètres, réalisés à l'aide des 20 stations mettent en évidence les mêmes tendances, à savoir: le parallélisme des isocourbes par rapport aux côtes, les gradients et leur signe, l'influence côtière des décharges d'eaux douces et le contrôle de la densité par le paramètre de salinité. Cependant seules les cartes construites à partir des résultats des prélèvements en continu de surface (profils horizontaux) permettent de situer les zones de

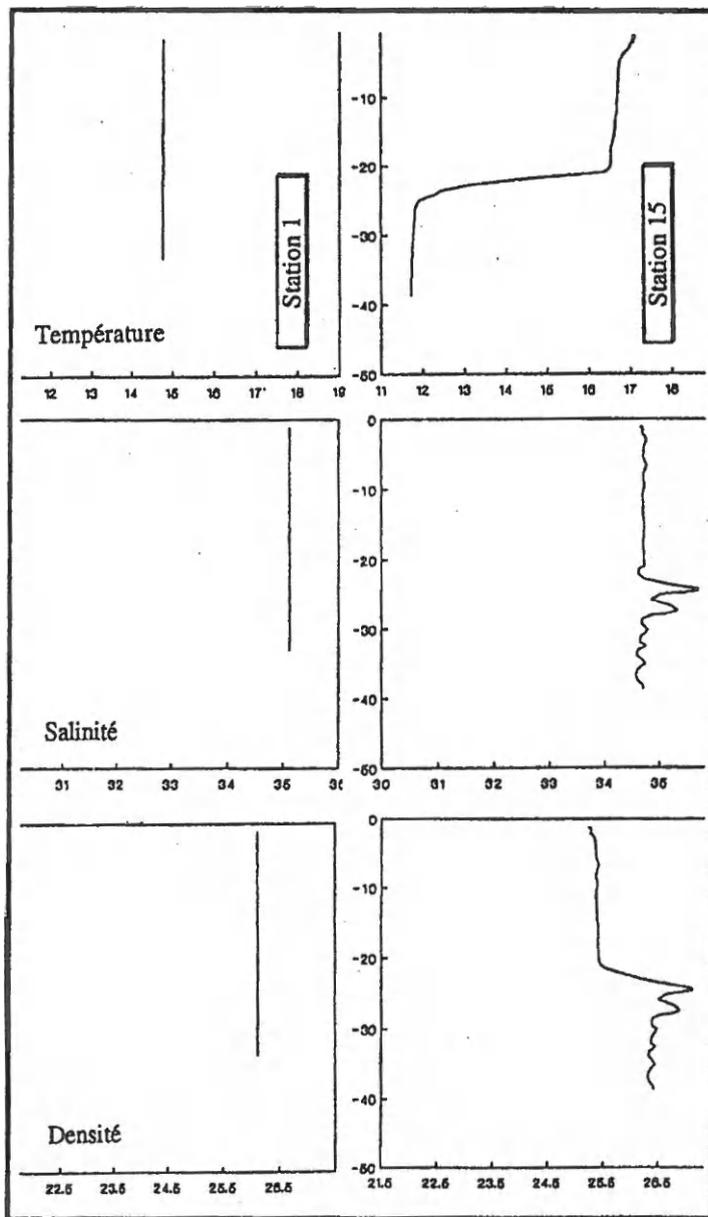


Figure 3.- Profils verticaux de température (T °C), salinité (S ‰) et densité (σ_t) aux stations 1 et 15.

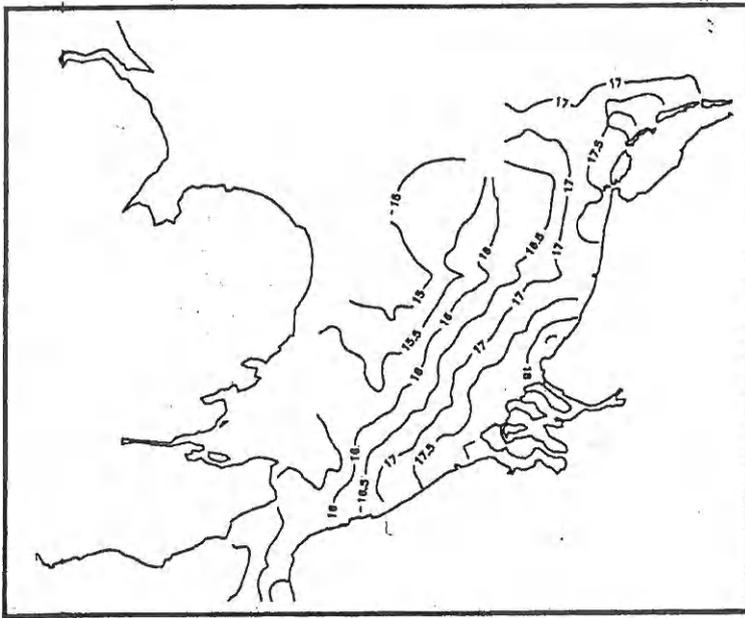
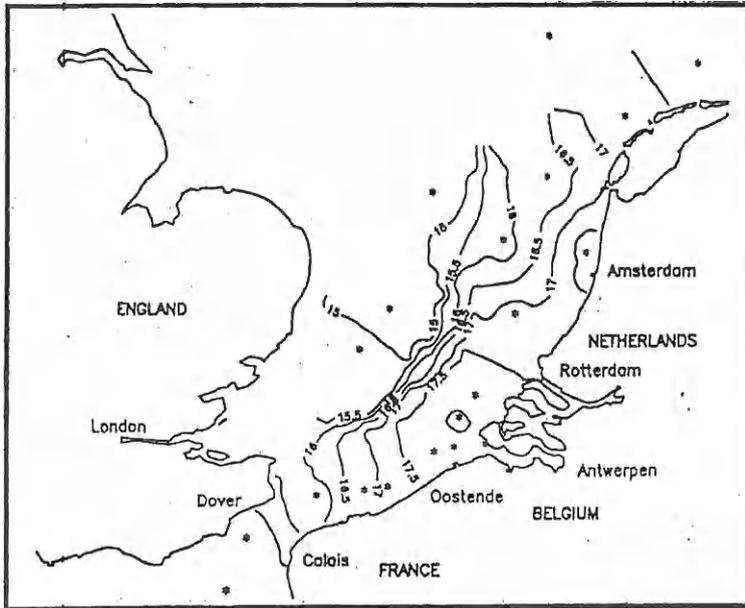


Figure 4.- Distribution des isothermes de surface réalisée d'après les données en station et d'après les données en continu.

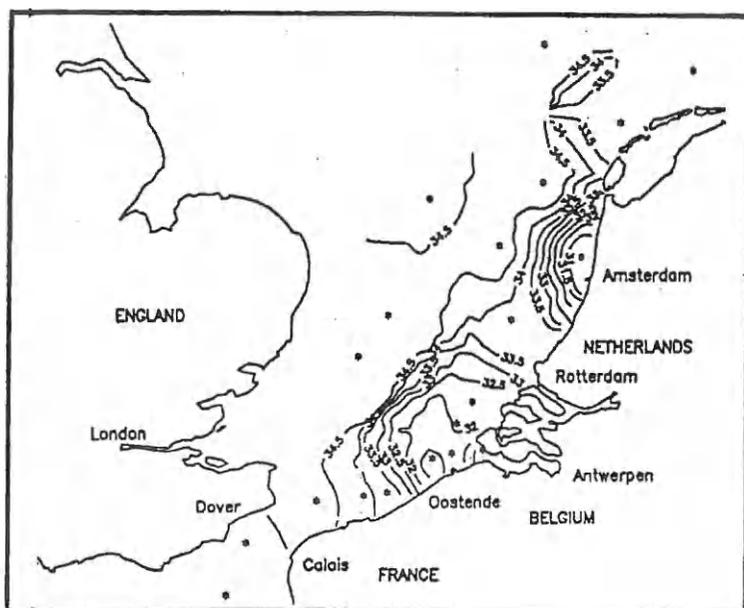


Figure 5.- Distribution des isohalines de surface réalisée d'après les données en station et d'après les données en continu.

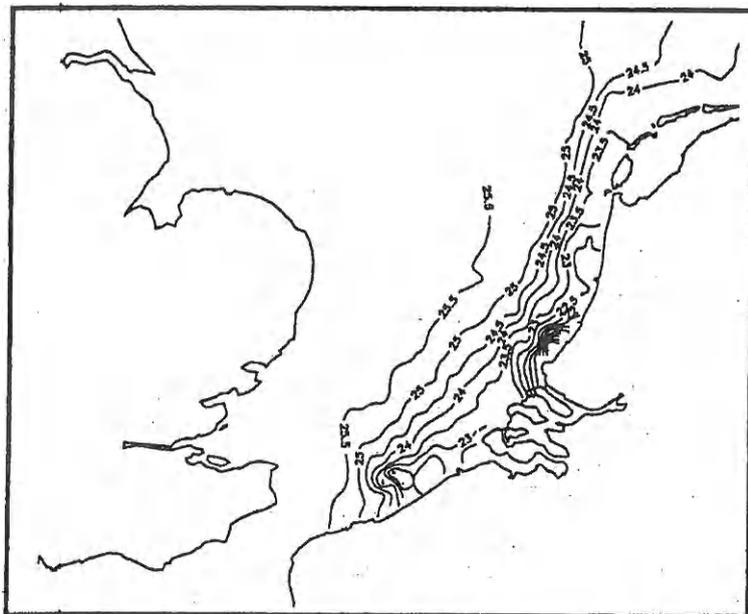
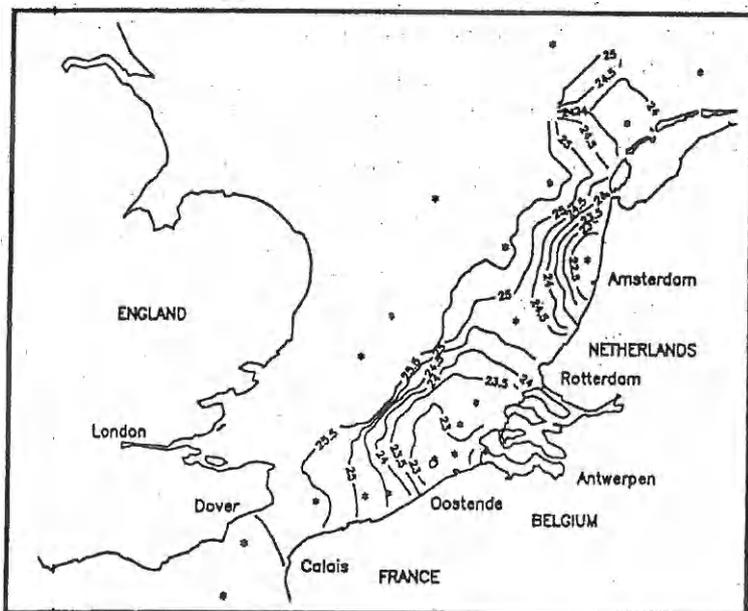


Figure 6.- Distribution des isopycnes de surface réalisée d'après les données en station et d'après les données en continu.

discontinuité. Le nombre de valeurs significatives nécessaires est de 800 pour la bathymétrie, la température, la salinité et la densité; 250 pour la fluorimétrie et 150 pour la chlorophylle *a*.

Les profils verticaux de concentration en sels nutritifs (nitrates, nitrites, phosphates et silicates) en fonction de la profondeur sont moins homogènes que ceux de température et de salinité (fig 7).

Les concentrations en nitrates sont celles qui présentent le plus de variation: de 0 à 32 microgramme atome d'azote par litre ($\mu\text{g at. N L}^{-1}$). Dans la majorité des cas, la teneur en nitrates est nulle (la moitié des stations) ou comprise entre 5 et 10 $\mu\text{g at. N L}^{-1}$ (stations 7, 9, 10, 11, 12 et 20). Les plus fortes concentrations (20 à 30 $\mu\text{g at. N L}^{-1}$) sont mesurées à proximité de l'embouchure de l'Escaut (stations 7 et 10). Les écarts entre les valeurs de concentrations aux différentes stations sont nettement plus importants que ceux mesurés sur la profondeur. Les concentrations en nitrites varient dans un moindre intervalle (0 à 1.2 $\mu\text{g at. N L}^{-1}$). Les concentrations en phosphates varient de 0 à 3 $\mu\text{g at. P L}^{-1}$ tant verticalement qu'horizontalement. Les concentrations en silicates varient entre 0 et 4 $\mu\text{g at. Si L}^{-1}$ et marquent généralement comme pour les phosphates, une augmentation avec la profondeur. Très souvent des maxima s'observent entre 10 et 20 mètres de profondeur (stations 2, 3, 6, 8, 11, 13, 17, 19 et 20). En résumé, les variations de concentration des nitrates mesurées sur le plan horizontal sont fortes relativement aux nitrites, phosphates et silicates. Par contre, en station, les concentrations en nitrates et en nitrites varient peu en fonction de la profondeur alors que les variations en station des phosphates et des silicates sont plus importantes.

Comme pour la température et la salinité, les courbes d'isoconcentration en nutriments sont parallèles à la côte et suivent les lignes du courant résiduel. Ces courbes marquent des maxima en face de l'embouchure de l'Escaut et au nord des embouchures de la Meuse et du Rhin. Les variations spatiales observées pour les nutriments sont aussi à mettre en relation avec l'équilibre production-consommation de l'écosystème. La fluorescence de l'eau (fig 11) et la concentration en chlorophylle *a*, toutes deux indicatrices de la biomasse phytoplanctonique, ont une distribution analogue à celle de la salinité. Les valeurs les plus élevées (90 FRU et 38 $\mu\text{g chl a L}^{-1}$) sont situées près des côtes et plus précisément au large de la côte belge dans la région de la plume de l'Escaut. L'extension de la tache de phytoplancton est encore plus marquée vers le sud ouest, en accord avec l'existence du gyre et le temps significatif de ce niveau trophique. La zone d'influence de la Meuse et du Rhin affiche des valeurs plus faibles (60 FRU et 10 $\mu\text{g chl a L}^{-1}$).

Au large, une zone où la concentration en chlorophylle est comprise entre 2 et 6 $\mu\text{g de chlorophylle a par litre}$ se maintient dans toute la partie centrale de la Baie Sud. Elle marque une limite au delà de laquelle les concentrations en nitrates sont inférieures à 2 $\mu\text{g at. N L}^{-1}$. L'azote constitue le plus souvent un élément limitant de la production primaire dans ce type d'écosystème (Rousseau et Lancelot, 1989)

Les plus hautes valeurs de biomasse zooplanctonique sont observées au sud-ouest et au nord-est du delta Escaut-Meuse-Rhin. Ces résultats coïncident parfaitement avec la répartition des paramètres physico-chimiques vu précédemment, nous renforçant dans l'idée de l'existence d'un courant résiduel dirigé vers le sud-ouest au niveau de la côte belge. La zone côtière comprise entre le Pas-de-Calais et l'estuaire de l'Escaut (1S) joue un rôle important sur la distribution et la caractérisation faunistique des communautés zooplanctoniques (Hecq, 1992). Les communautés zooplanctoniques de la Baie Sud sont pour la plupart originaires de la Manche. La Baie Sud contribue à l'augmentation de la diversité et de la biomasse zooplanctonique. La zone d'abondance est située en bordure

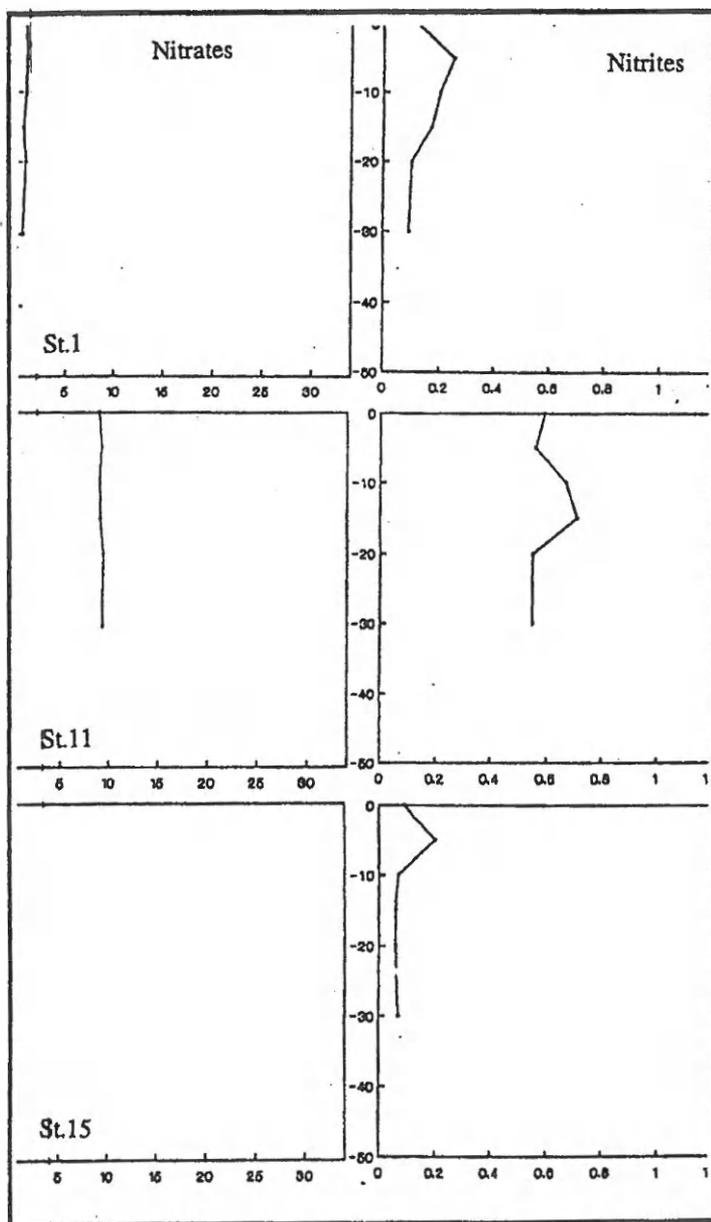


Figure 7.- Profils verticaux de nitrates (NO_3 ; $\mu\text{g at. N L}^{-1}$) et nitrites (NO_2 ; $\mu\text{g at. N L}^{-1}$) aux stations 1, 11 et 15.

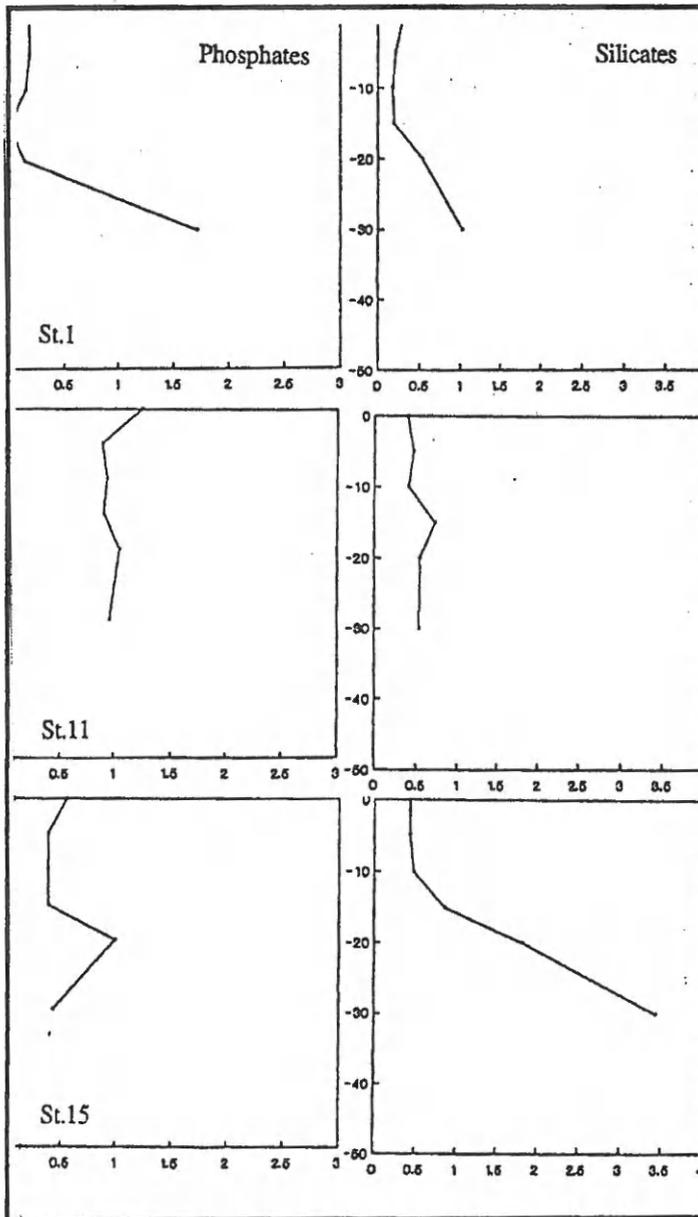
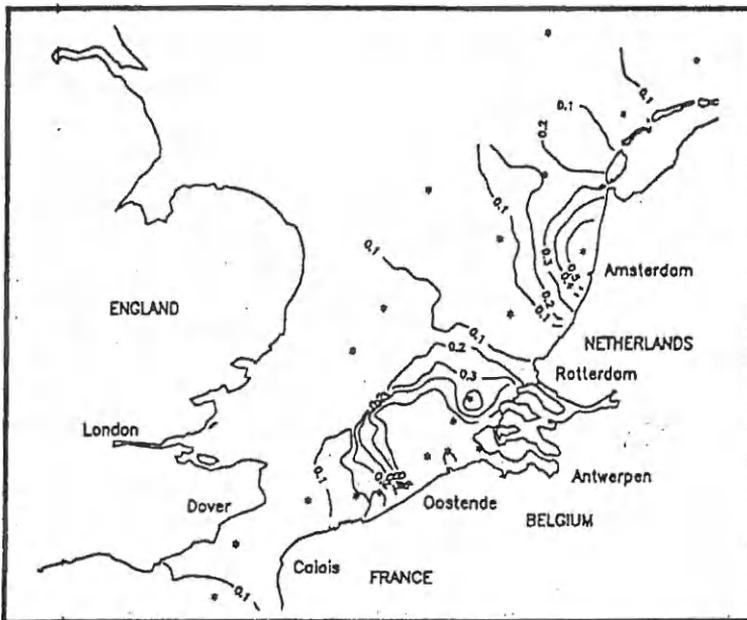
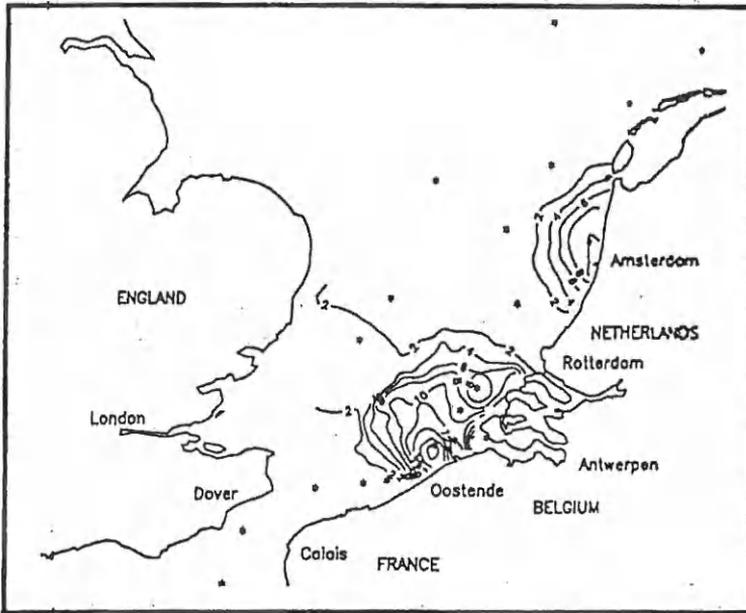
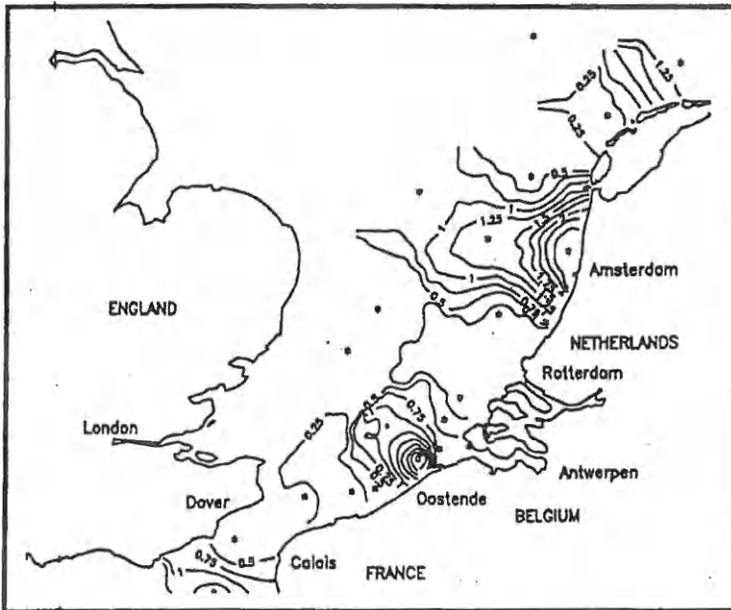
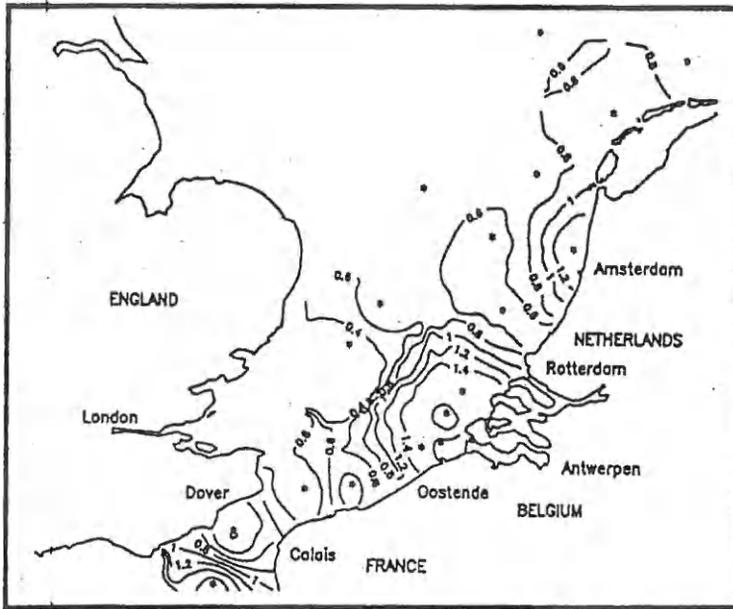


Figure 8.- Profils verticaux des phosphates (PO₄; µg at. N L⁻¹) et des silicates (SiO₄; µg at. N L⁻¹) aux stations 1, 11 et 15.



Figures 9.- Distribution des courbes d'isoconcentration en nitrates et nitrites de surface réalisée d'après les données en station.



Figures 10.- Distribution des courbes d'isoconcentration en phosphates et silicates de surface réalisée d'après les données en station.

des taches de phytoplancton. Dès le printemps, il y a mise en place d'une distribution spatiale stationnaire de communautés planctoniques étagées le long du courant résiduel atlantique et définies chacune par un niveau trophique dominant. Le phytoplancton se trouve en face de la côte belge, le zooplancton herbivore entre la zone 1S et 2, les carnivores en zone 1N et les omnivores au niveau du delta. Les communautés forment en zone 2 des chaînes trophiques plus complètes (fig. 13).

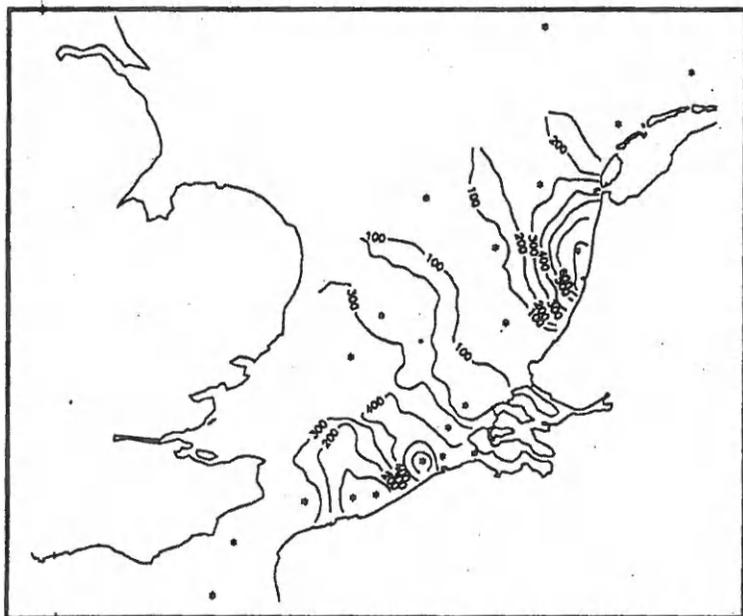


Figures 11.- Distribution des courbes d'isofluorescence de surface réalisées d'après les données en continu.

Si la distribution de ces communautés est relativement stationnaire, l'échelle temporelle d'une saison est marquée par un certain nombre de fluctuations conditionnées par la circulation résiduelle. Il ne faut cependant pas négliger les courants transitoires, qui affectent le mouvement des masses d'eaux, particulièrement dans la zone néritique côtière.

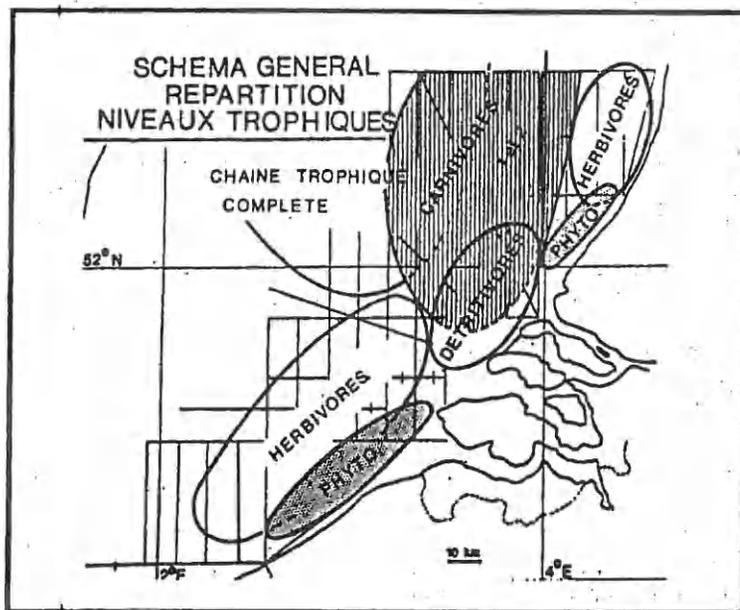
CONCLUSIONS

Sur base de l'analyse du contexte hydrologique, un réseau d'échantillonnage a été établi pour obtenir, grâce aux résultats d'une seule campagne, une vue synoptique de la distribution des paramètres planctoniques en Baie Sud de la Mer du Nord (secteur Est). Des radiales d'échantillonnage ont été effectuées perpendiculairement à la côte avec une fréquence plus élevée à proximité des estuaires, mais en tenant compte de l'extension de la plume liée aux gyres résiduels. Les résultats acquis au cours de cette campagne ont été traités de manière codifiée, grâce à une technique informatique apparentée à la reconstruction des champs incomplets de données, utilisable à bord du bateau et s'exprimant dans un langage commun à toutes les disciplines. De manière générale, les



Figures 12.- Distribution des courbes d'isoconcentration en chlorophylle a et en zooplancton (poids frais) de surface réalisée d'après les données en continu.

valeurs des divers paramètres mesurés sont comparables avec les observations réalisées au cours des campagnes précédentes et celles disponibles dans la littérature. Les isolignes se distribuent parallèlement aux côtes. Ces isolignes sont déformées au niveau des estuaires et sont disposées de manière concentrique le long des plumes. L'influence de l'Escaut se marque au large de la côte belge en direction du sud-ouest et son extension vers le large est d'environ 15 à 20 miles. Le contact entre les eaux de la plume et les eaux du large se marque par un fort gradient à caractère frontal. La forme de cette zone d'influence est imposée par la structure du panache estuarien et du gyre



Figures 13.- Distribution des dominances des principaux niveaux trophiques en Baie Sud (Hecq, 1992).

résiduel qui lui est associé et conserve un schéma relativement constant pour tous les paramètres. L'extension de la zone d'influence diffère cependant suivant le paramètre envisagé. Ainsi, la zone d'extension de la chlorophylle recouvre une surface nettement plus importante que celle de la salinité. Ceci confirme l'existence d'une échelle spatiale et temporelle propre à chaque paramètre et à chaque processus biologique. Comparativement aux résultats acquis précédemment sur un réseau à maille plus lâche, la plume d'extension de l'Escaut montre que l'effet du gyre s'est marqué plus loin encore vers le sud-ouest. De plus, on peut émettre l'hypothèse que les eaux de l'Escaut ont à long terme une influence sur la zone du Pas-de-Calais et de la Manche, du moins via les constituants de la chaîne alimentaire. L'influence de la plume du Rhin et de la Meuse se marque plus vers le nord-est, le long des côtes hollandaises et son extension est beaucoup moins marquée vers le large avec pour conséquence la plus faible productivité phytoplanctonique de cette plume. D'autre part, ces observations ont confirmé l'existence de plusieurs masses d'eau océaniques évoluant différemment selon

les échelles spatiale et temporelle et subissant des influences diverses. Cependant, si les masses d'eaux de la Baie Sud sont bien individualisées sur le plan horizontal, leur homogénéité verticale a été largement illustrée. Cette stratégie a permis de montrer que si les profils verticaux étaient superflus, de manière générale, à cause de l'homogénéité de la colonne d'eau, il est apparu que 20 stations n'étaient pas suffisantes pour une description synoptique. Des radiales perpendiculaires à la côte montrant de manière plus précise la distribution de tous les paramètres intégrés. Des mesures plus intensives devraient être réalisées d'une part dans le Pas-de-Calais et le secteur proche de la Manche de manière à élucider d'éventuels échanges et d'autre part plus au nord au niveau du Dogger Bank pour comprendre l'influence du front tidal.

REMERCIEMENTS

Ce travail est subsidié par la Communauté Française de Belgique (programme d'Actions de Recherches Concertées de l'Université de Liège - Convention 89 / 94-131). Il a été réalisé à bord du Belgica lors de la campagne LIPIDS 89 organisée par l'Unité d'Écohydrodynamique de l'Université de Liège dans le cadre des Actions de Recherches Concertées en Océanographie.

Les auteurs remercient les gestionnaires (UGMM), le Commandant et l'équipage du Belgica. La collecte des données et des échantillons ont été également possible grâce à MM J. BACKERS, P. DAUBY, M. ELSKENS, C. LEJEAR, A. POLLENTIER et E. TAMIGNEAUX.

BIBLIOGRAPHIE

- BRASSEUR P. and HAUS J. (1991). Application of a 3-D variational inverse model to the analysis of ecohydrodynamic data in the Northern Bering and Southern Chukchi Seas. *Journal of Marine Systems*, 1: 383-401.
- DJENIDI S. (1987). *Modèles mathématiques et dynamique des mers continentales d'Europe septentrionales*, Collections de la faculté des Sciences appliquées, ULG 220pp.
- DJENIDI S., (1990). Fronts tidaux sur le plateau continental nord-ouest européen. *Bull. Soc. Roy. Sci. de Liège*, 59 :205-216.
- HECQ J. H. 1982. *Distribution des communautés zooplanctoniques en relation avec le cycle du carbone en baie sud de la mer du Nord*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, 249 pp.
- HECQ J. H. 1992. Caractérisation du mésozooplancton en baie sud de la mer du Nord. (soumis pour publication).
- HECQ J.H., VEESCHKENS C., MATHIEU T. et GUILLAUME A. (1992). Caractérisation pigmentaire et floristique du phytoplancton en Baie sud de la Mer du Nord en situation hivernale (soumis pour publication).
- NIHOUL J.C.J. et RONDAY F., (1976). *Modèle hydrodynamiques*, Programme National R-D sur l'Environnement. Projet Mer, Rapport Final, J.C.J. Nihoul Ed. 3, 270 pp.
- NIHOUL J.C.J. and HECQ J.H., (1984). Influence of the residual circulation on the physicochemical characteristics of water masses and the dynamics of the ecosystems in the belgian coastal zone. *Continental Shelf Research*, 3, 167-174.

- NIHOUL J.C. and DJENIDI S., (1987). Perspective in Three-Dimensional Modelling of the Marine System *Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics*. Elsevier Amsterdam. :1-34.
- NIHOUL J.C., DJENIDI S. ET HECQ J.H., (1989). Modelling coastal/shelf systems with emphasis on long term trends. *International journal for numerical methods in engineering*. 27: 113-127.
- PINGREE R. D., HOLLIGAN P.M. and MARDELL G.T., (1979). Phytoplankton growth and cyclone eddies. *Nature* , 278: 245-247.
- ROUSSEAU V. and LANCELOT C., (1989). Phaeocystis spring bloom in the continental coastal zone of the North Sea. *Progress in Belgian Oceanographic Research*, Proceedings of the North Sea Symposium Held in Ghent, :225-246.