

# Simulation par SENEQUE 3.4 de l'impact des 8<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> programmes de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie

Gilles Billen<sup>1</sup>, Vincent Thieu<sup>1</sup>, Marie Silvestre<sup>1</sup>, Pierre Servais<sup>2</sup>, Josette Garnier<sup>1</sup>, Philippe Cugier<sup>3</sup> et François Lamy<sup>4</sup>

<sup>1</sup>UMR Sisyphe 7619, UPMC-CNRS, ([billen@ccr.jussieu.fr](mailto:billen@ccr.jussieu.fr))

<sup>2</sup>ESA, Université Libre de Bruxelles

<sup>3</sup>IFREMER Brest

<sup>4</sup>AESN, Nanterre

1. Introduction .....	1
2. Définition des scénarios testés.....	2
2.1. Découpage de l'espace .....	2
2.2. Contraintes hydrologiques.....	2
2.3. Apports diffus.....	2
2.4. Apports ponctuels.....	3
3. Validation du scénario de référence 2003 et simulation prospective de la situation 2012 dans le réseau hydrographique .....	4
4. Flux à la mer et effet sur l'eutrophisation marine côtière.....	10
4.1. L'Indicateur de potentiel d'eutrophisation côtière (ICEP).....	10
4.2. Application du modèle SiAM3D/ELISE.....	12
5. Conclusion.....	14
6. Références .....	15

## 1. Introduction

L'objectif de ce travail, réalisé dans le cadre de l'Atelier de Transfert et de Démonstration des modèles du PIREN-Seine, visait à mettre à l'épreuve la nouvelle version de SENEQUE (v.3.4), dont les améliorations récentes sont décrites dans un autre rapport. Il s'agissait tout d'abord de valider le modèle sur base des mesures acquises au cours de l'année 2003, qui représente une année, sinon exceptionnellement sèche (parce que le niveau des aquifères y gardait encore le souvenir des années humides antérieures), du moins caractérisée par un été très chaud et peu pluvieux.

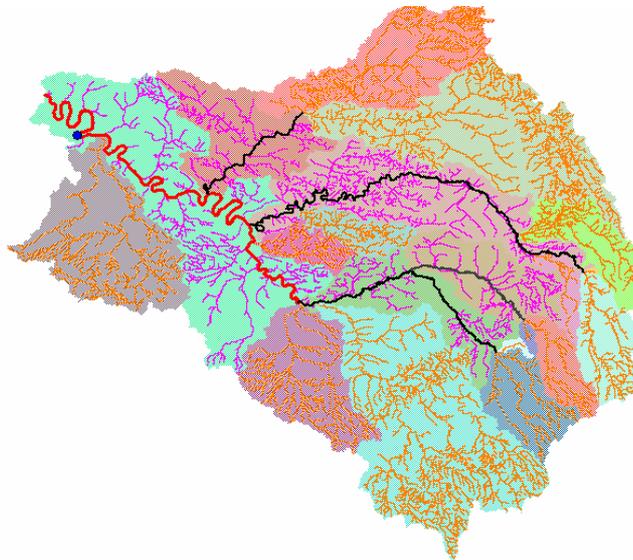
Il s'agissait ensuite de simuler, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire en l'occurrence dans les conditions hydrologiques et climatiques de l'année 2003, quel serait, à l'horizon 2012, l'effet sur la qualité de l'eau des mesures inscrites dans les 2 prochains programmes d'intervention de l'Agence de l'Eau en matière d'amélioration du traitement des effluents urbains.

Au total, cette application offre un exemple didactique de l'utilisation qui peut être faite du logiciel SENEQUE pour l'évaluation prospective d'une politique publique en matière d'assainissement urbain. C'est en ce sens qu'elle s'inscrivait particulièrement bien dans les objectifs affichés de l'Atelier 2006.

## 2. Définition des scénarios testés

### 2.1. Découpage de l'espace

Pour le projet de modélisation que nous présentons ici, un découpage de l'espace du bassin de la Seine a été choisi suffisamment précis pour prendre en compte les particularités résultant de l'action des 3 grands barrages-réservoirs et de la canalisation des cours d'eau navigables, mais globalisant en feuilles les bassins les plus amont a été choisi. Ce découpage, représenté dans la figure 1, comporte 1 axe principal (La Seine de Montereau à Poses), quatre axes secondaires (La Marne, de la confluence du Rognon à la confluence avec la Seine ; la Seine de la confluence de l'Ource à Montereau ; l'Aube de la confluence du Landion à la confluence avec la Seine ; l'Oise, de la confluence de l'Aisne à la confluence avec la Seine), et 15 bassins amont (Yonne, Marne amont, Seine amont, Aube amont, Oise amont, Aisne, Eure, Loing, Yerres, Saulx, Blaise, Grand Morin, Chevillon, Arce, Landion)



**Figure 1.** *Découpage de l'espace du bassin de la Seine considéré pour la modélisation par le modèle SENEQUE/Riverstrahler.*

### 2.2. Contraintes hydrologiques

Les débits spécifiques de l'année 2003 ont été calculées à l'aide du modèle HYDROCAL (Christophe et Billen, 2005), logiciel associé à SENEQUE qui réalise l'optimisation des paramètres du modèle Hydrostrahler à partir d'une part des données de pluviométrie et d'évapotranspiration, et d'autre part des observations de débits journaliers en différentes stations stratégiques du bassin sur une période pluriannuelle. L'optimisation a été effectuée sur la période 1991-2003, à partir des mesures en 15 stations-clés du bassin.

### 2.3. Apports diffus

Les apports diffus sont renseignés par type d'usage du sol, à partir de l'ensemble des informations disponibles sur les charges en nutriments des eaux sous-racinaires ou de petits cours d'eau en amont de tout rejet ponctuel (Thieu et al, 2007). Les classes d'usage du sol considérées

comprennent les forêts, les zones urbanisées, 11 types de terres arables (selon les Régions Agricoles), 6 types de prairies.

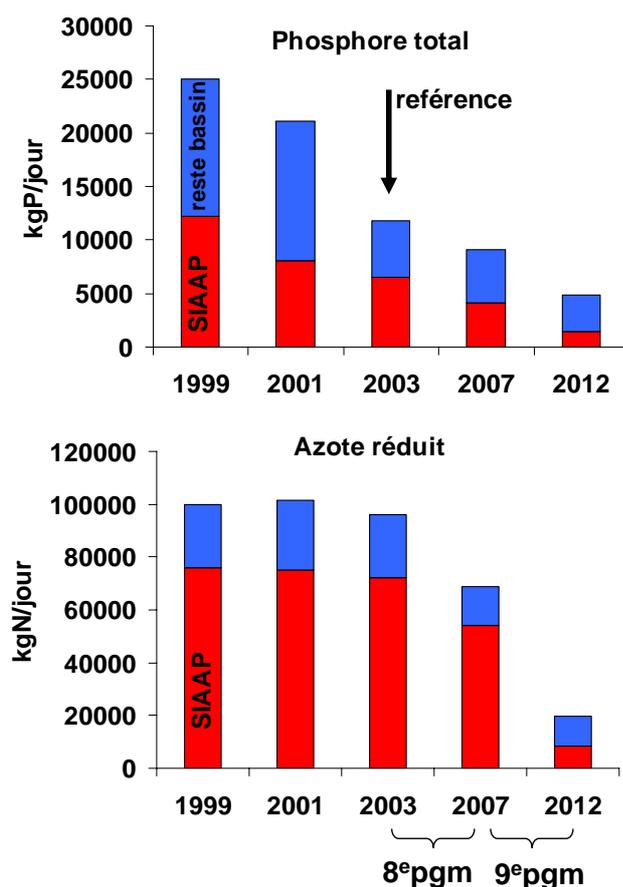
En ce qui concerne le phosphore, les apports de phosphore inorganique total sont établis à partir de la valeur retenue de la teneur en matières inorganiques en suspension (liée à l'érodibilité du sol) et de la teneur moyenne en phosphore échangeable des sols correspondants. Les valeurs retenues de cette dernière varient de 0.1 gP/kg pour les sols forestiers, à 1 gP/kg pour les sols arables.

## 2.4. Apports ponctuels

Les apports ponctuels retenus ceux fournis par l'AESN (Lamy, comm. pers.). Il s'agit des rejets de temps sec des stations d'épuration des collectivités en 2003, et de ceux estimés sur base des projets de travaux inscrits dans les 8<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> programme d'intervention de l'AESN.

Les rejets industriels ont été négligés, faute d'informations fiables à leur sujet.

Notons que des changements extrêmement rapides sont en train de se produire en matière de rejets urbains, les efforts consentis dans le traitement des effluents étant extrêmement important, comme en témoignent les estimations présentées en figure 2.



**Figure 2.** Estimation des rejets urbains (de temps sec) de phosphore et d'azote réduit depuis la fin des années 1990 et prévus jusqu'en 2012 pour l'ensemble du bassin de la Seine à Caudebec. La partie rouge représente la part des rejets de l'agglomération parisienne.

### **3. Validation du scénario de référence 2003 et simulation prospective de la situation 2012 dans le réseau hydrographique**

Pour chaque variable principale de la qualité de l'eau, nous présentons ci-après les résultats de la simulation par le modèle SENEQUE des variations saisonnières en 4 stations situées à l'exutoire des 3 grands bassins en amont de Paris, ainsi qu'à Poses, entrée du secteur estuarien, comparées aux données d'observation disponibles en ces stations. Un profil longitudinal calculé depuis Montereau jusqu'à Poses en période estivale (début septembre) est également représenté avec les données d'observation disponibles. Enfin une représentation cartographique de l'ensemble du réseau, à la résolution choisie par le découpage du projet est également figuré, avec un code couleur correspondant à la classification du SEQ-Eau.

Dans un deuxième panneau pour chaque variable, nous représentons de la même manière les résultats calculés pour le scénario 2012, confronté avec la simulation de référence.

En ce qui concerne l'ammonium, le modèle simule correctement les niveaux de concentration observés, tant en amont qu'en aval de Paris. La simulation 2012 prévoit une légère amélioration en amont de Paris, une amélioration spectaculaire en aval de Paris, grâce au passage de la station d'épuration Seine-Aval à un traitement de nitrification, dès 2007.

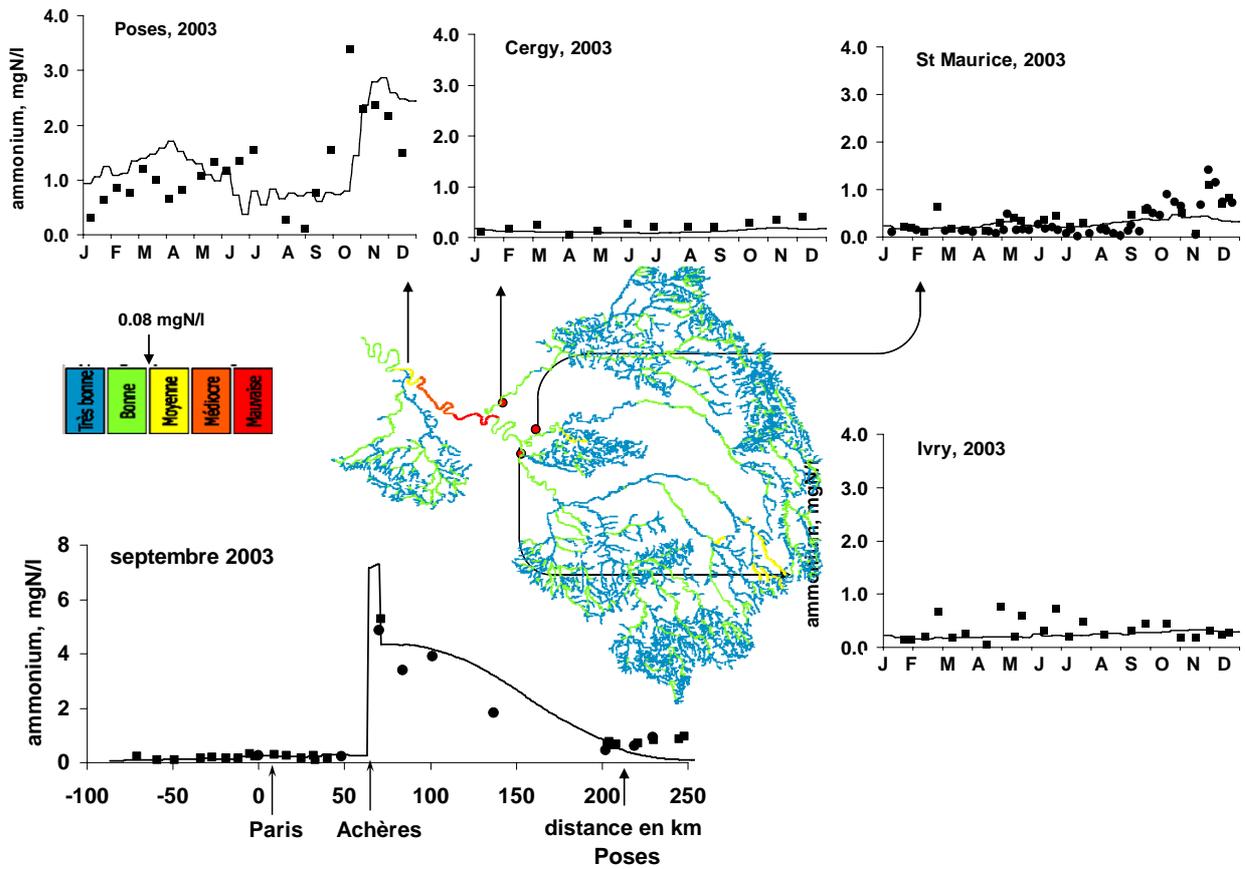
Pour les nitrates, le modèle simule bien le niveau général de contamination et ses variations saisonnières (bien que les niveaux hivernaux aient tendance à être légèrement surestimés, à cause sans doute d'une sous-estimation de la rétention riparienne, dépendante de la température dans la nouvelle version du modèle). Le scénario 2012 ne montre pas de modifications notables par rapport à la situation de référence 2003, confirmant l'origine essentiellement diffuse des nitrates. La diminution du potentiel de dénitrification des sédiments suite à la diminution des apports de carbone organique compense en outre la diminution des apports ponctuels de nitrates.

Les niveaux de concentration en phosphore sont en général bien simulés par le modèle en amont de Paris. Ils sont légèrement surestimés en aval de Paris. On a vu que le caractère très évolutif des rejets de phosphore (Figure 2) rend difficile leur estimation correcte à un moment donné. Le scénario 2012 prévoit une amélioration sensible du niveau de contamination tant à l'amont qu'à l'aval de l'agglomération Parisienne.

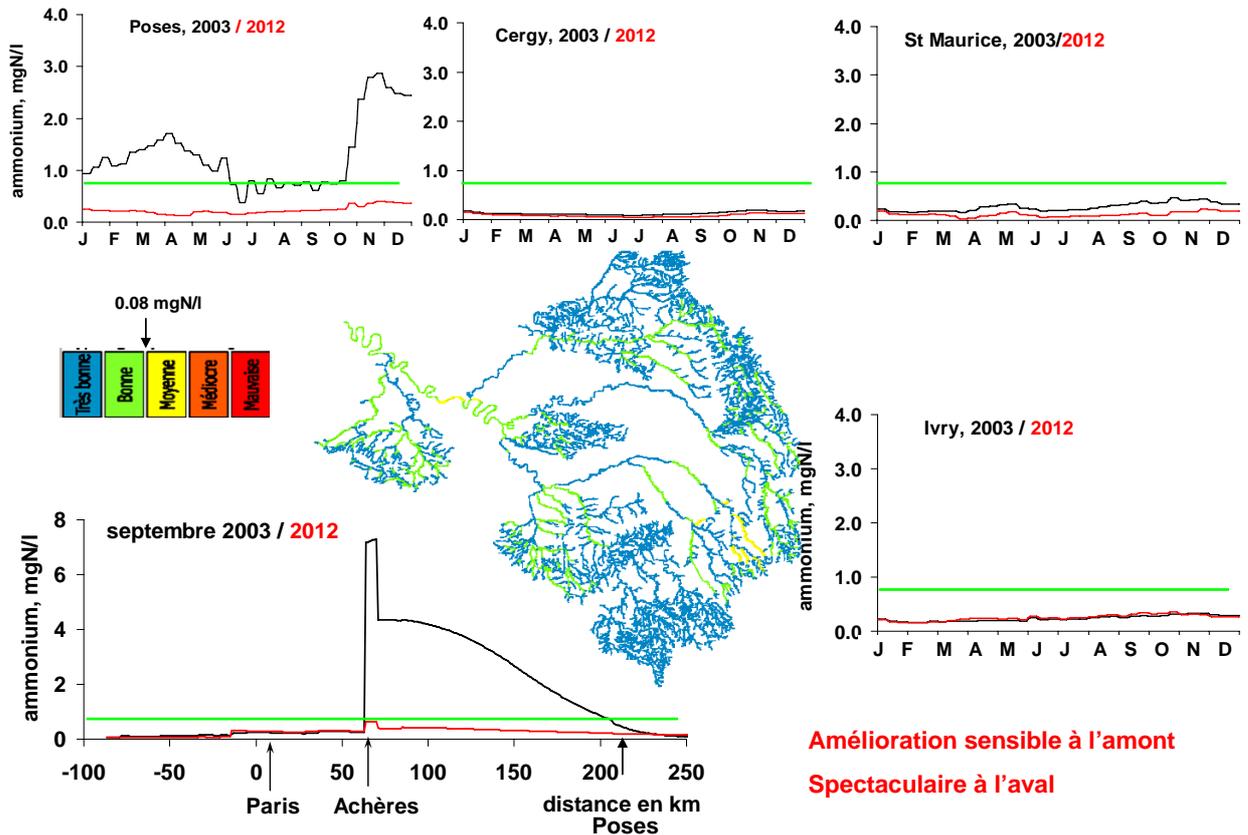
Le modèle simule correctement le développement algal planctonique dans les grands axes canalisés du réseau hydrographique, particulièrement dans la Marne, où les blooms sont les plus importants. Le modèle est moins bon dans l'axe de la Basse Seine en aval de Paris, où il est incapable de correctement reproduire les floraisons estivales, pourtant importantes qui s'y déroulent. La simulation 2012, malgré l'importance des efforts de réduction du phosphore, ne montre pas de baisse sensible du niveau de développement algal.

Enfin, le modèle simule très correctement la contamination bactériologique du réseau hydrographique, tant en amont qu'en aval de Paris. La simulation 2012 montre une amélioration sensible en amont de Paris, et spectaculaire en aval, de la contamination fécale, en corollaire de l'amélioration du traitement des eaux usées urbaines.

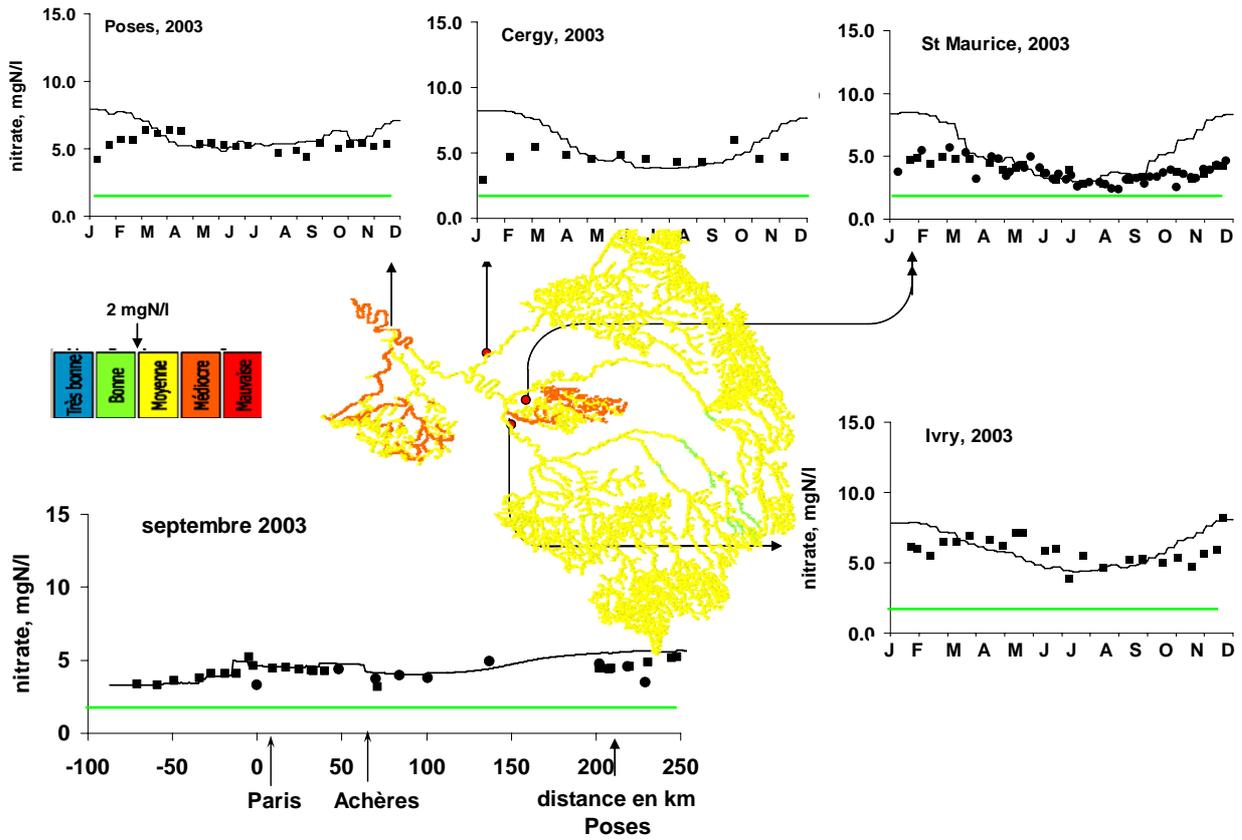
## La situation 2003 (validation) : ammonium



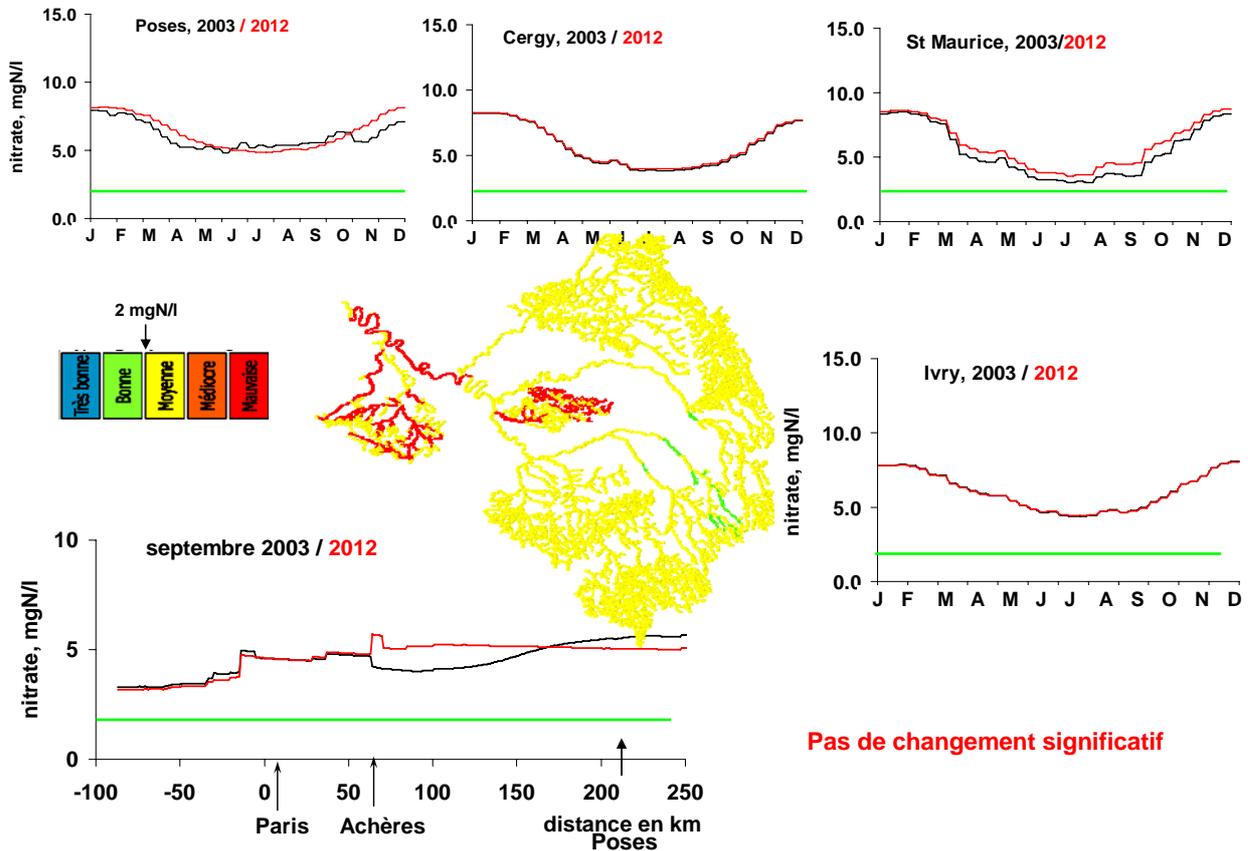
## La situation 2012 (scénario prospectif) : ammonium



## La situation 2003 (validation) : nitrates

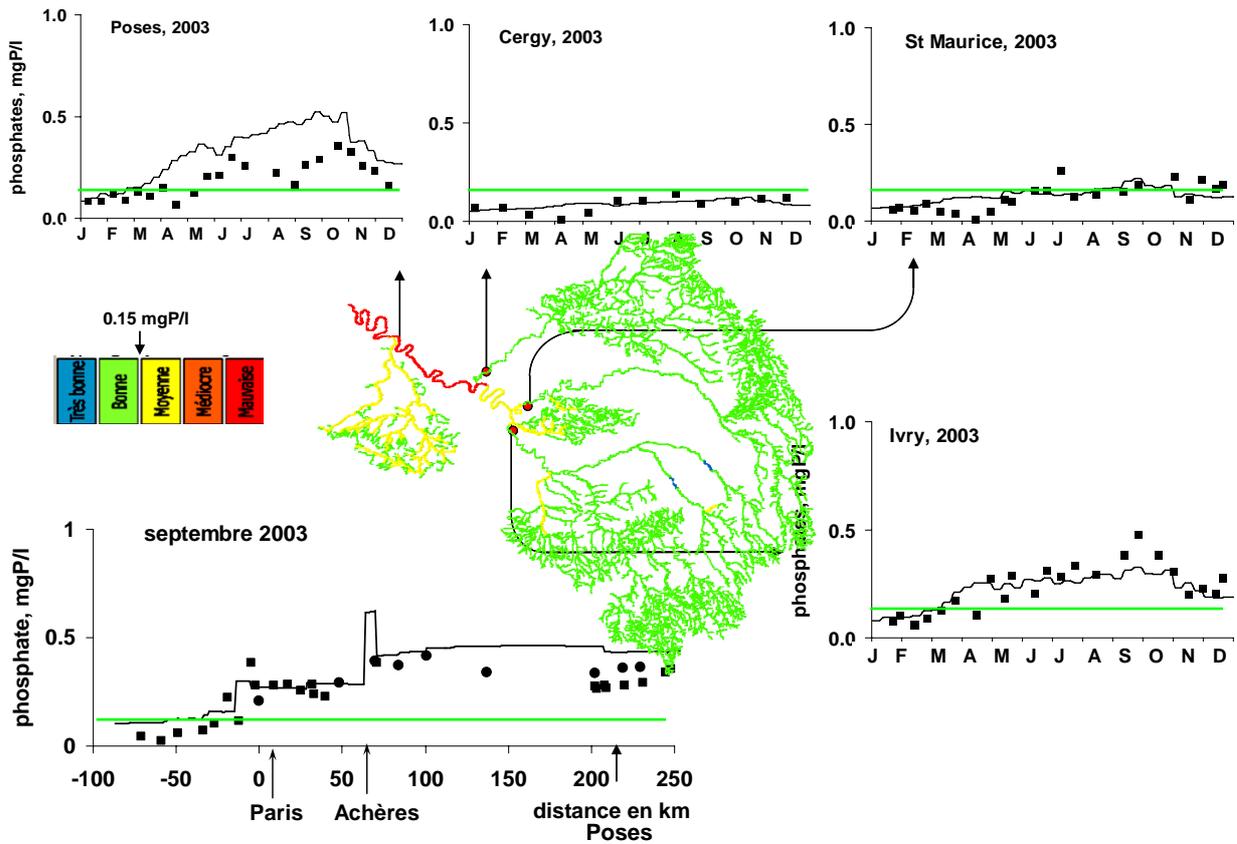


## La situation 2012 (scénario prospectif) : nitrates

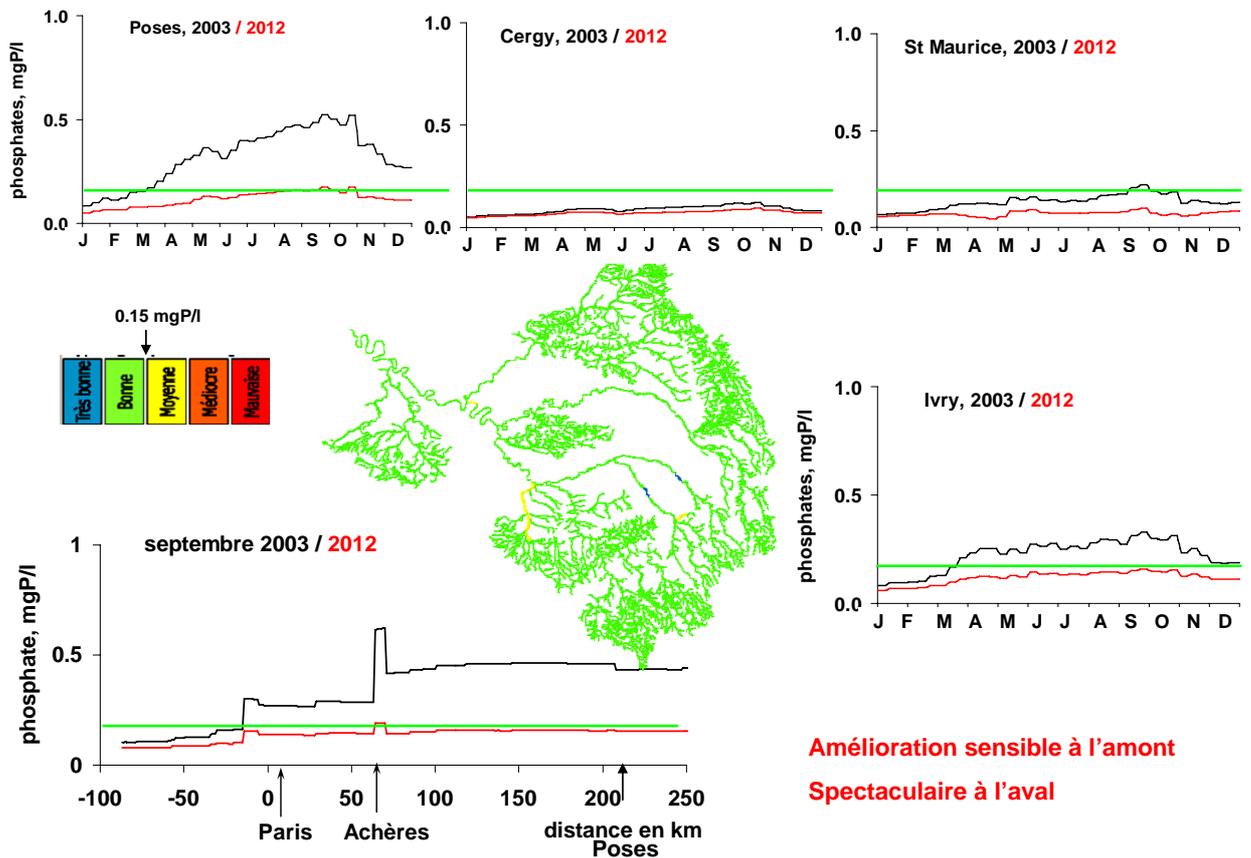


Pas de changement significatif

## La situation 2003 (validation) : phosphates

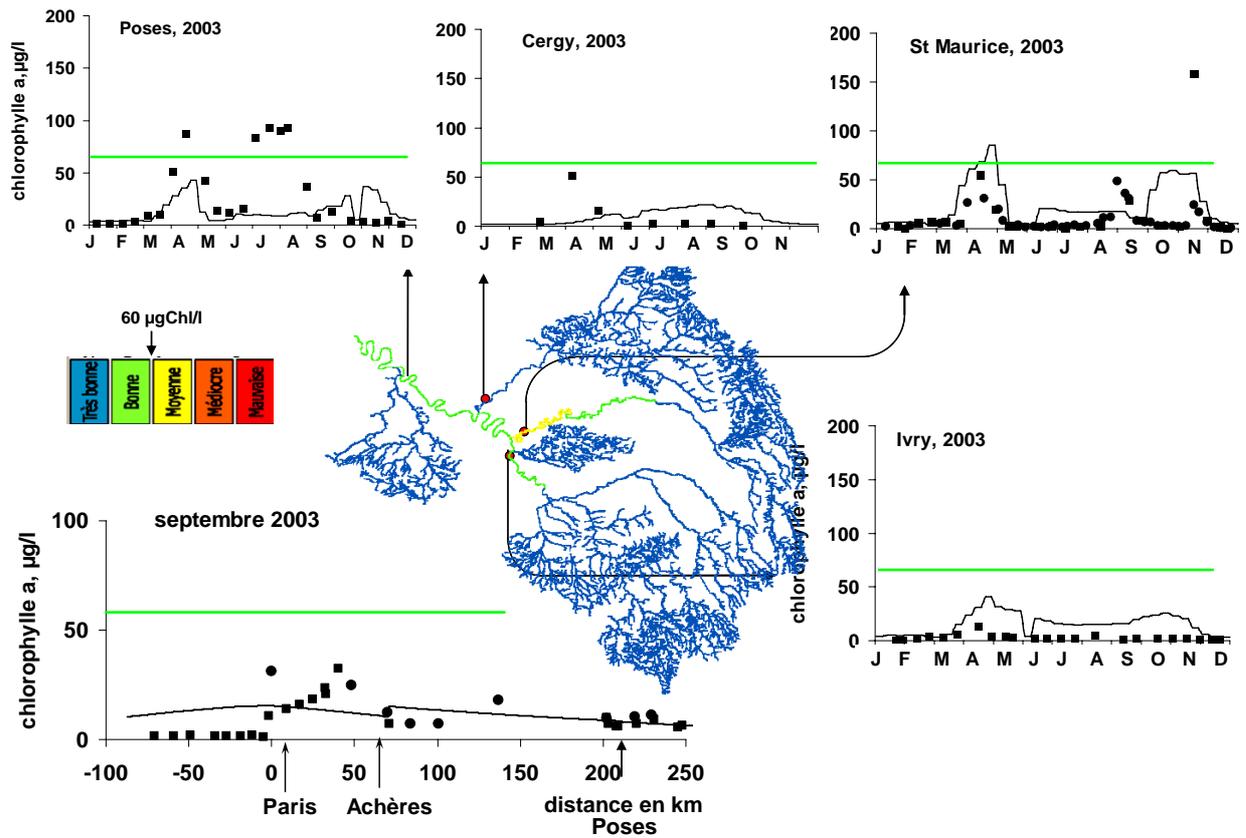


## La situation 2012 (scénario prospectif) : phosphates

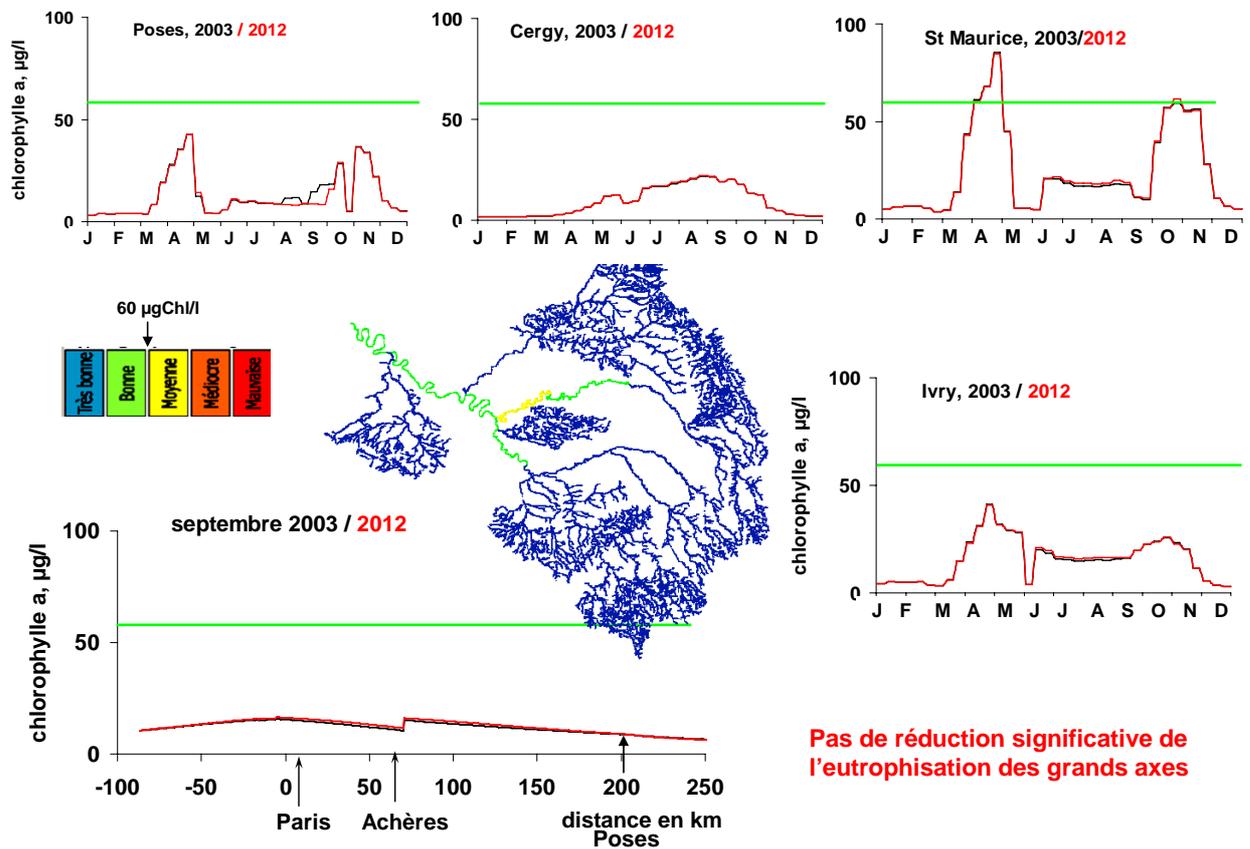


**Amélioration sensible à l'amont**  
**Spectaculaire à l'aval**

## La situation 2003 (validation) : phytoplancton (chlorophylle a)

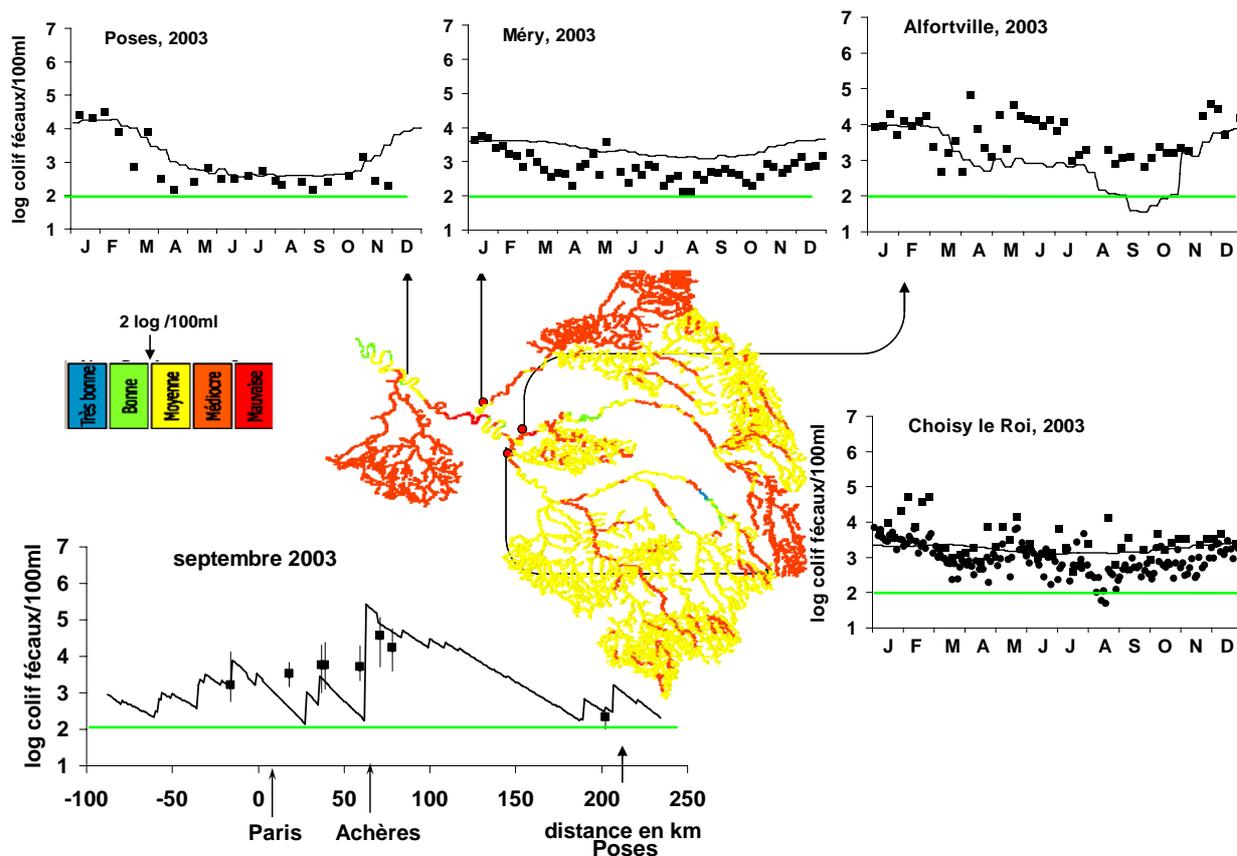


## La situation 2012 (scénario prospectif) : phytoplancton (chlorophylle a)

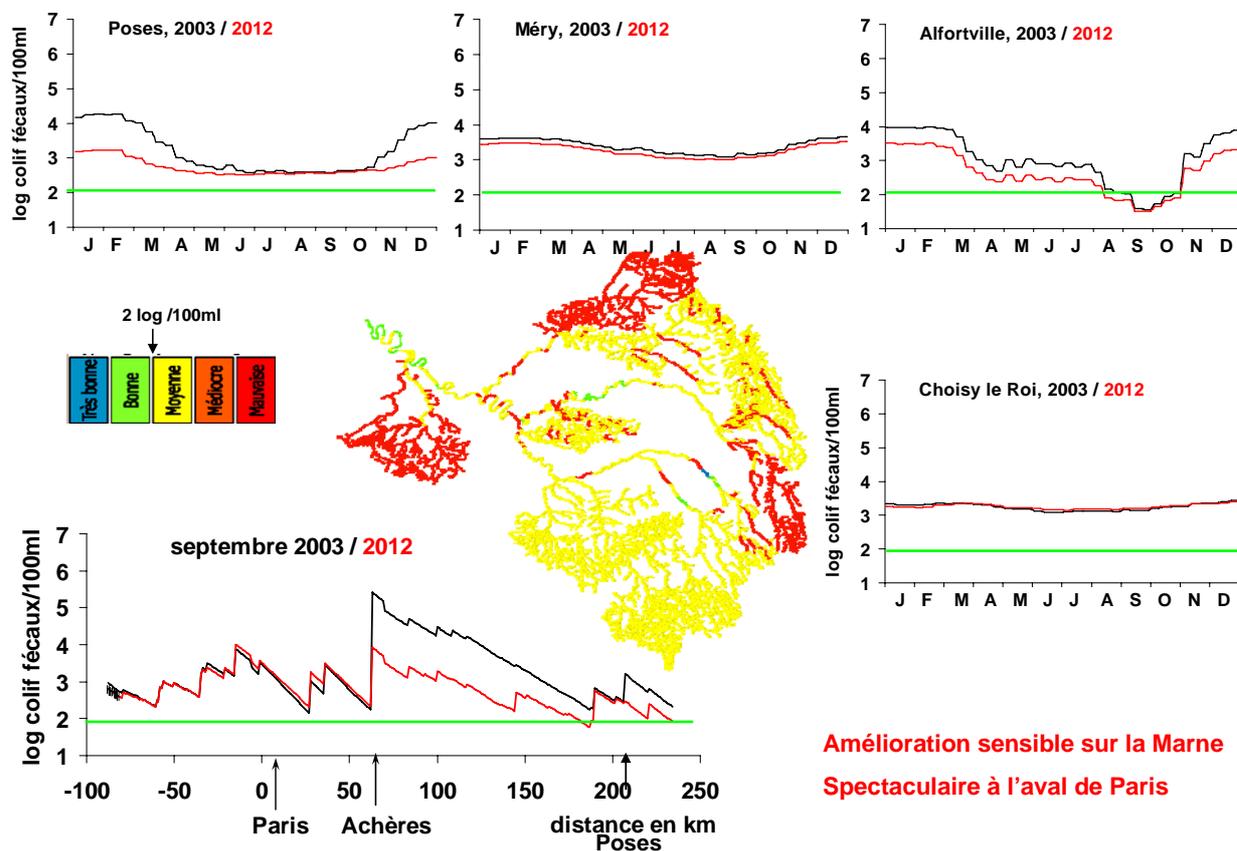


**Pas de réduction significative de l'eutrophisation des grands axes**

## La situation 2003 (validation) : Coliformes fécaux



## La situation 2012 (scénario prospectif) : coliformes fécaux



**Amélioration sensible sur la Marne  
Spectaculaire à l'aval de Paris**

## 4. Flux à la mer et effet sur l'eutrophisation marine côtière

### 4.1. L'Indicateur de potentiel d'eutrophisation côtière (ICEP)

Les problèmes d'eutrophisation côtière sont dus le plus souvent, non en eux-mêmes aux flux d'azote et de phosphore apportés par les rivières, mais plutôt au déséquilibre de ces flux par rapport aux flux de silice au regard des besoins de la croissance diatomique (Officer & Ryther, 1980 ; Conley et al., 1993, 1999 ; Cugier et al., 2005). Les blooms d'algues indésirables, le plus souvent des dinoflagellés, sont en effet le résultat d'une limitation des diatomées par la silice, qui les empêche d'utiliser les flux d'azote et de phosphore excédentaires, qui profitent alors à ces algues non siliceuses.

Nous avons donc été amenés à proposer un indicateur de risque d'eutrophisation en zone côtière (ICEP, indicator of coastal eutrophication potential) basé sur les valeurs de flux de nutriments (N, P, Si) d'origine fluviale (Billen & Garnier, 2007).

Cet indicateur représente le potentiel de croissance d'algues non siliceuses, sur les nutriments apportés par la rivière en excès par rapport à la silice. Il s'exprime donc en terme de 'production nouvelle' de biomasse d'algues non siliceuses susceptible d'être alimentée en zone marine côtière par les apports fluviaux. Dans un but de comparaison d'un bassin fluvial à l'autre, il est commode d'exprimer cet indicateur par unité de surface du bassin versant fluvial. L'indicateur ne prend pas en compte les particularités physiographiques, hydrologiques ou climatiques de la zone côtière concernée. En cela il ne caractérise que les apports fluviaux, à l'exclusion des conditions locales dans lesquelles est susceptible de se réaliser la production primaire marine.

Compte tenu des rapports molaires de Redfield (C :N :P :Si) de 106 : 16 : 1 : 20 (Redfield et al., 1963 ; Conley et al., 1989), l'indicateur se calcule de la manière suivante :

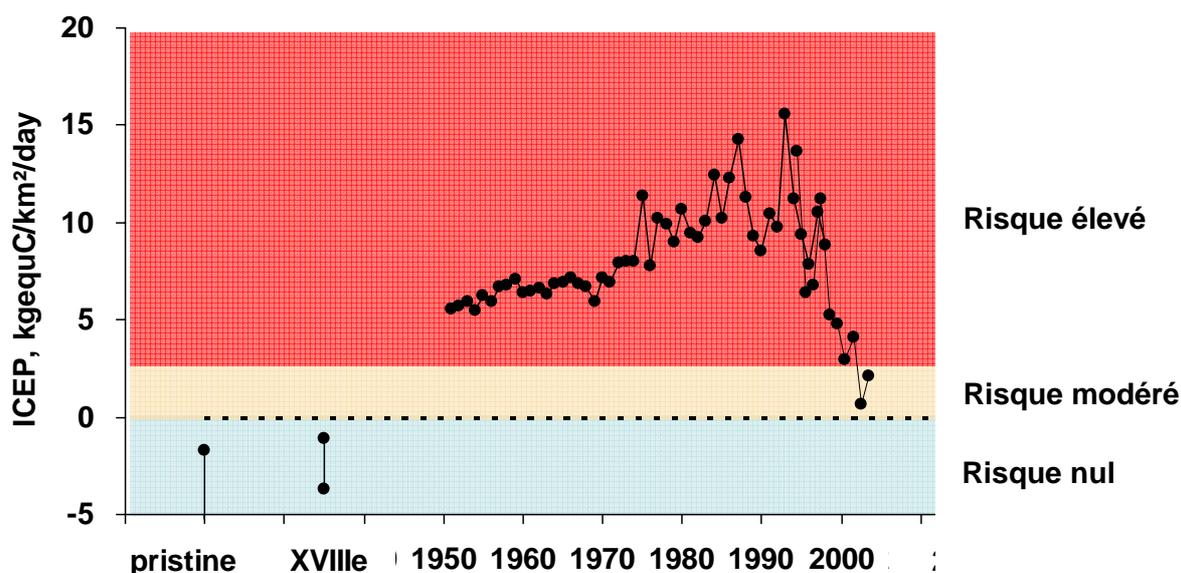
$$\begin{aligned} \text{ICEP} &= [ \text{NFlx} / (14*16) - \text{SiFlx} / (28*20) ] * 106 * 12 \quad \text{si } \text{N/P} < 16 \quad (\text{N limitant}) \\ \text{ICEP} &= [ \text{PFlx} / 31 - \text{SiFlx} / (28*20) ] * 106 * 12 \quad \text{si } \text{N/P} > 16 \quad (\text{P limitant}) \end{aligned} \quad (1)$$

où PFlx, NFlx and SiFlx sont respectivement les flux spécifiques (par km<sup>2</sup> de bassin versant) d'azote, de phosphore et de silice délivrés, exprimés en kgN.km<sup>-2</sup>.jour<sup>-1</sup>, en kgP/km<sup>-2</sup>.jour<sup>-1</sup> et en kgSi.km<sup>-2</sup>.jour<sup>-1</sup>.

La période, journalière, mensuelle ou annuelle, sur laquelle doit être calculé l'indicateur est une question importante. Dans un certain nombre de situations, comme celle de la Baie sud de la Mer du Nord, le temps de séjour des masses d'eau douces dans les zones côtières concernées peut être de plusieurs mois (Lancelot et al., 2005; Gijpens, 2006), les nutriments apportés en période hivernale par les fleuves contribuant alors directement aux processus d'eutrophisation, dans ce cas souvent printanniers. Dans le cas de la Baie de Seine, les phénomènes d'efflorescence de dinoflagellés toxiques apparaissent le plus souvent en fin d'été, et sont restreints au panache immédiat de la Seine, à l'aval du bouchon vaseux estuarien (Cugier et al, 2005). Dans ce cas, ce sont principalement les flux estivaux de nutriments terrigènes qui doivent être pris en compte.

Une valeur négative de l'ICEP indique théoriquement l'absence de risque de prolifération d'algues non siliceuses indésirables. Des tests réalisés grâce au couplage des modèles Riverstrahler et SiAM3D/Elise (Cugier et al, 2005) ont montré que le risque d'eutrophisation en Baie de Seine est significatif pour des valeurs d'ICEP comprises entre 0 et 2.5 kgC/km<sup>2</sup>/jour, et important au dessus de 2.5 kgC/km<sup>2</sup>/jour.

L'ICEP a été précédemment calculé sur les chroniques de flux de nutriments de la Seine mesurés à Poses, ainsi que sur les résultats de scénarios rétrospectifs relatifs à la situation pristine et 'traditionnelles' (XVIIIe siècle) du bassin de la Seine (Billen et al., 2007). Les résultats, présentés à la figure 3, montrent que le risque d'eutrophisation de la Baie de Seine était maximal au cours des années 1980-1990, et décroît très rapidement depuis une dizaine d'années.



**Figure 3.** Valeur de l'Indicateur de potentiel d'eutrophisation côtière calculé sur les flux de nutriments mesurés à Poses, et sur les résultats de simulations rétrospectives correspondant à l'état pristine et 'traditionnel' (XVIIIe siècle) du bassin de la Seine (Billen et al., 2007).

Le calcul de l'ICEP a été effectué sur les flux calculés dans les simulations SENEQUE présentées ci-dessus. Les résultats sont montrés dans le Tableau 1.

**Tableau 1.** Calcul des flux de nutriments (N,P,Si) apportés par la Seine à la zone côtière dans les scénarios décrits ci-dessus. L'ICEP est calculé (a) sur la moyenne annuelle, (b) sur la moyenne de fin d'été (septembre) à la station de Caudebec.

	Réf 2003	2012
<b>a. Flux annuels moyens</b>		
Flux Ntot, kgN/km <sup>2</sup> /an	1398	1313
Flux Ptot, kgP/km <sup>2</sup> /an	63	34
Flux SiO <sub>2</sub> , kgSi/km <sup>2</sup> /an	632	640
<b>Nutrient limitant principal</b>	<b>P</b>	<b>P</b>
<b>ICEP, kgC/km<sup>2</sup>/j.</b>	<b>3.15</b>	<b>-0.16</b>
<b>b. Flux estivaux</b>		
Flux Ntot, kgN/km <sup>2</sup> /jour	1.87	1.68
Flux Ptot, kgP/km <sup>2</sup> /jour	0.167	0.076
Flux SiO <sub>2</sub> , kgSi/km <sup>2</sup> /jour	0.935	0.976
<b>Nutrient limitant principal</b>	<b>P</b>	<b>P</b>
<b>ICEP, kgC/km<sup>2</sup>/j.</b>	<b>4.72</b>	<b>0.002</b>

La valeur de l'ICEP calculée sur les flux annuels moyens prévus par le modèle dans les conditions de 2003 indique un risque d'eutrophisation côtière important, avec une situation générale de limitation par le phosphore de la croissance algale côtière. Ce résultat n'est pas étonnant vu les conditions hydrologiques, sèches, de l'année 2003.

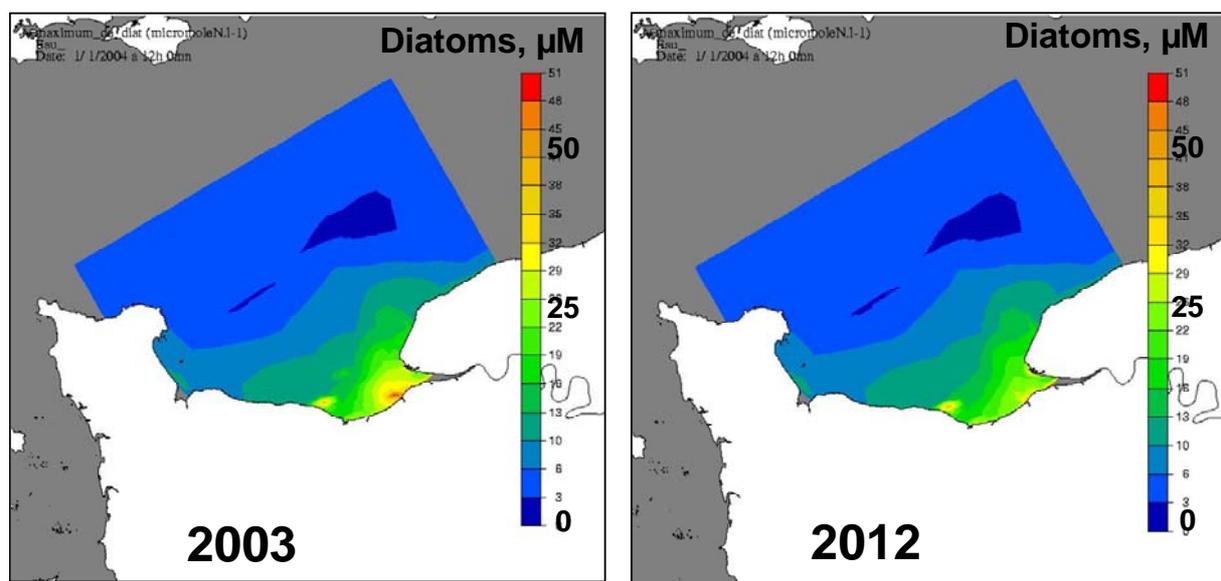
La situation prospective 2012 montre un ICEP négatif, montrant l'absence de risque d'eutrophisation côtière. Calculé sur base des flux estivaux seulement (septembre), ce qui est plus pertinent en ce qui

concerne les conditions de la Baie de Seine, l'ICEP calculé pour 2003 indique un risque plus élevé. La réduction du flux de phosphore en 2012 conduit à un ICEP pratiquement nul en 2012.

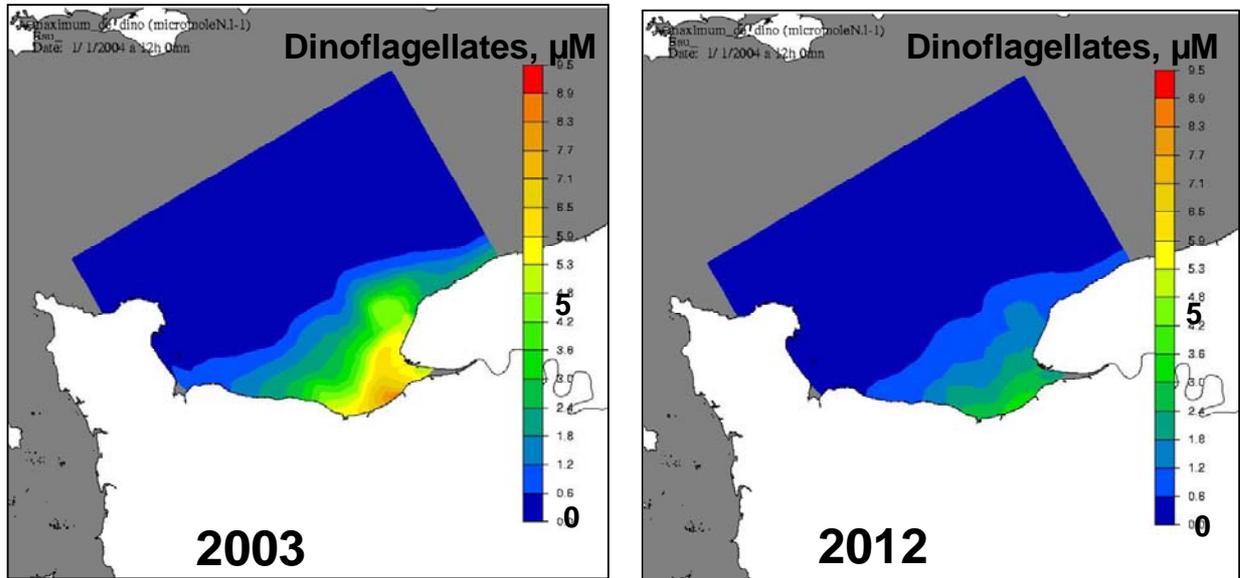
## 4.2. Application du modèle SiAM3D/ELISE

Le modèle SiAM3D/ELISE de l'Ifremer permet de calculer la dynamique de l'écosystème planctonique côtier résultat des apports de la Seine en Baie de Seine (Cugier et al., 2005). Le modèle a été utilisé pour calculer l'ampleur et la distribution des blooms algaux en Baie de Seine en réponse aux flux de nutriments prévus par le modèle SENEQUE en 2003 et 2012. Toutes les autres contraintes physiques imposées au milieu marin (apports océaniques, conditions climatiques) sont celles effectivement observées au cours de l'année 2003.

Les figures 4 et 5, et le tableau 2 montrent pour les deux scénarios, la répartition géographique du maximum de développement des diatomées (au printemps) et des dinoflagellés (en fin d'été) dans la Baie de Seine. Les scénarios 2003 et 2012 diffèrent très peu en ce qui concerne les diatomées. Par contre la biomasse maximale atteinte en 2012 par les dinoflagellés est réduite de plus d'un facteur 2 par rapport à 2003.



**Figure 4.** Distribution spatiale de la biomasse des diatomées (en  $\mu\text{mol N/l}$ ) au maximum de leur développement printanier estival en Baie de Seine, telle que simulée par le modèle pour les conditions de l'année 2003, dans les 4 scénarios du tableau 2.1.



**Figure 5.** *Distribution spatiale de la biomasse des dinoflagellés (en  $\mu\text{molN/l}$ ) au maximum de leur développement estival en Baie de Seine, telle que simulée par le modèle pour les conditions de l'année 2003 et de l'année 2012.*

**Tableau 2.** *Maximum de biomasse (en  $\mu\text{molN/l}$ ) atteint par les diatomées (a) et les dinoflagellés (b) (respectivement au printemps et en fin d'été) pour les 4 scénarios, dans différentes régions de la Baie de Seine.*

	Réf 2003	2012
<b>a. Diatomées (<math>\mu\text{molN/l}</math>)</b>		
Panache de la Seine	16.3	15.3
Calvados	10.5	10.5
Pays de Caux	8.1	8.1
Zone du large	4.75	4.75
<b>b. dinoflagellés (<math>\mu\text{molN/l}</math>)</b>		
Panache de la Seine	4.0	1.61
Calvados	1.77	0.84
Pays de Caux	1.6	0.59
Zone du large	0.27	0.14

## 5. Conclusion

Les actions prévues d'ici à 2012 par les 8<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> programmes d'intervention de l'AESN en matière de d'amélioration du traitement des eaux usées urbaines de temps sec, conduiront, par rapport à la situation de référence 2003 :

- (1) à une amélioration sensible de la contamination ammoniacale
- (2) à forte réduction de la charge en phosphore. Cette réduction n'est cependant pas suffisante pour diminuer significativement les blooms diatomiques printaniers dans les grands axes canalisés, notamment dans la Marne. Elle aura, en revanche, un effet bénéfique sur les risques de proliférations d'algues toxiques non siliceuses en Baie de Seine
- (3) à une amélioration sensible de la qualité microbiologique du réseau hydrographique en général, et de la Basse Seine en particulier.
- (4) La contamination nitrique restera un problème majeur dans l'ensemble du bassin de la Seine, et les flux d'azote à la mer ne seront diminués que d'environ 6%.

## 6. Références

- Billen, G., J. Garnier and P. Hanset. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia* 289: 119-137.
- Billen G. & Garnier J. (1997). The Phison River Plume: coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. *Aqu. Microb. Ecol.*, 13: 3-17.
- Billen, G. and J. Garnier. (2000). Nitrogen transfer through the Seine drainage network: a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia* 410: 139-150.
- Billen G, Garnier J. (in press). River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non siliceous algae. *Marine Chemistry*.
- Conley D.J. (1999). Biogeochemical nutrient cycles and nutrient management strategies. *Hydrobiologia*, 289:87-96.
- Conley D.J., Kilham S.S., Theriot E. (1989). Differences in silica content between marine and freshwater diatoms. *Limnology and Oceanography*, 34: 205-213.
- 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.
- Cugier, P., Billen, G., Guillaud, J.F., Garnier, J., Ménesguen, A. (2005). Modelling eutrophication of the Seine Bight under present, historical and future Seine river nutrient loads. *Journal of Hydrology* 304: 381-396
- Even S, Billen G, Bacq N, Théry S, Ruelland D, Garnier J, Cugier P, Poulin M, Blanc S, Lamy F, Paffoni C. (2007) New tools for modelling water quality of hydro-systems: an application in the Seine River basin in the frame of the Water Framework Directive. *The Science of the Total Environment*. (sous presse)
- 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., Laroche, L & Pinault, S., 2006. Determining the domestic specific loads of two wastewater plants of the Paris conurbation (France) with contrasted treatments: A step for exploring the effects of the application of the European Directive. *Water Research* 40 : 3257 – 3266.
- 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.
- Officer C.B. & Ryther J.H. (1980). The possible importance of silicon in marine eutrophication. *Marine Ecology Prog. Ser.*, 3: 383–391.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards. (1963). The influence of organisms on the composition of seawater. In M.N. Hill (ed.) *The Sea*. John Wiley & sons. NY pp. 12-37.
- Ruelland, D., Billen, G., Brunstein, D. & Garnier, J. (2007) SENEQUE: a multi-scaled GIS interface to the RIVERSTRAHLER model of the biogeochemical functioning of river systems. *The Science of the Total Environment* (sous presse)
- Ruelland D. (2004). SENEQUE, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau. *Revue Internationale de Géomatique* 14: 97-117.