

Les apports de nutriments à la mer : de la Convention OSPAR au Grenelle de l'environnement

Paul Passy^{1*}, Josette Garnier¹, Gilles Billen¹, Marie Silvestre¹, Sylvain Théry¹, Christiane Lancelot², Véronique Rousseau², Nathalie Gypens²

¹UPMC et CNRS, Sisyphe, Paris

²ULB, ESA, Bruxelles

* paul.passy@upmc.fr

1 Introduction

L'eutrophisation des eaux marines côtières est actuellement un défi environnemental majeur. Ce phénomène est dû au déséquilibre de nutriments apportés par les fleuves (Billen & Garnier, 2007 ; Garnier et al., 2010), pouvant entraîner un développement d'algues non siliceuses, comme les Phaeocystis, difficilement consommables par le zooplancton. Ces algues ont alors tendance à s'accumuler. Lors d'un changement physique du milieu (diminution de la température, baisse de luminosité, ...), ces algues meurent et sont dégradées par des bactéries, ce qui nécessite une quantité d'oxygène importante, pouvant engendrer une hypoxie voire une anoxie du milieu (Ludsin et al., 2009), préjudiciable à l'ensemble de l'écosystème marin. Certaines de ces algues non siliceuses sont également susceptibles de produire des toxines, rendant les coquillages qui les filtrent impropres à la consommation humaine. Ce phénomène d'eutrophisation des eaux côtières présente une ampleur planétaire, de la Mer du Nord au Golfe du Mexique en passant par la Mer Baltique ou la Mer de Chine Méridionale (Kim et al., 2010, Zhang et al., 2009).

Les apports de nutriments à la mer sont le reflet des activités humaines et des choix socio-politiques effectués par les populations des bassins versants. Dans le cas des bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut, dont les apports concourent à la pollution des zones côtières de la Manche orientale et de la Baie Sud de la mer du Nord, les apports de phosphore ont considérablement diminué depuis le bannissement des polyphosphates des poudres à lessiver et l'amélioration du traitement des eaux usées urbaines en station d'épuration. Le principal défi aujourd'hui et dans les années à venir concerne la pollution azotée. Cette pollution est essentiellement diffuse et d'origine agricole (Billen et al., 2007), et résulte du lessivage de l'azote apporté sous forme minérale ou organique aux sols arables en surplus des besoins des plantes. Cette pollution nitrique des eaux superficielles et souterraines est dommageable pour l'écosystème mais représente également une menace pour la production d'eau potable.

Dans le cadre du programme européen Aware (<http://www.aware-eu.net/>), nous avons été amenés à apporter notre expertise sur les processus de transferts des nutriments dans les bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut, dans une démarche participative impliquant des citoyens, des gestionnaires et des politiques. Ce programme a pour but de promouvoir la connectivité entre citoyens, scientifiques et gestionnaires afin de construire une vision partagée du problème et de proposer des solutions possibles. Un panel de dix citoyens franco-belges, riverains des trois bassins, a été sélectionné aléatoirement. Lors d'une première réunion en avril 2010, les scientifiques leur ont présenté les mécanismes physiques de l'eutrophisation, ainsi qu'un aperçu des leviers techniques, politiques et juridiques pouvant être mis en œuvre pour contrôler la pollution nitrique (Le document remis au panel de citoyens, rédigé par Pauline Rioussset, est fourni en annexe du présent rapport). Puis, en octobre 2010, le panel a rencontré et échangé avec des gestionnaires, des politiques et des acteurs de différents horizons (pêcheur, agriculteur, professionnel du tourisme, ...) afin de connaître le point de vue de chacun de ces acteurs. A la suite de cette réunion les dix citoyens ont formulé des recommandations destinées aux gestionnaires, en s'appuyant sur des scénarios de réduction d'eutrophisation, qu'ils ont demandé aux scientifiques de construire. Ce sont ces différents scénarios qui sont présentés ici.

2 Zone d'études

Les bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut ont tous trois un impact sur les eaux côtières de la Manche orientale et du sud de la Mer du Nord (Thieu et al., 2010). Les trois bassins ensemble couvrent une superficie de 102 380 km², 76 266 pour la Seine, 6193 pour la Somme et 19 922 pour l'Escaut (Figure 1).



Figure 1 : Les bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut

Les trois bassins sont dominés par les terres arables (figure 2), qui prédominent nettement dans le bassin de la Somme (77 %). Dans le bassin de la Seine, les terres arables se regroupent au centre du bassin, alors que dans le cas de l'Escaut elles se situent plutôt dans le sud, en Wallonie. La part des prairies s'élève à moins de 10 % dans les trois bassins et présente un maximum dans le bassin de la Seine (9.8 %), se situant essentiellement en périphérie, en Normandie et dans le Morvan. Il y a peu de forêts sur la Somme et l'Escaut (7 % dans les deux cas), mais représentent un quart de la superficie du bassin de la Seine, principalement sur ses franges nord, est et sud (Corine Land Cover 2006). Bien que l'agglomération parisienne soit la 3^{ème} d'Europe en termes d'habitants avec 12 600 000 habitants, les surfaces urbaines ne représentent que 7 % du bassin de la Seine, principalement situées au centre du bassin et le long des principaux axes fluviaux. La part de surfaces urbanisées est nettement plus élevée pour le bassin de l'Escaut atteignant plus de 25 % distribués assez uniformément. La densité de population y est la plus forte avec 542 hab.km⁻² en 2006, contre 215 hab.km⁻² pour la Seine et 110 hab.km⁻² pour la Somme (INSEE 2006).

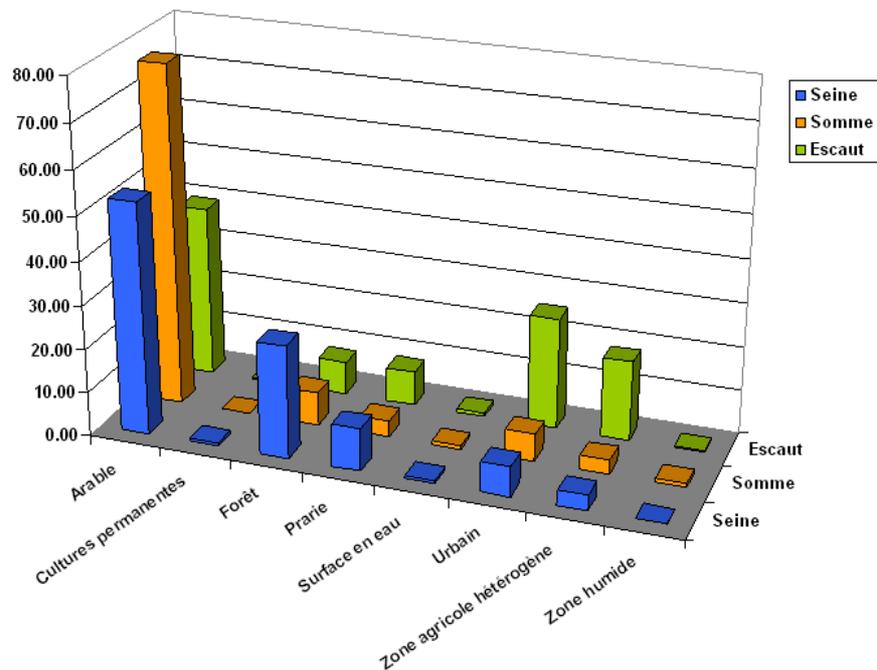


Figure 2 : Occupation du sol des bassins de la Seine de la Somme et de l'Escaut

3 Méthodes et outils

3.1 Les modèles

Afin de comprendre le fonctionnement écologique et biogéochimique à l'échelle du bassin versant, des modèles mathématiques ont été développés, nous permettant de tester nos connaissances scientifiques en comparant les observations avec nos simulations, et d'explorer des politiques de réduction d'apports de nutriments. Trois modèles ont été développés sur notre zone d'études. Seneque/RIVERSTRAHLER (Garnier et al., 2002) décrivant les processus en rivières, MIRO (Lancelot et al., 2005 ; Lancelot et al., 2007) pour les processus en Mer du Nord et MARS 3D, développé par l'IFREMER, décrivant plus finement les processus en Manche et en Baie de Seine. Les trois modèles sont des modèles biogéochimiques déterministes couplant un modèle hydrologique/hydrodynamique et un modèle décrivant le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème. Seneque peut être vu comme l'interface SIG de RIVERSTRAHLER permettant à l'utilisateur de rentrer toutes les données nécessaires. L'utilisateur définit lui-même sa zone d'études décrite sous forme de bassins et de branches à une résolution spatiale qu'il choisit selon ses besoins (Ruelland et al., 2007). La construction de la base de données SIG est ainsi le point clef d'une simulation RIVERSTRAHLER.

L'utilisateur doit donner en entrée, entre autres, un réseau hydrographique, décrit sous forme de tronçons et de bassins versants élémentaires, des écoulements superficiels et de surface, une occupation du sol (basée sur Corine Land Cover et sur les petites régions agricoles), et des rejets ponctuels domestiques et industriels (Figure 3). Ces informations sont transmises par Seneque à RIVERSTRAHLER. Ce dernier calcule ensuite, à un pas de temps décadaire, la qualité de l'eau tout au long du réseau hydrographique. Les résultats peuvent être visualisés sous forme de profils saisonniers en un point donné, de profils longitudinaux le long d'un axe fluvial ou sous forme de cartes de qualité d'eau à une décade donnée.

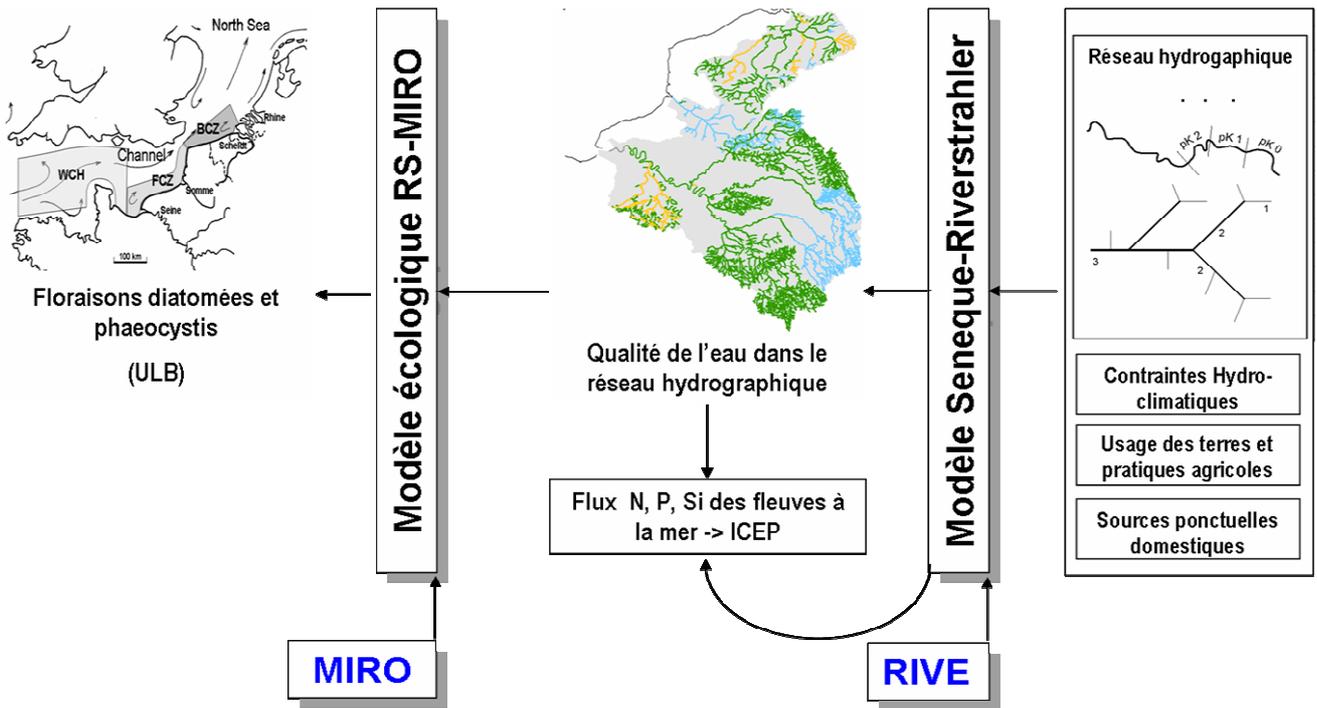


Figure 3 : Données de contraintes et couplage Seneque/RIVERSTRALER - MIRO

Le couplage des modèles RIVERSTRALER et MIRO a été validé pour l’année de référence 2006. Ces modèles sont un outil performant pour rendre compte de l’impact des politiques mises en place sur les bassins versants sur la qualité de l’eau des rivières et des eaux côtières. Ils permettent donc d’imaginer des scénarios de retour à un meilleur équilibre en termes de nutriments délivrés aux zones côtières belges et françaises. Plusieurs séries de mesures, visant à améliorer la qualité de l’eau des rivières et à réduire les efflorescences algales en Mer du Nord ont déjà été testés de cette manière (Cugier et al., 2005 ; Thieu et al., 2010).

3.2 Validation

L’année de référence choisie est 2006, présentant une hydrologie « moyenne ». Nous avons donc validé nos simulations en comparant nos résultats avec les observations 2006 à Doel, à l’embouchure de l’Escaut, et à Poses, à l’entrée de l’estuaire de la Seine (Figure 4). Le modèle Sèneque/Riverstrahler, entièrement déterministe, ne comporte pas d’étape de calibration sur les résultats observés. La figure 5 permet donc de juger de la capacité du modèle à rendre compte ou non des variations saisonnières observées des principales variables de qualité d’eau (nitrates, phosphates, silice, biomasse algale) à partir des contraintes que constituent l’hydrologie, les apports des stations d’épuration, l’usage du sol et la qualité de l’eau sous-racinaire résultat des pratiques agricoles. L’accord peut être considéré comme généralement satisfaisant.

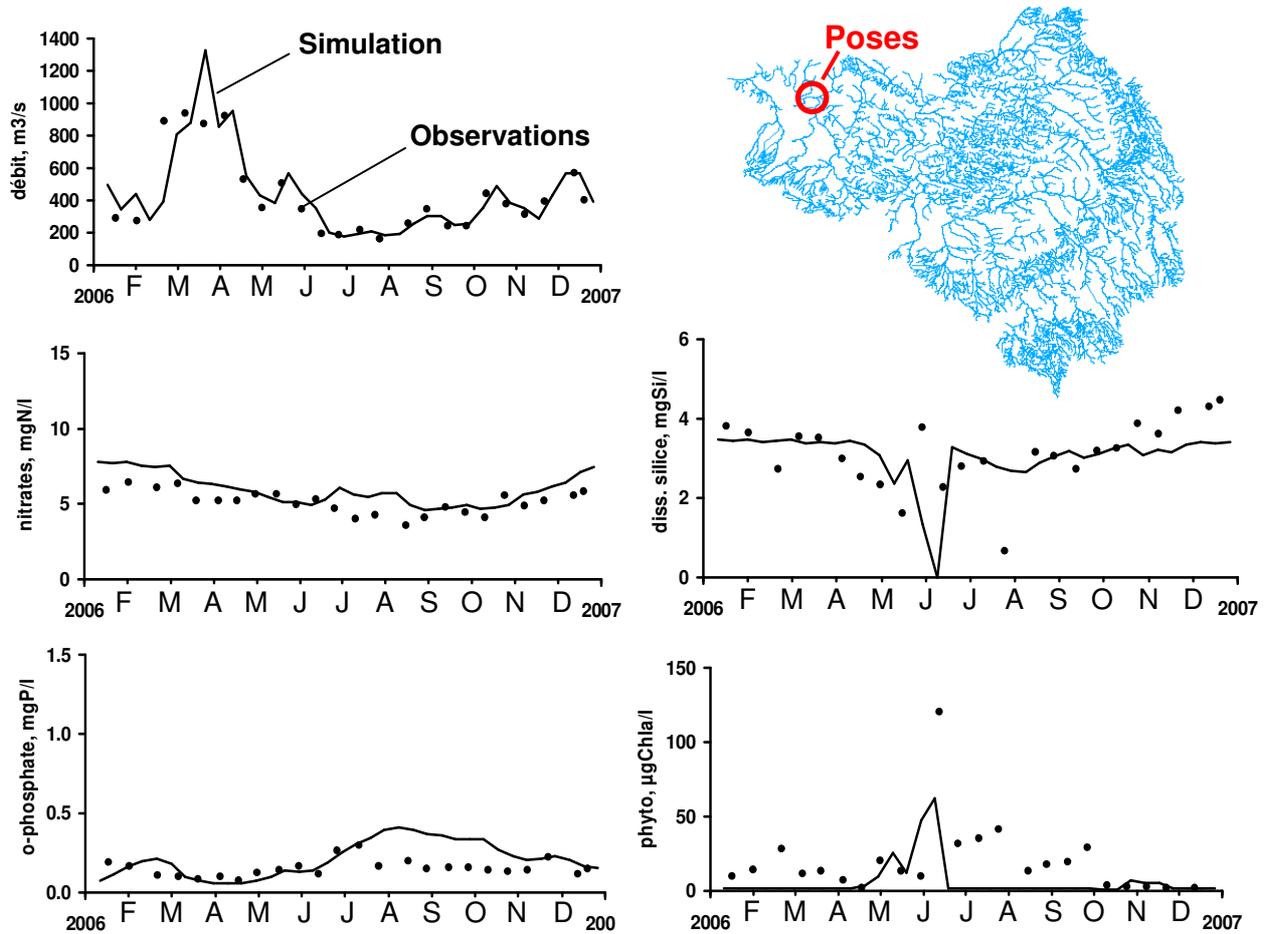


Figure 4 : Validation du modèle Sénèque/Riverstrahler à Poses pour l'année 2006 – débits, nitrates, phosphates, silice, phytoplancton

4 Rétrospective 1985

La convention OSPAR, signée en 1992 par 15 états membres de la façade occidentale de l'Europe, a pour but de promouvoir la coopération pour la protection de l'environnement de l'Atlantique du Nord Est au sens large, incluant la Manche et la Mer du Nord. Un des objectifs de ce traité était de réduire de moitié les flux de nutriments apportés par les fleuves dans les eaux marines côtières par rapport à ceux de 1985. Cette année peut en effet être considérée comme une des pires années en matière de nutriments délivrés à la mer. La première simulation effectuée a donc été une rétrospective 1985 (Figure 5). Pour les apports ponctuels, nous avons reconstitué les charges des stations d'épuration et de rejets industriels, et pour les apports diffus, nous nous sommes basés sur les données de Corine Land Cover 1990.

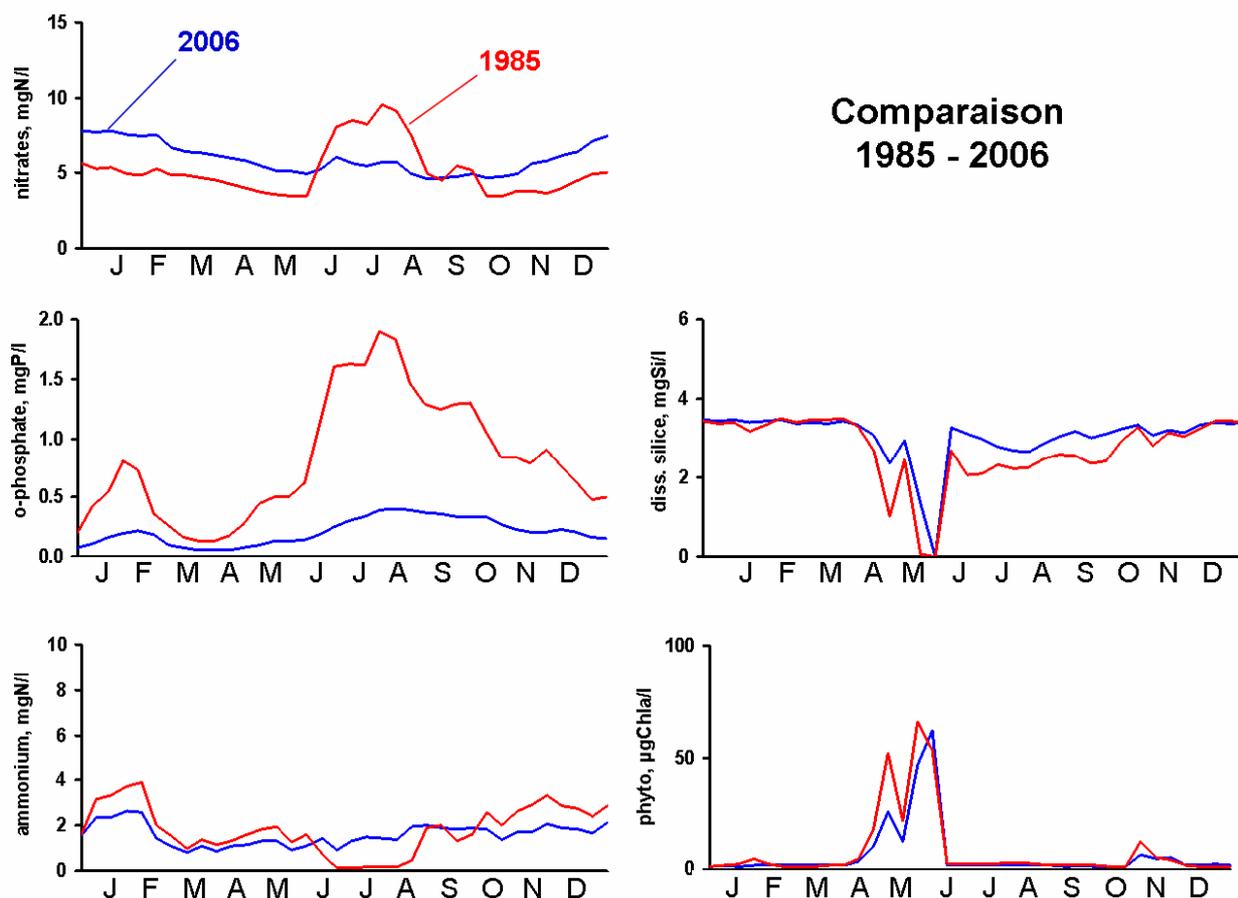


Figure 5 : Comparaison des concentrations de nutriments pour les années 1985 et 2006

En termes de concentrations, les principaux changements ont eu lieu sur l’azote et le phosphore. La situation vis-à-vis des nitrates s’est dégradée entre les deux années. En 1985, la concentration en azote était en moyenne inférieure de 2 mgN.l⁻¹ à la concentration actuelle (2006), sauf en été où elle était supérieure pendant un mois et demi. Cette dégradation est liée à l’inertie des aquifères dont la concentration continue de s’accroître même si l’usage des engrais s’est stabilisé depuis 1985.

Le second, et le plus spectaculaire, fait marquant vient du phosphore (Figure 6). La situation s’est nettement améliorée au cours de ces 25 dernières années. La diminution atteint jusqu’à 1.5 mgP.l⁻¹ en période estivale. Cette amélioration provient pour une grande part du bannissement des polyphosphates des poudres à lessiver. L’équipement récent des stations d’épuration en modules de déphosphatation est également une des raisons de ce résultat.

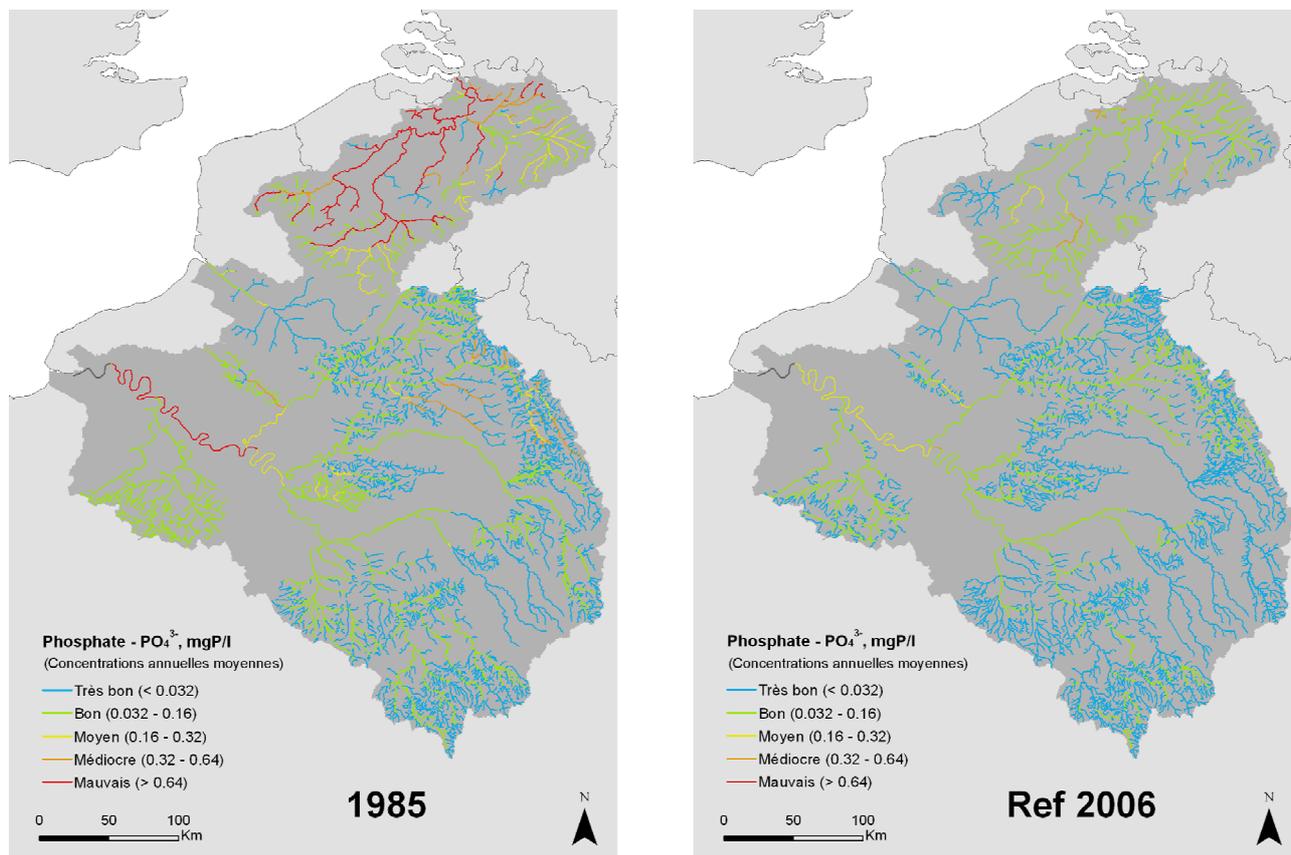


Figure 6 : Comparaison des concentrations en phosphore au sein du réseau hydrographique des trois bassins pour les années 1985 et 2006

Spatialement, l'amélioration entre les deux années, est surtout notable en aval du réseau de la Seine, où la situation passe de « mauvais » à moyen. Le changement est également visible sur l'Eure et l'Oise. L'amélioration la plus nette a lieu dans le bassin de l'Escaut, qui était presque entièrement « mauvais » en 1985 alors qu'il atteint des niveaux « très bons » à « moyens » en 2006.

5 Achever les efforts de traitement des eaux urbaines

En 1991, le parlement européen a ratifié la directive sur les eaux résiduaires urbaines (DERU), imposant le traitement tertiaire de l'azote (élimination de 70% de la charge entrante) et du phosphore (élimination de 80% de la charge entrante) dans toutes les stations d'épuration d'une capacité supérieure à 10000 équivalents habitants situées en zones sensible (c'est le cas des trois bassins considérés) d'ici 2005. L'objectif n'est pas entièrement atteint mais le sera très prochainement. Nous avons donc simulé ce que sera la situation lorsque toutes les stations seront mises aux normes sur les trois bassins (Figure 7).

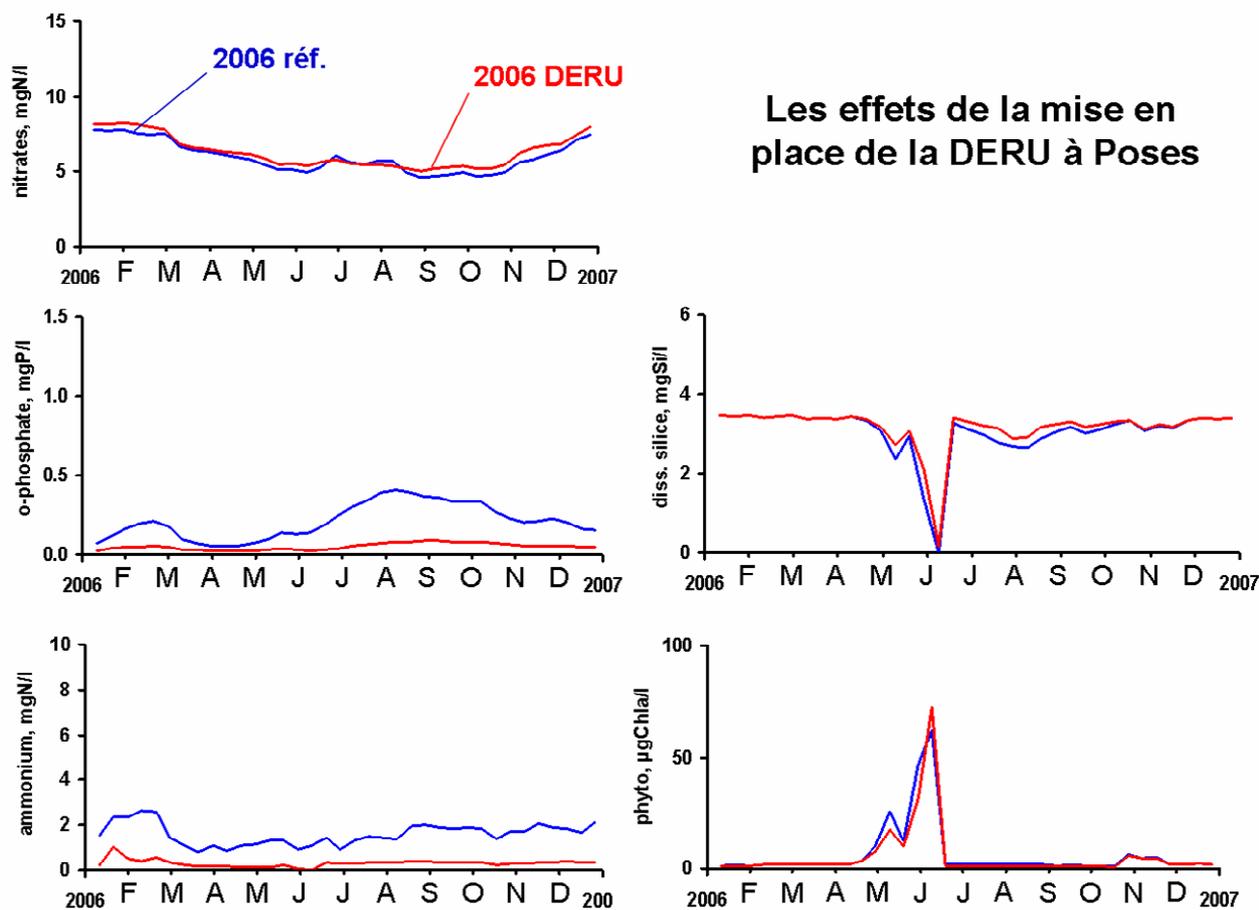


Figure 7 : Comparaison des concentrations de nutriments entre la situation de référence et l'application de la DERU

La DERU étant centrée sur les stations d'épuration, son application n'aura qu'un impact sur les apports ponctuels, à savoir essentiellement sur le phosphore et de façon moindre sur l'ammonium. Le phosphore passera de 0.5 mgP.l^{-1} en été à 0.1 mgP.l^{-1} et l'ammonium diminuera en moyenne de 1.8 mgN.l^{-1} pour atteindre 0.5 mgN.l^{-1} en moyenne annuelle.

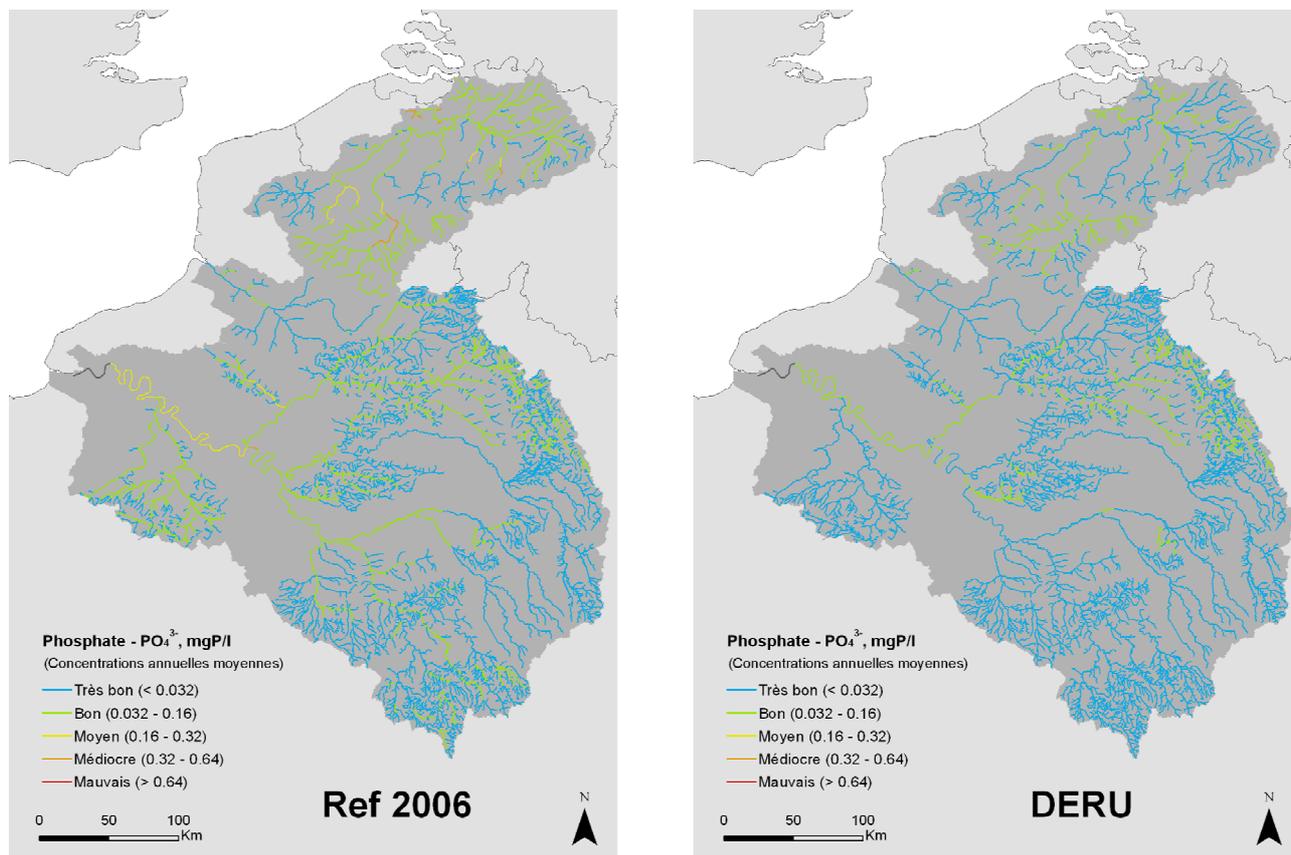


Figure 8 : Comparaison des concentrations en phosphore au sein du réseau hydrographique des trois bassins entre la situation de référence et l'application de la DERU

Les progrès réalisés en terme de phosphore sont déjà très importants (cf supra), la différence ne sera donc pas spectaculaire (Figure 8). La situation continuera de s'améliorer sur le tronçon aval de la Seine, où la situation deviendra « bonne » et sur le réseau de l'Escaut, où les stades « bons » à « très bons » seront atteints.

6 Les objectifs du Grenelle de l'Environnement

Le Grenelle de l'Environnement a identifié sur le territoire français 507 captages d'eau potable considérés comme prioritaires à cause de leur caractère stratégique pour l'approvisionnement ou des menaces qui pèsent sur leur qualité. L'objectif est de mettre en place sur leurs aires d'approvisionnement des mesures permettant de préserver ou de restaurer la qualité de l'eau souterraine de ces captages. Le passage de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique est cité explicitement dans la loi comme une des mesures à cet effet. Les bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut comportent bon nombre de ces captages Grenelle. Nous y avons ajouté les captages déclarés prioritaires par l'Agence de l'Eau (Figure 9). Sur l'Escaut belge, nous avons pris les captages classés en prioritaires par les instances wallonnes et flamandes.

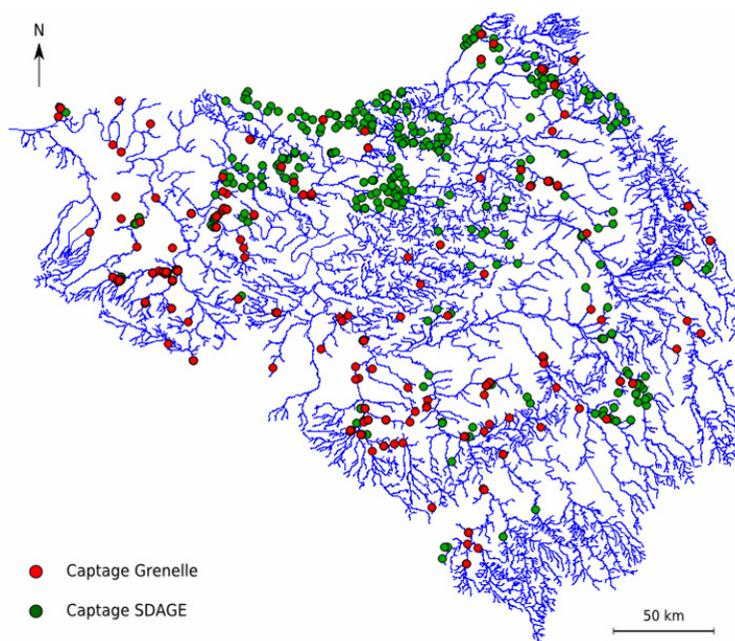


Figure 9 : Les captages prioritaires Grenelle et SDAGE du bassin de la Seine

La délimitation des aires d'alimentation de captage (AAC) est encore un travail en cours, et nous n'avons donc pas pu disposer de l'information définitive. En ce qui concerne le bassin de la Seine, une première estimation réalisée à l'AESN indique que le total des AAC représenterait environ 30% de la surface totale du bassin (Mr. P. Maret, AESN, comm. pers.). Nous avons donc été contraints de délimiter nous-mêmes une surface plausible des bassins d'alimentation, afin de réaliser une simulation préliminaire de l'effet à attendre d'un changement de pratiques agricoles sur ces espaces. Pour chaque captage, nous avons créé un tampon de 2 km de circonférence et sélectionné les bassins versants topographiques élémentaires identifiés dans Sénéque en intersection avec ce tampon (Figure 10) comme constituant l'aire d'alimentation du captage.

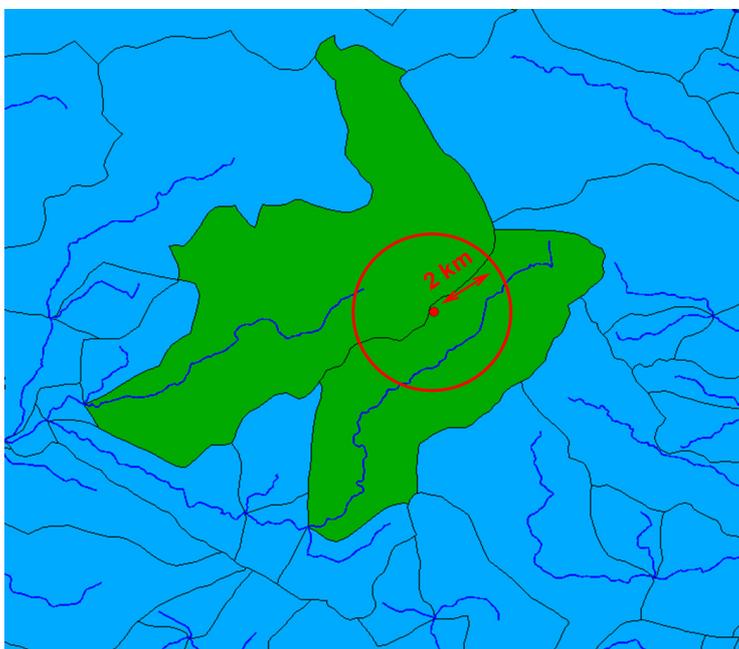


Figure 10 : Méthode de construction des aires d'alimentation de captage (bassins en vert)

Les zones ainsi délimitées représentent le tiers du bassin de la Seine, ce qui se rapproche des estimations de l'Agence de l'Eau Seine Normandie. Dans les terres agricoles de ces AAC, nous avons ensuite virtuellement substitué une agriculture biologique à l'agriculture conventionnelle, modifiant ainsi la qualité des eaux sous-racinaires produites conformément au scénario construit par Thieu et al (2010). (Figure 11).

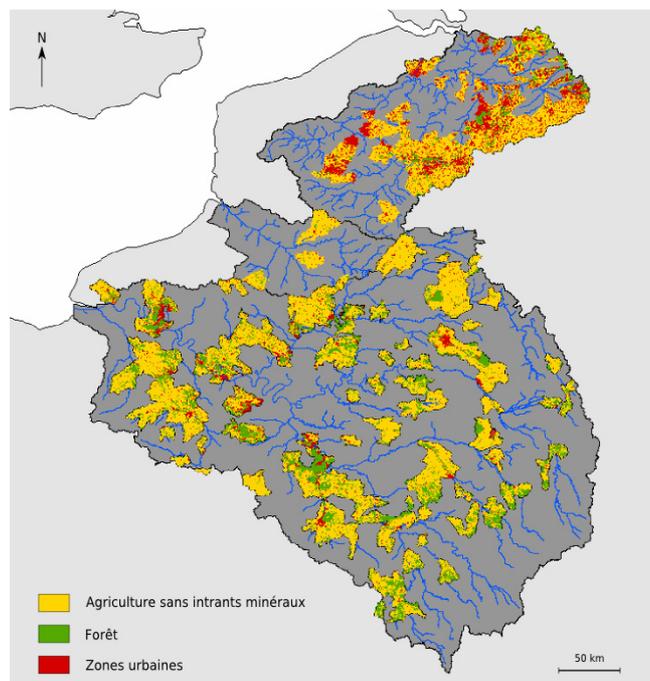


Figure 11 : Répartition des aires d'alimentation de captage et mise en place d'une agriculture sans intrants minéraux (en jaune)

Ce scénario est centré sur les apports diffus. Les impacts sont ainsi essentiellement visibles sur les concentrations de nitrates délivrés à la mer. La diminution d'azote à Poses est sensible, la concentration diminue d'1 mgN.l⁻¹ en moyenne sur l'année, allant de 6.2 mgN.l⁻¹ en hiver à 5 mgN.l⁻¹ en été (Figure 12).

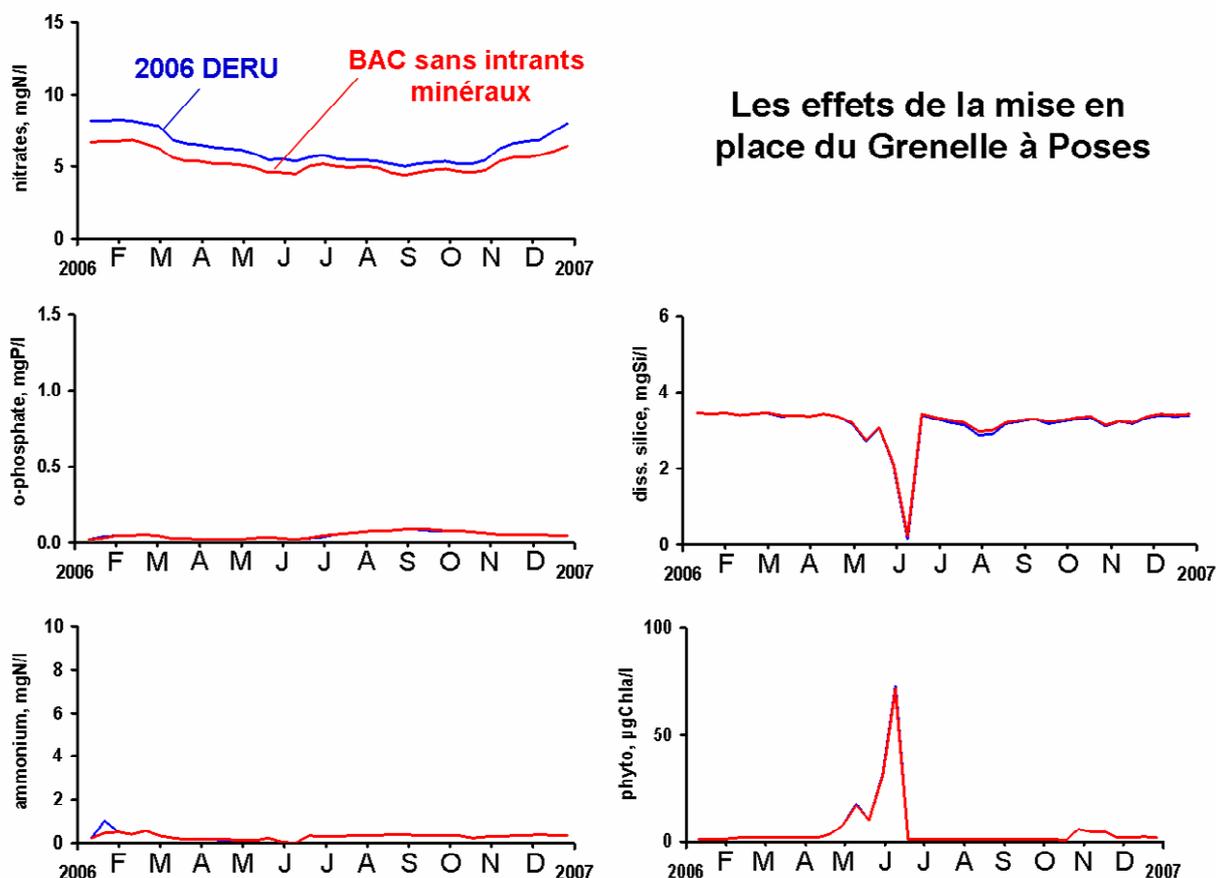


Figure 12 : Comparaison des concentrations de nutriments entre la situation « DERU » et « Grenelle »

Spatialement, la différence se fait également sentir sur les concentrations en nitrates (Figure 13). La situation tend à s'améliorer sur le tronçon de la Seine se situant entre Paris et la mer, sur l'axe Oise, le Petit Morin, et dans une large part du bassin de l'Aisne. La situation sur l'Escaut tend également à s'améliorer, notamment en Wallonie.

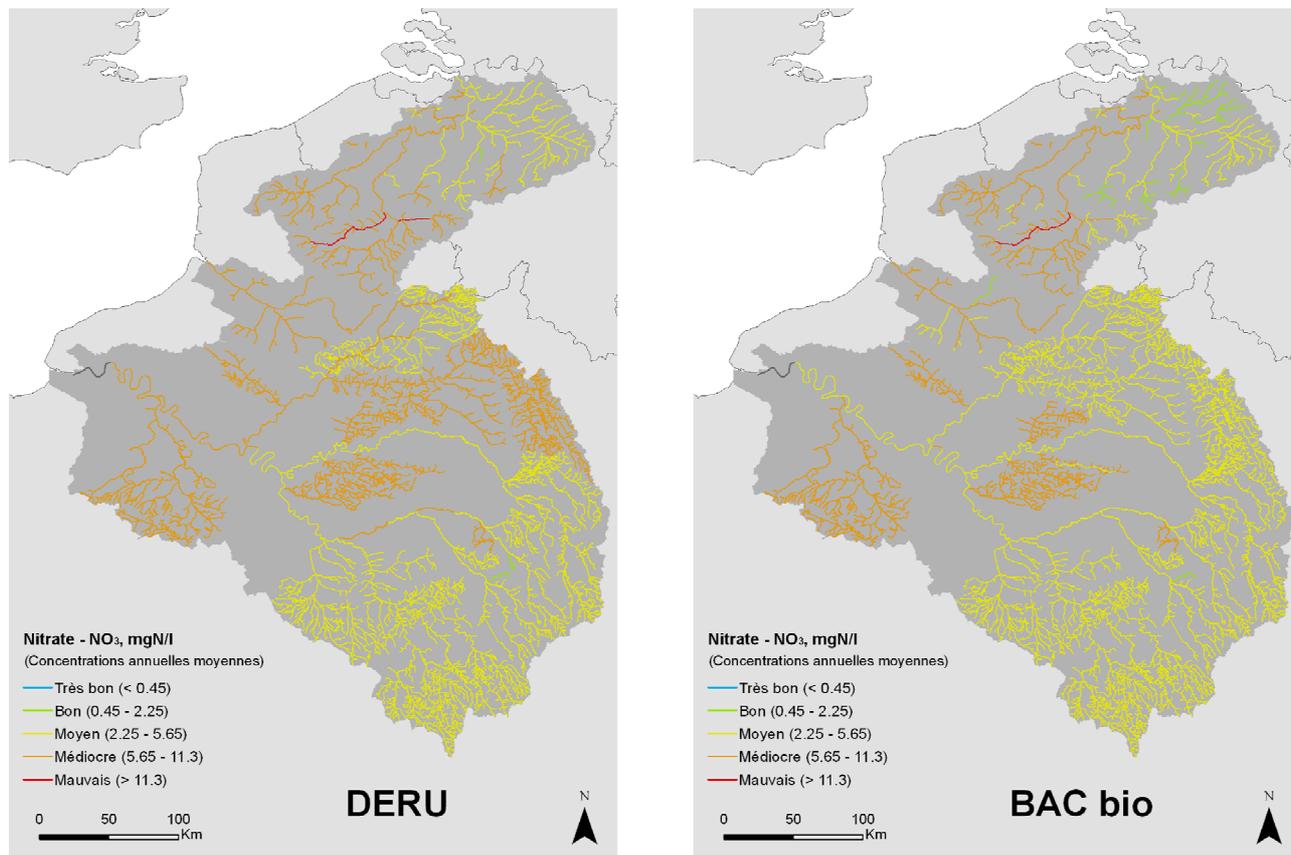


Figure 13 : Comparaison des concentrations en nitrates au sein du réseau hydrographique des trois bassins entre les situations « DERU » et « Grenelle »

7 Généralisation d'une agriculture sans intrants minéraux

Afin de pousser nos modèles au maximum et d'évaluer la réponse du système, nous avons créé un scénario dans lequel nous généralisons le passage à l'agriculture biologique à toutes les zones agricoles des trois bassins (Figure 14), comme déjà testé par Thieu et al. (2010).

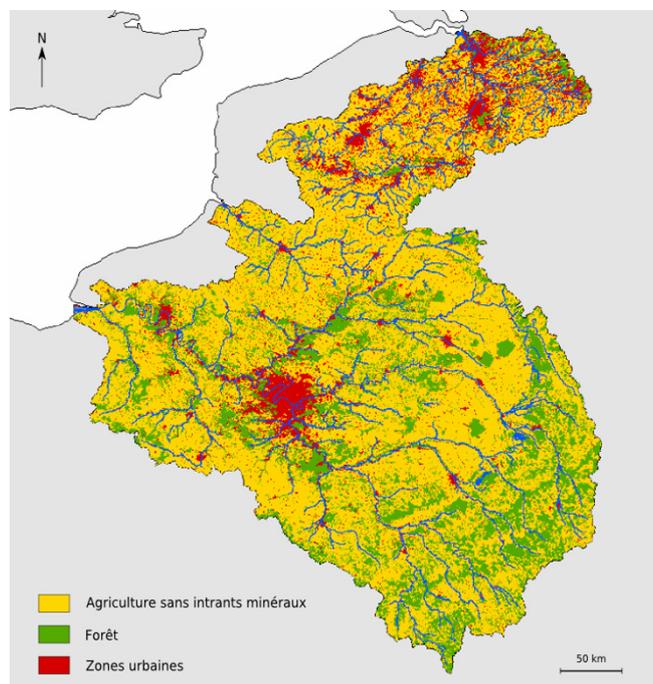


Figure 14 : Généralisation d'une agriculture sans intrants minéraux. Les zones jaunes correspondent aux zones agricoles.

Ce scénario de changement de pratiques agricoles aura une influence sur les concentrations d'azote à Poses. Nous avons vu qu'après la mise en place complète de la DERU, la concentration moyenne annuelle se situera aux alentours de 7 mgN.l^{-1} (Figure 15). Une généralisation de l'agriculture biologique nous permettrait d'atteindre 4.5 mgN.l^{-1} en moyenne annuelle et de descendre à 3 mgN.l^{-1} en période hivernale. Nous pouvons noter que ce scénario, comme les précédents, n'a pas d'influence sur le développement du phytoplancton au niveau de Poses, car les concentrations en nutriments ne seront toujours pas limitantes. Elles le seront plus en amont dans le réseau hydrographique.

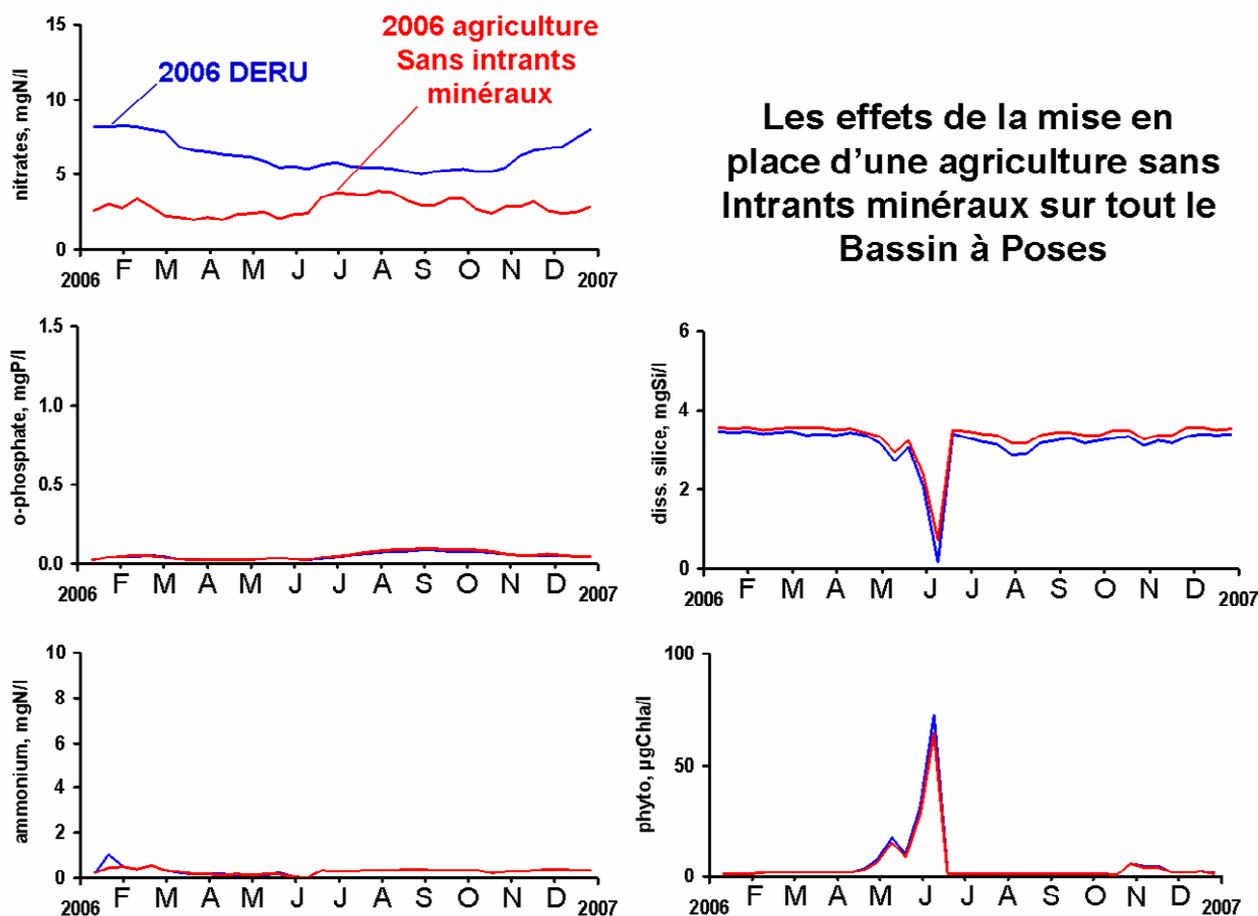


Figure 15 : Comparaison des concentrations de nutriments entre la situation « DERU » et « agriculture sans intrants minéraux »

En termes de concentrations de nitrates, les changements sont spectaculaires le long du réseau hydrographique (Figure 16). La totalité de l'amont du bassin de la Seine : le Loing, l'Yonne, l'Aube, la Marne, l'Aisne et l'Oise passeraient en classe de qualité « bonne ». Les bassins du Grand Morin, de l'Yerres et de l'Eure, ainsi que les tronçons aval de la Seine pourraient être classés en qualité « moyenne ». La quasi-totalité du bassin de la Somme deviendrait de qualité « bonne ». La partie méridionale de l'Escaut passerait à « médiocre » ou « moyen », tandis que la partie septentrionale passera de qualité moyenne à bonne.

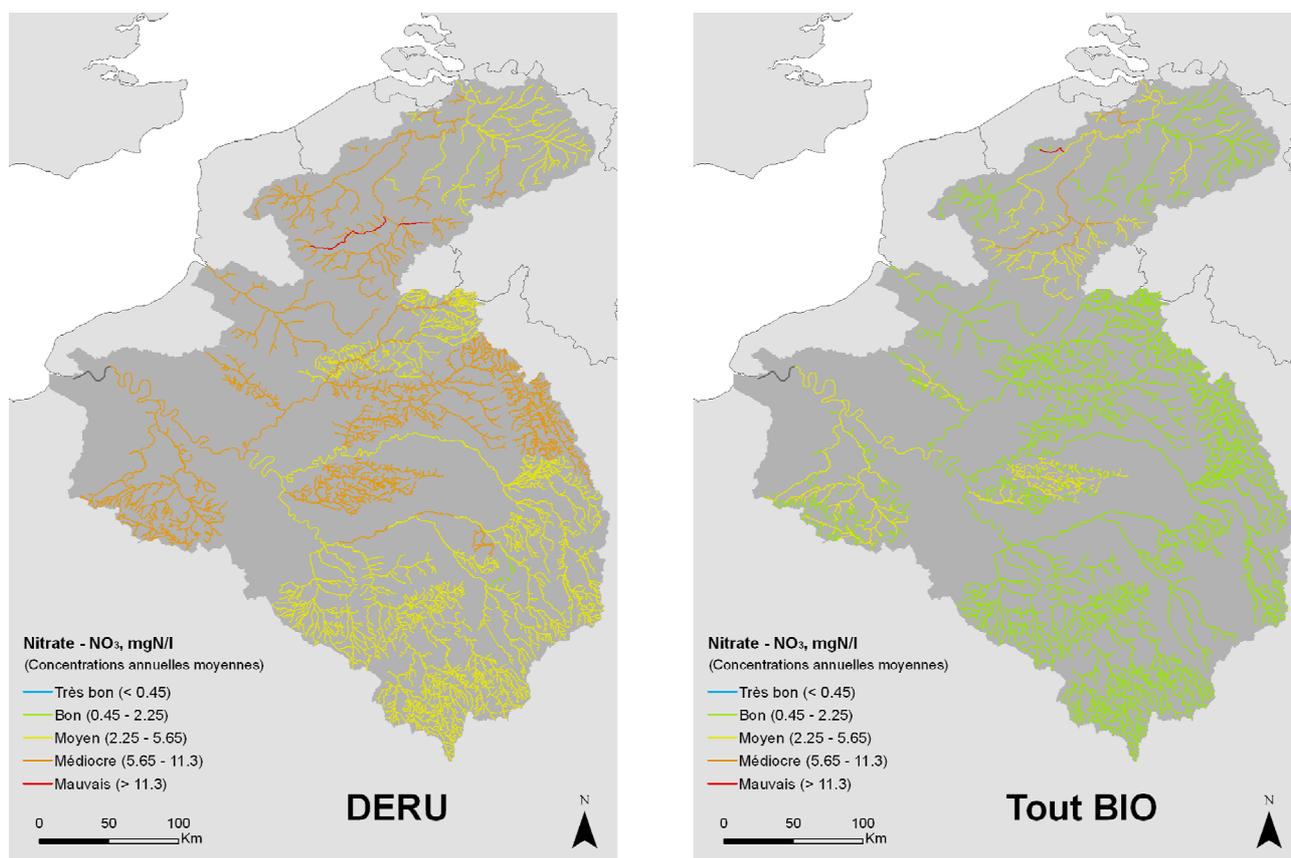


Figure 16 : Comparaison des concentrations en nitrates au sein du réseau hydrographique des trois bassins entre les situations « DERU » et « agriculture sans intrants minéraux »

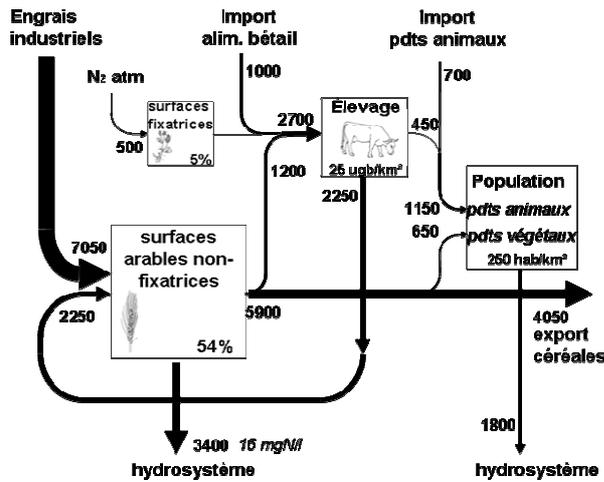
Les répercussions d'un tel scénario de conversion complète à l'agriculture biologique seraient évidemment considérables en termes de production agricole. La question qui se pose alors est de savoir si un tel scénario permet de « nourrir le monde », et plus particulièrement la population locale des trois bassins. Nous avons pour cela appliqué au territoire du bassin de la Seine, de l'Escaut et de la Somme la démarche développée par Billen et al. (2011 ce rapport) pour l'aire principale d'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne.

Remarquons tout d'abord que le système agricole actuel du territoire de nos 3 bassins est déficitaire en termes de fourniture en protéines par rapport aux besoins de la population (Figure 17a): en effet, s'il exporte des céréales, à raison de 4050 kgN/km²/an, il importe aussi des aliments pour bétail (1000 kgN/km²/an, principalement des tourteaux de soja d'Amérique latine) et des produits animaux (700 kgN/km²/an, de viande et lait). Si l'on convertit ces derniers en quantité d'azote nécessaire à leur production au rendement de conversion de l'élevage (inférieur à 20%), on voit que le système présente un déficit net de 420 kgN/km²/an.

Un scénario d'agriculture biologique sur ce territoire, respectant la double contrainte de substituer le recours aux engrais industriels par une fertilisation produite par fixation symbiotique sur les terres arables elles-mêmes, et de produire localement la nourriture du bétail, permet sans difficulté de fournir la ration végétale des habitants, laissant même un potentiel d'exportation de céréales de 500 kgN/km²/an, mais nécessite encore l'importation de produits animaux pour satisfaire la demande alimentaire des habitants (Figure 17b). Le système correspondant à ce scénario apparaît donc globalement plus déficitaire en protéines (3250 kgN/km²/an) que dans la situation actuelle.

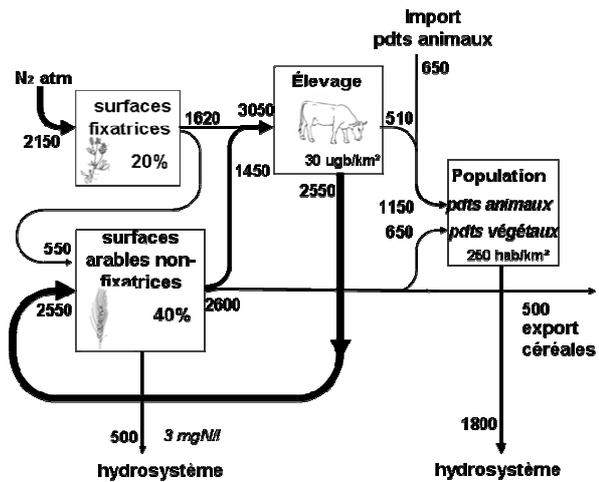
Par contre, si l'on superpose à ce scénario de passage à l'agriculture biologique une diminution de régime alimentaire de la population, conduisant à réduire de moitié la part des protéines animales dans la ration protéique totale (« régime demitarrien »), le système peut sans difficulté subvenir en interne aux besoins de sa population et présenter un solde net d'exportation de protéines de 100 kgN/km²/an (Figure 17c).

a. Situation présente (2006)
kgN/km²/an



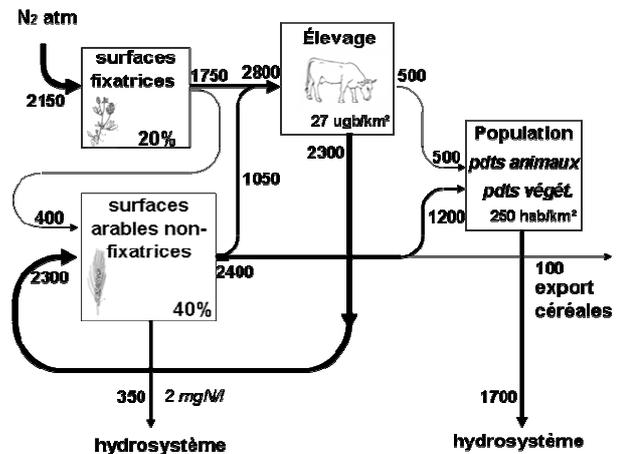
conc. NO₃ sous-racinaire: 16 mgN/l
Importation nette de protéines: 420 kgN/km²/an

b. Scénario bio-local
kgN/km²/an



conc. NO₃ sous-racinaire: 3 mgN/l
Importation nette de protéines: 3250 kgN/km²/an

c. Scénario bio-local et demitarien
kgN/km²/an



conc. NO₃ sous-racinaire: 2 mgN/l
exportation nette de protéines: 100 kgN/km²/an

Figure 17 : Bilan d'azote (en kgN/km²/an) du système agraire du territoire formé par les bassins versant de la Seine, de la Somme et de l'Escaut. a. dans la situation actuelle ; b. dans un scénario de conversion totale de l'agriculture aux pratiques de l'agriculture biologique avec la contrainte de produire localement l'alimentation du bétail ; c. dans le scénario b auquel on superpose la substitution d'une partie de la ration protéique humaine d'origine animale par des protéines végétales (régime demitarien).

8 Synthèse de l'évolution des trois bassins entre 1985, aujourd'hui et différents futurs

En 1985, la contamination en phosphore était la cause principale des problèmes d'eutrophisation tant dans le réseau hydrographique que dans les systèmes marins côtiers (Figure 18). De gros efforts ont été accomplis pour en diminuer l'ampleur, grâce au remplacement des phosphates des lessives par d'autres composés et à l'amélioration du traitement en station d'épuration des eaux usées domestiques et industrielles. Les concentrations en phosphore continuent à décroître et atteindront un minimum d'ici quelques années, lorsque la DERU aura été totalement mise en place.

La réduction des concentrations en nitrates au sein du réseau hydrographique est désormais le principal défi des politiques actuelles et futures. L'amélioration du traitement en station d'épuration au-delà des efforts déjà programmés n'aurait quasiment aucune influence sur ce nutriment. L'enjeu se situe au niveau des apports diffus, donc au niveau de l'agriculture. La solution la plus efficace serait de diminuer radicalement les intrants minéraux. Les préconisations du Grenelle de l'Environnement en matière de protection des aires d'alimentation de captages vont dans ce sens : Nous avons montré que la mise en place d'une agriculture sans intrant minéraux dans les AAC réduirait déjà sensiblement les concentrations en nitrates dans le réseau hydrographique et les apports d'azote à la Manche et à la Mer du Nord.

La généralisation des pratiques de l'agriculture biologique, ou de toute autre forme d'agriculture produisant une eau sous-racinaire de concentration inférieure à 4 mgN/l, à l'ensemble des terres agricoles des trois bassins permettrait de se rapprocher des objectifs fixés par la convention OSPAR en termes d'azote apporté à la côte. Un tel changement permettrait également de retrouver un réseau hydrographique en « bon » état.

Pour chacun de ces scénarios, il est possible de calculer l'indice de risque d'eutrophisation des eaux côtières : ICEP (Garnier et al., 2010). Un ICEP positif indique un risque d'eutrophisation et un ICEP négatif ou nul, une absence de risque. Les simulations DERU et Grenelle tendent à diminuer ce risque, mais seule la simulation « tout bio » parvient presque à l'éliminer (Figure 18).

Une autre voie d'amélioration se trouve dans la création ou la restauration de zones humides ou de retenues d'eau dans les secteurs amont du réseau hydrographique. Cet aménagement du paysage aurait un effet curatif en favorisant la dénitrification des surplus de nitrates provenant des terres arables. Cette voie est en cours d'exploration, en se basant notamment sur des archives et des corpus de cartes anciennes (Benoit et al., 2011 rapport PIREN) ainsi que sur l'analyse du fonctionnement de dispositifs existant de zones humides construites (Tournebize et al., 2011 rapport PIREN).

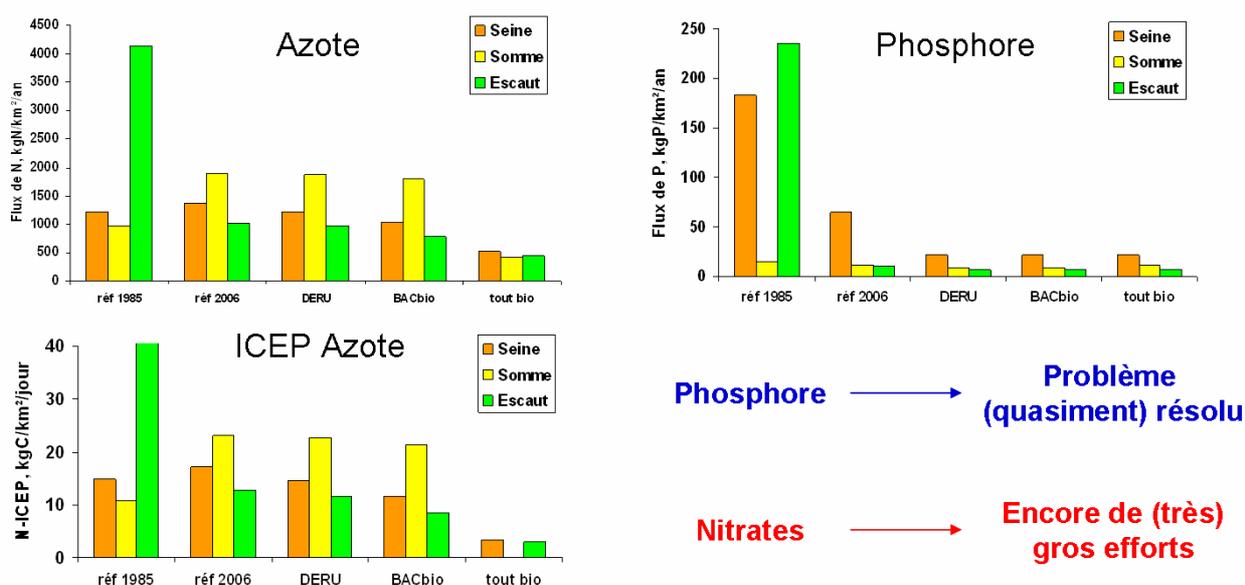


Figure 18 : Synthèse des différents scénarios en termes d'azote et de phosphore délivrés à la mer

9 Références

- Ahmed S., Amin R., Gladkova I, Gilerson A., “Characterizing bio-optical and ecological features of algal bloom waters for detection and tracking from space,” *Ocean Sensing and Monitoring II* 7678 (2010)
- Billen G, Garnier J. River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non siliceous algae. *Marine Chemistry*. (2007) 106: 148-160
- Billen G, Garnier J, Nemery J, Sebilo M, Sferratore A, Benoit P, Barles S, Benoit M., A long term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *The Science of the Total Environment* (2007) 275: 80-97
- Billen G., Thieu V., Garnier J., Silvestre M., “Modelling the N cascade in regional watersheds: The case study of the Seine, Somme and Scheldt rivers,” *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133, n°. 3 (Octobre 2009): 234-246.
- Cugier P., Billen G., Guillaud J.F., Garnier J., Ménesguen A., “Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading,” *Journal of Hydrology* 304, n°. 1 (Mars 10, 2005): 381-396.
- Garnier J., Billen G., Hannon E., Fonbonne S., Videnina Y., Soulie M., “Modelling the transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube River,” *Estuarine Coastal and Shelf Science* 54, n°. 3 (Mars 2002): 285-308.
- Garnier J., Beusen A., Thieu V., Billen G., Bouwman L., “N:P:Si nutrient export ratios and ecological consequences in coastal seas evaluated by the ICEP approach,” *Global Biogeochemical Cycles* 24 (Avril 23, 2010): 12 PP.
- Kim T., Sheng Y., Park K., “Modeling water quality and hypoxia dynamics in Upper Charlotte Harbor, Florida, U.S.A. during 2000,” *Estuarine Coastal and Shelf Science* 90, n°. 4 (Décembre 30, 2010): 250-263.
- Lancelot C., Spitz Y., Gypens N., Ruddick K., Becquevort S., Rousseau V., Lacroix G., Billen G., “Modelling diatom and Phaeocystis blooms and nutrient cycles in the Southern Bight of the North Sea: the MIRO model,” *Marine Ecology-Progress Series* 289 (2005): 63-78.
- Lancelot C., Gypens N., Billen G., Garnier J., Roubeix V., “Testing an integrated river-ocean mathematical tool for linking marine eutrophication to land use: The Phaeocystis-dominated Belgian coastal zone (Southern North Sea) over the past 50 years,” *Journal of Marine Systems* 64, n°. 1 (Janvier 2007): 216-228.
- Ludsin S., Zhang X., Brandt S., Roman, R., Boicourt W., Mason D., Costantini M., “Hypoxia-avoidance by planktivorous fish in Chesapeake Bay: Implications for food web interactions and fish recruitment,” *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* (Décembre 1, 2009): S121-S131.
- Ruelland D., Billen G., Brunstein D., Garnier J., “SENEQUE: A multi-scaling GIS interface to the Riverstrahler model of the biogeochemical functioning of river systems,” *Science of The Total Environment* 375, n°. 1 (Avril 1, 2007): 257-273.
- Thieu V., Garnier J., Billen G., “Assessing the effect of nutrient mitigation measures in the watersheds of the Southern Bight of the North Sea,” *Science of The Total Environment* 408, n°. 6 (Février 15, 2010): 1245-1255.
- Zhang Y., Wang Y., Wang Y., Xi H., “Investigating the Impacts of Landuse-landcover (LULC) Change in the Pearl River Delta Region on Water Quality in the Pearl River Estuary and Hong Kong’s Coast,” *Remote Sensing* 1, n°. 4 (11, 2009): 1055-1064.