

Cycle de l'azote pour un scénario hypothétique d'agriculture intégrée, généralisée aux bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut

Vincent Thieu¹, Gilles Billen¹, Josette Garnier¹ and Marc Benoit²

¹ UMR 7619 Sisyphe, CNRS/UPMC, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

² UR 055 INRA SAD ASTER, 662 av L. Buffet, 88500 Mirecourt, France

* personne à contacter : Gilles.Billen@upmc.fr

1 Introduction

Au cours des 50 dernières années, le développement de l'agriculture moderne dans les pays industrialisés a considérablement affecté la qualité des ressources en eau, au point de compromettre la capacité des territoires ruraux à produire une eau potable de qualité.

Par rapport aux premiers systèmes agricoles traditionnels du nord-ouest de l'Europe, les agro-systèmes modernes sont caractérisés par le découplage entre production agricole et élevage. Dans les zones d'agriculture intensive, le lessivage des engrais minéraux et des herbicides a entraîné la contamination des eaux souterraines et de surface, alors que le fumier produit en excès dans les zones d'élevage intensif a conduit à des excédents considérables d'azote et de phosphore dans le sol, qui entraînent également la contamination de l'eau. Une fois transportés vers les zones marines, les nutriments soutiennent le développement d'efflorescences d'algues provoquant anoxie et mortalités piscicole (Camargo et Alonso, 2006; Diaz et Rosenberg, 2008). Un déséquilibre des proportions d'azote et de phosphore par rapport à la silice atteignant les zones côtières crée de plus un changement dans la composition taxonomique du phytoplancton, favorisant la dominance d'espèces indésirables non siliceuses par rapport aux diatomées.

Les trois bassins versants adjacents de la Seine, la Somme et l'Escaut offrent des exemples illustratifs de telles situations. Le bassin de la Seine (202 hab / km²) se caractérise notamment par une augmentation des terres cultivables au détriment des prairies (Mignolet et al., 2007), tandis que les zones de polyculture-élevage n'existent plus qu'aux lisières orientale et occidentale du bassin.

Les modifications des exportations en éléments nutritifs, en réponse aux activités humaines dans ces bassins au cours des 50 dernières années, sont caractérisées par des trajectoires différentes pour l'azote et le phosphore. Alors que le phosphore a récemment entamé un déclin rapide (Billen et al., 2001; 2007; 2005), le développement d'une agriculture industrialisée a augmenté la quantité d'azote aux zones côtières (Billen et al. 2001) ou au mieux les flux se sont maintenus à un niveau élevé (Billen et al., 2005), incompatible avec un approvisionnement en eau potable de bonne qualité (Ledoux et al., 2007).

Un travail récent de modélisation de ces trois bassins versants a montré que la contamination des phosphates a été considérablement diminuée par une amélioration continue du traitement du P dans les eaux usées (Thieu et al., 2010). Par ailleurs les bilans d'azote dans les trois bassins (Thieu et al., 2009) a mis en évidence la faible contribution azotée des effluents urbains par rapports aux sources agricoles diffuses qui deviennent alors une cible principale à viser pour diminuer les émissions d'azote. Pourtant, l'application de bonnes pratiques agricoles préconisées par la politique agricole commune (introduction de cultures intermédiaires, réduction de la fertilisation, extensification de l'élevage bovin, etc.), n'apparaît pas suffisante pour satisfaire aux exigences de la réglementation européenne des points de vues de la contamination en azote des eaux de surface et souterraines (directive 2000/60/CE, 2000; Thieu et al., 2010) et des rapports N: P hivernaux (OSPAR, 2005). De plus, le délai de réponse des eaux souterraines à des changements de pratiques agricoles complique l'évaluation des mesures à court terme de la diminution des teneurs en nitrate. Les travaux de Ledoux et al. (2007), ont mis en évidence qu'il serait nécessaire de stopper les apports de fertilisants synthétiques 'azote pour réduire considérablement les concentrations en nitrate à l'horizon 2050, alors que la mise en oeuvre de bonnes pratiques agricoles ne pourraient que les stabiliser à leur niveau actuel.

Afin de poursuivre l'exploration du modèle, nous avons élaboré un scénario plus radical, tendant vers une agriculture sans fertilisation chimique dans les trois bassins.

Un tel scénario n'est sans doute pas réaliste sur le plan économique et politique actuellement, mais il existe toutefois une demande croissante de produits alimentaires biologiques par la population d'Europe occidentale (Bonny, 2006). Notre objectif ici est simplement d'évaluer le potentiel d'un changement drastique de l'agriculture, en se basant sur sa capacité à nourrir les populations locales, mais aussi à répondre aux exigences de la réglementation en termes de qualité d'eau douce et santé des écosystèmes côtiers.

2 Flux d'azote dans les bassins et construction du scénario de réduction

2.1 Contraintes agronomiques

La mise en œuvre détaillée des techniques d'agriculture biologique peut varier considérablement d'une région à l'autre, dans la mesure où l'essence même de cette agriculture alternative est de s'adapter aux conditions locales par le choix des variétés de plantes les plus appropriées, et de rotations culturales complexes. Notre scénario idéalisé considère que toutes les surfaces actuellement consacrées à l'agriculture (terres labourables et des prairies) dans les trois bassins sont converties aux pratiques de l'agriculture biologique sans modification de la superficie agricole totale ni de la population humaine. Le scénario implique que les seules sources de fertilisation pour les terres arables sont (i) la fixation d'azote par les légumineuses insérées dans les rotations avec des cultures de céréales et (ii) le fumier animal produit par le bétail nourri d'herbe produite localement ou de cultures fourragères (voir figure 1). Aucune importation d'aliments pour bétail n'est autorisée.

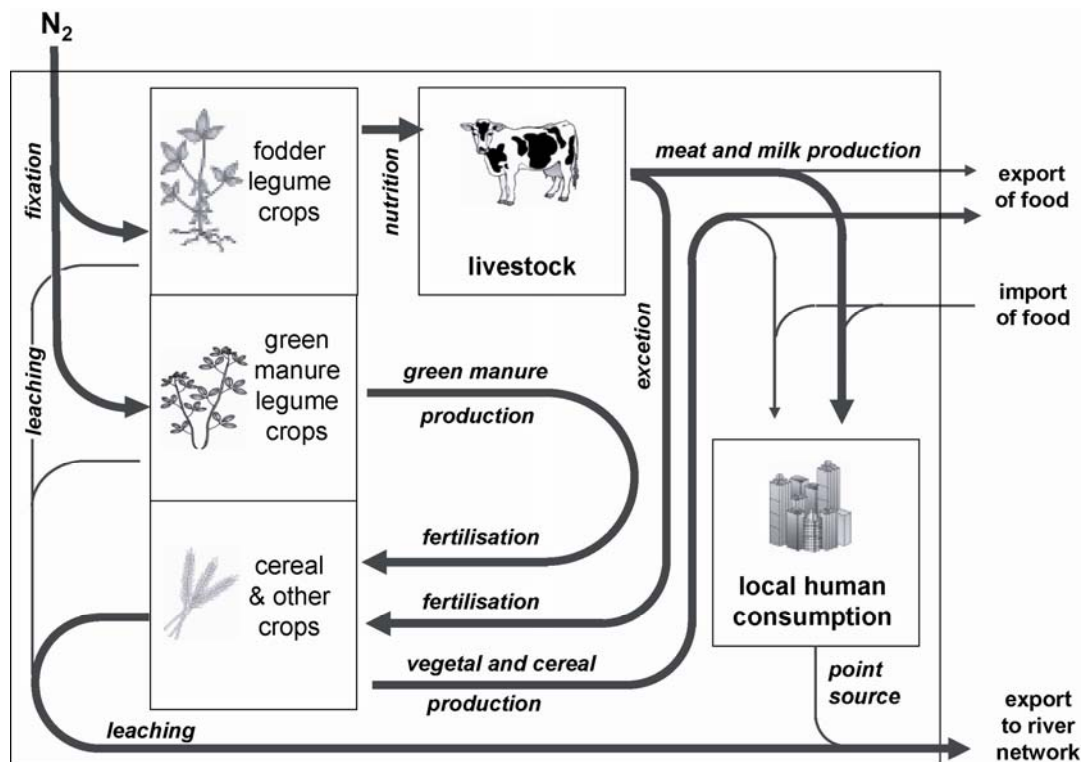


Figure 1. Principe de fonctionnement du système agricole 'biologique' dans les bassins versants.

Compte tenu de ces principes, il est possible de calculer, la part de superficie agricole qui doit être consacrée à la production fourragère pour chaque densité de bétail (en UGB/km²), en tenant compte de ce que la

consommation du bétail représente la somme de son excréation (82 kgN / UGB / an) et de sa production de viande et lait (17 kgN / UGB / an) et en utilisant un rendement moyen de 110 kg N / ha / an pour la production des cultures fourragères (ces chiffres correspondent à la valeur moyenne observée actuellement dans les trois bassins, sur basé sur les statistiques officielles de l'agriculture (Agreste, 2000; NEI, 2000)). La superficie consacrée à la culture des céréales est alors calculé en admettant qu'une certaine proportion de la superficie agricole qui n'est pas consacrée à des cultures fourragères est utilisée pour la production d'engrais vert fixateur d'azote pour la fertilisation des cultures céréalières. Théoriquement, cette proportion peut varier de 0 à 50%, cette dernière valeur correspondant à une rotation bi-annuelle. La fertilisation azotée totale des cultures céréalières est alors calculée comme la somme des déjections animales produites et de l'engrais vert disponible. La production céréalière est alors estimée en utilisant la relation entre le rendement et la fertilisation totale observée dans les trois bassins dans les situations présentes et passées (figure 2).

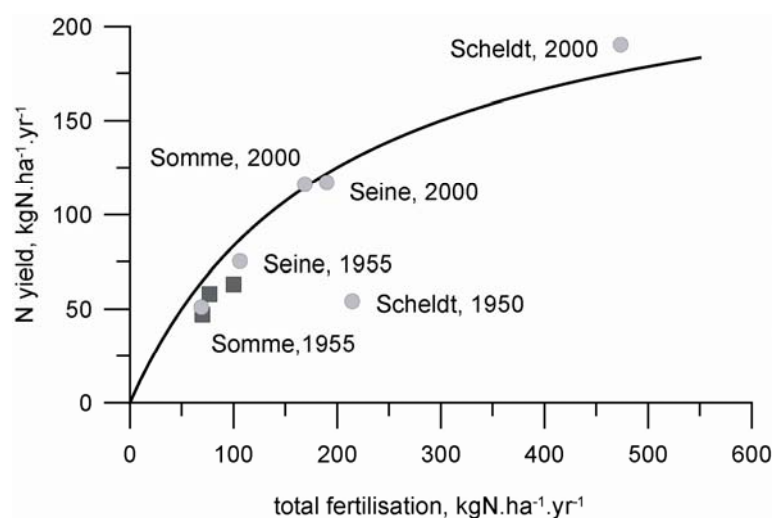


Figure 2. Relation observée entre le rendement céréalier moyen et la fertilisation azotée totale (synthétique et organique) dans les trois bassins en 2000 et 1955 (cercles gris, calculé à partir des statistiques agricoles belges et françaises). Les rendements moyens déclarés par les exploitations biologiques de la région Centre (Glachant 2009) sont également indiquées pour comparaison (carrés gris foncé).

Cette procédure de calcul suppose implicitement que les techniques d'agriculture biologique ont des rendements similaires à l'agriculture conventionnelle, à niveau égal de fertilisation. Un certain nombre d'études ont comparé le rendement de l'agriculture biologique et conventionnelle pour différentes cultures sous même contexte pédo-climatique dans les pays industrialisés (Badgley et al., 2007; Stanhill, 1990): elles concluent que l'agriculture biologique présente en moyenne des rendements inférieurs d'environ 10% à ceux de l'agriculture conventionnelle. Cela peut s'expliquer par une fertilisation plus faible, ainsi que par un contrôle moins efficace des ravageurs et des adventices. Des données détaillées disponibles pour les exploitations biologiques de la région Centre (Glachant, 2009) montrent une relation rendement-fertilisation très similaire à celle observée pour l'agriculture conventionnelle dans nos trois bassins (Figure 2), ce qui confirme le bien fondé de notre hypothèse.

Les figures 3a et 3b montrent le rendement céréalier théorique et la production céréalière totale calculés pour les trois bassins en fonction de la densité de bétail, pour 3 valeurs de la proportion de surface non fourragère consacrée à la production d'engrais vert. Avec l'augmentation de la densité du cheptel, le rendement des céréales augmente rapidement, tant parce que la quantité de déjections animales s'accroît que parce que cette quantité est répartie sur une surface céréalière décroissante. Cette décroissance de la surface céréalière avec l'augmentation du cheptel explique aussi pourquoi la production totale de céréales diminue après avoir atteint un maximum. Par comparaison, le rendement des céréales effectivement observés dans les systèmes d'agriculture biologique en France et en Belgique varie entre 45 et 100 kg N / ha / an (FranceAgriMer, 2009; Glachant, 2009), restreignant ainsi probablement la partie réaliste des graphiques de la figure 3a à la moitié

inférieure de la fourchette de densité de cheptel.

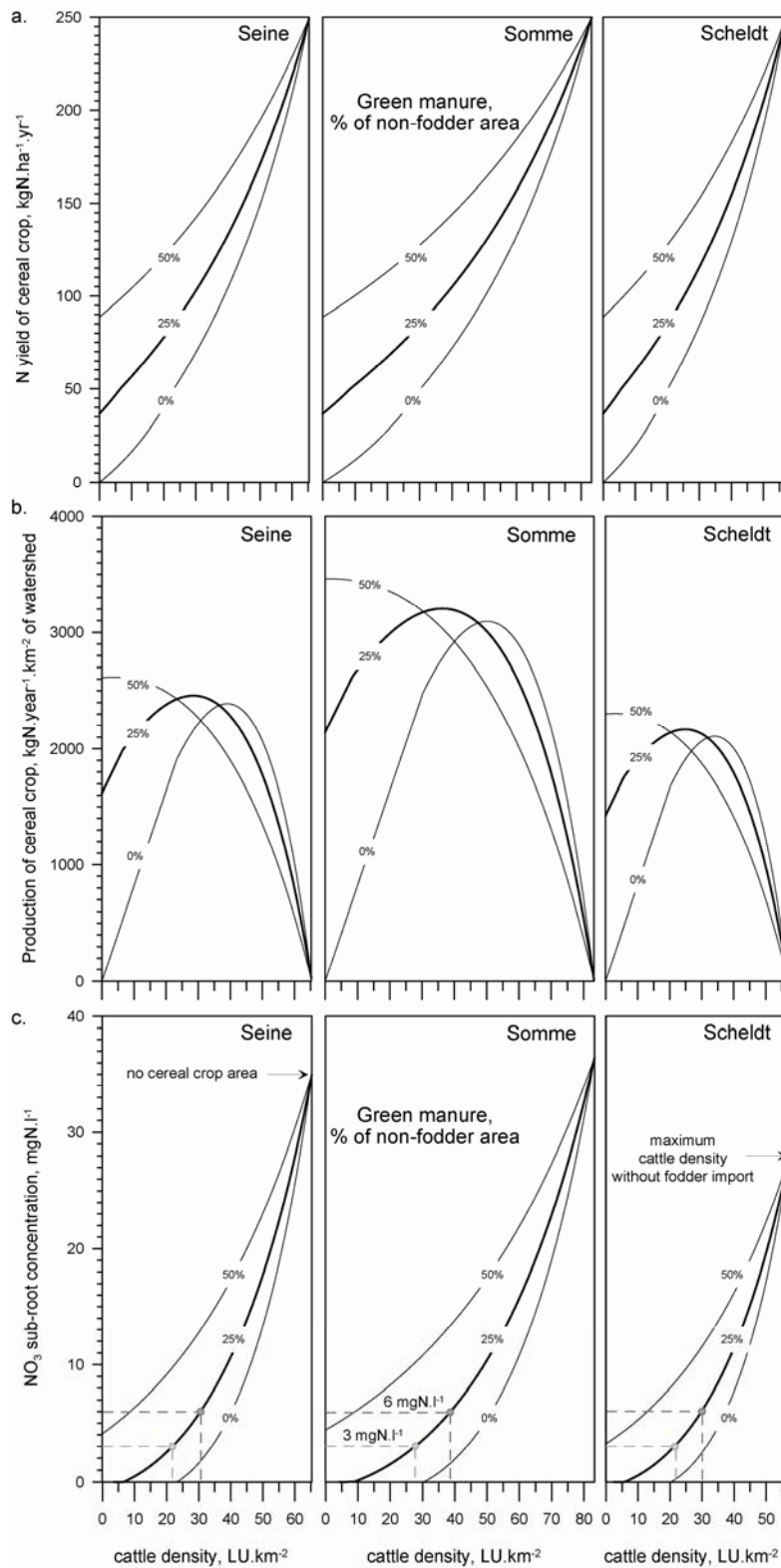


Figure 3. Rendement des cultures céréalières (a), de la production de cultures de céréales (b) et concentration sous-racinaire en nitrate en fonction de la fertilisation organique, représentée ici par la densité du bétail (fumier) et la proportion de surface non-fourragère consacrée aux cultures de légumineuses (engrais vert), sans modification de la superficie agricole totale des bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut.

2.2 Composition de l'eau sous-racinaire

Pour évaluer les émissions diffuses d'azote de l'agriculture biologique, nous avons examiné les données rapportées dans la littérature concernant les concentrations d'azote dans les eaux de surface ou sous-racinaires produites par des exploitations biologiques.

Drinkwater et al. (1998) ont montré que la substitution d'engrais de synthèse, par du fumier animal ou de l'engrais vert, dans des rotations maïs-soja au N-E des USA réduit le lessivage des nitrates de 30% et accroît le pool de matière organique du sol. En Bavière, sous sols limoneux drainés, Honish et al. (2002) ont rapporté des concentrations sous-racinaires de nitrate de 4.5 à 6.5 mgN / l dans une zone exploitée en agriculture biologique, tandis que des concentrations deux fois plus élevées ont été trouvées sous agriculture conventionnelle. Korsæth et Eltun (2000) a comparé les pratiques de l'agriculture conventionnelle et écologique dans le centre-sud-est de la Norvège, pour des rotations complexes alternant betteraves, céréales et prairies. Les fuites d'azote par drainage ont été réduite de 30-35 à 20-21 kg N / ha / an, avec des concentrations moyennes de nitrates dans la gamme 4-6 mgN / l pour l'agriculture biologique. Hansen et al. (2000) a utilisé une approche de modélisation pour évaluer le lessivage de l'azote à partir de différents systèmes d'élevage biologique (y compris les cultures arables, l'élevage porcin, bovin et laitier) au Danemark à la fois sur sols limoneux et sablonneux. Le calcul de la concentration moyenne de nitrates sous la zone racinaire varie dans la gamme de 7.7-14 mgN / l pour les sols sableux et 5.5-8.6 mgN / l pour les sols limoneux. Pour l'ensemble du domaine expérimental INRA de Mirecourt (à l'est du bassin parisien, France), qui a été reconverti en agriculture biologique depuis 1994, Benoît et Larramendy (2003) ont calculé la concentration moyenne de nitrates des eaux drainées, sur base de mesures en bougies poreuses, à 5.5-6.5 mgN / l ; ils mentionnent qu'environ la moitié des pertes d'azote sont causées par le retournement des prairies temporaires de luzerne utilisé dans les rotations comme précédent des céréales.

Toutes ces données convergent vers une gamme de 3-6 mgN / l comme valeur raisonnable de la concentration moyenne des nitrates dans l'eau de surface produite par l'agriculture biologique. Cette gamme sera utilisée dans notre scénario pour définir les sources diffuses de nitrates. Il est intéressant de remarquer que c'est exactement la gamme (3.4-5.8 mgN/l) mesurée par Sabatier (1890) pour les systèmes agricoles du bassin de Paris à la fin du XIXe siècle.

Pour faire le lien avec les contraintes agronomiques discutées dans la section précédente, nous avons calculé les pertes d'azote provenant des terres arables comme l'excédent de fertilisation des cultures par rapport à la leur production agricole, et nous avons converti cet excédent en concentration de nitrates en considérant les valeurs moyennes annuelles de ruissellement des bassins versants respectifs, à savoir 260 mm pour la Seine, 240 mm pour la Somme et de 330 mm pour l'Escaut (Thieu et al., 2009). Pour les pâturages et les parcelles d'engrais vert, une perte d'azote moyenne de 5 kg N / ha a été prise en considération. Les concentrations en nitrates sous-racinaires moyennes résultant de ces calculs sont présentées dans la figure 3c en fonction de la densité du cheptel pour les trois bassins. En fixant la proportion de terres arables consacrées à la production d'engrais verts à 25%, la gamme de 3 à 6 mgN / l évoquée plus haut pour ces concentrations définit une gamme de densités de bétail compatible avec une qualité des eaux acceptable à 22-30, 27-39 et 21 -29 UGB / km² pour la Seine, la Somme et de l'Escaut, respectivement.

Quant à la concentration des eaux souterraines, nous supposons dans ce scénario idéalisé que les aquifères ont atteint l'équilibre avec le sous-concentration de l'eau s'infiltrer dans la racine. En tant que tel, l'équilibre peut exiger aussi longtemps que 50 ans, notre scénario représente donc l'effet à long terme des pratiques agricoles biologiques. Le maintien même de nitrate riverains (exprimée en pourcentage du flux de nitrates émis par le bassin versant) est supposé être le même que dans le scénario de référence (et al Thieu. 2009). Le scénario considéré ici utilise les mêmes contraintes hydrologiques dans cette dernière étude, à savoir celles d'un sol mouillé, une moyenne et une année sèche (2001, 2000 et 1996, respectivement). Les sources ponctuelles de nutriments (apports d'eaux usées urbaines) correspondent aux scénarios définis à l'al Thieu. (2010) avec 90% de P et l'enlèvement de 70% de démnagements N dans toutes les usines de traitement des eaux usées avec une capacité plus de 20.000 équivalents habitants.

Les données sur le rôle des pratiques de l'agriculture biologique sur les émissions d'autres éléments nutritifs (phosphore, silice) et les matières en suspension sont trop rares pour soutenir toute hypothèse sur un changement par rapport à la situation actuellement observée, de sorte que nous avons assumé le même pour

les sources diffuses ces nutriments que ceux examinés par al Thieu. (2009).

2.3 Autres contraintes pour le scénario agriculture biologique

En ce qui concerne la concentration des eaux souterraines, nous supposons dans ce scénario idéalisé que les aquifères ont atteint l'équilibre avec les concentrations sous-racinaires infiltrées. Un tel équilibre peut nécessiter plusieurs décennies, de sorte que notre scénario représente l'effet à long terme des pratiques agricoles biologiques.

La rétention riparienne des nitrates (exprimée en pourcentage du flux de nitrates émis par le bassin versant) est supposée être la même que dans le scénario de référence (Thieu et al. 2009). Le scénario considéré ici utilise les mêmes contraintes hydrologiques que dans cette dernière étude, à savoir celles d'une année humide d'une année moyenne et d'une année sèche (2001, 2000 et 1996, respectivement). Les sources ponctuelles de nutriments (apports d'eaux usées urbaines) correspondent aux scénarios définis par Thieu et al. (2010) avec un abattement de 90% du phosphore et de 70% de l'azote dans toutes les stations d'épuration de capacité supérieure à 20.000 équivalents habitants.

Les données relatives au rôle des pratiques d'agriculture biologique sur les émissions d'autres éléments nutritifs (phosphore, silice) et des matières en suspension sont trop rares pour soutenir toute hypothèse sur un changement par rapport à la situation actuellement observée, de sorte que nous avons fait l'hypothèse que les sources diffuses de ces nutriments restent identiques à celles du scénario de référence Thieu et al. (2009).

3 Résultats

Les résultats de ce scénario d'agriculture biologique généralisée seront comparés avec ceux présentés précédemment par Thieu et al. (2010) qui comprennent i) un scénario pristine, (ii) un scénario de référence (2000), (iii) un scénario avec une amélioration du traitement des eaux usées en stations d'épuration et l'application de bonnes pratiques agricoles, mais aussi (iv) un scénario « business-as-usual » résultant du traitement des eaux usées avec la poursuite des pratiques agricoles actuelles qui implique la poursuite de l'accroissement des concentrations en nitrate des eaux souterraines jusqu'à atteindre un équilibre avec les eaux sous-racinaires (Ledoux et al., 2007).

3.1 Réduction de l'écart entre autotrophie et hétérotrophie dans le bassin

Le scénario d'agriculture biologique envisagé conduit à une réduction significative de la production agricole dans les bassins Seine et la Somme, avec une augmentation simultanée de la densité de bétail et de son caractère hétérotrophe (*Tableau 1*).

Le bassin hydrographique de la Seine devient presque équilibré en termes d'autotrophie (A) et hétérotrophie (H), avec seulement une exportation relativement faible de produits agricoles, allant de 1310 à 1350 kgN / km² / an, respectivement, pour les concentrations sous-racinaires de 3 et 6 mgN / l, respectivement. Le bassin versant de la Somme peut exporter une partie encore plus importante de sa production agricole (de 2390 à 2650 kgN / km² / an). Dans le bassin de l'Escaut, la production agricole reste à peu près identique, mais la densité d'élevage est fortement diminuée (de 70 UGB / km² pour l'agriculture conventionnelle actuelle à moins de 30 UGB / km² dans ce scénario). Toutefois, en raison de sa forte densité de population, l'Escaut reste un bassin hétérotrophe, avec une importation d'environ 570 kg N / km² / an pour l'alimentation humaine et animale. Les tendances de ce scénario sont représentées dans un diagramme AH (*Figure 2*), qui montre aussi les trajectoires historiques des trois bassins. Ce scénario montre une inversion des tendances observées au cours des 30-50 dernières années, et le retour vers un meilleur équilibre entre autotrophie et hétérotrophie.

En plus de l'équilibre autotrophie/hétérotrophie, il est intéressant d'examiner les besoins de la population en termes de protéines animales et végétales. En France et en Belgique, la consommation en protéines est estimée à 15 gN/hab/ jour, dont environ 65% proviennent de produits animaux (viande, lait et œufs)

(FAOSTAT, 2006). Les productions animales et de céréales issues de ce scénario ne peuvent plus satisfaire ces consommations. Si la production des céréales diminue en moyenned'un facteur 3 par rapport à la situation actuelle, cette production reste en excès par rapport aux besoins de la population locale (

Tableau 2).

Tableau 1. Estimation de l'autotrophie et hétérotrophie des trois bassins dans le scénario type « agriculture biologique » de la superficie agricole actuelle. Les chiffres correspondants pour la situation actuelle (Billen et al., 2009) sont indiqués en comparaison.

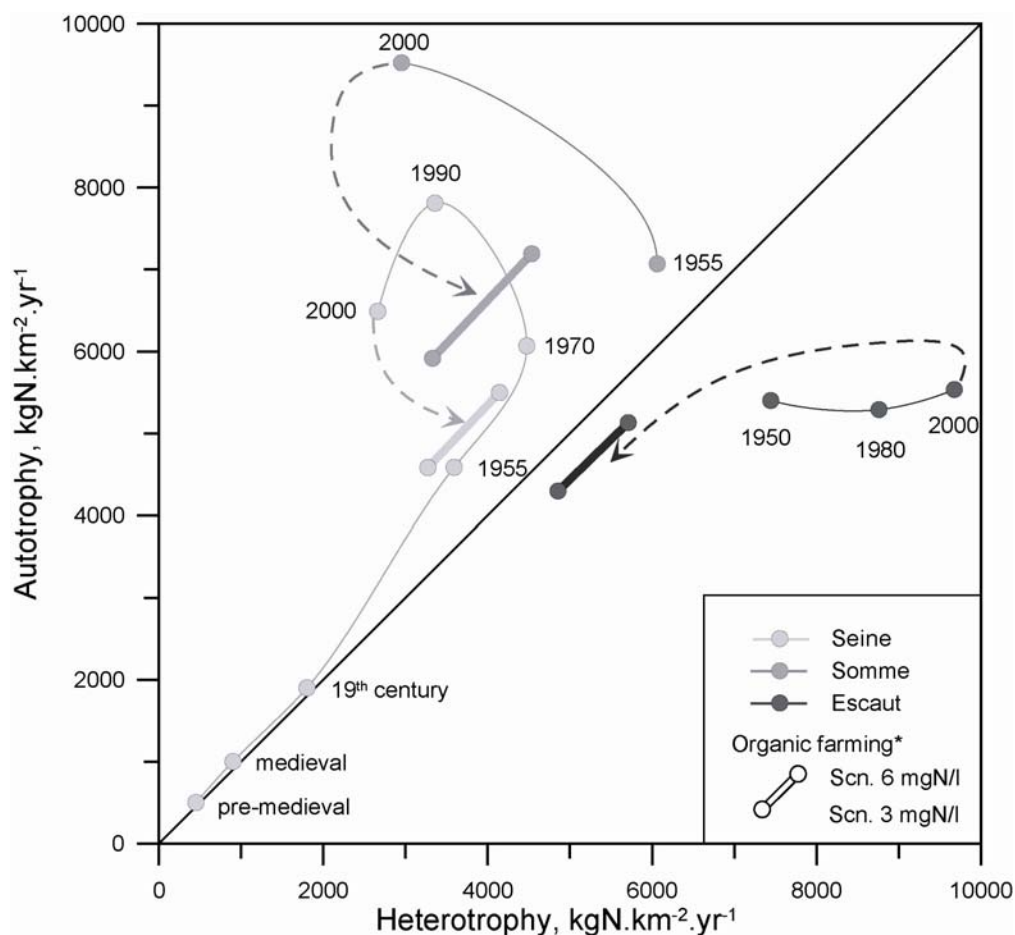
	Seine	Somme	Escaut
Surface totale, km ²	76370	6190	19860
Surface agricultural, km ²	50487	5237	13039
Densité de population humaine, hab./km ²	202	101	496
Situation actuelle (Billen et al., 2009)			
Autotrophie, kgN/km ² /yr	6855	10500	5355
Cheptel, UGB/km ²	15.6	23.3	69.2
Heterotrophie, kgN/km ² /yr	2561	2591	9697
Potential d'exportation (A-H), kgN/km ² /yr	4294	7909	-4342
Scénario d'AB généralisé (6 mgN/l)			
Autotrophie, kgN/km ² /yr	5498	7193	5131
Cheptel, UGB/km ²	30.5	38.8	29.8
Heterotrophie, kgN/km ² /yr	4144	4536	5710
Potentiel d'exportation (A-H), kgN/km ² /yr	1354	2658	-579
Scénario d'AB généralisé (3 mgN/l)			
Autotrophie, kgN/km ² /yr	4583	5915	4296
Cheptel, UGB/km ²	21.75	27	21.25
Heterotrophie, kgN/km ² /yr	3272	3328	4854
Potentiel d'exportation (A-H), kgN/km ² /yr	1311	2588	-559

Tableau 2. Production et consommation par la population dans les trois bassins pour le scénario « agriculture biologique ». Les chiffres correspondants à la situation actuelle (tels qu'ils ressortent des statistiques agricoles) sont indiqués en comparaison

	Seine		Somme		Scheldt	
	Needs	Prod. (% needs)	Needs	Prod. (% needs)	Needs	Prod. (% needs)
Present situation						
Céréales (+fruits, lég.), kgN/km ² /an	387	6189 (1676%)	194	9524 (4921%)	950	5535 (582%)
Viande et lait, kgN/km ² /an	719	267 (37%)	359	484 (135%)	1765	1189 (67%)
Generalised OA (6 mgN/l)						
Céréales (+fruits, lég.), kgN/km ² /an	387	2460 (636%)	194	3211 (1659%)	950	2137 (225%)
Viande et lait, kgN/km ² /an	719	522 (73%)	359	804 (224%)	1765	512 (29%)
Generalised OA (3 mgN/l)						
Céréales (+fruits, lég.), kgN/km ² /an	387	2417 (624%)	194	3141 (1623%)	950	2157 (227%)

Viande et lait, kgN/km²/an 719 372 (52%) 359 560 (156%) 1765 365 (21%)

En ce qui concerne les produits animaux, le système agricole actuel ne couvre pas la demande des populations locales pour la viande et le lait (sauf pour la Somme), actuellement en partie importés. Si ce scénario améliore légèrement l'autosuffisance du point de vue des produits d'origine animale dans le bassin de la Seine (52-73% par rapport à la valeur actuelle 37%), pour le bassin de l'Escaut l'autosuffisance en viande et en lait diminue (21-29% pour le scénario testé contre un niveau actuel de 67%)



* 25% of non fodder area devoted to green manure production

Figure 2. Autotrophie et hétérotrophie des trois bassins dans l'hypothèse d'une transition générale vers l'agriculture biologique (voir tableau 1) par rapport aux situations actuelles et historiques (Billen et al., 2009).

3.2 Amélioration de la qualité du réseau hydrographique

L'amélioration du traitement des eaux urbaines résiduaires dans la Seine, la Somme et les bassins de l'Escaut a un effet beaucoup plus important sur la restauration de la qualité du phosphore que sur l'azote en raison du rôle dominant de sources diffuses dans la charge d'azote total (Thieu et al., 2010). Les résultats à court terme de l'application des bonnes pratiques agricoles contribueraient à une diminution des flux d'azote dans les eaux de ruissellement de 32%, 40% et 35%, respectivement, pour la Seine, la Somme et l'Escaut par rapport au scénario de référence (Thieu et al., 2010). Dans le scénario théorique de type «agriculture biologique» cette réduction atteindrait à court terme 54-73%, 63-78% et 49-70% pour les trois bassins, respectivement (cf. gamme de 3-6 mgN / l pour la concentration moyenne en nitrate dans les eaux sous racinaires,

caractéristique de l'agriculture biologique). Selon la même hypothèse, les concentrations en nitrate des eaux souterraines diminueraient de 24-58%, 39-67% et 13-51% pour les trois bassins, respectivement.

L'impact de bonnes pratiques agricoles est important dans les régions les plus contaminées (Brie-Beauce pour la Seine, le nord du bassin de l'Escaut) avec une restauration des eaux de qualité moyenne (Figure 3). Pour la Somme et les bassins en amont de la Seine, l'hypothèse basse (long terme, concentration maximum en nitrate sous-racinaire de 6 mg /l), conduit dans les zones où la qualité des eaux est mauvaise, à une qualité de moyenne à bonne (0.45-2.25 mgN /l). En considérant une concentration en nitrates de 3 mg /l (hypothèse haute), ces zones deviennent de très bonne qualité (<0,45 mg N-NO₃ / l) alors que la plupart des masses d'eau des trois bassins deviennent de bonne qualité. Un tel scénario d'agriculture de « type biologique » est donc le seul qui permette d'obtenir une bonne qualité d'eau à l'aval des trois bassins. Par comparaison, le scénario « pristine », qui supprime toute activité humaine, conduit à une très bonne qualité dans l'ensemble des réseaux de drainage. À l'opposé, le scénario « business-as-usual » révèle une aggravation de la contamination des masses d'eau, avec une mauvaise qualité en basse Seine et dans plusieurs de ses affluents.

Ces résultats montrent qu'il est sans doute possible, moyennant, une politique volontariste de diminuer les émissions d'azote suffisamment pour restaurer des conditions acceptables de contamination azotée de l'eau.

3.3 Potentiel d'eutrophisation

Pour les conditions hydrologiques de l'année 2000, les flux d'azote exportés à la mer par la Seine sont estimés à 1975 kgN/km²/an (Figure 4). Cette exportation d'azote diminue à 1462, 1084 et 768 kgN/km²/an, respectivement, pour le scénario à court terme (bonnes pratiques agricoles) et pour les hypothèses (long terme) du scénario « agriculture biologique », tandis que le scénario « business-as-usual » conduit à un flux de 2245 kgN/km²/an. Pour la Somme, avec un flux de référence de 1333 kgN/km²/an, ces mêmes changements de pratiques agricoles réduiraient les exportations d'azote à 987, 663 et 436 kgN/km²/an, respectivement, tandis que 1623 kgN/km²/an sont exportés pour le scénario «business-as-usual». Pour l'Escaut, l'écart moindre entre les contaminations des eaux souterraines et de surface, fait que le le scénario « business-as-usual » (1570 kgN/km²/an) est proche de la situation actuelle (1464 kgN/km²/an). L'impact du scénario « bonnes pratiques agricoles » est comparable à celui de «l'agriculture biologique », avec des flux estimés respectivement à 1071 et 974 kgN/km²/an, mais l'impact du scénario «agriculture biologique » devient visible (737 kgN/km²/an) en considérant la gamme basse des concentrations moyennes en nitrate sur les sols agricoles biologiques (3 mgN / l).

Ainsi, quelles que soient les conditions hydrologiques, le scénario « agriculture biologique » apparaît comme le plus efficace. Il réduit considérablement les flux d'azote (facteur de 2-3) à la sortie des trois bassins alors que la mise en œuvre de bonnes pratiques agricoles ne les réduit que d'un facteur 1.4.

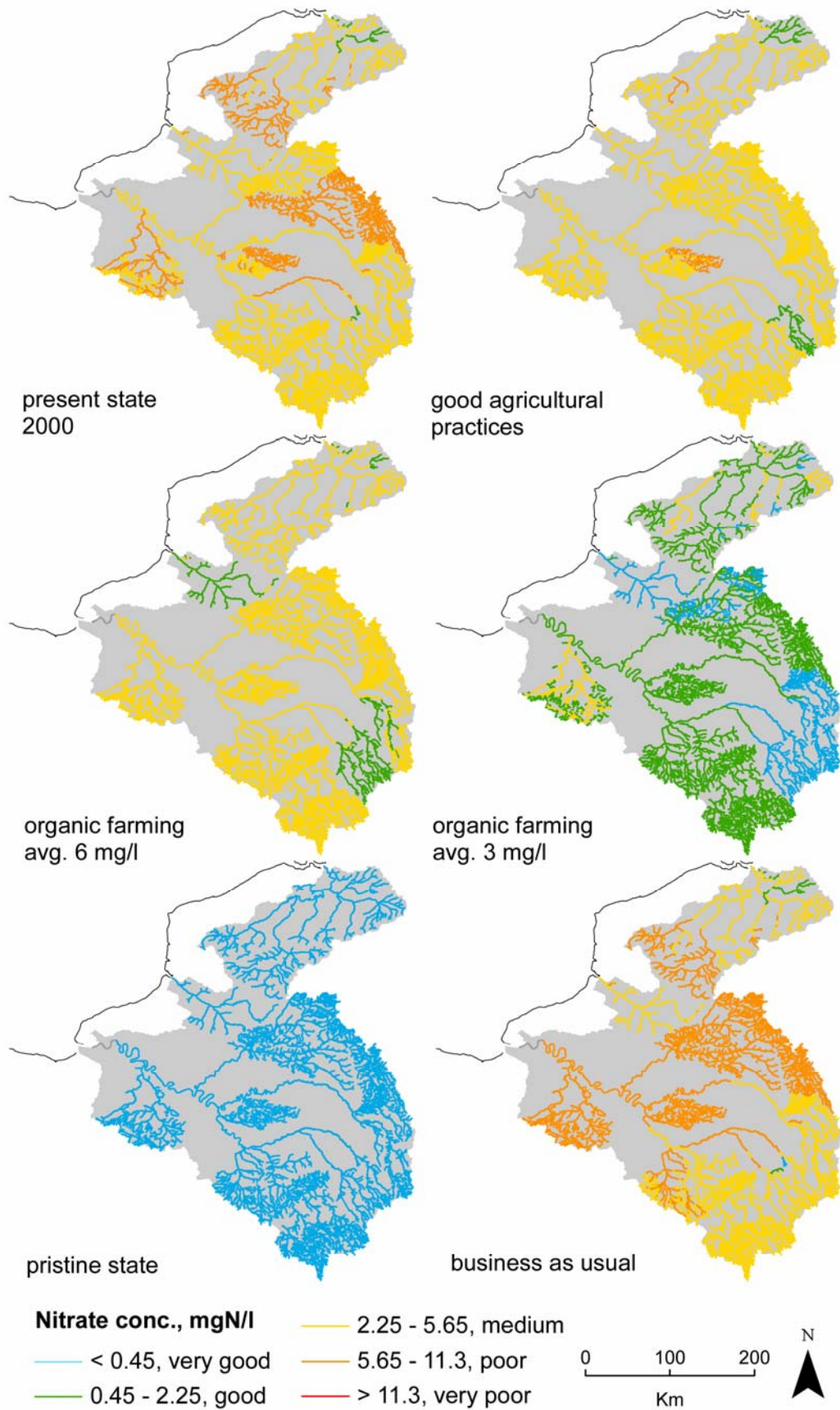


Figure 3. Distribution de la concentration moyenne annuelle de l'azote dans les trois bassins pour les différents scénarios calculés par le modèle SÉNÈQUE.

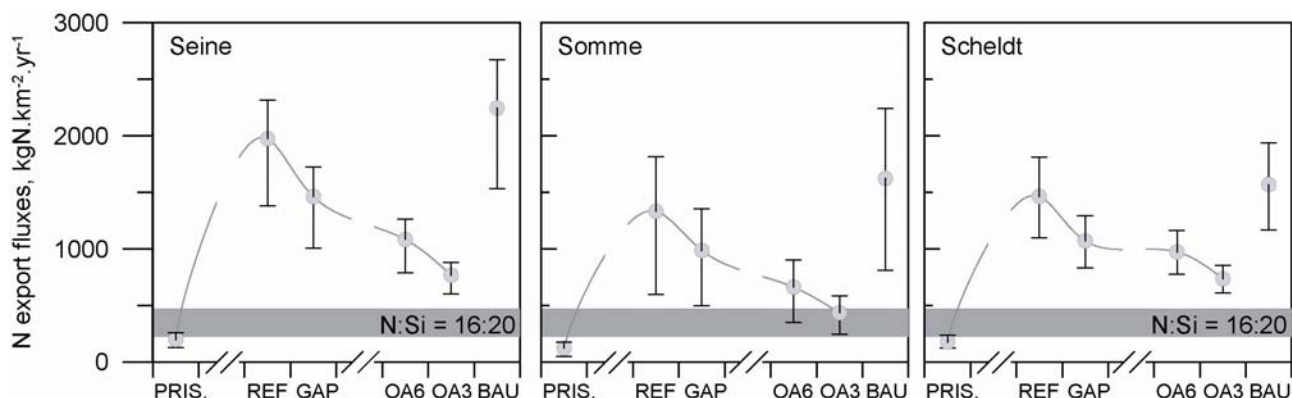


Figure 4. Réduction des flux de nutriments exportés à l'exutoire de la Seine, de la Somme et de l'Escaut. Calcul effectué par le modèle de Senèque Riverstrahler pour des conditions hydrologiques moyenne (cercle plein), sèches (valeur basse de la barre) et humide (valeur haute de la barre). Pris: scénario pristine ; REF: année de référence 2000 ; scénario GAP: bonnes pratiques agricoles scénario ; scénario BAU: Business-as-usual. OA3 et OA6 représentent le scénario « agriculture biologique » avec ses hypothèses haute (OA3) et basse (OA6). Le rapport N:Si correspondant aux besoins des algues est indiqué par la bande grisée.

L'indicateur ICEP (indicator of coastal eutrophication potential) (Billen et Garnier, 2007) permet de quantifier les risques d'eutrophisation côtière associés aux flux de nutriments fluviaux : une valeur négative implique que la silice est en excès par rapport à l'azote, ce qui indique l'absence de risque d'eutrophisation (**Tableau 3**). Au contraire, les valeurs positives indiquent que la quantité d'azote est en excès sur la silice par rapport aux besoins de la croissance des algues siliceuses, ce qui peut conduire au développement d'algues non-siliceuses, souvent considérées comme indésirables par rapport aux diatomées siliceuses.

La variabilité des sources diffuses d'azote en fonction des conditions hydrologiques (des flux plus importants en année humide) expliquent les valeurs de l'ICEP plus élevées pour tous les scénarios dans ces conditions. Avec des valeurs de l'ICEP de 21 à 29 kgC/km²/jour pour la simulation de « référence 2000 » à 23-34 kgC/km²/jour pour le scénario «business-as-usual», les eaux côtières des trois bassins sont actuellement caractérisées par un fort potentiel d'eutrophisation en conditions hydrologiques humides. Les bonnes pratiques agricoles permettraient de réduire l'ICEP à 13-20 kgC/km²/jour, alors que pour les scénarios d'«agriculture biologique» l'ICEP atteindrait des valeurs aussi faibles que 6-12 kgC/km²/jour pour la Seine et 2-6 et 6-10 kgC/km²/jour pour la Somme et l'Escaut, respectivement, ce qui représente une réduction très significative du potentiel de développement d'algues nuisibles en zone côtière.

Tableau 3. Valeurs calculées de l'indicateur du potentiel de l'eutrophisation côtière (ICEP) pour les différents scénarios, dans des conditions sèches et humides.

ICEP, kgC/km ² /d	Seine		Somme		Schledt	
	sèche	humide	sèche	humide	sèche	humide
Pristine	-1.8	-4.1	-1.4	-4.5	-2.8	-5.3
Reference 2000	18.2	28.9	7.1	21.2	13.1	21.0
Bonnes pratiques agricoles	12.4	19.8	5.5	14.1	8.9	12.9
Agriculture biologique 6mg/l	8.6	12.2	3.0	6.8	7.8	10.5
Agriculture biologique 3mg/l	5.7	6.2	1.4	1.9	5.2	5.8
Business as usual	20.2	34.1	10.2	27.7	13.9	22.6

4 Discussion

En construisant un tel scénario basé sur des pratiques de type « agriculture biologique » généralisées à l'échelle de ces trois bassins hydrographiques fortement peuplées, nous cherchions à savoir si l'agriculture, peut concilier (i) la demande de denrées alimentaires pour les populations locales, (ii) un fonctionnement écologique conduisant à des écosystèmes aquatiques de bonne qualité et (iii) des flux en nutriments équilibrés pour la croissance algale dans la zone côtière adjacente.

Pour le premier point, il apparaît clairement que les scénarios d'agriculture biologique conduisent à un meilleur équilibre entre autotrophie et hétérotrophie, même si le statut actuel des trois bassins est conservé, la Somme restant le territoire le plus autotrophe, alors que l'Escaut montre toujours un déficit de production par rapport à ses besoins de consommation, la Seine étant en position intermédiaire.

En ce qui concerne le fonctionnement écologique des trois systèmes de rivières, nos résultats montrent clairement que le passage à l'« agriculture biologique » permettrait d'atteindre des concentrations en nitrate dans les eaux de surface beaucoup plus faibles que les autres mesures testées. A ce stade, c'est le seul scénario capable de ramener la concentration d'azote dans la plupart des rivières des trois bassins en dessous du niveau de 2,25 mgN/l (10 mgNO₃/l), souvent considéré comme un seuil pour le bon état écologique (Camargo et Alonso, 2006).

A la zone côtière, ce scénario a donc montré qu'il pouvait contribuer à une diminution du flux d'azote de plus d'un facteur supérieur à 2 par rapport à celui des « bonnes pratiques agricoles ». Si l'on en juge par l'ICEP, ce scénario ne suffit toutefois pas à éliminer tout risque de prolifération d'algues indésirables à la zone côtière, mais ce risque est considérablement réduit. L'application d'un modèle de zone côtière (MIRO : Lancelot et al., soumis) prédit qu'à la zone côtière belge, la densité cellulaire maximale de *Phaeocystis* (algue mucilagineuse produisant des mousses) diminuerait de 46 10⁶ cellules / l (situation actuelle) à 21-30 10⁶ cellules / l (scénario « agriculture biologique »), tandis que la durée de la floraison serait réduit de 33 jours à 18-25 jours respectivement (conditions hydrologiques de l'année 2000). Par comparaison, on obtient 35 10⁶ cellules/l pendant 27 jours pour le scénario de bonnes pratiques agricoles.

Au total, même si la généralisation d'une agriculture biologique n'est pas un objectif réaliste à court terme, l'agriculture biologique ne concernant que 3,9% de la superficie agricole totale en Europe (11% en Autriche - 2% en France, Bonny, 2006), la demande par les consommateurs de denrées alimentaires issues de l'agriculture biologique se développe rapidement, de 10-15% par an au cours des périodes récentes (Bonny, 2006). Cette tendance est susceptible de plaider en faveur d'une extension progressive de ce mode d'agriculture, qui, à long terme, pourrait être une manière de préserver les ressources en eau tout en répondant aux exigences alimentaires de la population.

5 Références

- Agreste (2000). Ministère de l'agriculture et de la pêche, Agreste la statistique agricole. (<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/>).
- Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M., Aviles-Vazquez, K., Samulon, A., and Perfecto, I. (2007). Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems* 22, 86-108.
- Badgley, C., and Perfecto, I. (2007). Can organic agriculture feed the world? *Renewable Agriculture and Food Systems* 22, 80-86.
- Benoît, M., and Larramendy, S. (2003). Agriculture biologique et qualité des eaux : Depuis des observations et enquêtes à des tentatives de modélisation en situation de polyculture-élevage. Séminaire sur les recherches en Agriculture Biologique INRA. *ACTA Draveil, 20 et 21 novembre 2003*.
- Billen, G., and Garnier, J. (2007). River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non siliceous algae. *Marine Chemistry* 106, 148-160.

- Billen, G., Garnier, J., Ficht, A., and Cun, C. (2001). Modeling the response of water quality in the Seine River estuary to human activity in its watershed over the last 50 years. *Estuaries and Coasts* 24, 977-993.
- Billen, G., Garnier, J., Nemery, J., Sebilo, M., Sferratore, A., Benoit, P., Barles, S., and Benoit, M. (2007). A long term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *Science of the Total Environment* 275, 80-97.
- Billen, G., Garnier, J., and Rousseau, V. (2005). Nutrient fluxes and water quality in the drainage network of the Scheldt basin over the last 50 years. *Hydrobiologia* 540, 47-67.
- Billen, G., Thieu, V., Garnier, J., and Silvestre, M. (2009). Modelling the N cascade in regional watersheds: The case study of the Seine, Somme and Scheldt rivers. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133, 234-246.
- Bonny, S. (2006). L'agriculture biologique en Europe : situation et perspectives. Notre Europe (www.notre-europe.eu/fileadmin/IMG/pdf/Bonny_Agribio.pdf).
- Camargo, J., and Alonso, Á. (2006). Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International* 32, 831-849.
- Connor, D. (2008). Organic agriculture cannot feed the world. *Field Crops Research* 106, 187-190.
- Diaz, R. J., and Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science(Washington)* 321, 926-929.
- Drinkwater, L. E., Wagoner, P., and Sarrantonio, M. (1998). Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* 396, 262-265.
- EC (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the council of 23 October, 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. *Official J Eur Commun*
- FAOstat (2006). Food and Agriculture Organization of the United. *Statistical Database*.
- FranceAgriMer (2009). "Situation des marchés des céréales biologiques, campagne 2008/2009."
- Glachant, C. (2009). Resultats technico-economiques en systèmes de grandes cultures biologique en zone centre - Recolte 2007. *Journal Technique Grandes Culture biologique ITAB/Arvalis*
- Hansen, B., Kristensen, E., Grant, R., Høgh-Jensen, H., Simmelsgaard, S., and Olesen, J. (2000). Nitrogen leaching from conventional versus organic farming systems—a systems modelling approach. *European Journal of agronomy* 13, 65-82.
- Honish, M., Hellmeier, C., and Weiss, K. (2002). Response of surface and subsurface water quality to land use changes. *Geoderma* 105, 277-298.
- Korsaeth, A., and Eltun, R. (2000). Nitrogen mass balances in conventional, integrated and ecological cropping systems and the relationship between balance calculations and nitrogen runoff in an 8-year field experiment in Norway. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 79, 199-214.
- Lancelot, C., Gypens, N., Billen, G., Garnier, J., and Roubex, V. (2007). 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, 216–228.
- Lancelot, C., Rousseau, V., and Gypens, N. (2009). Ecologically based indicators for Phaeocystis disturbance in eutrophied Belgian coastal waters (Southern North Sea) based on field observations and ecological modelling. *Journal of Sea Research* 61, 44-49.
- Lancelot, C., Spitz, Y., Gypens, N., Ruddick, K., Becquevort, S., Rousseau, V., Lacroix, G., and Billen, G. (2005). Modelling diatom and Phaeocystis blooms and nutrient cycles in the Southern Bight of the North Sea: the MIRO model. *Marine Ecology Progress Series* 289, 63-78.
- Lancelot, C., Thieu, V., Polard, A., Garnier, J., Billen, G., Hecq, W., and Gypens, N. (subm.). River-ocean ecological modeling and economic assessment of nutrient reduction policies on coastal Phaeocystis blooms.
- Ledoux, E., Gomez, E., Monget, J. M., Viavattene, C., Viennot, P., Ducharne, A., Benoit, M., Mignolet, C., Schott, C., and Mary, B. (2007). Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS–MODCOU modelling chain. *Science of the Total Environment* 375, 33–47.
- Mignolet, C., Schott, C., and Benoît, M. (2007). Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of the Total Environment* 375, 13-32.
- NIS (2000). Agricultural census 2000, results database. (<http://www.statbel.fgov.be/>).
- OSPAR (2005). Common Procedure for the Identification of the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area, OSPAR Agreement 2005-3.

- Redfield, A. C., Ketchum, B. H., and Richards, F. A. (1963). The influence of organisms on the composition of sea-water. *In M. N. Hill (ed.), The Sea, John Wiley & Sons, New York*, 12-37.
- Ruelland, D., Billen, G., Brunstein, D., and Garnier, J. (2007). SENEQUE 3: a GIS interface to the RIVERSTRAHLER model of the biogeochemical functioning of river systems. *Science of the Total Environment* 375, 257-273.
- Sabatier, P. (1890). Leçons élémentaires de chimie agricole par Paul Sabatier. pp. 339. G. Masson, Paris.
- Stanhill, G. (1990). The comparative productivity of organic agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 30, 1-26.
- Thieu, V., Billen, G., and Garnier, J. (2009). Nutrient transfer in three contrasting NW European watersheds: The Seine, Somme, and Scheldt Rivers. A comparative application of the Seneque/Riverstrahler model. *Water research* 43, 1740.
- Thieu, V., Garnier, J., and Billen, G. (2010). Assessing the effect of nutrient mitigation measures in the watersheds of the Southern Bight of the North Sea. *Science of the Total Environment* in press.