

23

LES ELEMENTS NUTRITIFS EN BAIE DE SEINE.

AMINOT A., KEROUEL R., MAUVAIS J.L.

1. Introduction

Au premier échelon de la chaîne alimentaire, le développement du phytoplancton est conditionné par la présence des éléments nutritifs, essentiellement l'azote et le phosphore nécessaires à toutes les espèces, mais également le silicium, indispensable aux algues à squelette siliceux, telles que les diatomées.

Dans les eaux côtières, les apports continentaux peuvent enrichir considérablement le milieu en azote et en phosphore (rejets industriels, urbains et agricoles). Un enrichissement excessif en un ou plusieurs éléments peut alors avoir des conséquences sur l'équilibre et la densité des populations naturelles.

La Baie de Seine représente un exemple de domaine côtier influencé par d'importants apports continentaux. Il était donc intéressant de connaître la répartition des différents éléments nutritifs à plusieurs époques de l'année. Nous nous intéresserons principalement aux éléments nutritifs minéraux à l'état dissous, qui représentent la majorité des espèces chimiques disponibles pour le phytoplancton.

Nous examinerons l'influence des eaux douces sur la baie d'une part en étudiant leur dilution, d'autre part en quantifiant les potentiels et les stocks nutritifs. Les relations avec le développement du plancton seront abordées.

2. Matériel et méthodes

Les résultats en baie de Seine ont été obtenus au cours de quatre campagnes : du 13 au 17 mai 1978, du 23 septembre au 5 octobre 1978, du 7 au 13 mars 1979, du 7 au 20 octobre 1983.

Les prélèvements ont été effectués à l'aide de bouteilles Niskin de 5 litres. Pour les sels nutritifs, les échantillons, préfiltrés à 50 μm , sont conservés en flacons de polyéthylène de 125 ml à -20°C jusqu'à l'analyse en laboratoire. Les analyses ont été réalisées selon les méthodes automatiques décrites par Tréguer et Le Corre (1975).

Les salinités ont été mesurées au salinomètre Guidline Autosol 8400.

* IFREMER. Centre de Brest. Direction Environnement et Recherches Océaniques.
Environnement Littoral, B.P. 337, 29273 Brest Cedex.

3. Résultats et discussion

3.1. Les apports

Les apports annuels d'azote minéral dissous par la Seine sont représentés sur la figure 1 (données de la Cellule anti-pollution de Rouen). L'azote total peut être assimilé à la somme $N-NO_3 + N-NH_4$, l'azote des nitrites ne représentant que 2 % environ du total (Bessineton 1978 a). On note des fluctuations annuelles des apports avec une nette tendance à l'accroissement surtout après 1978. Simultanément l'azote ammoniacal a beaucoup diminué sans doute en raison d'une meilleure épuration des eaux usées. Au moment des campagnes de 1978-1979, l'apport moyen d'azote minéral dissous est de 66 000 t/an (Guillaud, 1983). Bessineton (1978 b) a estimé les apports supplémentaires des autres rivières se jetant dans la baie (Risle, Touques, Dives, Orne, Vire et Douve). Au total leur contribution est d'environ 15 % des apports de la Seine (# 10 000 t/an). En 1983, l'apport d'azote minéral dissous est d'environ 110 000 t (fig. 1), soit presque le double de l'année 1978. Guillaud (1983) a quantifié également les flux d'azote organique en 1978-1979. Il les estime à environ 10 000 t/an pour l'azote organique particulaire et 3 500 t/an pour l'azote organique dissous. L'azote organique représentait donc 17 % de l'azote total en 1978-1979. L'amélioration de la qualité de l'eau de la Seine (moins d'ammonium, plus d'oxygène) depuis 1976 n'ayant pu que favoriser la minéralisation de l'azote organique, on peut estimer que les flux ne se sont pas accrues en 1983. L'azote organique ne devrait donc alors pas dépasser 10 % de l'azote total.

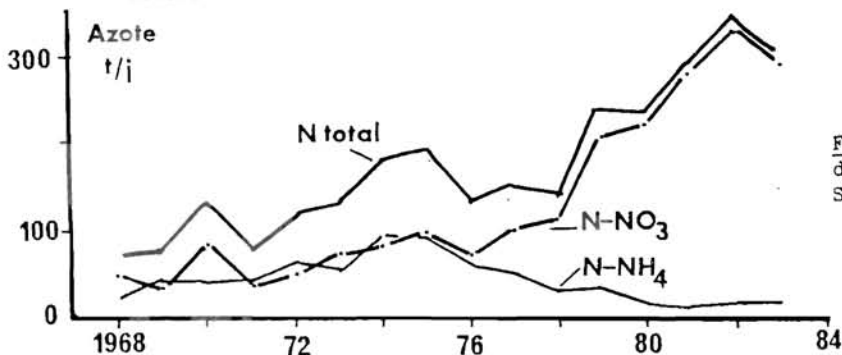


Figure 1. Flux d'azote de la Seine

Les apports de phosphore dissous (orthophosphate) par la Seine en 1975, 1976 et 1977 sont respectivement de 10 500, 10 700 et 11 600 t (Bessineton, 1978 c). Guillaud (1983) donne, pour moyenne annuelle 1975-1978, 10 300 t. En 1982, la Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine notait que les apports de phosphore étaient restés relativement constants contrairement à ceux d'azote. L'apport de phosphore particulaire par la Seine a été évalué à 3 200 t/an (Guillaud, 1983). Par ailleurs, les apports de phosphore par les phosphogypses sont, en fin 1977, d'environ 6 000 t/an (Bessineton, 1978 c). Toutefois ce phosphore n'est soluble qu'à 46 % (Commission "Baie de Seine", 1980), ce qui réduirait à 3 000 t/an les apports réels dus aux phosphogypses, soit 30 % de ceux de la Seine. Notons que ces apports se font localement, à la sortie de l'estuaire, en eau presque marine. Les apports de phosphore par les autres rivières de la baie représentent environ 4 % de ceux de la Seine (Bessineton, 1978 c).

Quant au flux de silicium, on l'estime à 38 000 t/an (Guillaud, 1983).

3.2. Dilution des apports

L'influence des eaux douces sur la baie de Seine est importante. Les mesures de salinité ont permis de calculer qu'il y a en baie de Seine deux à

trois mois de stockage d'eau douce (limite nord de la baie : Barfleur-Etretat). Les incidences d'une crue, par exemple, seront donc encore sensibles bien après la chute des débits. En mai 78, fin de la période humide, le débit de la Seine était stable depuis plusieurs semaines à environ $600 \text{ m}^3/\text{s}$. En septembre-octobre 1978 et en octobre 1983, fin de l'étiage, le débit était de $180 \text{ m}^3/\text{s}$. En mars 79, période des crues, le débit était de l'ordre de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ mais avait été précédé, trois semaines auparavant, par une crue à $1\,400 \text{ m}^3/\text{s}$. En octobre 1983, le débit était de $250 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces débits doivent être majorés de 30 % pour tenir compte de la totalité des apports d'eau douce à la baie.

La figure 2 présente les distributions spatiales de la salinité et des principaux éléments nutritifs en surface et à basse mer, au cours des différentes campagnes. La répartition des salinités montre l'influence prépondérante de la Seine. Les salinités décroissent en effet globalement du sud-est vers le nord-ouest. Cependant, il ne faut pas négliger les autres apports côtiers qui infléchissent les isohalines parallèlement aux côtes sud et ouest surtout pendant la période humide (noter l'isohaline 33 ‰ en mars 79). En fait, les eaux de la Seine semblent s'évacuer principalement par le nord-est de la baie, une partie longeant la côte Est en formant une bande d'eau dessalée et turbide. L'isohaline 33 ‰, du fait de sa relative stabilité, semble traduire l'influence des eaux douces à long terme : elle ne se rapproche significativement de l'estuaire qu'après un étiage prolongé tel que celui de 1983. L'isohaline 30 ‰ paraît traduire l'influence à court terme, s'éloignant ou se rapprochant de l'estuaire selon les débits.

En ce qui concerne la distribution globale des trois éléments nutritifs (N, P, Si), on constate qu'elle est très similaire à celle des salinités. La décroissance des concentrations s'effectue du sud-est vers le nord-ouest. Cette situation se retrouve en toute saison et montre l'effet prédominant de la Seine. En hiver, l'influence des eaux douces se fait sentir tout le long de la côte comme on peut le voir par l'allure des lignes d'isoconcentration, très semblable à celle de l'isohaline 33 ‰. La dilution des éléments nutritifs est traduite par leurs relations avec la salinité. Nous avons extrapolé la partie linéaire de ces relations à salinité nulle pour obtenir une approximation des concentrations en eau douce. Le tableau 1 donne les valeurs ainsi obtenues, comparées aux mesures directes en Seine (moyenne des stations 11 et 12 du Réseau National d'Observation).

	Mai 78		Septembre 78		Mars 79		Octobre 83	
	Calc.	Mes.	Calc.	Mes.	Calc.	Mes.	Calc.	Mes.
Azote total	340	300	430	300	410	405	510	450
Phosphore	21	21	33	32	23	18	30	35
Silicium	66	83	140	105	130	127	200	-

Tableau 1. Concentrations d'azote, de phosphore et de silicium ($\mu\text{mol}/\text{l}$) en eau douce calculées d'après les droites de dilution et mesurées par le RNO.

On constate que, dans l'ensemble, la concordance est assez bonne (+ 15 % environ), ce qui semble traduire un comportement grossièrement conservatif, comme l'a déjà mentionné Guillaud (1983) pour ces éléments sur tout l'estuaire. Ce résultat ne doit pas être interprété comme la preuve d'une absence d'activités biologiques, ce qui est infirmé par les conclusions de l'analyse des stocks décrite ci-dessous. En réalité, cela traduit une prédominance de l'intensité des phénomènes d'advection sur les activités biologiques. De fait, en mars, septembre et octobre, périodes d'activités biologiques très faibles ou réduites, les relations salinité-éléments nutritifs

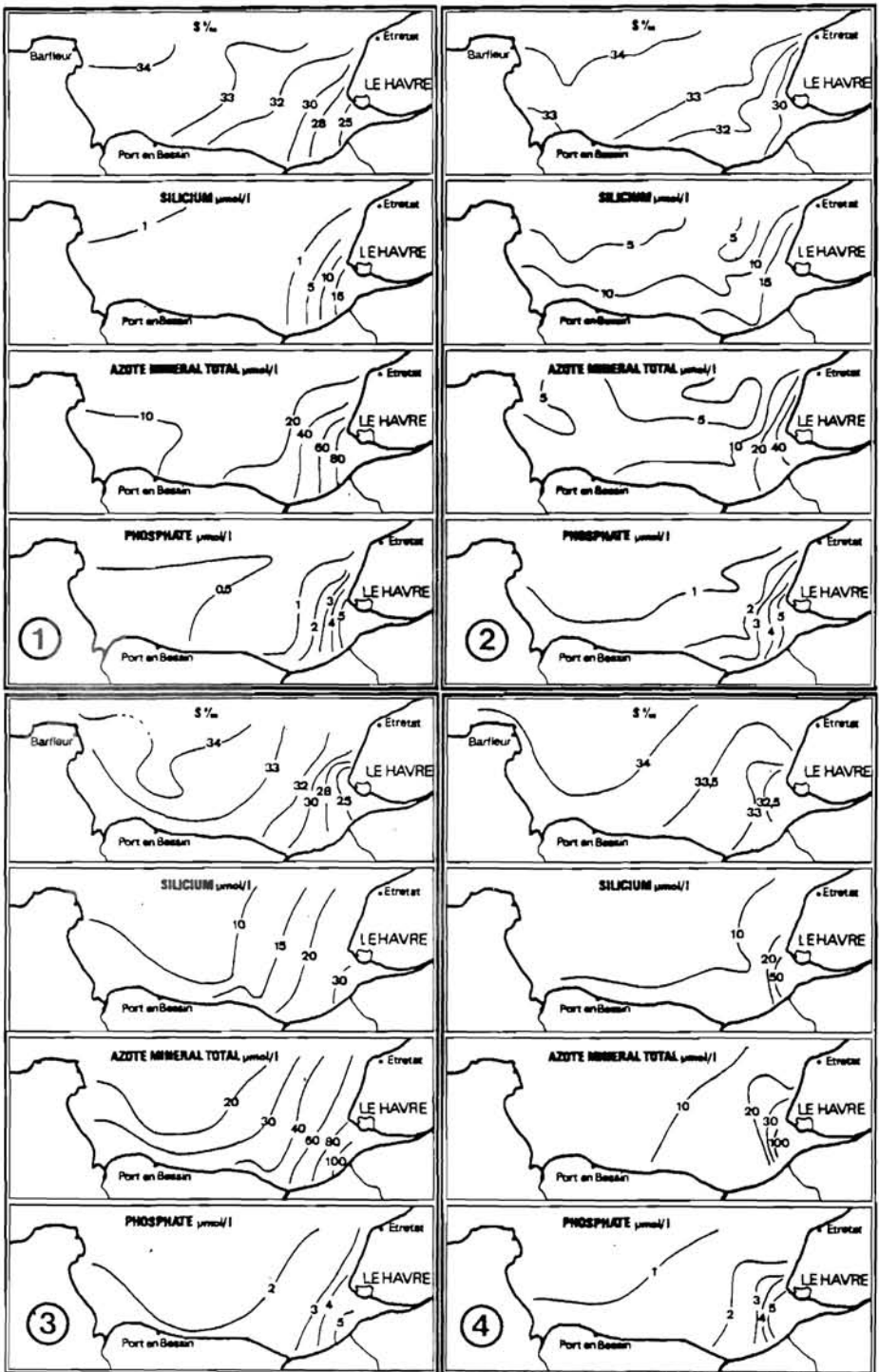


Figure 2. Distribution des salinités et éléments nutritifs en baie de Seine.
 1 : mai 1978 ; 2 : septembre 1978 ; 3 : mars 1979 ; 4 : octobre 1983.

sont linéaires sur toute la gamme des salinités rencontrées (25 à 35 ‰) tandis qu'en mai, période d'intense poussée phytoplanctonique seule la partie inférieure à 31 ‰ était linéaire.

L'estuaire (< 31 ‰) est en effet le siège des plus forts effets de mélange associés à une plus faible productivité (trop de matières en suspension), alors que la zone des "eaux côtières" (> 31 ‰), c'est-à-dire la grande majorité de la baie de Seine, est favorable au développement planctonique.

Le comportement grossièrement conservatif constaté en baie de Seine est donc normalement limité à l'estuaire mais peut s'étendre à une grande partie de la baie en dehors des périodes de forte activité biologique.

3.3. Éléments nutritifs et phytoplancton

La baie de Seine reçoit une quantité très importante de sels nutritifs. Toutefois en hiver les conditions sont défavorables au développement planctonique et, du fait du renouvellement de l'eau par les courants, un certain potentiel nutritif est perdu. Cette perte dépend de la durée du stockage des eaux douces et de la période non productive. Les temps de stockage ont été déterminés à l'aide des mesures de salinité et sont de 1,5 mois en mai 1978, 3,5 mois en septembre 1978, 1,5 mois en mars 1979 et 2,5 mois en octobre 1983. En admettant que la productivité est très faible de fin novembre à début avril, on peut alors considérer les apports de décembre, janvier et février comme perdus pour la baie de Seine : cela représente un quart à un tiers des apports annuels.

Nous avons par ailleurs déterminé les quantités potentiellement disponibles et les stocks présents dans la baie. Ces calculs sont fait en connaissant les volumes d'eau de mer et d'eau douce ainsi que les concentrations moyennes dans un certain nombre de mailles élémentaires de la baie. L'eau de mer de référence est prise à 34,5 ‰ et les concentrations marines de référence sont celles de l'hiver 1979 pour cette salinité (N = 12 $\mu\text{mol/l}$, P = 1 $\mu\text{mol/l}$, Si = 6 $\mu\text{mol/l}$). Pour le phosphore la contribution des phosphogypses est incluse dans l'apport potentiel de l'eau douce, à raison de 3 000 t/an, au prorata du temps de stockage. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Epoque	N				P				Si			
	Potentiel		Stock		Potentiel		Stock		Potentiel		Stock	
	TOT	ED	TOT	%Pot	TOT	ED	TOT	%Pot	TOT	ED	TOT	%Pot
Mai 78	38	20	26	68	6,0	2,7	2,4	40	26	8	4	15
Sept. 78	40	22	11	27	7,3	4,0	3,5	48	32	14	19	59
Mars 79	41	23	40	98	6,2	2,9	6,1	98	33	15	35	104
Oct. 83	31	14	17	55	5,4	2,1	4,1	76	29	11	28	97

Tableau 2. Comparaison des potentiels nutritifs et des stocks présents en baie de Seine (kt). ED : eau douce ; TOT : total eau douce + eau de mer.

On remarque tout d'abord que la contribution des eaux douces représente environ la moitié du potentiel nutritif de la baie pour les trois éléments considérés (N, P, Si). Il s'agit donc d'un milieu indéniablement eutrophe. En second lieu, nous pouvons comparer les potentiels nutritifs aux stocks. La différence de ces deux valeurs nous informe sur la partie consommée, donc passée sous forme particulière (vivante ou détritique). A la fin de l'hiver, les deux valeurs sont identiques : ce résultat important, obtenu avec les trois éléments, confirme la validité des estimations effectuées, car la faible productivité hivernale ne doit pas avoir significativement réduit le potentiel disponible.

En mai, on constate la disparition du tiers de l'azote, des deux tiers du phosphore et de presque tout le silicium : c'est le résultat des poussées planctoniques de printemps. Ces populations planctoniques printanières, constituées en majorité de diatomées (COB, 1978) ont consommé le silicium qui est réduit à moins de $1 \mu\text{mol/l}$ dans les deux tiers de la baie (fig. 1). A ces concentrations, la plupart des diatomées ne peuvent plus l'utiliser (Paache, 1973 ; Tilman et Kilham, 1976) ce qui empêche leur développement ultérieur. Cependant le phosphore et l'azote sont encore présents en quantités suffisantes pour la croissance d'algues n'exigeant pas de silicium. En effet, en mai, après la poussée de diatomées, 40 % du phosphore et 70 % de l'azote sont encore disponibles.

Le rapport molaire N/P du potentiel nutritif de mai est voisin de 15, rapport moyen d'assimilation du phytoplancton (Redfield *et al.*, 1963), mais la consommation des éléments s'est faite avec un rapport de 7,5. Ce dernier rapport qui n'est pas nécessairement anormal (Ryther et Dunstan, 1971), peut aisément s'expliquer par une accumulation intracellulaire de phosphate non assimilé, phénomène classique lorsque la concentration n'est pas limitante (Tilman et Kilham, 1976). Le rapport N/P élevé du stock restant (24) ne serait pas alors nécessairement le signe d'un excès d'azote par rapport au phosphore pour le plancton, le phosphate accumulé devant en effet être rapidement libéré dans le milieu à la mort des diatomées.

L'étude du stock d'automne (sept. 78, oct. 83) traduit l'évolution très différente selon les éléments : l'azote a continué à diminuer et ne représente plus que 27 % du potentiel alors que le phosphore et le silicium se sont accrus. On entre en effet dans la phase de diminution de la productivité et la régénération des éléments sous leurs formes minérales peut devenir significative.

Pour le silicium la consommation estivale se trouve en effet réduite, les diatomées n'étant plus dominantes ; il n'y a donc pas réutilisation intense de la fraction régénérée. Les mesures faites en septembre 1978 montrent toutefois la présence de Diatomées, mais celles-ci sont largement concurrencées par des Cryptophycées et des Chlorophycées. Notons qu'en octobre 1983, le stock de silicium est égal au potentiel nutritif, ce qui peut signifier un retour précoce à la situation pré-printanière (régénération totale).

Quant au phosphore, après l'été (sept. 78), il a été consommé avec un rapport N/P de 17, ce qui est proche du rapport moyen. Bien qu'il soit admis que la régénération du phosphore soit plus rapide que celle de l'azote, ce résultat nous paraît confirmer l'hypothèse avancée précédemment d'une accumulation cellulaire de phosphate au printemps. Ce phosphore libéré ensuite dans le milieu a été réutilisé normalement par les populations qui ont succédé. Dans ces conditions, la conclusion que l'on peut tirer en considérant le stock restant après la saison productive, avec un N/P de 7, est qu'en baie de Seine les facteurs limitants seraient en fait successivement le silicium puis l'azote.

BESSINETON, C. (1978 a). - Les apports en azote dans l'estuaire de la Seine. Direction des Affaires Maritimes, Rapport de la commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine. 10 p + 22 fig.

BESSINETON, C. (1978 b). - Apports de sels nutritifs en baie de Seine par les rivières de Basse-Normandie. Direction des Affaires Maritimes, Rapport de la commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine. 6 p + 15 fig.

BESSINETON, C. (1978 c). - Les apports en phosphates de la Seine. Direction des Affaires Maritimes, Rapport de la commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine. 5 p + 14 fig.

COB (1978). - BAIE DE SEINE, Campagne Thalia mai 1978, présentation des résultats. CNEXO-COB Département Environnement Littoral, 189 p.

- Commission "Baie de Seine" (1980).- Note de synthèse sur les contrôles effectués dans les zones de rejets de phosphogypse depuis le début des déversements jusqu'en 1979. Direction des Affaires Maritimes, Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution dans l'estuaire et en baie de Seine.
- GUILLAUD, J.-F. (1983).- Les flux de sels nutritifs dans l'estuaire de la Seine (France) ; rôle et importance du bouchon vaseux au cours du mélange estuarien. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40 (suppl. 1) : 180-187.
- PAASCHE, E. (1973).- Silicon and the ecology of marine planktonic diatoms. II. Silicate-uptake kinetics in five diatom species. *Mar. Biol.* 19, 262-269.
- REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H., et RICHARDS, F.A. (1963).- The influence of organisms on the composition of sea water, p. 26-77. In : M.N. Hill (ed.) *The Sea*, V.2, Interscience.
- RYTHER, J.H. et DUNSTAN, W.M. (1971).- Nitrogen, Phosphorus and Eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 171 (3975) : 1008-1013.
- TILMAN D., et KILHAM S.S. (1976). Phosphate and silicate growth and uptake kinetics of the diatoms *Asterionella formosa* and *Cytotella meneghiniana* in batch and semicontinuous culture. *J. Phycol.*, 12, p. 375-383.
- TREGUER P., LE CORRE P. (1975).- Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. L.O.C., U.B.O., Avenue Le Gorgeu, 29283 Brest Cedex, France.