

Spéciation du phosphore et apports en baie de Seine orientale

Phosphore
Spéciation
Flux
Estuaire
Seine

Phosphorus
Speciation
Flux
Estuary
Seine

Alain AMINOT, Jean-François GUILLAUD et Françoise ANDRIEUX

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER),
Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral, B.P. 70, 29280
Plouzané, France.

RÉSUMÉ

La baie de Seine est le milieu recevant le fleuve français le plus riche en substances nutritives, notamment en phosphore. Les flux de phosphore dissous (phosphate) et particulaire ont donc été évalués à partir du suivi bimensuel du Port Autonome de Rouen (respectivement 8 400 t et 2 600 tonnes par an). Les variations de concentration en fonction du débit sont opposées : décroissance hyperbolique pour le phosphate et croissance linéaire pour le phosphore particulaire. Une estimation basée sur la population raccordée aux réseaux d'assainissement concorde à 20 % près avec le flux de phosphate mesuré. La détermination des principales formes de phosphore particulaire (adsorbé, apatitique, inorganique non apatitique, organique) a été effectuée dans tout l'estuaire en couvrant la gamme de salinité. Il en ressort une grande homogénéité de composition du phosphore particulaire estuarien aux différentes époques de l'année. Cette étude a aussi permis de montrer qu'environ 50 % du phosphore particulaire était potentiellement biodisponible. Les fortes charges particulières expulsées hors de l'estuaire lors des crues de printemps peuvent donc contribuer de manière significative à l'enrichissement de la baie au moment des phases de développement du phytoplancton.

Oceanologica Acta, 1993. 16, 5-6, 617-623.

ABSTRACT

Phosphorus speciation and inputs to the Eastern Bay of Seine

The Bay of Seine receives the French river with the highest nutrient concentrations, especially phosphorus. Dissolved (phosphate) and particulate phosphorus fluxes have been determined from fortnightly serial data collected by the Port Autonome de Rouen. These determinants exhibit behaviour opposite to that of the river flow: phosphate concentration decreases hyperbolically and particulate phosphorus increases linearly. An approach based on the rate of domestic effluent treatment agrees well (20 %) with the measured phosphate flux. The determination of the main particulate phosphorus forms (adsorbed, apatite, non-apatite inorganic, organic) was undertaken over the whole estuarine salinity range. The speciation of particulate phosphorus exhibits a great homogeneity, irrespective of the salinity and the time of the year. From this study, it may be concluded that some 50 % of the particulate phosphorus is potentially bioavailable. Heavy loads of particles expelled from the estuary during spring floods may therefore significantly contribute to the enrichment of the bay at the time when phytoplankton is actively growing.

Oceanologica Acta, 1993. 16, 5-6, 617-623.

INTRODUCTION

La baie de Seine est le réceptacle du plus grand fleuve se déversant en Manche, et constitue donc à ce titre un domaine d'étude particulier. La Seine, drainant un bassin de 75 000 km², lui apporte en effet en moyenne 400 m³ d'eau par seconde et de 0,5 à 1 million de tonnes de matières particulaires par an. Couvrant 15 % du territoire français, le bassin versant de la Seine accueille cependant environ 20 % des superficies agricoles, 30 % de la population et 40 % des activités économiques de la France (Goujon *et al.*, 1992). Soumise à une pression agricole, urbaine et industrielle plus forte que les autres zones côtières, la baie de Seine est un milieu sensible, notamment en ce qui concerne l'enrichissement en éléments nutritifs, particulièrement l'azote et le phosphore. Le développement de poussées planctoniques intenses y a été observé depuis déjà de nombreuses années (Paulmier et Joly, 1986), mais les travaux sur les apports et le comportement des éléments nutritifs restent cependant très peu nombreux (Guillaud, 1983 ; Aminot *et al.*, 1986). Si les travaux de Ryther et Dunstan (1971), souvent confirmés par la suite (Graneli, 1987), montrent une limitation des poussées planctoniques par l'azote en zone marine côtière, des études plus récentes ont également fait ressortir la possibilité d'une limitation par le phosphore, par exemple en Méditerranée (Berland *et al.*, 1980) ou en baie de Vilaine (Quéguiner *et al.*, 1986). Le phosphore étant le facteur reconnu de longue date comme limitant en eau douce (Vollenweider, 1968), il est aisé de concevoir que le milieu estuarien et côtier, zone de transition vers l'océan, constitue un domaine complexe où, selon le lieu et l'époque, divers éléments nutritifs peuvent jouer un rôle primordial. Il est donc apparu prioritaire, notamment dans le cadre du Programme National d'Océanographie Côtière, et dans un but de modélisation ultérieure, de réunir des éléments pouvant permettre une meilleure approche de l'eutrophisation côtière. Le présent travail vise donc à évaluer les flux de phosphore entrant en baie de Seine orientale, et plus particulièrement les formes sous lesquelles est véhiculé ce phosphore. L'accent sera donc mis sur la spéciation du phosphore particulaire dans la Seine et son estuaire, ceci dans le but de quantifier la part potentiellement biodisponible, seule fraction pouvant le cas échéant contribuer à l'enrichissement du milieu.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Évolution temporelle et flux

Les données du Port Autonome de Rouen (Service Maritime de la Seine Maritime, 1984 à 1991) ont servi de base pour le suivi temporel et le calcul des grands flux. Nous avons utilisé les mesures d'orthophosphate dissous depuis 1984 et celles de phosphore total depuis leur mise en oeuvre en 1989. Ces mesures sont effectuées bimensuellement, sur des prélèvements collectés à mi-profondeur à deux stations, l'une au barrage de Poses (limite physique de la marée

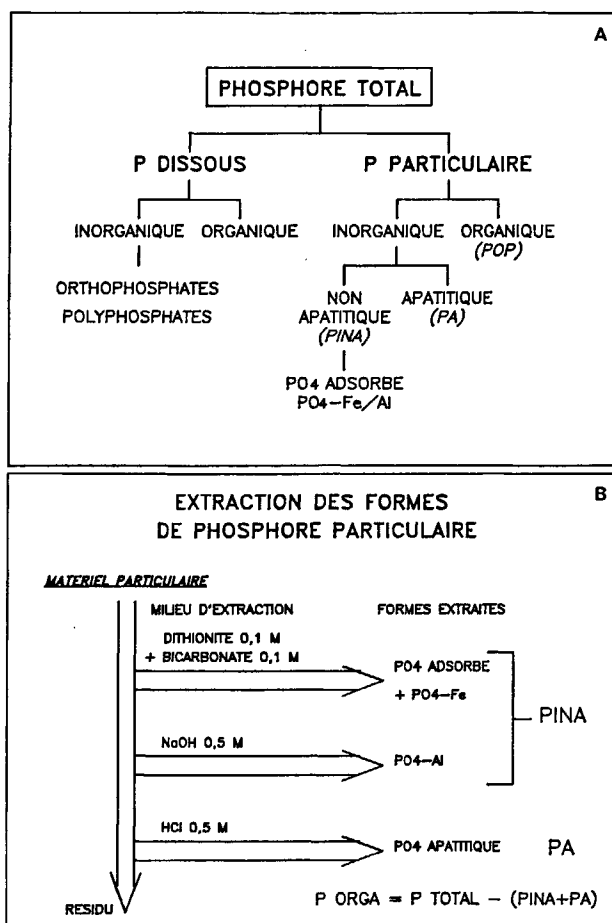


Figure 1

A : schéma de spéciation du phosphore dans les eaux ; B : schéma d'extraction utilisé pour la détermination des formes de phosphore particulaire (d'après Psenner *et al.*, 1988).

A: speciation of phosphorus in waters; B: extraction flow chart for the determination of particulate phosphorus forms (after Psenner *et al.*, 1988).

dynamique), l'autre à Caudebec. Ces stations sont situées respectivement à 160 et 50 km de l'embouchure (Le Havre), en amont et en aval de Rouen.

Le schéma de la figure 1 A permet de constater que la différence entre le phosphore total et le phosphore des orthophosphates correspond approximativement au phosphore particulaire. En effet, les autres formes dissoutes telles que le phosphore organique ou les polyphosphates ne représentent généralement pas plus de 5 % du phosphore dissous, comme l'ont montré nos évaluations effectuées sur les prélèvements fluviaux lors des campagnes de 1991-1992.

Les analyses d'orthophosphate dissous réalisées par le Port Autonome de Rouen sont faites sur eau filtrée à 0,45 µm, selon la méthode de Murphy et Riley (1962) ; le phosphore total est mesuré sur l'eau brute, après minéralisation au persulfate à l'autoclave (AFNOR, 1982).

Les flux journaliers de phosphore ont été calculés par multiplication des débits par les concentrations ; les flux annuels (Fa) en tonnes par an ont été évalués par la relation de Walling et Webb (1985) : $F_a = k \cdot Q_m \cdot (\sum Q_i C_i / \sum Q_i)$ avec

Q_m = débit moyen annuel ($m^3 s^{-1}$), Q_i = débit instantané ($m^3 s^{-1}$), C_i = concentration instantanée ($mg l^{-1}$), k = coefficient correcteur d'unité.

Spéciation du phosphore particulaire

Cette étude a été abordée au cours de cinq campagnes effectuées dans l'estuaire de la Seine à bord du navire océanographique *Thalia* (1991, 1992). Nous avons cherché à couvrir différentes conditions de crues et de coefficients de marée, à savoir :

6-8 novembre 1991 : $210 m^3 s^{-1}$; coefficient : 85-90
 18 février 1992 : $503 m^3 s^{-1}$; coefficient : 108
 29 avril 1992 : $338 m^3 s^{-1}$; coefficient : 63
 3 juin 1992 : $176 m^3 s^{-1}$; coefficient : 89
 1^{er} juillet 1992 : $241 m^3 s^{-1}$; coefficient : 95

Les prélèvements ont été effectués en surface au cours de la remontée de l'estuaire, à contre-courant et aux environs de la basse-mer, entre l'embouchure et Tancarville (25 km), limite aval des eaux douces. Le matériel particulaire a été récolté par filtration sur membranes de fibre de verre Whatman GF/F de 25 mm de diamètre (porosité nominale $0,7 \mu m$) et conservé congelé jusqu'au jour de l'analyse.

Le phosphore particulaire total a été mesuré selon la méthode de Solorzano et Sharp (1980), qui consiste en une oxydation au four à $500^\circ C$ suivie d'une reprise du résidu dans l'acide chlorhydrique $0,2 mol l^{-1}$. La détermination des principales formes de phosphore particulaire a été réalisée par une technique d'extractions successives dans des milieux appropriés (fig. 1 B). Ce travail n'étant pas à but méthodologique, nous avons repris le protocole classique de Williams *et al.* (1976), modifié selon Psenner *et al.* (1988), mis au point initialement pour l'étude des sédiments. Son application aux faibles quantités de matériel particulaire récoltées a exigé un soin opératoire très rigoureux, et notamment la réalisation de blancs de filtre. Les extraits obtenus ont été dilués ou neutralisés de manière à pouvoir y pratiquer la mesure du phosphate selon la méthode de Murphy et Riley (1962) automatisée, selon Tréguer et Le Corre (1975). L'étalonnage a été effectué dans le même milieu que celui des extraits, et complété par la pratique d'ajouts dosés afin de s'affranchir d'éventuelles interférences. Le phosphate adsorbé a été déterminé par extraction du matériel particulaire à l'eau de mer naturelle pauvre en phosphate ($PO_4 < 0,01 \mu mol l^{-1}$) empoisonnée au mercure, sur une durée d'une trentaine d'heures (après test de cinétique). Cinq à six niveaux de concentration de matériel particulaire ont été utilisés pour permettre une extrapolation à dilution infinie. Comme pour les extractions chimiques, des blancs de filtres ont été réalisés, notamment pour corriger les résultats de la fraction provenant du phosphate dissous dans l'eau retenue dans les filtres. Les extractions sont réalisées directement à bord sur matériel frais. Les extraits sont ensuite congelés et analysés au laboratoire dans un délai de quelques semaines.

Le protocole d'extraction, très classique, n'a pas fait l'objet de tests spécifiques de reproductibilité, cette dernière étant estimée à 5-10 % (Gray et Kirkland, 1986). Ceci est conforme à la cohérence des résultats obtenus et tout à fait satisfaisant eu égard à l'objectif de l'étude.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Évolution des concentrations et des flux

Les concentrations en orthophosphate et en phosphore particulaire à Caudebec varient considérablement au cours de l'année (fig. 2 A), étant respectivement fonction inverse et directe du débit (fig. 2 B). Le phosphate est relié

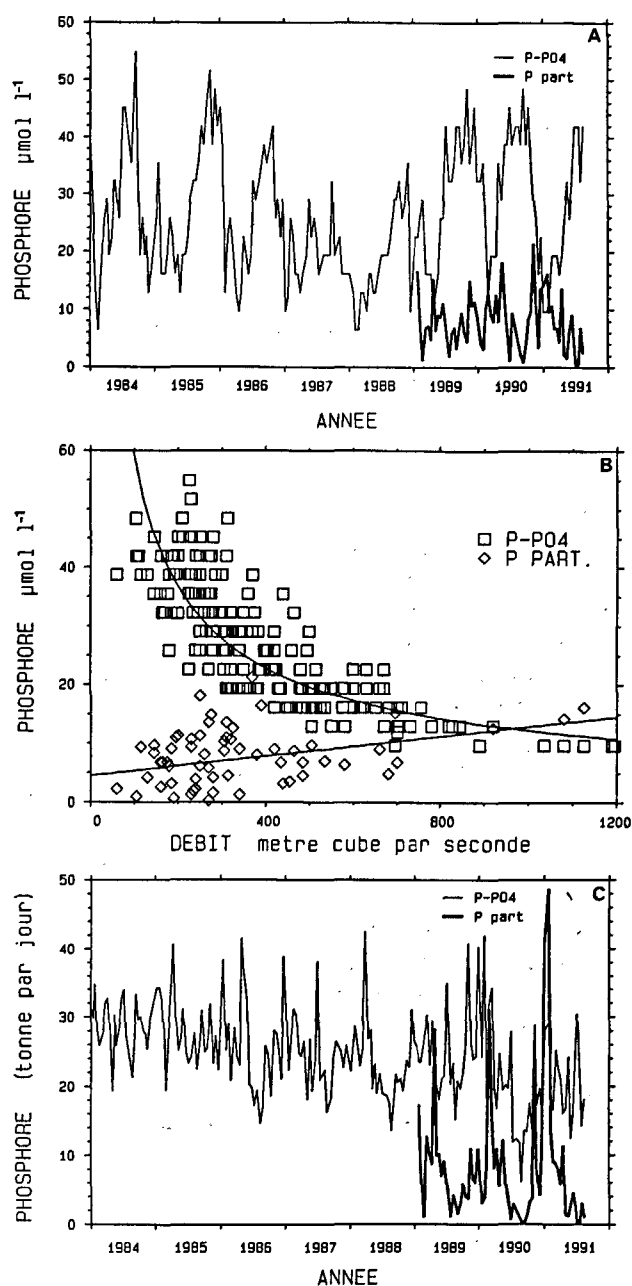


Figure 2

A : variations annuelles des concentrations de phosphate et de phosphore particulaire en Seine (Caudebec) ; B : relations débit-phosphate et débit-phosphore particulaire en Seine (Caudebec) ; C : variations annuelles des flux journaliers de phosphate et de phosphore particulaire en Seine (Caudebec).

A : annual variations of phosphate and particulate phosphorus concentrations in the river Seine (Caudebec) ; B : flow-phosphate and flow-particulate phosphorus relationships in the river Seine (Caudebec) ; C : annual variations of phosphate and particulate phosphorus daily fluxes in the river Seine (Caudebec).

au débit Q par une fonction hyperbolique ($[P-PO_4] = 55,9 Q^{-0,73}$; $n = 185$, $r^2 = 0,76$), qui traduit le fait que les sources ponctuelles délivrant un flux constant dominant par rapport au phénomène de lessivage. Ce fait peut être relié à l'origine essentiellement domestique et industrielle du phosphate, dont les flux journaliers subissent un léger effet saisonnier se traduisant par une diminution en période estivale (fig. 2 C). Le phosphore particulaire peut être relié au débit par une fonction linéaire ($[PP] = 2,2 \cdot 10^{-4} Q + 0,17$; $n = 60$, $r^2 = 0,34$). Ce type de relations croissantes est caractéristique de l'érosion des sols et a déjà été mise en évidence pour les matières en suspension (Avoine, 1986).

Les données dont nous disposons nous ont permis de montrer la décroissance régulière du flux annuel de phosphate apporté à l'estuaire : de plus de 10 000 t en 1984 à moins de 8 000 t en 1990. Cette baisse de 4 % par an est imputable en totalité à la réduction des apports industriels (fabrication d'engrais) au niveau de Rouen.

Il est par ailleurs intéressant de comparer, sur la période 1988-1990, le flux moyen annuel de phosphate (exprimé en P) de la Seine, en aval de Rouen, à celui des autres grands fleuves français :

Seine : 8 400 t de P- PO_4 , soit 110 t km^{-2} de bassin versant
 Loire : 3 200 t de P- PO_4 , soit 28 t km^{-2} de bassin versant

Gironde : 1 600 t de P- PO_4 , soit 23 t km^{-2} de bassin versant
 Rhône : 5 500 t de P- PO_4 , soit 55 t km^{-2} de bassin versant.

On constate que le flux de la Seine domine largement celui des autres fleuves non seulement en flux absolu, mais également en flux spécifique, avec deux à cinq fois plus de phosphate par unité de surface que sur les autres bassins versants. Cette particularité est à relier majoritairement à la forte densité de population, notamment due à l'agglomération parisienne, dont une grande partie est raccordée aux réseaux de collecte et de traitement urbains qui se déversent finalement dans la Seine. Ainsi, pour le phosphate, sur les 8 400 t de phosphore déversées annuellement, 1 600 t proviennent des rejets industriels de Rouen et 6 800 t du bassin versant amont. Pour un taux de dépollution moyen de 32 % (Ministère de l'Environnement, 1991) et un rejet moyen journalier de 3 g de phosphore par habitant et par jour (Aminot et Guillaud, 1991), les apports correspondent à 9 millions d'équivalents-habitants, nombre à rapprocher de la population raccordée au réseau de collecte sur la surface de bassin versant considérée, soit 11 millions d'habitants.

Le flux de phosphore particulaire évalué pour 1989 et 1990 s'élève à 2 600 t par an (pour environ 700 000 t par an de matières en suspension), soit près du quart du phosphore apporté à l'estuaire. L'étude de la spéciation du phosphore particulaire et de la répartition annuelle des apports comparés à ceux de phosphate a permis d'améliorer la connaissance de ce phosphore et notamment de l'évaluer en terme de biodisponibilité.

Spéciation et biodisponibilité du phosphore particulaire

Les mesures de phosphore particulaire total réalisées sur tout l'estuaire au cours du cycle 1991-1992 sont présentées sur la figure 3 A. On notera la relative homogénéité du phosphore particulaire, dans la zone turbide, avec 70 à 90 μmol par gramme de matériel en suspension. Au printemps et en été, les concentrations s'élèvent rapidement aux fortes salinités, jusqu'à plus de 300 $\mu mol g^{-1}$ dans la zone la moins turbide où le phytoplancton constitue alors la source principale de phosphore particulaire. Si l'on évalue, à partir des données du Port Autonome de Rouen, la concentration de phosphore dans le matériel particulaire fluvial, on aboutit à une valeur de 120 $\mu mol g^{-1}$, soit un peu plus que ce que donne la mesure directe. Toutefois la contribution d'une partie, même faible, du phosphore dissous dans le calcul du phosphore particulaire est de nature à expliquer la plus grande part de la différence. Les valeurs obtenues par les deux approches s'avèrent donc cohérentes.

L'étude de la spéciation du phosphore particulaire nous a permis de déterminer les concentrations des principales formes de phosphore dans le matériel en suspension de l'estuaire aval (tableau). La relative homogénéité de ces formes sur toute la zone aux différentes époques est mise en évidence par les écarts-types généralement faibles obtenus à chaque campagne, poussées planctoniques exclues. On constate également une assez grande stabilité des concentrations au cours de l'année, particulièrement pour le

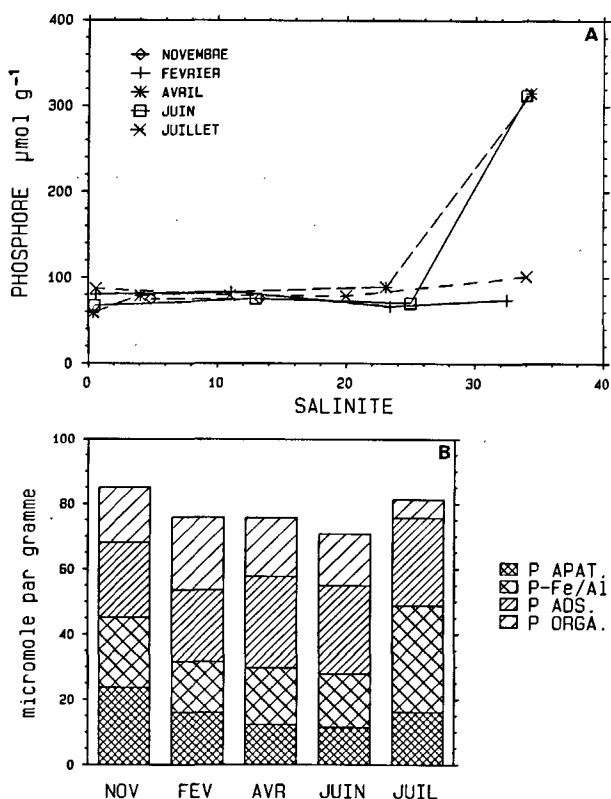


Figure 3
 Le phosphore particulaire dans l'estuaire de la Seine (cycle 1991-1992). A : concentration dans le matériel en suspension en fonction de la salinité ; B : distribution des formes de phosphore particulaire moyennée sur l'estuaire (poussées planctoniques exclues).

Particulate phosphorus in the Seine estuary (1991-1992 cycle). A : concentrations in suspended particulate matter versus salinity; B : distribution of particulate phosphorus forms; averages on the whole estuary (plankton blooms excluded).

phosphore inorganique non-apatitique ainsi que pour le phosphate adsorbé, et dans une moindre mesure pour le phosphore apatitique et le phosphore organique. Cette dernière forme, calculée par différence, doit toutefois être considérée comme affectée d'une plus grande incertitude.

Le schéma de synthèse de la figure 3 B permet une comparaison globale des concentrations des différentes formes en fonction du temps. En moyenne générale, les proportions rapportées au phosphore total sont de 59 % de PINA (dont 33 % de phosphore adsorbé), 20 % de PA et 21 % de PO. Une étude du même type menée sur l'estuaire du Saint-Laurent (Canada) par Lucotte et d'Anglejan (1983) fait ressortir une homogénéité spatiale et temporelle similaire à celle de l'estuaire de la Seine. Le phosphore apatitique (PA) et le phosphore organique (PO) sont à des concentrations proches de celles trouvées en Seine, mais les proportions de PA et de phosphore inorganique non apatitique (PINA) sont inversées, la Seine étant beaucoup plus riche en PINA.

Parmi les travaux effectués en eau douce, il est intéressant de se référer à ceux de Gray et Kirkland (1986) sur onze rivières de Colombie Britannique (Canada), qui révèlent une spéciation du phosphore particulaire très proche de celle du Saint-Laurent, et à ceux de Vernet et Dominik (1989) sur le Rhône, qui montrent également une forte dominante (84 %) de PA.

Tableau

Spéciation du phosphore particulaire dans l'estuaire de la Seine. Moyennes et écarts-types sur tout l'estuaire en micromoles par gramme de matériel en suspension. Entre parenthèses : pourcentage relatif au P particulaire total. Les valeurs élevées caractéristiques de poussées planctoniques à l'aval ont été omises. Abréviations : voir figure 1. A noter que le phosphore adsorbé (P_{ads}) est inclus dans le PINA.

Speciation of particulate phosphorus in the Seine estuary. Means and standard deviations over the whole estuary expressed in micromoles per gram of suspended particulate matter. In parenthesis: percentage relation to total particulate phosphorus. High values characteristic of planktonic blooms in the outer estuary have been omitted. Abbreviations as in Figure 1. Note that P_{ads} is part of PINA.

| Date | 6-8 nov. 1991 | 18 fév. 1992 | 29 avr. 1992 | 3 juin 1992 | 1er juil. 1992 |
|----------------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Nombre de stations | 7* | 2 | 3* | 3 | 3 |
| PINA | 44 ± 5 (52) | 40 ± 4 (49) | 45 ± 9 (60) | 43 ± 4 (61) | 60 ± 9 (72) |
| Pads. | 23 ± 8 (27) | 22 ± 2 (27) | 28 ± 8 (37) | 27 ± 8 (39) | 27 ± 5 (33) |
| PA | 24 ± 2 (28) | 17 ± 6 (21) | 12 ± 6 (16) | 11 ± 1 (16) | 17 ± 2 (20) |
| Porga. | 17 ± 6 (20) | 24 ± 8 (30) | 18 ± 2 (24) | 16 ± 2 (23) | 6 ± 6 (7) |
| P particulaire total | 85 | 81 | 75 | 70 | 83 |

* seulement deux stations pour P_{ads} .

Bien que les activités agricoles et urbaines d'un bassin versant conduisent à un accroissement des concentrations de PINA et de PO (Gray et Kirkland, 1986), une telle hypothèse concernant l'estuaire de la Seine apparaît toutefois prématurée faute d'éléments de comparaison avec des bassins versants géologiquement similaires et compte tenu de l'influence maritime notable sur le matériel sédimentaire (Avoine, communication personnelle).

La figure 3 B fait également ressortir les proportions non biodisponibles et potentiellement biodisponibles du phosphore particulaire. Cette dernière discrimination est faite en fonction du devenir des matières en suspension expulsées en baie de Seine, milieu relativement bien oxygéné et à faible concentration de phosphate comparé à la Seine. Ainsi, le phosphore apatitique et les phosphates de fer et d'aluminium peuvent être considérés comme insolubles et non réactifs au pH et au potentiel redox des eaux de la baie. Le phosphate adsorbé au contraire devrait se libérer par désorption progressive au fur et à mesure de la dispersion des particules dans une eau de plus en plus pauvre en phosphate. Quant au phosphore organique, dont une partie est probablement adsorbée et l'autre sous forme de débris végétaux, sa minéralisation progressive va le rendre petit à petit disponible pour les microalgues. Dans cette première approche, nous avons donc considéré comme potentiellement biodisponibles le phosphate adsorbé et le phosphore organique.

Les résultats montrent que la moitié (53 ± 9 %) du phosphore particulaire pénétrant en baie de Seine est potentiellement biodisponible, à court ou moyen terme, pour le phytoplancton. Si l'on applique cette proportion au flux de phosphore particulaire précédemment déterminé, on obtient 1 300 t par an de phosphore potentiellement biodisponible s'ajoutant aux 8 400 t par an de P- PO_4 . Cet apport supplémentaire n'apparaît donc pas, de prime abord, comme très significatif vis-à-vis de l'enrichissement du milieu, et l'on pourrait en conclure que la seule mesure du phosphate suffit à fournir une information pertinente. Néanmoins, une approche plus circonspecte s'avère utile, car les formes dissoutes et particulaires se comportent de manières opposées en fonction du débit.

De ce fait, comme le montre la figure 4, le pourcentage de phosphore particulaire biodisponible par rapport au phosphore biodisponible total peut atteindre à Caudebec des proportions de plus de 40 % lors des crues. De plus, à fort débit, il se produit une remise en suspension importante des particules déposées dans l'estuaire qui peuvent alors être évacuées dans la baie (Avoine, communication personnelle). Les crues de fin d'hiver et de début de printemps injectent ainsi en baie de Seine, juste avant les poussées planctoniques, des quantités de phosphore particulaire biodisponible bien supérieures à celles qui ressortent des pourcentages déterminés ci-dessus.

Ces phénomènes ne doivent pas être négligés pour l'évaluation de l'impact réel des apports de phosphore de la Seine sur l'eutrophisation du milieu. Néanmoins, il n'est pas aisé de les prendre en compte sans une connaissance des cinétiques de minéralisation et de désorption des formes potentiellement biodisponibles.

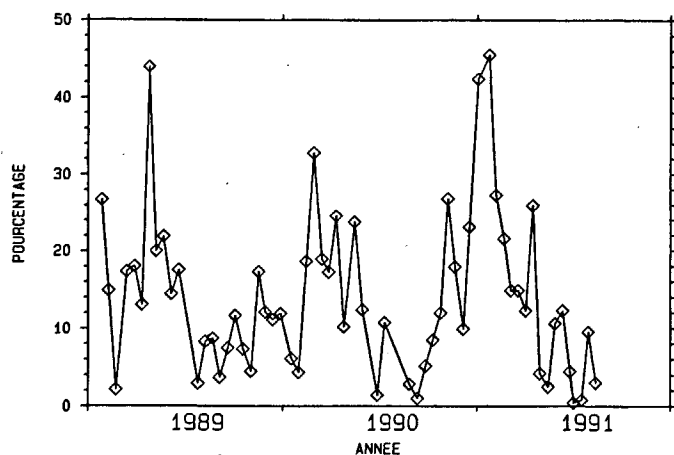


Figure 4

Pourcentage de phosphore biodisponible sous forme particulaire (PPb) par rapport au phosphore biodisponible total : $PPb \times 100 / (PPb + P-PO_4)$.

Percentage of bioavailable phosphorus in particulate form (bPP) related to total bioavailable phosphorus : $bPP \times 100 / (bPP + PO_4-P)$.

CONCLUSION

L'étude des flux de phosphore en baie de Seine orientale a permis de quantifier les apports sous différentes formes dissoute et particulaires. Il a pu être mis en évidence que l'intensité des flux comparée aux autres estuaires fait de la

baie de Seine un milieu particulier quant à l'enrichissement en phosphore.

L'examen détaillé des formes de phosphore particulaire a conclu à une homogénéité relativement forte du matériel particulaire dont la composition, en termes de phosphore, est assez stable. De ce fait, il est aisé de déterminer la proportion moyenne de phosphore particulaire potentiellement biodisponible représentative de ce milieu, soit environ 50 %.

Si le flux moyen annuel de phosphore particulaire biodisponible ne représente que 13 % du flux total, les périodes de crue sont propices à l'évacuation vers la baie de concentrations élevées de particules, lesquelles peuvent alors accroître considérablement les proportions de phosphore particulaire biodisponible par rapport à celles du phosphore dissous. Les bilans globaux annuels de phosphore doivent donc être complétés d'évaluations plus précises sur les formes mises en jeu et sur les périodes d'apports.

Remerciements

Nous remercions tous ceux qui nous ont apporté leur concours lors des campagnes et du travail de laboratoire, tout particulièrement Roger Kérouel, Philippe Cann, Anne-Marie Le Guellec et Alain Abarnou.

RÉFÉRENCES

- AFNOR (1982). Norme NF T 90-023. Dosage des orthophosphates, des polyphosphates et du phosphore total, septembre 1982.
- Aminot A. et J.-F. Guillaud (1991). Apports en matière organique et en sels nutritifs par les stations d'épuration, IFREMER, Actes de Colloques, 11, 11-26.
- Aminot A., R. Kérouel et J.-L. Mauvais (1986). Les éléments nutritifs en baie de Seine, IFREMER, Actes de Colloques, 4, 289-295.
- Avoine J. (1986). Évaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine, IFREMER, Actes de Colloques, 4, 117-124.
- Berland B.R., D.J. Bonin et S.Y. Maestrini (1980). Azote ou phosphore ? Considérations sur le "paradoxe nutritionnel" de la Méditerranée. *Oceanologica Acta*, 3, 1, 135-142.
- Goujon R., J.-P. Dupont et R. Meyer (1992). L'estuaire de la Seine. Compte-rendu du colloque national «Estuaires et Deltas : des milieux menacés ?», Bègles, 25 juin 1992, 8 pp.
- Graneli E. (1987). Nutrient limitation of phytoplankton biomass in a brackish water bay highly influenced by river discharge. *Estuar. coast. Shelf Sci.*, 25, 555-565.
- Gray C.B.J. et R.A. Kirkland (1986). Suspended sediment phosphorus composition in tributaries of the Okanagan lakes, B. C., *Wat. Res.*, 20, 9, 1193-1196.
- 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., suppl. 1*, 40, 180-187.
- Lucotte M. et B. d'Anglejan (1983). Forms of phosphorus and phosphorus-iron relationships in the suspended matter of the St-Lawrence estuary. *Can. J. Earth Sci.*, 20, 1880-1890.
- Ministère de l'Environnement (1991). Assainissement des collectivités locales : état de l'équipement et des financements, 83 pp.
- Murphy J. et J.P. Riley (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. *Anal. chim. Acta*, 27, 31-36.
- Paulmier G. et J.-P. Joly (1986). Les phénomènes d'eaux colorées en baie de Seine. IFREMER, Actes de Colloques, 4, 477-484.
- Psenner R., B. Boström, M. Dinka, K. Petterson, R. Pucsko et M. Sager (1988). Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Arch. Hydrobiol., Beih., Ergebn. Limnol.*, 30, 98-103.
- Quéguiner B., M. Hafsouli et P. Tréguer (1986). Simultaneous uptake of ammonium and nitrate by phytoplankton in coastal ecosystems. *Estuar. coast. Shelf Sci.*, 23, 751-757.
- Ryther J.H. et W.M. Dunstan (1971). Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 171, 1008-1013.
- Service Maritime de la Seine Maritime, 3^{ème} section (1984-1991). Étude des pollutions en Seine. Cellule Antipollution.
- Solorzano L. et J.H. Sharp (1980). Determination of total dissolved phosphorus and particulate phosphorus in natural waters. *Limnol. Oceanogr.*, 25, 4, 754-758.
- Tréguer P. et P. Le Corre (1975). Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 110 pp.
- Vernet J.-P. et J. Dominik (1989). Bassin versant de type alpin : apport et emploi des radio-isotopes comme traceurs de transport, in : Connaissance et gestion de la frange littorale et du proche plateau continental. Cours intensif européen, Bordeaux, France, 15-28 septembre 1985, Conseil de l'Europe, Direction de l'enseignement, de la Culture et du Sport, éditeur, 81-106.
- Vollenweider R.A. (1968). The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as factors in eutrophication. Technical Report to OCDE, Paris, DAS/CSI/6827, 1-182.
- Walling D.E. et W. Webb (1985). Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers : some cautionary comments. *Mar. Pollut. Bull.*, 16, 12, 448-492.
- Williams J.D.H., J.-M. Jaquet et R.L. Thomas (1976). Forms of phosphorus in the surficial sediments of lake Erie. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 33, 413-429.