

# Modélisation des transferts de nutriments de la Seine vers la Baie de Seine et de l'eutrophisation côtière

Philippe Cugier<sup>1</sup>, Gilles Billen<sup>2</sup>, Josette Garnier<sup>2</sup>, Alain Ménesguen<sup>1</sup>, Jean François Guillaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dptmt Ecol.Côtière, Dir.Envir.&Améngmt Littoral, IFREMER Brest BP70, 29280 Plouzané

<sup>2</sup> UMR 7619 Sisyphé, CNRS-Université Pierre & Marie Curie, 4 place Jussieu, 75005 Paris

|   |    |
|---|----|
| Modélisation des transferts de nutriments de la Seine vers la Baie de Seine et de l'eutrophisation côtière..... | 1  |
| 1. Contexte et objectifs.....   | 1  |
| 2. Le modèle SENEQUE.....   | 2  |
| 3. Le modèle Baie de Seine.....   | 5  |
| 4. Analyse de scénarios de la gestion du bassin versant.....  | 8  |
| 4.1. 'Etats de référence' du système Seine-Baie de Seine.....   | 8  |
| 4.1.1 L'Etat 'Pristine'.....  | 8  |
| 4.1.2 L'Etat 'Rural Traditionnel'.....  | 8  |
| 4.2. Scénarios de traitement des eaux usées.....  | 9  |
| 4.2.1 Traitement du phosphore.....  | 9  |
| 4.2.2 Traitement de l'azote combiné au traitement du phosphore.....   | 9  |
| 4.2.3 Traitement du phosphore limité à la période de végétation.....  | 10 |
| 5. Conclusion.....  | 10 |
| 6. Références.....  | 11 |

## 1. Contexte et objectifs

L'eutrophisation de la Baie de Seine, et les blooms épisodiques de dinoflagellés qui en sont une des manifestations, est un sujet de préoccupation croissant (Belin et Raffin, 1998). Ces phénomènes sont très liés au déséquilibre des apports fluviaux d'azote, de phosphore et de silice, et dépendent donc de la manière dont les activités humaines sur le bassin versant interagissent avec les processus naturels pour déterminer les apports au milieu marin. En vue de prévoir l'effet sur l'eutrophisation marine des mesures prises pour l'amélioration de la qualité des eaux continentales, nous avons tenté, dans le cadre du programme LITEAU (MEDE), de faire dialoguer deux modèles :

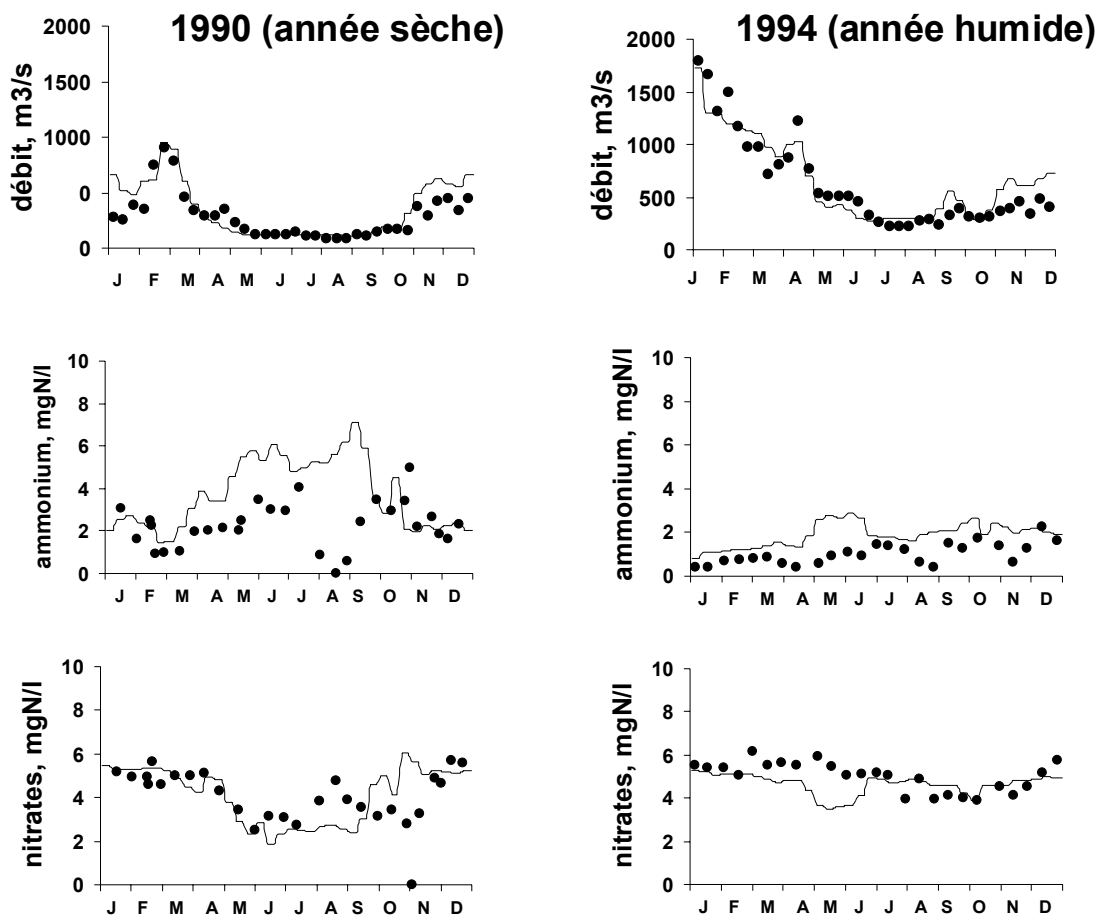
- Un modèle de réseau hydrographique (SENEQUE, Garnier et al. 1995; Billen et al., 2001), permettant de relier l'activité humaine dans le bassin versant (pratiques agricoles, aménagement du paysage hydrologique, rejets urbains,...) aux flux d'azote, de phosphore et de silice amenés à la mer.
- Un modèle hydrodynamique tridimensionnel de l'estuaire et de la Baie de Seine (Cugier, 1999, Cugier et Le Hir, 2002), permettant de reproduire les variations spatio-temporelles de la dynamique hydro-sédimentaire et de la stratification thermo-haline créée par le panache de la Seine, et de simuler la dynamique des diatomées et des dinoflagellés.

L'intérêt d'un tel couplage réside dans la possibilité qu'il offre de relier l'Etat de la Baie de Seine à la gestion du bassin amont, comme le nécessite par exemple la mise en œuvre de la nouvelle Directive Cadre Européenne sur la Gestion des Eaux par Bassin.

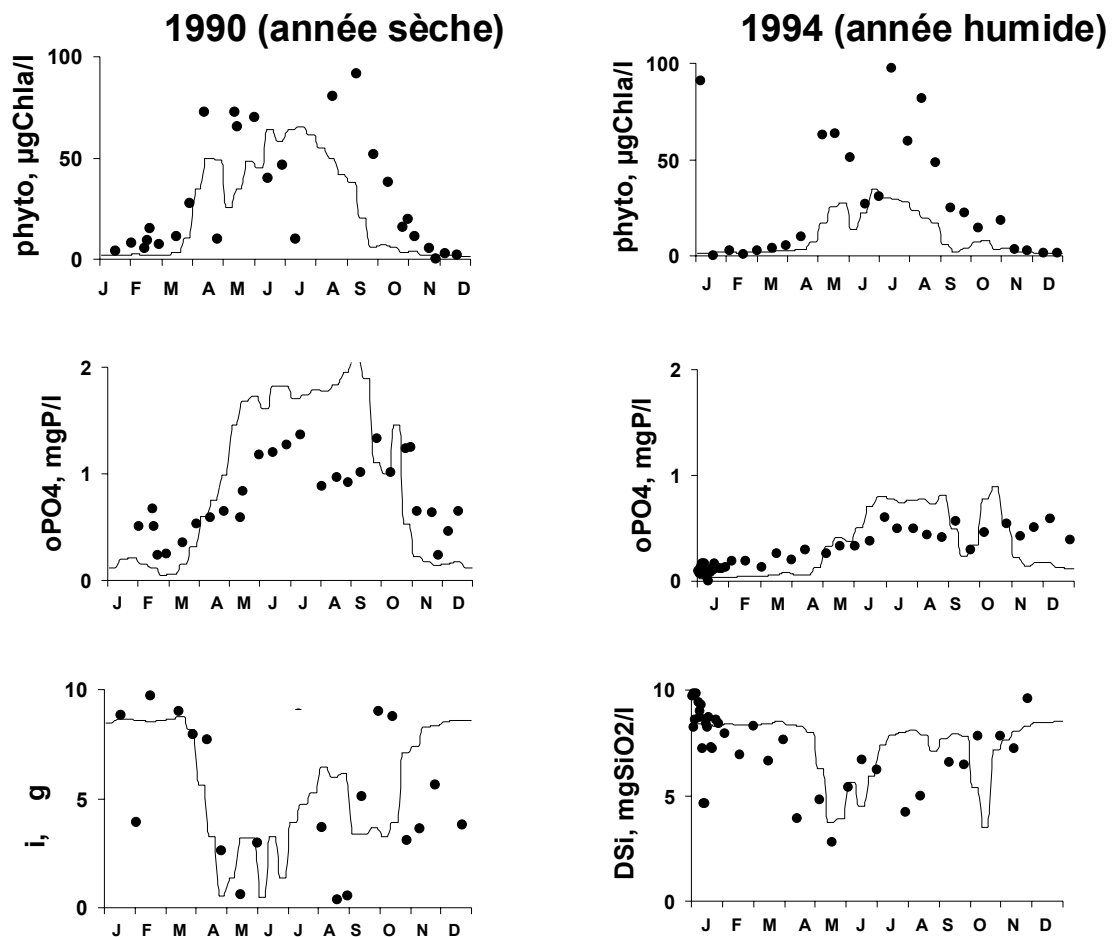
## 2. Le modèle SENEQUE

Le modèle SENEQUE, dans sa version 1.3, permet de calculer la qualité de l'eau et le bilan des transferts de nutriments dans les bassins versants amont (Seine Amont, Marne, Oise, Eure) et dans l'axe de la Seine de Paris à Poses ou Caudebec, à partir des contraintes climatiques (pluviométrie, évapotranspiration) et liées à l'activité humaine (usage du sol et pratiques agricoles, rejets d'eau usée, régulation hydraulique).

Les figures 1 et 2 montrent à titre d'exemple les performances du modèle sur 2 situations choisies pour représenter des extrêmes de conditions hydrologiques (1990, année sèche, 1994, année humide). Le bilan des flux de nutriments évalué par le modèle pour ces 2 situations est présenté dans le Tableau 1. Ces résultats soulignent la réponse au débit très différente pour les 3 nutriments (N, P, Si), qui s'explique par l'importance relative de leurs apports diffus et ponctuels.



**Figure 1** Simulation par le modèle SENEQUE 1.3 des variations saisonnières du débit, de la concentration en ammonium et en nitrates à Poses, dans les conditions hydrologiques de l'année 1990 (année sèche) et 1994 (année humide). Comparaison avec les données observées par le SNS de Rouen (Ficht, comm. pers.).



**Figure 2** Simulation par le modèle SENEQUE 1.3 des variations saisonnières de la biomasse phytoplanctonique, de la concentration en ortho-phosphates et de la silice dissoute à Poses, dans les conditions hydrologiques de l'année 1990 (année sèche) et 1994 (année humide). Comparaison avec les données observées.

**Tableau 1** Bilan des flux de nutriments pour les années 1990 et 1994.

|   | 1990 (année sèche) | 1994 (année humide) |
|---|--------------------|---------------------|
| Débit moyen à Poses (m <sup>3</sup> /s) | 343                | 658                 |
| Flux d'azote à Poses (kTN/an)           | 84                 | 136                 |
| Flux de phosphore à Poses (kTP/an)      | 8                  | 10                  |
| Flux de silice à Poses (kTSi/an)        | 37                 | 79                  |
| Rapports molaires (N : P : Si)          | 22 : 1 : 5         | 29 : 1 : 8          |

Dans le cadre du projet LITEAU, une reconstitution du fonctionnement du Système Seine au cours des 50 dernières années a été réalisée (Billen et al., 2001) (Figure 3). En ce qui concerne l'équilibre des flux de nutriments transférés à la mer, au delà des variations interannuelles considérables liées à la pluviométrie, les résultats montrent (Figure 4) :

- Le déficit croissant de silice par rapport à l'azote et au phosphore par comparaison aux besoins de la croissance des diatomées.
- Deux inversions du rapport N:P, qui diminue en dessous du rapport de Redfield au début des années 60, puis devient de nouveau supérieur dans les années récentes, suggérant la possibilité d'une limitation de la croissance algale par le phosphore.

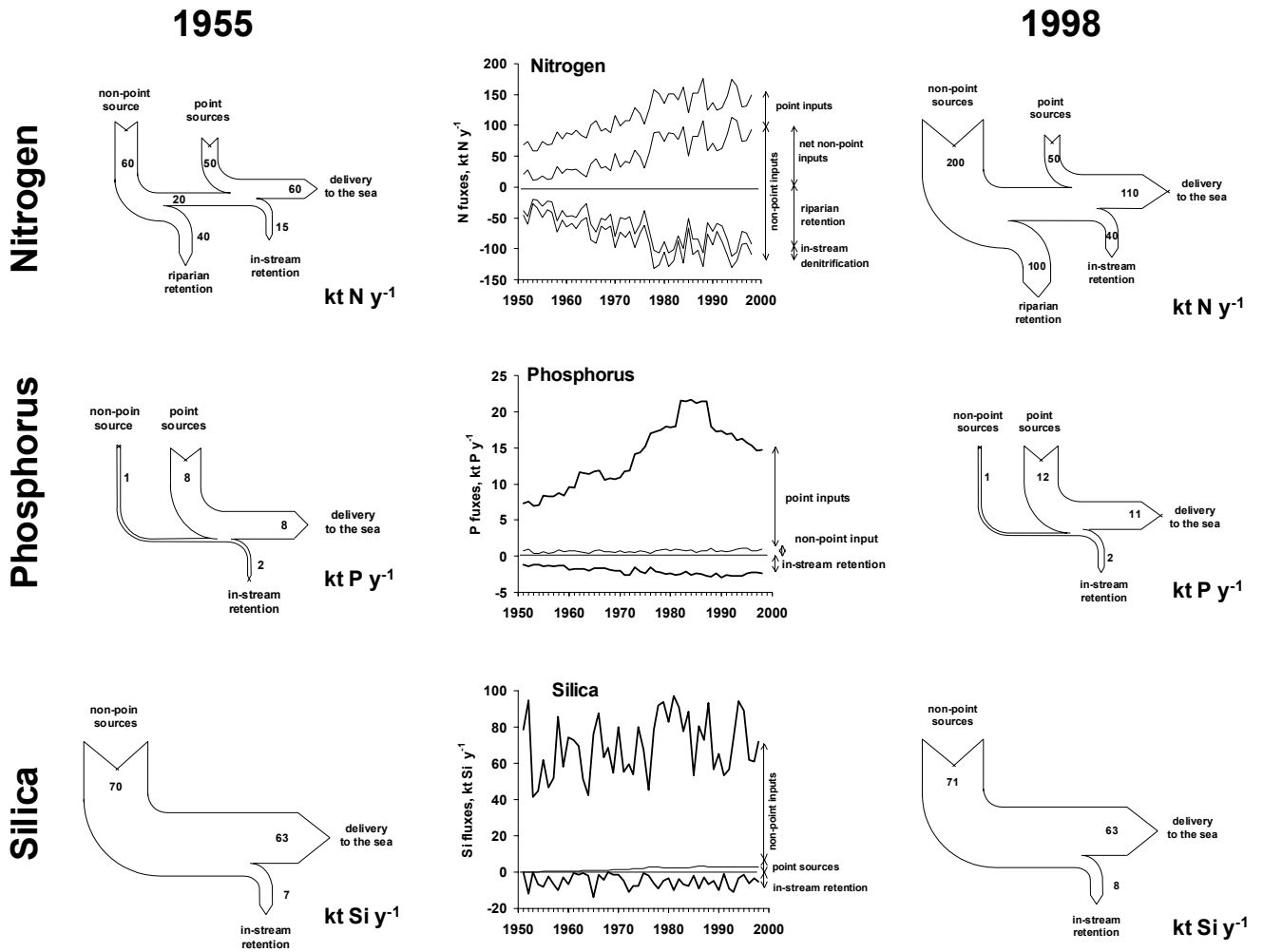


Figure 3 Bilan des sources et des transferts de nutriments dans le bassin de la Seine en 1955 et 1998, reconstitué à l'aide du modèle SENEQUE 1.3 (d'après Billen et al., 2001)

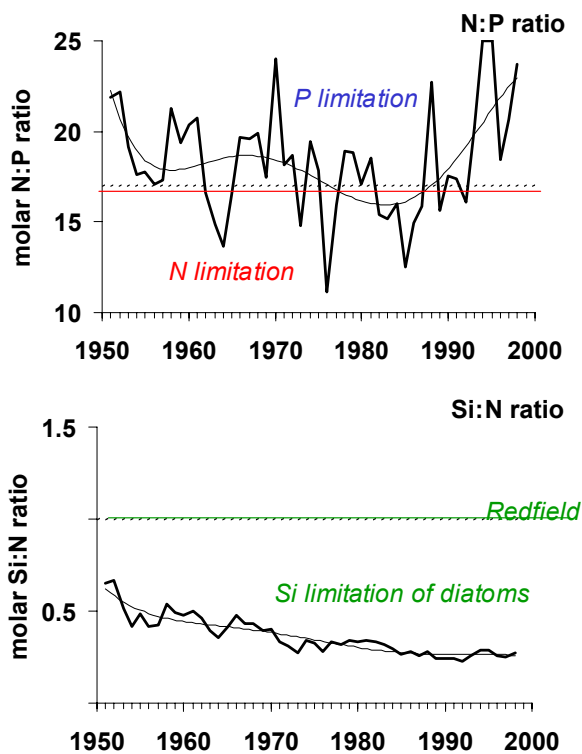
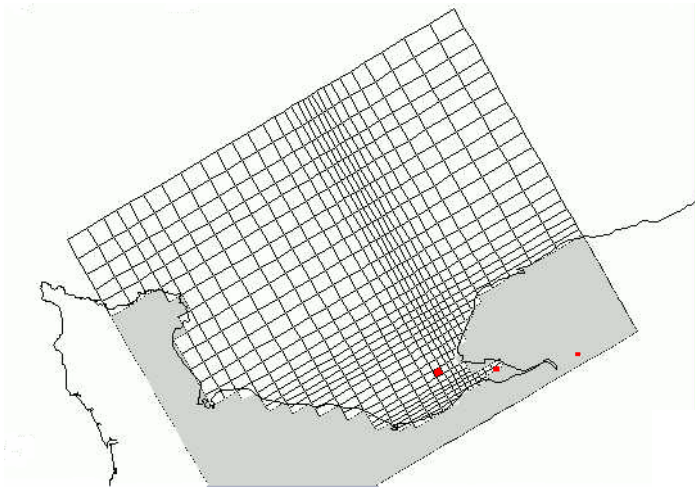


Figure 4 Variations interannuelles du rapport molaire des flux de nutriments transférés à la Baie de Seine de puis les 50 dernières années (d'après Billen et al., 2001)

### 3. Le modèle Baie de Seine

Le modèle de la Baie de Seine, établi par Cugier (1999) est constitué d'une partie hydrosédimentaire (SiAM-3D) permettant le calcul de la marée, des courants, du transport des substances dissoutes et particulaires, et prenant en compte le sédiment et les processus d'érosion-dépôt, et d'une partie écologique décrivant la dynamique des nutriments (N,P,Si) et des principaux compartiments de la biocénose (diatomées, dinoflagellés, zooplancton, bactéries). Le maillage horizontal (Figure 5) est particulièrement fin dans la zone du panache de la Seine.

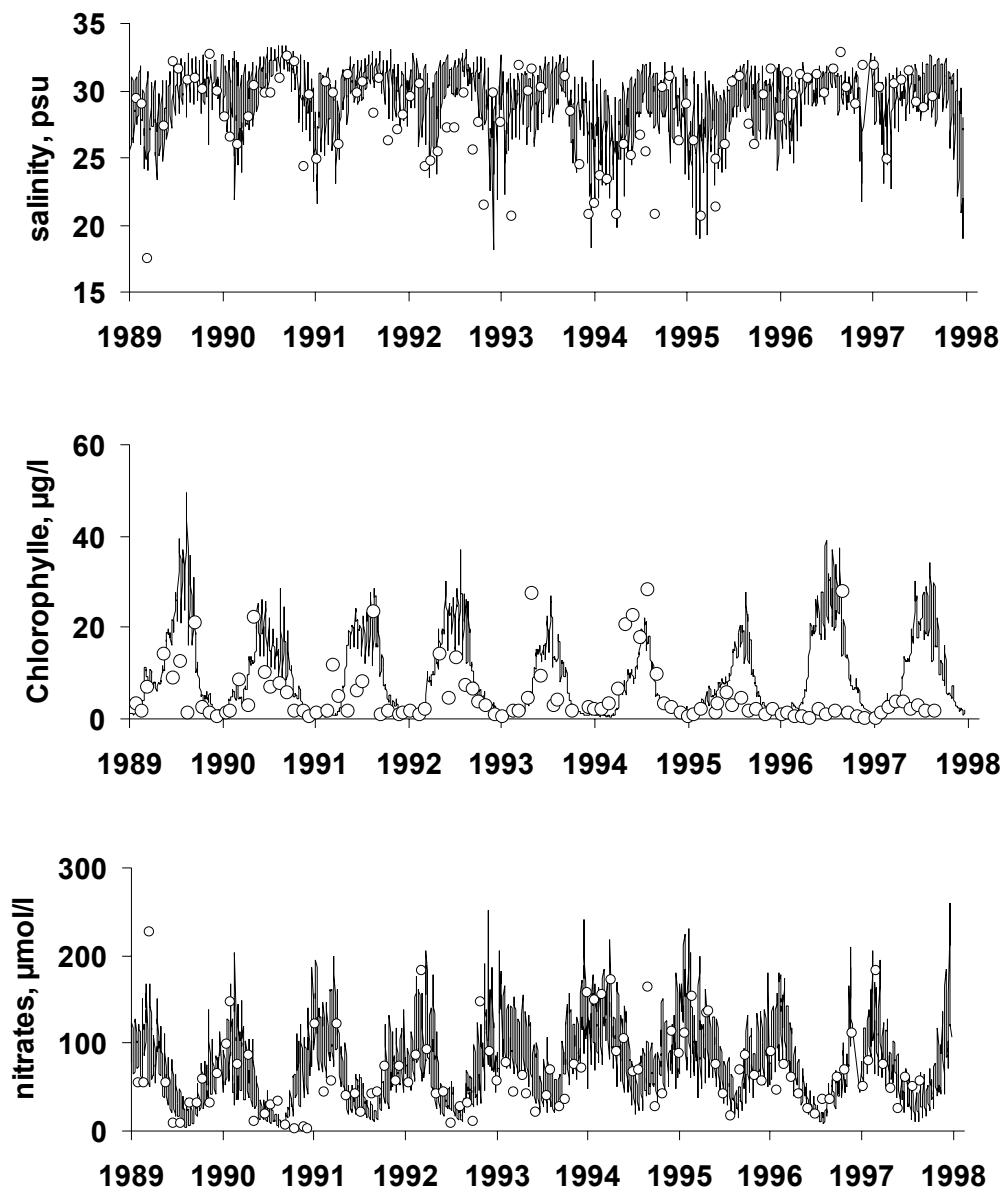


*Figure 5* Maillage horizontal utilisé pour le modèle SiAM-3D/ELISE de la Baie de Seine (Cugier, 1999)

Le modèle permet le calcul des floraisons algales dans l'ensemble de l'estuaire et du panache de la Seine en Baie de Seine au cours du cycle saisonnier, à partir des conditions météorologiques régnant sur le domaine, et des flux de nutriments délivrés par la rivière à Poses.

Les performances du modèles ont été validées sur les données acquises dans les programmes de surveillance conduits depuis 1976. La figure 6 montre par exemple les variations interannuelles de la salinité, de la chlorophylle et des nitrates simulées par le modèle en une station de surveillance située à l'entrée de l'avant Port du Havre. Le figure 7 compare les résultats du modèle de la Baie de Seine (alimenté par les mesures disponibles à Poses ou par les flux calculés par le modèle SENEQUE) en ce qui concerne le développement des dinoflagellés avec les mesures du réseau de surveillance REPHY le long de la côte du Calvados de 1987 à 1997. Les résultats montrent clairement que les années sèches, au cours desquelles les apports de silice sont plus déficitaires par rapport aux apports d'azote et de phosphore, sont celles où les floraisons estivales de dinoflagellés sont les plus importantes.

L'analyse des concentrations en nutriments pendant les périodes de floraison algale maximale dans le panache de la Seine (Figure 8) montre que l'élément limitant principal pour les diatomées est le phosphore au printemps et la silice en été, tandis que l'azote est l'élément limitant des dinoflagellés lors de leur floraison estivale (Tableau 2).



*Figure 6 Variations interannuelles de la salinité, de la chlorophylle et des nitrates simulée par le modèle en une station de surveillance située à l'entrée de l'avant Port du Havre.*

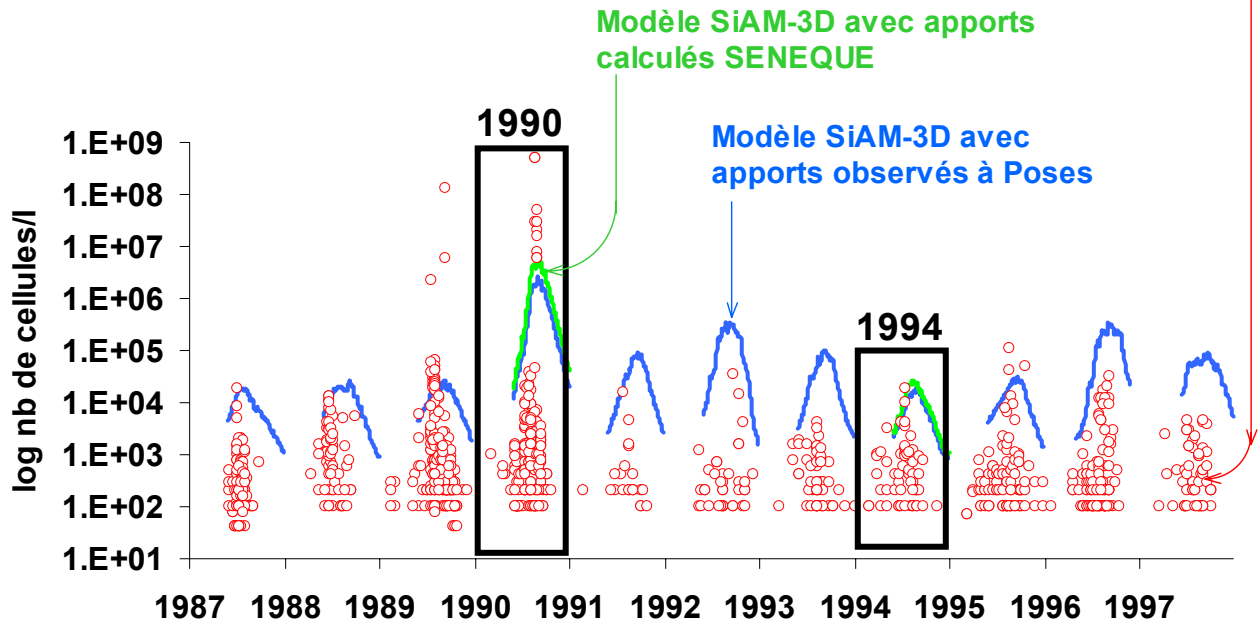


Figure 7 Simulation par le modèle SiAM-3D du développement des dinoflagellés le long des côtes du Calvados de 1987 à 1997. Comparaison avec les mesures issues du réseau de surveillance REPHY.

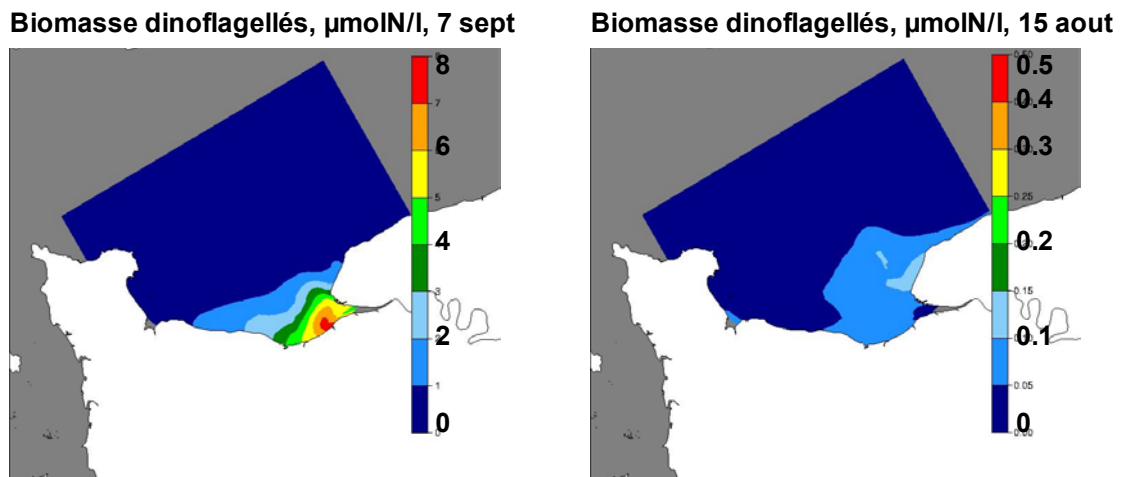


Figure 8 Distribution spatiale de la biomasse de dinoflagellés au maximum de leur développement estival en Baie de Seine, telle que simulée par le modèle pour les conditions de l'année 1990 (année sèche, à gauche) et 1994 (année humide, à droite)

Tableau 2. Valeurs intégrées sur la zone du panache de la Seine des productions annuelles et des biomasses maximales des diatomées et des dinoflagellés en année sèche et en année humide.

|  | 1990 (année sèche) | 1994 (année humide) |
|--|--------------------|---------------------|
| Production de <b>diatomées</b> ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2/\text{yr}$ )     | 83                 | 94                  |
| Biomasse maximale de diatomées ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2$ )               | 23                 | 34                  |
| Élément limitant   | silice             | silice              |
| Production de <b>dinoflagellés</b> ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2/\text{yr}$ ) | 7.3                | 0.15                |
| Biomasse maximale de dinoflagellés ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2$ )           | 9                  | 0.1                 |
| Élément limitant   | azote              | azote               |

## **4. Analyse de scénarios de la gestion du bassin versant**

L'ensemble SENEQUE-Modèle Baie de Seine une fois validé, l'intérêt principal du projet consistait dans l'étude de l'effet sur l'eutrophisation de la Baie de Seine de divers scénarios d'aménagement du bassin versant. L'outil de modélisation mis au point permet donc de démontrer comment l'activité humaine conditionne le fonctionnement du continuum rivière-estuaire-mer. Deux types de scénarios ont été explorés. Les premiers, rétrospectifs, s'inscrivent dans la problématique de la recherche de conditions de référence de l'état de la Baie de Seine. Les seconds, prospectifs, visent à évaluer ce que l'on peut attendre en terme de contrôle de l'eutrophisation côtière de la mise en œuvre des programmes techniquement réalisables à moyen terme de gestion des rejets d'eaux usées.

### **4.1. 'Etats de référence' du système Seine-Baie de Seine.**

Une pratique courante, quoique éminemment contestable, consiste à rechercher dans les conditions d'un passé hypothétique et souvent idéalisé, des conditions de références permettant de définir les objectifs de gestion actuelle des milieux naturels. Même si nous pensons au contraire que la définition du 'Bon Etat Ecologique' doit résulter plutôt d'un débat global sur la manière dont nous voulons vivre au présent et au futur sur un territoire donné, il nous a semblé éclairant pour ce débat de reconstituer par simulation l'état passé du système Seine-Baie de Seine.

#### **4.1.1 L'Etat 'Pristine'**

En l'absence de toute présence humaine dans le bassin versant, le réseau hydrographique de la Seine ne recevait pour tout apport terrigène que les faibles flux de nutriments issus du lessivage des sols forestiers, auxquels s'ajoutent les apports périodiques directs de feuilles mortes de la végétation rivulaire. Le bilan calculé des flux résultants de nutriments délivrés à la Baie de Seine est détaillé dans le Tableau 3 pour les conditions hydrologiques-types de 1990 et 1994. Les flux de silice sont dans ce cas largement excédentaires par rapport aux flux d'azote et de phosphore.

Les résultats du modèle de la Baie de Seine montrent que la production diatomique dans la zone du panache de la Seine est inférieure d'un facteur 2 à la production actuelle dans les conditions hydrologiques correspondantes, mais que c'est surtout la production de dinoflagellés qui s'y trouve inférieure d'un facteur 100. La production primaire est donc largement dominée, en toute saison, par les diatomées. L'azote apparaît comme l'élément limitant principal de la croissance des deux classes d'algues (Tableau 3).

#### **4.1.2 L'Etat 'Rural Traditionnel'**

Les travaux menés dans le cadre du PIREN-Seine avec les équipes d'historiens ont permis de définir les grandes lignes du fonctionnement de l'hydrosystème Seine dans les conditions d'exploitation humaine des sols du bassin (agriculture-élevage) et du réseau hydrographique (étangs et moulins) depuis le Moyen-Age. Nous avons choisi d'explorer les flux de nutriments délivrés par la Seine à la fin du XVIIIe siècle, à un moment où la population parisienne atteint déjà 500 000 habitants. Le Tableau 3 présente les estimations de flux de nutriments réalisés par le modèle dans ces conditions.

La production des diatomées et des flagellés qui en résulte dans la zone du panache de la Seine a été calculée pour ces conditions (Tableau 3). Si la production diatomique est sensiblement stimulée par rapport à celles de l'état pristine, le développement des algues non siliceuses reste encore tout à fait marginal. C'est toujours l'azote qui limite le développement algal, tant des diatomées que des flagellés, sauf en conditions de forte hydraulité où le phosphore prend le pas sur l'azote comme élément limitant de la production diatomique.



**Tableau 3.** Bilan des flux de nutriments délivrés à Poses et valeurs intégrées sur la zone du panache de la Seine des productions annuelles et des biomasses maximales des diatomées et des dinoflagellés en année sèche et en année humide, pour 3 scénarios de référence : situation pristine, rurale traditionnelle et actuelle .

|  | 1990 (année sèche) |          |          | 1994 (année humide) |          |          |
|--|--------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
|  | pristine           | XVIIIe   | actuel   | pristine            | XVIIIe   | actuel   |
| Flux d'azote à Poses (kTN/an)  | 2                  | 13       | 84       | 4                   | 22       | 136      |
| Flux de phosphore à Poses (kTP/an)   | 0.1                | 0.6      | 8        | 0.2                 | 0.8      | 10       |
| Flux de silice à Poses (kTSi/an)   | 44                 | 40       | 37       | 84                  | 82       | 79       |
| Rapports molaires (N : P : Si)   | 38:1:350           | 46: 1:72 | 22: 1: 5 | 41:1:390            | 56:1:107 | 29: 1: 8 |
| Production de <b>diatomées</b> ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2/\text{yr}$ )     | 50                 | 61       | 83       | 41                  | 48       | 94       |
| Biomasse maximale de diatomées ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2$ )               | 9                  | 11       | 23       | 9.5                 | 12       | 34       |
| Élément limitant   | azote              | azote    | silice   | azote               | phosph.  | Silice   |
| Production de <b>dinoflagellés</b> ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2/\text{yr}$ ) | 0.04               | 0.05     | 7.3      | 0.03                | 0.03     | 0.15     |
| Biomasse maximale de dinoflagellés ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2$ )           | 0.017              | 0.019    | 9        | 0.016               | 0.016    | 0.1      |
| Élément limitant   | azote              | azote    | azote    | azote               | azote    | Azote    |

## 4.2. Scénarios de traitement des eaux usées

Parmi les leviers d'une politique de réduction de la contamination en nutriments des eaux de surface, seule l'action sur les rejets ponctuels peut être efficace à court et moyen terme. L'action sur les apports diffus, particulièrement dans un bassin comme celui de la Seine, dotés d'aquifères à très longue inertie, ne pourrait être suivie d'effet qu'à beaucoup plus long terme. Nous avons donc choisi d'explorer tout d'abord les bénéfices en terme d'eutrophisation côtière qui pourraient résulter d'un traitement tertiaire du phosphore et de l'azote dans les stations d'épuration de l'ensemble du bassin de la Seine.

### 4.2.1 Traitement du phosphore

En raison du caractère ponctuel dominant des apports de phosphore aux eaux de surface dans le bassin de la Seine, la généralisation d'un traitement de déphosphatation à 90% des effluents urbains et industriels conduirait à une réduction extrêmement sensible des transferts de phosphore dans le réseau hydrographique. (Tableau 4). Cette mesure, techniquement réalisable, est de nature à limiter les prolifération algales printanières dans les principaux affluents de la Seine en amont de Paris, et aussi à limiter la rétention de silice qu'elles entraînent.

L'effet sur les floraisons algales dans le panache de la Seine est très significatif. Le phosphore devient l'élément limitant principal de la croissance des diatomées comme des dinoflagellés (Tableau 4). La production des deux groupes d'algues diminue sensiblement par rapport aux situations actuelles de même hydrologie. Mais l'effet le plus spectaculaire est une réduction de plus d'un facteur 10 du maximum de biomasse atteint par les dinoflagellés par rapport à la situation actuelle.

### 4.2.2 Traitement de l'azote seul ou combiné au traitement du phosphore

La généralisation d'un traitement de nitrification/dénitrification éliminant 50% de la charge azotée totale dans toutes les stations d'épuration du bassin de la Seine n'entraînerait qu'une diminution de l'ordre de 20% des flux d'azote apportés à la mer, leur origine diffuse étant prédominante (Tableau 4). Une telle réduction se marque sur les productions algales de manière significative mais nettement moins marquée que dans le cas d'une réduction des apports de phosphore, par ailleurs techniquement et économiquement plus aisée. Si ce scénario de traitement de l'azote est combiné à la réduction du phosphore, il n'en résulte guère de bénéfice supplémentaire en ce qui concerne les développements algaux en Baie de Seine par rapport au traitement du phosphore seul.

### 4.2.3 Traitement du phosphore limité à la période de végétation

En ce qui concerne le contrôle des floraisons algales en rivière, il a été montré que le traitement du phosphore des effluents urbains gardait son efficacité s'il était limité à la période de végétation (avril-septembre) (Garnier et al. 2002). En ce qui concerne l'effet sur l'eutrophisation côtière, les simulations montrent que l'effet sur le développement de dinoflagellés dans le panache de la Seine est pratiquement identique à un traitement poursuivi toute l'année. La raison en est que les blooms indésirables en Baie de Seine se localisent dans le panache même du fleuve, où les masses d'eau douces n'ont qu'un temps de séjour relativement limité. La situation pourrait de ce point de vue être très différente dans une Baie à temps de renouvellement plus lent, où la croissance algale pourrait intégrer les apports hivernaux de nutriments terrigènes, ce qui n'est pas le cas de la Baie de Seine.

**Tableau 4 .** Bilan des flux de nutriments délivrés à Poses et valeurs intégrées sur la zone du panache de la Seine des productions annuelles et des biomasses maximales des diatomées et des dinoflagellés en année sèche, pour divers scénarios de traitement de l'azote et du phosphore des effluents domestiques et industriels dans l'ensemble du bassin de la Seine.

|  | actuel   | trtN50%  | trtP90%    | trtP90%<br>et N50% | trtP90%<br>estival |
|--|----------|----------|------------|--------------------|--------------------|
| Flux d'azote à Poses (kTN/an)  | 84       | 66       | 84         | 67                 | 84                 |
| Flux de phosphore à Poses (kTP/an)   | 8        | 9        | 1          | 1                  | 5                  |
| Flux de silice à Poses (kTSi/an)   | 37       | 36       | 40         | 40                 | 39                 |
| Rapports molaires (N : P : Si)   | 22: 1: 5 | 16: 1: 4 | 176 :1 :43 | 147:1:44           | 38:1: 9            |
| Production de <b>diatomées</b> ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2/\text{yr}$ )     | 83       | 84       | 74         | 74                 | 79                 |
| Biomasse maximale de diatomées ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2$ )               | 23       | 23       | 13         | 13                 | 17                 |
| Élément limitant   | silice   | silice   | phosph.    | phosph.            | phosph.            |
| Production de <b>dinoflagellés</b> ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2/\text{yr}$ ) | 7.3      | 3        | 0.5        | 0.3                | 0.6                |
| Biomasse maximale de dinoflagellés ( $\mu\text{molN}/\text{m}^2$ )           | 9        | 3.7      | 0.4        | 0.2                | 0.4                |
| Élément limitant   | azote    | azote    | phosph.    | phosph.            | phosph.            |

## 5. Conclusion

L'étude réalisée a permis de rendre opérationnel et de valider le couplage des modèles SENEQUE et Baie de Seine. Les simulations réalisées à l'aide de cet ensemble de modèles démontrent la sensibilité de la Baie de Seine à l'équilibre des nutriments N, P et Si en provenance du bassin versant. Leurs résultats sont résumés dans la figure 9 pour une année de faible hydrologie, dont on a vu qu'elle représente la situation à risque du point de vue de l'occurrence de blooms de dinoflagellés.

Au cours des périodes historiques, l'azote semble avoir été l'élément limitant principal de la croissance des algues au moment de leur maximum de biomasse, les apports de silice étant alors excédentaires par rapports à ceux des deux autres nutriments. Actuellement, l'accroissement des apports d'azote et de phosphore ont fait de la silice l'élément limitant principal de la production diatomique, ce qui favorise la croissance estivale des algues non siliceuse. La baisse tendancielle récente des apports ponctuels de phosphore, et la relative facilité technique des traitements de déphosphatation des effluents, font qu'une situation d'excédent de silice pourrait être rapidement restaurée en Baie de Seine, avec une limitation générale par le phosphore. Une telle situation serait caractérisée par des floraisons d'algues non siliceuses nettement moins importantes qu'actuellement, et probablement tout à fait supportables. On serait loin cependant de retrouver l'état 'historique' ou 'pristine' du système écologique de la Baie de Seine.

## anthropisation

(Valeurs intégrées sur la zone du panache de la Seine)

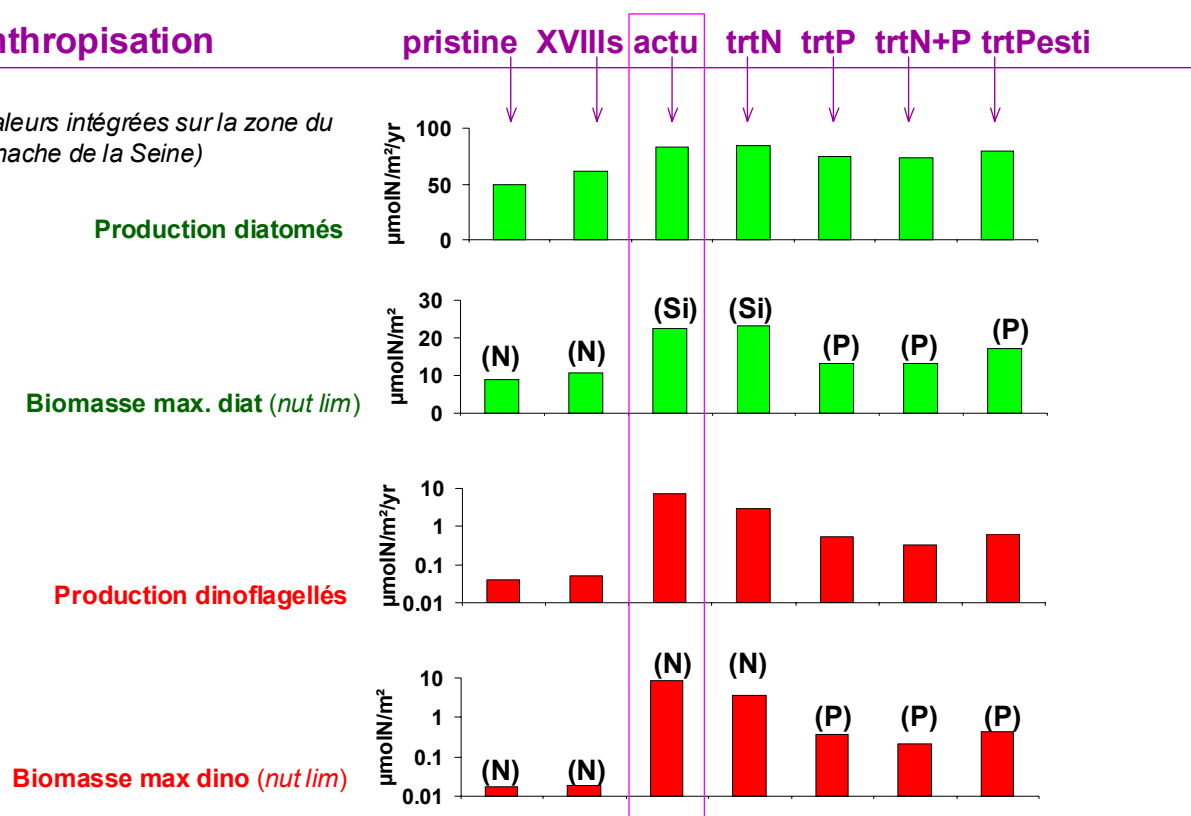


Figure 9 Effet des différents scénarios d'anthropisation sur les développements algaux dans le panache de la Seine en conditions de faible hydrologie (année sèche type 1990)

## 6. Références

- Belin, C. & Raffin (1998). Les espèces phytoplanctoniques toxiques et nuisibles sur le littoral français de 1884 à 1995 : résultats du REPHY. Ifremer RST.DEL/MP-AO 98-18
- Billen, G., Garnier, J., Ficht, A. & Cun, C., 2001. Modelling the response of water quality in the Seine River Estuary in response to human activity in the watershed over the last 50 years. *Estuaries* 24: 977-993.
- Cugier, P., 1999. Modélisation du devenir à moyen terme dans l'eau et le sédiment des éléments majeurs (N, P, Si, O) rejetés par la Seine en baie de Seine. Thèse de doctorat, Univ. de Caen, 241 p.
- Cugier, P., Le Hir, P., 2002. Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine river (France). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 55, 673-695.
- Garnier J., Billen G. & Coste M. (1995). Seasonal succession of diatoms and Chlorophyceae in the drainage network of the river Seine: Observations and modelling. *Limnol. Oceanogr.* 40: 750-765.
- Garnier J., Billen G., Akopian, M, Némery, J, Pinault, S., Desruelle M, Dufayt O, Flipo N, Even S, Poulin M. (2002). Développement des peuplements végétaux dans le bassin de la Marne: dynamique des nutriments et eutrophisation. Contrôle par les organismes filtreurs. Rapport de synthèse du programme PIREN-Seine 1998-2001. Février 2002. cdROM.
- Guillaud J.F., Andrieux F., Ménesguen A., 2000. Biogeochemical modelling in the Bay of Seine (France) : an improvement by introducing phosphorus in nutrient cycles. *J. Mar. Systems*, 25, pp 369-386.