

**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'AMENAGEMENT LITTORAL**

**LES APPORTS EN SELS NUTRITIFS
DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE**

par

Jean-François GUILLAUD



R.INT.DEL/93.04/BREST

**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'AMENAGEMENT LITTORAL**

**LES APPORTS EN SELS NUTRITIFS
DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE**

par

Jean-François GUILLAUD

R.INT.DEL/93.04/BREST

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
1. MATERIELS ET METHODES	5
2. LE SILICIUM	5
2.1. LES CONCENTRATIONS	5
2.2. LES FLUX JOURNALIERS	7
2.3. LES APPORTS ANNUELS	8
3. LE PHOSPHORE.....	9
3.1. LES CONCENTRATIONS	9
3.1.1. Le phosphate	9
3.1.2. Le phosphore "particulaire"	11
3.1.3. Le phosphore total	13
3.2. LES FLUX JOURNALIERS	14
3.3. LES APPORTS ANNUELS	17
4. L'AZOTE	18
4.1. LES CONCENTRATIONS	18
4.1.1. Le nitrate.....	18
4.1.2. Le nitrite	20
4.1.3. L'ammonium	20
4.1.4. L'azote minéral dissous.....	21
4.1.5. L'azote organique dissous.....	22
4.1.6. L'azote organique particulaire	22
4.1.7. L'azote total	22
4.2. LES FLUX JOURNALIERS	23
4.2.1. L'azote minéral dissous.....	23
4.2.2. L'azote total	25
4.3. LES APPORTS ANNUELS	26
4.3.1. L'azote minéral dissous.....	26
4.3.2. L'azote total	27
5. CONCLUSIONS.....	28
6. BIBLIOGRAPHIE	30
LISTE DES SIGLES	32

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude des phénomènes d'eutrophisation en Baie de Seine (Programme National d'Océanographie Côtière), il est apparu nécessaire d'évaluer les flux de sels nutritifs parvenant à l'estuaire de la Seine ; ces flux ont été calculés à la station de Caudebec qui appartient au réseau d'observation de la Cellule Antipollution de la Seine-Maritime (fig. 1).

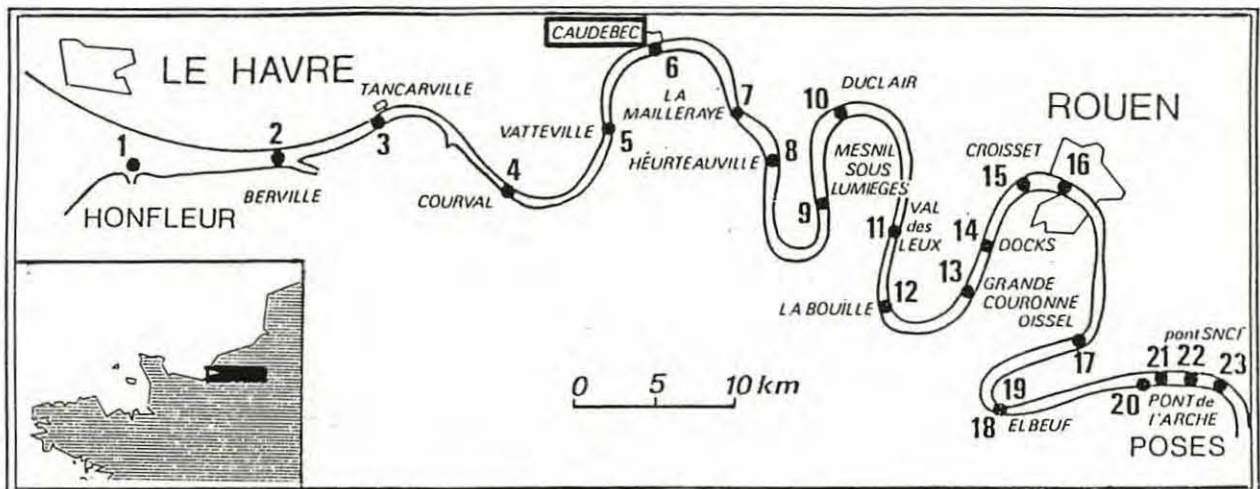


Figure 1 : Localisation de la station de Caudebec dans l'estuaire de la Seine.

Cette station présente l'avantage d'être en aval de Rouen et donc d'intégrer les rejets urbains et industriels de cette agglomération ; elle se situe toujours en amont de l'intrusion saline et les mesures y sont faites à une fréquence élevée (toutes les 2 semaines). Cette station a par contre l'inconvénient d'être soumise à la marée dynamique et donc de subir des augmentations temporaires des concentrations en matières en suspension (valeur moyenne : 56 mg/l à Caudebec contre 34 mg/l à Poses) ; elle peut aussi être influencée par la dispersion de rejets situés plus en aval mais ceux-ci restent faibles par rapport au flux global amont de sels nutritifs.

Dans cette étude, nous nous intéresserons successivement aux variations des concentrations et des flux de silicium, de phosphore et d'azote. Les données brutes des mesures en Seine nous ont été aimablement communiquées sur support informatique par Monsieur Ficht de la Cellule Antipollution de Rouen (Service Maritime de la Seine-Maritime, 3^e section, 1974 à 1991).

1. MATERIELS ET METHODES

Les prélèvements d'eau sont faits à l'aide d'une bouteille à clapets Niskin, au milieu du fleuve à mi-profondeur, en condition de marée moyenne (l'heure marée n'est pas prédéterminée).

Les méthodes d'analyses sont les suivantes :

- silicium : méthode de Rodier (1978) ;
- phosphate et phosphore total : norme AFNOR T90023 ;
- ammonium : méthode de Koroleff (1969) ;
- nitrite : norme AFNOR T90013 ;
- nitrate : norme AFNOR T90012 ;
- azote organique : méthode de Koroleff (1976).

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel Statgraphics 2.1.

2. LE SILICIUM

2.1. LES CONCENTRATIONS

Les concentrations en silicium dissous sont mesurées toutes les 2 semaines à Caudebec depuis 1984 ; elles varient de 0,3 mg/l à 6 mg/l avec une valeur moyenne de 3,3 mg/l (118 μ mol/l).

L'évolution des concentrations en fonction des débits montre une dispersion assez grande avec une augmentation rapide dans la gamme des faibles débits croissants puis une stabilisation lors des débits de crues. Ce type d'évolution caractérise une source diffuse où le lessivage des sols est prépondérant ; à cette évolution on peut ajuster une fonction du débit Q, du type :

$$a / (1 + e^{-(bQ + c)})$$

Cette fonction croît rapidement pour les faibles valeurs de Q puis tend vers la valeur a lorsque Q tend vers l'infini (fig. 2).

La variance résiduelle peut encore être réduite par l'introduction d'un facteur saisonnier reflétant l'influence de la consommation par les diatomées sur les concentrations en silice ; ce facteur est de la

forme : $\sin[(\text{mois} - 3) \cdot \pi/6]$; il est égal à -1 en décembre (production primaire minimale) et à $+1$ en juin (production primaire maximale). Paradoxalement, l'introduction de la température, qui constitue un facteur saisonnier typique, n'améliore pas la relation.

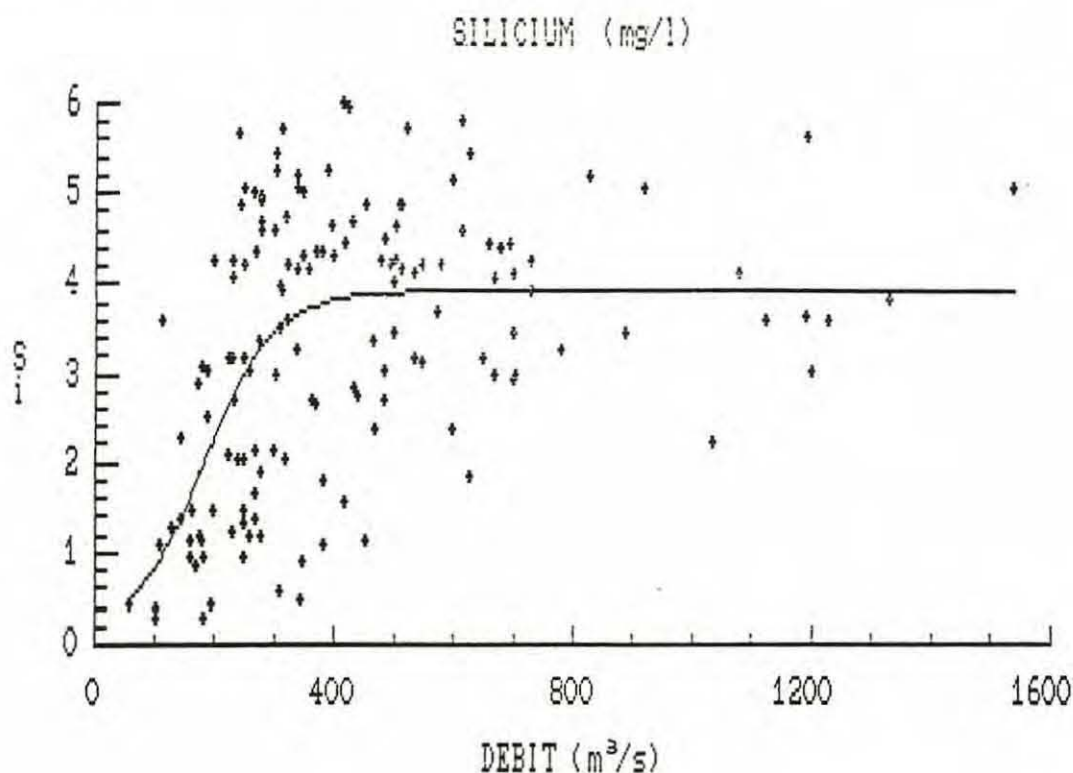


Figure 2 : Variation des concentrations en silicium en fonction des débits à Caudebec.

L'équation de la régression multiple non linéaire donnant les concentrations en silice en fonction du débit et du mois est la suivante :

$$Si = 3,86/1 + e^{(-0,015 Q + 2,46)} - 0,86 \sin[(\text{mois} - 3) \times 0,524]$$

$$n = 149 ; r^2 = 0,46 ;$$

$$Si \text{ en mg/l} ; Q \text{ en m}^3/\text{s}.$$

Les coefficients de cette équation ont été déterminés par la méthode de MARQUARDT ; ils sont tous significativement différents de zéro.

La représentation graphique des valeurs observées et des valeurs calculées par cette relation en fonction du temps montre une assez bonne concordance entre ces valeurs, avec cependant une sous-estimation durant les hivers 87-88 et 88-89 (fig. 3).

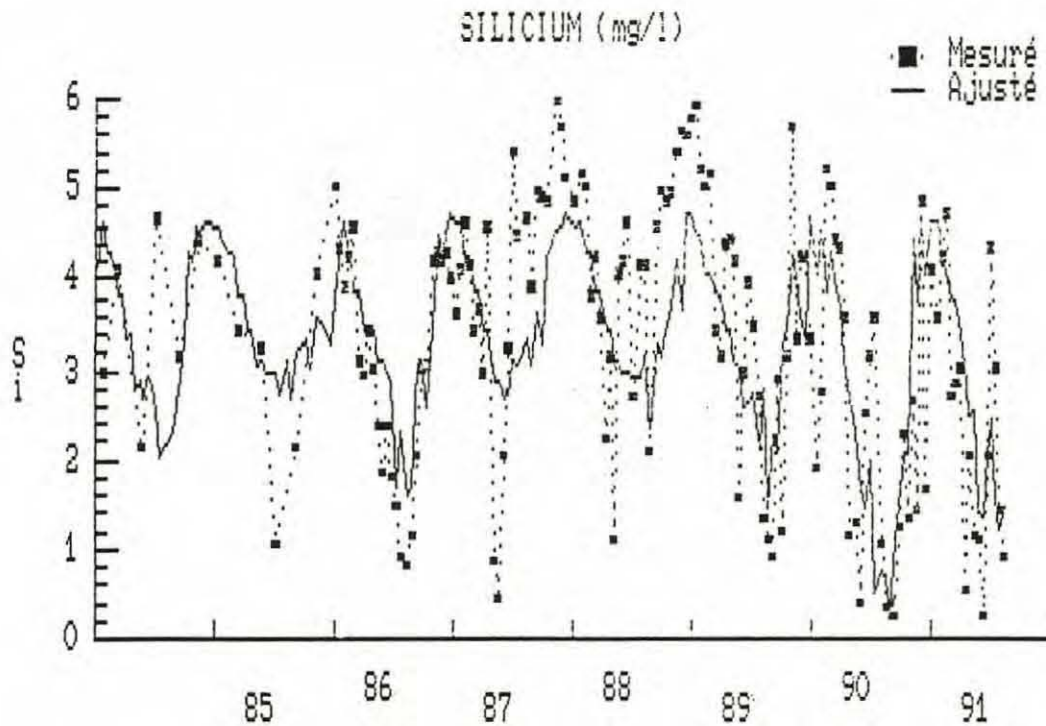


Figure 3 : Variation des concentrations mesurées et calculées en silicium à Caudebec.

2.2. LES FLUX JOURNALIERS

Une estimation des flux journaliers de silicium peut être calculée en multipliant les débits par l'estimation précédente des concentrations. On obtient ainsi une équation de la forme :

$$\text{Flux Si} = K.Q.[\text{concentration estimée : } f(Q, \text{mois})]$$

où K est un facteur correctif d'unité ($K = 0,0864$).

L'équation est la suivante :

$$\text{Flux Si} = 0,0864 Q \times [3,86/1 + e^{(-0,015 Q + 2,46)} - 0,86 \sin((\text{mois} - 3) \times 0,524)]$$

Flux Si en t/j ; Q en m³/s.

La comparaison entre les flux calculés par cette relation et les flux observés est représentée sur la figure 4.

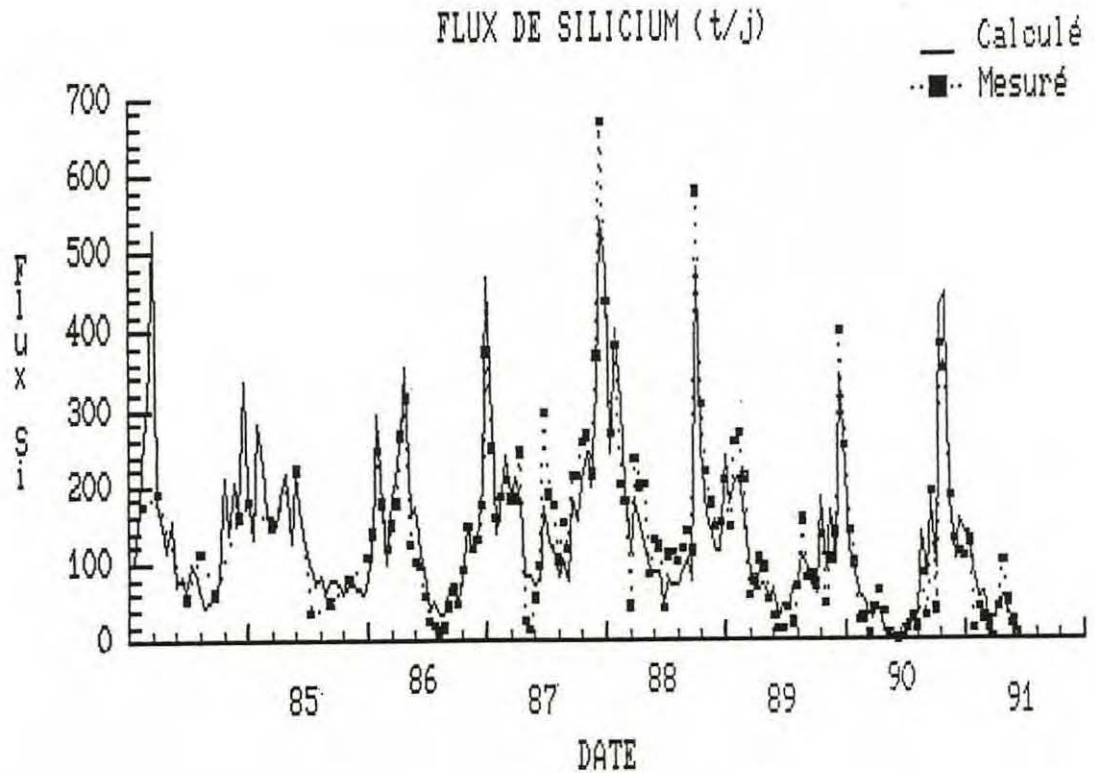


Figure 4 : Variation des flux calculés et des flux mesurés en silicium à Caudebec.

2.3. LES APPORTS ANNUELS

Les apports de silicium ont été calculés, pour chaque année, à l'aide de la formule suivante (WALLING et WEBB, 1985) :

$$\text{Flux annuel (t par an)} = K \cdot Q_m \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

Q_m = débit moyen annuel (m^3/s) ;

Q_i = débit instantané (m^3/s) ;

C_i = concentration instantanée (mg/l) ;

K = coefficient correcteur d'unité.

Pour l'évaluation des flux annuels, ce mode de calcul a été préféré à l'intégration annuelle de la courbe donnant la variation temporelle des flux estimés (fig. 4) ; le calcul utilisé permet de travailler avec les valeurs réelles des flux (et non pas leurs estimations) et de corriger les n débits pris en compte, par le débit annuel moyen réel Q_m .

La figure 5 représente sur la période 84-90 les valeurs annuelles du flux de silicium en fonction des débits moyens annuels.

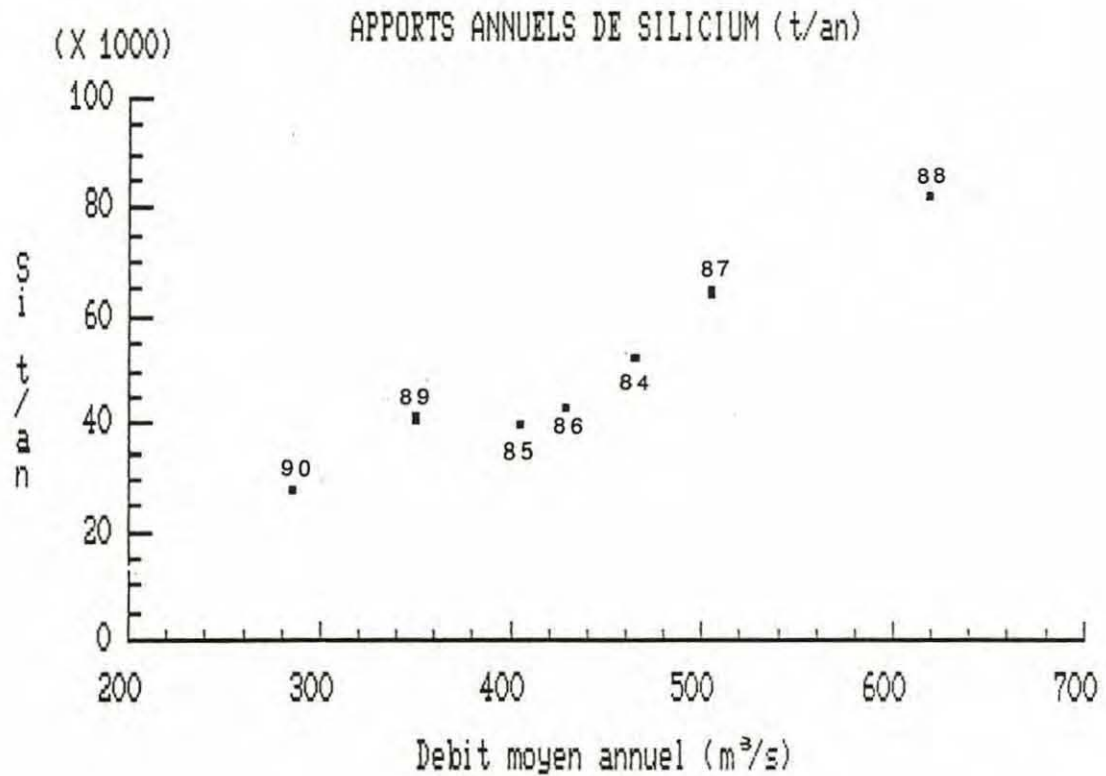


Figure 5 : Relation entre les débits moyens annuels et les flux annuels de silicium à Caudebec.

Pour un débit interannuel moyen de 413 m³/s, le flux de silicium est de 46 300 t par an.

3. LE PHOSPHORE

3.1. LES CONCENTRATIONS

3.1.1. Le phosphate

Les concentrations en P-PO₄ varient à Caudebec de 0,2 à 1,7 mg/l avec une valeur moyenne de 0,8 mg/l (26 µmol/l).

Lorsque les débits augmentent, les concentrations en P-PO₄ décroissent et la relation entre les deux paramètres est la suivante :

$$P-PO_4 = 55,88 Q^{-0,73}$$

$$n = 185 ; r^2 = 0,76 ;$$

$$P-PO_4 \text{ en mg/l ; } Q \text{ en m}^3/\text{s}.$$

Si l'on fait l'hypothèse que les concentrations observées sont dues à des apports constants, on devrait avoir une fonction du type $P-PO_4 = a Q^{-1}$; en fait les concentrations réelles en phosphate sont en léger excès, pour les forts débits, par rapport à la courbe qui traduit cette hypothèse de rejet constant (fig. 6) ; l'origine de cet excès est sans doute à rechercher dans le lessivage des sols.

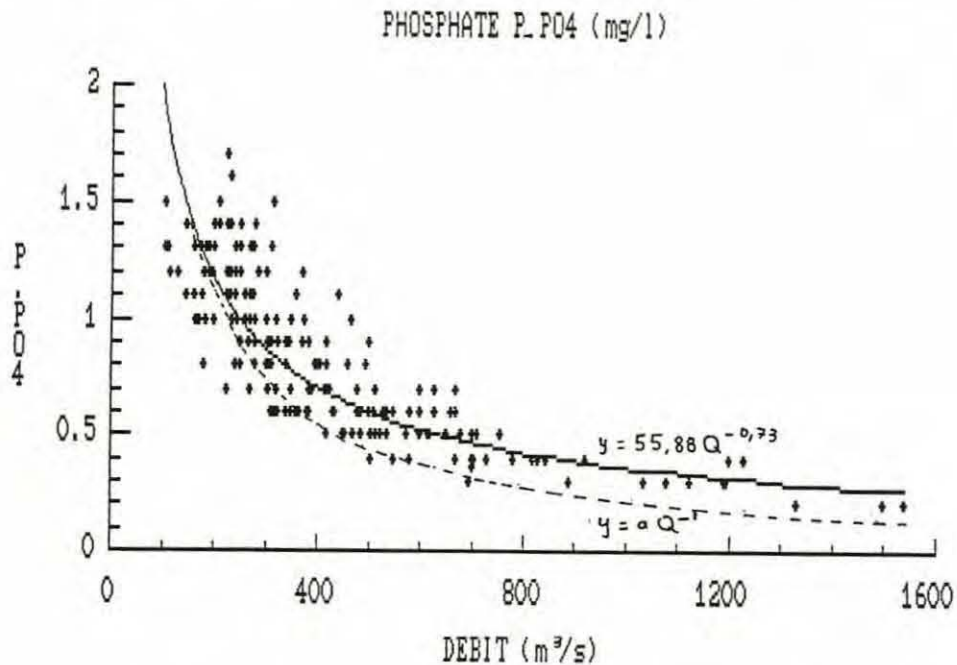


Figure 6 : Relation entre les concentrations en P-PO₄ et les débits à Caudebec.

On peut par ailleurs rechercher si une part de la variation des concentrations en phosphate est liée à une évolution pluriannuelle, indépendamment de la relation avec le débit ; pour cela on a ajusté les observations à une fonction du type $P-PO_4 = (a + bt)Q^c$ où t est le temps en jour et Q le débit en m³/s. L'équation de la régression multiple non linéaire est la suivante :

$$P-PO_4 = (31,7 - 0,003 t)Q^{-0,60}$$

$$n = 186 ; r^2 = 0,67.$$

Les coefficients de cette équation sont tous significativement différents de 0 et traduisent une baisse des concentrations de l'ordre de 3 % par an.

L'évolution pluriannuelle des concentrations mesurées, et des concentrations calculées à l'aide de la relation précédente, est représentée sur la figure 7.

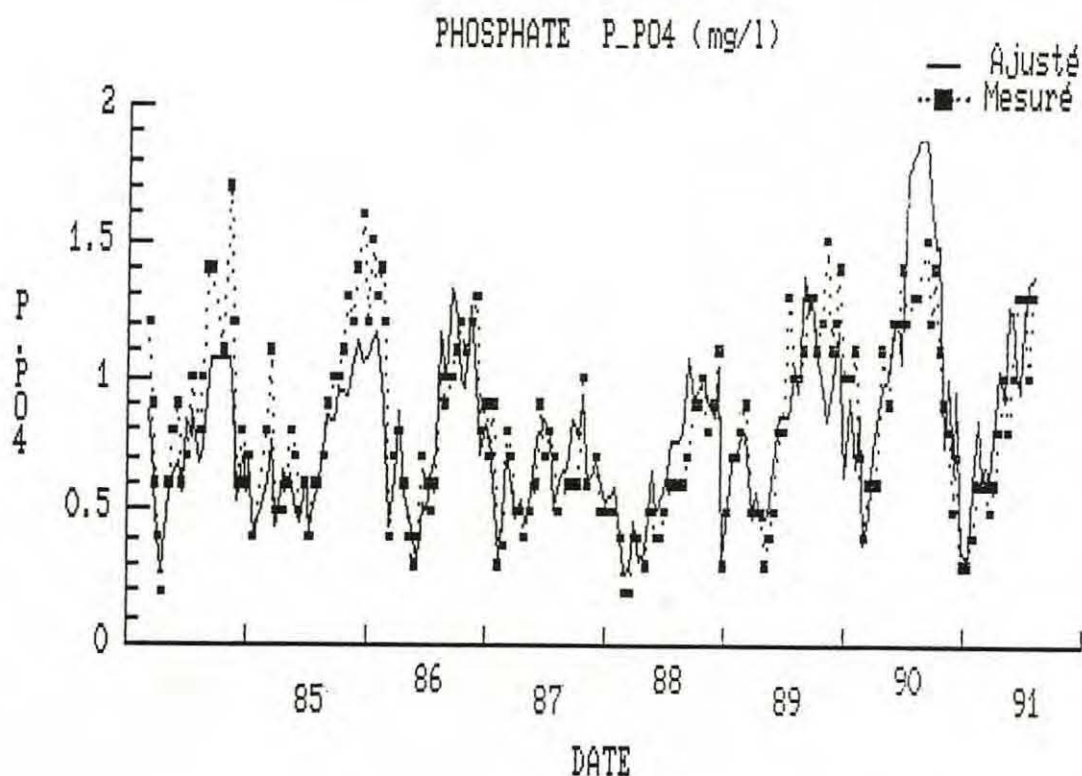


figure 7 : Evolution des concentrations mesurées et calculées en P-PO4 à Caudebec.

3.1.2. Le phosphore "particulaire"

La différence entre les concentrations de phosphore total (mesurées depuis 1989) et de phosphore des orthophosphates est appelée ici phosphore "particulaire" ; il comprend en fait le phosphore organique dissous et particulaire, les polyphosphates, le phosphore apatitique et les ortho-phosphates liés physiquement ou chimiquement aux particules. La concentration en phosphore "particulaire" à Caudebec varie de 0,01 mg/l à 0,66 mg/l avec une valeur moyenne de 0,25 mg/l (8 μ mol/l) ; cette valeur moyenne n'est pas statistiquement différente de celle mesurée à Poses (0,27 mg/l) malgré des teneurs en matières en suspension plus faibles à cette station amont.

Le taux moyen de phosphore "particulaire", par rapport au phosphore total, est de 23 % à Caudebec ; ce taux est voisin de celui mesuré à Poses (27 %).

Les concentrations en phosphore "particulaire" sont corrélées à la fois aux MES (matières en suspension) et au débit (qui sont à Caudebec deux variables indépendantes) suivant une relation de la forme :

$$P_{\text{particulaire}} = 3,8 \cdot 10^{-4} Q + 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ MES}$$

P particulaire en mg/l ; Q en m³/s ; MES en mg/l ;

n = 61 ; r² = 0,76.

L'évolution des concentrations en phosphore "particulaire" mesurées et calculées à l'aide de la relation précédente est représentée sur la figure 8.

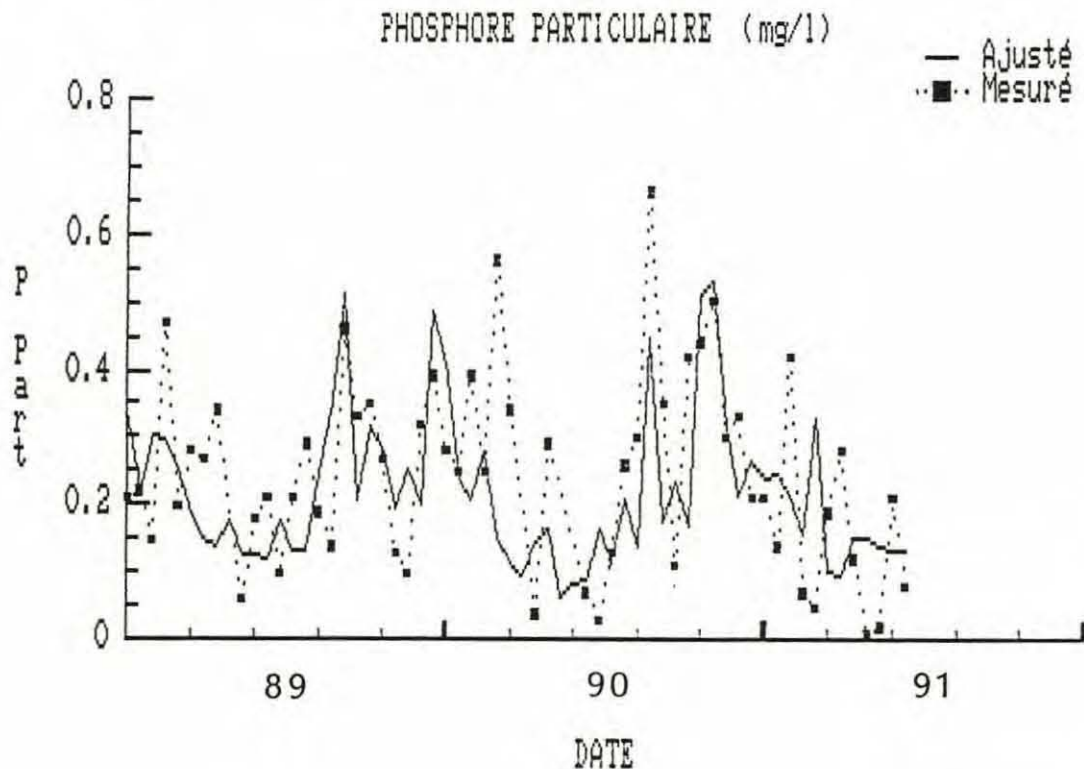


Figure 8 : Evolution des concentrations mesurées et calculées en P "particulaire" à Caudebec.

Les teneurs en phosphore "particulaire" rapportées à la masse de MES ont été calculées. Pour des teneurs en MES supérieures à 100 mg/l, la concentration en phosphore "particulaire" est relativement constante et égale en moyenne à $1,9 \cdot 10^{-3}$ mg de P par mg de MES (soit 60 $\mu\text{mol/g}$) ; cette valeur reflète la teneur en phosphore des éléments en suspension apportés lors des crues par ruissellement sur les bassins versants.

Pour des teneurs en MES inférieures à 50 mg/l, la charge en phosphore des particules augmente et est en moyenne égale à $8,1 \cdot 10^{-3}$ mg de P par mg de MES (soit 260 $\mu\text{mol/g}$).

Cette augmentation peut traduire une nature différente des particules en fonction de la charge en MES ; lorsque celles-ci sont en faible concentration, les éléments les plus fins et les plus riches en matière organique prédominent, cette matière organique étant elle-même plus riche en phosphore que la fraction minérale. Ces éléments fins peuvent être de nature minéralogique différente des particules plus grossières (moins riches en phosphore) qui sont présentes lorsque les concentrations en MES sont élevées.

3.1.3. Le phosphore total

L'attaque à chaud en milieu acide des échantillons d'eau brute fournit une mesure des concentrations en phosphore total (organique et minéral, dissous et particulaire) ; ces mesures sont réalisées à Caudebec depuis 1989. La concentration en phosphore total varie de 0,60 mg/l à 1,75 mg/l avec une valeur moyenne de 1,14 mg/l (37 $\mu\text{mol/l}$).

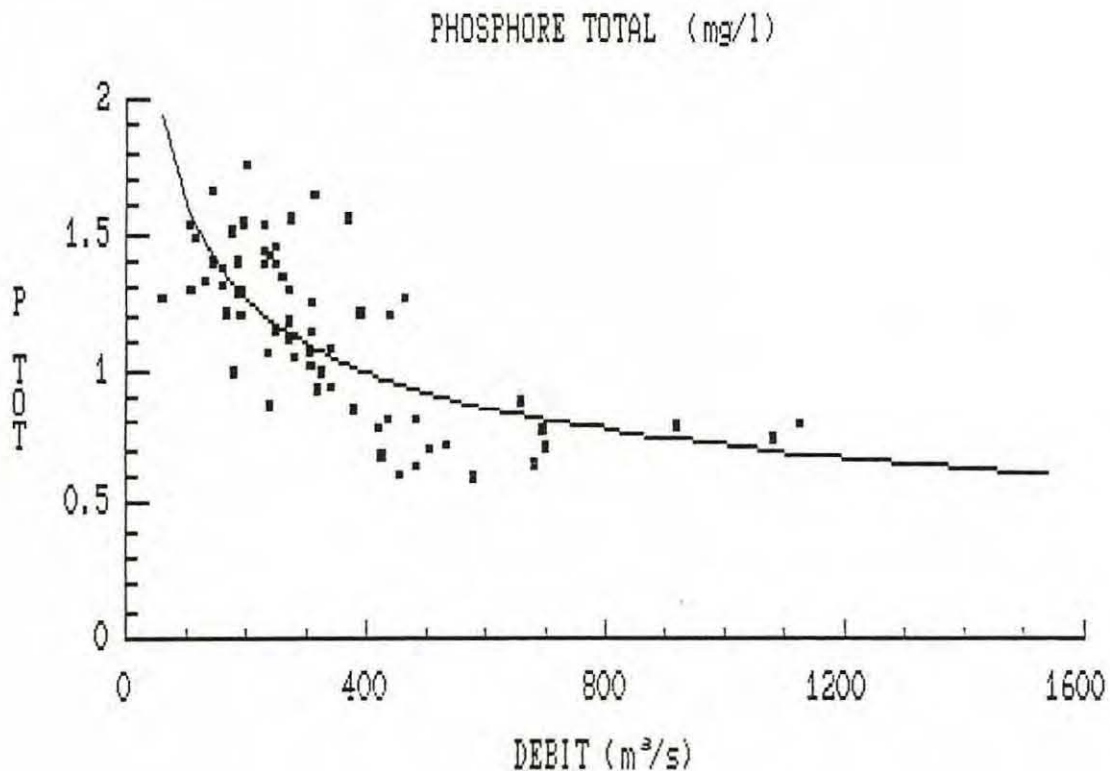


Figure 9 : Relation entre les concentrations en phosphore total et les débits à Caudebec.

La relation entre les débits et les concentrations en phosphore total est de la forme (fig. 9) :

$$P \text{ total} = 8,15 Q^{-0,35}$$

$$n = 66 ; r^2 = 0,51 ;$$

P total en mg/l ; Q en m³/s.

3.2. LES FLUX JOURNALIERS

Une estimation des flux journaliers de P-PO₄ peut être faite en multipliant les débits par l'estimation précédente des concentrations (en fonction des débits) ; on obtient aussi une équation de la forme :

$$\text{Flux P-PO}_4 = K.Q.(\text{concentration estimée : } f(Q))$$

où K est un facteur correctif d'unité (K = 0,0864).

L'équation est la suivante :

$$\text{Flux P-PO}_4 = 0,0864 Q[55,88 Q^{-0,73}] = 4,83 Q^{0,27}$$

Flux P-PO₄ en t/j ; Q en m³/s.

Les calculs ont été faits de façon similaire pour les flux de P "particulaire" et de P total, à partir de l'estimation précédente des concentrations ; on obtient les équations suivantes :

$$\text{Flux P particulaire} = 3,3 \cdot 10^{-5} Q^2 + 1,1 \cdot 10^{-4} Q \times \text{MES}$$

$$\text{Flux P total} = 0,704 Q^{0,65}$$

Flux P en t/j ; Q en m³/s ; MES en mg/l.

La figure 10 illustre les relations entre les flux de phosphore et les débits ; pour les flux de phosphore "particulaire", qui sont également fonction des MES, ces dernières ont été fixées à leur valeur moyenne (56 mg/l) pour la représentation graphique.

La figure 11 permet de faire la comparaison entre l'évolution des flux réels de phosphore à Caudebec et les flux calculés à l'aide des équations précédemment définies.

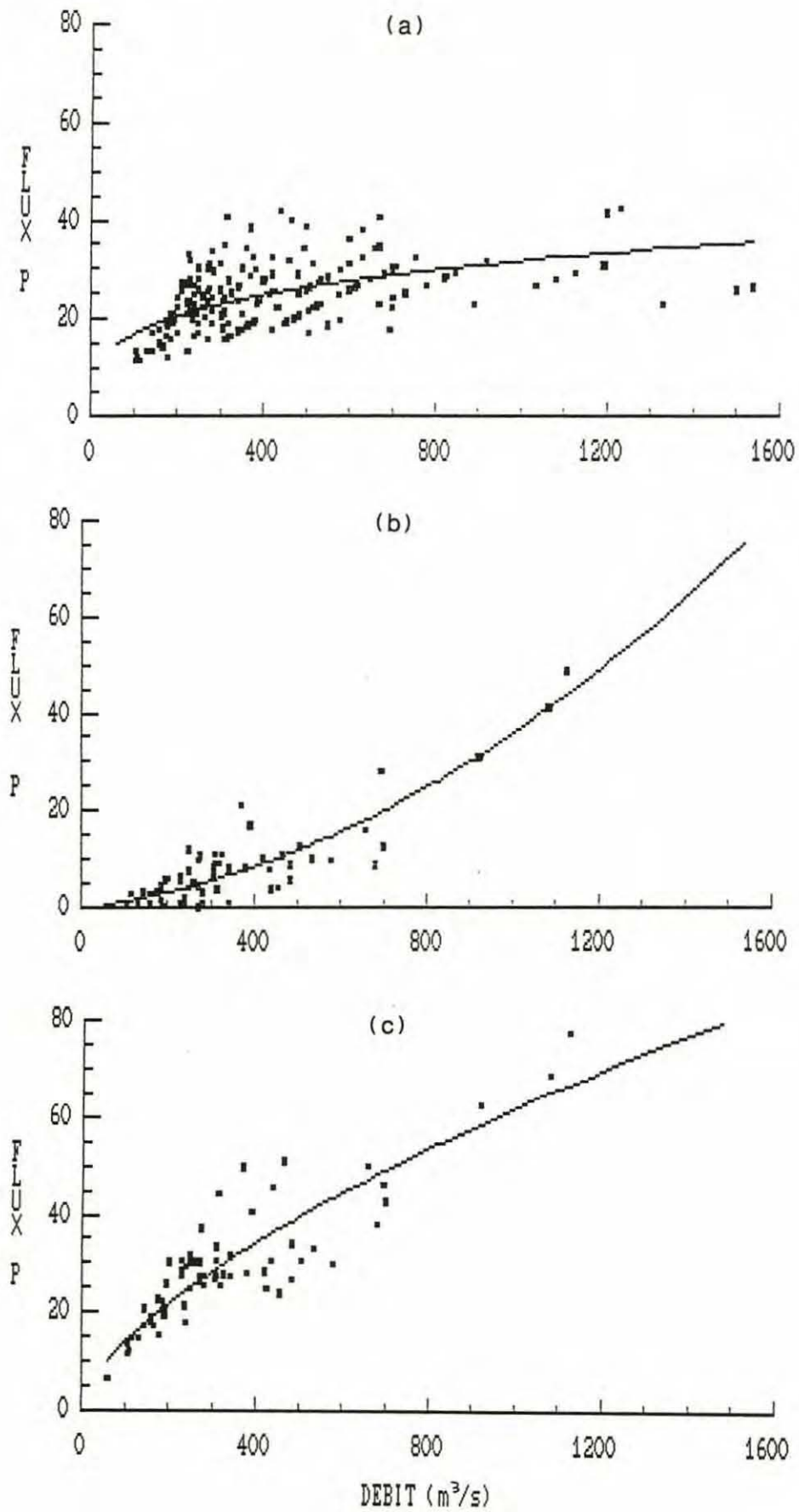


Figure 10 : Variation des flux journaliers de phosphore en fonction des débits à Caudebec (a : flux de P-PO₄ ; b : flux de P particulaire ; c : flux de P total).

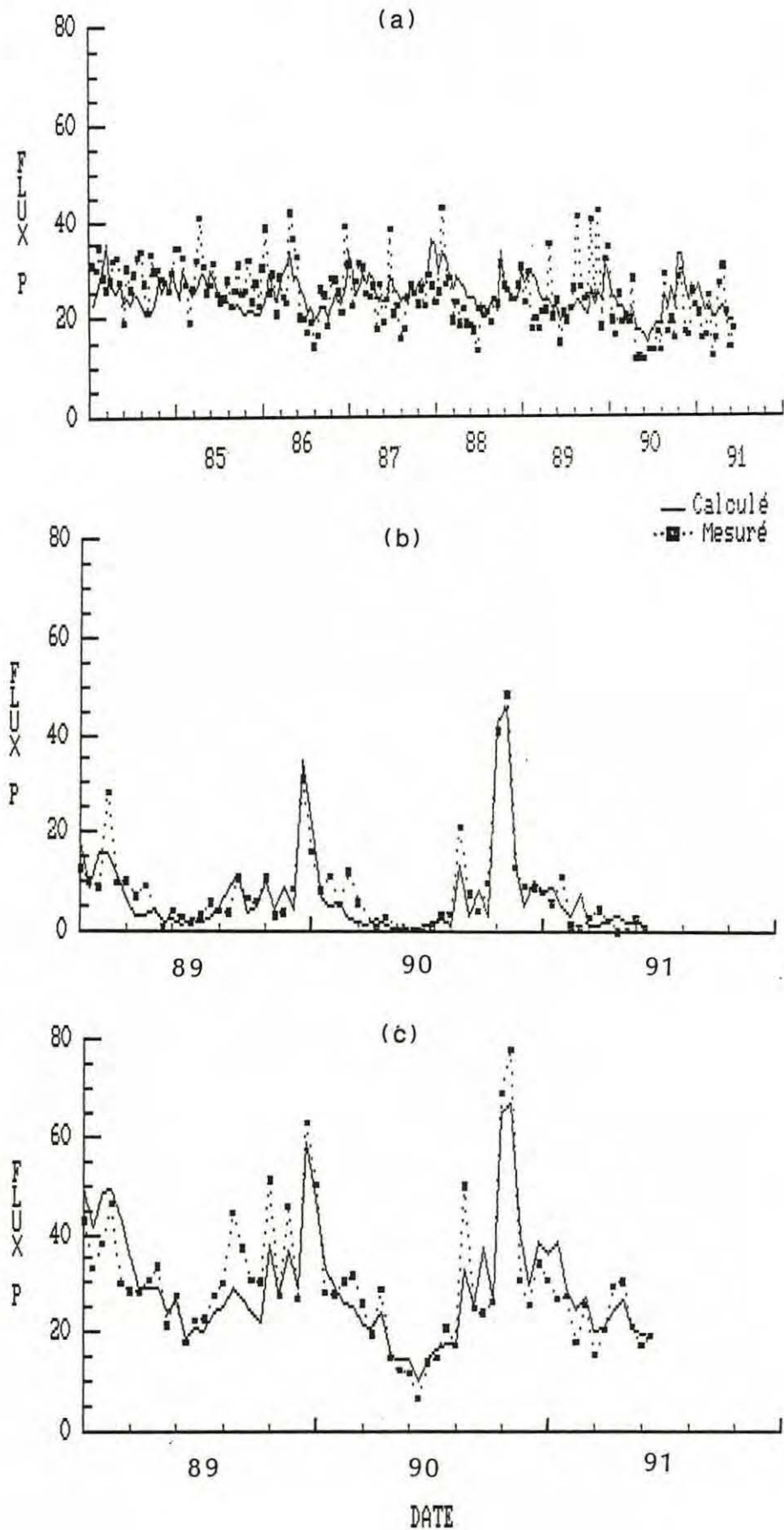


Figure 11 : Variation des flux mesurés et des flux calculés de phosphore à Caudebec (a : flux de $P-PO_4$; b : flux de P particulaire ; c : flux de P total).

La figure 11(a) illustre la tendance pluriannuelle de décroissance des flux de phosphate à Caudebec ; elle est de l'ordre de 300 t par an entre 1984 et 1991 et elle est reliée à la décroissance des concentrations mise en évidence précédemment (3 % par an). Les flux à Poses sont, quant à eux, restés constants sur la même période et cette diminution en aval de Rouen provient d'une réduction des rejets industriels au niveau de cette agglomération.

3.3. LES APPORTS ANNUELS

Comme pour le silicium, les apports annuels de P-PO₄ ont été calculés, pour chaque année, à l'aide de la formule suivante (WALLING et WEBB, 1985) :

$$\text{Flux annuel (t par an)} = K.Qm \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

Sur la période 84-90, les flux annuels de P-PO₄ à Caudebec varient peu avec les débits moyens annuels ; ils montrent par contre une décroissance avec le temps de 300 t par an en liaison avec la réduction des rejets à Rouen (fig. 12).

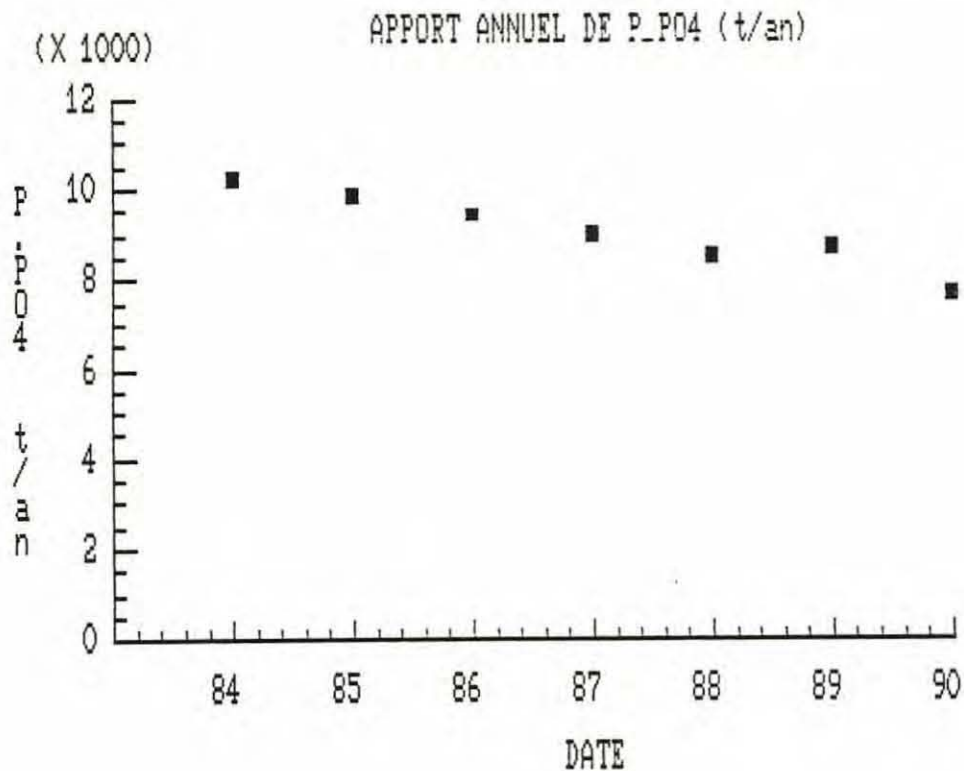


Figure 12 : Flux annuels de P-PO₄ à Caudebec.

Sur les trois dernières années d'étude (88, 89, 90), le flux moyen annuel de P-PO₄ à Caudebec est de 8 400 t par an ; à Poses, il est de 6 750 t par an, ce qui suppose un apport au niveau de la Région Rouennaise de 1 650 t par an, soit 25 % des apports amont à Poses ; en 1984-1985, cet apport à Rouen était de 2 750 t par an, soit 37 % des apports amont.

Des données plus anciennes permettent de constater que les apports amont (Poses) sont restés relativement stables (6 900 t par an entre 1975 et 1977) alors que les apports à Rouen étaient à cette période de l'ordre de 5 200 t par an, donnant un flux total à l'aval de 12 000 t par an de P-PO₄.

Les apports annuels de P "particulaire" à Caudebec, évalués en 89-90, sont de 2 850 t par an.

Les apports annuels de P total à Caudebec, évalués sur la même période, sont très voisins de 11 000 t par an.

A ces apports par la Seine se rajoutent les apports dus aux rejets de phosphogypses par émissaire en Baie de Seine qui représentent 2 700 t par an de P total et 890 t par an de P-PO₄.

Si l'on fait l'hypothèse d'un transport conservatif du phosphore dans l'estuaire de la Seine, il arrive donc annuellement dans la partie orientale de la Baie de Seine 13 700 t par an de P total dont 9 300 t par an de P-PO₄ ; à titre de comparaison, ces 13 700 t par an sont équivalentes au rejet brut de 9,4 10⁶ eq-ht (4 g/eq-ht par jour).

4. L'AZOTE

4.1. LES CONCENTRATIONS

4.1.1. Le nitrate

Les concentrations en N-NO₃ varient à Caudebec de 4,1 mg/l à 7,2 mg/l avec une valeur moyenne de 5,4 mg/l (386 μmol/l) sur la période 84-91.

Les variations des concentrations en N-NO₃ sont faiblement corrélées au débit, avec une tendance à la dilution lors des crues ; cette légère dilution pourrait être due aux eaux de ruissellement dont

les teneurs en nitrate sont inférieures à celles du fleuve. La relation est de la forme (fig. 13) :

$$N\text{-NO}_3 = 5,69 - 6,9 \cdot 10^{-4} Q$$

$N\text{-NO}_3$ en mg/l ; Q en m^3/s ;

$n = 186$; $r^2 = 0,12$.

La recherche d'une évolution pluriannuelle des concentrations en nitrate a été faite en intégrant le temps (en jour) dans une régression multiple linéaire (méthode "pas à pas" avec un ratio F d'entrée et de sortie égal à 4) ; on obtient :

$$N\text{-NO}_3 = 5,29 - 5,4 \cdot 10^{-4} Q + 2,3 \cdot 10^{-4} t$$

$n = 186$; $r^2 = 0,23$.

Cette relation montre que les concentrations sont en augmentation de 1,6 % par an, soit 12 % entre 1984 et 1991.

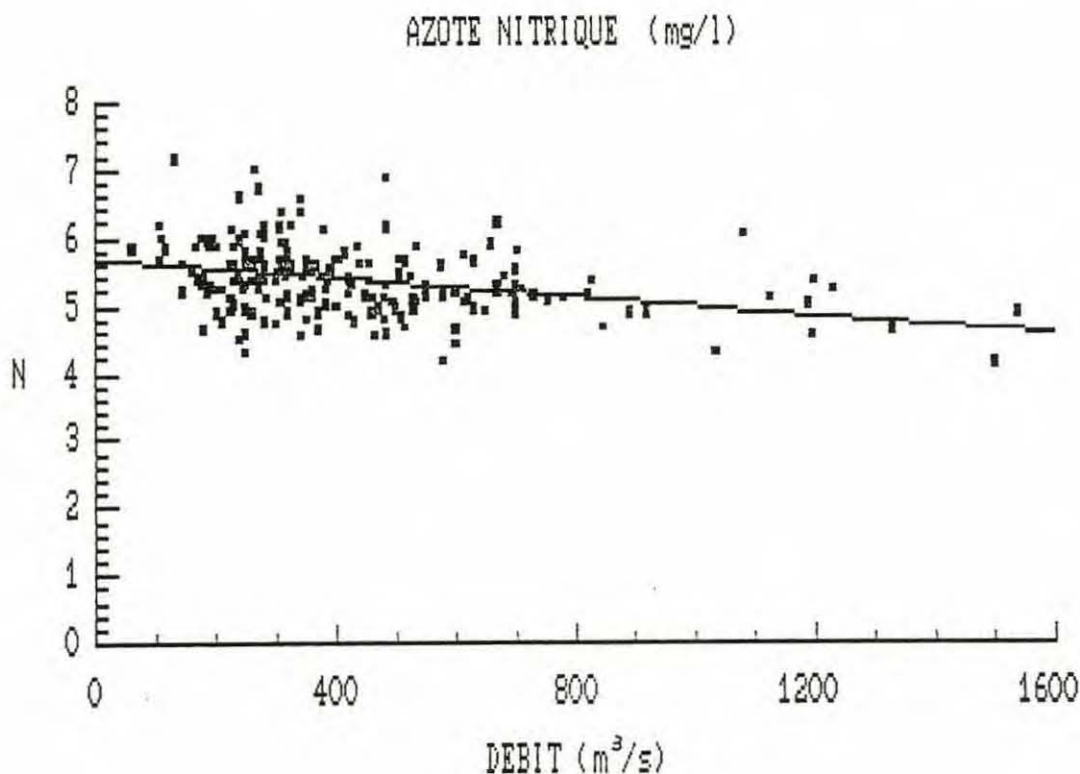


Figure 13 : Relation entre les débits et les concentrations en azote nitrique à Caudebec.

4.1.2. Le nitrite

Les concentrations en nitrite sont faibles en hiver (de l'ordre de 0,10 mg/l) et plus élevées en été (0,20 mg/l), à l'exception du mois d'août (0,07 mg/l) durant lequel le pic estival de nitrite n'apparaît pas du fait des meilleures conditions d'oxygénation de l'estuaire.

4.1.3. L'ammonium

Les concentrations en azote ammoniacal varient de 0,01 mg/l à 3,45 mg/l avec une valeur moyenne de 0,83 mg/l (59 $\mu\text{mol/l}$).

Elles dépendent significativement à la fois du débit (dilution des rejets) et de la température (oxydation de l'ammonium en nitrite et nitrate) ; l'équation de régression multiple linéaire est de la forme :

$$\text{N-NH}_4 = 2,86 - 0,10 T - 0,0015 Q$$

N-NH₄ en mg/l ; T en °C ; Q en m³/s ;

n = 186 ; r² = 0,50.

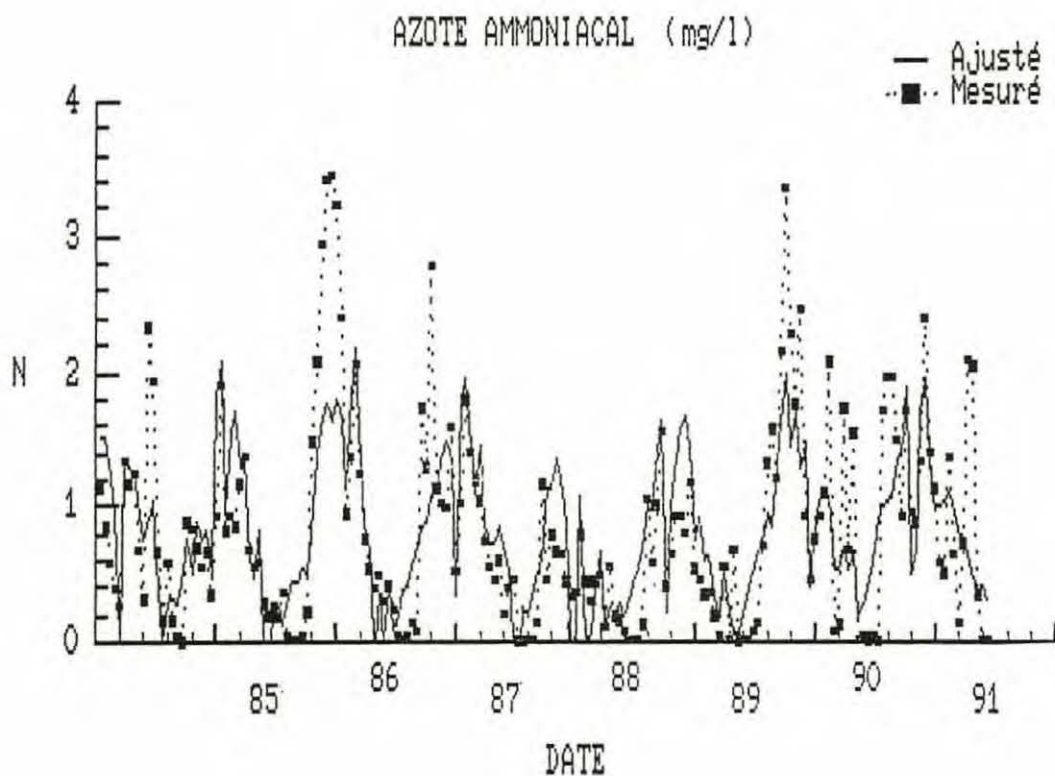


Figure 14 : Evolution des concentrations mesurées et des concentrations calculées en azote ammoniacal à Caudebec.

La comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées par cette relation est représentée sur la figure 14 ; elle montre une certaine sous-évaluation des concentrations en période hivernale.

4.1.4. L'azote minéral dissous

La somme des concentrations en nitrate, nitrite et ammonium fournit des valeurs d'azote total minéral dissous qui varient de 4,4 à 8,6 mg/l avec une valeur moyenne de 6,4 mg/l (457 $\mu\text{mol/l}$).

Ces concentrations sont significativement corrélées au débit et à la température suivant une régression multiple linéaire de la forme :

$$N \text{ minéral} = 8,55 - 2,2 \cdot 10^{-3} Q - 9,3 \cdot 10^{-2} T$$

N minéral en mg/l ; T en °C ; Q en m³/s ;

n = 186 ; r² = 0,47.

Cette équation est très proche de la somme des équations donnant N-NO₃ et N-NH₄, et qui est égale à :

$$N \text{ minéral} = 8,55 - 2,2 \cdot 10^{-3} Q - 0,10 T$$

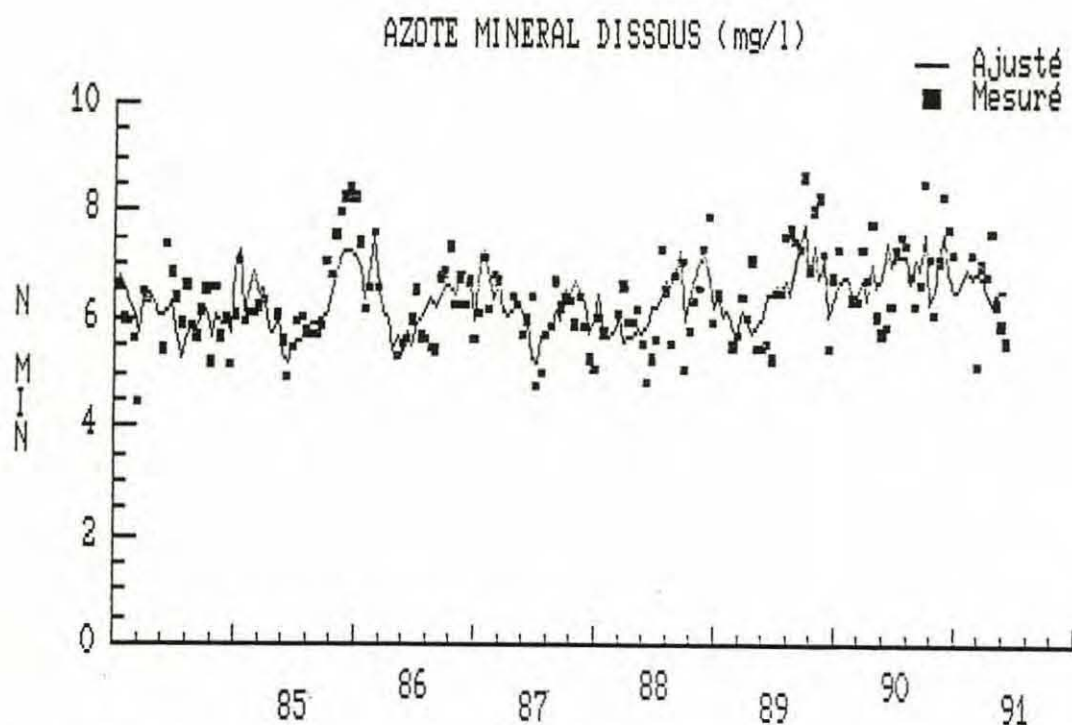


Figure 15 : Variation des concentrations mesurées et des concentrations calculées d'azote minéral dissous à Caudebec.

La comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées à l'aide de cette dernière relation est représentée sur la figure 15.

L'intégration du temps dans la régression multiple linéaire montre que les concentrations en azote minéral dissous ont significativement progressé de 1,9 % par an, soit 14 % entre 1984 et 1991.

4.1.5. L'azote organique dissous

Mesurées depuis 1988 par différence entre l'azote organique total et l'azote organique particulaire, les concentrations en azote organique dissous (NOD) sont comprises entre 0,11 mg/l et 1,15 mg/l avec une valeur moyenne de 0,51 mg/l (36 $\mu\text{mol/l}$) ; ces concentrations n'apparaissent positivement et faiblement corrélées qu'avec la température suivant une équation de la forme :

$$\text{NOD} = 0,33 + 0,012 T$$

$$n = 86 ; r^2 = 0,11 ;$$

$$\text{NOD en mg/l ; T en } ^\circ\text{C}.$$

4.1.6. L'azote organique particulaire

Les concentrations en azote organique particulaire (NOP) sont comprises entre 0,1 et 1,06 mg/l avec une valeur moyenne égale à 0,35 mg/l (25 $\mu\text{mol/l}$) ; ces concentrations montrent une relation, curieusement faible, avec les matières en suspension, de la forme :

$$\text{NOP} = 0,027 \text{ MES}^{0,59}$$

$$\text{NOP en mg/l ; MES en mg/l ;}$$

$$n = 84 ; r^2 = 0,19.$$

4.1.7. L'azote total

La somme des concentrations en azote minéral et en azote organique représente les concentrations en azote total qui varient de 5,5 à 9,7 mg/l avec une valeur moyenne de 7,2 mg/l (514 $\mu\text{mol/l}$). Ces concentrations d'azote total varient significativement en fonction inverse du débit (effet de dilution) et de la température ; la diminution des concentrations en azote total lorsque la température augmente peut traduire une perte d'azote, soit par dénitrification en été, soit par piégeage d'azote organique

particulière dans les sédiments en étiage. L'équation de régression multiple linéaire est la suivante :

$$N_{\text{total}} = 9,16 - 2,1 \cdot 10^{-3} Q - 8 \cdot 10^{-2} T$$

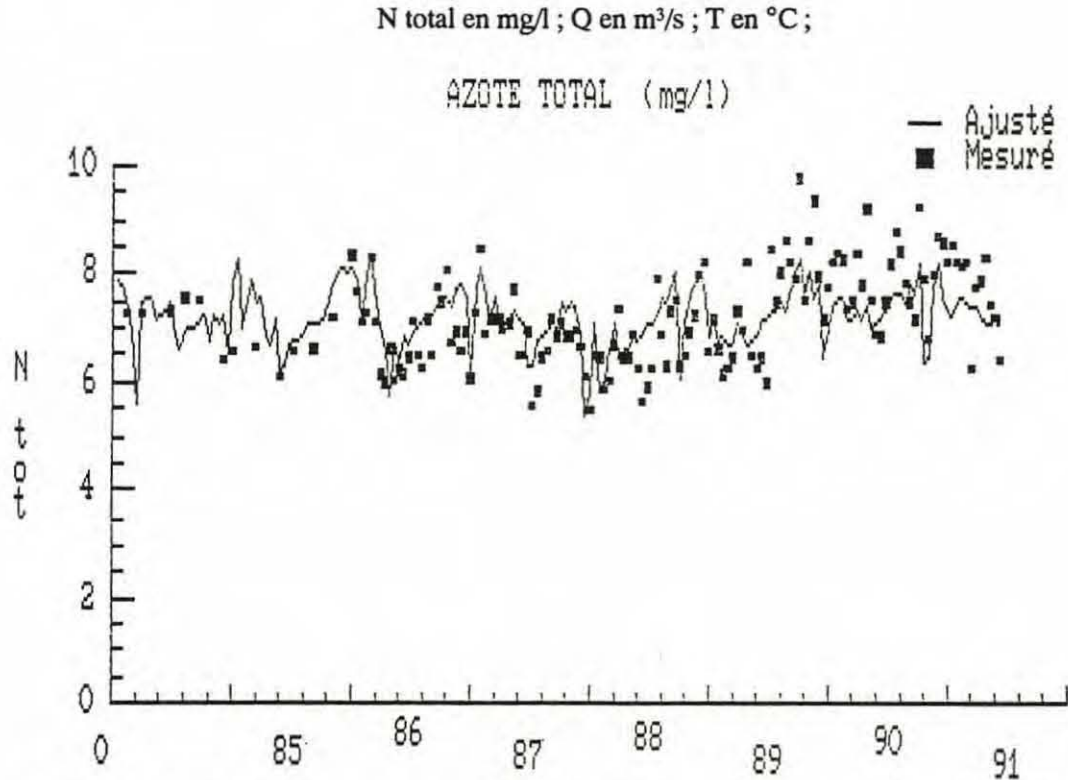


Figure 16 : Variation des concentrations mesurées et des concentrations calculées d'azote total à Caudebec.

Les valeurs observées et les valeurs calculées par cette relation précédente sont représentées sur la figure 16. L'intégration du temps dans la régression multiple linéaire montre que les concentrations en azote total ont significativement progressé de l'ordre de 2,2 % par an, soit 17 % sur la période comprise entre 1984 et 1991.

La forte augmentation observée en 90-91 est due à la fois à cette évolution pluriannuelle et à la faiblesse des débits durant ces années (corrélation inverse débit-concentration).

4.2. LES FLUX JOURNALIERS

4.2.1. L'azote minéral dissous

Une estimation des flux journaliers d'azote minéral dissous peut être calculée en multipliant les débits par l'estimation précédente des concentrations, fonction à la fois du débit et de la température ; une

expression plus simple de ces flux peut néanmoins être obtenue en négligeant le rôle secondaire de la température dans l'évolution des concentrations qui sont alors estimées uniquement en fonction du débit ; on obtient alors pour les flux la relation suivante :

$$\text{Flux N minéral} = 0,0864 Q (6,92 - 1,25 \cdot 10^{-3} Q)$$

Soit :

$$\text{Flux N minéral} = 0,60 Q - 1,1 \cdot 10^{-4} Q^2$$

Flux N minéral en t/j ; Q en m³/s.

La figure 17 représente les flux calculés par la relation précédente et les flux observés en fonction du débit à Caudebec.

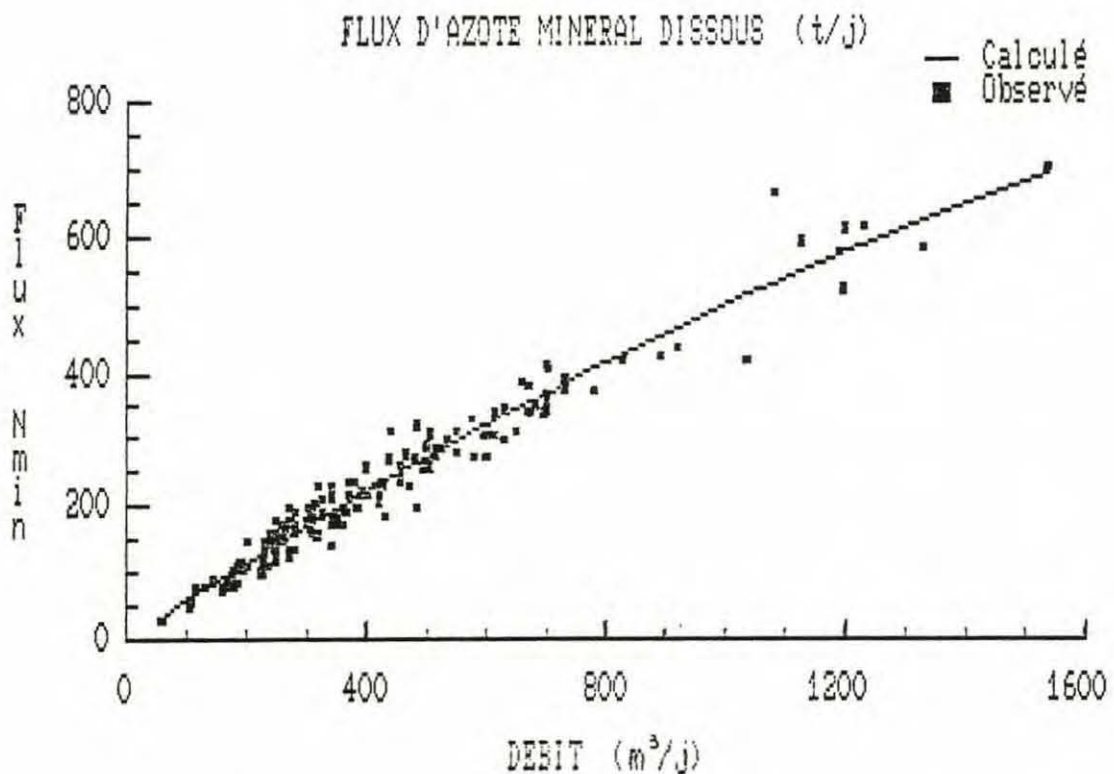


Figure 17 : Variation des flux journaliers d'azote minéral dissous en fonction des débits à Caudebec.

4.2.2. L'azote total

De la même manière que pour l'azote minéral dissous, une évaluation simple des flux d'azote total a été calculée en multipliant les débits par une estimation des concentrations en fonction uniquement du débit (le rôle secondaire de la température est négligé) ; on obtient la relation suivante :

$$\text{Flux N total} = 0,0864 Q(7,74 - 1,26 \cdot 10^{-3} Q)$$

Soit :

$$\text{Flux N total} = 0,67 Q - 1,1 \cdot 10^{-4} Q^2$$

Flux N total en t/j ; Q en m³/s.

La figure 18 représente les flux calculés par la relation précédente et les flux observés en fonction du débit à Caudebec.

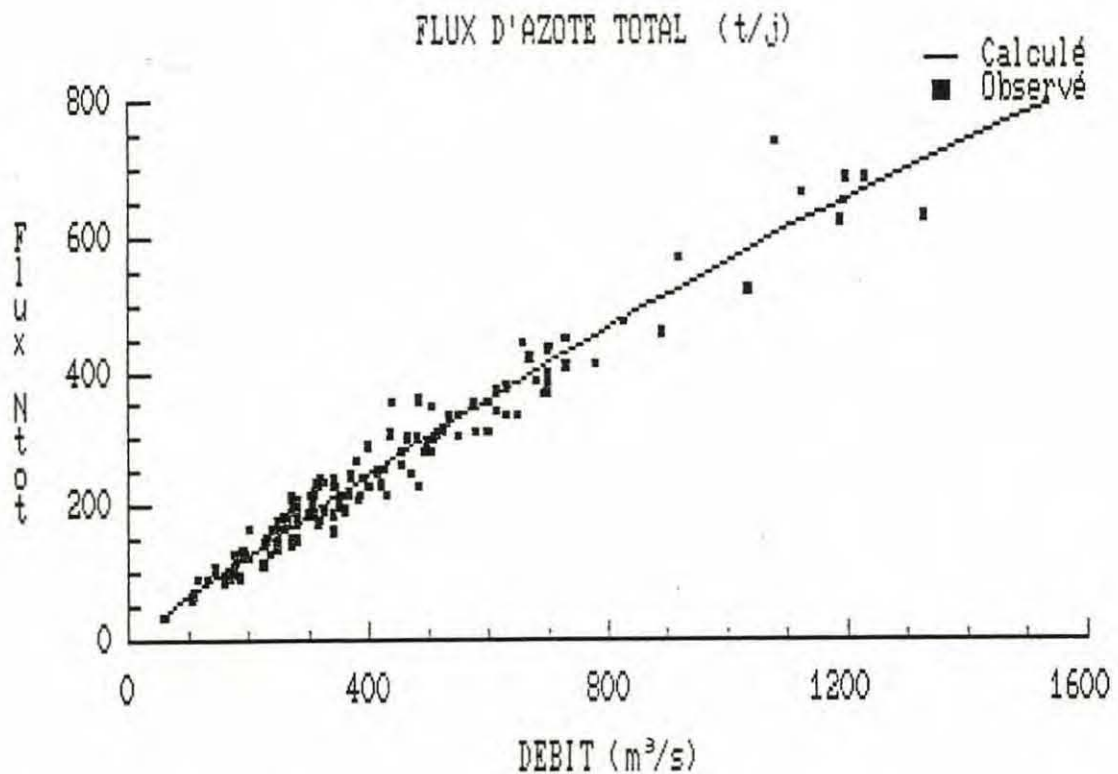


Figure 18 : Variation des flux journaliers d'azote total en fonction des débits à Caudebec.

Les flux d'azote total à Caudebec ne sont pas statistiquement différents de ceux mesurés à Poses ; il ne semble donc pas y avoir d'apports massifs d'azote au niveau de l'agglomération rouennaise (les

120 000 habitants de cette agglomération produisent théoriquement 1,8 t d'azote par jour, ce qui est faible en comparaison des apports amont).

4.3. LES APPORTS ANNUELS

4.3.1. L'azote minéral dissous

Les apports d'azote minéral dissous ($N-NO_3 + N-NO_2 + N-NH_4$) ont été évalués chaque année avec la formule déjà décrite pour les apports de phosphore et de silicium :

$$\text{Flux} = K \cdot Q_m \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

Ces apports sont en étroite relation avec le débit moyen annuel (fig. 19).

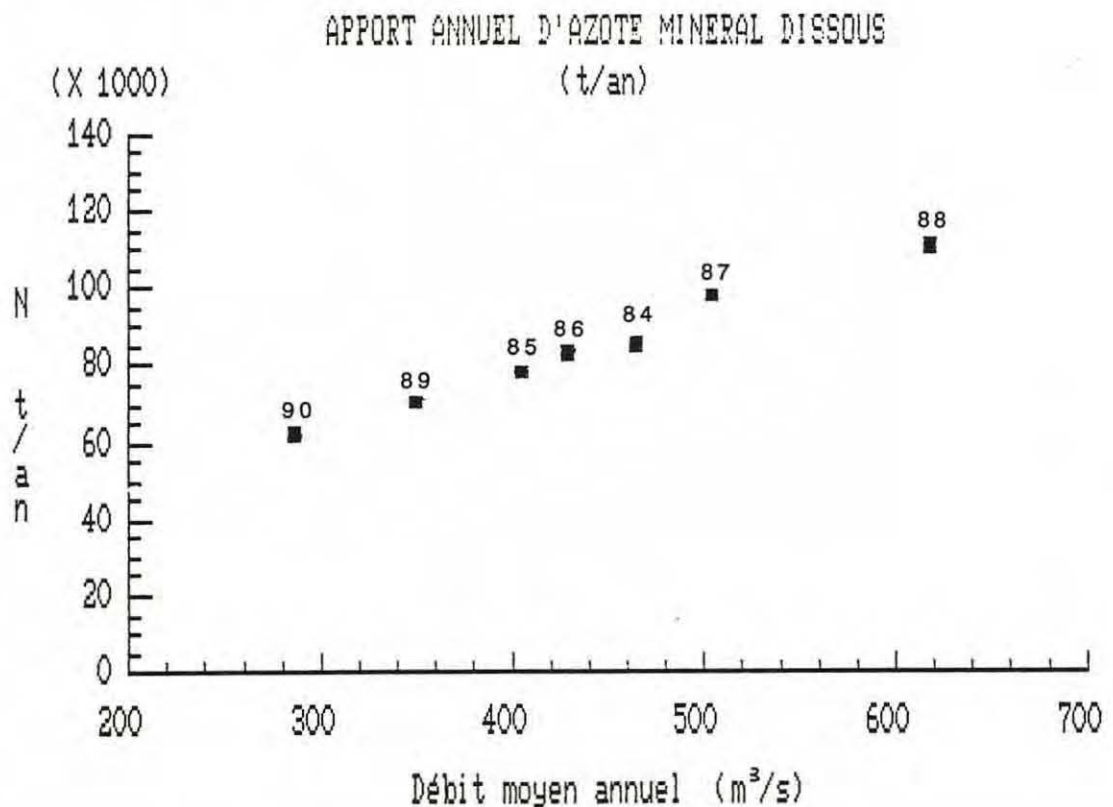


Figure 19 : Apport annuel d'azote minéral dissous en fonction du débit moyen annuel à Caudebec.

Pour un débit moyen interannuel de 413 m³/s, les apports d'azote minéral dissous sont de 80 500 t par an. Des données plus anciennes, issues de mesures fréquentes faites à Courval, donnent pour un même

débit interannuel de $413 \text{ m}^3/\text{s}$ un apport annuel moyen d'azote minéral dissous de $44\,000 \text{ t}$ par an durant la période 1968–1973 ; les apports d'azote minéral dissous ont donc presque doublé en vingt ans.

4.3.2. L'azote total

Les apports d'azote total (minéral + organique) ont été évalués annuellement, de la même manière que les apports d'azote minéral dissous. Ces apports annuels sont en étroite relation avec le débit moyen annuel (fig. 20).

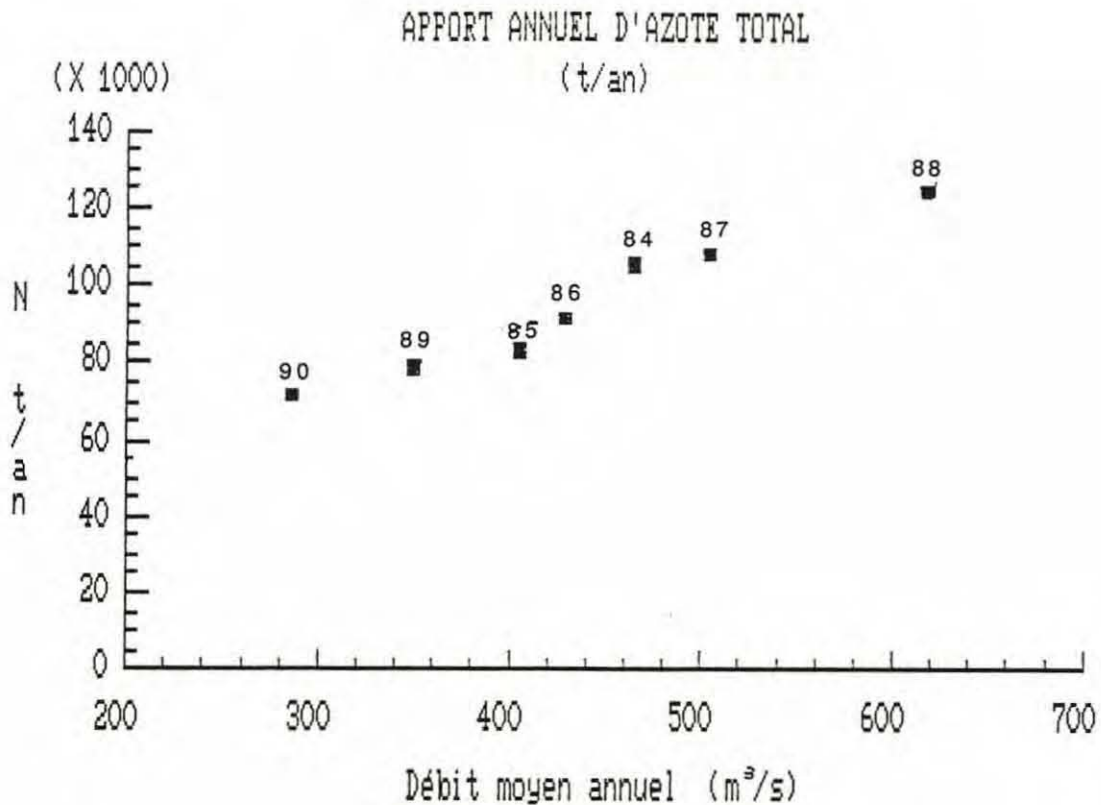


Figure 20 : Apport annuel d'azote total en fonction des débits moyens annuels à Caudebec.

Pour un débit moyen interannuel de $413 \text{ m}^3/\text{s}$, les apports d'azote total sont de $90\,700 \text{ t}$ par an.

Les apports annuels d'azote organique total représentent quant à eux de l'ordre de $10\,000 \text{ t}$ par an (soit 11% des apports d'azote total) ; des données plus anciennes montrent que ces apports d'azote organique sont restés relativement stables depuis 1979 ($10\,000$ à $12\,000 \text{ t}$ par an).

A titre de comparaison, les apports d'azote total ($90\,700 \text{ t}$ par an) sont équivalents aux rejets bruts de $16,5 \cdot 10^6 \text{ éq. ht}$.

5. CONCLUSIONS

Les variations des concentrations en sels nutritifs dans l'estuaire de la Seine, en amont de l'intrusion saline (station de Caudebec), ont été décrites ; les concentrations en silicium sont liées au débit (lessivage) et à la saison (consommation par le phytoplancton fluvial) ; les concentrations en phosphore sont une fonction inverse du débit et reflètent l'influence prépondérante des rejets ponctuels constants sur les teneurs en phosphore ; les concentrations en azote total sont, au cours de l'année, relativement stables, avec une légère diminution quand les débits et les températures augmentent ce qui traduit, d'une part, l'influence négligeable des apports constants et, d'autre part, l'existence possible de phénomènes de dénitrification (ou de stockage d'azote particulaire dans les sédiments en période estivale).

Les équations donnant les concentrations en sels nutritifs en mg/l à Caudebec sont les suivantes :

$$Si = 3,86/1 + e^{(-0,015 Q + 2,46)} - 0,86 \sin[(\text{mois} - 3) \times 0,524]$$

$$P\text{-}PO_4 = 55,88 Q^{-0,73}$$

$$P\text{-total} = 8,15 Q^{-0,35}$$

$$N \text{ minéral} = 8,55 - 2,2 \cdot 10^{-3} Q - 9,3 \cdot 10^{-2} T$$

$$N \text{ total} = 9,16 - 2,1 \cdot 10^{-3} Q - 8 \cdot 10^{-2} T$$

Les apports annuels de silicium et d'azote sont actuellement, pour un débit moyen interannuel égal à 413 m³/s, de :

- 46 300 t par an de silicium,
- 80 500 t par an d'azote minéral dissous,
- 90 700 t par an d'azote total.

Les apports de phosphore, indépendants des débits moyens annuels, sont actuellement de :

- 8 400 t par an de P-PO₄,
- 11 000 t par an de P total.

Les apports de P-PO₄ sont en diminution de 300 t par an (entre 1984 et 1990), du fait de la réduction des rejets dans l'agglomération rouennaise, qui sont actuellement de 1 650 t par an. Par contre, les données concernant les variations des concentrations en azote total traduisent, sur la période 1984-1991, une croissance des apports de l'ordre de 2 % par an.

Tableau I
Apports annuels en azote et phosphore par quelques grands fleuves.

Fleuve	Débit moyen (m ³ /s)	Surface bassin versant (10 ³ km ²)	N minéral (t/an)	P-PO ₄ (t/an)	P total (t/an)	$\frac{\text{N minéral}}{\text{Surf. B.V.}}$ (kg/km ² .an)	$\frac{\text{P-PO}_4}{\text{Surf. B.V.}}$ (kg/km ² .an)	Références
Seine	413	78	80 500	8 400	11 000	1 030	110	Cette étude
Loire	890	115	137 000	3 200	7 500	1 190	28	A.B.L.B. (1989-1991)
Gironde	780	71	50 000	1 600	-	700	23	IFREMER (1991-1992)
Rhône	1 700	99	67 000	5 500	7 300	680	55	ROMANA (com. pers.)
Vilaine	70	11	11 700	250	-	1 060	23	MERCERON (1987)
Rhin	2 200	160	362 000	22 000	38 000	2 260	137	DE JONGE (1990)
Pô	1 500	75	105 000	4 900	-	1 400	65	MARCHETTI (1990)

Par ailleurs, les valeurs moyennes des rapports molaires Si/N et Si/P dans ces apports sont faibles (respectivement 0,28 et 6,1) et ne permettent pas d'écarter l'hypothèse d'une limitation par la silice de la croissance des diatomées en Baie de Seine ; cette hypothèse doit cependant être vérifiée par une étude réelle des facteurs limitants.

La comparaison des apports annuels de la Seine avec ceux d'autres grands fleuves français ou européens est synthétisée dans le tableau I. Sur ce tableau figurent aussi les apports spécifiques en kilogrammes par kilomètre carré de bassin versant et par an. En ce qui concerne l'azote minéral dissous, on peut noter l'importance des apports par le Rhin, la Loire, le Pô et la Seine ; pour le phosphore (P-PO₄), la Seine et le Rhin se détachent largement au niveau des apports spécifiques.

6. BIBLIOGRAPHIE

- A.B.L.B. (Agence de Bassin Loire Bretagne), 1989-1991. Réseau de mesure de la qualité des eaux de surface. Résultats annuels 1988 et 1990 (Station de la Possonnière), 14 p. + annexes.
- DE JONGE V.N., 1990. Response of the Dutch Wadden Sea ecosystem to phosphorus discharges from the River Rhine. *Hydrobiologia*, 195, pp 49-62.
- IFREMER, 1991 et 1992. Surveillance Ecologique du Site du Blayais, Années 1990 et 1991. Rapport scientifique, IFREMER/DEL/91 (non paginé) et rapport IFREMER/DEL/92/18, 290 p.
- KOROLEFF F., 1969. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. ICES CM 1969/C, Hydr. Comm., pp 9-19.
- KOROLEFF F., 1976. Determination of nutrients in K. Grasshof (ed.). *Methods of seawater analysis*. Verlag Chemie, New-York.NY, pp 118-181.
- MARCHETTI R., 1990. Algal blooms and gel production in the Adriatic Sea. C.E.C. Water Pollution Research. Report n° 16. Eutrophication related phenomena in the Adriatic Sea and in other Mediterranean Coastal Zones. Ed. by H. Barth and L. Fegan, pp 21-42.
- MERCERON M., 1987. Mortalités de poissons en Baie de Vilaine (juillet 1982). IFREMER-DERO.87-14.EL, 100 p.

Norme AFNOR NF T90012. Dosage des nitrates, août 1975. In AFNOR-1986-Recueil de normes françaises. Eaux, méthodes d'essai, pp 256-257.

Norme AFNOR NF T90013. Dosage des nitrites, novembre 1985. In AFNOR-1986-Recueil de normes françaises. Eaux, méthodes d'essai, pp 258-259.

Norme AFNOR NF T90023. Dosage des orthophosphates, des polyphosphates et du phosphore total, septembre 1982. In AFNOR-1986-Recueil de normes françaises. Eaux, méthodes d'essai, pp 270-279.

RODIER J., 1978. L'analyse de l'eau. Dunod Ed., 1135 p.

Service Maritime de la Seine-Maritime (3^e section), 1974 à 1991. Etude des Pollutions en Seine. Cellule Antipollution (non paginé).

WALLING D.E. et W. WEBB, 1985. Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers : some cautionary comments. Marine Pollution Bulletin, vol. 16, n° 12, pp 448-492.

LISTE DES SIGLES

MES	:	matières en suspension
P-PO ₄	:	phosphore du phosphate
P particulaire	:	phosphore particulaire
P total	:	phosphore total
N-NO ₃	:	azote du nitrate
N-NH ₄	:	azote ammoniacal
N minéral	:	azote minéral dissous
NOD	:	azote organique dissous
NOP	:	azote organique particulaire
N total	:	azote total (N minéral + NOD + NOP)

Formules de conversion des mg en μmol

Pour Si : $\mu\text{mol} = \text{mg}/0,028$

Pour P : $\mu\text{mol} = \text{mg}/0,031$

Pour N : $\mu\text{mol} = \text{mg}/0,014$