



eau  
seine  
NORMANDIE

PROGRAMME PIREN-SEINE

Programme Interdisciplinaire de Recherche  
sur l'Environnement de la Seine



# La cascade de l'azote dans le bassin de la Seine

Comprendre les processus  
pour inverser les tendances

Sous la direction de Gilles Billen

ENSEMBLE  
DONNONS  
VIE à L'EAU

Agence de l'eau

#15

L'Agence de l'eau Seine-Normandie a pour mission, conjointement avec les acteurs de l'eau, de conduire les eaux du bassin de la Seine vers le bon état écologique.

Depuis 1989, le Programme de Recherche Interdisciplinaire sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine) nous aide à mieux comprendre le fonctionnement du bassin et contribue aux décisions de l'Agence.

Ce programme de recherche a apporté un éclairage décisif sur la manière dont les rivières et les zones humides participent à l'épuration de nos effluents, sur la nécessité de réduire nos rejets en phosphore pour limiter l'eutrophisation, sur l'impact attendu du changement de pratiques culturales afin de réduire la contamination des eaux par les nitrates, etc.

Partenaire du PIREN-Seine, l'Agence de l'eau souhaite valoriser l'important travail accompli et soutenir les recherches futures en contribuant à la publication de ces travaux.

C'est l'objet de cette collection que de faire partager au plus grand nombre ces connaissances longuement mûries.

Michèle Rousseau

*Directrice générale de l'Agence de l'eau Seine-Normandie*

Le programme de recherche PIREN-Seine est né en 1989 de la volonté du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) de faire se rencontrer les chercheurs de diverses disciplines (une centaine de personnes appartenant à une vingtaine d'équipes) et les acteurs qui ont en charge la gestion des ressources en eau (une dizaine d'organismes publics et privés) dans cet espace de 75 000 km<sup>2</sup> constituant le bassin hydrographique de la Seine. En s'inscrivant dans la durée, tout en redéfinissant périodiquement ses objectifs et ses orientations, le programme, basé sur la confiance et le dialogue, a permis l'émergence d'une culture scientifique partagée entre gestionnaires et scientifiques. Les recherches à caractère appliqué sont menées dans un cadre coordonné privilégiant le développement de notre capacité à analyser, à comprendre et à prévoir le fonctionnement de cet ensemble régional d'écosystèmes qu'est le bassin de la Seine : comment ce territoire, avec sa géologie, son climat, sa végétation, mais aussi avec ses activités agricoles, domestiques et industrielles, fabrique-t-il à la fois le milieu aquatique lui-même et la qualité de l'eau de nos rivières et de nos nappes ?

Par un pilotage souple et participatif, le programme a su concilier, au sein d'une même démarche, les exigences d'une recherche fondamentale qui vise à fournir les clés pour comprendre, avec celles de la demande sociale qui attend des outils pour guider l'action.

Mais la demande sociale ne s'exprime pas seulement par le questionnement technique des gestionnaires. Elle passe aussi par le débat public avec les élus, les associations, les citoyens. L'état présent du milieu aquatique résulte de l'action millénaire de l'homme sur son environnement. Sa qualité future dépendra de ce que nous en ferons ; ce qui appelle un débat sur la manière dont nous voulons vivre sur le territoire qui produit l'eau que nous buvons, compte tenu des contraintes que nous imposent la nature et la société. L'ambition du PIREN-Seine, en tant que programme de recherche publique engagé, est aussi d'éclairer un tel débat. C'est dans cet esprit que nous avons entrepris la publication de cette collection de travaux. Elle veut offrir aux lecteurs, sur les sujets porteurs d'enjeux en matière de gestion de l'eau, les clés de la compréhension du fonctionnement de notre environnement.

Jean-Marie Mouchel et Gilles Billen

*Direction du Programme PIREN-Seine*



# La collection du programme PIREN-SEINE

Cette collection analyse différents aspects du **fonctionnement du bassin de la Seine** et de ses grands affluents, soit 75 % du territoire d'intervention de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. D'autres programmes, en liaison avec le PIREN-Seine, s'intéressent à des régions ou des problématiques différentes. Ainsi Seine-Aval se focalise sur l'estuaire de la Seine et édite une collection similaire depuis 1999.



**#1** - Le bassin de la Seine



**#2** - L'hydrogéologie



**#3** - La pollution par les nitrates



**#4** - Le peuplement de poissons



**#5** - L'agriculture



**#6** - L'eutrophisation des cours d'eau



**#7** - Les métaux



**#8** - La contamination microbienne



**#9** - La micropollution organique



**#10** - L'eau dans les campagnes avant l'ère industrielle



**#11** - Les petites rivières urbaines



**#12** - Le risque écotoxicologique



**#13** - Impact du changement climatique sur les ressources en eau



**#14** - Les pesticides



**#15** - La cascade de l'azote

La couleur de chaque fascicule renvoie à l'un des quatre objectifs principaux de l'Agence de l'eau :



**Développer la gouvernance, informer et sensibiliser sur la thématique de l'eau**

**Satisfaire les besoins en eau, protéger les captages et notre santé**

**Reconquérir les milieux aquatiques et humides, favoriser la vie de la faune et de la flore**

**Dépolluer, lutter contre les pollutions de l'eau et des milieux aquatiques**

# La cascade de l'azote dans le bassin de la Seine

Avec la participation de :

Gilles BILLEN<sup>(1)</sup>, Josette GARNIER<sup>(1)</sup>, Vincent THIEU<sup>(2)</sup>, Paul PASSY<sup>(1)</sup>, Pauline RIOUSSET<sup>(1)</sup>,  
Marie SILVESTRE<sup>(4)</sup>, Sylvain THÉRY<sup>(1)</sup>, Guillaume VILAIN<sup>(1)</sup>, Claire BILLY<sup>(3)</sup>

4

Numéro ISBN : 978-2-918251-14-9

Numéro ISSN : 1968-5734

Dépôt légal : décembre 2011

(1) UMR Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75005 Paris (France)

(2) Joint Research Centre - European Commission, Institute for Environment and Sustainability, Via Fermi, TP 460, 21027 Ispra (Italie)

(3) Footways SAS, 10 Avenue Buffon, 45 071 Orleans Cedex 2 (France)

(4) FIRE 3020 (Fédération Ile de France de Recherche sur l'Environnement, CNRS/UPMC), 4 place Jussieu, 75005 Paris (France)

## RÉSUMÉ

**A**u XXI<sup>e</sup> siècle, la quantité d'azote réactif introduite par l'homme dans la biosphère est devenue supérieure à celle générée par l'ensemble des processus naturels de fixation biologique. Ce constat d'une perturbation de grande ampleur (doublement de la vitesse de circulation de l'azote) ne serait pas préoccupant s'il n'était lui-même à l'origine de problèmes écologiques et sanitaires importants. Pour comprendre ce phénomène, il est nécessaire d'identifier les processus de cheminement dans l'environnement des atomes d'azote introduits sous forme d'azote réactif, à savoir la cascade de l'azote.

Après une remise en perspective du cycle de l'azote à l'échelle de l'histoire de la Terre, le présent fascicule montre que cette surabondance de l'azote est un phénomène récent, initié au XX<sup>e</sup> siècle tant par les progrès de l'industrie chimique ayant permis la généralisation des engrais azotés synthétiques que par l'augmentation du trafic automobile. L'ensemble des milieux sont affectés. À l'origine, on trouve bien sûr le lessivage des nitrates des sols agricoles mais aussi la volatilisation de l'ammoniac lors de l'épandage ou de la manipulation des déchets animaux. Si les agglomérations stimulent la production d'azote par les milieux agricoles périurbains pour nourrir la population, elles sont elles-mêmes directement à l'origine d'émissions atmosphériques d'oxydes d'azote. Les milieux naturels se retrouvent ainsi « fertilisés » involontairement, ce qui se traduit notamment par une perte de biodiversité ainsi que par des phénomènes d'eutrophisation dans les milieux aquatiques. Enfin, la contamination des ressources en eau par les nitrates peut les rendre impropres à la consommation.

Le présent fascicule focalise l'analyse sur le bassin de la Seine qui a la particularité de concentrer sur un même territoire une métropole de plus de 10 millions d'habitants et une zone agricole de grandes cultures de tout premier ordre. Résultat : si le territoire de la Seine reçoit une quantité d'engrais de synthèse considérable, les exportations commerciales d'azote (principalement céréalières) sont aussi parmi les plus importantes d'Europe. A contrario, la plus faible part accordée à l'élevage ne permet pas d'assurer les besoins de la population en protéines animales qui doivent être importées. L'étude permet ainsi d'aboutir au calcul de l'empreinte alimentaire azotée du Francilien moyen, pour estimer les flux d'azote générés par la chaîne agro-alimentaire.

Quant à l'étude des tendances évolutives de la contamination nitrique des aquifères et du réseau hydrographique de la Seine, elle montre clairement que dans le cadre d'un scénario « laisser-faire », la contamination nitrique moyenne des grands aquifères continuerait d'augmenter jusqu'à atteindre ou dépasser la limite de potabilité, parallèlement à une dégradation de la qualité de l'eau des cours d'eau et une aggravation de l'eutrophisation marine.

Même si le caractère diffus des perturbations rend difficile la maîtrise du cycle de l'azote, des solutions existent pour inverser cette tendance. Les leviers sont multiples : limiter à la source les fuites d'azote engendrées par l'agriculture, en agissant tant sur les pratiques culturales que sur l'organisation de la chaîne agroalimentaire ; améliorer l'épuration tertiaire des eaux résiduaires urbaines ; concevoir des aménagements du paysage permettant d'amplifier le pouvoir d'épuration naturel de certains milieux vis-à-vis de la contamination nitrique. Ces solutions montrent la nécessité d'intervenir à différents niveaux, en impliquant l'ensemble des acteurs de la société.

## 7 Introduction

 L'OXYDO-RÉDUCTION

 L'AZOTE DANS TOUS SES ÉTATS

### METTRE en PERSPECTIVE

#### 10 Les trois âges de l'azote

11 Le premier âge de l'azote : l'abondance primordiale

12 Le deuxième âge de l'azote : la rareté structurante de l'azote réactif

15 Le troisième âge de l'azote : une surabondance néfaste

### COMPRENDRE

#### 18 Les étapes de la cascade de l'azote dans le bassin de la Seine

19 La cascade de l'azote et les problèmes environnementaux qu'elle génère

20 Les pertes d'azote de l'agriculture par lessivage

> Le principe

+ L'EXPRESSION DES CONCENTRATIONS EN NITRATE :  $\text{MgN/L}$  OU  $\text{MgNO}_3/\text{L}$  ?

> À l'échelle de l'ensemble d'un territoire agricole

+ L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE

24 Les émissions d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) par l'agriculture

 LE  $\text{N}_2\text{O}$ , UN GAZ À EFFET DE SERRE

26 Transferts et rétention d'azote sans le réseau hydrographique

+ LES ISOTOPES DE L'AZOTE ENREGISTRENT LA DÉNITRIFICATION

+ LA DÉNITRIFICATION DES EFFLUENTS URBAINS

30 La gestion de l'azote alimentaire urbain

30 Émissions d'oxydes d'azote par le trafic routier et l'industrie

31 L'apport d'azote au milieu marin côtier et son eutrophisation

### MESURER et AMÉLIORER

32 Bilan d'azote du bassin de la Seine et scénarios futurs

33 La mesure de l'enrichissement en azote du bassin de la Seine

35 Les relations ville-campagne : moteur du cycle anthropique de l'azote

> L'agglomération parisienne et son hinterland\* nourricier

> Le bassin de la Seine au sein de l'Europe

> Les pertes d'azote de l'agriculture

> Le scénario tendanciel de la contamination nitrique

43 Les leviers de la gestion du cycle de l'azote et les scénarios du futur

> L'achèvement des efforts d'épuration des eaux usées

+ LA DERU, LA DIRECTIVE NITRATES, LA DCÉ ET LA CONVENTION D'OSPAR

> Repenser les pratiques agricoles et la chaîne agroalimentaire

+ LA DEMANDE EN PRODUITS DE L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE ET LES MOUVEMENTS DE RELOCALISATION DE L'APPROVISIONNEMENT ALIMENTAIRE

 LE « GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT » ET LA PROTECTION DES CAPTAGES PRIORITAIRES

> Aménager le paysage hydrologique

53 Conclusion

# INTRODUCTION

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont aujourd'hui au cœur des préoccupations environnementales. Les bouleversements climatiques en cours et à venir, induits par la perturbation du cycle du carbone résultant de l'usage des combustibles fossiles, préoccupent l'opinion publique. Les gouvernements, trop lentement, commencent à prendre la mesure des efforts à fournir pour rétablir l'équilibre biogéochimique\* du cycle du carbone et enrayer l'accroissement des gaz à effet de serre\* dans l'atmosphère. Moins sous le feu des projecteurs, le cycle de l'azote est pourtant à l'échelle mondiale, bien plus perturbé par l'intervention humaine que celui du carbone.

Cette modification du cycle de l'azote trouve son origine dans la découverte, il y a tout juste 100 ans, du procédé permettant la fixation industrielle de l'azote atmosphérique (procédé Haber-Bosch, 1910) et son utilisation massive pour la production des engrais azotés pour l'agriculture. L'accroissement considérable des quantités d'azote mises ainsi en circulation dans la biosphère, a multiplié par deux l'intensité du cycle naturel de cet élément à l'échelle du monde (par 4 en ce qui concerne l'Europe). Cela constitue actuellement un sujet d'inquiétude grandissante à cause des effets environnementaux multiples et variés qui en résultent : contamination nitrique des eaux superficielles et souterraines, eutrophisation\* marine, pollution atmosphérique par les oxydes d'azote et l'ammoniac, pluies acides et retombées azotées conduisant à une perte de diversité des espaces naturels, altération des sols, accroissement de l'effet de serre, destruction de la couche d'ozone.

Le réseau de recherche ESF NinE (pour *Nitrogen in Europe*) a mis en exergue les neuf plaies des perturbations du cycle de l'azote (figure 1a). À l'initiative de ce réseau, un ouvrage collectif vient de paraître (avril 2011) qui fait le point sur tous les aspects des perturbations du cycle de l'azote à l'échelle européenne (Sutton et al., 2011, *The European Nitrogen Assessment, sources, effects and policy perspectives*. Cambridge University Press, figure 1b).

L'objectif du présent fascicule est de décliner cette évaluation pour le cas particulier du bassin\* de la Seine.

L'azote est un élément clé dans le fonctionnement de la biosphère. Il est un constituant essentiel de tous les êtres vivants, présent dans les protéines (la machinerie enzymatique de la cellule) et dans les acides nucléiques (le matériel génétique). C'est aussi un élément essentiel dans nombre de procédés industriels, dans le secteur des colorants, des matières plastiques, des explosifs. Ces rôles multiples s'expliquent par la richesse et la complexité des réactions chimiques dans lesquelles l'élément azote peut être impliqué (voir Notions clés : L'azote dans tous ses états). Ce n'est pas sans raison que René de Obaldia (1967) affirmait :

« ... Sans l'azote, pas de 14 juillet, pas de frontières, pas de beurre, pas de canons, pas de gaz, pas d'électricité, pas d'autobus, pas de moralité, pas d'hélicoptère, rien... L'anarchie quoi ! ... ».

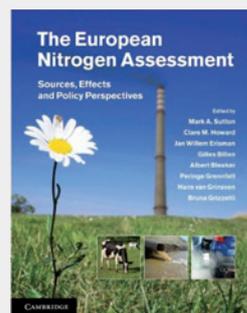
Nous décrirons d'abord le cycle non perturbé de l'azote, et le rôle clé que cet élément, souvent régulateur du fonctionnement des écosystèmes, jouait dans le passé pour structurer aussi les activités humaines, rurales comme urbaines. Nous analyserons ensuite les mécanismes par lesquels une partie importante des quantités massives d'azote réactif\* apportée dans le territoire du bassin de la Seine est re-dispersée dans tout l'environnement et chemine, en cascade, d'un compartiment à l'autre dans l'environnement. Nous envisagerons enfin les mesures possibles et les leviers d'action pour une gestion d'ensemble du cycle de l'azote à l'échelle du bassin de la Seine.



Figure 1 :

a : Le logo du réseau Européen NinE (*Nitrogen in Europe*) symbolise le défi que représente la prise en compte simultanée des neuf altérations environnementales majeures résultant de la perturbation massive du cycle de l'azote : A pour *Aquatic pollution*, C pour *Coastal eutrophication*, T pour *Terrestrial eutrophication and biodiversity loss*, A pour *Acidification of soils and waters*, S pour *Stratospheric chemistry and ozone*, Gr pour *Greenhouse gas balance and warming*, O pour *Ozone and plant damages*, U pour *Urban air quality and health*, P pour *Particles and human health*. Ces neuf lettres forment la devise « Act as group » : agir collectivement.

b : Les travaux du réseau NinE viennent d'aboutir à la publication d'un ouvrage de synthèse sur les sources, les effets et les perspectives politiques des perturbations du cycle de l'azote à l'échelle européenne (*The European Nitrogen Assessment*, Sutton et al, 2011).



## L'oxydo-réduction et la vie

À côté des réactions acide-base et de dissolution/précipitation, les réactions d'oxydo-réduction occupent en chimie la place la plus importante parce qu'elles mettent en œuvre une transformation plus profonde de la structure des corps qui réagissent. Elles impliquent en effet le transfert d'électrons entre deux atomes ou groupes d'atomes. Une espèce chimique est dite réductrice si elle est capable de donner des électrons, oxydante si elle est en mesure au contraire d'en accepter. L'espèce réductrice, en cédant ses électrons, et l'espèce oxydante en les acceptant, se transforment profondément l'une et l'autre.

Par exemple l'oxygène, présent à raison de 20 % dans l'atmosphère terrestre actuelle, est un oxydant puissant. La matière organique qui constitue la biomasse des organismes vivants est réductrice : il faut peu de chose pour que le carbone qui la compose cède ses électrons à l'oxygène et se retrouve sous forme de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), tandis que l'oxygène est transformé en eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Cette transformation est utilisée par le métabolisme des organismes qui, comme les animaux ou beaucoup de micro-organismes, se procurent leur énergie par la respiration de molécules organiques (organotrophes).

En l'absence d'une source extérieure d'énergie, les espèces chimiques tendent à s'échanger leurs électrons jusqu'à équilibration du potentiel oxydant et réducteur de tous les composés restant.

Mais en ce qui concerne la chimie des éléments constitutifs des organismes vivants, un tel équilibre final représenterait la mort : la vie sur terre consiste en fait en un état de déséquilibre permanent, maintenu par l'activité des organismes autotrophes (comme les plantes) qui utilisent l'énergie solaire pour fabriquer en continu de la matière organique réductrice et instable. C'est le processus de photosynthèse, par lequel le carbone du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) est réduit en carbone organique, grâce aux électrons cédés par l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) qui se voit ainsi transformée en oxygène. Photosynthèse et respiration (autotrophie et organotrophie) sont ainsi les deux fonctions complémentaires qui assurent le fonctionnement des écosystèmes.

# L'azote dans tous ses états

Situé au milieu de la deuxième ligne du tableau de Mendéléiev, l'azote possède 5 électrons sur sa dernière couche et peut en conséquence former des composés sous pas moins de 9 états d'oxydation.

Mis à part le diazote  $N_2$  (état d'oxydation 0) qui constitue 78% de l'atmosphère, les principaux composés présents dans l'environnement sont, soit les formes tout à fait réduites\* (état d'oxydation -3) comme l'ammoniac ( $NH_3$ ) ou l'ion ammonium ( $NH_4^+$ ) ou encore les acides aminés et les protéines ( $R-NH_2$ , où R représente une chaîne d'atomes composée principalement de carbone et d'hydrogène), soit tout à fait oxydées (état d'oxydation +5) comme l'ion nitrate ( $NO_3^-$ ).

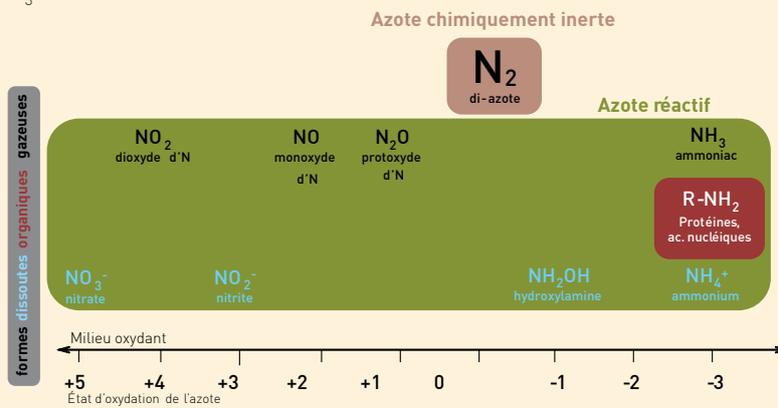


Figure 2 : Classification des composés de l'azote selon leur état d'oxydation et leur forme.

L'interconversion des formes réduites inorganique ( $NH_4^+$ ) et organique (acides aminés) par les métabolismes autotrophes\* et hétérotrophes\* constitue l'essentiel du cycle naturel de l'azote. S'y superpose la réduction assimilative des nitrates lors de son absorption autotrophe, ainsi que l'oxydation de l'ammonium en nitrate par la nitrification et la dénitrification des nitrates en diazote par des bactéries anaérobies\*. Ces deux derniers processus conduisent à l'émission de produits azotés d'état d'oxydation intermédiaire, comme l'oxyde nitreux ( $N_2O$ , état d'oxydation +1), le monoxyde d'azote ( $NO$ , état d'oxydation +2), le nitrite ( $NO_2^-$ ), le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ).

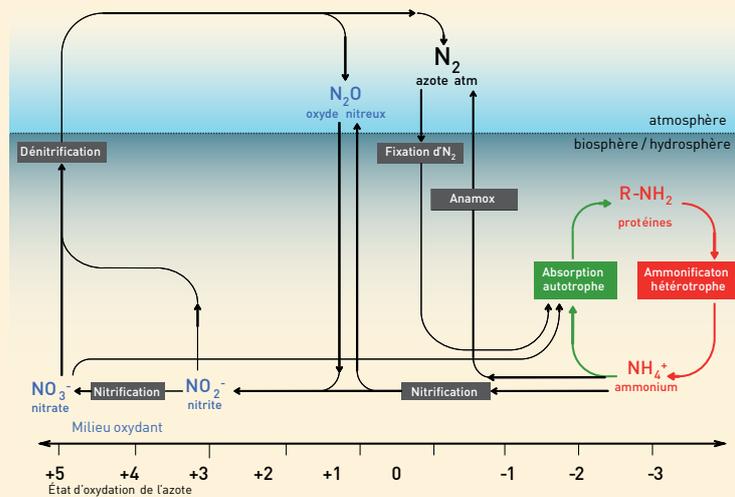
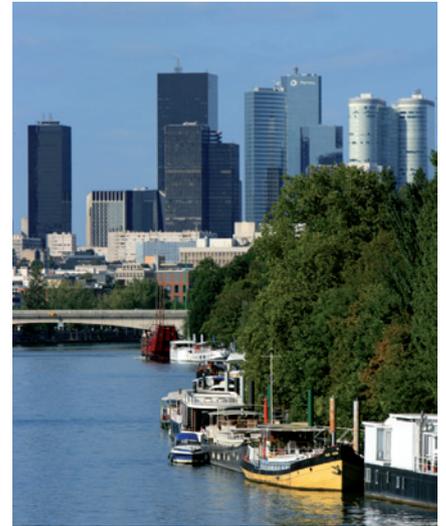


Figure 3 : Le cycle naturel de l'azote.



# les trois âges de l' azote

On comprend mieux la complexité des mécanismes qui concourent au cycle de l'azote actuel, et l'ampleur des perturbations introduites dans ce cycle par l'homme depuis un demi-siècle, en considérant les étapes de leur mise en place depuis les origines de la vie sur terre, il y a quatre milliards et demi d'années. Trois grandes périodes se sont succédées, correspondant chacune à un nouveau régime du cycle de l'azote. La période actuelle est caractérisée par une surabondance d'azote réactif liée à l'activité humaine.



## Le premier âge de l'azote : l'abondance primordiale

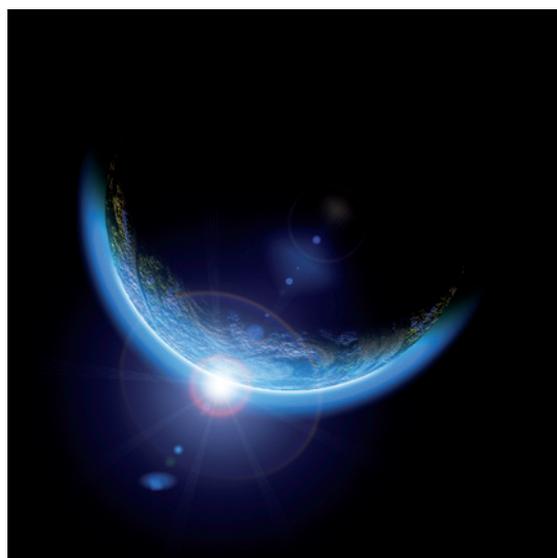
Lors de la naissance de la vie sur terre, l'atmosphère terrestre est bien différente de celle qui nous enveloppe actuellement, car elle ne contient aucune trace d'oxygène. Des conditions réductrices règnent à la surface du globe ; le carbone est présent dans l'atmosphère en abondance sous forme de  $\text{CO}_2$  et de CO et l'azote sous forme de diazote ( $\text{N}_2$ ) et d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) (voir *Notions clés* : l'azote dans tous ses états).

Sous l'effet des radiations ultraviolettes et des décharges électriques produites par les orages, des molécules organiques\*, précurseurs de la matière vivante, se forment dans les océans. L'azote s'y retrouve lié au carbone sous forme d'amines, c'est-à-dire au même état d'oxydation que dans l'ammoniac. Les premiers organismes qui se développent, constitués de protéines\* et d'acides nucléiques\* et entourés d'une membrane de lipides\*, tirent leur énergie de la fermentation ou de la respiration des molécules organiques préexistantes. Ce métabolisme\* hétérotrophe reminéralise l'azote organique sous forme d'ammoniac. Quand ensuite se développent les organismes autotrophes (photosynthétiques ou non), capables de synthétiser eux-mêmes, à partir d'éléments minéraux, leur matière organique, c'est à partir d'ammoniac, abondant dans le milieu, qu'elles s'approvisionnent en azote. Le cycle de l'azote qui se met alors en place est un cycle très simple, sans changements d'états d'oxydation, basé sur l'équilibre entre la fixation autotrophe de l'ammoniac en acides aminés et protéines et la reminéralisation hétérotrophe de l'azote organique en ammoniac (un cycle de l'azote restreint à la partie droite de la figure 3).

Mais la synthèse de matière organique, nécessite de réduire le carbone du  $\text{CO}_2$ , et donc d'avoir accès à des substances réductrices, qui agissent comme donneurs d'électrons pour opérer la transformation du  $\text{CO}_2$  en molécules organiques. L'hydrogène, les sulfures, le fer et le manganèse réduits, présents en abondance dans l'océan primordial, jouent ce rôle dans les premiers temps. Au fur et à mesure que progresse la vie sur la planète, que s'y accumule la matière organique, les substances réductrices s'épuisent, et le potentiel rédox\* des océans et de l'atmosphère se modifie. Les métabolismes autotrophes en sont limités dans leur capacité à former de la matière organique. La crise n'est résolue que par le développement, il y

a 2,7 milliards d'années, d'une nouvelle forme de photosynthèse, oxygénique, capable d'utiliser le pouvoir réducteur de l'eau pour réduire le  $\text{CO}_2$  en molécules organiques. L'eau devient le réservoir inépuisable du pouvoir réducteur nécessaire à la photosynthèse. Cette utilisation génère de l'oxygène qui progressivement s'accumule dans l'atmosphère et l'océan, et vient à bouleverser complètement les conditions qui avaient prévalu jusque-là sur la planète. L'oxygène est en effet toxique pour les organismes anaérobies, qui s'étaient développés en son absence aux débuts de la vie sur terre. De nombreuses espèces vont disparaître ou se réfugier dans des niches protégées où subsistent des conditions réductrices. Par ailleurs, la présence d'oxygène dans l'atmosphère va permettre la formation dans la stratosphère d'une couche d'ozone absorbant une bonne part du rayonnement solaire ultraviolet, rendant ainsi possible la colonisation du milieu terrestre par la vie, jusque-là cantonnée dans les milieux aquatiques.

C'est le premier grand bouleversement de l'histoire biogéochimique de la terre : des organismes, par leurs activités, ont transformé, de manière radicale et définitive, l'environnement de tous les autres.



## Le deuxième âge de l'azote : la rareté structurante de l'azote réactif

Le passage de conditions réductrices à des conditions oxydantes à la surface de la terre change complètement la configuration du cycle de l'azote (qui prend la forme décrite dans la figure 3). L'ammoniac, première source d'azote des organismes autotrophes, qui était sa forme stable, omniprésente en conditions réductrices, devient maintenant instable dans les nouvelles conditions oxydantes de la planète. Dans ces conditions, l'oxydation de l'ammoniac en nitrate délivre en effet de l'énergie, qu'utilisent pour croître de nouvelles bactéries nitrifiantes. Réciproquement, l'utilisation du nitrate par les autotrophes nécessite de re-réduire l'azote pour la synthèse des protéines, au prix d'un coût énergétique élevé. De surcroît, dans les niches réductrices qui subsistent, les nitrates peuvent être réduits par les métabolismes dénitrifiants, en diazote gazeux. Cette forme d'azote n'est pas directement utilisable par les autotrophes. Sa stabilité chimique en fait une espèce non réactive, très difficilement mobilisable pour l'incorporation dans la matière vivante. Seules quelques bactéries, dites azotrophes\*, en sont capables, à grand frais énergétiques. Le stock de diazote dans l'atmosphère constitue donc essentiellement un réservoir inerte dans lequel se trouve piégée la plus grande partie de l'azote de la planète. Les formes réactives (nitrates, ammonium et ammoniac, azote organique, etc.) deviennent rares à la surface de la terre.

Désormais, la vie va devoir s'accommoder de la rareté de l'azote réactif. C'est le plus souvent, sur terre comme en mer, la faible disponibilité de l'azote qui limite le développement des autotrophes, des algues marines comme des végétaux terrestres, et leur croissance n'est possible que dans la mesure où elle peut être soutenue par un flux d'azote minéral produit par la reminéralisation hétérotrophe de l'azote incorporé à la biomasse. Les écosystèmes naturels s'organisent donc en cycle étroitement fermé de l'azote, et les pertes inévitables sont compensées par une lente, difficile et précieuse fixation d'azote atmosphérique réalisée par les bactéries azotrophes, vivant libres dans les sols ou les eaux, ou en symbiose\* avec certaines plantes, comme les légumineuses qui abritent ces bactéries bienfaisantes dans les nodules de leurs racines.

La forêt primitive, qui recouvrait la majeure partie du continent européen avant le Néolithique, offre l'exemple d'une circulation essentiellement fermée

de l'azote. La croissance des plantes s'accompagne du prélèvement de cet élément dans le sol et sa transformation en matière organique végétale. La plus grande partie de la biomasse formée retombe sur le sol où les microorganismes de la litière la reminéralisent, restituant alors au sol l'azote nécessaire à la poursuite de la croissance végétale. Utilisé au fur et à mesure de sa production, l'azote minéral ne s'accumule jamais en concentration élevée dans le sol, de sorte que son lessivage\* par les eaux de pluie est minime, n'excédant jamais 200 kgN/km<sup>2</sup>/an. Ces pertes peuvent être largement compensées par la fixation biologique de diazote (figure 4). L'énorme stock d'azote organique accumulé dans la biomasse forestière et dans l'humus constitue en outre un tampon très efficace contre les fluctuations de ces apports et de ces pertes. Le fonctionnement équilibré du milieu forestier en fait un système stable susceptible de se maintenir durant des millénaires. Les cours d'eau drainant des bassins forestiers non perturbés reçoivent donc peu d'éléments azotés, ce qui limite considérablement le développement des algues dans les milieux aquatiques.

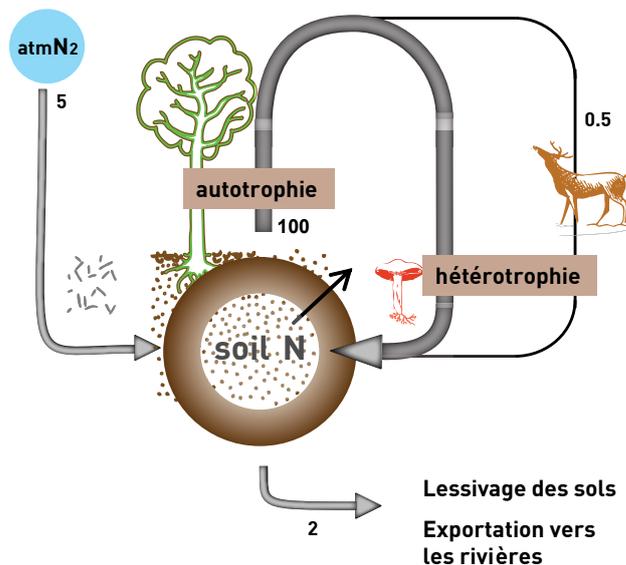


Figure 4 : Le cycle de l'azote dans une forêt tempérée (flux d'azote associés au métabolisme des principaux groupes fonctionnels, en kgN/ha/an).

Les différentes formes d'agriculture traditionnelle se sont aussi développées dans ce contexte de rareté de l'azote réactif [voir fascicule PIREN-Seine n°1, Le bassin de la Seine : « Les grandes phases du développement de l'agriculture occidentale »]. Tous les perfectionnements des systèmes agraires traditionnels ont consisté dans l'art de transférer de manière durable, vers les champs de céréales (plantes particulièrement exigeantes en azote et incapables de fixer celui de l'air), la matière azotée issue d'écosystèmes capables de mobiliser l'azote atmosphérique. En Europe occidentale, le bétail a longtemps joué ce rôle de convoyeur d'azote depuis les pâturages semi-naturels riches en plantes légumineuses\*, ou les parcelles cultivées en fourrages fixateurs d'azote, vers les terres arables sur lesquelles étaient épandues leurs déjections. La complémentarité entre élevage et céréaliculture (labourage et pâturage !) faisait ainsi la richesse des campagnes et lui permettait d'exporter vers les villes une part significative de sa production sans compromettre la pérennité de la fertilité des sols. La fermeture du cycle de l'azote constituait une contrainte incontournable autour de laquelle se sont structurées les principales activités humaines (figure 5).

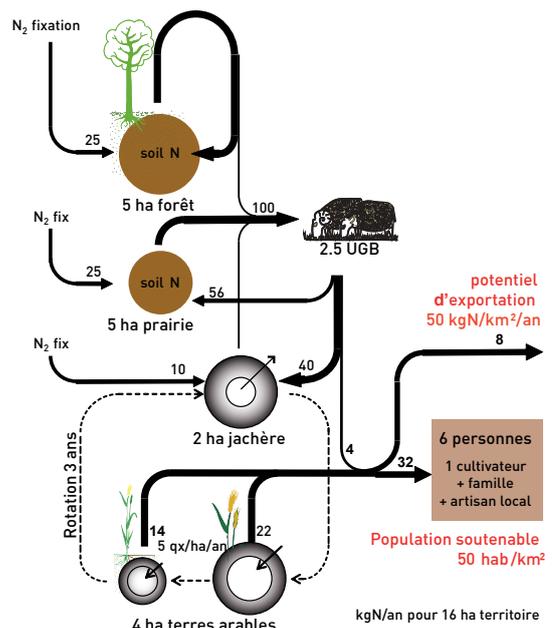


Figure 5 : Le cycle de l'azote dans un territoire rural traditionnel, au XVIII<sup>e</sup> siècle, géré selon la technique de l'assolement triennal. Une période de jachère est utilisée pour assurer la fertilisation par les déjections du bétail (flux en kgN/an pour un territoire de 16 ha, représentant la surface d'une exploitation familiale de l'époque).

C'est ainsi que le développement démographique des villes n'a pu se réaliser qu'accompagné par le développement parallèle des techniques agricoles de leur hinterland\*. Le cas de Paris est particulièrement frappant à cet égard : le territoire du bassin de la Seine qui nourrissait les 500 000 habitants de la ville à la veille de la révolution française, est le même que celui qui nourrira les 5 millions d'habitants que

compte Paris un siècle et demi plus tard. Le potentiel d'exportation de nourriture du territoire rural du bassin a été multiplié par dix, grâce à une gestion plus efficace de la fixation d'azote par les légumineuses, la culture systématique de fourrage protéagineux, un accroissement du cheptel et une meilleure gestion de ses excréments (figure 6).

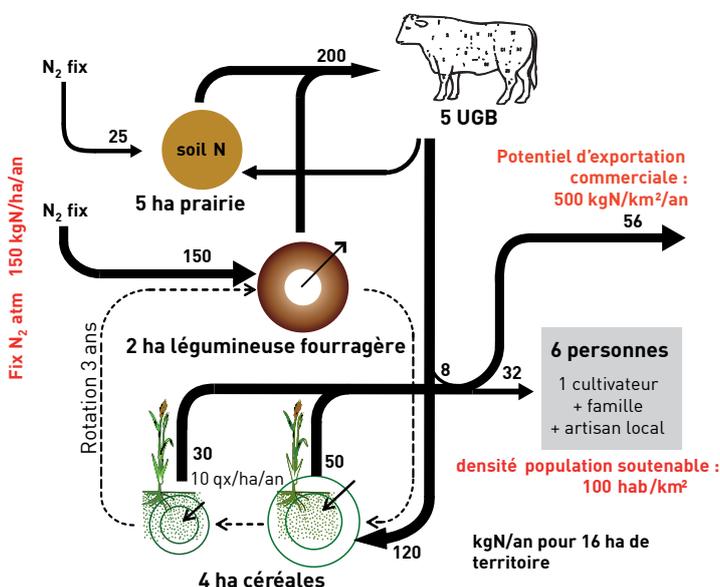


Figure 6 : Le cycle de l'azote dans un territoire rural traditionnel, au XIX<sup>e</sup> siècle : la jachère a été remplacée par une culture fourragère de légumineuses fixatrices d'azote, ce qui permet un accroissement du bétail et une meilleure fertilisation des terres arables (flux en kgN/an pour un territoire de 16 ha, représentant la surface d'une exploitation familiale de l'époque).

# METTRE en PERSPECTIVE

Il n'en demeure pas moins, qu'une certaine « faim d'azote » commence à se faire sentir à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Si la mise en culture des terres très riches en azote de la Grande Prairie Nord-américaine offre temporairement la possibilité de produire des céréales

à bas prix qui inondent les marchés européens, cette agriculture 'minièrè' épuise rapidement les sols et rappelle aux migrants européens qu'il n'y a pas d'agriculture durable sans restitution à la terre des éléments exportés par la récolte (figure 7).

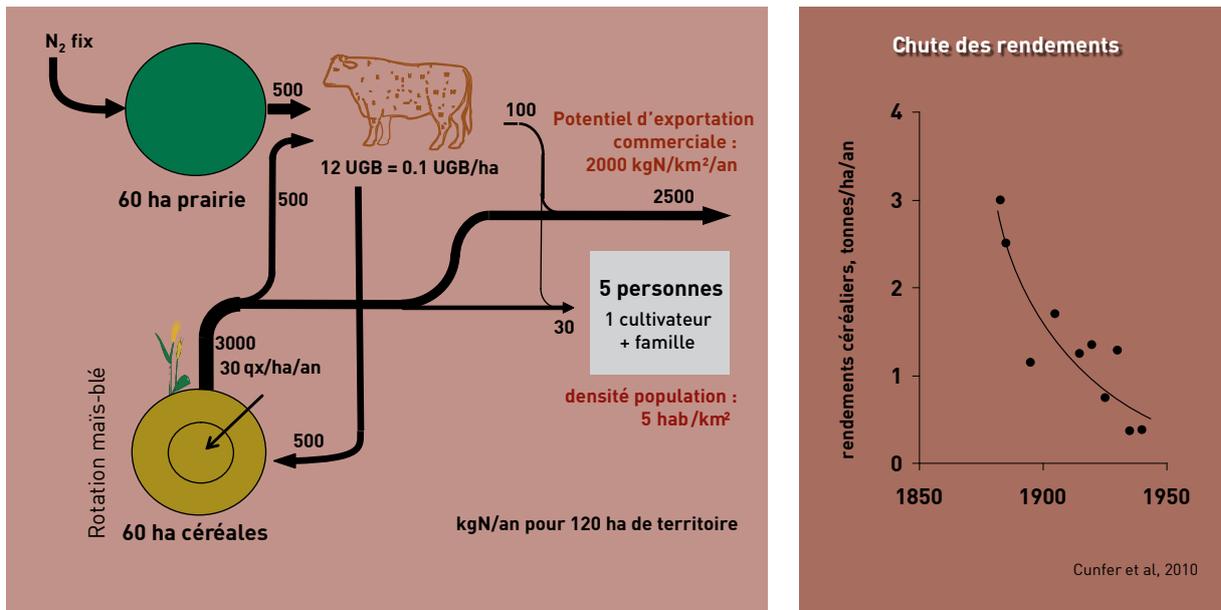


Figure 7 : L'exploitation 'minièrè' du stock d'azote du sol de la prairie nord-américaine par une agriculture à cycle ouvert au XIX<sup>e</sup> siècle (flux en kgN/an pour un territoire de 60 ha, représentant la surface d'une exploitation familiale de l'époque au Kansas). Source : Cunfer et al, 2010

## Le troisième âge de l'azote : une surabondance néfaste

Tandis que, à l'aube du XX<sup>e</sup> siècle, le développement urbain pousse à ses limites la capacité exportatrice d'azote des territoires agricoles, l'industrie chimique naissante, notamment dans les secteurs des explosifs et des colorants, exerce elle aussi une forte demande en composés azotés fixés, et tout particulièrement en acide nitrique. La production de salpêtre, par nitrification spontanée de l'ammoniaque libéré par la décomposition d'excréments animaux, et l'importation massive de nitrates du Chili, seuls gisements de composés azotés disponibles sur la planète, assurent d'abord à elles-seules cette demande.

À la veille de la première guerre mondiale, deux chimistes allemands, Fritz Haber et Carl Bosch mettent au point le premier procédé opérationnel permettant la conversion industrielle de l'azote atmosphérique en ammoniaque puis en acide nitrique. Le procédé implique la réaction sous forte pression et à haute température du diazote avec l'hydrogène (figure 8).

Offrant d'abord une source d'azote nitrique à l'industrie allemande des explosifs, puis à l'industrie chimique en général, il a permis ensuite le développement considérable de l'industrie des engrais azotés, dont l'usage s'est généralisé en Europe occidentale à partir des années 1950.

Dès 1924, le biologiste américain Alfred Lotka voit dans le procédé Haber-Bosch une véritable révolution biogéochimique :

« Ce développement extraordinaire est bien davantage que le départ d'une nouvelle industrie. Il représente rien moins que le début d'une nouvelle ère ethnologique dans l'histoire de l'humanité, une nouvelle époque cosmique. Dans le court laps de temps d'une douzaine d'années (un bref instant en termes géologiques), l'homme a initié des transformations comparables en importance aux processus cosmiques. »



Figure 8 : Le procédé Haber-Bosch. Une usine d'azote dans les années 1950.

## METTRE en PERSPECTIVE

En effet, la généralisation de l'usage des engrais azotes synthétiques dans les pays industrialisés n'a pas mené seulement à une augmentation sans précédent de la production agricole, mais aussi à une complète restructuration de l'agriculture elle-même, qui perd son statut de secteur primaire pour devenir une activité adossée à l'industrie chimique lourde.

(figure 9). La complémentarité entre agriculture proprement dite et élevage, base des systèmes agraires traditionnels européens, est définitivement rompue. Un système agraire à cycle ouvert peut se mettre en place, puisque l'industrie est maintenant à même de prélever dans le réservoir inépuisable d'azote contenu dans l'atmosphère.



Figure 9 : Trois affiches réalisées à 35 ans d'intervalle pour représenter le monde agricole montrent le changement radical de statut de l'agriculture. La richesse du monde agricole dépend encore étroitement du bétail en 1900 en haut (Syndicat Central des Agriculteurs de France, G. Fay) puis de l'industrie dès 1935 en bas à gauche (Société de Saint Gobain, F-H d'Alesi) et en bas à droite (Comptoir Français de l'Azote, Stéphane).

Parallèlement, le développement du trafic routier et plus généralement des combustions à haute température, telles que celles réalisées dans les moteurs à explosion et les centrales thermiques, convertissent des quantités non négligeables de diazote atmosphérique en oxydes d'azote gazeux ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) qui sont eux-mêmes convertis dans l'atmosphère en acide nitrique ou en aérosols et retombent sur le sol ou en mer, parfois après un transport atmosphérique sur de longues distances.

Aujourd'hui, la quantité d'azote réactif introduite annuellement à l'échelle du globe dans la biosphère par l'industrie et le trafic automobile représente plus que celle apportée par l'ensemble des processus de fixation biologique. Cela implique un doublement de

la vitesse de circulation de l'azote (Galloway et al, 2008; Gruber and Galloway, 2008, Erisman et al., 2008) comme le montre la figure 10.

L'Europe est l'illustration de cet emballement : l'introduction d'azote réactif dans la biosphère par l'activité humaine y est 3 à 4 fois plus intense que celle liée aux processus naturels ; les problèmes environnementaux, écologiques et sanitaires qui en résultent y sont particulièrement aigus (van Egmont et al., 2002 ; Sutton et al., 2011).

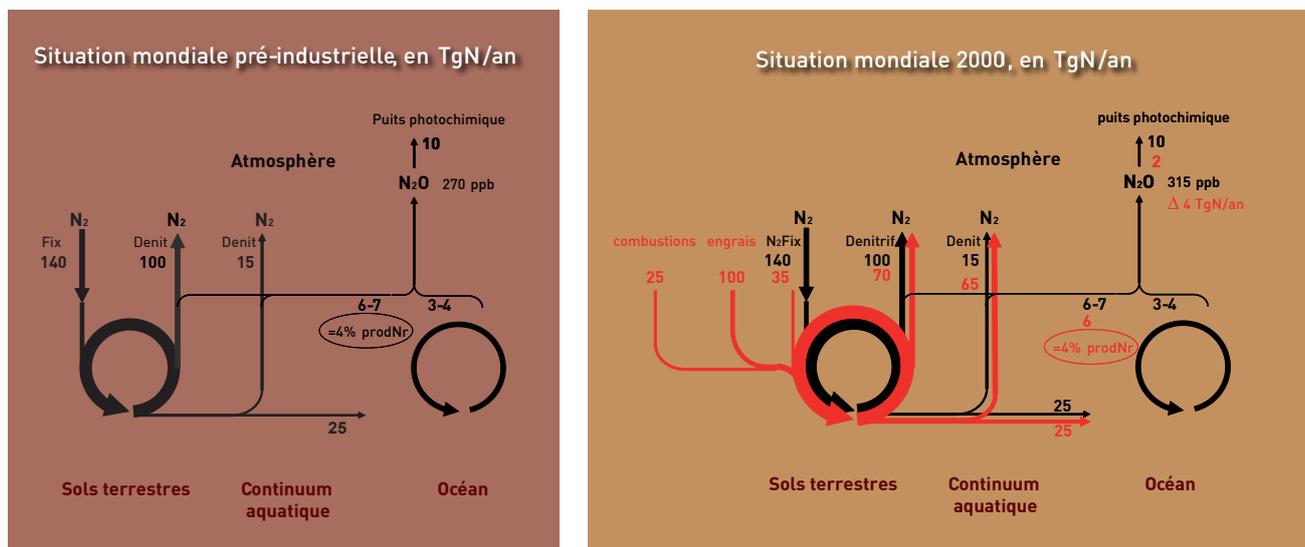
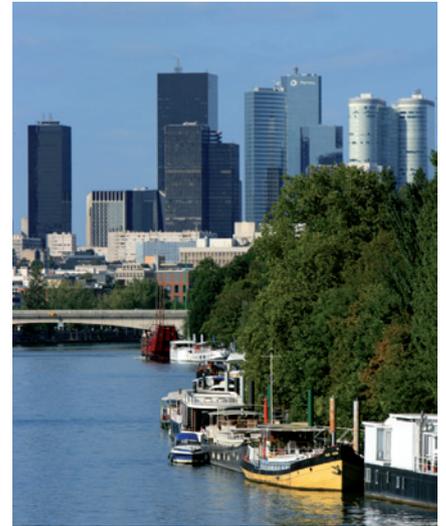


Figure 10 : Le cycle global de l'azote pré-industriel et actuel. La fixation de diazote atmosphérique par le procédé Haber-Bosch, par les processus de combustion ou par la culture des légumineuses, a plus que doublé l'introduction d'azote réactif par rapport au cycle pré-industriel. Les schémas montrent également les émissions associées d'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et l'accumulation de ce gaz dans l'atmosphère, les mécanismes de sa destruction en haute atmosphère (puits photochimique) restant inférieurs à la vitesse de sa production qui représente globalement 4% de la vitesse de création d'azote réactif (Nr) - (figure adaptée de Gruber & Galloway, 2008; Crutzen et al, 2008; Seitzinger et al, 2006).



# Les étapes de la cascade de l'azote dans le bassin de la Seine

Après l'analyse des perturbations apportées au cycle de l'azote à l'échelle du globe, l'étude se concentre sur le bassin de la Seine. Celui-ci se caractérise par la coexistence d'une métropole parmi les plus peuplées d'Europe (10 millions d'habitants) et de zones agricoles parmi les plus intensives au monde. Comment l'azote réactif est-il apporté à ce bassin en conséquence des activités urbaines et agricoles ? Quel cheminement suit-il ensuite ? Quels mécanismes sont en jeu ? Avec quelles conséquences environnementales ? Pour répondre à ces questions, il est d'abord nécessaire d'introduire le concept de cascade de l'azote et d'analyser les processus liés au cycle de l'azote dans les différentes composantes du système Seine.



## La cascade de l'azote et les problèmes environnementaux qu'elle génère

La cascade de l'azote désigne le cheminement à travers les différents compartiments de la pédosphère, de la biosphère et de l'atmosphère, d'un atome d'azote introduit sous forme d'azote réactif, avant de retourner dans le réservoir de diazote atmosphérique (figure 11). Si la production d'azote réactif\* sous forme d'engrais et son utilisation comme fertilisant des sols agricoles sont des interventions humaines parfaitement intentionnelles, destinées à produire des protéines végétales ou animales pour l'alimentation humaine, le devenir de cet azote échappe dans une large mesure à l'intention initiale à cause de l'extrême mobilité des formes réactives de l'azote, conduisant à une faible efficacité de l'emploi des engrais. Le lessivage des nitrates des sols agricoles et la volatilisation de l'ammoniac des excréments animaux redistribuent d'emblée dans l'environnement une part significative des engrais azotés utilisés en agriculture, de sorte que c'est l'ensemble des milieux, naturels ou cultivés,

terrestres ou aquatiques, qui sont affectés par l'usage des engrais. En milieu urbain, les émissions atmosphériques d'oxydes d'azote par les processus de combustion redistribuent également de l'azote réactif sur de longues distances. Les milieux naturels se retrouvent donc fertilisés non intentionnellement, ce qui occasionne une banalisation de leur flore et de leur faune, donc une perte considérable de biodiversité, et dans les milieux aquatiques, une eutrophisation qui affecte leur fonctionnement ainsi que les services que peuvent rendre ces systèmes (voir fascicule PIREN-Seine n°6, L'eutrophisation des cours d'eau). La contamination des ressources en eaux par les nitrates conduit en outre à les rendre impropres à la consommation, à moins de leur faire subir des traitements coûteux dans les usines de fabrication d'eau potable (voir fascicule PIREN-Seine n°3, La pollution par les nitrates).

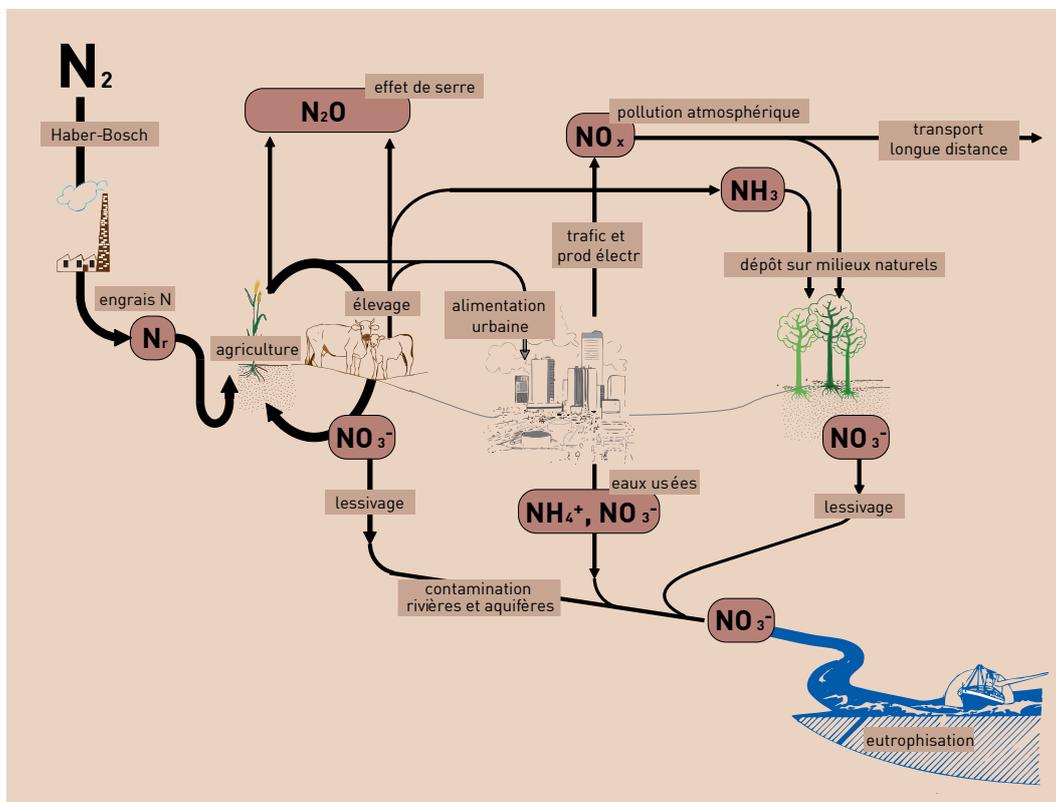


Figure 11 : Schéma de la cascade de l'azote.

Mais la cascade de l'azote ne s'arrête pas aux milieux aquatiques et terrestres. La présence dans l'atmosphère d'oxydes d'azote conduit à la formation d'ozone, une des principales causes des affections respiratoires liées à la pollution atmosphérique, avec les aérosols, également produits par réaction de l'ammoniac avec les oxydes d'azote. La qualité de l'air, comme celle de l'eau est donc fortement affectée par la cascade de l'azote. Les ions nitrates dispersés dans l'environnement sont éventuellement sujets à la dénitrification, processus microbien par lequel ils sont transformés en diazote, ramenant donc l'élément à sa forme non-réactive. La cascade n'en est pas pour autant terminée, puisqu'une fraction de l'azote dénitrifié est libérée sous forme

d'oxyde nitreux ( $N_2O$ ), puissant gaz à effet de serre qui contribue, avec le  $CO_2$ , au dérèglement climatique de la planète, ainsi d'ailleurs qu'à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.

Une série de dommages environnementaux inter-reliés les uns aux autres, et affectant tous les milieux aquatiques, terrestres et atmosphériques, anthropisés ou naturels, accompagne donc inévitablement la production d'azote réactif par l'industrie et les transports. Nous vivons aujourd'hui dans un monde malade d'une surabondance d'azote, où la limitation structurante qu'exerçait cet élément par sa rareté relative a été supprimée de manière incontrôlée.

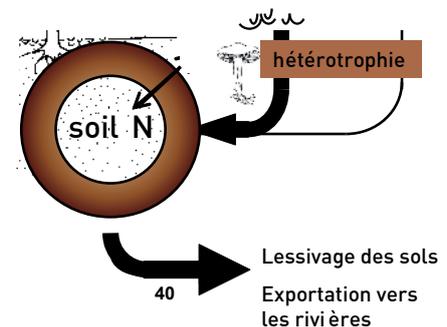
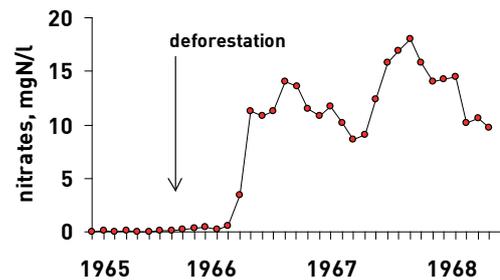
## Les pertes d'azote de l'agriculture par lessivage

### LE PRINCIPE

On a vu précédemment que les forêts naturelles ont développé un cycle de l'azote très rétentif, dans lequel les pertes par lessivage liées à la percolation de l'eau de pluie à travers le profil de sol sont réduites par l'activité de prélèvement de l'azote minéral exercée de façon permanente par la végétation (figure 4).

Il en va tout autrement en cas de coupe à blanc de la forêt. Alors même que les végétaux ne sont plus là pour les absorber, des nitrates, très solubles, continuent d'être produits par la lente minéralisation de l'énorme stock d'azote accumulé dans la litière et l'humus. Il en résulte un lessivage très important, pouvant aller jusqu'à conférer à l'eau qui draine ces sols des teneurs en nitrate dépassant la limite de potabilité actuellement reconnue de  $50 \text{ mgNO}_3/\text{l}$  (soit  $11 \text{ mgN/l}$ ) (Likens & Borman, 1975) (figure 12).

La nature même de l'agriculture, qui en quelque sorte réalise à chaque récolte l'équivalent d'une coupe à blanc, entraîne donc inévitablement des pertes d'azote par lessivage, particulièrement durant les périodes où le sol est laissé nu. Les apports de fertilisants minéraux, directement solubles, sont particulièrement sujets à l'entraînement par lessivage, s'ils ne sont pas très rapidement prélevés par les plantes cultivées ou réorganisés sous forme de matière organique par la microflore du sol.



Flux d'azote en  $\text{kgN/ha}$

Figure 12 : Coupe à blanc d'une forêt : l'exemple de Hubbard Brook.

Cycle de l'azote après coupe à blanc et évolution de la concentration en nitrates dans l'eau du ruisseau drainant la parcelle coupée.



## L'EXPRESSION DES CONCENTRATIONS EN NITRATES : MgN/L OU MgNO<sub>3</sub>/L ?

Les scientifiques expriment généralement les concentrations de toutes les formes de l'azote par la masse de l'élément N contenue dans un volume d'eau de 1 litre : mgN/l. C'est le choix qui est fait tout au long de ce fascicule.

Pourtant, il est usuel, en ce qui concerne le nitrate, d'exprimer sa concentration en masse de l'ion nitrate lui-même : mgNO<sub>3</sub>/l. C'est cette unité qui est utilisée par les marchands d'eau minérale, ainsi que dans les normes de potabilité (50 mgNO<sub>3</sub>/l).

La conversion d'un système d'unité dans l'autre se fait par la formule :

$$\text{mgNO}_3/\text{l} = \text{mgN}/\text{l} * (14 + 3 * 16) / 14 = \text{mgN}/\text{l} * 4,43$$

Ainsi la norme de 50 mgNO<sub>3</sub>/l correspond-elle à 11,3 mgN/l.

### À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE AGRICOLE

À l'échelle de la parcelle agricole, les fuites d'azote par lessivage peuvent être estimées par divers dispositifs tels que les cases lysimétriques\*, ou les bougies poreuses\*, qui permettent le prélèvement et le dosage des flux d'eau infiltrés en dessous de la zone du sol explorée par les racines. Dans les parcelles équipées de drains, la composition en nitrate de l'eau collectée dans ces ouvrages permet aussi de quantifier les pertes d'azote par lessivage. Une synthèse des données de ce type disponibles pour les terres agricoles du bassin de la Seine ou de régions proches est fournie dans la figure 13.

Ces données montrent une relation évidente entre le lessivage et l'importance de la fertilisation totale (qu'elle soit organique ou minérale). Une relation existe aussi avec l'importance de l'épaisseur de l'horizon supérieur de sol dans le contrôle des pertes azotées : les sols agricoles les moins épais, comme les rendzines de Champagne crayeuse, donnent lieu à des pertes plus importantes que les sols limoneux profonds qui caractérisent la Beauce.

Certaines pratiques agricoles permettent de diminuer notablement le lessivage : il en est ainsi de la pratique des cultures intermédiaires piège à azote (CIPAN), qui consiste à intercaler après une culture récoltée en été et une autre semée au printemps, un couvert végétal qui permettra d'éviter que le sol soit laissé nu pendant la période des pluies hivernales. Cette pratique est susceptible de diminuer le lessivage de l'azote d'environ 30 %, tout en augmentant les stocks de carbone et d'azote organique du sol. Le semis direct (sans labour) n'est que peu efficace pour limiter le lessivage (Constantin, 2008).

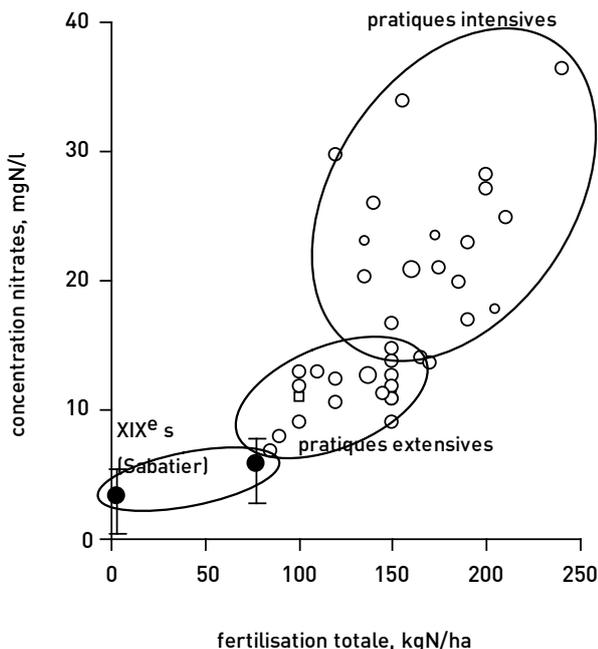


Figure 13 : Mesures en cases lysimétriques réalisées depuis une vingtaine d'années par l'INRA de Versailles (Boniface et al., 1996) et de Châlons-en-Champagne (Ballif et al., 1996), des mesures réalisées à l'aide de bougies poreuses dans des parcelles agricoles et forestières en Lorraine (Benoît et al., 1995), des suivis détaillés à l'exutoire de petits bassins expérimentaux équipés de drains comme celui de l'Orgeval et du Leudon-en-Brie (Belamie, 1980, Mariotti, 1982, Muxart et al., 1997).

## À L'ÉCHELLE DE L'ENSEMBLE D'UN TERRITOIRE AGRICOLE

À cette échelle, les pertes de nitrates peuvent être reliées au surplus de fertilisation apportée (engrais synthétiques, fumure animale, fixation de diazote par les légumineuses, dépôt atmosphérique) par rapport au prélèvement d'azote correspondant à la croissance de la partie récoltée des plantes cultivées. Si le rendement des cultures s'accroît en général avec l'importance de la fertilisation azotée, cet accroissement n'est pas linéaire : il se fait avec un rendement d'utilisation de l'azote de plus en plus faible. Les pertes d'azote par lessivage, volatilisation ou dénitrification s'accroissent donc avec la fertilisation (figure 14).

En faisant l'hypothèse que ce surplus soit entièrement évacué avec le lessivage (en négligeant donc la dénitrification, la volatilisation et les variations de

stock de matière organique azotée dans le sol), on peut calculer la concentration en nitrate qui en résulte au niveau de l'eau infiltrée alimentant les aquifères (compte tenu d'une lame d'eau infiltrée moyenne de 350 mm par exemple). On voit alors que le respect d'une norme maximale de 50 mgNO<sub>3</sub>/l (soit 11,3 mgN/l) pour l'eau infiltrée devrait conduire à limiter globalement la fertilisation, au niveau de l'ensemble des assolements du territoire agricole, à 150 kgN/ha/an.

Or, on est actuellement bien au dessus de cette limite pour l'agriculture conventionnelle. Seules certaines exploitations d'agriculture biologique satisfont à ce critère, parce qu'elles pratiquent une agriculture beaucoup moins intensive dont le bilan d'azote est moins excédentaire (voir *En savoir plus* : l'agriculture biologique).

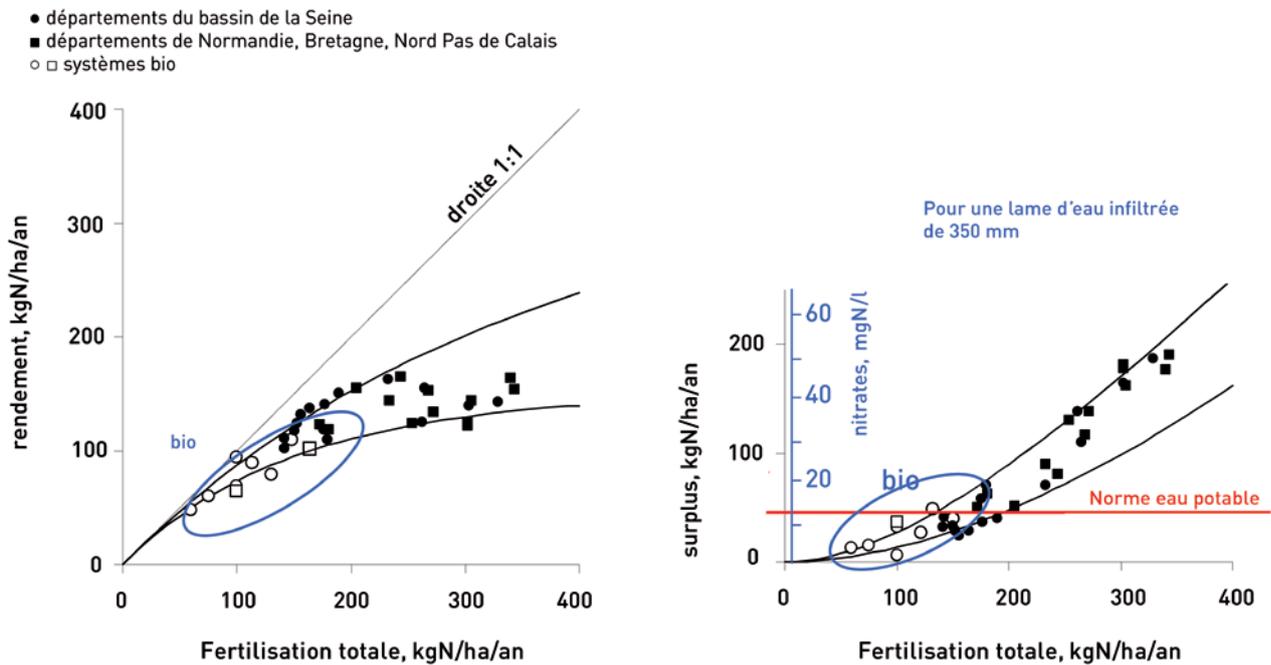


Figure 14 : a. Rendement agricole (en termes de prélèvement d'azote par la récolte) et b. pertes d'azote (surplus) pour l'ensemble des terres arables des différents départements du nord de la France en fonction de la fertilisation totale qui leur est appliquée. Sur la même figure sont portées les données comparables relatives à quelques exploitations d'agriculture biologique. La ligne rouge représente la norme de 50 mgNO<sub>3</sub>/l.

L'agriculture biologique désigne un ensemble de pratiques obéissant à un cahier des charges précis dont la principale exigence est d'exclure le recours aux engrais de synthèse, aux pesticides et aux organismes génétiquement modifiés. Un cahier des charges national existe en France, auquel s'est substitué depuis 2007 un cahier des charges européen.

L'obtention du label correspondant est conditionné à des contrôles très rigoureux. Les deux contraintes principales de l'agriculture biologique - se passer des engrais azotés minéraux et des produits antiparasitaires de synthèse -, imposent en général la mise en place de rotations culturales longues et complexes alternant céréales et légumineuses, dont la fixation biologique d'azote atmosphérique est à l'origine de l'essentiel de la fertilisation azotée des autres cultures, soit par apport d'engrais vert\*, soit par le détour de l'alimentation animale et l'épandage du fumier.

En ce qui concerne l'élevage, le cahier des charges impose une proportionnalité de la taille du cheptel et de la surface de terres, de façon à ne pas dépasser une production d'effluents animaux correspondant à 170 kgN/ha/an. L'alimentation des animaux doit privilégier l'herbe et se faire avec des produits issus de l'exploitation agricole elle-même, ou d'autres exploitations biologiques de la même région, même si des dérogations peuvent être obtenues dans certains cas, autorisant jusqu'à 40% d'alimentation non bio ou non locale.

Le bilan d'azote de deux exploitations biologiques, l'une en grande culture, l'autre en polyculture élevage, est schématisé (Figure 15).

L'objectif du « Plan Agriculture Biologique Horizon 2012 » issu du « Grenelle de l'environnement » est de faire passer de 2 à 6% la part de l'agriculture biologique dans la SAU en France (de 0,8% à 2,4% en 2013 en Île-de-France).

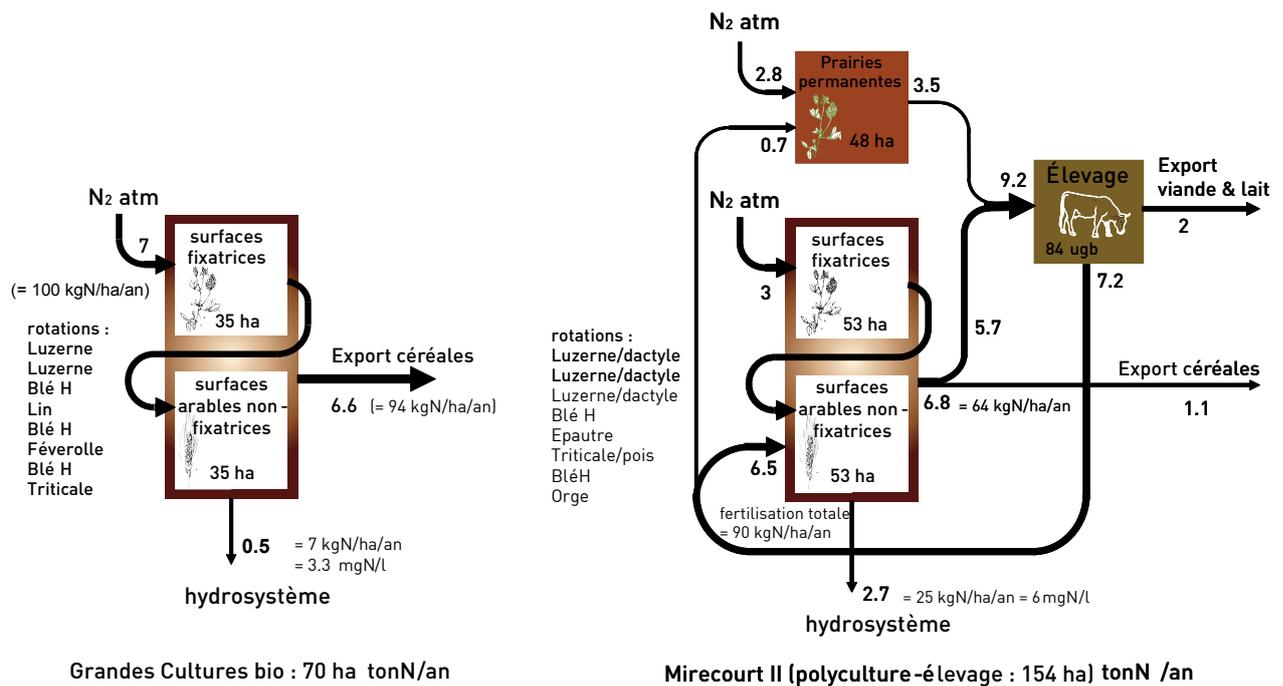


Figure 15 : Fonctionnement biogéochimique de deux exploitations types d'agriculture biologique.

À gauche : une exploitation de grandes cultures sans élevage en Brie.

À droite : une exploitation de polyculture-élevage en Lorraine.

Source : enquêtes directes, et Barataud et al, in prep



## Les émissions d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et d'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) par l'agriculture

Les sols agricoles ne perdent pas seulement de l'azote réactif par lessivage vers l'hydrosystème, ils en émettent aussi vers l'atmosphère, principalement sous forme d'ammoniac ou d'oxyde nitreux.

La volatilisation de l'ammoniac a surtout lieu lors de l'épandage ou de la manipulation des déchets animaux ; les bâtiments d'élevage sont aussi une source importante d'émission d'ammoniac vers l'atmosphère. Une faible partie de l'ammoniac émis, s'il n'est pas rapidement réabsorbé par la végétation alentour ou redéposé avec les gouttelettes de pluie, peut former, avec des nitrates ou des sulfates, des aérosols qui sont alors susceptibles d'un transport atmosphérique à longue distance. L'ammoniac

contribue ainsi pour une part importante (30-70 %) à la pollution de l'air par les particules fines ( $<2,5 \mu\text{m}$ ) qui représentent une menace réelle pour la santé humaine : on estime à 6-12 mois la réduction moyenne d'espérance de vie liées à ces particules fines en Europe.

En moyenne annuelle, les mesures directes d'émission de  $\text{N}_2\text{O}$  par les sols arables du bassin de la Seine montrent des valeurs de l'ordre de 0,5 à 1  $\text{mgN-N}_2\text{O/m}^2/\text{jour}$ , tandis que les sols de prairie ou de forêt montrent des valeurs respectivement de 0,2 et 0,15. Compte tenu de la répartition de l'usage des sols, la figure 16 montre la répartition de ces émissions dans le bassin.

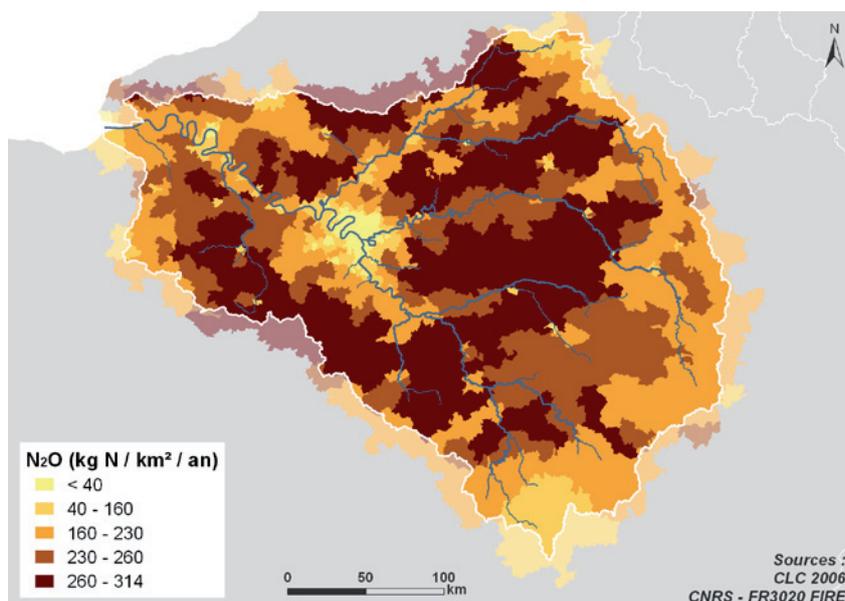


Figure 16 : Distribution géographique des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  par les sols du bassin de la Seine (Garnier et al 2009b).

Il s'agit là seulement des émissions directes de  $\text{N}_2\text{O}$ , à savoir celles directement produites par les sols agricoles de plateau. Des émissions beaucoup plus intenses ont lieu dans les zones de bas de pente, caractérisées par une humidité plus grande des sols, à cause de la proximité des nappes, ou dans les zones humides qui bordent les rivières, surtout si celles-ci sont fertilisées (figure 17).

L'ensemble des émissions qui ont lieu secondairement dans les zones humides où parviennent les nitrates de l'agriculture et dans les rivières elles-mêmes, sont désignées comme des émissions indirectes et ont été évaluées à environ 10% des émissions directes (Garnier et al., 2009).

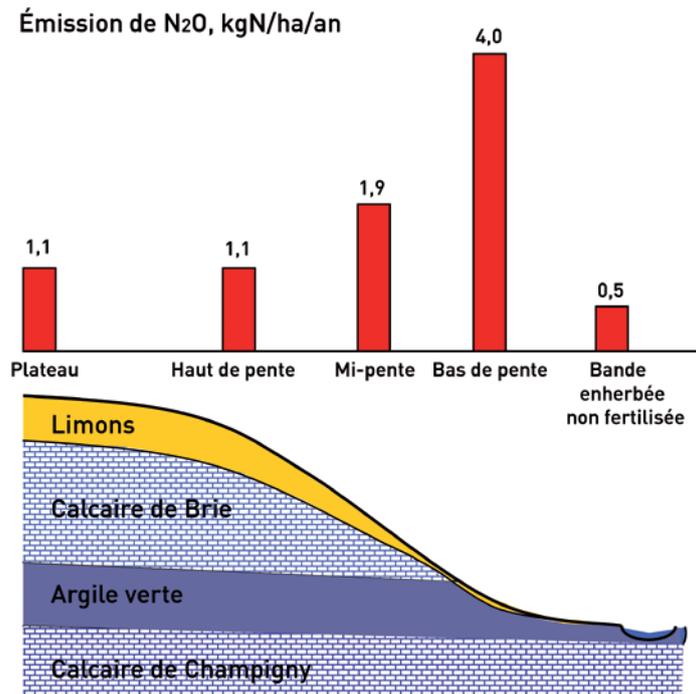


Figure 17 : Émission moyenne annuelle de N<sub>2</sub>O le long d'un transect plateau-rivière en Brie (Vilain, 2010).

LES NOTIONS CLÉS

## Le N<sub>2</sub>O, un gaz à effet de serre

L'oxyde nitreux également appelé protoxyde d'azote ou hémioxyde d'azote de formule N<sub>2</sub>O est un gaz incolore.

Il est classifié comme polluant par le protocole de Kyoto, étant le quatrième plus important gaz à effet de serre à contribuer au réchauffement de la planète, et le principal gaz à effet de serre produit par l'agriculture. Son importance est liée à son pouvoir de réchauffement global 25 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub>.

Les émissions d'oxyde nitreux des sols agricoles sont liées aux processus de dénitrification et de nitrification. Le N<sub>2</sub>O est un composé intermédiaire de la dénitrification quand l'anaérobiose\* est incomplète, en raison de conditions non optimales empêchant alors une dénitrification jusqu'au stade N<sub>2</sub>. De même, une nitrification incomplète de l'ammonium, quand l'oxygène vient à manquer, donne lieu à une production intermédiaire de N<sub>2</sub>O. Ces émissions de N<sub>2</sub>O sont particulièrement importantes après une pluie de printemps sur les terres fertilisées, mais aussi après celles de l'automne, ainsi qu'au moment du dégel des sols (Vilain et al., 2010).

## Transferts et rétention d'azote dans le réseau hydrographique

Les teneurs moyennes en nitrates mesurées en hiver dans les petits ruisseaux du bassin de la Seine reflètent bien évidemment celles des eaux sous-racinaires\* qui les alimentent. Ainsi, la teneur médiane en nitrates des ruisseaux drainant exclusivement des zones forestières est de 0,5 mgN/l (Thibert, 1996), tandis que celle des ruisseaux drainant des bassins agricoles dépasse le plus souvent 5 mgN/l. D'une manière générale pourtant, les teneurs en nitrates effectivement mesurées dans les petits ruisseaux agricoles sont sensiblement inférieures à celles calculées à partir de l'occupation des sols de leur bassin versant et des teneurs mesurées dans les eaux sous-racinaires (figure 18). Elle ne s'en rapproche que dans le cas de bassins versants agricoles équipés d'un réseau de drainage.

On peut donc penser que cette différence résulte des processus de rétention ou d'élimination qui se déroulent dans les milieux qui bordent les rivières avant que l'eau de la zone sous-racinaire du sol ou de la nappe n'en atteigne le cours. La mesure de la composition isotopique\* naturelle des nitrates de l'eau des ruisseaux agricoles vient confirmer cette interprétation (voir encadré). Le bilan d'azote sur un petit bassin versant agricole en Brie et les mesures isotopiques montrent bien que les zones de bas de pente où les eaux souterraines viennent en contact avec la partie supérieure, biogéochimiquement la plus active des sols, agissent comme des zones de dénitrification intense qui éliminent, plus qu'elles ne retiennent, une part significative des nitrates issus du lessivage des sols agricoles (figure 19).

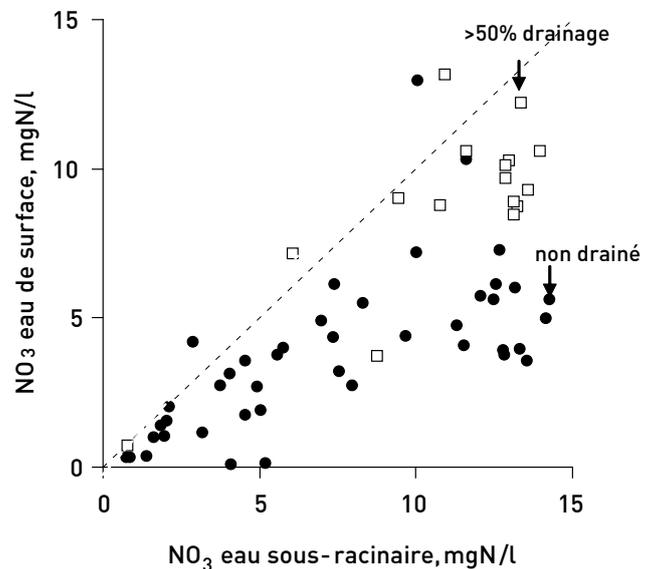


Figure 18 : Concentration en nitrate mesurée dans l'eau de petits ruisseaux agricoles comparée aux concentrations des eaux sous-racinaires qui les alimentent. Les carrés blancs représentent des ruisseaux en zone agricole drainées à plus de 50%. Sauf pour ces derniers, la concentration en nitrate des cours d'eau apparaît souvent largement inférieure à celle des eaux sous-racinaires (Billen et al, 1990).

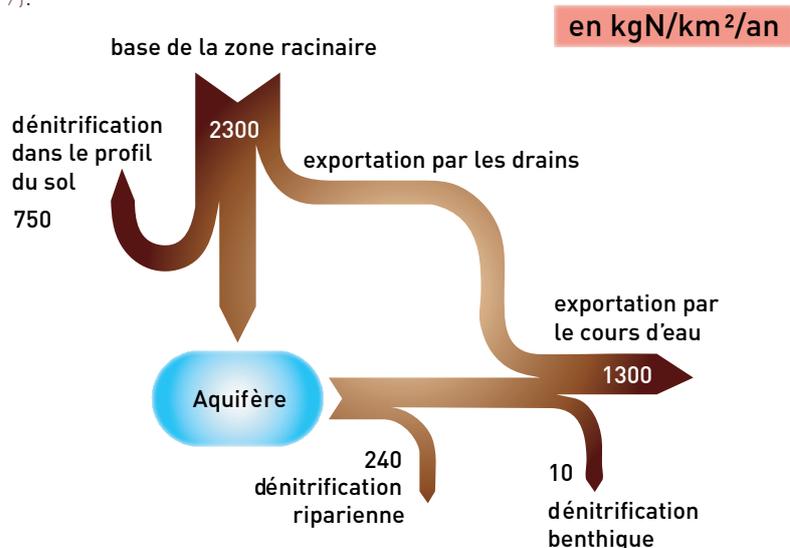


Figure 19 : Bilan d'azote d'un petit bassin agricole en Brie (ruisseau des Avenelles, ordre 2) (Billy et al., 2008).

Dans le réseau hydrographique lui-même, le processus de dénitrification qui, sauf si la colonne d'eau du cours d'eau est gravement appauvrie en oxygène, a lieu surtout dans les sédiments, est encore susceptible de réduire la teneur en nitrates des eaux. Le fond des cours

d'eau, et plus encore celui des milieux stagnants comme les mares, étangs, lacs ou réservoirs agissent comme des 'pompes' à nitrate et éliminent par dénitrification jusqu'à 20 mgN/m<sup>2</sup>/h, comme le montrent les mesures effectuées à l'aide de cloches benthiques (figure 20).

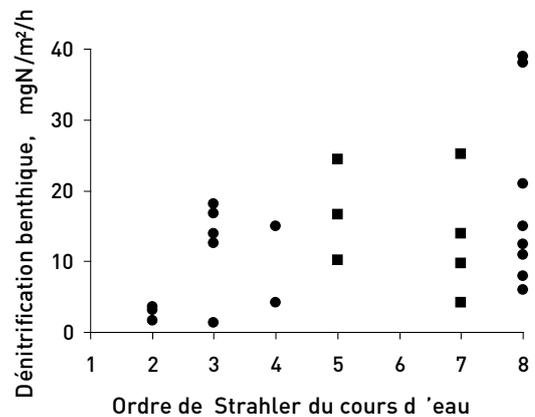
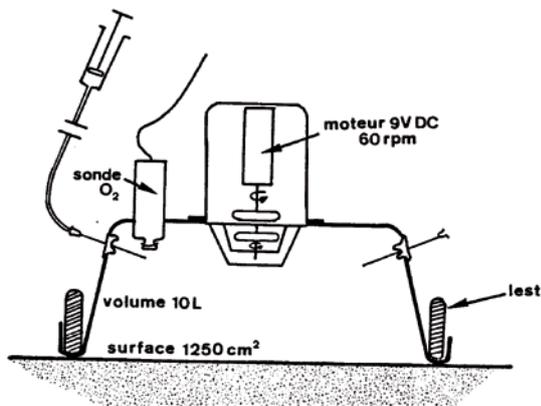


Figure 20 : a. Cloches benthique permettant la mesure des flux de dénitrification benthique. b. Taux de dénitrification benthique mesuré dans divers cours d'eau (●) et milieux stagnants (■) (mares, lacs de barrage, bras morts connectés...) du bassin de la Seine.

Cet effet est surtout important lorsque le temps de séjour des masses d'eau est long et que la profondeur est faible. La présence d'étangs qui allongent le temps de passage des masses d'eau, ou les grands

barrages-réservoirs où l'eau séjourne plusieurs mois (Garnier et al., 1999 ; 2000), sont ainsi des lieux de rétention (élimination) des nitrates (figure 21).

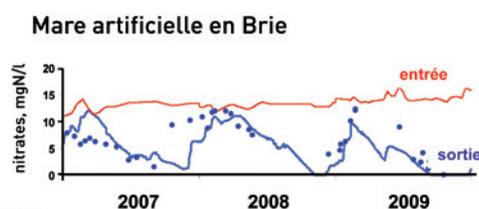
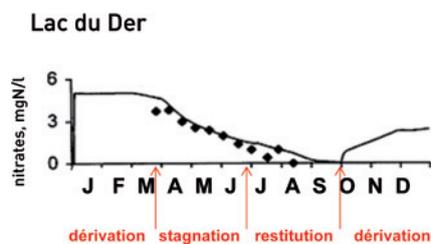


Figure 21 : Le rôle des milieux stagnants sur la réduction des teneurs en nitrates des cours d'eau. a. Le Lac du Der : évolution de la teneur en nitrates des eaux stockées. b. Une mare artificielle en Brie, collectant les eaux drainées d'une exploitation agricole de 35 ha : évolution de la concentration en nitrates à l'entrée et à la sortie.



## LES ISOTOPES DE L'AZOTE ENREGISTRENT LA DÉNITRIFICATION

L'azote existe sous deux formes isotopiques stables dans la nature :  $^{14}\text{N}$  et  $^{15}\text{N}$ .

La composition du diazote atmosphérique, qui compte 99,64 % de  $^{14}\text{N}$  et 0,36 % de  $^{15}\text{N}$  est prise comme référence. La mesure de la composition isotopique naturelle de l'azote de la matière organique des sols et des nitrates des eaux offrent un moyen indirect d'évaluer l'importance que jouent les processus de dénitrification au cours de la cascade de l'azote. En effet, les processus de dénitrification, comme celui de la volatilisation de l'ammoniac, parce qu'ils convertissent l'azote en une forme gazeuse, sont très légèrement plus rapides lorsqu'ils se produisent sur l'isotope  $^{14}\text{N}$  que sur le  $^{15}\text{N}$ . Il en résulte un léger enrichissement des espèces réactives résiduelles, parfaitement détectable par spectrométrie de masse\*.

Ainsi, les nitrates qui rejoignent les rivières après passage à travers une zone humide riparienne, siège d'une dénitrification significative, gardent la signature de ce processus d'élimination par une composition enrichie en isotope lourd ( $^{15}\text{N}$ ) par rapport à la composition initiale des nitrates des eaux souterraines qui sont à leur source.

De la même façon, la matière organique des sols agricoles montre généralement une composition isotopique significativement supérieure à celle des engrais azotés ou de l'azote atmosphérique fixé par les légumineuses, à cause de l'effet cumulatif des pertes gazeuses liées à la dénitrification et à la volatilisation de l'ammoniac. Cet enrichissement isotopique est particulièrement marqué dans les zones de bas de pente favorables à la dénitrification. À titre d'ordre de grandeur, on estime environ à 10 kgN/ha/an l'intensité moyenne de dénitrification nécessaire pour expliquer un enrichissement de 1 ‰ de la matière organique du sol par rapport à la composition de l'atmosphère (Billy et al., 2010).

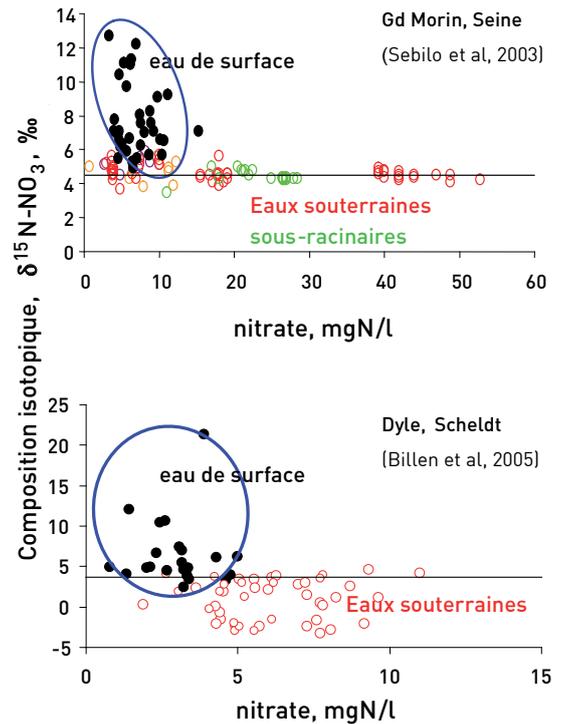


Figure 22 : Composition isotopique des nitrates dans les eaux de petits ruisseaux agricoles et des eaux souterraines dont elles sont issues.

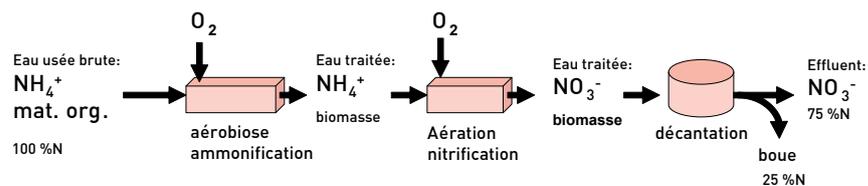


## LA DÉNITRIFICATION DES EFFLUENTS URBAINS

Le traitement biologique le plus conventionnel des eaux usées consiste à laisser des bactéries minéraliser la matière organique présente dans ces eaux dans un réacteur aéré. L'essentiel de l'azote présent dans les eaux usées se retrouve alors sous forme d'ammonium, une petite partie étant séquestrée dans la biomasse des bactéries que l'on récupèrera par décantation sous forme de boues. Dans certains cas, le traitement s'arrête à cette étape : l'azote présent dans les eaux usées est alors rejeté à 70-80 % à la rivière sous forme minérale et réductrice, tandis que seuls 20 à 30 % sont retenus avec les boues.

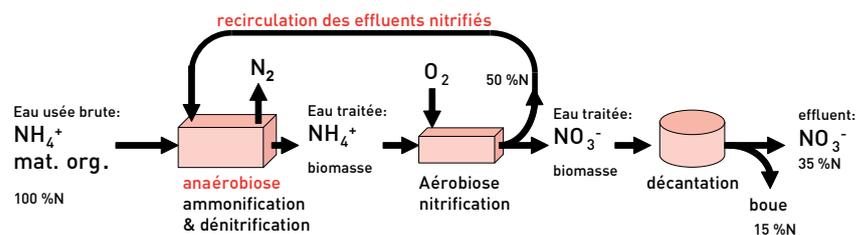
Si l'aération est prolongée, la nitrification de l'ammonium produit peut avoir lieu : les performances de rétention de l'azote sont toujours de 20-30 % mais l'azote est rejeté sous sa forme nitrique oxydée.

### Traitement biologique conventionnel (secondaire)



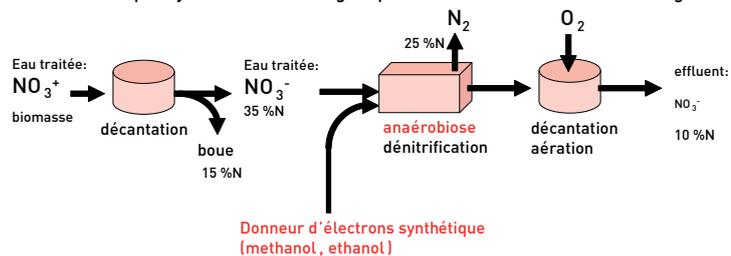
Dans certains ouvrages d'épuration, les effluents nitrifiés sont en partie recyclés en tête de traitement et mélangés avec l'eau usée non traitée. On ne les aère pas à cette étape, de manière à permettre une dégradation anaérobie de la matière organique qui se fait alors aux dépens du pouvoir oxydant des nitrates, réduits en azote gazeux. La charge azotée de la partie des effluents recyclée est alors éliminée. Le traitement se poursuit en aérobie et l'ensemble de la chaîne permet de retenir près de 65 % de l'azote présent dans les eaux usées brutes.

### Dénitrification par recirculation (traitement tertiaire)



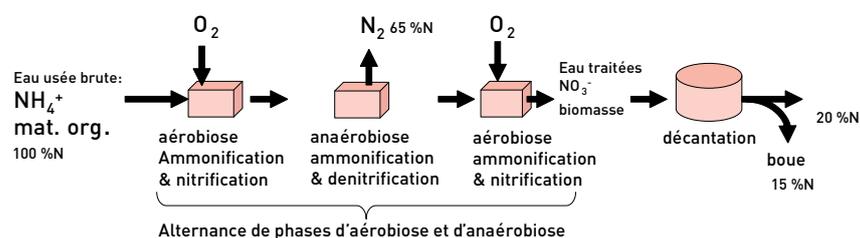
Pour aller plus loin dans l'élimination de l'azote, certaines stations d'épuration réalisent une étape ultime de dénitrification en ajoutant un produit organique comme le méthanol ou l'éthanol destiné à permettre de retrouver des conditions anaérobies et permettre la dénitrification.

### Dénitrification par ajout de substrat organique (traitement tertiaire en fin de ligne)



Enfin, les stations les plus modernes réalisent une alternance de traitements aérobie et anaérobies pour permettre successivement la nitrification et la dénitrification.

### Traitement biologique dénitrifiant intégré



## La gestion de l'azote alimentaire urbain

Du point de vue du cycle de l'azote, une grande ville comme Paris agit sur les territoires ruraux proches ou lointains qui l'alimentent comme une pompe à protéines, stimulant dans ces territoires la production d'excédents agricoles commercialisables et concentrant vers elle un flux d'azote considérable. Chaque habitant urbain consomme en effet aujourd'hui plus de 8 kgN/an sous forme de produits céréaliers (17 %), de produits animaux (69 %) et de fruits et légumes (14 %).

Près d'un tiers de cet azote rejoint les déchets solides urbains (voir fascicule PIREN-Seine n°1) ; le reste est effectivement ingéré et se retrouve sous forme d'excréments dans les eaux résiduaires urbaines. Depuis la mise en vigueur du tout à l'égout, et jusqu'à une période encore récente, l'azote contenu dans les eaux usées, s'il n'était pas rejeté intégralement aux rivières, n'était que très partiellement retenu par les stations d'épuration : seules les boues d'épuration

retenaient une fraction de l'azote, représentant un maximum de 25 % de la charge entrante, sous forme de biomasse microbienne susceptible d'un retour à l'agriculture par épandage. Le reste, minéralisé en ammonium, éventuellement nitrifié, était rejeté dans le milieu aquatique avec les effluents traités. La Directive Européenne sur les Eaux Résiduaires Urbaines de 1991, fait maintenant obligation aux agglomérations de plus de 10 000 habitants dans les zones dites sensibles à l'eutrophisation de procéder à un traitement spécifique destiné à retenir l'azote et le phosphore. Ce traitement, dit tertiaire, fait appel au processus de dénitrification [voir Notions clés : la dénitrification des effluents urbains, page 29]. Si la majeure partie de l'azote ainsi 'retenu' est en fait rendu à l'atmosphère sous forme de  $N_2$ , il se produit malheureusement aussi des émissions significatives de  $N_2O$ , liées à des conditions sub-optimales d'oxygénation qui s'établissent lors du processus.

## Émissions d'oxydes d'azote par le trafic routier et l'industrie

Tous les processus de combustion à haute température, comme dans les moteurs à explosion, dans les centrales électriques thermiques ou les chaudières, s'accompagnent d'une certaine fixation chimique du diazote atmosphérique sous forme d'oxydes d'azote ( $NO$ ,  $NO_2$ ).

Le trafic routier est à l'origine de la plus grande partie des émissions d'oxyde d'azote. Les progrès accomplis dans la technologie des pots catalytiques a permis de limiter les émissions de  $NO_x$  des voitures particulières à essence à 1 g N par km parcouru, mais ce n'est pas le cas des véhicules au diesel, les poids lourds émettant en moyenne 8,5 g N/km.

Au total, les émissions de  $NO_x$  en région Île-de-France, évaluées à 115 ktonnes N/an, se répartissent comme suit (AirParif, 2005) :

Trafic automobile particulier :	24 %
Trafic de marchandises :	28 %
Résidentiel et tertiaire :	20 %
Production d'énergie :	7 %
Plateformes aéroportuaires :	6 %
Industrie manufacturière :	6 %
Traitement des déchets :	5 %
Agriculture :	4 %

Ces oxydes d'azote, instables, subissent des réactions complexes dans l'atmosphère, aboutissant à leur oxydation en acide nitrique et à la formation d'ozone troposphérique. Ils contribuent ainsi largement à la pollution atmosphérique urbaine, et en particulier aux affections respiratoires dans les grandes agglomérations. Transportés sur de longues distances, les nitrates formés finissent par retomber au sol sous forme de particules fines ou de pluies acides.

Les retombées atmosphériques d'azote oxydé sur le bassin de la Seine s'élevaient ainsi en moyenne à 5,5 kgN/ha/an avec des maximums pouvant aller jusqu'à plus de 10 kgN/ha/an (Billen et al., 2009). De telles valeurs de dépôt ne sont pas sans effets, surtout lorsqu'elles concernent des écosystèmes naturels qui se retrouvent ainsi 'fertilisés' non intentionnellement, modifiant considérablement les conditions d'existence

des espèces sauvages. Ces retombées représentent en conséquence une cause majeure de perte de biodiversité dans les écosystèmes naturels. En particulier, les sites Natura 2000, qui devraient être protégés de toute altération humaine, se voient en fait soumis à cette pression majeure comme tous les autres sites du bassin (figure 23).

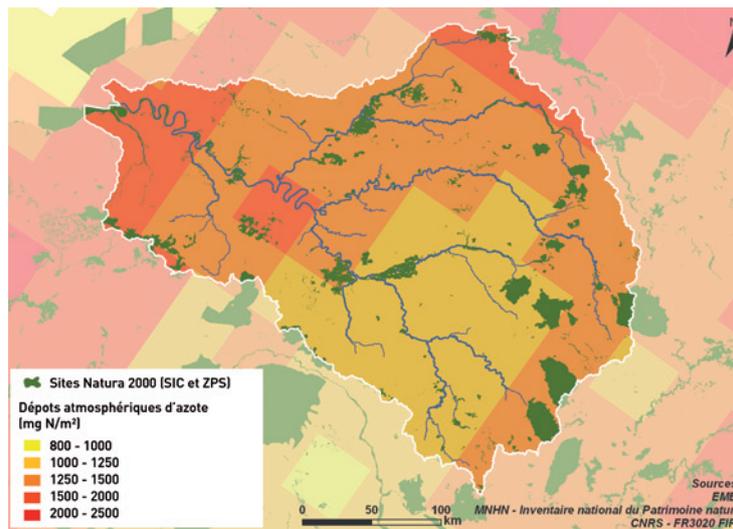


Figure 23 : Retombées totales d'azote dans le bassin de la Seine, et localisation des sites Natura 2000.

## L'apport d'azote au milieu marin côtier et son eutrophisation

Les flux d'azote amenés par le fleuve au milieu marin côtier modifient également les conditions de développement des algues planctoniques qui sont à la base des chaînes trophiques\* marines. Ces algues dépendent en effet pour leur croissance de l'apport par les rivières des nutriments essentiels que sont l'azote, le phosphore et la silice. Tant qu'un certain équilibre est respecté dans la proportion de ces apports (la silice étant d'origine naturelle), ceux-ci ne peuvent être que bénéfiques pour la vie marine et la production halieutique.

Cependant, les apports anthropiques d'azote sont désormais largement excédentaires par rapport aux quantités de phosphore et surtout de silice

qui les accompagnent. Les algues siliceuses (les diatomées), qui constituent la flore naturelle et la plus utile pour l'alimentation du zooplancton, lui-même consommé par les poissons, se trouvent alors carencées en silice, et ne peuvent utiliser l'excédent d'azote apporté. Les diatomées sont alors remplacées par d'autres algues, non siliceuses, et souvent inconsommables, voire toxiques, qui profitent des apports d'azote des rivières. Leur prolifération, non contrôlée par les consommateurs zooplanctoniques naturels, donne lieu à divers dysfonctionnements qui caractérisent le phénomène d'eutrophisation côtière : production de toxines empoisonnant les coquillages, accumulation de mousses sur les plages, anoxie des eaux profondes (voir fascicule n°6, L'eutrophisation des cours d'eau).

# Bilan d'azote du bassin de la Seine et scénarios futurs



Pour évaluer à l'échelle du bassin de la Seine l'ampleur de la perturbation du cycle de l'azote, il faut établir le bilan des apports d'azote réactif liés aux activités humaines sur ce territoire. Certains de ces apports sont intentionnels et résultent du développement de la population urbaine et de la demande alimentaire qu'elle exerce sur l'agriculture. Mais une grande partie des flux d'azote qui caractérise le système Seine est contre-productif et responsable d'une dégradation préoccupante de la qualité de l'air et d'une contamination nitrique grandissante des ressources en eau. À partir de ce constat, l'enjeu est d'identifier des solutions réalistes pour endiguer les émissions d'azote réactif dans l'environnement



## La mesure de l'enrichissement en azote du bassin de la Seine

Une mesure de la perturbation du cycle de l'azote d'un territoire donné est fournie par la valeur de la somme des apports nets anthropogéniques d'azote réactif associés à l'activité humaine : le NANI (*Net Anthropogenic Nitrogen Input*) ou apport anthropique net d'azote réactif (Howarth et al., 1996, 2010 ; Boyer et al ; 2002). Le NANI (figure 24) représente la somme des apports à ce territoire d'azote d'origine humaine :

- par l'épandage d'engrais azotés synthétiques,
- par la fixation d'azote atmosphérique des cultures de légumineuses,
- par le bilan du dépôt et des émissions atmosphériques d'azote,
- par le bilan des importations et exportations de produits alimentaires pour l'homme et le bétail.

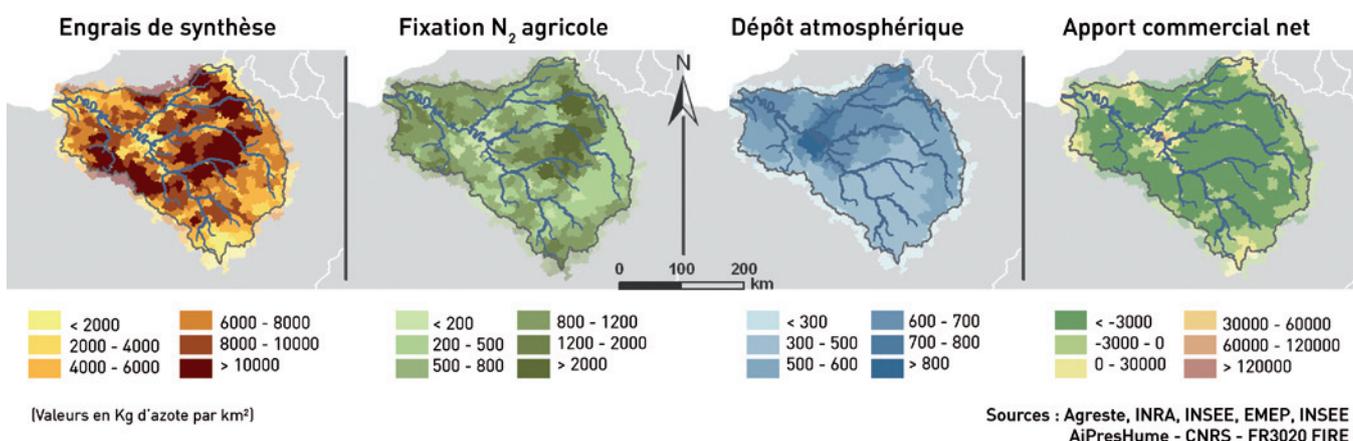


Figure 24 : Les apports anthropogéniques d'azote au bassin de la Seine : apports annuels d'engrais synthétiques, fixation symbiotique, dépôt atmosphérique et apport commercial net d'azote dans la nourriture et le foin.

Les statistiques agricoles fournissent les chiffres permettant d'estimer les deux premières composantes des NANI.

Les données de différents réseaux de mesure des retombées atmosphériques (par ex. EMEP, Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) (<http://www.emep.int/>) permettent d'estimer la troisième. Pour de vastes territoires comme le bassin de la Seine, on fait souvent l'approximation que les retombées d'azote réduites sont entièrement le résultat des émissions locales liées aux activités d'élevage et d'épandage des engrais organiques, l'ammoniac n'étant pas transporté sur de longues distances. Seules sont donc prises en considération les données de retombées atmosphériques d'azote oxydé (NO<sub>x</sub> et NO<sub>3</sub>-), dues à l'activité urbaine et au trafic routier après un transport sur de longues distances.

Enfin, la dernière composante des NANI consiste dans le bilan des échanges commerciaux de produits agricoles avec l'extérieur. Nous avons défini comme autotrophe, (Billen et al., 2007) un bassin qui produit plus de biens agricoles (exprimées en N contenu) que n'en consomment localement la population et le cheptel animal, et qui exporte le surplus. À l'inverse, un territoire dont la population et le cheptel consomment plus de biens agricoles qu'il n'en produit est un système hétérotrophe, qui doit importer une part de ses ressources alimentaires. Une ville est par essence un système hétérotrophe ; certaines régions d'élevage intensif le sont aussi.

Le bilan de la production agricole totale et de la consommation locale permet donc de définir le caractère auto - ou hétérotrophe d'un territoire et de calculer le bilan de ses échanges commerciaux d'azote (figure 25).

# MESURER et AMÉLIORER

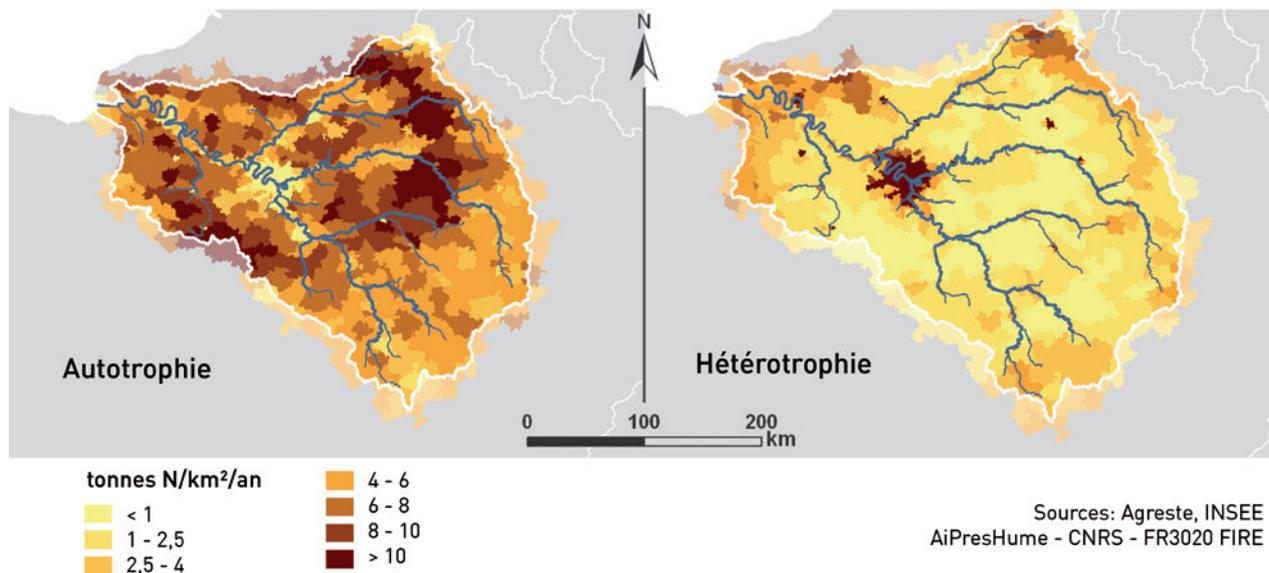


Figure 25 : Autotrophie et hétérotrophie du bassin de la Seine.

Appliquée au bassin de la Seine, et aux autres bassins européens, l'évaluation des NANI montre que ce bassin ne compte globalement pas parmi les plus enrichis en azote d'Europe (figure 26a). Un regard sur les différentes composantes des NANI en montre la raison : si le territoire de la Seine reçoit une quantité d'engrais de synthèse considérable, les exportations commerciales d'azote, en grande partie sous

forme de céréales, sont parmi les plus importantes d'Europe. Ces exportations, venant en déduction des autres postes du NANI, expliquent la faible valeur de cet indicateur. La répartition du NANI à plus fine résolution dans le bassin de la Seine révèle que les zones urbaines et les zones d'élevage sont celles qui reçoivent les plus importantes quantités d'azote anthropogéniques (figure 26b).

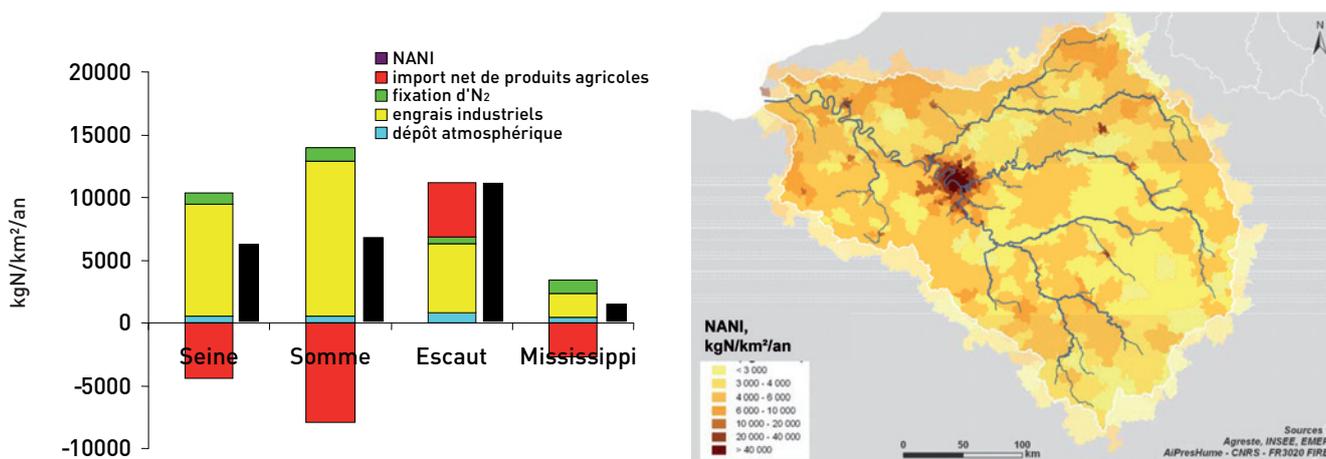


Figure 26 : a. Histogramme des 4 composantes du NANI dans le bassin de la Seine et dans quelques autres bassins typiques. b. Distribution géographique des NANI dans le bassin de la Seine.

La mesure du flux d'azote total exporté par la Seine à son exutoire (à Poses) est un autre indicateur du degré d'enrichissement du bassin versant. La moyenne actuelle, fortement dépendante des conditions hydrologiques, est de 1 950 kgN/km<sup>2</sup>/an. Cette valeur a fortement augmenté au cours des 50 dernières années (figure 27). Ce chiffre reste cependant très inférieur à celui des apports nets au bassin versant (NANI), soit 5965 kgN/km<sup>2</sup>/an. Cette différence indique

que, du total des apports anthropiques d'azote au bassin, seule une fraction avoisinant les 20 %, est transférée par l'hydrosystème jusqu'à la mer. Le reste est soit stocké dans certains compartiments du système Seine (les sols, la végétation, les aquifères\*, etc.), soit éliminé par le processus de dénitrification microbienne vers l'atmosphère sous forme de diazote ou d'autres formes réactives d'azote gazeux (N<sub>2</sub>O par exemple).

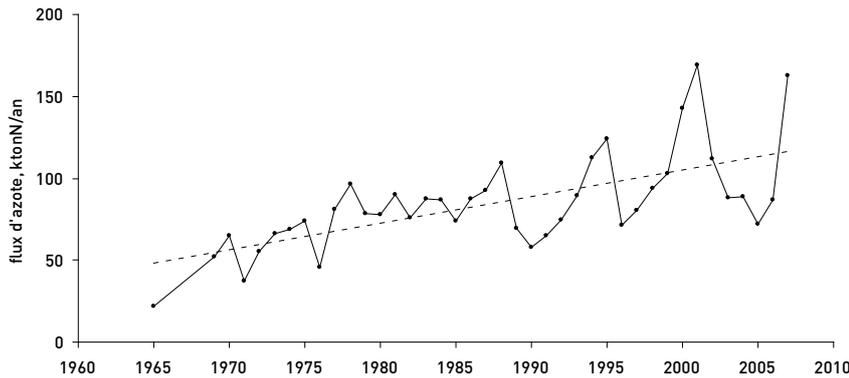


Figure 27 : Évolution à long terme du flux d'azote exporté par la Seine à Poses. Les variations interannuelles suivent étroitement celles du débit. Il s'y superpose une tendance d'augmentation à long terme, correspondant à une multiplication par 2,5 depuis 1965.

## Les relations ville-campagne : moteur du cycle anthropique de l'azote

Le bassin de la Seine a la particularité de rassembler sur un même territoire une métropole de plus de 10 millions d'habitants, comme il n'en existe que quelques unes en Europe, et une des zones agricoles de grandes cultures parmi les plus productives du monde. Le territoire du bassin de la Seine est donc un lieu singulier d'interactions entre la ville et l'agriculture.

### L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE ET SON HINTERLAND\* NOURRICIER

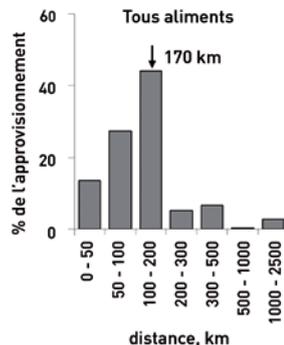
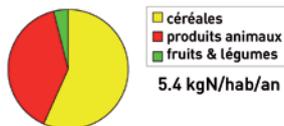
Historiquement, jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, le développement de Paris a été accompagné par celui de l'agriculture du territoire rural du bassin de la Seine dont la capacité d'exportation a longtemps suivi la demande alimentaire de la capitale. Le même hinterland, un cercle de 150 km de rayon autour de la ville, suffisait à assurer l'essentiel de son approvisionnement, malgré le décuplement de sa population (figure 27). La généralisation de l'agriculture

industrielle, dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, a conduit à un accroissement sans précédent de la productivité des grandes cultures céréalières, et à une spécialisation géographique extrême de l'activité agricole qui a repoussé l'élevage vers les territoires périphériques du bassin de la Seine, particulièrement vers le Grand Ouest.

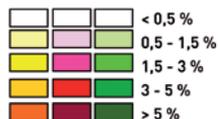
Combinée à un accroissement sensible de la part des protéines animales dans le régime alimentaire humain (près de 70 % de protéines animales en moyenne en France en 2010 contre 40 % au début du XIX<sup>e</sup> siècle), cette spécialisation territoriale a conduit à étendre l'aire principale d'approvisionnement alimentaire de Paris sur un grand quart nord-ouest de la France (figure 28). Ce territoire produit plus de 70 % de la consommation de l'agglomération parisienne (en plus de celle des autres grandes villes qu'il comporte), les 30 % restant provenant pour moitié de divers départements français et de l'étranger. Le seul bassin de la Seine n'assure plus quant à lui que 54 % des besoins de l'agglomération parisienne, mais 63 % des besoins en protéines végétales.

# MESURER et AMÉLIORER

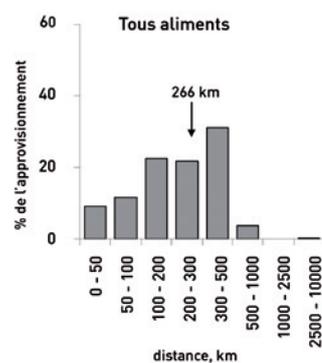
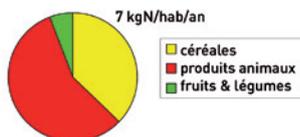
## a. Situation en 1786



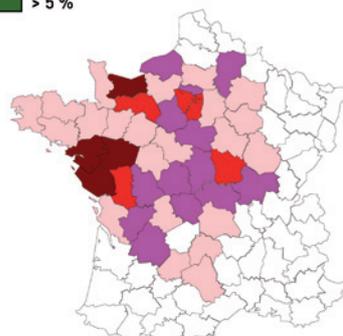
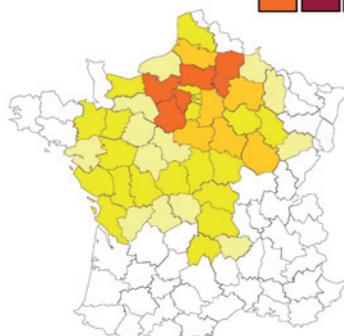
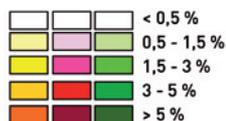
Contribution à l'approvisionnement de Paris (%)



## b. Situation en 1896



Contribution à l'approvisionnement de Paris (%)



### c. Situation en 2006

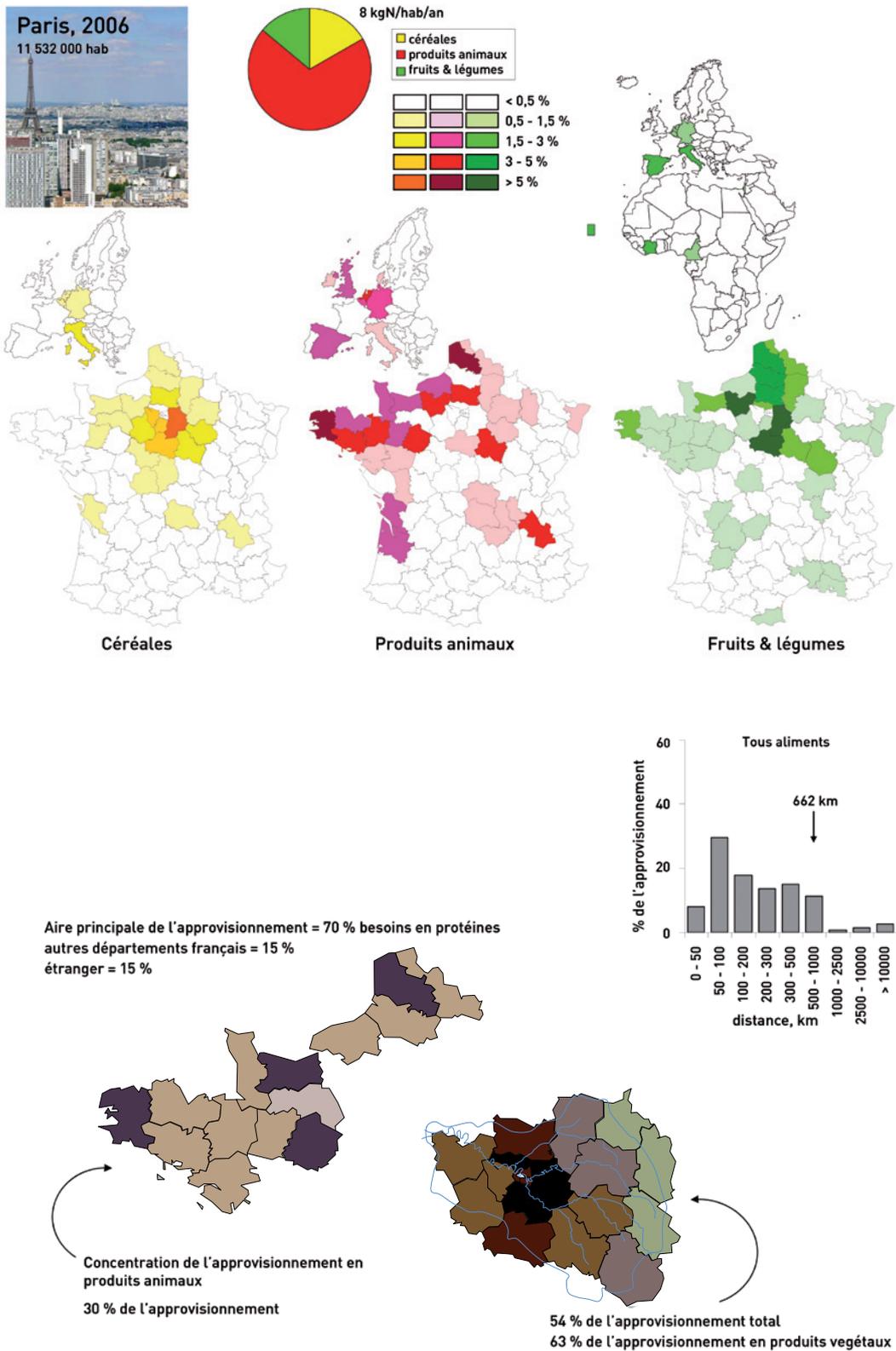


Figure 28 : Aires et distances d'approvisionnement de Paris en céréales, produits animaux et fruits et légumes a. en 1786, b. en 1896, c. en 2006 (Billen et al, 2011).

# MESURER et AMÉLIORER

Pour l'établissement du bilan d'azote actuel (figures 29 et 30), nous avons considéré séparément les départements de la partie centrale du bassin parisien qui constituent le bassin hydrographique de la Seine et les autres territoires (Bretagne, Normandie, Somme et Nord-Pas de Calais) qui contribuent à l'alimentation de Paris. Il y a là deux territoires, de dimensions semblables (respectivement 92 000 km<sup>2</sup> et 89 000 km<sup>2</sup>) mais dont le fonctionnement du système agricole est extrêmement différent.

L'agriculture du bassin versant de la Seine est surtout dominée par les grandes cultures, avec peu d'élevage et un recours très limité à la fertilisation organique, qu'elle soit d'origine animale ou végétale. Les engrais azotés de synthèse assurent l'essentiel des besoins

des plantes cultivées. La production agricole peut subvenir à l'essentiel des besoins de la population en protéines végétales qui représentent moins de 10 % de la production agricole locale. La plus grande partie de cette production, près de 5 000 kgN/km<sup>2</sup>/an, est exportée hors du bassin.

Au contraire, le faible développement de l'élevage ne permet pas d'assurer les besoins de la population en protéines animales, et le bassin importe donc 670 kgN/km<sup>2</sup>/an de produits animaux. Au rendement moyen de la conversion des protéines végétales en protéines animales en France (16%), ceci équivaut à 4190 kgN/km<sup>2</sup>/an de protéines végétales, ce qui réduit considérablement le caractère exportateur net du bassin de la Seine.

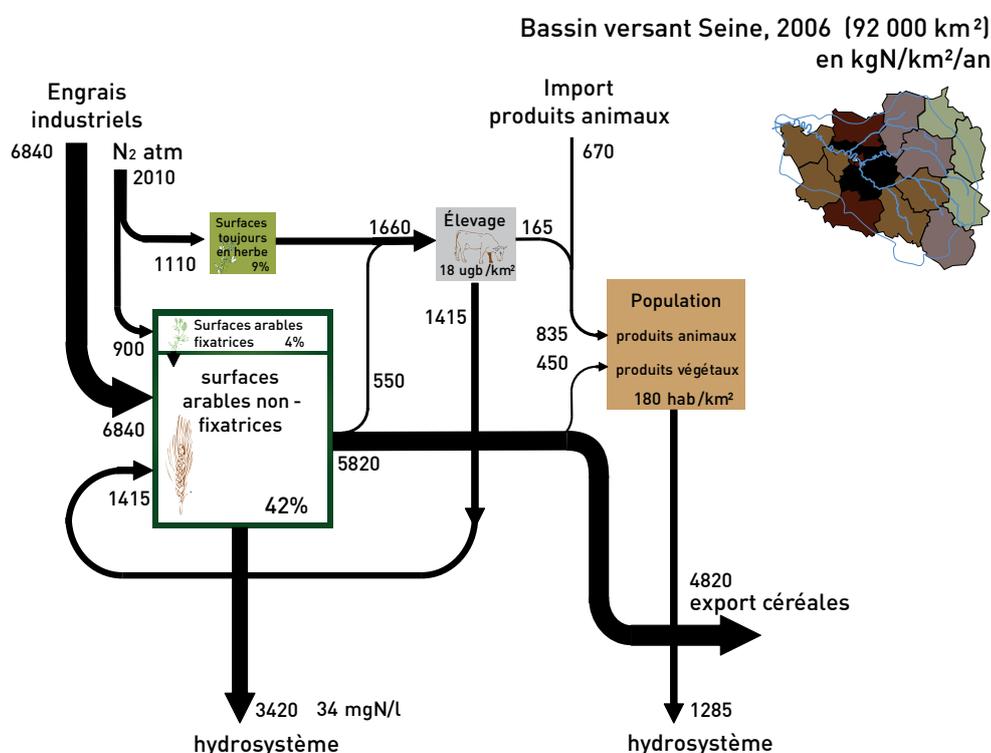


Figure 29 : Fonctionnement biogéochimique actuel (2006) exprimé en flux d'azote (en kgN/km<sup>2</sup>/an) du système agricole du bassin de la Seine.

C'est pour l'approvisionnement en protéines animales qu'intervient le territoire formé par la Bretagne, la Normandie et le Nord (BNN), qui assure la plus grande partie des besoins en viande et en produits laitiers de l'agglomération parisienne. Là, l'élevage occupe une place beaucoup plus importante, et l'alimentation du bétail, beaucoup plus nombreux que dans le bassin

de la Seine (81 UGB/km<sup>2</sup> contre 18), représente le flux d'azote le plus important du système. De surcroît, la fourniture de nourriture au bétail n'est assurée que pour un peu plus de la moitié par les cultures locales : l'importation d'aliments pour bétail, essentiellement du soja brésilien et argentin, représente une source majeure de protéines pour le cheptel.

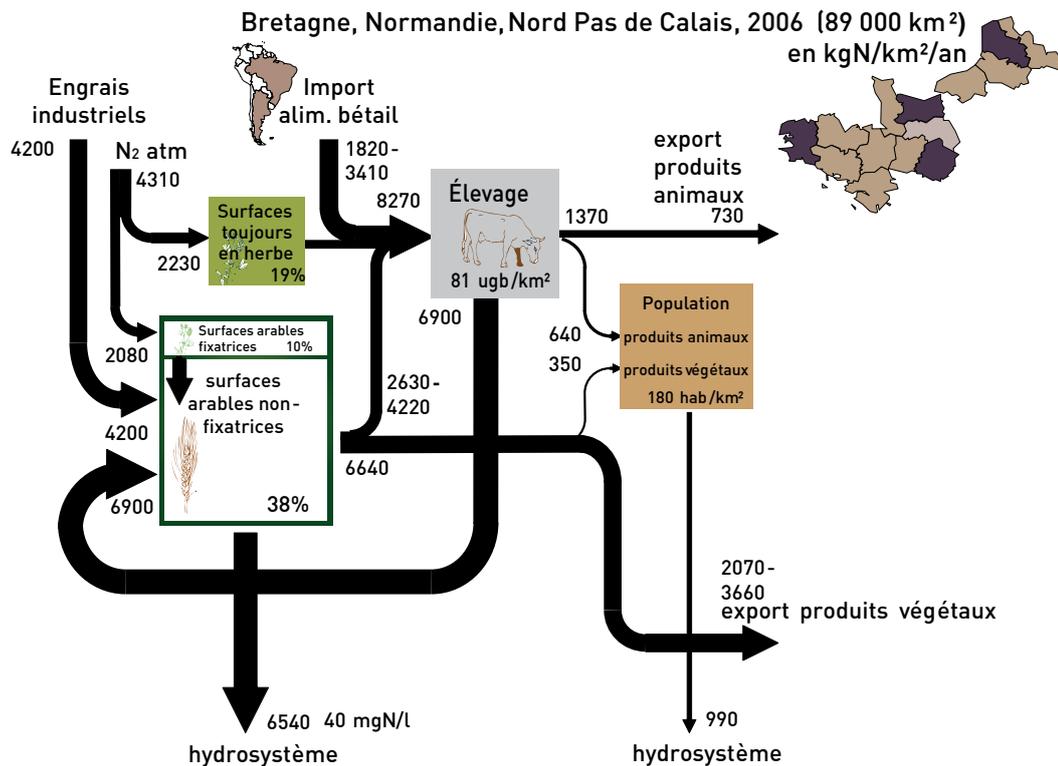


Figure 30 : Fonctionnement biogéochimique actuel (2006) exprimé en flux d'azote (en kgN/km<sup>2</sup>/an) du système agricole du bassin de la Seine.

On voit donc bien l'interdépendance de ces deux territoires, mais aussi la dépendance du second à un troisième situé en Amérique du Sud, même si une incertitude existe sur l'estimation du flux importé qui diffère selon deux méthodes utilisées. Au rendement moyen de la production de soja au Brésil et en Argentine (25 quintaux/ha/an), c'est une surface agricole pratiquement équivalente à celle du territoire BNN qui est nécessaire pour en approvisionner le bétail.

En ramenant par habitant les chiffres de ce bilan, il est possible de décomposer l'empreinte alimentaire azotée individuelle du Francilien moyen, et de définir en quelque sorte un équivalent-habitant (equ-hab) généralisé, qui représenterait les flux d'azote générés à tous les stades de la chaîne agro-alimentaire par l'alimentation d'un habitant, soit 7,3 kgN/equ-hab/an (figure 30). L'équivalent-habitant classiquement considéré comme représentatif de la charge azotée individuelle dans les eaux usées urbaines est

de 15 gN/equ-hab/jour ou 5,4 kgN/equ-hab/an. La différence avec le chiffre de la consommation brute totale de 8 kgN/equ-hab/an est une estimation de la production de déchets solides générés entre l'approvisionnement en produits agricoles bruts et la consommation finale effective. Ces pertes de l'ordre de 20-30%, sont en effet des valeurs citées par plusieurs études qui se sont intéressées à cette question (WRAP, 2009 ; ADEME, 2010). Pour simplifier le diagramme, nous avons considéré, comme nous y invite l'analyse des aires d'approvisionnement, que l'essentiel de la consommation francilienne de produits végétaux est issue d'agrosystèmes similaires à celui du bassin de la Seine, tandis que l'essentiel de la consommation de produits animaux provient d'agrosystèmes du type Bretagne-Normandie-Nord-Pas-de-Calais. La consommation de produits de la mer (poissons, mollusques, crustacés, soit environ 0,7 kgN/hab/an) est exclue de l'analyse.

# MESURER et AMÉLIORER

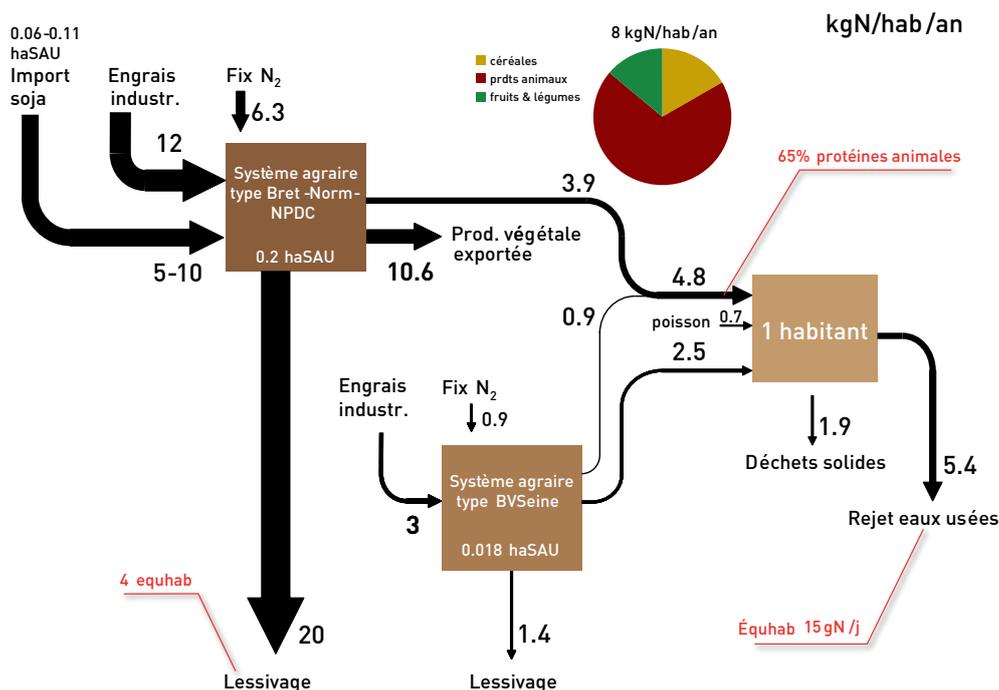


Figure 31 : L'empreinte azote du Francilien moyen en 2006 (généralisation de la notion d'équivalent habitant) (Flux en kgN/habitant/an).

## LE BASSIN DE LA SEINE AU SEIN DE L'EUROPE

Les chiffres ci-dessus montrent que le territoire principal d'approvisionnement de l'agglomération parisienne présente un bilan net d'exportation de produits alimentaires, même en considérant les importations de protéines destinées à l'alimentation du bétail.

Si l'on définit le caractère autotrophe ou hétérotrophe d'un territoire par la différence entre le contenu en azote de la récolte de plantes cultivées et les besoins en azote protéique des hommes et de ses animaux domestiques (ANAH : *Anthropogenic Nitrogen Autotrophy and Heterotrophy*, Billen et al., 2010), ce territoire est donc nettement autotrophe.

La distribution des zones autotrophes et hétérotrophes de l'Europe (figure 32), étudiée en détail dans le cadre de l'*European Nitrogen Assessment* (Sutton et al, 2011 ; Billen, Leip et al, in prep), montre en effet que le Nord de la France compte parmi les régions d'Europe les plus autotrophes. Des zones très hétérotrophes, importatrices de protéines existent par contre, de la Belgique au Danemark, dans la vallée du Pô, en Espagne et au Portugal. Des zones plus équilibrées dominent en Europe de l'Est et du Nord.

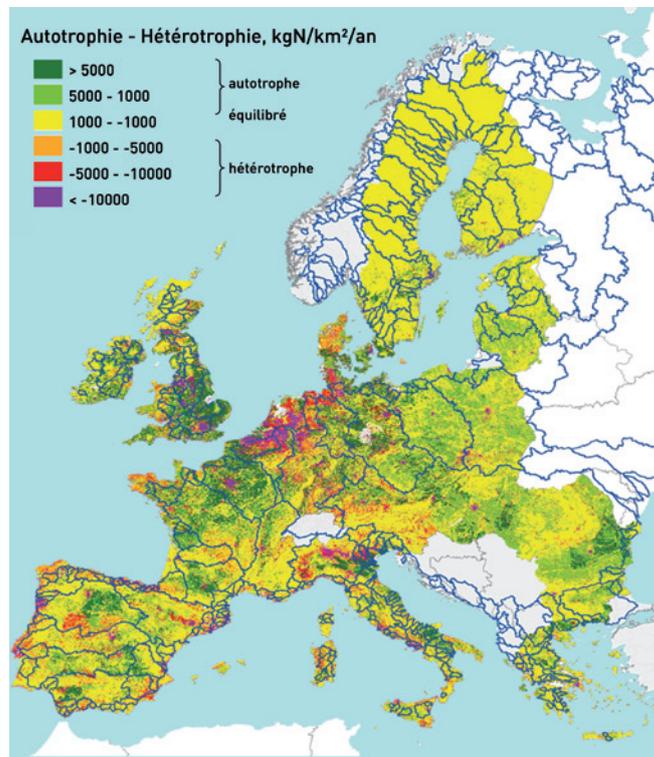


Figure 32 : Du fait de la spécialisation des territoires entre grandes cultures et élevage intensif, l'Europe apparaît aujourd'hui comme une mosaïque de territoires autotrophes et hétérotrophes, c'est-à-dire respectivement exportateurs ou importateurs de protéines. (source : ENA, Sutton et al, 2011 ; Billen, Leip et al. in prep)

Dans son ensemble cependant, l'Europe est déficitaire en protéines. Si elle a montré une balance positive en matière d'exportations de céréales durant les années 1990, le solde est aujourd'hui nul (figure 32). En revanche, ses importations de protéines végétales destinées à l'alimentation animale ne cessent de croître (figure 33).

Au contraire d'une affirmation fréquemment entendue, l'agriculture très productive de l'Europe ne contribue donc en rien à « nourrir le monde » au-delà de ses frontières. Par contre, le bassin de la Seine est un pourvoyeur important de céréales pour le reste de l'Europe.

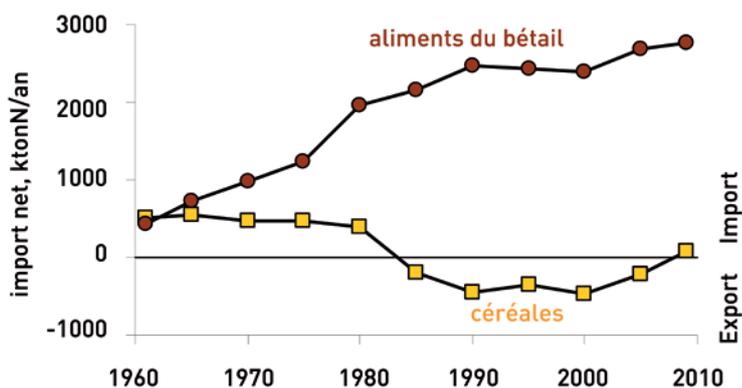


Figure 33 : Balance du commerce extérieur de l'Europe des 27 en termes de céréales et de protéines destinées à l'alimentation du bétail. (source : FAOstat)

## LES PERTES D'AZOTE DE L'AGRICULTURE

L'importance des niveaux de fertilisation minérale et organique des terres arables du bassin parisien comme de la Bretagne, de la Normandie et du Nord-Pas-de-Calais conduit à des pertes d'azote vers l'hydrosystème représentant plus de la moitié de la fertilisation totale (figure 30). Celles-ci représentent la pollution azotée diffuse de l'hydrosystème. En ce qui concerne le bassin de la Seine, les travaux menés dans le cadre du PIREN-Seine permettent d'en préciser le devenir (figure 34). Une partie de l'azote ayant quitté la zone racinaire\* du sol sous forme de nitrate s'infiltré dans la zone non saturée\* du sol et rejoint éventuellement les aquifères, où il est susceptible de s'accumuler. Le temps de séjour dans les grandes formations aquifères du bassin parisien central est considérable, et leur concentration n'est pas encore en équilibre avec celles des eaux qui les alimentent (voir fascicule n°3, La pollution par les nitrates). Il s'y produit donc un stockage d'azote correspondant à la différence entre la concentration de la recharge et celle de la vidange de la nappe. Une autre partie du surplus azoté des terres arables est entraîné par des flux hydriques plus superficiels directement vers le réseau hydrographique. C'est aussi la voie qu'empruntent les eaux de nappe profonde lorsqu'elles rejoignent enfin les cours d'eau. En chemin, dans les bas de versant et dans les zones riveraines des cours d'eau,

ces flux peuvent traverser des zones superficielles et actives du sol, qui, riches en matière organique et gorgées d'eau, sont dans les conditions idéales pour le processus de dénitrification. Une part importante des flux d'azote est donc éliminée dans ces zones humides (que nous appellerons riveraines), pour l'essentiel en azote moléculaire, mais pour une part non négligeable aussi sous forme de  $N_2O$ .

Cette dénitrification riparienne\* est le processus principal qui protège naturellement les eaux de surface de la pollution diffuse azotée. Son importance justifie amplement les efforts déployés pour maintenir, voire pour restaurer les zones humides du bassin.

Dans le réseau hydrographique, l'azote issu des apports diffus est rejoint par celui provenant des rejets ponctuels urbains. Les progrès des techniques de collecte et de traitement des eaux usées urbaines ont conduit à une rétention significative des flux azotés associés aux rejets urbains : plus de la moitié des flux bruts émis par les villes est aujourd'hui retenue dans les stations d'épuration, et cette rétention s'accroîtra encore dans les années qui viennent conformément aux directives européennes qui imposent aux collectivités de plus de 10 000 habitants d'épurer 70 % de l'azote contenu dans leurs eaux résiduaires.

Des processus naturels de rétention et d'élimination de l'azote interviennent encore au sein même du réseau hydrographique. Ce sont surtout les sédiments du fond qui jouent ce rôle, particulièrement dans les zones stagnantes que sont les réservoirs et les annexes hydrauliques, mais aussi les zones estuariennes. Au final, près de la moitié de l'azote issu du bassin versant et apporté au réseau hydrographique, est éliminé avant de rejoindre l'exutoire du fleuve en mer, soit aux interfaces entre le bassin versant et le réseau hydrographique, soit dans le réseau hydrographique lui-même.

La fraction restante qui rejoint le milieu marin, suffit cependant à y poser des problèmes d'eutrophisation. Et cela d'autant plus que le flux d'azote apporté est largement en excès par rapport au flux de silice qui l'accompagne, compte tenu des besoins des diatomées planctoniques. L'excédent d'azote ne servira donc pas à la croissance de ces algues siliceuses, mais seulement à celles d'algues indésirables comme les Dinoflagellés, productrices de toxines, ou les Phaeocystis, dont la gangue muqueuse est responsable de l'accumulation de mousses nauséabondes sur les plages du Nord-Pas de Calais et de Belgique (voir fascicule n°6, L'eutrophisation des cours d'eau du bassin de la Seine).

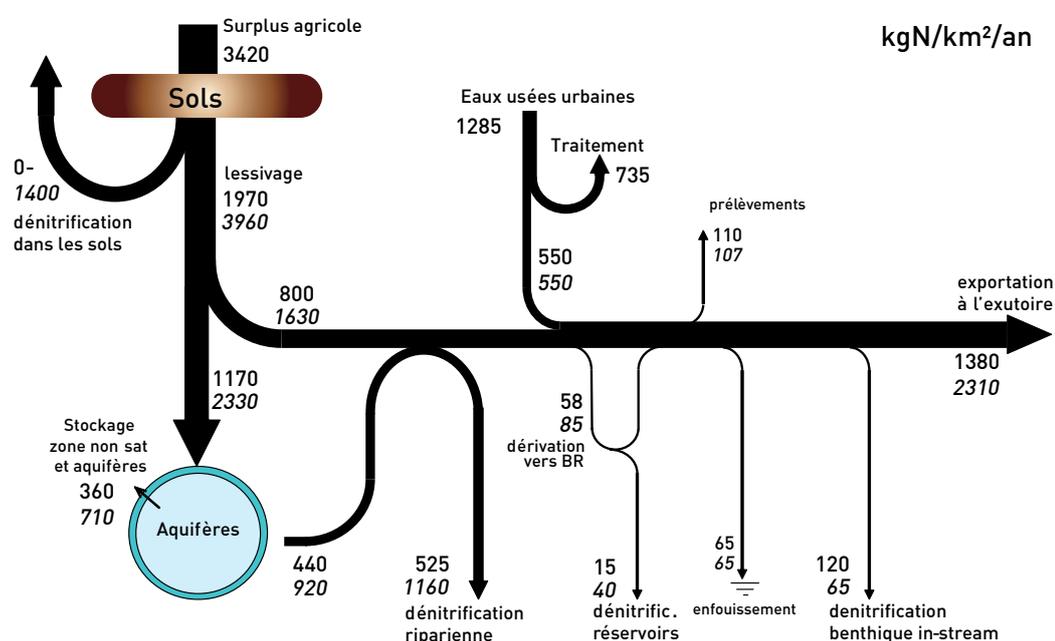


Figure 34 : Flux d'azote dans le réseau hydrographique de la Seine (d'après Billen et al., 2010). La fourchette des chiffres indiquée est relative à des conditions hydrologiques caractéristiques respectivement d'une année sèche (chiffres droits) et d'une année humide (chiffres en italique).

## LE SCÉNARIO TENDANCIEL DE LA CONTAMINATION NITRIQUE

La figure 35 résume les tendances évolutives de la contamination nitrique des aquifères, du réseau hydrographique et des zones côtières du bassin de la Seine, et prolonge ces tendances à l'horizon des prochaines décennies. C'est le scénario 'laisser-faire' qui correspond à ce qui se produirait dans les années futures si rien n'était fait pour changer les pratiques de la fin des années 1990, ni en matière d'agriculture, ni en ce qui concerne le traitement des eaux

urbaines. La contamination nitrique moyenne des grands aquifères continuerait d'augmenter jusqu'à atteindre ou dépasser la limite de potabilité, la dégradation de la qualité de l'eau des cours d'eau se poursuivrait en termes de concentration en nitrates, et l'eutrophisation marine, malgré son léger recul depuis 1985, s'aggraverait de nouveau.

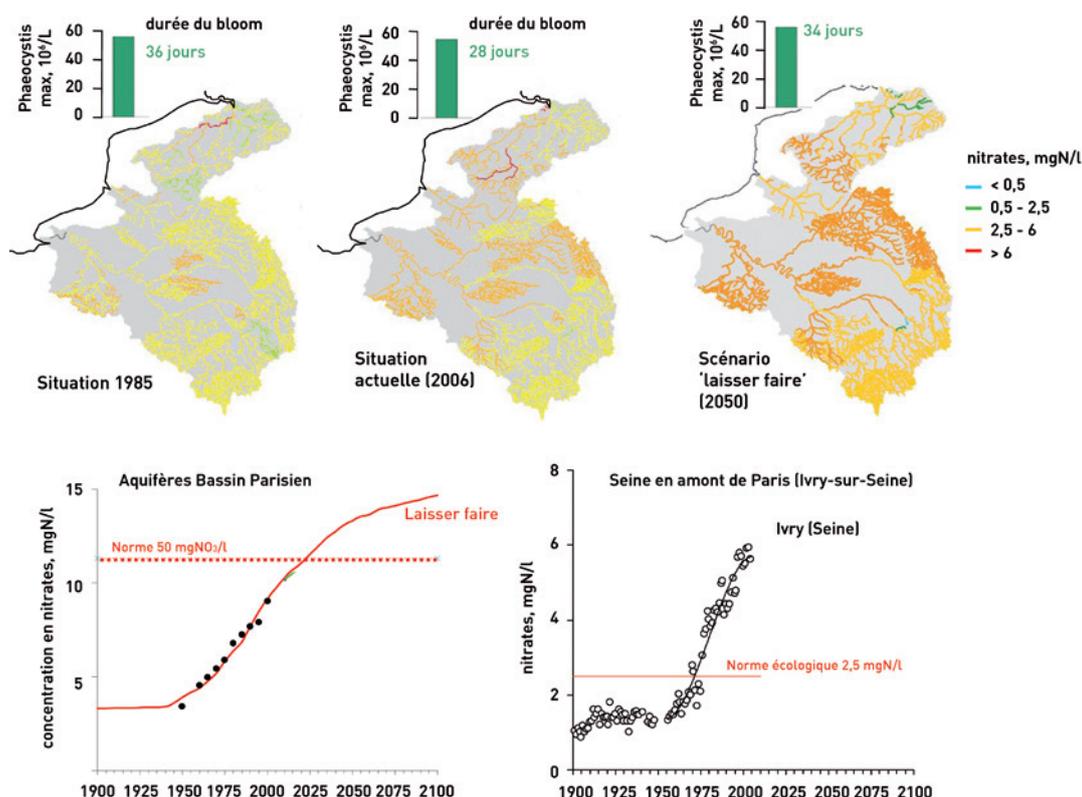


Figure 35 : Tendances évolutives de la contamination nitrique des aquifères et du réseau hydrographique de la Seine (de la Somme et de l'Escaut) et prolongation de ces tendances dans le cadre d'un scénario « laisser-faire ». Calculs par le modèle Sénèque/Riverstrahler à mêmes conditions hydrologiques (celles de 2006), pour la situation de pollution de 1985, de 2006 et pour un scénario « laisser-faire ».

## Les leviers de la gestion du cycle de l'azote et les scénarios du futur

De quels moyens dispose-t-on pour enrayer les émissions d'azote réactif dans l'environnement, pour tarir en quelque sorte la cascade de l'azote et inverser la tendance à l'accroissement de contamination qui se poursuit depuis plus de 40 ans ?

Les leviers sont de deux types : ceux qui concernent les apports ponctuels et visent à parfaire la collecte et l'épuration des eaux résiduaires urbaines ; ceux qui concernent les apports diffus et cherchent à limiter à la source les fuites environnementales d'azote engendrées par l'agriculture, en agissant sur les pratiques culturales ou sur l'organisation d'ensemble de la chaîne agroalimentaire. En outre, certains aménagements du paysage terrestre et aquatique permettent d'amplifier le pouvoir d'épuration naturel de certains milieux vis-à-vis de la contamination nitrique.

## L'ACHÈVEMENT DES EFFORTS D'ÉPURATION DES EAUX USÉES

La Directive Européenne sur les Eaux Résiduaires Urbaines (DERU) de 1991, reprise dans la Directive Cadre sur l'Eau de 2001 (DCE) impose 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 10 000 équivalents-habitants situées en zone sensible (c'est le cas de l'ensemble du bassin de la Seine). L'objectif n'est pas entièrement atteint mais le sera très prochainement.

Ainsi, la station d'épuration Seine Aval (à Achères en aval de Paris) qui traite 65 % des eaux usées de l'agglomération parisienne, sera équipée dès 2012

d'une étape de dénitrification réduisant son rejet azoté de 70%. Nous avons donc simulé ce que sera la situation lorsque toutes les stations du bassin seront mises aux normes (figure 36).

Les résultats montrent que l'effet de ces efforts d'épuration se fera sentir bien davantage sur le phosphore (la diminution des flux depuis 1985 est spectaculaire) que sur l'azote, en raison de la part dominante des apports diffus dans la contamination nitrique totale. L'accroissement de ces apports diffus masque la diminution des apports ponctuels imputables aux efforts d'épuration.

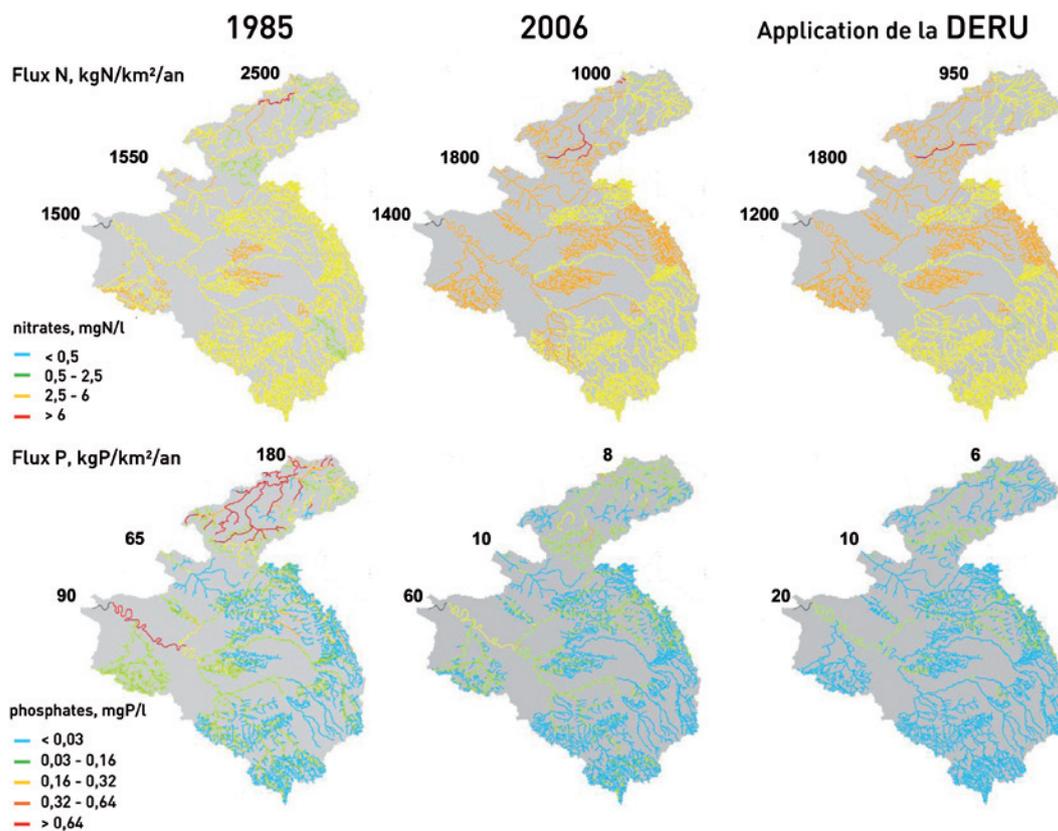


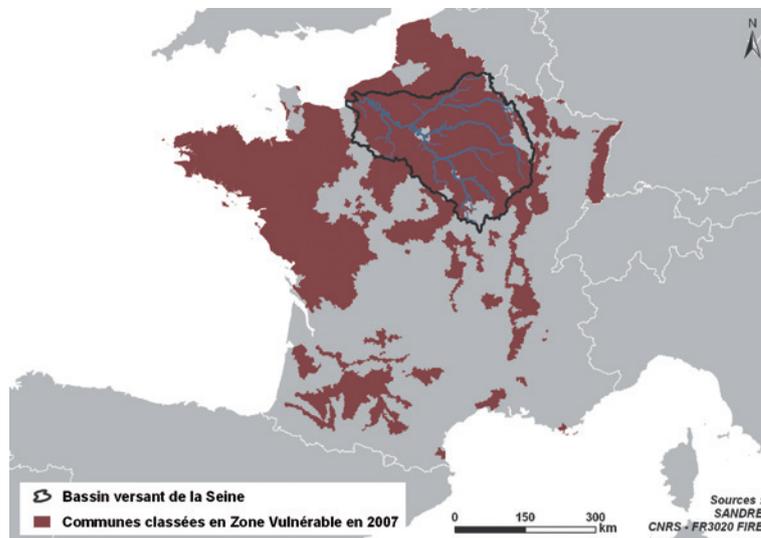
Figure 36 : Comparaison des concentrations en nitrates et en phosphore au sein du réseau hydrographique de la Seine (de la Somme et de l'Escaut) calculé par le modèle Sèneque/Riverstrahler, à mêmes conditions hydrologiques, (celles de 2006) pour la situation de pollution de 1985, de 2006 et pour un scénario où serait achevée la mise en conformité des stations d'épuration du bassin vis-à-vis de la DERU. Les flux annuels correspondant d'azote et de phosphore à l'exutoire des trois bassins sont également indiqués.



## LA DERU, LA DIRECTIVE NITRATES, LA DCE ET LA CONVENTION D'OSPAR

La **Directive Européenne sur les Eaux Résiduaires Urbaines (DERU)** (91/271/CEE, 21 mai 1991) impose des obligations de collecte et de traitement des eaux usées aux agglomérations urbaines. Dans les zones dites sensibles à l'eutrophisation (c'est le cas du bassin de la Seine, comme l'a stipulé, après de vives controverses, l'arrêt de la Cour Européenne de Justice du 23 décembre 2005), les agglomérations de plus de 10 000 habitants doivent se doter de dispositifs d'épuration permettant d'éliminer 80 % du phosphore et 70 % de l'azote des eaux usées traitées. L'échéance stipulée est actuellement dépassée, mais la mise en conformité des stations du bassin, y compris les grandes stations de l'agglomération parisienne est actuellement en cours.

La **Directive « Nitrates »** de 1991 régit la pollution nitrique issue de l'agriculture. Elle enjoint les états membres à identifier l'ensemble des « zones vulnérables » à la contamination nitrique et à y établir des programmes d'action, qui reposent sur des mesures obligatoires pour les exploitants agricoles. En France, 44 % du territoire français (et la presque totalité du bassin de la Seine) sont situés en zones vulnérables aux nitrates.



Les mesures principales applicables aux zones vulnérables sont les suivantes :

- Élaboration par les exploitants de plans de fumure prévisionnels et enregistrement des quantités réellement apportées aux champs qui ne peuvent dépasser 170 kgN/ha/an, et doivent être appliquées selon un calendrier rigoureux.
- Établissement de bandes enherbées le long des cours d'eau et interdiction du drainage des zones humides et du retournement de prairies en zones inondables.

Par ailleurs, en amont des points de captage d'eau potable superficielle, si le taux de nitrates dépasse 50 mg/L, la zone est mise en « zone d'action complémentaire ». Il devient alors obligatoire d'y appliquer une couverture hivernale des sols pendant la période de risque, d'enherber les berges des cours d'eau et de limiter les apports azotés.

La **Directive Cadre Européenne** (2000/60/CE, 23 octobre 2000) harmonise en un tout cohérent l'ensemble des directives précédentes en matière de gestion des eaux. L'objectif général (obligation de résultat !) est d'atteindre d'ici à 2015 (avec des dérogations possibles jusqu'en 2025) le bon état écologique des différents milieux sur tout le territoire européen.

La **Directive cadre Stratégie pour le milieu marin** (2008/56/CE, 17 juin 2008) complète le dispositif en ce qui concerne les milieux marins. Elle reprend les obligations contractées par les états membres dans le cadre des conventions internationales telles que le **Traité OSPAR** (1992), acte de coopération pour protéger l'environnement marin de l'Atlantique du Nord-Est. Un des objectifs affichés de ce traité est de réduire de 50 % les apports d'azote et de phosphore par les rivières par rapport à la référence de 1985.

## REPENSER LES PRATIQUES AGRICOLES ET LA CHAÎNE AGRO-ALIMENTAIRE

Depuis une vingtaine d'années, des programmes d'incitation à l'application de bonnes pratiques agricoles sont menés en France, notamment sous l'égide du CORPEN\*. La Directive Européenne Nitrates est venue les renforcer (voir encadré Directive nitrates et zones vulnérables). Ces mesures visent principalement à mieux raisonner la fertilisation azotée, en la dimensionnant mieux en quantités et en calendrier d'application par rapport aux besoins des cultures. Elles préconisent également l'implantation au sein des rotations culturales, de cultures intermédiaires pièges

à azote (CIPAN), visant à éviter les périodes hivernales de sols nus. Ces pratiques, qui peinent cependant à se généraliser en l'absence de mesures réglementaires suffisamment contraignantes, ont une efficacité avérée. Un scénario de généralisation de ces mesures de rationalisation de la fertilisation et d'introduction de CIPAN montre qu'elles seraient de nature à stabiliser la contamination nitrique, donc à enrayer sa progression, à l'échelle du bassin de la Seine (figure 37) (voir fascicule n°3, La pollution par les nitrates).

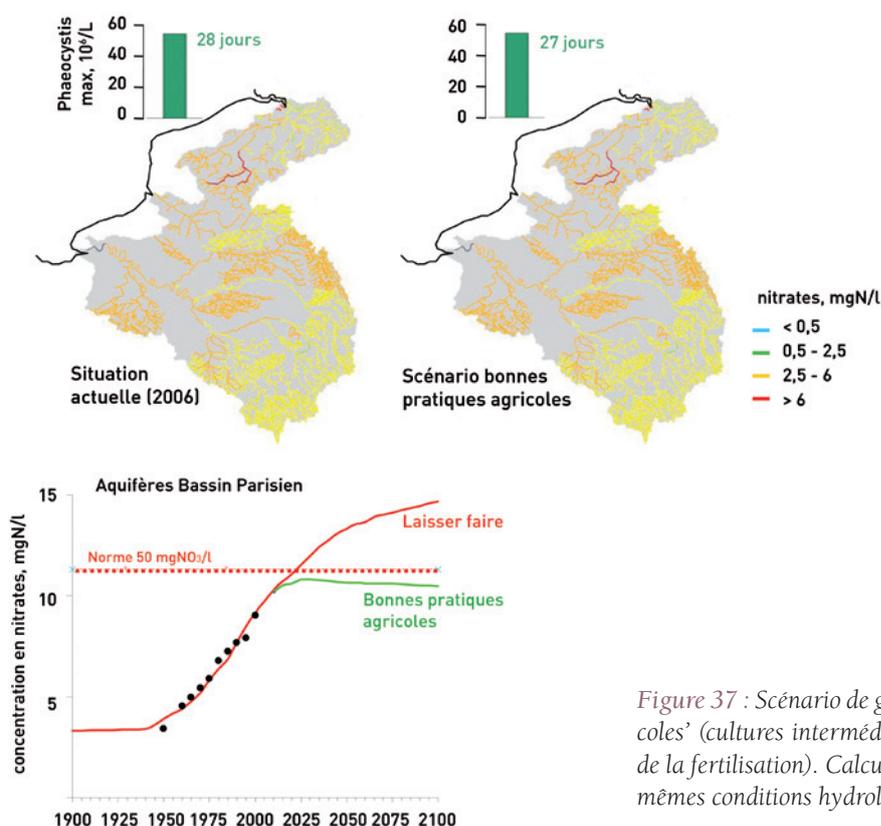


Figure 37 : Scénario de généralisation des 'bonnes pratiques agricoles' (cultures intermédiaires pièges à azote, réduction de 10 % de la fertilisation). Calculs par le modèle Sénèque/Riverstrahler à mêmes conditions hydrologiques (celles de 2006).

Pour aller au-delà de la simple stabilisation de la situation, des changements plus radicaux de pratiques agricoles semblent cependant nécessaires. L'agriculture biologique, parce qu'elle constitue maintenant un système agronomique techniquement éprouvé, répondant à un cahier des charges précis, encadré par des contrôles rigoureux et inséré dans des filières aval en plein développement, se présente de plus en plus comme une alternative crédible pouvant servir de modèle pour penser l'agriculture de demain. Parmi

les mesures décidées lors des débats du « Grenelle de l'environnement », figure la promotion de l'agriculture biologique, aujourd'hui très peu développée en France et en particulier dans le bassin de la Seine. Les aires d'un certain nombre de captages d'eau potable désignés comme prioritaires (voir *En savoir plus* : le « Grenelle de l'environnement » et la protection des captages prioritaires) sont ainsi des territoires privilégiés pour le passage de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique. Un scénario d'agriculture biologique dans

l'ensemble des terres agricoles des aires d'alimentation de captages prioritaires a été construit, en modifiant dans ces zones la qualité des eaux sous-racinares produites conformément au scénario construit par Thieu et al en 2010 (figure 38a). L'effet est très significatif sur les concentrations de nitrates dans le réseau (celles-ci diminuent en moyenne de 1 mgN/l) et sur les flux exportés à la mer.

Un scénario de généralisation d'une agriculture à très bas intrants sur l'ensemble des terres agricoles du bassin de la Seine aboutit à des résultats encore plus spectaculaires, permettant de rétablir des conditions de bon à très bon état sur pratiquement l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine du point de vue de sa contamination nitrique, et à terme, de restaurer la qualité des aquifères (figure 38b).

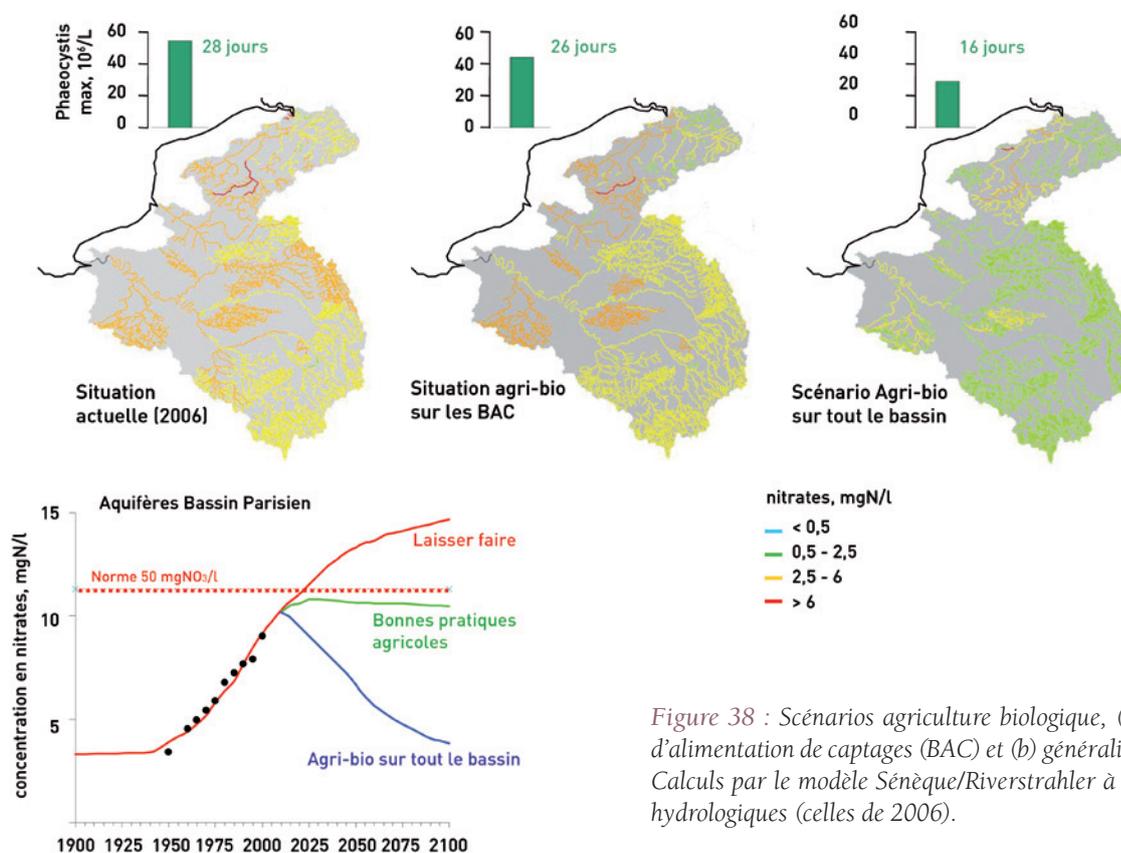


Figure 38 : Scénarios agriculture biologique, (a) sur les bassins d'alimentation de captages (BAC) et (b) généralisé à tout le bassin. Calculs par le modèle Sénèque/Riverstrahler à mêmes conditions hydrologiques (celles de 2006).

Un tel scénario de généralisation de l'agriculture biologique à tout le bassin est évidemment largement utopique. De nombreux freins institutionnels, techniques, sociologiques et économiques rendent difficile l'adoption de telles pratiques par une majorité d'agriculteurs insérés dans les réseaux amont et aval de l'agriculture conventionnelle, ou tentés par

d'autres types de productions. Pourtant la demande des consommateurs est forte et dépasse aujourd'hui largement l'offre locale, de même que se multiplient les mouvements de consommateurs en faveur d'une relocalisation de l'approvisionnement alimentaire (voir *En savoir plus* page 48).



## LA DEMANDE EN PRODUITS DE L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE ET LES MOUVEMENTS DE RELOCALISATION DE L'APPROVISIONNEMENT ALIMENTAIRE

C'est en Île-de-France et dans les régions voisines que l'on trouve le maximum de consommateurs de produits issus de l'agriculture biologique, alors même que cette forme d'agriculture y est la moins développée.

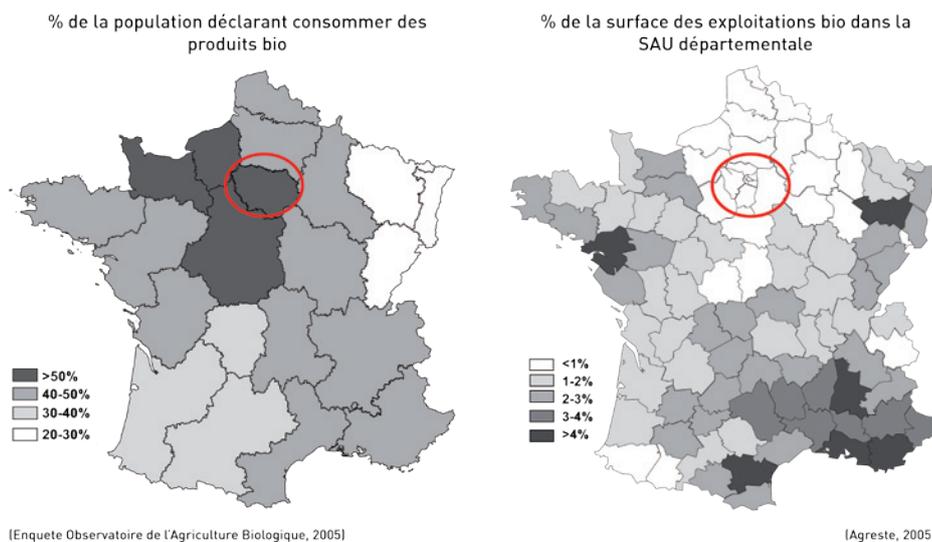


Figure 39 : Géographie de la demande et de l'offre de produits de l'agriculture biologique en France.

Un autre indicateur de cette aspiration du public à une désintensification de la production de nourriture et à la relocalisation des circuits de distribution alimentaire est fourni par la multiplication extrêmement rapide en Île-de-France des associations pour le maintien d'une agriculture paysanne (AMAP), comme l'indique la figure 40. Ce système alternatif de distribution alimentaire, non dépendant du marché conventionnel, est basé sur le contact direct et solidaire entre producteurs et consommateurs. Si ce type de circuit court ne concerne aujourd'hui que 0,3 % de la population, la rapidité de son développement est un indicateur d'une volonté profonde de maîtrise de la vie quotidienne et de la recherche de relations économiques nouvelles entre production et consommation.

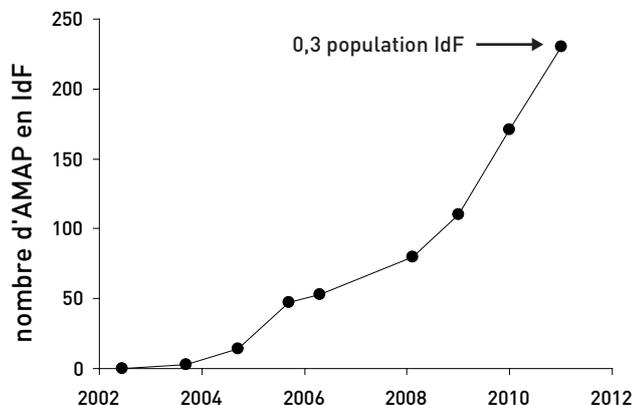


Figure 40 : Evolution du nombre d'AMAP en Île-de-France (source : [www.amap-idf.org](http://www.amap-idf.org)).

## Le « Grenelle de l'environnement » et la protection des captages prioritaires

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. Le SDAGE Seine-Normandie prévoyait lui-aussi de cibler des programmes volontaristes de restauration sur un certain nombre de captages d'eau potable. Au total, 1 700 captages sont ainsi désignés comme prioritaires. Leurs aires d'approvisionnement ne sont pas encore entièrement délimitées, mais collectivement, elles devraient représenter près d'un tiers de la surface totale du bassin.

L'objectif est de mettre en place, sur ces aires, des mesures permettant de préserver ou de restaurer la qualité de leur eau souterraine.

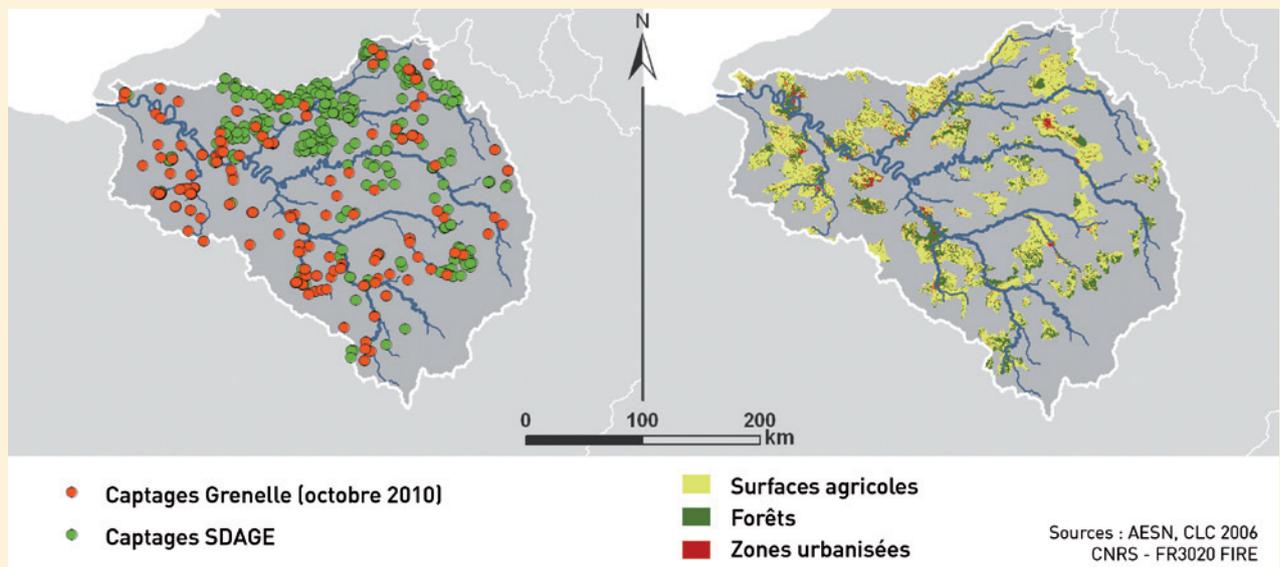


Figure 41 : Les captages prioritaires Grenelle et SDAGE du bassin de la Seine et une estimation provisoire de leurs aires d'alimentation.

# MESURER et AMÉLIORER

Une objection souvent entendue à l'encontre de l'agriculture biologique est qu'elle serait incapable de « nourrir le monde ». En particulier, dans le contexte de la croissance démographique mondiale qui culminera dans les années 2050 avec une population de 9 à 11 milliards d'individus, l'Europe n'a-t-elle pas le devoir de produire au maximum de ses capacités agricoles pour contribuer à l'effort de lutte contre la sous-nutrition des pays du Tiers Monde ? Nous avons vu que le système agricole européen actuel n'exporte pas, en bilan, au-delà de ses frontières et est au contraire dépendant des importations de protéines de pays émergents. La question se pose donc simplement de savoir si, dans notre scénario d'agriculture biologique, les besoins alimentaires des populations locales peuvent être assurés. Cette question peut être abordée à partir de l'examen du cycle actuel de l'azote dans le territoire du bassin de la Seine considéré comme l'hinterland nourricier traditionnel de Paris. Nous avons vu qu'actuellement, avec une production agricole majoritairement soutenue par l'utilisation d'engrais de synthèse, le bassin exporte plus de 80 % de sa production céréalière et importe les trois quarts de ses besoins en produits animaux (figure 26). Dans un scénario où l'agriculture du bassin de la Seine ferait exclusivement appel à une fertilisation

endogène basée sur la culture des légumineuses et la valorisation des déchets d'élevage, sans importation de protéagineux extérieurs, il est parfaitement possible de subvenir à l'ensemble des besoins de la population en protéines animales et végétales (figure 42a), tout en exportant près d'un quart de la production céréalière. Ceci suppose cependant une agriculture biologique relativement intensive, qui donnerait encore lieu à des pertes d'azote excessives vers l'hydrosystème. Pour satisfaire au critère d'une eau sous-racinaire de concentration 6 mgN/l en moyenne sur l'ensemble des terres arables, il faudrait réduire la densité du bétail en dessous de 30 UGB\*/km<sup>2</sup>, ce qui exigerait alors l'importation de quelques 40 % des besoins en produits animaux de la population (contre 70 % aujourd'hui).

Si toutefois, les habitudes alimentaires des habitants se modifiaient, conformément à l'appel de Barsac (NinE, 2010, <http://www.nine-esf.org/Barsac-text>), qui prône un régime 'demitarrien', c'est-à-dire comportant la moitié de la proportion de produits animaux actuels, les besoins de la population pourraient tout-à-fait être couverts localement, laissant encore la place à l'exportation d'un quart de la production céréalière (figure 42b) (Thieu et al., 2010).

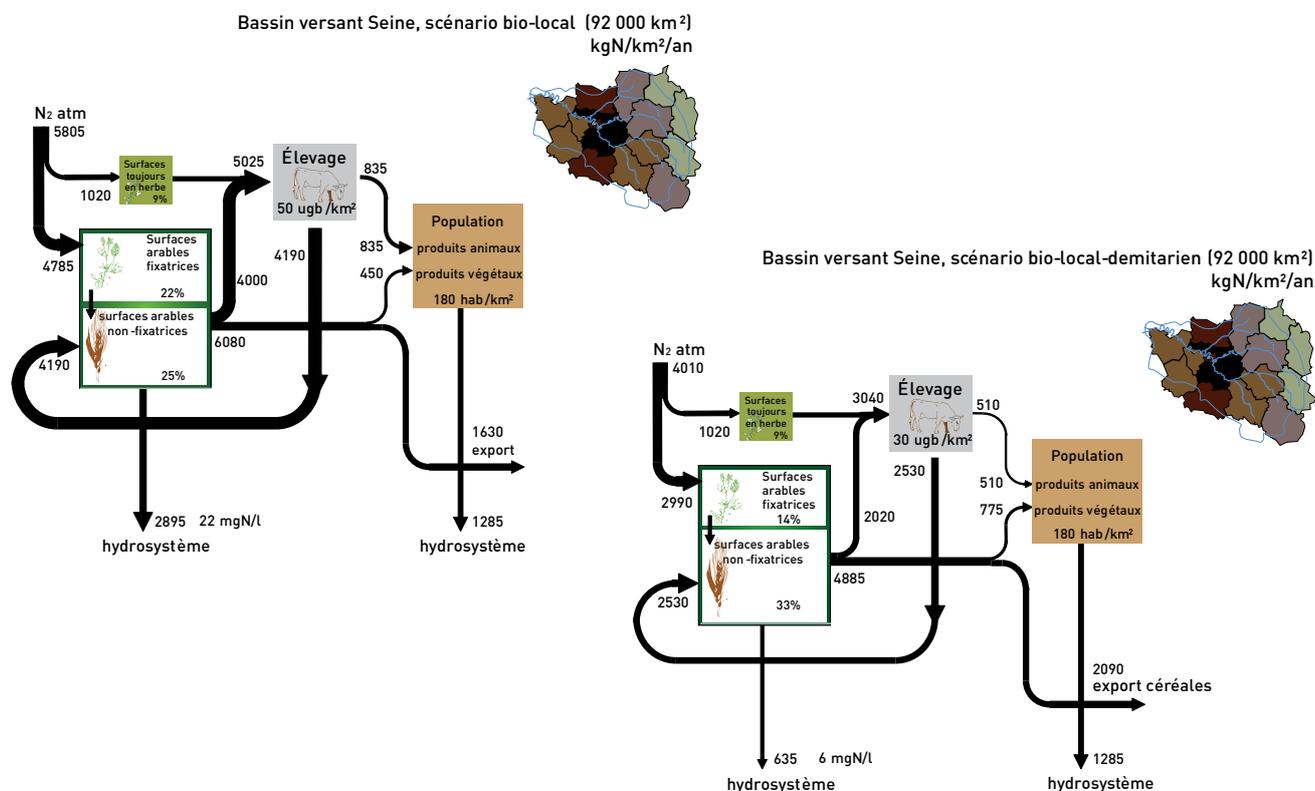


Figure 42 : Schéma du cycle de l'azote dans le bassin de la Seine (a) dans un scénario hypothétique de généralisation de l'agriculture biologique et de retour à un élevage basé sur les ressources locales de foin, (b) dans un scénario comportant en plus de (a) une réduction de la consommation humaine de produits animaux à 50 % de la consommation actuelle. Voir la figure 29 pour comparaison avec la situation actuelle.

L'empreinte alimentaire par habitant d'un tel système est représentée à la figure 43. Son contraste avec la figure correspondant à la situation actuelle (figure 31) est particulièrement frappant, moins en termes de

surface agricole totale nécessaire (0,3 ha/hab contre 0,33 ha/hab actuellement) qu'en termes de pollution azotée générée par le système agricole (3,5 kgN/hab/an contre 21,5 kgN/an).

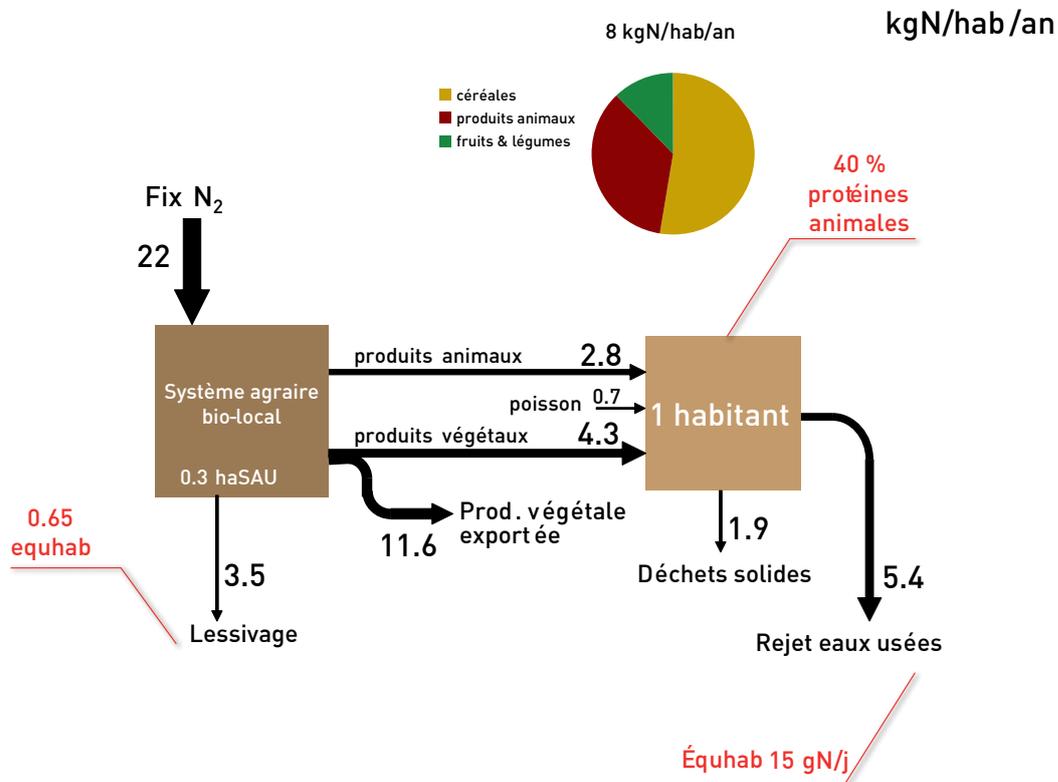


Figure 43 : L'empreinte azote du Francilien moyen dans un scénario hypothétique de généralisation à tout le bassin de la Seine d'un système agraire basé sur le cahier des charges de l'agriculture biologique et sur un régime alimentaire demitarien.



## AMÉNAGER LE PAYSAGE HYDROLOGIQUE

En complément des actions de réduction de la pollution azotée agricole, et parce que celles-ci ne pourront porter leurs effets que dans un futur assez éloigné en raison notamment de l'inertie de la réponse de divers compartiments environnementaux comme les sols et les grands aquifères, diverses mesures peuvent être envisagées qui visent à éliminer ou retenir une fraction de la pollution azotée à l'interface des sols et des aquifères avec les cours d'eau ou dans le réseau hydrographique lui-même. Il s'agit de restaurer ou d'amplifier le pouvoir de rétention des zones humides riveraines des cours d'eau ou des zones stagnantes comme les mares et retenues. On a vu précédemment (figure 21) que ces systèmes pouvaient éliminer une part significative de la pollution nitrique diffuse. L'élimination des nitrates par la mare artificielle en Brie, collectant les eaux drainées d'une exploitation agricole de 35 ha est exemplative.

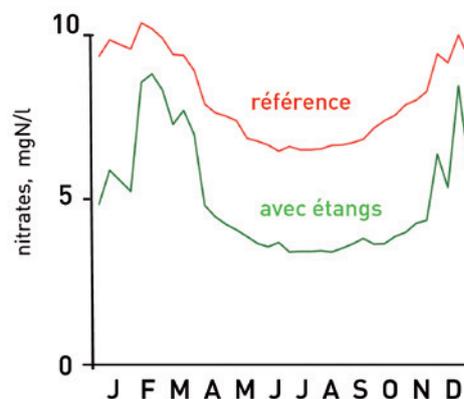
De tels aménagements paysagers, ont fait l'objet d'un scénario où ont été réimplantés des étangs, similaires à ceux qui constellaient le paysage rural de l'Ancien Régime comme en attestent les cartes de Cassini du milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle. À l'échelle du sous-bassin du Grand Morin, les résultats montrent un abattement en azote de 25 % par rapport à une situation de référence (figure 44).

Le réalisme d'un tel scénario d'aménagement de « retenues » nécessiterait de prendre en compte d'autres enjeux tels que la biodiversité et la connectivité des paysages.

Le boisement des zones humides riveraines, pour en accroître le potentiel de rétention des nitrates, permettrait aussi d'amplifier les processus de rétention naturels tout au long de la cascade de l'azote.



(a). Carte de Cassini du bassin de l'Orgeval (Coulommiers), montrant les nombreux étangs existant au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle.



Exutoire du grand Morin (1000 km<sup>2</sup>)

Flux d'azote :

référence : 1400 kgN/km<sup>2</sup>/an

avec étangs : 1000 kgN/km<sup>2</sup>/an (-25 %)

(b). Concentration et flux de nitrates à l'exutoire du bassin du Grand Morin calculées dans les conditions hydrologiques de 2006, avec et sans étangs.

Figure 44 : Résultats d'un scénario de réimplantation d'étangs sur les cours d'eau en Brie.

## CONCLUSION

L'azote est au cœur du fonctionnement des écosystèmes, mais sa circulation dans les différents compartiments environnementaux a été très fortement perturbée suite à l'introduction massive par l'activité humaine de formes réactives d'azote qui jouaient autrefois, par leur rareté même, un rôle structurant sur le fonctionnement des écosystèmes.

Ces perturbations concernent aussi bien l'atmosphère (pollution atmosphérique, pluies acides, gaz à effet de serre) que l'hydrosphère (contamination nitrique généralisée des eaux souterraines et de surface, eutrophisation). Des mesures sévères sont nécessaires pour les limiter car les coûts sociaux, économiques et environnementaux induits par ces perturbations sont considérables : à l'échelle européenne, ils sont évalués à 150-750 €/habitant/an (ENA, Sutton et al, 2011). En ce qui concerne l'approvisionnement en eau potable à partir des eaux souterraines dans le bassin de la Seine, les coûts liés au traitement des eaux des captages contaminés qui pourraient être évités par un changement radical des pratiques agricoles vers une agriculture à bas niveau d'intrants sont évalués à 160-200 €/ha/an (Larroque, 2010).

L'urgence des mesures à prendre est rendue d'autant plus pressante que l'inertie du système est grande, en raison même de la taille de certains des réservoirs environnementaux d'azote (sols, aquifères) dont le temps de réaction se compte en dizaines d'années. Un relâchement de la résistance au changement de certains acteurs sociaux est par ailleurs indispensable.

Au cours des 20 dernières années, un problème analogue de contamination généralisée du réseau hydrographique par les phosphates a pu être maîtrisé. Grâce à l'interdiction des poly-phosphates dans les poudres à lessiver et leur substitution par d'autres agents séquestrants, grâce à l'amélioration du traitement du phosphore dans les stations d'épuration urbaines, la contamination en phosphore est revenue aujourd'hui à son niveau des années 1960. Des efforts considérables, législatifs et techniques ont été nécessaires pour arriver à ce résultat, que d'aucuns croyaient utopique il y a trente ans.

Dans le cas de l'azote, la solution du problème peut s'avérer plus complexe, en raison de son origine diffuse, à la différence du phosphore essentiellement d'origine ponctuelle. En outre la réduction de l'azote, ne nécessite pas seulement des dispositifs techniques, mais exige une remise en cause plus structurelle de notre système agroalimentaire.

Tous les acteurs de la société sont directement impliqués : pas seulement les agriculteurs qui auront à repenser leurs pratiques, mais aussi tous les acteurs des filières amont (producteurs d'engrais, d'aliment pour bétail, semenciers, etc.) et aval (transformateurs, distributeurs), qui participent à l'inertie du système. Enfin, au bout de la chaîne, les consommateurs, tant par le choix des filières de distribution qu'ils privilégieront, que par le régime alimentaire qu'ils adopteront, pèseront de manière décisive sur l'avenir du territoire et de son fonctionnement biogéochimique.



*Figure 45 : Étang de Vallière, espace naturel sensible faisant l'objet de travaux de restauration. Le site présente un bois humide, un marais et une roselière.*

## Bibliographie

ADEME. 2010. Dossier de Presse. Le gaspillage alimentaire au cœur de la campagne nationale grand public sur la réduction des déchets. 15 Novembre 2010.

Ballif J.L., Herre C., Gobert D., 1996. Les lysimètres en sol de craie de Châlons-sur-Marne. In *Un point sur trente ans de lysimétrie en France (1960-1990)*. Muller J.C. Ed. INRA-Comifer-Editions Paris, 115-149.

Belamie R., 1980. Influence of cropping practices and hydrological factors on the variation of nitrates in the discharges from a representative basin in the Paris region. *Proceedings of the Helsinki symposium IAMS IAM publ.* 130.

Benoît M., Saintot D., Gaury F. 1995. Mesures en parcelles d'agriculteurs des pertes en nitrates. Variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l'eau d'un bassin d'alimentation. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 81: 175-188.

Billen G., Beusen A., Bouwman L., Garnier J. (2010). Nitrogen autotrophy and heterotrophy of world watersheds: present, past and future trends. *Global Biogeochem. Cycles*, 24, GB0A11, doi:10.1029/2009GB003702.

Billen G., Barles S., Chatzimpiros, P., Garnier, J. (2011). Grain, meat and vegetables to feed Paris: where did and do they come from? Localising Paris food supply areas from the eighteenth to the twenty-first century. *Regional Environmental Changes*. DOI 10.1007/s10113-011-0244-7

Billen G., Garnier J., Nemery J., Sebilo M., Sferratore A., Benoit P., Barles S., Benoit M. (2007) A long term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *The Science of the Total Environment* 275: 80-97

Billen G., Thieu V., Garnier J., 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.

Billy C., Birgand F., Sebilo M., Billen G, Tournebize J., Kao C. (2009) Nitrate dynamics in artificially drained nested watersheds. *Physics and Chemistry of the Earth*. doi:10.1016/j.pce.2008.09.007

Billy C, Billen G, Sebilo M, Tournebize J. (2010). Nitrogen isotopic composition of leached nitrate and soil organic matter as an indicator of denitrification in a sloping drained agricultural plot and adjacent uncultivated riparian buffer strips. *Soil Biology and Biochemistry*. 42: 108-117

Boniface R. et al, 1996. Lysimètres en sols de Versailles. Bilan 1974-1990. In « Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990 ». J.C. Muller, coordinateur. INRA éditions, Paris.

Crutzen P. J., Mosier A.R., Smith K.A., Winiwarter W. (2008). N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 389-395

Erisman J.W., Galloway J.N., Sutton M.S., Klimont Z. and Winiwater W. (2008) How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636 - 639.

Galloway J. N., Townsend A. R., Erisman J. W., Bekunda M., Cai Z. C., Frenay J. R., Martinelli L. A., Seitzinger S. P. and

Sutton M. A., 2008. Transformation of the nitrogen cycle : Recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320, 889-892.

Garnier J., Beusen A., Thieu V., Billen G., Bouwman L. (2009). N:P:Si nutrient export ratios and ecological consequences in coastal seas evaluated by the ICEP approach. Special issue "Past and Future Trends in Nutrient Export from Global Watersheds and Impacts on Water Quality and Eutrophication", *Global Biogeochemical Cycles*. doi:10.1029/2009GB003583.

Garnier J., Billen G., Sanchez N., & Leporcq B. (2000). Ecological functioning of a large reservoir in the upstream basin of the river Seine (Marne reservoir, France). *Regulated Rivers, Research and Management*. 16:51-71.

Garnier J., Billen G., Martinez A., Mounier E., Silvestre M., Vilain G., Toche F. (2009b). Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in the Seine river and basin: observations and budgets *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 133: 223-233

Gruber N., Galloway J. N., An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle, *Nature*, vol. 451, 17 January 2008, doi:10.1038/nature06592.

Howarth et al., (1996). Regional nitrogen budgets and riverine nitrogen and phosphorus fluxes for drainages to the north atlantic ocean : natural and human influences. *Biogeochemistry* 35 : 75-139.

Likens G. E. and Bormann F. H. 1975. An experimental approach in New England landscapes. pp. 7-29. In: A. D. Hasler (ed.). *Proc. INTECOL Symp. on Coupling of Land Water Systems, 1971*. Leningrad. Springer-Verlag New York Inc

Sebilo M., Billen G., Grably M., Mariotti A. (2003). Isotopic composition of nitrate-nitrogen as a marker of riparian and benthic denitrification at the scale of the whole Seine River system. *Biogeochemistry*, 63: 35-51.

Sutton et al., 2011, *The European Nitrogen Assessment, sources, effects and policy perspectives*. Cambridge University Press, ISBN-10: 1107006120

Thieu V., Billen G., Garnier J., Benoit M. (2010). Nitrogen cycling in a hypothetical scenario of generalised organic agriculture in the Seine, Somme and Scheldt watersheds. *Reg Environ Change* DOI 10.1007/s10113-010-0142-4

Mariotti A. 1982. *Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote*. Thèse. Université Pierre et Marie Curie.

Muxart T. (coord), 1997. *Exportation des MES et des polluants. PIREN-Seine, Rapport d'activité 1996. I. Thème bassins versants ruraux*. Ch. 7, pp. 75-124.

Van Egmond K., Bresser T. and Bouwman L. (2002). The European nitrogen case. *Ambio* 31:72-78.

WRAP, 2009. *Household Food and Drink Waste in the UK. Final report*. ISBN:1-84405-430-6

WRAP, 2009. *The food we waste in Scotland. Final Report*. ISBN: 1-84405-420-9

## Glossaire

**Acides nucléiques** : molécules organiques constituant le matériel génétique des organismes.

**Anaérobie** : désigne un milieu dans lequel est absent le dioxygène ( $O_2$ ). Certaines bactéries ont la faculté de vivre dans de tels milieux et de réduire les nitrates en diazote.

**Anaérobiose** : absence d'oxygène.

**Aquifère** : formation géologique souterraine, formée de roches poreuses ou fissurées, dans laquelle l'eau peut s'infiltrer, s'accumuler et circuler ; le mot aquifère désigne à la fois le contenant (les roches) et son contenu (l'eau).

**Autotrophie** : fonction par laquelle les plantes sont capables de produire de la matière organique vivante à partir de ses éléments sous forme minérale. L'autotrophie d'un territoire anthropisé représente la production de matière végétale par l'ensemble des surfaces agricoles.

**Azote réactif** : désigne tous les composés azotés impliqués dans des processus biologiques, photochimiques et radiatifs, présents dans l'atmosphère et la biosphère, à l'exception de la forme stable  $N_2$ .

**Azote réduit** : qualifie l'azote sous la forme  $NH_3$  (ammoniac),  $NH_4^+$  (ammonium) ou organique par opposition à ses formes oxydées telles que le nitrate ( $NO_3^-$ ).

**Azotrophe** : capacité de certain microorganismes de fixer l'azote moléculaire ( $N_2$ ) de l'air.

**Bassin versant** : le bassin versant d'un fleuve est la surface terrestre drainée par ce fleuve et qui collecte vers lui toute la partie non évaporée des précipitations.

**Biogéochimie** : discipline scientifique qui traite de la transformation et du devenir de la matière, notamment de la matière organique et des éléments majeurs (C carbone, N azote, P phosphore, S soufre, etc.) dans la biosphère, par l'effet des processus biologiques, chimiques et géologiques.

**Bougie poreuse** : instrument de prélèvement de l'eau dans le sol constitué d'une extrémité en céramique et d'un tube en PVC. Ce dispositif permet de suivre les flux de nitrates dans le sol.

**Case lysimétrique** : dispositif contenant de la terre mise en culture et laissée à l'air libre, qui permet de recueillir l'eau d'infiltration et de mesurer l'évapotranspiration réelle et la composition des eaux d'infiltration.

**Chaîne trophique (ou alimentaire)** : succession d'organismes servant de proies aux suivants.

**Composition isotopique** : proportion des différents isotopes d'un même élément dans une substance chimique. Les isotopes sont des formes d'un élément chimique ayant le même nombre d'électrons et de protons, et donc la même réactivité, mais un nombre différent de neutrons, et donc une masse légèrement différente.

**CORPEN** : Comité pour la Réduction des Pollutions azotées, mis en place dans les années 1980 par le Ministère de l'Agriculture pour édicter des codes de bonnes pratiques en matière de fertilisation azotée.

**Eaux sous-racinaires** : eaux infiltrées en dessous de la zone d'exploration du sol par les racines.

**Engrais vert** : engrais constitué par des résidus végétaux retournés dans le sol et dont la décomposition libèrera les nutriments nécessaires à la croissance des plantes cultivées.

**Eutrophisation** : fonctionnement altéré d'un écosystème aquatique suite à un enrichissement excessif en nutriments.

**Gaz à effet de serre** : les gaz à effet de serre sont des composés chimiques contenus dans l'atmosphère où ils emprisonnent la chaleur parce qu'ils retiennent une partie du rayonnement infra-rouge émis par la terre chauffée par le soleil, selon le mécanisme dit d'« effet de serre ». Ces gaz, dont les principaux sont le gaz carbonique ( $CO_2$ ), l'oxyde nitreux ( $N_2O$ ) et le méthane ( $CH_4$ ), sont présents naturellement dans l'atmosphère, mais l'activité de l'homme a conduit à en accroître significativement la teneur.

**Hétérotrophie** : l'hétérotrophie est la fonction par laquelle les animaux s'approvisionnent en énergie et élaborent leur matière organique constitutive à partir d'une autre matière organique animale ou végétale. L'hétérotrophie d'un territoire anthropisé représente la consommation de produits agricoles par l'homme et ses animaux domestiques.

**Hinterland** : mot allemand signifiant « arrière-pays ». Il s'agit, pour une ville, des territoires dont elle dépend pour son approvisionnement.

**Lessivage** : transport d'éléments contenus dans le sol par les eaux d'infiltration.

**Lipides** : molécules organiques constitutives des graisses.

**Lysimètre (ou case lysimétrique)** : dispositif permettant de recueillir la totalité des eaux infiltrées en dessous d'une parcelle de sol cultivé.

**Métabolisme** : ensemble des réactions chimiques qui permettent la croissance, la maintenance et l'activité des organismes vivants.

**Molécules organiques** : molécules constituées de plusieurs atomes de carbone lié à d'autres éléments, et le plus souvent constitutives ou dérivées des organismes vivants.

**Pédosphère** : couche de surface de sol à l'interface avec l'atmosphère et la lithosphère.

**Plantes légumineuses** : plantes supérieures cultivées ou non qui ont la capacité, grâce à une symbiose avec des microorganismes azotophiles, d'utiliser l'azote moléculaire de l'air. Les pois, les haricots, le soja, la luzerne ou le trèfle sont des exemples de légumineuses.

**Potentiel redox** : (ou potentiel d'oxydo-réduction) indicateur permettant de quantifier la tendance d'une espèce chimique ou d'un milieu à agir comme oxydant (c'est-à-dire à capter des électrons).

**Protéines** : molécules organiques riches en azote constituant notamment tous les enzymes responsables du métabolisme vivant.

**Spectrométrie de masse** : technique permettant de distinguer les différents isotopes d'un même élément chimique.

**Symbiose** : relation entre deux organismes d'espèce différente dont l'association permet un bénéfice mutuel.

**UGB - Unité Gros Bétail** : nombre de têtes de bétail équivalent en matière de déjections produites à la production d'une vache laitière.

**Zone non saturée** : zone supérieure du sol et de la roche sous-jacente dont la porosité n'est pas entièrement remplie d'eau.

**Zone racinaire** : zone d'exploration du sol par les racines des végétaux.

**Zone riparienne** : aire d'interaction directe entre un cours d'eau et les systèmes terrestres, à travers laquelle transite l'eau issue du bassin versant avant de rejoindre le cours d'eau. Les zones ripariennes, riches en matières organiques et anoxiques présentent un fort potentiel de réduction des nitrates issus des bassins versants amont grâce notamment au processus de dénitrification.



**eau  
seine**  
NORMANDIE

## L'Agence de l'eau Seine-Normandie

est un établissement public du ministère chargé du Développement durable.

Sa mission est de financer les ouvrages et les actions qui contribuent à préserver les ressources en eau et lutter contre les pollutions, en respectant le développement des activités économiques. Pour ce faire, elle perçoit des redevances auprès de l'ensemble des usagers qu'elle redistribue sous forme d'aides financières aux collectivités locales, aux industriels, aux artisans, aux agriculteurs et aux associations qui entreprennent des actions de protection du milieu naturel. Ses actions s'expriment à travers un programme pluriannuel. Les études et recherches pilotées par l'Agence contribuent à la gestion équilibrée de la ressource en eau et de tous les milieux aquatiques.

## Siège

51, rue Salvador Allende  
92027 Nanterre Cedex  
Tél. 01 41 20 16 00  
Fax 01 41 20 16 09

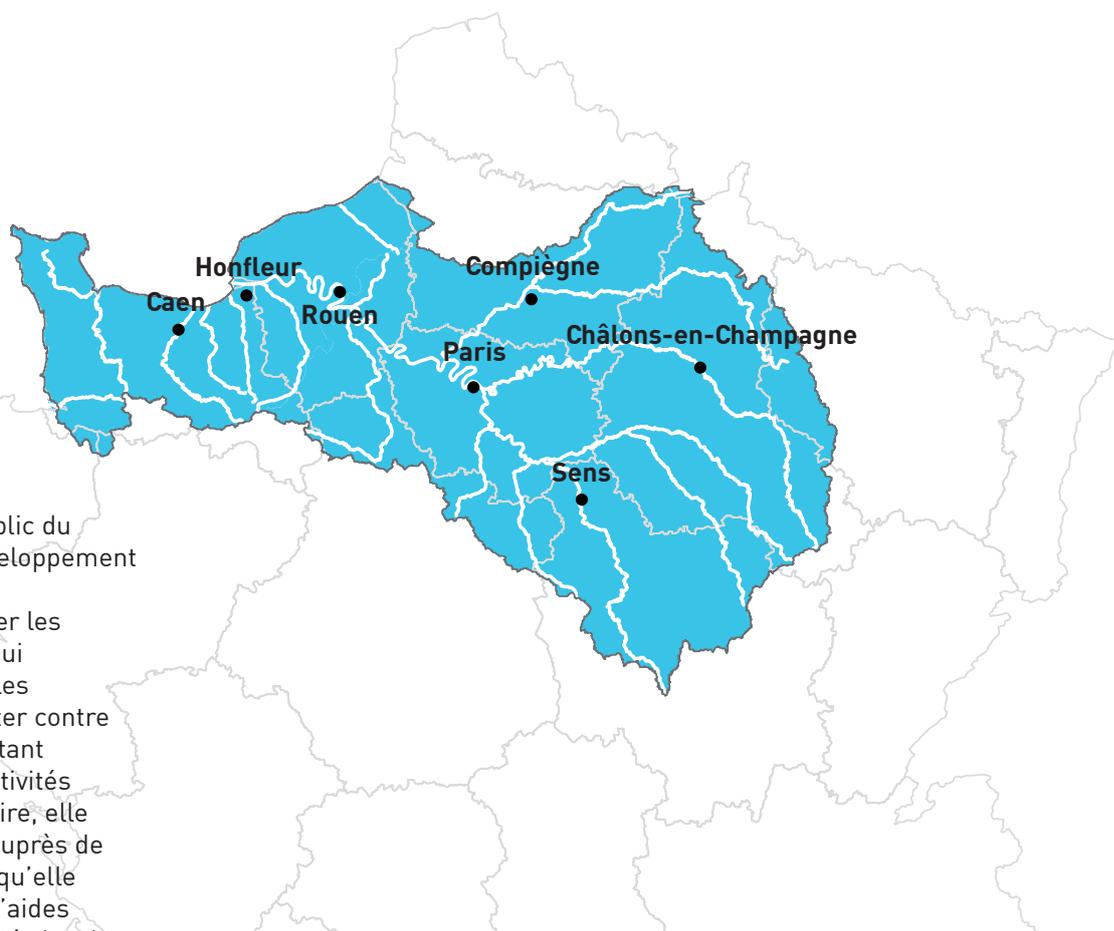
[www.eau-seine-normandie.fr](http://www.eau-seine-normandie.fr)

## Programme PIREN-Seine

Direction et secrétariat :  
UMR CNRS 7619 Sisyphe  
Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)  
4, place Jussieu 75005 Paris  
Tél. 01 44 27 74 24  
Fax 01 44 27 45 88

[www.piren-seine.fr](http://www.piren-seine.fr)

ENSEMBLE  
DONNONS  
VIE À L'EAU  
Agence de l'eau



## Les PARTENAIRES du PIREN-Seine

AGENCE DE L'EAU SEINE-  
NORMANDIE (AESN)  
[www.eau-seine-normandie.fr](http://www.eau-seine-normandie.fr)

CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)  
[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

DIRECTION RÉGIONALE ET  
INTERDÉPARTEMENTALE DE  
L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉNERGIE  
D'ÎLE-DE-FRANCE (DRIEE-IF)  
[www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr](http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr)

EAU DE PARIS  
[www.eaudeparis.fr](http://www.eaudeparis.fr)

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION  
(IZA)  
[www.iza.com](http://www.iza.com)

LYONNAISE DES EAUX  
[www.lyonnaise-des-eaux.fr](http://www.lyonnaise-des-eaux.fr)

LES GRANDS LACS DE SEINE :  
INSTITUTION INTERDÉPARTEMENTALE  
DES BARRAGES-RÉSERVOIRS DU  
BASSIN DE LA SEINE (IIBRBS)  
[www.iibrbs.fr](http://www.iibrbs.fr)

SYNDICAT DES EAUX  
D'ÎLE-DE-FRANCE (SEDIF)  
[www.sedif.com](http://www.sedif.com)

SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL  
POUR L'ASSAINISSEMENT DE  
L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE  
(SIAAP)  
[www.siaap.fr](http://www.siaap.fr)

UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS  
DE GRANULATS (UNPG)  
[www.unicem.fr](http://www.unicem.fr)

VOIES NAVIGABLES DE FRANCE  
(VNF)  
[www.vnf.fr](http://www.vnf.fr)

Numéro ISBN : 978-2-918251-14-9  
Numéro ISSN : 1968-5734  
Dépôt légal : décembre 2011

