

Flux de nutriments entre la Manche et la Mer du Nord. Situation actuelle et évolution depuis dix ans

Nutriments
Flux
Pas-de-Calais

Nutrients
Fluxes
Dover Strait

Daniel BENTLEY ^a, Robert LAFITE ^b, Nicholas H. MORLEY ^c, Rachael JAMES ^c, Peter J. STATHAM ^c and Jean-Claude GUARY ^a

^a CNAM/INTECHMER, Laboratoire de Biogéochimie Marine, B.P. 324, 50103 Cherbourg Cedex, France.

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

^c University of Southampton, Department of Oceanography, SO9 5NH Southampton, U.K.

RÉSUMÉ

L'estimation des flux de substances chimiques dissoutes et notamment de nutriments à travers le détroit du Pas-de-Calais, menée dans le cadre du programme «*MAST I-FluxManche*», repose sur des prélèvements mensuels effectués lors de transects Folkestone-Cap Gris Nez. De septembre 1990 à novembre 1991, l'échantillonnage a été réalisé systématiquement sur six stations et à deux profondeurs. Les résultats de ces campagnes permettent d'évaluer les concentrations moyennes sur le site et d'en déduire des données quantitatives de transfert de nutriments grâce aux flux hydrodynamiques calculés à l'aide des modèles hydrodynamiques numériques. Les flux ainsi calculés sont d'environ 180.10^3 t/an d'azote nitreux et nitrique, 30.10^3 t/an de phosphore dissous et 240.10^3 t/an de silicium dissous. L'inquiétude actuelle concernant l'élévation possible des rejets d'azote et de phosphore dans le milieu marin, que semblent confirmer les observations faites en Mer du Nord par les équipes hollandaises, a conduit à comparer les données actuelles à celles enregistrées lors de campagnes effectuées à bord de car-ferries de 1979 à 1981. Les augmentations observées restent faibles et du même ordre de grandeur que les variations interannuelles (+ 0,85 $\mu\text{mol/l}$ N-NO₂ + NO₃, + 0,1 $\mu\text{mol/l}$ P-PO₄, + 1,1 $\mu\text{mol/l}$ Si entre 1979-1980 et 1990-1991).

Oceanologica Acta, 1993. 16, 5-6, 599-606.

ABSTRACT

Nutrient fluxes between the English Channel and the North Sea. Actual situation and evolution since ten years

As part of the *MAST I-FluxManche* initiative, a monthly (September 1990 to November 1991) sampling programme has been carried out in the Dover Strait. Samples were taken (weather permitting) at two depths at each of six standard stations between Folkestone and Cap Gris-Nez. Data from all surveys, in conjunction with estimates of water movement derived from hydrodynamic numerical model, have been used to calculate fluxes of nutrients between the Channel and the North Sea. Results demonstrate that although nutrient concentrations are lower in the central channel-waters than in the coastal zone, the dissolved nutrient flux to the North Sea is more important for stations of the central part of the Dover Strait as water. Current concern about possible increases in nitrogen

and phosphate discharges to seawater, apparently confirmed for the southern North Sea by Dutch workers, prompted a comparison of the present data set with values obtained by sampling from car-ferrys during the period 1979-81. That long time scale investigation does not show more important increase than interannual variability can do (+ 0,85 $\mu\text{mol/l}$ N-NO₂ + NO₃, + 0,1 $\mu\text{mol/l}$ P-PO₄, + 1,1 $\mu\text{mol/l}$ Si from 1979-1980 to 1990-1991).

Oceanologica Acta, 1993. 16, 5-6, 599-606.

INTRODUCTION

Les travaux réalisés sur les problèmes d'eutrophisation en Mer du Nord (van Bennekom *et al.*, 1975 ; Nelissen et Stefels, 1988) ont conduit récemment à l'estimation des sources de nutriments en Mer du Nord (Zevenboom *et al.*, 1987 ; Billen, 1989 ; van Bennekom et Wetsteijn, 1990). Il est généralement admis que les sources de nutriments en Mer du Nord sont essentiellement les apports fluviaux (Escaut, Rhin et Meuse ; van Bennekom et Wetsteijn, 1990), mais que les apports d'eaux atlantiques enrichies arrivant par le détroit du Pas-de-Calais peuvent constituer un apport de base non négligeable (Laane *et al.*, 1992). Du côté français, des mesures de concentration en nutriments ont été effectuées dans le détroit du Pas-de-Calais dans le cadre du réseau national d'observation du milieu marin ou d'études du site de la centrale électro-nucléaire de Gravelines, ou encore pour la caractérisation de masses d'eau circulant en Manche (Bentley, 1985 ; Brylinski *et al.*, 1984 ; Quisthoudt *et al.*, 1987) ; mais ces mesures n'étaient pas associées à des mesures de flux d'eau entre la Manche et la Mer du Nord et les quantités de matières transportées n'avaient pas été évaluées. Le programme *MAST I-FluxManche* associant une étude pluridisciplinaire des eaux du détroit du Pas-de-Calais aux calculs de flux d'eau à l'aide du modèle numérique (Salomon *et al.*, 1992 ; Grochowski *et al.*, 1992), a permis une estimation des flux de nutriments transportés.

De Jonge et Postma (1974), Billen (1989), van Bennekom et Wetsteijn (1990) ont mis en évidence une augmentation de la concentration en nutriments dans les eaux du Pas-de-Calais et du sud de la Mer du Nord dans les dernières décennies. Laane *et al.* (1992), confirment cette tendance en analysant les résultats collectés dans la littérature depuis 1930. Nous avons choisi de comparer les données acquises lors du programme *MAST I-FluxManche* en 1990-1991 avec celles obtenues en 1979-1980 sur le même site, à partir de campagnes «car-ferry», et utilisant des techniques analytiques similaires.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

A chacune des six stations hydrologiques du programme *MAST I-FluxManche* (fig. 1 ; de fx-1, côte anglaise, à fx-6, côte française) a été effectué un prélèvement dit de surface (entre 0 et 5 m) et un prélèvement dit de profondeur (entre 15 et 20 m) à l'aide de pompes et tuyaux en

polytétrafluoroéthylène (PTFE). Un volume de 250 ml d'eau de mer est immédiatement filtré sur membrane nylon (diamètre 47 mm, pore 0,45 μm) puis réparti dans deux flacons en polyéthylène stockés en glacière ou congelés immédiatement. Pour limiter l'évolution des concentrations, la conservation des échantillons au congélateur (-20°C) n'excède jamais deux mois. L'azote nitreux et nitrique, les phosphates et les silicates sont dosés, après décongélation une nuit à température ambiante, à l'aide d'un auto-analyseur à flux continu (Technicon AA II) en utilisant les méthodes mises au point par Treguer et Le Corre (1975). Lors du suivi «car-ferry» réalisé en 1979-1980, les prélèvements étaient effectués en surface pendant la marche du bateau, les échantillons ainsi collectés ont été analysés avec la même méthodologie qu'en 1990-1991.

RÉSULTATS

La représentation en trois dimensions des résultats obtenus permet une vue globale des cycles saisonniers et de la répartition spatiale des concentrations en nutriments. Pour les nitrites et nitrates (fig. 2), on observe, en surface comme en profondeur, un maximum hivernal (20 $\mu\text{mol/l}$ en janvier 1991) et des concentrations très faibles (voire inférieures à la limite de détection (0,1 $\mu\text{mol/l}$) en juillet et août, cela tout au long de la radiale. Pour les stations «centrales», le

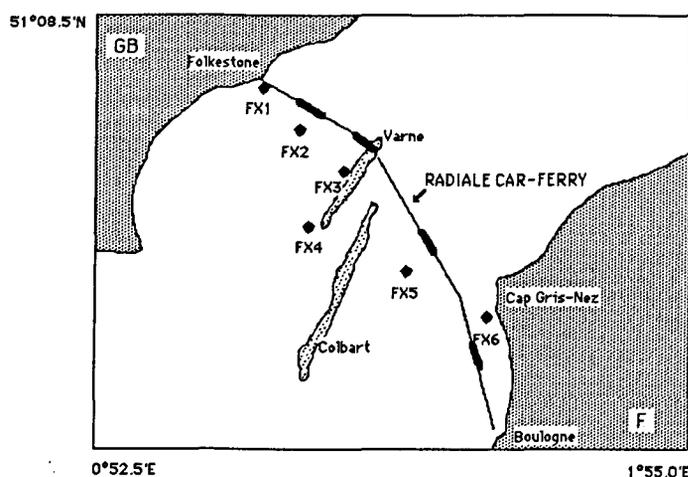


Figure 1

Localisation des stations de prélèvement du programme *MAST I-FluxManche* (1990-1991) et des sites de prélèvements sur les radiales «car-ferry» (1979-1980).

Situation of MAST I FluxManche sampling stations (1990-1991) and of car-ferrys sampling sites (1979-1980).

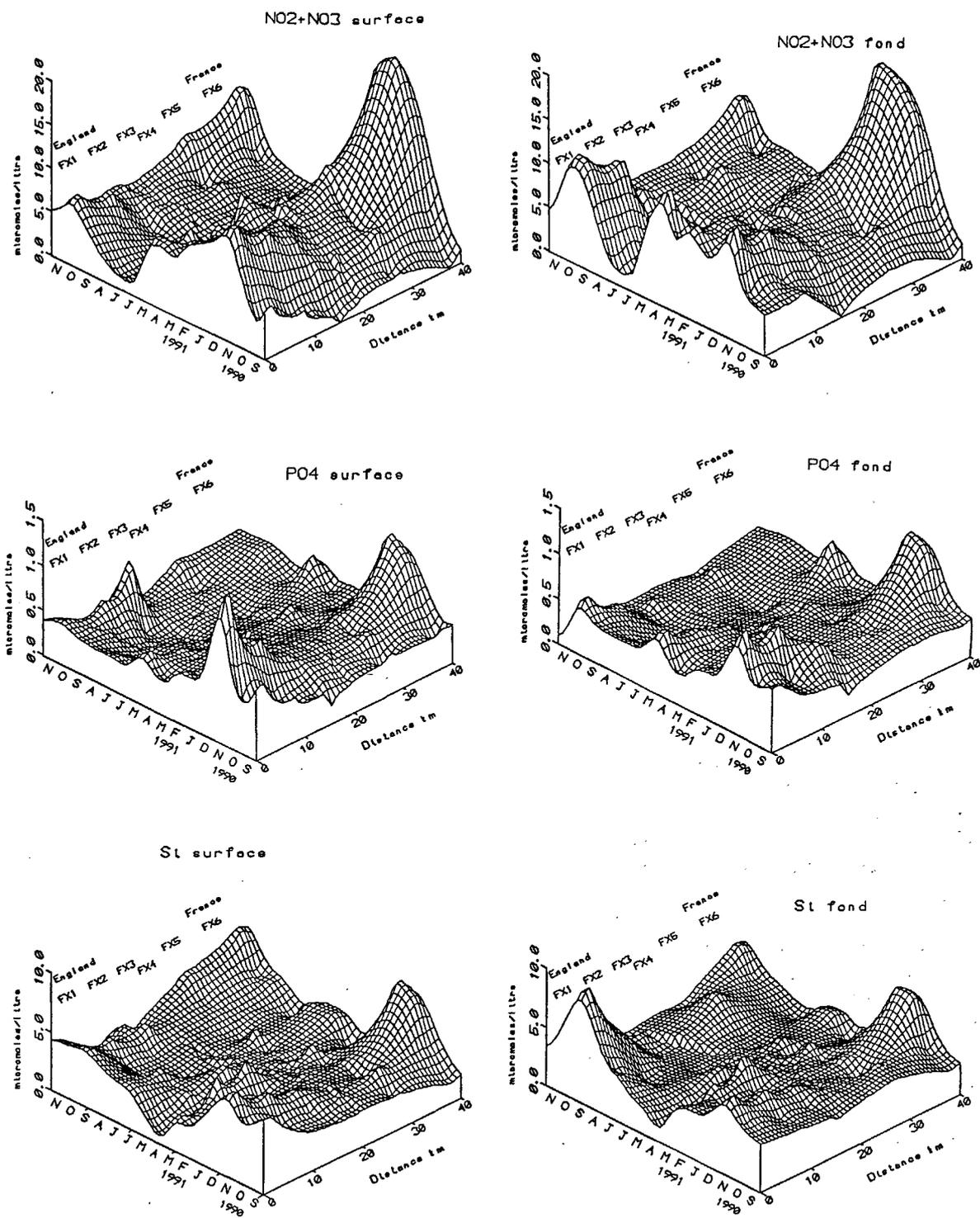


Figure 2

Variations saisonnières et spatiales des concentrations en nutriments durant la période d'étude.

Seasonal and spatial distribution of nutrients concentrations during the sampling period.

relief du diagramme 3D est atténué par rapport aux stations côtières car les variations sont essentiellement liées aux cycles biologiques, l'influence tellurique n'y étant pas directement perceptible, comme le confirme le tracé comparé des isolignes de salinité et de nitrites + nitrates (fig. 3). On constate, en effet, la part prépondérante des phénomènes saisonniers (isolignes perpendiculaires à l'axe du temps), avec une chute printanière des concentrations et

des valeurs estivales faibles tout au long de la radiale. Ces phénomènes saisonniers sont perturbés en zone côtière (stations 1, 2 et 6) sous l'effet des apports telluriques comme le montre le tracé des salinités, relativement indépendant des variations saisonnières, mais qui associe les dessalures aux pics de concentration. Les diagrammes (fig. 2) sont sensiblement similaires en surface et au fond sauf pour la station 1 (côte anglaise) où les concentrations

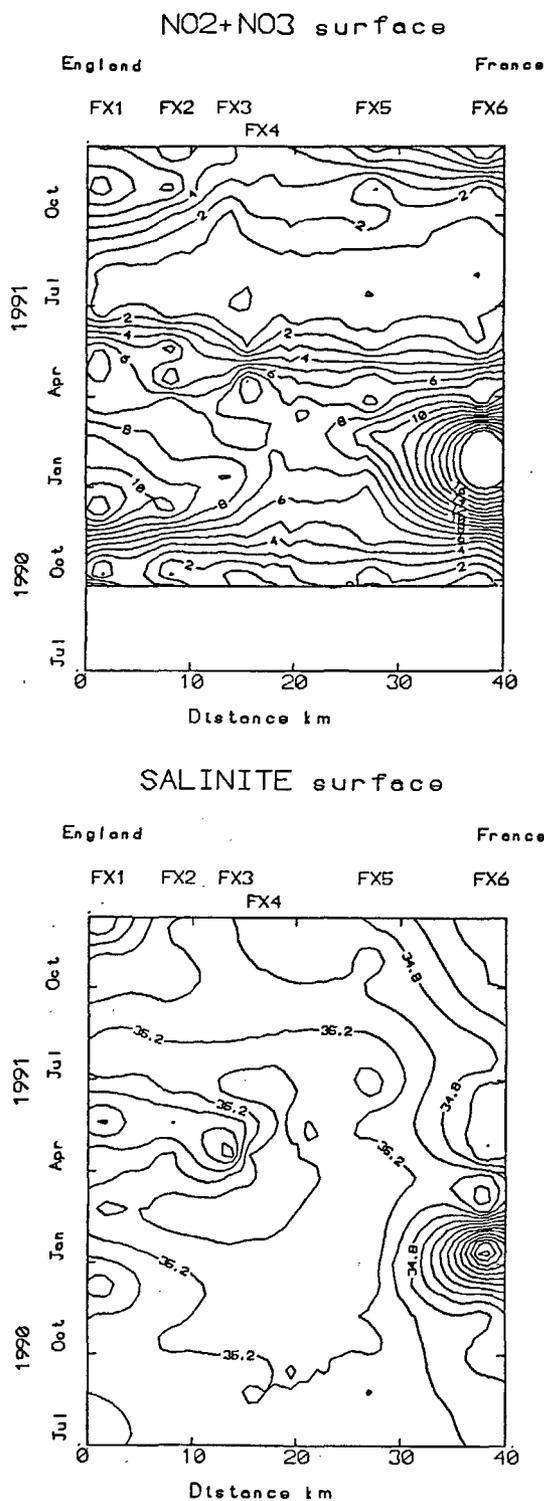


Figure 3

Tracé comparé des isolignes de concentration en nitrites + nitrates et des isohalines pendant la période d'étude.

Graph of isolines of nitrites + nitrates concentration compared with the graph of salinity.

en avril, septembre et octobre 1991 sont plus élevées au fond du fait de la remise en suspension de matériel profond en cours de minéralisation (par exemple en septembre : 5,1 $\mu\text{mol/l}$ en surface et 12,1 $\mu\text{mol/l}$ en profondeur). Les concentrations en MES sont d'ailleurs nettement plus élevées au fond qu'en surface à ces dates (Lafite *et al.*, 1992).

Les phosphates (fig. 2) présentent, à une échelle dix fois inférieure, des variations comparables à celles des nitrites + nitrates. Le cycle saisonnier est moins marqué, mais les stations du centre du détroit présentent en juillet des valeurs inférieures à la limite de détection (0,02 $\mu\text{mol/l}$) alors que les concentrations maximales sont relevées en janvier, en zones côtières.

Les concentrations les plus élevées en silicium dissous sont mesurées en décembre et janvier, les plus basses en avril (fig. 2), et ce de façon plus accentuée en zone littorale. Comme pour les nitrites et nitrates les valeurs de «profondeur» en septembre et octobre 1991 sont nettement supérieures à celles de surface à la station 1 (par exemple en septembre : 4,9 $\mu\text{mol/l}$ en surface et 10 $\mu\text{mol/l}$ en profondeur).

DISCUSSION

Les différentes zones du détroit du Pas-de-Calais sont donc soumises aux cycles saisonniers, avec accentuation du phénomène en zone côtière sous l'effet des apports, notamment du littoral français (Seine, Somme, Authie, Canche et Liane). Les moyennes et les écart-types des concentrations aux différentes stations, présentées sous forme de graphiques à la figure 4, montrent que les stations 1 et 6 présentent des concentrations plus élevées et plus variables que les quatre autres stations, et ceci pour tous les nutriments mesurés. Les écart-types élevés en zone côtière française sont liés aux conditions d'apports, les rejets étant effectués majoritairement en mer sur la côte britannique ; ils le sont par les rivières en France, et sont donc soumis aux variations de débits (van Bennekorn et Wetsteijn, 1990).

Cependant, à partir des flux d'eau calculés par modélisation mathématique (Salomon *et al.*, 1992) en tenant compte de l'hydrodynamique du site et de la météorologie, on peut montrer que les quantités de nutriments dissous transportées à travers le détroit sont plus importantes entre les stations 3 et 5 (boîtes 5 à 9 du modèle) donc dans le «chenal» plus profond du détroit, à l'est des bancs du Colbart et du Varne (fig. 5). Les cycles saisonniers des concentrations en nutriments affectent bien entendu aussi les quantités transportées à travers le détroit, et l'on peut observer un maximum hivernal et un minimum au printemps (de mars à mai) pour la silice et en été pour nitrites et nitrates. Ces cycles sont liés à la succession des populations planctoniques sur cette zone où une floraison importante de diatomées débute dès mars, épuisant le stock de silicium dissous précédant d'autres espèces telles que *Phaeocystis*, qui réduiront aussi le stock d'élément azoté (Lancelot, 1989). Ceci est confirmé par les valeurs moyennes de chlorophylle *a* relevées sur l'ensemble de la radiale au printemps, qui sont de 3,3 $\mu\text{g/l}$ en mars, 1,3 $\mu\text{g/l}$ en avril et 1,8 $\mu\text{g/l}$ en mai, contre seulement 0,5 $\mu\text{g/l}$ pour les autres mois de l'année (Lafite *et al.*, 1992). Comme pour les concentrations, les flux de phosphate et de silice sont influencés par les variations saisonnières (fig. 6) ; cependant les rapports minimum/maximum de ces flux sont d'environ 1/6 alors qu'ils atteignent 1/40 pour l'azote nitreux et nitrique. Un tableau récapitulatif

(tab. 1) met en évidence l'extrême variabilité des flux de nutriments dissous transportés, liée aux conditions météorologiques et aux flux d'eau induits (comme le montrent les écarts-types mensuels importants). On note aussi d'importantes différences inter-annuelles pour les mois de septembre, octobre et novembre 1991 par rapport aux mêmes mois en 1990.

Les données acquises sur le même site en 1979-1980 à partir des prélèvements effectués à bord des car-ferries permettent d'aborder le problème de l'augmentation des concentrations sur une période de dix ans. La comparaison des moyennes, obtenues sur un même nombre d'observations (n = 15), pour quatre stations communes aux deux suivis (fig. 1 et 7), indique une légère augmentation pour l'ensemble des nutriments mesurés ainsi qu'une baisse des températures. Cette baisse des températures (- 0,7°C) est inférieure aux variations inter-annuelles mesurées pendant le suivi 1990-1991 (+ 1,3°C en moyenne sur quatre mois entre 1990 et 1991). Les salinités ont été mesurées par des méthodes différentes (méthode de Mohr-Knudsen puis mesures par sonde CTD *in situ*), et la différence observée ne sera pas discutée. Si, par contre, on compare les augmentations moyennes des concentrations en nutriments avec les variations inter-annuelles observées sur les mois de septembre, octobre et novembre 1991 par rapport à 1990, on constate que l'évolution sur dix ans est du même ordre de grandeur, voire inférieure (cas de l'azote nitreux et nitrique), à celle mesurée en un an (tab. 2).

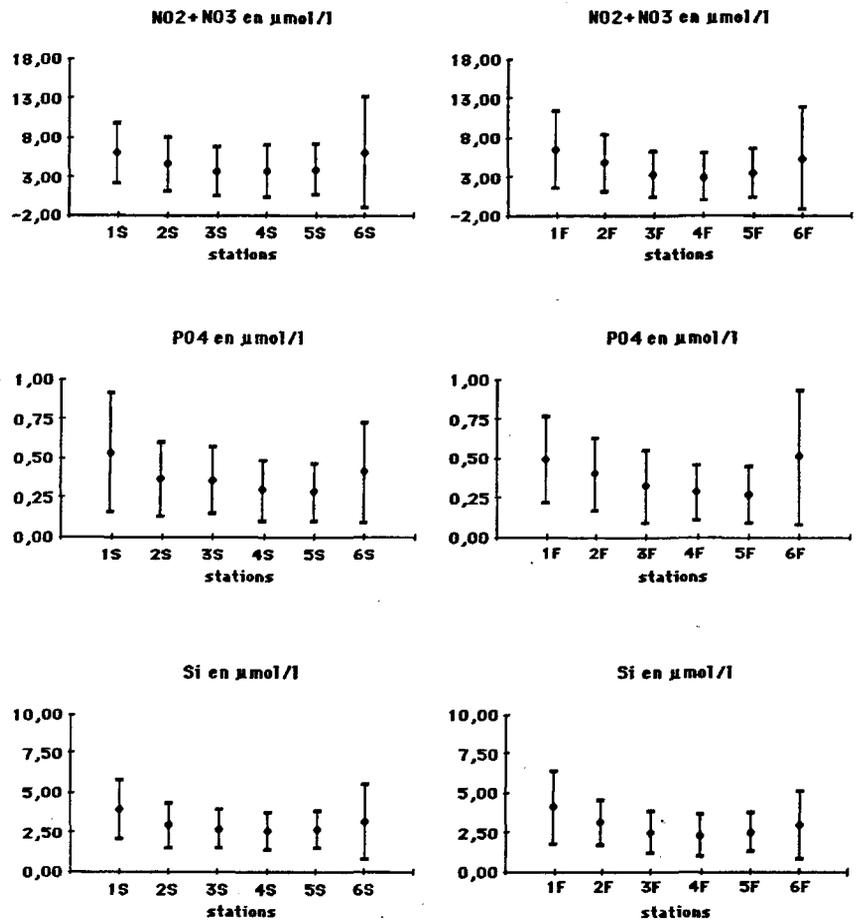


Figure 4

Moyennes et écart-types de l'ensemble des mesures sur la radiale (stations fx1 à fx6, S = surface, F = fond, n = 15; septembre 1990 à novembre 1991)

Means and standard-deviations of all the data (station fx1 to fx6, S = surface, F = bottom, n = 15; September 1990 to November 1991).

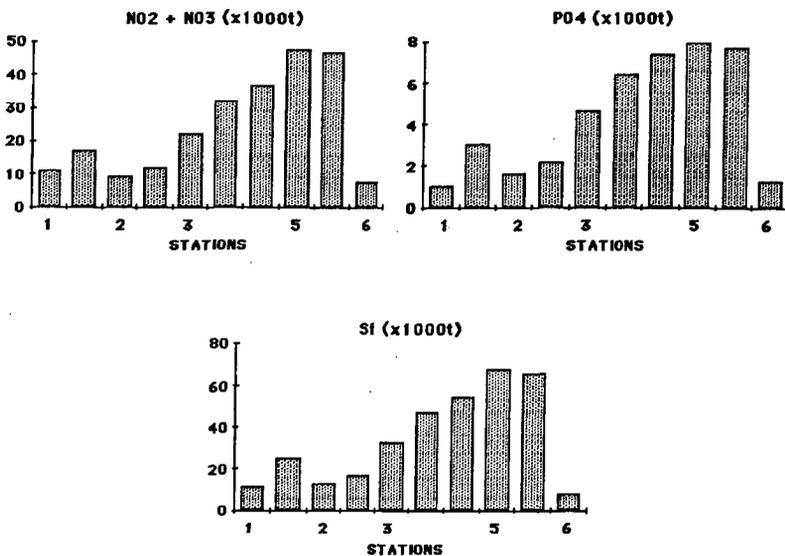


Figure 5

Quantités de nutriments transportés par «boîte» du modèle mathématique, à travers le détroit du Pas-de-Calais.

Quantities of dissolved nutrients carried for each "box" of the mathematical model, through the Dover strait.

CONCLUSION

Il apparaît que les zones côtières subissent une augmentation des concentrations en nutriments sous l'effet des apports telluriques (du littoral français notamment). La part de ces apports fluviaux dans le flux global de nutriments à travers le détroit du Pas-de-Calais est actuellement à l'étude à partir d'informations de débits et de concentrations relevées dans les fleuves côtiers français. De même, le rôle des estuaires côtiers picards par rapport à l'impact de la Seine reste à appréhender. Les flux de nutriments estimés pendant cette étude montrent que la majorité du transport se fait dans la partie orientale du détroit entre les bancs du Varne et du Colbart et le littoral français.

La prise en compte par d'autres auteurs (Laane *et al.*, 1992) de la phase particulière du phosphore et de l'azote amène à des valeurs de flux nettement plus importantes

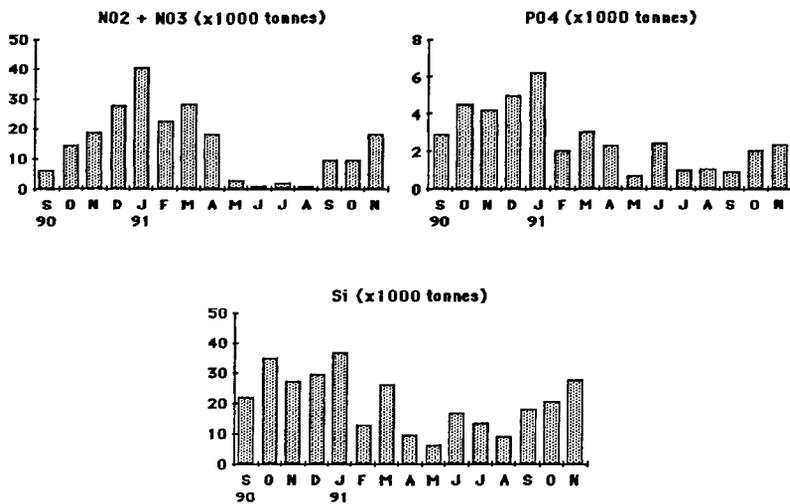


Figure 6

Quantités de nutriments transportées à travers le détroit du Pas-de-Calais pendant la période d'étude.

Quantities of dissolved nutrients carried through the Dover Strait during the sampling period.

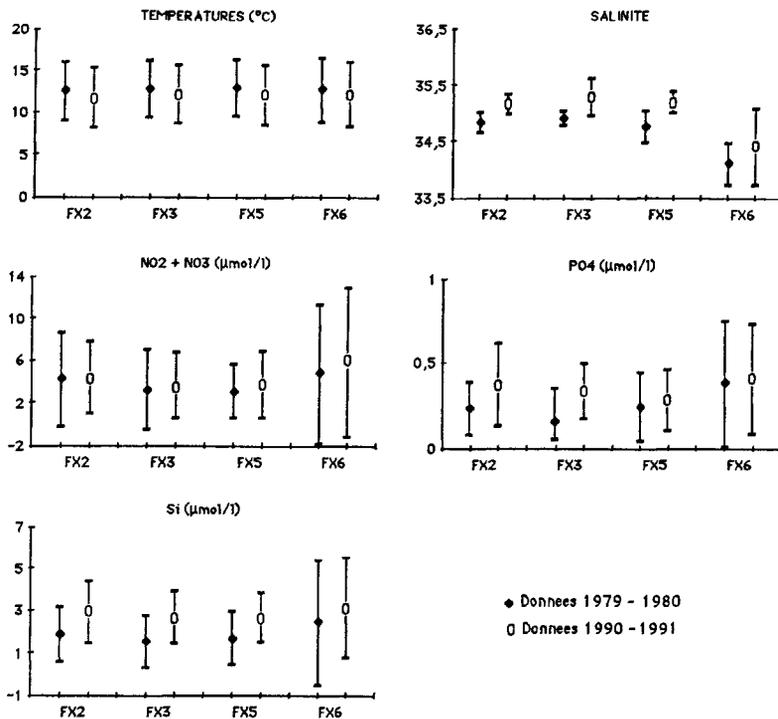


Figure 7

Moyennes et écart-types obtenus sur l'ensemble des observations mensuelles (n = 15) en 1979-1980 et en 1990-1991.

Means and standard-deviations of all data collected during fifteen cruises in 1979-1980 and 1990-1991.

(environ deux fois) que les nôtres ou que celles d'autres auteurs (Postma, 1973 ; Brockman *et al.*, 1988). Des dosages dans la phase particulaire ont été réalisés à l'Université de Southampton, ce qui permettra d'estimer la part de cette phase dans le flux des nutriments mesurés lors de certaines campagnes. Les données acquises sur le même site en 1979-1980 montrent une légère augmentation pour l'ensemble des nutriments mesurés, mais l'évo-

lution sur dix ans est du même ordre de grandeur que celle mesurée en un an. Il serait donc très intéressant de réaliser des suivis à long terme à partir d'échantillonnages et de techniques analytiques comparables pour appréhender les problèmes d'évolution des concentrations en nutriments, ce d'autant que des travaux récents semblent montrer une augmentation des rejets d'azote par les fleuves due paradoxalement à une amélioration du traitement des eaux de rivière, amélioration qui réduirait la capacité naturelle de dénitrification des rivières (Billen, 1989).

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux équipes des laboratoires de Chimie marine de l'Université de Lille I, d'IFREMER-Nantes, ainsi qu'aux équipages des différents navires océanographiques pour l'aide qu'ils nous ont apportée lors des missions. Ce travail a été financé et réalisé dans le cadre du Programme européen MAST I «FluxManche» (n°0053-C).

RÉFÉRENCES

van Bennekom A.J., W.W.C. Gieskes et J.B. Tjssens (1975). Eutrophication of Dutch coastal waters. *Proc. R. Soc., Lond.*, B 189, 359-374.

van Bennekom A.J. et F.J. Wetsteijn (1990). The winter distribution of nutrient in the southern bight of the North Sea (1961-1978) and in the estuaries of the Scheldt and the Rhine/Meuse. *Neth. J. Sea Res.*, 25, 1/2, 75-87.

Bentley D. (1985). Caractéristiques physico-chimiques des eaux du détroit du Pas-de-Calais. *J. Rech. océanogr.*, 10, 2, 69-71.

Billen G. (1989). N budget of major rivers discharging into the continental coastal zone of the North Sea, in : *Eutrophication and algal blooms in North Sea coastal zones, the Baltic and adjacent areas. C.E.C. water pollution research report n°12*, C. Lancelot, G. Billen and H. Barth, éditeurs. Bruxelles. 153-171.

Brockman V., G. Billen et W.W. Gieskes (1988). North Sea nutrients and eutrophication, in : *Pollution of the North Sea, an assessment*. W. Salomon, B.L. Bayne, E.K. Duursma et V. Försner éditeurs. Springer Verlag, Berlin. 348-389.

Brylinski J.-M., J. Dupont et D. Bentley (1984). Conditions hydrobiologiques au large du Cap Gris-Nez : premiers résultats. *Oceanologica Acta*, 7, 3, 315-322.

Grochowski N., M.B. Collins, S.R. Boxall, J.-C. Salomon et R. Lafite (1992). Sediment transport paths in the Eastern Channel, *Oceanologica Acta*, 16, 5-6, 531-537.

de Jonge V.N. et H. Postma (1974). Phosphorus compounds in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea. Res.*, 8, 139-153.

Tableau 1

Flux de nutriments à travers le détroit du Pas-de-calais.

Fluxes of nutrients through the Dover Strait.

		Eau Débit moyen 1000 m ³ /s	Flux d'azote (NO ₂ + NO ₃) 1000 t/mois	Flux de phosphore (PO ₄) 1000 t/mois	Flux de silicium (Si) 1000 t/mois
1990	SEPTEMBRE	87 ± 59	7 ± 8	3 ± 3	22 ± 19
	OCTOBRE	144 ± 80	14 ± 12	3 ± 2	34 ± 24
	NOVEMBRE	95 ± 97	18 ± 22	4 ± 5	26 ± 33
	DÉCEMBRE	104 ± 115	35 ± 48	7 ± 10	40 ± 55
1991	JANVIER	143 ± 108	52 ± 50	8 ± 7	46 ± 43
	FÉVRIER	79 ± 67	29 ± 33	2 ± 3	14 ± 15
	MARS	100 ± 85	27 ± 30	3 ± 4	30 ± 33
	AVRIL	75 ± 104	18 ± 26	2 ± 3	4 ± 6
	MAI	33 ± 56	3 ± 9	1 ± 2	4 ± 12
	JUIN	144 ± 61	1 ± 2	4 ± 2	22 ± 12
	JUILLET	113 ± 53	2 ± 2	1 ± 1	18 ± 14
	AOUT	82 ± 55	1 ± 1	2 ± 2	10 ± 9
	SEPTEMBRE	91 ± 55	13 ± 13	1 ± 1	22 ± 20
	OCTOBRE	94 ± 67	13 ± 15	3 ± 2	22 ± 19
	NOVEMBRE	133 ± 139	24 ± 29	2 ± 2	31 ± 37
			DÉBIT MOYEN 103 ± 26 x 1 000 m ³ /s	FLUX DE NO ₂ + NO ₃ 209 ± 91 x 1 000 t/an (septembre 1990 à septembre 1991)	FLUX DE PO ₄ 41 ± 15 x 1 000 t/an (septembre 1990 à septembre 1991)

Tableau 2

Moyenne des différences de concentrations en µ mol/l.

A : différences 1979-1980/1990-1991 ; B : différences septembre, octobre et novembre 1990/1991.

	NO ₂ + NO ₃		PPO ₄		Si	
	A	B	A	B	A	B
STATION 2	+ 0,5	+ 1,7	+ 0,16	+ 0,30	+ 1,2	- 1,0
STATION 3-4	+ 0,6	+ 0,9	+ 0,14	- 0,09	+ 1,3	- 0,7
STATION 5	+ 0,9	+ 0,0	+ 0,06	- 0,22	+ 1,1	- 0,3
STATION 6	+ 1,4	+ 1,8	+ 0,06	- 0,09	+ 0,9	+ 1,4

Laane R.W.P.M., G. Goeneveld, A. Devries, A.J. van Bennekom et J.S. Sydow (1992). Nutrients (P, N, Si) in the Channel and the Strait of Dover : seasonal and year-to-year variation and fluxes to the North Sea. Notitie, Directoraat General Rijkswaterstaat, éditeur, La Haye, NL, 19 pp.

Lafite R., S. Shimwell, N Grochowski, J.-P. Dupont, L. Nash, J.-C. Salomon et M.B. Collins (1992). Suspended particulate matter fluxes through the Strait of Dover. soumis à *Oceanologica Acta*.

Lancelot C. (1989). Phaeocysts blooms in the continental coastal area of the channel and the North Sea in : C.E.C. water pollution research report n°12, C. Lancelot, G. Billen and H. Barth, éditeurs. Bruxelles, 29-53.

Nelissen P.H.M. et J. Stefels (1988). Eutrophication in the North Sea, NIOZ rapport 1988-4.

Postma H. (1973). Transport and budget of organic matter in the North Sea, in : *North Sea Science*, éditeur, Goldberg Ed., MIT Press, Cambridge, UK, 326-334.

Quisthoudt C. D., Bentley et J.-M. Brylinski (1987). Discontinuité hydrobiologique dans le détroit du Pas-de-Calais. *J. Plankt. Res.*, 9, 995-1002.

Salomon J.-C., M. Breton et P. Guéguénat (1992). Flux d'eau calculé à travers le détroit du Pas-de-Calais. *Oceanologica Acta*, 16, 5, 449-455 (this issue).

Treguer P. et P. Le Corre (1975). Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Utilisation de l'AALI Technicon. Laboratoire d'Océanographie chimique, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 59 pp.

Zevenboom W., H.R. Bos et R.J. De Breugd (1987). Seasonal fluctuations in nutrient concentrations in the southern North Sea. Notitie : NZ-N-87.29. North Sea Directorate, éditeur. Rijswijk, Netherlands, 21 pp.