



eau
seine
NORMANDIE

PROGRAMME PIREN-SEINE

Programme Interdisciplinaire de Recherche
sur l'Environnement de la Seine



La
pollution
du bassin de la Seine
par les **nitrate**s

Comprendre l'origine
et la migration des nitrates
dans l'écosystème
pour mieux protéger
les aquifères

Sous la direction de Pascal Viennot

ENSEMBLE
DONNONS
vie à l'eau

Agence de l'eau

#3

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.

Guy Fradin
 Directeur 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 km² 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 micro pollution organique

D'autres fascicules sont à paraître dans les domaines suivants : les zones humides, les pesticides, l'histoire de Paris, les petites rivières urbaines et les risques écotoxicologiques.

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 pollution du bassin de la Seine par les nitrates

Auteurs :

Pascal VIENNOT⁽¹⁾, Emmanuel LEDOUX⁽¹⁾, Jean-Marie MONGET⁽¹⁾,
Céline SCHOTT⁽²⁾, Cécile GARNIER⁽³⁾, Nicolas BEAUDOIN⁽⁴⁾

Numéro ISBN : 978-2-918251-02-6
Dépôt légal : janvier 2009

(1) École des mines de Paris/ARMINES, Centre de Géosciences, Fontainebleau
(2) INRA/SAD, Mirecourt
(3) Agence de l'Eau Seine-Normandie, Nanterre
(4) INRA, Laon

RÉSUMÉ

Le cycle de l'azote est aujourd'hui, à l'échelle de la planète, le plus profondément perturbé des grands cycles biogéochimiques. L'azote qui entre à 80 % dans la composition de l'atmosphère se transforme en nitrates dans les sols.

Une partie de ces nitrates est ensuite entraînée vers les eaux de surface et souterraines.

Ce phénomène – absolument naturel – a été fortement amplifié par l'utilisation d'engrais de synthèse depuis le milieu du XX^e siècle.

Cinquante ans plus tard, la pollution croissante de nos ressources en eaux est devenue un souci majeur et pas seulement parce que la France est menacée de lourdes sanctions par la Commission européenne.

Le bassin de la Seine est particulièrement exposé à la pollution par les nitrates, les cultures céréalières et industrielles y étant très développées.

Or le bassin compte de nombreux aquifères qui alimentent une large population.

Avant même de penser à satisfaire en 2015 la Directive cadre européenne en atteignant le bon état écologique des eaux, il faudrait réussir à stopper l'aggravation de la pollution nitrique.

C'est bien sûr l'objectif des décideurs du bassin qui ont néanmoins besoin de savoir comment agir efficacement.

Là interviennent les chercheurs.

En étudiant de façon aussi fine que possible la diffusion de l'azote et des nitrates vers les aquifères (par l'observation de terrain et l'utilisation de modèles informatiques), ceux-ci contribuent à mesurer l'évolution de la pollution et à proposer des stratégies pour la limiter.

Des scénarios sont ensuite testés.

La « directive nitrates » de 1991 a abouti à la distinction entre zones dites « normales » et zones « vulnérables ».

En « zones vulnérables », le non respect des prescriptions légales du code « de bonnes pratiques agricoles » est passible de sanctions financières.

Encore faut-il que les mesures préconisées, fertilisation raisonnée, mise en place de bandes enherbées et d'inter-cultures de type CIPAN (cultures intermédiaires pièges à nitrates), soient efficaces.

Les recherches permettent à la fois de le vérifier et de les optimiser.

Reste que la propagation des nitrates dans le sol et les aquifères est par essence très lente...

Des mesures d'urgence s'imposent en sachant que l'on n'a que trop tardé à les mettre en place et que leur effet sera long à se faire sentir.

7 Introduction

- > Le cycle de l'azote dans l'agriculture moderne
- > Les problèmes environnementaux

COMPRENDRE

8 La pollution du bassin de la Seine par les nitrates

9 Origines des nitrates

- > Les nitrates d'origine naturelle
- > Les nitrates apportés par les hommes

9 LES NITRATES SONT-ILS DANGEREUX ?

10 LE CYCLE NATUREL DE L'AZOTE

12 Migration des nitrates

- > Du sol aux nappes
- > Voyage au cœur des nappes

13 CONTAMINATION DES AQUIFÈRES DU BASSIN DE LA SEINE : DONNÉES STATISTIQUES ONQES, ADES.

MODÉLISER

14 La pollution par les nitrates

15 QU'EST-CE QU'UN MODÈLE ?

16 Le modèle hydrogéologique MODCOU

18 Le modèle agronomique STICS

- > Objectifs et données de référence
- > Spatialisation de STICS
- > Les données agricoles

22 LE MAILLAGE PETITES RÉGIONS AGRICOLES (PRA)

23 Évolution de la pollution par les nitrates de 1970 à 2004

- > Couplage de STICS et de MODCOU
- > Validation du modèle sur les concentrations mesurées en aquifères

PRÉVOIR

30 Pour décider sur la base d'éléments quantifiés

31 Mesures de protection des eaux souterraines et mise en œuvre des réglementations

- > Zones vulnérables et sanctions
- > Les bonnes pratiques agricoles

33 DIRECTIVES EUROPÉENNES

35 Cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN*) : Modélisation et évaluation de leur efficacité dans le bassin de la Seine

40 Conclusion

Ce document est complémentaire de deux autres ouvrages édités dans la même collection : « L'agriculture dans le bassin de la Seine » et « L'hydrogéologie du bassin de la Seine ».

Le bassin de la Seine est un véritable cas d'école de contamination par les nitrates des eaux souterraines. Les cultures céréalières et industrielles* y sont particulièrement développées. Elles reçoivent des apports importants de fertilisants industriels azotés. Or le bassin compte de nombreux aquifères* dont dépend l'approvisionnement en eau potable d'une large population (plus de 50% de l'alimentation en eau potable du bassin, soit près de 900 millions de m³ par an, provient des formations aquifères).

Le cycle de l'azote dans l'agriculture moderne

L'agriculture a besoin d'eau et d'azote pour augmenter ses rendements.

Ainsi, avant le milieu du XX^e siècle et la découverte du procédé Haber-Bosch de synthèse artificielle de l'azote atmosphérique, l'agriculture traditionnelle enrichissait les terres cultivées en leur apportant des fumures animales, des matières végétales issues d'autres écosystèmes ou des limons de rivières. La culture de légumineuses, fixatrice d'azote, jouait le même rôle.

Depuis la mise au point d'engrais azotés de synthèse, l'agriculture moderne s'est affranchie des mécanismes naturels. Le cycle de l'azote s'est largement ouvert (figure 2) et le lessivage des excédants de nitrates contamine les eaux souterraines et de surface.

En outre, les processus de nitrification et de dénitrification, stimulés comme le reste du cycle, émettent de l'oxyde nitreux qui constitue un gaz à effet de serre. Aujourd'hui, le taux de fixation de l'azote atmosphérique en azote réactif lié à l'activité humaine représente près du double de celui des milieux naturels.

Le cycle de l'azote est, à l'échelle de la planète, le plus profondément perturbé des grands cycles biogéochimiques.

Les problèmes environnementaux

Cet enrichissement généralisé des écosystèmes par l'azote réactif s'accompagne de nombreux problèmes environnementaux : contamination nitrique des eaux, eutrophisation* des écosystèmes aquatiques, émission d'ammoniac et formation d'aérosols, aggravation de l'effet de serre.

De tous ces effets, la contamination nitrique des eaux souterraines est parmi les plus directs. C'est d'elle qu'il sera question ici.

L'objet du présent document est de déterminer les mécanismes de cette contamination pour la limiter. Trois phases sont nécessaires à cette démarche : **comprendre, modéliser, prévoir.**

- **Une phase de compréhension de l'évolution de la contamination nitrique du bassin au cours des dernières décennies et de ses causes.** Cette phase passe par une analyse approfondie des données de concentrations mesurées dans les différents aquifères et de leur évolution ;

- **Une phase de modélisation qui traduit une certaine vision du système constitué par les sols du bassin et les aquifères sous-jacents en une représentation mathématique.** Le modèle sera validé en confrontant ses réponses aux mesures de terrain ;

- **Une phase d'exploitation exploratoire des modèles qui, conçus dans un premier temps comme des outils de connaissance, doivent ensuite être suffisamment opérationnels pour répondre aux questions posées par les gestionnaires de la ressource en eau du bassin.** L'enjeu est de guider leur action pour préserver ou restaurer la qualité de l'eau, notamment en réponse à la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Il s'agit d'estimer la réponse du système à des changements des contraintes qui pèsent sur lui, comme la mise en place de mesures agro-environnementales.



La pollution du bassin de la Seine par les nitrates

La pollution des aquifères du bassin de la Seine par les nitrates est d'origine agricole. Elle résulte de l'application d'engrais sur tout son territoire. C'est une pollution diffuse, non localisée et donc difficilement identifiable et quantifiable.



Origine des nitrates

LES NITRATES D'ORIGINE NATURELLE

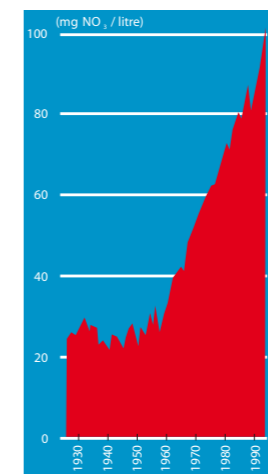
Même en l'absence de toute fertilisation azotée, on trouve de l'azote dans les sols. Cela résulte de la fixation de l'azote atmosphérique par certaines plantes comme les légumineuses, par l'intermédiaire des nodosités de leurs racines. Ces nodosités sont le siège d'une activité symbiotique : la plante fournit les sucres et l'énergie issus de la photosynthèse et bénéficie, en retour, des acides aminés issus du processus.

Jusqu'à 300 kg d'azote peuvent ainsi être produits à l'hectare, en partie assimilés par les cultures et exportés, en partie conservés dans le sol sous forme de nitrates. Ceux-ci résultent, en fin de cycle saisonnier, de la transformation de la matière organique des plantes par les bactéries nitrifiantes du sol. Ils pourront être utilisés par les plantes qui succéderont.

Un sol normal contient environ 1000 kg d'azote (N) par hectare, sous forme de matière organique plus ou moins fraîche ou en cours de décomposition. La décomposition étant très lente (jusqu'à plusieurs dizaines d'années), seule une fraction de l'azote est transformée chaque année en nitrates. En régime normal, les nitrates sont remplacés par de la matière organique fraîche et le stock d'azote reste relativement constant.

Les nitrates non consommés par la végétation sont lessivés par les eaux d'infiltration en hiver et au printemps. Ils parviennent dans les nappes phréatiques. Tout changement de l'occupation du sol peut perturber cet équilibre. Le labourage d'une prairie ou le défrichage d'une forêt engendrent ainsi une augmentation des flux de nitrates vers les nappes car le stock de matière organique se décompose et s'oxyde plus vite. En l'absence de fertilisation, la concentration « naturelle » en nitrates des eaux souterraines est estimée entre 5 et 25 mg/l (NO_3^-), une valeur courante moyenne de 10 mg/l étant généralement admise. A titre d'exemple, les mesures de concentrations en nitrates des captages de la Traconne (bassin versant de la Voulzie, situé à proximité de la ville de Provins en Seine et Marne) font apparaître des concentrations relativement élevées et constantes, de l'ordre 22 mg/l, entre les années 1930 et 1955 (figure 1).

Figure 1 : Évolution de la teneur en nitrates mesurée dans les captages de la Traconne (source Eau de Paris, anciennement SAGEP).



Les nitrates sont-ils dangereux ?

La norme de concentration maximale en nitrates de l'eau potable admise par l'Organisation Mondiale de la Santé est de 50 mg de nitrates par litre d'eau. L'Europe recommande une norme guide à 25 mg de NO_3^- /l.

En eux-mêmes les nitrates (NO_3^-) ne sont pas toxiques pour l'homme.

Le problème provient de leur transformation possible en nitrites (NO_2^-) par des bactéries présentes dans le tube digestif.

Les nouveaux nés, dont l'estomac contient encore des bactéries actives, sont ainsi particulièrement vulnérables à une forme d'anémie (la méthémoglobinémie) causée par le blocage de l'hémoglobine par les nitrites (syndrome du bébé bleu). Les ruminants y sont également sensibles.

Dans l'intestin des adultes, les nitrites réagissent aussi avec les matières organiques pour former des nitrosamines dont le caractère cancérigène est avéré. On suspecte les nitrates de favoriser ainsi l'accroissement des cas de cancers du colon.

Par ailleurs, les nitrates transportés par les rivières et les fleuves vers la mer contribuent aux problèmes d'eutrophisation* qui bouleversent l'équilibre des écosystèmes marins côtiers.

Les nitrates ne sont pas les seuls polluants résultant des pratiques de l'agriculture industrielle.

Le recours systématique aux pesticides est aussi une cause majeure de pollution de l'eau souterraine par l'agriculture.

Mais la teneur en nitrates, plus facile à doser et à surveiller, est le plus souvent très bien corrélée à la contamination en pesticide, et constitue par là même, un bon indicateur des autres altérations de la qualité de l'eau causées par l'agriculture industrielle.

Le cycle naturel de l'azote

L'azote est un constituant essentiel de tous les êtres vivants puisqu'il entre dans la composition des protéines et des acides nucléiques*. C'est aussi l'un des principaux éléments régulateurs du fonctionnement des écosystèmes : l'azote gazeux (N_2) a beau être très abondant dans l'atmosphère dont il occupe 78% du volume, il est sous cette forme inaccessible à la plupart des êtres vivants. Seules les formes minérales réactives (nitrate NO_3^- , ammonium NH_4^+) sont utilisables par les plantes et l'azote organique (protéines, acides aminés*) par les animaux.

Le fonctionnement des écosystèmes naturels consiste donc en un cycle où une quantité limitée d'azote minéral réactif est prélevée par les plantes qui le transforment en biomasse*, celle-ci étant utilisée et reminéralisée par les animaux et les microorganismes (figure 2).

Seules certaines bactéries, parfois associées à des plantes comme les légumineuses, sont capables d'enrichir le système et d'accélérer le cycle en fixant un peu d'azote atmosphérique sous une forme réactive utilisable. Ainsi, dans la nature, la croissance des plantes se fait au rythme de la restitution au sol des formes minérales de l'azote issues de l'activité des animaux et des microorganismes du sol.

Peu d'azote échappe à ce cycle terrestre, quoique l'eau de pluie, percolant à travers le sol, puisse entraîner avec elle, vers les nappes et les rivières, les nitrates produits par l'oxydation bactérienne de l'ammonium. La perte correspondante est généralement compensée par la fixation d'azote et par de faibles retombées atmosphériques.

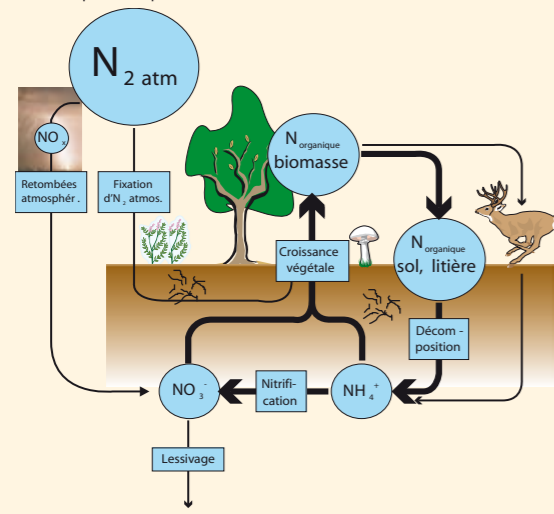


Figure 2 : Cycle de l'azote dans un écosystème naturel.

repères

Concentration naturelle d'azote dans les sols (N) : > environ 1000 kg / ha

Concentration naturelle des eaux souterraines en nitrates (NO_3^-) : > entre 5 et 25 mg / litre

Provenance des nitrates d'origine humaine contenus dans les eaux continentales françaises :
 > agriculture : 66 %
 > collectivités locales : 22 %
 > industrie : 12 %

Apports d'azote en grande culture : > de 150 à 300 unités (1 unité d'azote = 1 kg d'azote / ha)

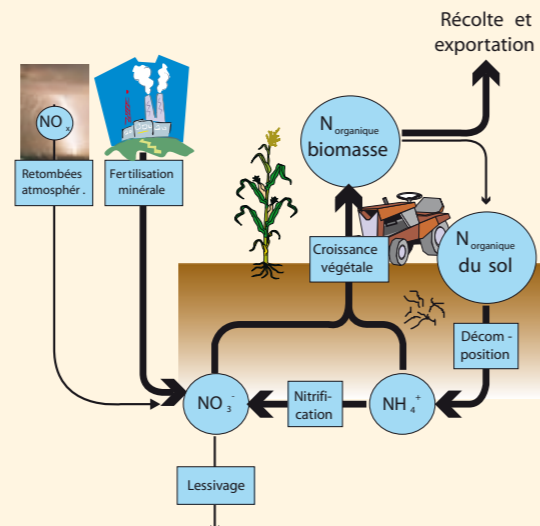


Figure 3 : Cycle de l'azote dans l'agriculture moderne.

LES NITRATES APPORTÉS PAR LES HOMMES

Si le changement d'occupation des sols peut entraîner une production de nitrates, la source majeure d'origine humaine en est l'apport d'engrais azotés. Celui-ci s'effectue directement sous forme de nitrates, d'ammonitrates à base de nitrates d'ammonium (NH_4NO_3) et d'urée (CON_2H_4). Ces deux derniers se transforment ensuite dans le sol en nitrates. Dans le cas d'épandages de lisier d'élevage, c'est la forme ammoniacquée qui domine (figure 3).

Les apports en azote aux cultures s'expriment généralement en kilo d'azote par hectare, que ce soit des nitrates, de l'ammoniac, de l'urée, etc.

Si la majorité de cet azote est consommée par les plantes, comme pour les nitrates d'origine naturelle, une partie est lessivée par l'eau de pluie et peut donc rejoindre les cours d'eau par ruissellement ou drainage* superficiel. L'azote peut également s'infiltrer vers les nappes souterraines.

En France, selon un bilan du Ministère chargé de l'Agriculture, la différence entre azote apporté et azote effectivement consommé, est passée de 320 000 tonnes en 1995 à 400 000 tonnes en 1997. Les régions les plus touchées sont la Bretagne, la Champagne-Ardenne, le Centre, le Poitou-Charentes et l'Île-de-France.

Pour l'agriculteur, une fertilisation azotée optimale consiste à apporter l'azote au niveau des racines des cultures au moment de leur croissance. Les principaux apports s'effectueront donc à la reprise de végétation des cultures d'hiver ou après les semis des cultures de printemps, et ce sous forme minérale directement assimilable (nitrate).

Si une pluie intervient peu de temps après l'application, le risque de lessivage* est important. Il devra être compensé par un nouvel apport.

En revanche, un apport d'azote sous forme moins directement assimilable (sous forme organique par exemple), exige une décomposition en fonction de l'humidité des sols et de la température.

La décomposition préalable de cet apport n'est pas facile à contrôler et ne se fait pas forcément au rythme de la demande de la végétation.

Dans tous les cas, l'idéal, pour éviter le lessivage et protéger les eaux, serait donc qu'à la fin de la saison culturale, la végétation ait consommé tous les nitrates apportés.



Épandage.



Blé.

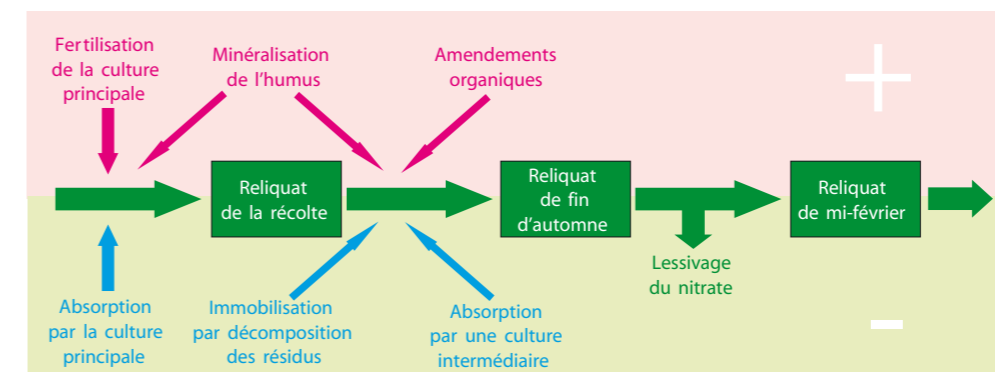


Figure 4 : Facteurs techniques influençant l'évolution du reliquat d'azote nitrique dans le sol au cours du temps et de son lessivage.
 + : accroissement ;
 - : diminution.

Migration des nitrates

DU SOL AUX NAPPES

Qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine, les nitrates en excès vont être entraînés dans les sols par les pluies.

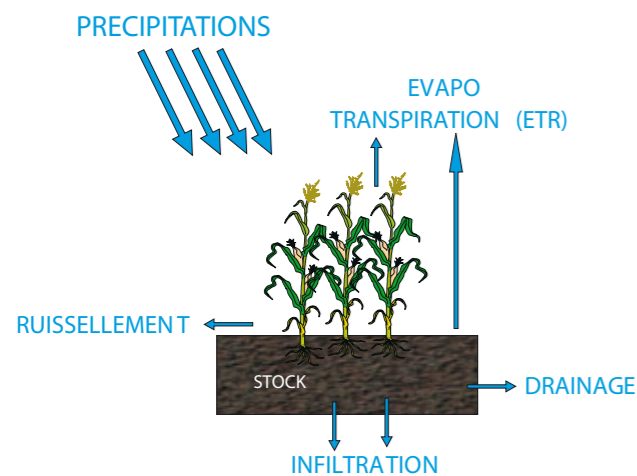


Figure 5 : Schéma du bilan hydrique simplifié SOL-PLANTE.

L'infiltration, qui représente l'alimentation des nappes, s'effectue généralement en hiver et au début du printemps. L'évapotranspiration est alors faible. Généralement, le périple souterrain des eaux de pluie est lent.

C'est en particulier le cas dans les régions constituées de calcaire ou de granite peu fissuré, de craie, de sable ou d'alluvions : l'infiltration n'excède pas quelques mètres par an dans les sables fins et s'élève à moins d'un mètre dans la craie non karstique.

L'eau remplit progressivement les moindres interstices.

Les nappes souterraines ne sont jamais en effet des étendues d'eau libre, mais des couches de terrain saturées d'eau. Les nitrates, ne sont ni retenus ni dégradés au cours de cette migration et atteignent donc inexorablement les nappes profondes.

VOYAGE AU CŒUR DES NAPPES

L'eau souterraine chemine dans le sous-sol sous l'effet de la gravité, s'accumule dans la roche aquifère pour constituer une nappe dans laquelle elle continue à circuler (renouvellement de l'eau) avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau. L'eau et les nitrates dissous progressent très lentement dans les nappes (1 mètre par jour, voire moins). Un captage, situé à 10 km en aval d'une parcelle alimentée en excès par des nitrates, pourra n'être pollué que 30 années plus tard.

Les nitrates ne se dégradent généralement pas à l'intérieur des nappes comme en attestent les mesures effectuées sur le bassin de la Seine, sauf dans trois cas d'élimination naturelle :

1. La roche aquifère, hôte de la nappe, contient un métal assez rare : la pyrite. En l'absence d'oxygène, la pyrite est oxydée par les nitrates pour former des sulfates de fer et de l'azote gazeux qui s'échappe vers l'atmosphère. On parle alors de dénitrification naturelle, fréquente dans les aquifères de socle du bassin.
2. La nappe est isolée de l'atmosphère par une formation semi-perméable de type argileux. En l'absence d'échange en oxygène avec le sol, les bactéries, après consommation de l'oxygène dissous dans l'eau, puisent celui présent dans l'ion nitrate. Certains forages du nord de la France, situés dans la nappe crayeuse, sont ainsi exempts de nitrates alors même que la nappe en est très chargée. Ce cas est rare et très localisé.
3. La nappe, de type alluviale, se trouve près d'un cours d'eau. On constate que les teneurs en nitrates peuvent diminuer de moitié entre la bordure de la plaine alluviale près de coteaux et la rivière. C'est le cas pour pratiquement chaque rivière et en particulier les bassins de la Marne et de la Seine. À cela deux raisons :
 - la végétation alluviale (en bordure de rivière) consomme les nitrates de la nappe ;
 - de façon plus significative, la nappe qui circule en profondeur dans la partie graveleuse des alluvions, est isolée de la surface par une couche de limons aussi imperméable que l'argile. Ceci permet une dénitrification naturelle partielle allant jusqu'à 50 %, faute de temps pour se réaliser complètement.



CONTAMINATION DES AQUIFÈRES DU BASSIN DE LA SEINE : DONNÉES STATISTIQUES ONQES, ADES

L'Observatoire National de la Qualité des Eaux Souterraines (ONQES) a été créé en 1983 pour « centraliser, homogénéiser et mettre à disposition d'utilisateurs autorisés toutes informations concernant la qualité chimique des eaux souterraines brutes et réaliser l'exploitation de ces données, notamment pour des synthèses nationales ».

Il intègre les analyses réalisées sur eaux brutes souterraines (non traitées) des services déconcentrés de la Santé (DDASS : Direction Départementale des Actions Sanitaires et Sociales).

Cette base de données nationale est un fichier composite de données aux échelles locales, régionales ou de bassins entiers.

Elle traite essentiellement des données relatives à la qualité des eaux souterraines brutes.

ZOOM SUR LE BASSIN DE LA SEINE

La base de données présente deux intérêts : elle comporte un très grand nombre de points de mesures (environ 6 500 points) bien répartis sur l'ensemble du bassin de la Seine et s'étend sur une longue période d'observation comprise entre 1972 et 1995 (figure 6).

De plus, la banque de données publique, nationale également, ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) intègre les données qualité depuis 1995 de la santé, des agences de l'eau, des Directions Régionales de l'Environnement (DIREN), des conseils généraux, et d'autres maîtres d'ouvrage.

L'évolution de la médiane* et celle des premier et troisième quartiles* de la distribution statistique annuelle des concentrations en nitrates dans l'ensemble des trois grands aquifères du bassin de la Seine (Craie, Eocène et Oligocène) montrent une augmentation régulière, remarquablement continue et quasi-linéaire, des concentrations en nitrates sur près de 30 années (figure 7).

L'augmentation de la valeur médiane des concentrations en nitrates mesurées dans le bassin de la Seine est en moyenne de 0,64 mg/l/an depuis plus de 30 ans.

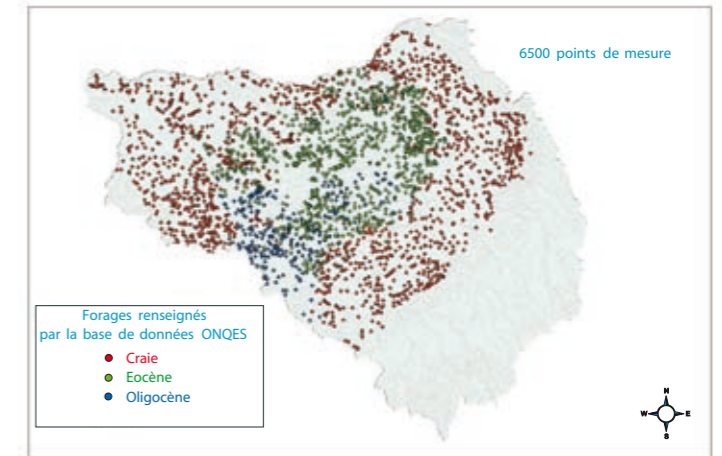


Figure 6 : Répartition géographique des forages de la base de données ONQES sur les aquifères de la Craie, de l'Eocène et de l'Oligocène.

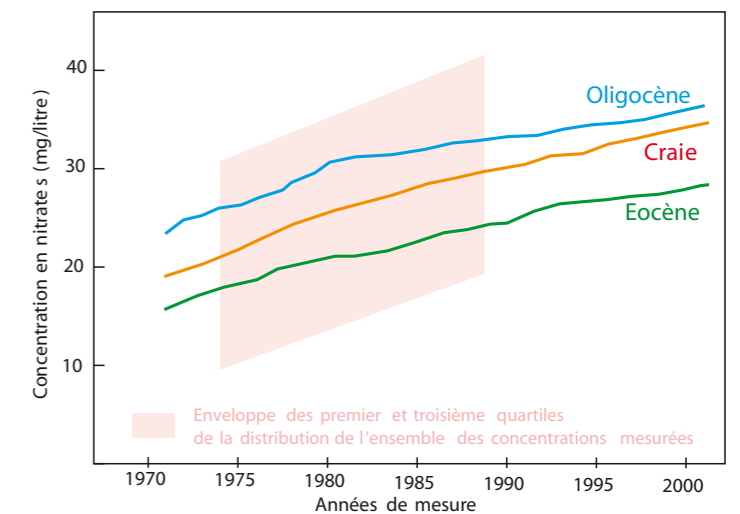


Figure 7 : Évolution annuelle de la médiane des concentrations en nitrates dans les captages sur l'ensemble du bassin de la Seine.



La pollution par les nitrates

Au moyen de modèles mathématiques, les chercheurs reproduisent l'état de la pollution du bassin pour mieux la comprendre et la combattre.

Ils s'appuient sur l'hydrologie qui étudie la progression de l'eau dans les aquifères et sur l'agronomie ou science des techniques agricoles.



L'évolution de la contamination par les nitrates de l'ensemble des aquifères du bassin amène à s'interroger. Si la cause de cette pollution (le développement de l'agriculture intensive sur le bassin) semble bien établie, il est plus difficile de répondre à ces questions :

- Les niveaux de pollution vont-ils se stabiliser ?
- Peut-on faire marche arrière pour retrouver rapidement une bonne qualité générale de nos eaux souterraines ?
- Quelle est l'efficacité de telle ou telle mesure agro-environnementale ?

Pour apporter des réponses à ces différentes questions, des modèles mathématiques ont été développés afin, dans un premier temps, de tenter de reproduire le taux de pollution actuel du bassin et sa dynamique, puis, dans un second temps, de permettre d'étudier à l'échelle du bassin l'impact de mesures de réduction de la pollution.

L'étude de la pollution azotée des aquifères du bassin de la Seine fait appel à deux spécialités scientifiques bien distinctes :

- **l'hydrogéologie** qui, d'une manière générale, s'occupe du flux de l'eau souterraine à travers les aquifères et autres milieux poreux peu profonds ;
- **l'agronomie** qui fédère et approfondit les connaissances scientifiques et techniques nécessaires à l'agriculture dont le rôle premier est de pourvoir à l'alimentation de l'humanité.

La modélisation de la pollution azotée du bassin de la Seine consiste donc dans **l'association d'un modèle agronomique et d'un modèle hydrogéologique**.

La simulation des transferts diffus de nitrates d'origine agricole est réalisée par **couplage** entre le modèle hydrogéologique **MODCOU** et le modèle agronomique **STICS**.

Le premier permet de simuler le comportement hydrodynamique du bassin et le transfert de polluants dans tous les compartiments du sol (bilan hydrique de surface, zone non saturée, formations aquifères).

Le second sert à simuler le comportement du système « sol-culture-atmosphère » au cours d'une ou plusieurs années successives et à évaluer les flux de nitrates susceptibles d'être entraînés dans les formations aquifères ou les rivières.

LES NOTIONS CLÉS

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système permettant de relier ses propriétés aux contraintes auxquelles il est soumis (ici la météorologie, les types de sol, les pratiques agricoles...) : son niveau de simplification dépend des objectifs d'étude poursuivis.

C'est à la fois un outil :

- de connaissance permettant de synthétiser et de tester la compréhension que l'on a du fonctionnement du ou des systèmes ;
- de prévision permettant d'anticiper les réactions du système à des changements de ses contraintes (modification des pratiques agricoles, changement climatique, etc.).

La démarche de modélisation consiste d'abord à traduire les connaissances acquises à partir d'études rigoureuses et détaillées menées sur le terrain et/ou en laboratoire, puis à valider les modèles en comparant leurs réponses à des mesures (débit des rivières et niveau piézométrique* pour les modèles hydrogéologiques par exemple).

Le modèle hydrogéologique MODCOU

Le modèle hydrogéologique MODCOU fait l'objet d'une description détaillée de son fonctionnement dans le fascicule « L'hydrogéologie du bassin de la Seine » de la collection du programme PIREN-SEINE. Il est possible de se reporter à son glossaire pour certains termes techniques.

Seuls les principes généraux de ce modèle sont présentés ici.

Le modèle MODCOU a pour objectif la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans les aquifères.

Comme précédemment précisé, il permet de reproduire le comportement hydrodynamique du bassin et le déplacement des polluants dans tous les compartiments du sol (de la zone non saturée aux aquifères).

Le domaine étudié est discrétisé* en mailles* carrées emboîtées, formant une structure multicouche : (une couche de surface et trois couches aquifères dans le bassin de la Seine (figure 8).

Aux mailles sont rattachées les caractéristiques physiques du domaine : direction de drainage, pente, type de sol et distribution des zones de production* principalement pour les mailles de surface et transmissivité*, coefficient d'emmagasinement*, porosité* pour les mailles souterraines.

D'une manière générale, MODCOU utilise cinq modules inter-connectés pour représenter les circulations d'eau dans le bassin :

- **un module d'entrée (ou de forçage)**, qui prend en compte les données météorologiques (précipitations et évapotranspiration potentielle ou ETP*) ; ici, elles ont été fournies par Météo-France sur la période 1970-2005 et sur une grille régulière de 8 kilomètres de côté couvrant l'ensemble du bassin ;
- **un module de production**, qui calcule évapotranspiration, infiltration, ruissellement et stockage dans le sol (bilan d'eau) en fonction des précipitations, de l'ETP et de paramètres de structure (types de sol, mode d'occupation) caractérisant des zones de production homogènes ;
- **un module de transfert en surface**, qui reproduit l'acheminement en rivière de l'eau de ruissellement ainsi que celle issue des échanges avec le domaine souterrain ;
- **un module de transfert souterrain**, qui simule les écoulements dans les aquifères en fonction de l'infiltration depuis la surface et des échanges nappes-rivière ;
- **un module d'échange surface-souterrain**, qui calcule les échanges à double sens entre les deux milieux (aquifères et cours d'eau).

Le calage des données de structure de la couche de surface et des trois couches souterraines représentées (Oligocène, Eocène et Craie) a été effectué pour optimiser la restitution des débits de 125 stations hydrométriques et celle des niveaux des nappes dans 139 piézomètres*.

À titre d'exemple, la figure 9 présente la comparaison des piézométries mesurées et calculées sur deux piézomètres du bassin et les débits calculés et mesurés de la Seine à Paris et de la Marne à Noisiel.

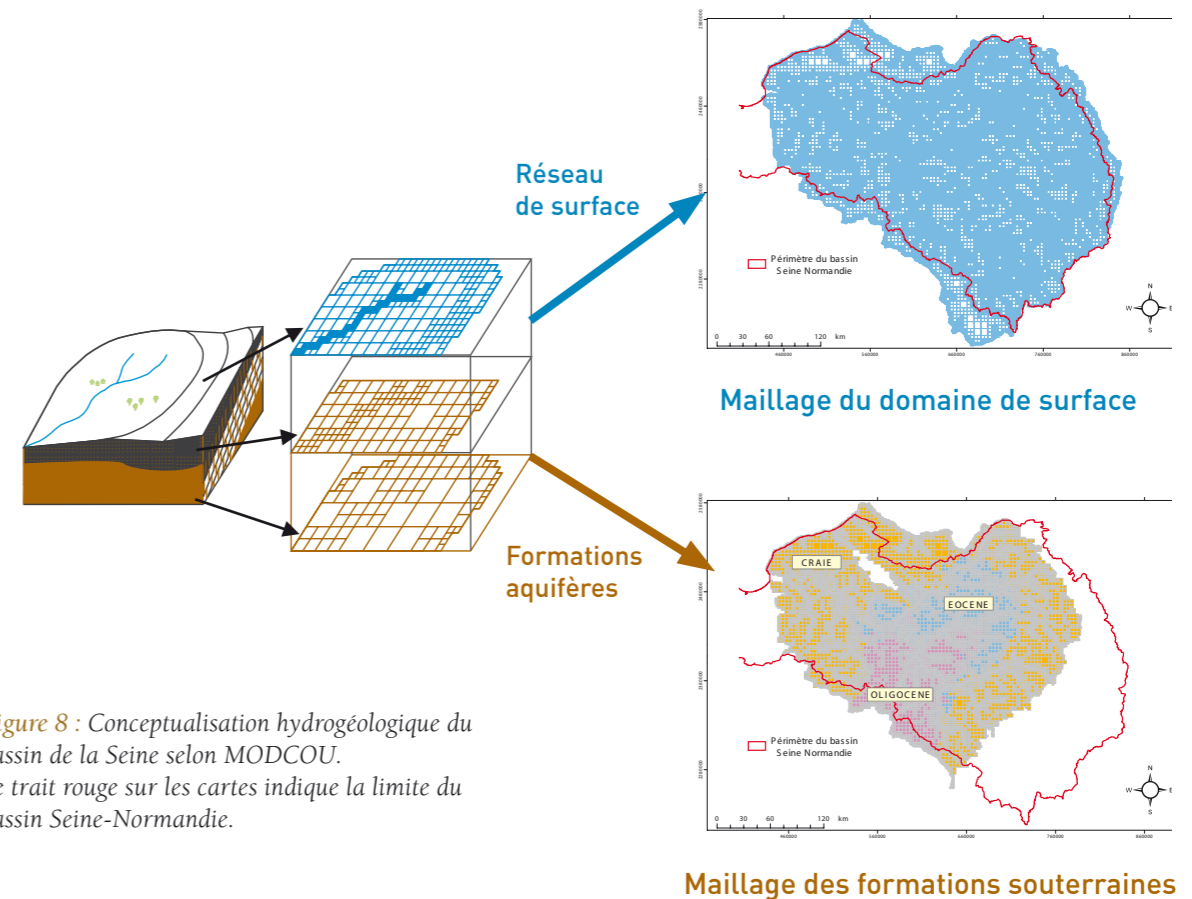


Figure 8 : Conceptualisation hydrogéologique du bassin de la Seine selon MODCOU. Le trait rouge sur les cartes indique la limite du bassin Seine-Normandie.

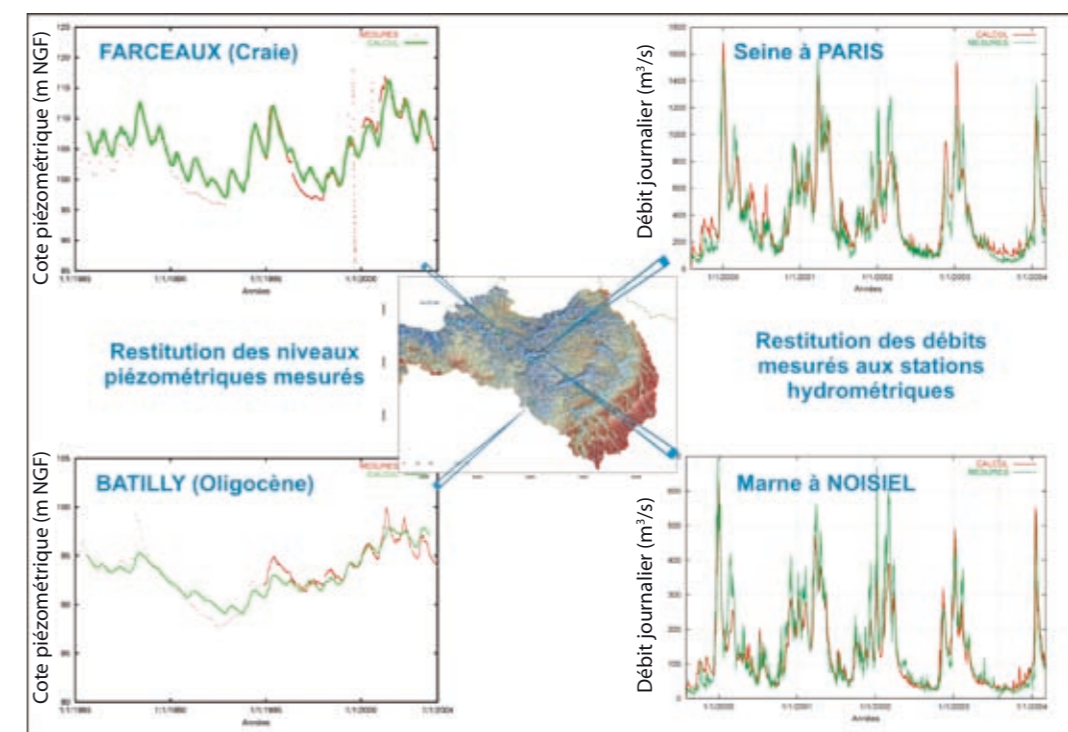


Figure 9 : Calage hydrodynamique du modèle en termes de restitution des cotes piézométriques des aquifères et de débit des rivières.

Le modèle agronomique STICS

OBJECTIFS ET DONNÉES DE RÉFÉRENCE

La lixiviation* n'est pas une grandeur directement mesurable en situation agricole. Il est nécessaire de recourir à **un modèle mathématique qui va simuler le comportement du système d'échange « sol-culture-atmosphère »**.

STICS (Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de simulation du cycle agronomique des cultures ainsi que de leurs bilans hydrique, azoté et carboné. Il a été développé par l'INRA* en collaboration avec différents organismes du milieu agronomique.

STICS est utilisé pour simuler au pas de temps journalier, le comportement du système d'échange sol-plante au cours de plusieurs années successives d'exploitation.

L'intérêt d'un modèle de ce type est de prédire des variables d'état du milieu ou des flux qui ne sont pas tous mesurables. Le modèle peut être utilisé dans une démarche de diagnostic des impacts d'une situation réelle ou dans une démarche de pronostic d'impact d'un scénario alternatif. Dans les deux cas, un travail rigoureux de calibration est nécessaire.

L'interface* supérieure du modèle est l'atmosphère caractérisée par plusieurs variables climatiques (radiation solaire, température minimale et maximale, précipitation, évapotranspiration potentielle).

L'interface inférieure se situe dans le sol au niveau de la profondeur maximale (de l'ordre du mètre) accessible au système racinaire (figure 10).

Celle-ci est fonction du type de sol et de la nature de la plante cultivée.

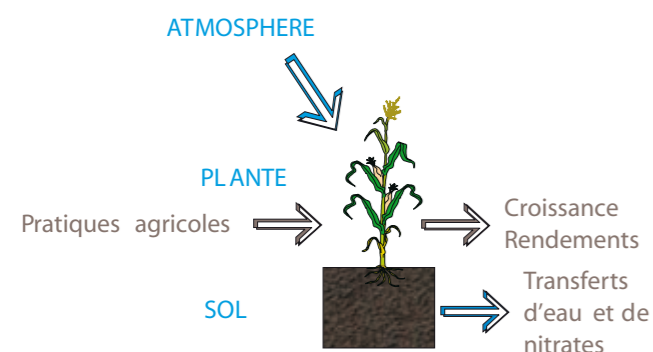


Figure 10 : Principe général des phénomènes pris en compte par STICS.

La mise en oeuvre de STICS requiert quatre sources de données (figure 11) :

- **données climatiques :** température minimale, maximale, pluviométrie, évapotranspiration potentielle (ETP) et rayonnement global, au pas de temps journalier ;
- **données « sol » :** le sol est décrit comme une succession de couches horizontales caractérisées par leurs propriétés physiques (épaisseur, masse volumique, teneur en eau à la capacité au champ* et au point de flétrissement*, teneur en cailloux). La couche de surface où se concentre l'activité biologique se caractérise par ses paramètres physicochimiques (teneurs en argile, en calcaire, en azote organique, albédo*, etc..) ;
- **paramètres « culture » :** il s'agit des paramètres relatifs aux différents processus agronomiques pris en compte (germination, levée, développement, etc..) incluant la prise en compte de l'effet des stress hydrique, thermique et azoté sur le fonctionnement de la plante ;
- **données « techniques culturales » :** elles déterminent les modalités et les dates des interventions culturales (semis, irrigation, apports d'engrais azotés, apports d'amendements organiques, récolte, travail du sol, incorporation des résidus de culture, etc.).

À ces données d'entrée, s'ajoutent celles concernant les variables d'initialisation (dates de début et fin de simulation ; humidité et quantité d'azote minéral initiales dans les couches du sol) et d'autres paramètres généraux communs à toutes les simulations tels que, par exemple, la profondeur maximale du sol affectée par l'évaporation.

Les données de sortie de STICS fournissent des grandeurs agronomiques (biomasse végétale, rendement en produit récolté, teneur en protéines des grains, bilan azoté de la culture, etc.) et des grandeurs environnementales (flux d'eau et de nitrates sortant de la zone racinaire).

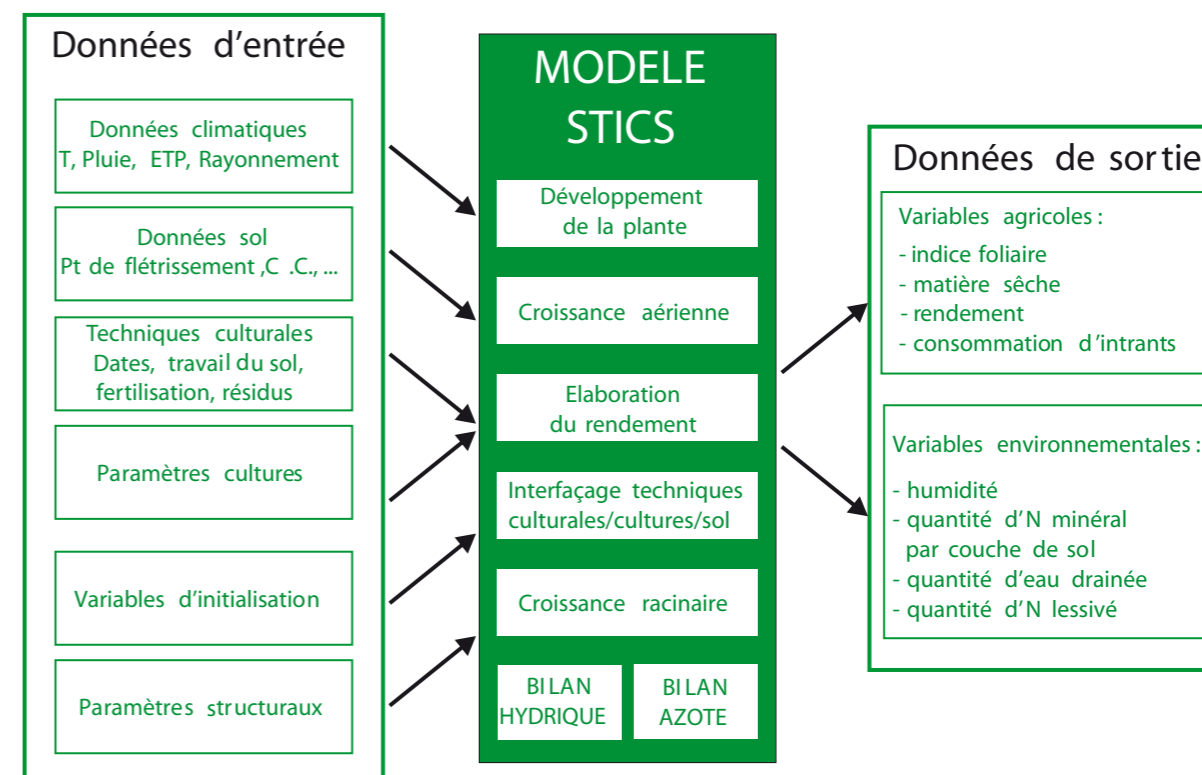


Figure 11 : Entrées-sorties de STICS.

SPATIALISATION DE STICS

Le couplage du modèle agronomique STICS avec le modèle hydrogéologique MODCOU a nécessité la mise en œuvre d'une procédure de spatialisation (figure 12).

Cette spatialisation permet la mise en correspondance de chaque maille de la grille de la couche de surface du modèle MODCOU en s'appuyant sur la définition

de zones géographiques « homogènes » croisant spatialement les données climatiques, les types de sol et les zones agricoles, tout en tenant compte de l'évolution temporelle des données météorologiques et des pratiques agricoles (pratiques, assolements*, ...). Le nombre d'unités spatiales ainsi définies est de 7 826 sur l'ensemble du bassin étendu de la Seine (figure 13).

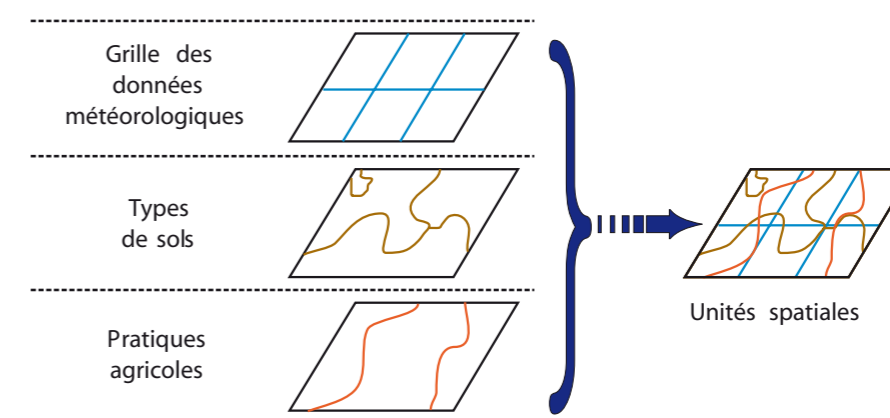


Figure 12 : Organisation spatiale des données météorologiques, pédologiques et agricoles.

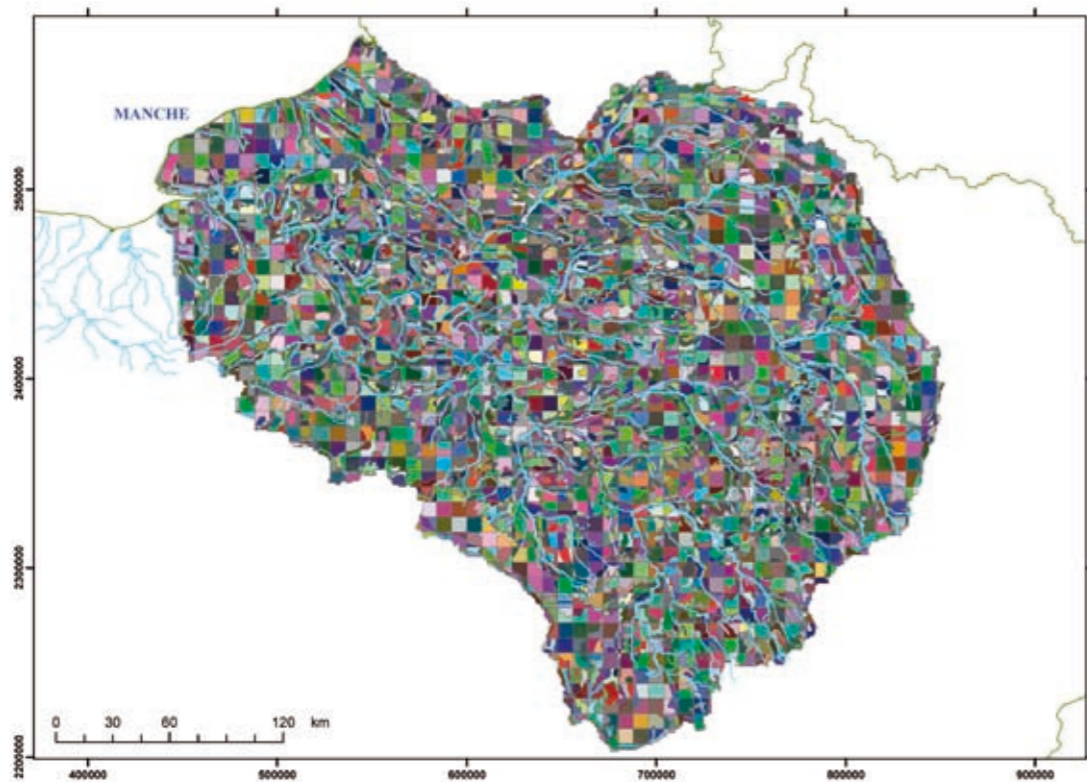


Figure 13 : Cartographie des unités spatiales de simulation du modèle agronomique STICS.

LES DONNÉES AGRICOLES

La simulation, par STICS, du flux de nitrates à la base du système racinaire des cultures fait appel à deux niveaux d'information concernant les pratiques agricoles :

- **Les successions de culture** sur une même parcelle expliquent davantage les risques de pertes en nitrates que la répartition (assolement) de cultures différentes sur un ensemble de parcelles.

Elles prennent en compte en effet la période d'interculture (entre récolte d'une culture et semis de la suivante) qui peut durer de plusieurs jours à plusieurs mois, si la culture suivante est une culture de printemps.

Le risque de lessivage des nitrates est alors au maximum en l'absence de végétation pour absorber le reliquat d'azote non utilisé par la culture précédente.

Le niveau de risque dépend, bien entendu, de la durée de la période d'interculture, de la pratique ou non de labour, de l'apport de fumier, mais aussi de la proportion de cultures de printemps et éventuellement de la mise en place de cultures intermédiaires.

- **Les séquences techniques** représentent des suites ordonnées de techniques culturales réalisées sur des plantations en vue d'en tirer une production. Ne sont prises en compte dans le modèle agronomique que les techniques culturales qui sont censées avoir un impact sur le cycle de l'azote.

Parmi elles figurent principalement les travaux du sol, les dates de semis et de récolte ainsi que les pratiques de fertilisation azotée minérale et organique.

La mise en relation des méthodes de culture sur le bassin versant de la Seine avec la hausse des teneurs en nitrates dans les aquifères et les cours d'eau, rend nécessaire une spatialisation des phénomènes et donc le choix d'un maillage spatial d'agrégation* des différents types d'information.

Le choix de ce maillage doit être guidé par trois principales contraintes :

1. Les sources d'information disponibles sur ce maillage doivent être de bonne qualité.
2. La précision spatiale de la maille doit être suffisante au regard de la zone étudiée, mais également permettre d'utiliser une partie des informations recueillies lors de la modélisation des flux de nitrates par le modèle agronomique.
3. Le maillage doit avoir une signification par rapport aux phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence (dans notre cas, des dynamiques agricoles représentées par des évolutions de modes d'occupation du sol et de pratiques agricoles).

Par rapport à toutes ces contraintes, le maillage en Petites Régions Agricoles (PRA) paraît constituer le meilleur compromis (figure 14).

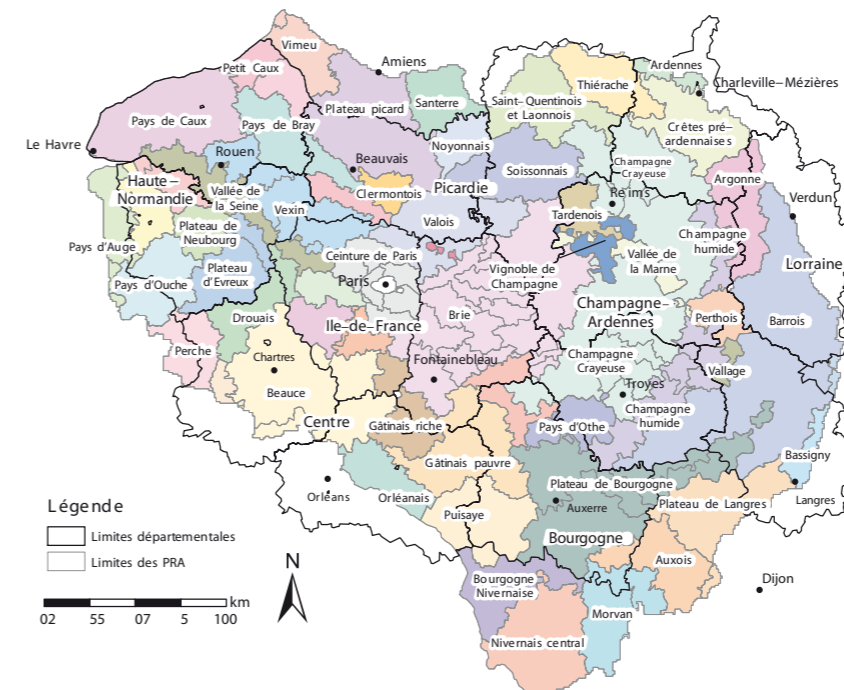


Figure 14 : Cartographie des Petites Régions Agricoles (PRA) du bassin.



Herse rotative pour préparation d'un lit de semence.



Capitules de tournesol.



Fleur mâle de maïs.



LE MAILLAGE PETITES RÉGIONS AGRICOLES (PRA)

La précision spatiale des PRA, au nombre de 147 sur le bassin et de taille moyenne égale à 425 km², est relativement bonne au regard des 78 600 km² couverts par le bassin de la Seine. Sa fiabilité est d'autant plus grande que la PRA est utilisée depuis 30 ans par les professionnels agricoles pour caractériser l'agriculture française.

De plus, les PRA présentent une bonne concordance avec les grands ensembles géologiques des aquifères du bassin de la Seine. Cette concordance s'avère particulièrement nette entre le Morvan et le socle granitique, la Champagne crayeuse et les couches du Crétacé supérieur, la Champagne humide et les couches du Crétacé inférieur, et enfin pour le Barrois, les plateaux de Langres et de Bourgogne et les couches du Jurassique.

Le renseignement sur les pratiques agricoles observées depuis le début des années 1970 (date qui représente le début de l'agriculture intensive à forte consommation d'intrants) sur chaque PRA du bassin a été effectué à partir de deux sources principales d'informations :

- des enquêtes directives auprès d'experts agricoles (conseillers agricoles principalement) appartenant au dispositif institutionnel des Organisations Professionnelles Agricoles ou à des coopératives ;
- des statistiques agricoles nationales et départementales.

Les bases de données finales établies par l'INRA de Mirecourt à partir de l'ensemble des informations collectées par enquête, contiennent, pour chaque culture d'une succession culturale, les séquences techniques selon trois thématiques principales :

- des informations d'ordre général sur les dates de semis et de récolte, le rendement, l'enfouissement des résidus de récolte, le pourcentage de culture intermédiaire implantée avant la culture considérée ;
- des informations relatives aux pratiques de fertilisation azotée minérale et organique (nombre d'apports, date et dose) ;
- des informations relatives aux différents types de travaux du sol (répartis en trois catégories : déchaumage, travail superficiel et labour) et à la façon dont ils sont combinés au cours du cycle cultural.

La diversité des systèmes de production agricoles du bassin de la Seine et leurs évolutions peuvent être décrites à l'aide de la classification européenne des Orientations Technico-économiques des Exploitations (OTEX). Cette classification est renseignée dans les recensements agricoles de 1970, 1979, 1988 et 2000. La figure 15 illustre la variation des grandes dominantes agricoles pendant cette période.

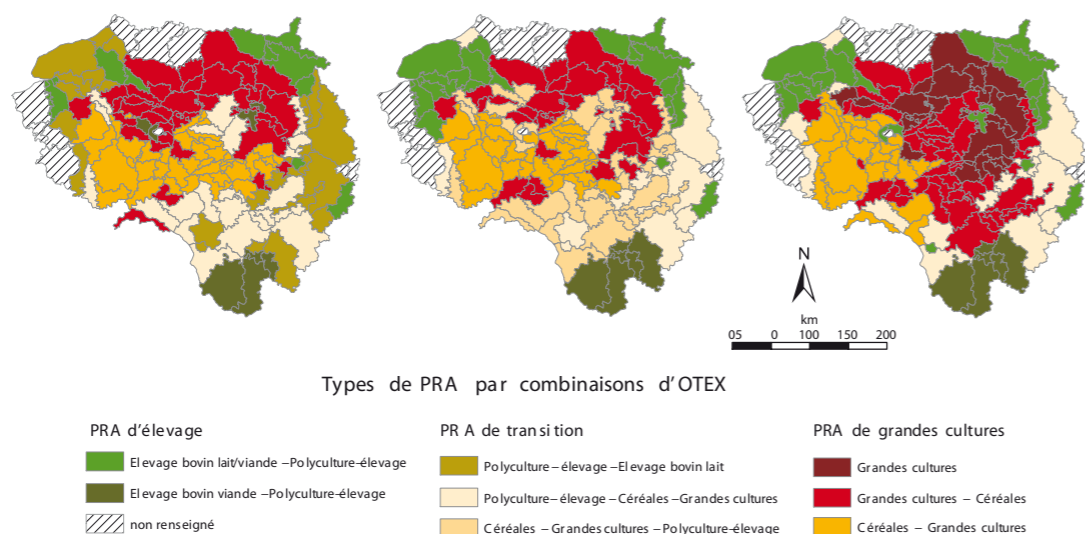


Figure 15 : Illustration de la variation des grandes dominantes agricoles sur le bassin entre les années 1970 et 1988 (d'après les Recensements Généraux de l'Agriculture).

Évolution de la pollution de 1970 à 2004 : analyses issues de la modélisation

Les flux d'azote lessivés, c'est-à-dire entraînés hors du système racinaire des cultures ou des prairies, ont été modélisés à l'aide du logiciel STICS spatialisé. Ces calculs ont été effectués sur la base des données complètes par Petites Régions Agricoles du bassin sur la période 1970-2004. Les flux d'azote ainsi calculés sont susceptibles d'être transférés vers les cours d'eau ou les nappes.

Les résultats obtenus sont fournis à l'échelle de chaque Unité Spatiale de Simulation sous forme de kilogramme d'azote (N) par hectare de surface agricole cultivée (Surface Agricole Utile) et au pas de temps de calcul journalier. Ramenés à des moyennes sur une période plus longue (annuelle ou pluriannuelle par exemple), ces résultats peuvent être cartographiés sur le bassin (figure 16).

COUPLAGE DE STICS ET DE MODCOU,

Le modèle agronomique STICS fournit, au pas de temps journalier, les flux d'azote à la base du système racinaire.

Cette quantité d'azote est alors disponible :

- pour être en partie lessivée et entraînée par ruissellement de surface ou sub-surface vers le réseau hydrographique ;
- pour être entraînée dans les eaux d'infiltration qui alimentent les nappes.

Le calcul de la concentration moyenne journalière est effectué en tenant compte de la part relative des surfaces cultivées (SAU) sur chaque maille du modèle de surface et des flux d'eau calculés résultant du bilan hydrique des précipitations effectué par le module de surface du modèle hydrogéologique.

Les flux d'azote sont alors convertis en concentration sous racinaire, exprimée en milligrammes de nitrates par litre (figure 18).

Cette concentration calculée en chaque maille du modèle est celle de l'eau d'infiltration qui va percoler à travers la zone non saturée avant d'alimenter la nappe sous-jacente.

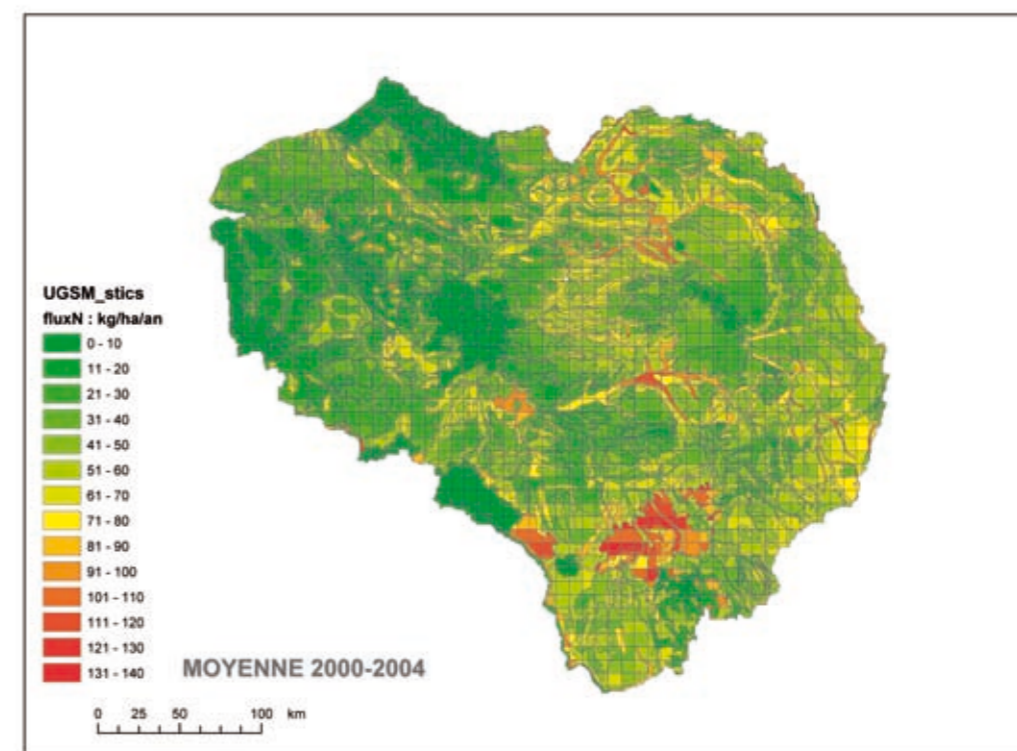


Figure 16 : Flux moyens d'azote sous racinaire (N) calculés par unité de simulation sur le bassin et sur la période 2000/2004 (en kg/ha de SAU/ann).

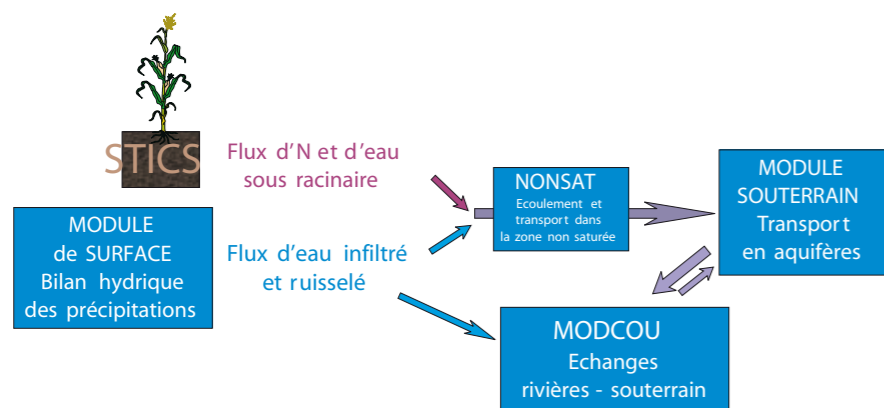


Figure 17 : Principe général du couplage STICS-MODCOU.

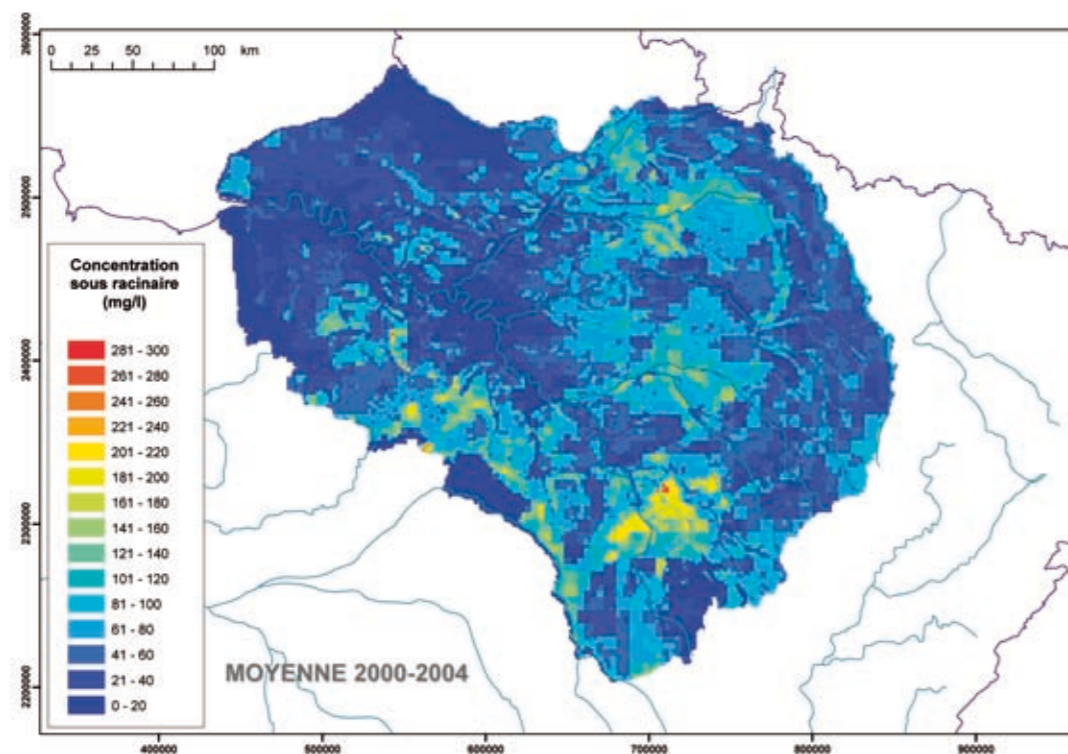


Figure 18 : Concentrations sous racinaires moyennes calculées entre 2000 et 2004 (en mg/l), rapportées sur la grille de surface du modèle hydrogéologique.

VALIDATION DU MODÈLE SUR LES CONCENTRATIONS MESURÉES EN AQUIFÈRES

De même que pour les données mesurées ONQES - SISE-Eaux (voir encadré page 13), la caractérisation de l'état de la concentration en nitrates dans un aquifère est donnée par la médiane de sa distribution statistique.

L'évolution annuelle de cette médiane sert donc de base à l'évaluation des capacités du modèle à reproduire les données observées et au calage de ses paramètres.

La figure 19 présente l'évolution des médianes des concentrations calculées au droit des ouvrages de mesure dans les différents aquifères simulés et leur comparaison avec celles estimées à partir des mesures effectuées entre les années 1970 et 2000.

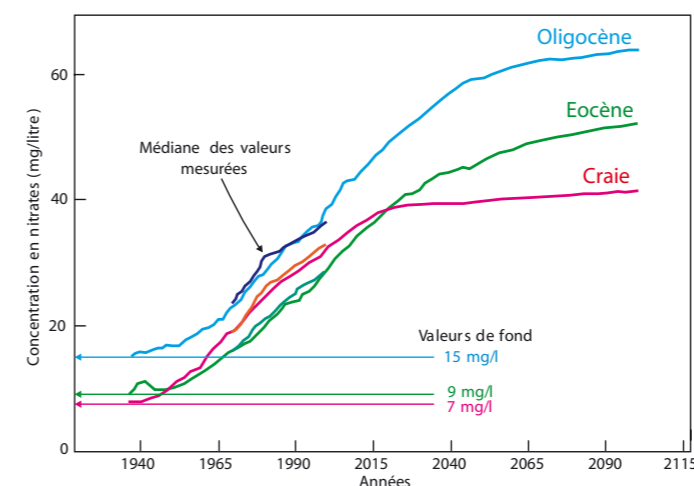


Figure 19 : Comparaison des résultats fournis par le modèle STICS-MODCOU et des valeurs observées in situ pour la médiane des concentrations en nitrates dans les formations aquifères de l'Oligocène, l'Eocène et la Craie.

Les prédictions pour les années futures correspondent à un maintien des pratiques agricoles des dix dernières années (scénario de type « Laisser Faire ») associées à la météorologie de ces mêmes années. La valeur de fond correspond à la teneur en nitrates qu'il est nécessaire d'imposer initialement dans les aquifères pour obtenir une bonne concordance entre concentrations calculées et concentrations mesurées.

Le résultat obtenu est bon, la variance des écarts entre les médianes mesurées et calculées n'excédant pas 5 mg/l.

On peut donc estimer que le modèle restitue bien l'évolution de la médiane des concentrations en nitrates par aquifère et donc la dynamique globale de mise en place de la pollution depuis plus d'un demi siècle.

Comme indiqué sur les courbes, le calage du modèle a nécessité d'imposer une « valeur de fond » qui correspond à la concentration en nitrates présente dans les formations aquifères antérieurement à l'intensification de l'agriculture au début des années 50.

Il n'existe que très peu de données de mesures en nitrates à cette période mais les quelques chroniques disponibles dans la bibliographie démontrent la réalité de telles valeurs.

Compte tenu de ces éléments, une carte simulée de la concentration en nitrates sur les formations affleurantes à une période correspondant à l'année 2004 peut ainsi être proposée (figure 20).

Les figures 21 à 23 (voir page suivante) présentent la répartition spatiale, par ouvrage et pour chaque aquifère considéré, de la moyenne des écarts calculés pour l'année 2000 entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées par le modèle au droit de chaque point d'analyse.

Les points jaune à rouge indiquent une surestimation des valeurs calculées par le modèle. Les points bleu foncé à violet indiquent une sous estimation de ces mêmes valeurs.

Les points bleu turquoise indiquent une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles calculées (plus ou moins 10 mg/litre d'écart).

Ces cartes font apparaître que, globalement et sur une grande majorité d'ouvrages, le modèle reproduit bien l'état de pollution actuel des aquifères.

MODÉLISER

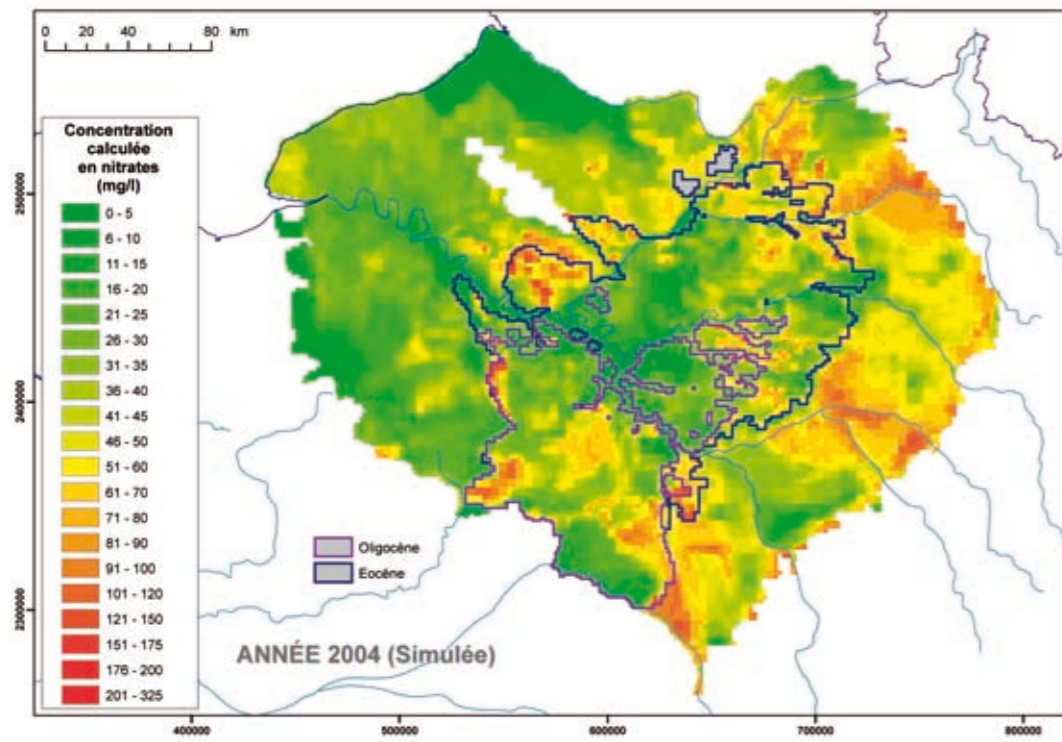


Figure 20 : Concentrations en nitrates calculées pour l'année 2004.

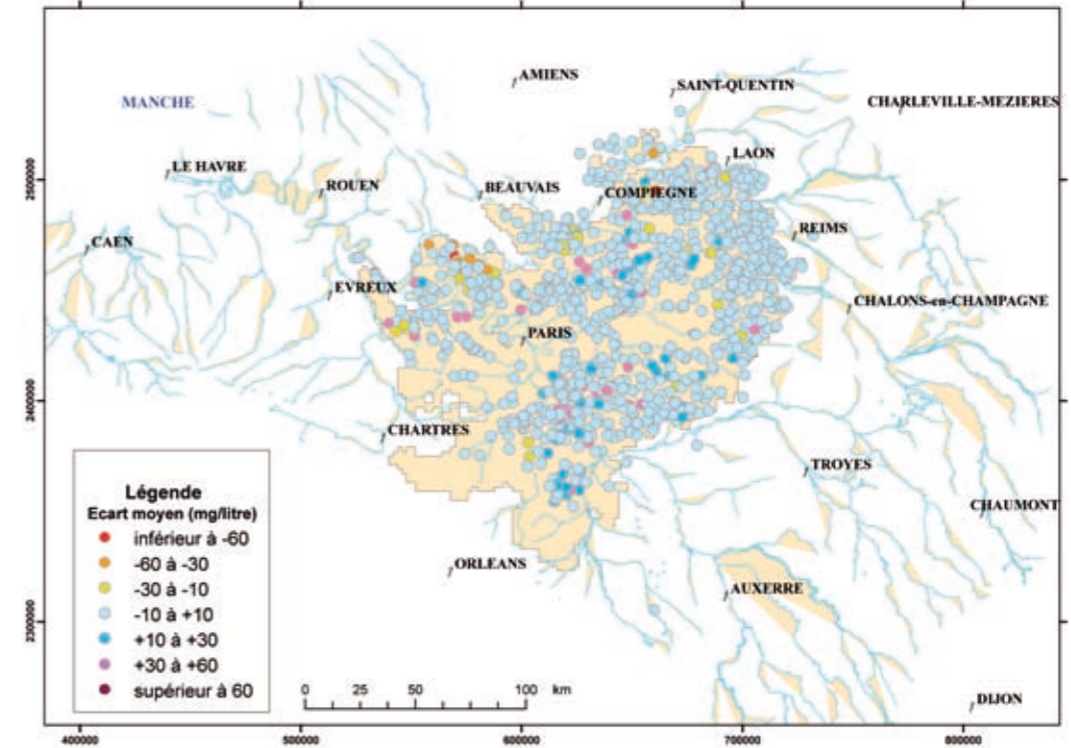


Figure 22 : Moyenne des écarts entre concentrations en nitrates observées et simulées en 2000 pour l'aquifère de l'Éocène.

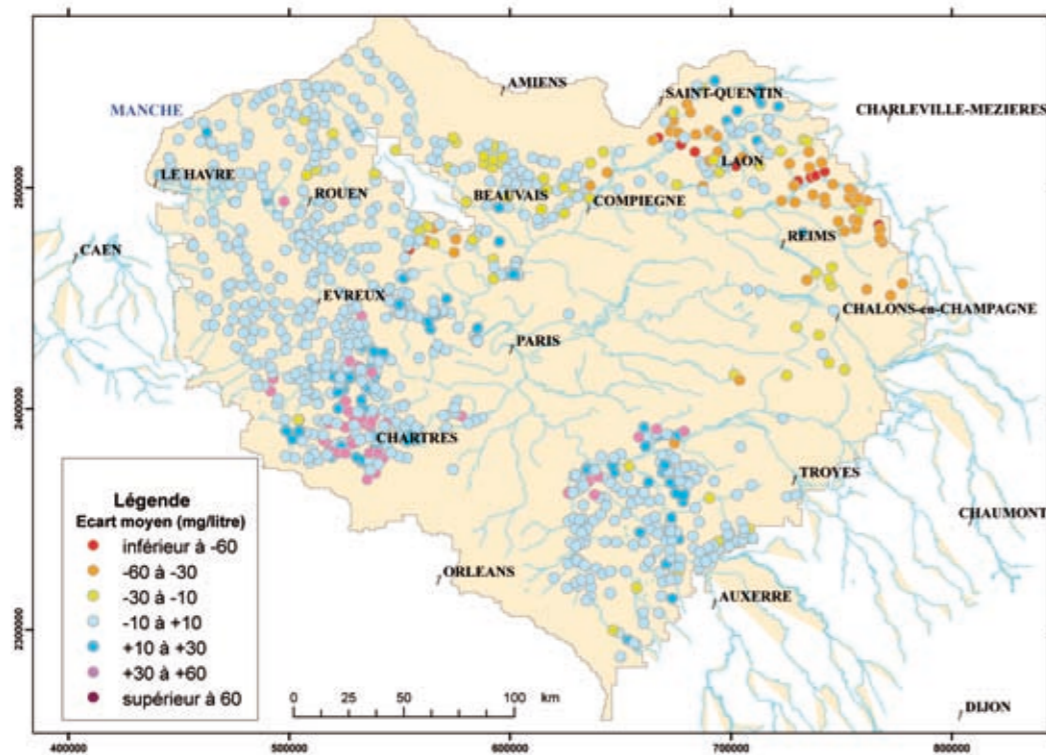


Figure 21 : Moyenne des écarts entre concentrations en nitrates observées et simulées en 2000 pour l'aquifère de la Craie.

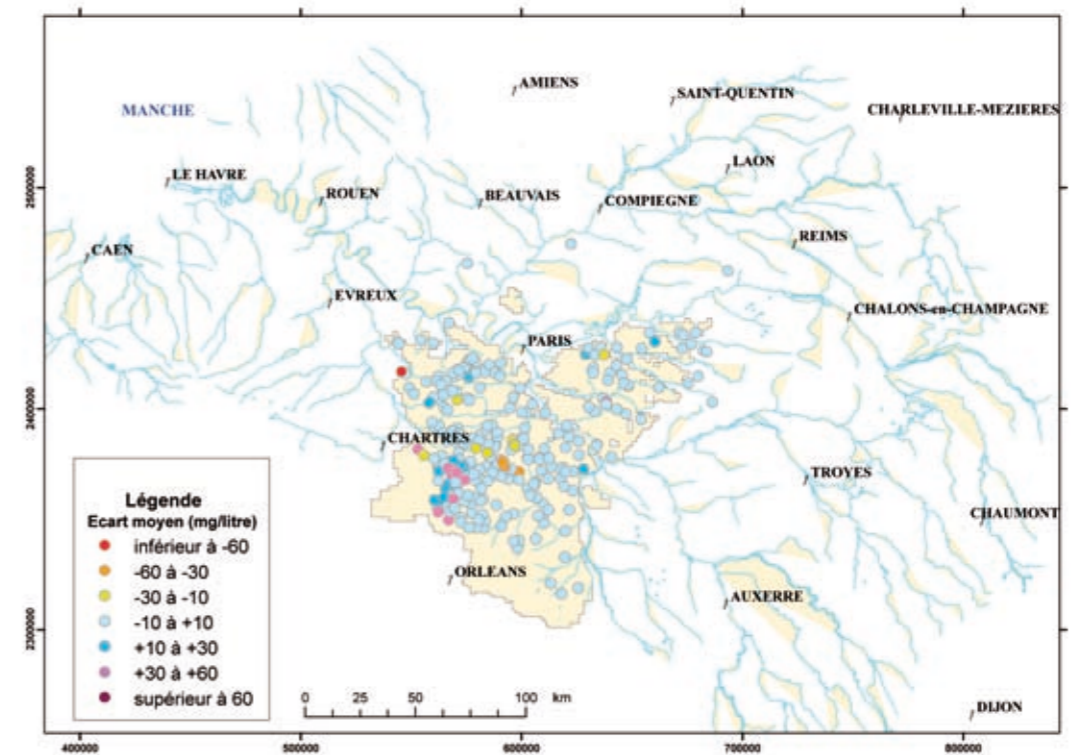


Figure 23 : Moyenne des écarts entre concentrations en nitrates observées et simulées en 2000 pour l'aquifère de l'Oligocène.

Plusieurs hypothèses peuvent être apportées pour expliquer certains écarts importants entre valeurs mesurées et calculées.

Les trois principales sont :

- un défaut, localement, de représentativité du modèle agronomique, lié à des conditions agronomiques précises qui peuvent différer des conditions moyennes prises en compte dans les simulations.

À l'échelle du modèle présenté, le bassin de la Seine dans son intégralité, ces spécificités très locales sont difficiles à prendre en compte ;

- un problème de représentation du modèle hydrogéologique MODCOU, notamment dans la géométrie des formations aquifères modélisées.

Ceci est particulièrement vrai en bordure de formation où les épaisseurs imposées dans le modèle sont parfois beaucoup trop faibles (inférieures à 2 mètres) ou dans des secteurs où cette épaisseur « utile » est sous-estimée comme c'est certainement le cas au nord de la Champagne.

L'intégration de cartographies plus précises des épaisseurs utiles (et plus particulièrement dans la Craie) devrait permettre de corriger certains biais ;

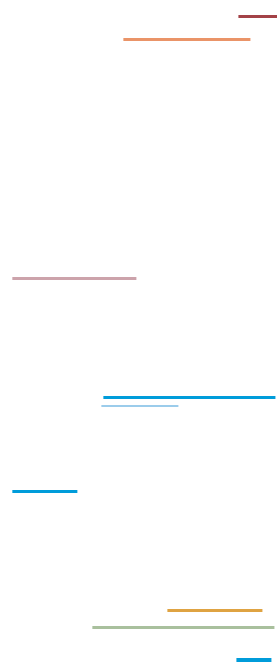
- la non prise en compte, à ce jour, du caractère multicouches au sein même des aquifères. En effet, dans le modèle, les trois formations représentées sont considérées comme homogènes sur toute leur épaisseur. Or, dans la réalité, ces formations sont généralement constituées d'alternance de bancs aquifères séparés par des lentilles argileuses plus ou moins perméables.

Ces différents bancs sont donc plus ou moins protégés des sources de pollutions superficielles. Une mesure ponctuelle, effectuée à telle ou telle profondeur ne reflètera pas spécialement l'état de pollution moyen de la formation (les formations superficielles étant les plus touchées).

Un découpage vertical des formations du Tertiaire (Eocène, Oligocène) permettant de distinguer les principales formations aquifères le composant (sables de Fontainebleau, calcaires de Beauce et Brie, calcaires du Champigny ...) a été initié en 2007 et devrait permettre, là aussi, d'améliorer localement les résultats.



Racines.



Ces quelques limites de la modélisation de la pollution nitrique du bassin dans sa forme actuelle, effectuée à grande échelle, ne doivent pas masquer la fiabilité de cette dernière à reproduire, dans la grande majorité des cas, l'état actuel de la pollution et son évolution.

Ce type de modèle, représentatif du fonctionnement du bassin à l'échelle régionale, ne peut et ne pourra toutefois pas remplacer les études de terrain ni les recherches appliquées à l'échelle des petits territoires, comme les bassins d'alimentation de captage.

Mais le plus important reste que le modèle reproduit très bien la dynamique d'évolution dans son ensemble de la pollution par les nitrates du bassin de la Seine depuis plus de 30 ans.

Ceci lui confère donc un bon degré de fiabilité dans sa capacité à prévoir les grandes évolutions de la pollution attendues à court et moyen terme. Il pourra donc permettre de réorienter ou de conforter les politiques de protection des eaux souterraines mises en place.



Épandage.



Champ de blé.





Pour décider d'éléments quantifiés sur la base

En accord avec la Directive Cadre Européenne sur l'eau, il faudrait en 2015 que la qualité de nos eaux souterraines soit redevenue bonne. Un objectif ambitieux qu'un certain nombre d'actions vise à atteindre, comme la protection des captages ou les méthodes de fertilisation raisonnée.

Quelle est l'efficacité réelle de ces mesures ? Peut-on la quantifier ? Les chercheurs apportent des éléments de réponse en ce qui concerne la pollution par les nitrates.



Chacun a aujourd'hui pris conscience de la nécessité de préserver les formations aquifères.

Les directives européennes (page 33) et la menace de sanctions en cas de non respect par la Commission Européenne ont mobilisé les États membres, la France en particulier.

La Directive Cadre sur l'Eau, DCE, oriente la politique de gestion globale de la ressource car elle fixe des objectifs ambitieux comme une bonne qualité des eaux souterraines en 2015, la préservation et l'arrêt de la dégradation de l'ensemble des formations aquifères et pas seulement des captages.

Dans ce contexte, la modélisation aura pour objectif de vérifier la faisabilité de telle ou telle action et de mesurer ses effets potentiels.

Mesures de protection des eaux souterraines et mise en œuvre des réglementations

Les mesures de protection des eaux souterraines contre la pollution par les nitrates sont, en France, basées sur deux approches principales qui permettent de mettre en application la Directive « Nitrates » établie en 1991.

Ce texte constitue le principal instrument réglementaire de lutte contre les pollutions azotées d'origine agricole qui constituent la majeure partie des pollutions diffuses.

Transposée en droit français par le décret n°93-1038 du 27 août 1993, son application se décline en plusieurs volets :

- la délimitation de zones vulnérables ;
- la définition et la mise en œuvre de programmes d'actions en zones vulnérables, imposant à tout agriculteur qui y est établi de limiter la fertilisation azotée ;
- l'application volontaire d'un code national des bonnes pratiques agricoles en dehors des zones vulnérables.

ZONES VULNÉRABLES ET SANCTIONS

Environ 50% de la Surface Agricole Utile (SAU) française est aujourd'hui classée en zone vulnérable et trois générations de programmes d'actions se sont succédées :

- la première (1996-2000) visait à corriger les pratiques les plus polluantes ;
- la seconde (2001-2003) devait permettre l'évolution de ces pratiques afin de protéger, voire de restaurer la qualité des eaux ;
- la troisième génération de programmes, lancée en juillet 2004, consiste aujourd'hui en un renforcement des mesures engagées par les précédents programmes.

Celles-ci s'appliquent désormais sur des territoires plus vastes et un contrôle accru de leur bonne application est prévu en parallèle.

Un agriculteur dont l'exploitation est classée ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) risque une sanction financière de la police de l'eau ou de la police des installations classées s'il ne respecte pas les prescriptions des plans d'actions. S'il perçoit des subventions de la Politique Agricole Commune (PAC), il s'expose en outre à des pénalités. Le respect de la directive « nitrates » est en effet, depuis le 1^{er} janvier 2005, un critère de conditionnalité des aides de la PAC.

LES BONNES PRATIQUES AGRICOLES

En dehors des zones vulnérables, la lutte contre les pollutions azotées d'origine agricole repose sur la mise en place de mesures dites de « bonnes pratiques agricoles » :

- **le conseil en fertilisation**, qui doit permettre d'ajuster les apports d'engrais en fonction des besoins des plantes et des conditions de sol et météorologiques locales. Il s'agit d'éviter une politique de fertilisation par excès et donc de diminuer sensiblement les doses d'engrais apportées annuellement par l'agriculteur. On peut citer par exemple, l'opération « Ferti-Mieux », lancée en 1991 par l'ANDA (Association Nationale pour le Développement Agricole) et le Ministère de l'Agriculture, et qui vise à lutter contre les pollutions diffuses par un changement volontaire des pratiques agricoles en matière de fertilisation : réduction des doses et des périodes d'application ;

- la mise en place de bandes enherbées pour limiter les transferts de nitrates vers les cours d'eau. Plus axées vers la protection des eaux de surface, ces bandes enherbées peuvent être parfois efficaces sur les eaux souterraines en particulier en milieu karstique comme en Craie de Seine Maritime et dans le Tertiaire du Champigny. Ces formations enregistrent de nombreuses pertes directes des cours d'eau vers les eaux souterraines (Yerres en particulier).

Les bandes enherbées, d'au moins 6 mètres de large, sont efficaces s'il y a ruissellement. Les particules en suspension se déposent sur les rugosités de l'herbe. Ainsi les produits phytosanitaires (organiques ou minéraux) sont-ils retenus. La pellicule de surface, riche en humus et débris végétaux, constitue une zone de contact ou un processus physico-chimique assure une fixation des substances. Une partie de l'eau s'infiltre et entraîne les substances en solution et la zone racinaire favorise la rétention puis la dégradation de celles-ci. Les transferts vers le ruisseau ou la rivière sont ainsi limités.

Certaines sources documentaires (Arvalis) avancent les chiffres suivants :

- limitation du ruissellement : -60%
- Matières En Suspension (MES) : -85%
- nitrates : -45%
- phosphates : -31%
- pesticides : -72%.

En l'état actuel des connaissances, il est impossible de simuler l'efficacité de ces bandes enherbées à l'échelle d'un bassin versant de la taille de celui de la Seine.



Champs de culture séparés par des bandes enherbées et arborées.

- la mise en place d'inter-cultures de type CIPAN (Culture Intermédiaire Piège A Nitrates).

Les CIPAN (autrefois appelés « engrais verts ») sont constitués de couverts végétaux, généralement de la moutarde, implantés sur une parcelle entre la récolte d'une culture et le semis de la culture suivante. Ces périodes d'inter-culture peuvent être longues, de l'ordre de 6 à 8 mois par exemple entre un blé et une culture de printemps comme la betterave.

Les CIPAN permettent donc d'éviter que les sols restent nus pendant une longue période, et que les reliquats azotés restant dans le sol après la récolte ne soient ainsi lessivés en profondeur pendant la période hivernale, d'où leur nom de « pièges à nitrates ».

Outre ce rôle de « pièges à nitrates », ils permettent également de lutter contre les adventices*, par effet de concurrence, en évitant la sélection d'une flore spécifique et de réduire l'érosion des terres cultivées. Les CIPAN sont réellement profitables lorsqu'ils sont éliminés mécaniquement avant la prochaine culture.



DIRECTIVES EUROPÉENNES

DIRECTIVE EUROPÉENNE 91/676/CEE DU 12 DÉCEMBRE 1991 DITE DIRECTIVE « NITRATES »

Elle constitue le principal instrument réglementaire pour lutter contre les pollutions liées à l'azote provenant de sources agricoles. Elle concerne l'azote toutes origines confondues (engrais chimiques, effluents d'élevage, effluents agro-alimentaires, boues..) et toutes les eaux quels que soient leur origine et leur usage.

L'application nationale de cette directive a débuté en 1994 et comprend plusieurs volets :

- La délimitation de zones vulnérables dans les secteurs où les eaux présentent une teneur en nitrates approchant ou dépassant le seuil de 50 mg/l et/ou ont tendance à l'eutrophisation. La délimitation actuelle (mai 2000) en France métropolitaine concerne 74 départements. Elle s'appuie sur les observations de la campagne de surveillance de la qualité des eaux souterraines et superficielles (1997-98) qui a confirmé la poursuite de la dégradation de la qualité dans les secteurs pollués.
- La définition de programmes d'actions dans les zones vulnérables s'appliquent à tous les agriculteurs de cette zone.

Si le 1^{er} programme (1997-2000) visait à corriger les pratiques les plus polluantes, le second (2001-2003) doit permettre l'évolution de ces pratiques afin de protéger, voire de restaurer la qualité des eaux :

- des objectifs quantifiés de gestion des fertilisants azotés et de couverture des sols sont fixés localement ;
- un code national des bonnes pratiques agricoles d'application volontaire est appliqué en dehors des zones vulnérables ;
- une évaluation locale et nationale de la mise en oeuvre de la directive est prévue en 2004.

Les principales mesures du 2^{ème} programme d'actions sont :

- le respect de l'équilibre entre les besoins des cultures, les apports en fertilisants azotés et les fournitures des sols ;
- l'établissement d'un plan de fertilisation et l'enregistrement des apports effectués ;
- la limitation des apports d'effluents d'élevage : de 210 Kg d'azote/ha épanchable par an (au début du programme) pour atteindre 170 kg/ha (au 20/12/2002) ;
- le respect de périodes d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés ;

- les restrictions d'épandage à proximité des eaux de surface, sur sols en forte pente, détrempés, inondés, gelés ou enneigés ;
- le respect de durées réglementaires de stockage des effluents d'élevage ;
- l'obligation de couverture des sols, si nécessaire, et de maintien enherbé des berges de cours d'eau.

Ces mesures sont complétées par :

- des actions renforcées dans les zones en excédent structurel d'azote lié aux élevages (ZES) : une zone est considérée en excédent structurel d'azote dès lors que la quantité totale d'effluents d'élevage produite annuellement conduirait, si elle était épanchée en totalité, à un apport annuel d'azote supérieur à 170kg d'azote/ha.

Ces actions s'appliquent à l'échelle de l'exploitation et concernent :

- la fixation de la surface maximale d'épandage autorisée ;
- l'obligation de traiter ou de transférer les effluents ne pouvant pas être épanchés dans la limite de ces maxima ;
- l'interdiction d'augmenter les effectifs animaux par espèce tant que la résorption de l'excédent structurel n'est pas réalisée. Toutefois, une dérogation peut être accordée pour les jeunes agriculteurs et les exploitations de dimension économique insuffisante.

- des actions complémentaires dans les zones situées dans les bassins versants en amont des prises d'eau superficielle destinées à la consommation humaine et en situation de dépassement pour le paramètre nitrates.

Elles s'appliquent à l'échelle de l'exploitation et comprennent :

- une obligation de couverture hivernale des sols durant la période de risques de lessivage des nitrates vers les eaux ;
- une obligation de maintien en bordure de cours d'eau de l'enherbement des berges, des surfaces en herbe, des arbres, des haies, des zones boisées et de tout aménagement visant à limiter le ruissellement et le transfert vers les eaux superficielles notamment les talus ;
- des conditions au retournement des prairies ;
- une limitation des apports azotés, toutes origines confondues, identique ou non selon les exploitations.



DIRECTIVE EUROPÉENNE 2000/60/CEE DU 23 OCTOBRE 2000 DITE DIRECTIVE CADRE SUR L'EAU

Le Parlement européen et le Conseil ont adopté le 23 octobre 2000 la directive 2000/60/CEE, dite Directive Cadre sur l'Eau (DCE), établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Depuis 1975, une trentaine de directives ou de décisions communautaires ont été adoptées dans le domaine de la préservation des milieux aquatiques et des ressources en eau.

Abrogeant plusieurs de ces textes, à l'exception des directives relatives à la consommation humaine (directive 98/83/CE du 3 novembre 1998), aux eaux de baignade (directive 76/160/CEE du 8 décembre 1975), aux eaux résiduaires urbaines (directive « eau » 91/271/CEE du 21 mai 1991) et aux nitrates d'origine agricole (directive « nitrates » 91/676/CEE du 31 décembre 1991), la DCE vise à apporter une vision d'ensemble à la politique européenne de gestion de l'eau et à établir un cadre européen pour la protection des eaux continentales, souterraines et côtières.

Ce texte très ambitieux engage chaque État-membre à parvenir à terme de quinze ans à un « bon état écologique des eaux ».

Dans le cas où l'atteinte du bon état écologique en 2015 apparaît inenvisageable du fait du niveau de dégradation observé entraînant une impossibilité technique de réaliser des travaux de restauration ou une impossibilité économique (coûts exorbitants qui seraient engendrés, usages ne pouvant pas être remis en cause), cet objectif pourra être fixé à un niveau moins exigeant voire reporté à une échéance ultérieure.

Ces cas de dérogation devront être réduits au maximum possible.

La DCE fixe un second objectif de non détérioration des ressources en eau et définit à cette fin des stratégies particulières à mettre en place pour la lutte contre la pollution toxique ainsi que pour la prévention et le contrôle de la pollution des eaux souterraines.

Elle s'inspire fortement de la politique française de gestion de l'eau dont elle reprend les principes directeurs afin de guider l'action des États-membres en vue de la réalisation de ses objectifs.

L'action des États-membres doit s'inscrire dans une planification à mener à l'échelle des districts hydrographiques.

Elle confirme la place du milieu naturel comme élément central de la politique de l'eau et réaffirme le rôle des acteurs de l'eau.

Ses innovations portent essentiellement sur les objectifs environnementaux qu'elle fixe dans un délai précis mais aussi sur la prise en compte de l'économie et de l'aménagement du territoire à chaque étape de sa mise en œuvre ainsi que sur un renforcement de la participation active du public.

La mise en œuvre de la DCE repose sur un calendrier prévoyant notamment :

- un recensement des bassins et la définition des districts hydrographiques en 2003 : le découpage du territoire français en 6 bassins hydrographiques est conservé tel qu'il existe aujourd'hui ;
- la réalisation en 2004 d'un état des lieux faisant l'analyse pour chaque district hydrographique des caractéristiques naturelles, des pressions s'exerçant sur la ressource et des impacts générés, sur la base d'un découpage en masses d'eau ;
- la mise en place d'un premier programme de surveillance de l'état des eaux ;
- l'élaboration dès 2009 de plans de gestion et de programmes de mesures qui, pour chaque district, définiront les objectifs à atteindre pour 2015 et les actions à mettre en œuvre ; ces documents seront révisés en 2015 puis tous les 6 ans ; ils consisteront en France en une modification des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE).

La DCE et l'instauration du référentiel des masses d'eau ne remettent ainsi pas en cause les politiques de gestion de l'eau à l'échelle des bassins versants en France. Seule une articulation entre SDAGE, SAGE, contrats de milieux et masses d'eau doit être recherchée.

La DCE est transposée en droit français par la loi n°2004-338 du 21 avril 2004.

Cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) : modélisation et évaluation de leur efficacité dans le bassin de la Seine

Le rôle des CIPAN sur les flux d'azote sous racinaire susceptibles d'atteindre les nappes, a pu être étudié par modélisation sur l'ensemble du bassin de la Seine.

L'introduction de culture intermédiaire de type CIPAN est effectuée dans les rotations* de cultures de chaque Petite Région Agricole (voir encadré page 22) lorsque le calendrier agricole le permet, c'est-à-dire :

- présence d'un sol nu à partir de fin août-début septembre et si
- la période de sol nu est supérieure à 50 jours.

Afin d'estimer l'impact de l'introduction de CIPAN dans les rotations de cultures, un calcul comparatif a été effectué sur une période couvrant les années 1992 à 2004.

Cette période est suffisamment longue pour être significative.

Les pratiques agricoles étudiées sont évidemment représentatives de ce qui se fait actuellement sur le bassin.

La mise en place de CIPAN dans les rotations de cultures du bassin permet, localement, une réduction sensible des flux d'azote et par voie de conséquence des concentrations sous racinaires susceptibles de s'infiltrer vers les nappes sous jacentes (figures 25 et 26).

Ces résultats corroborent l'étude de l'INRA (précédemment citée) qui conclut que les cultures intermédiaires peuvent réduire **jusqu'à 50% voire 90% le lessivage des nitrates dans l'hiver qui suit leurs applications.**

La réduction des flux d'azote permise par l'introduction de CIPAN est fonction du niveau de pollution en leur absence, de l'importance du piégeage opéré l'année du semis et de sa fréquence au sein de sa rotation.

Ainsi, cette fréquence peut être par exemple de 50% pour une rotation betterave-blé, ou de 25% pour une rotation betterave-blé-colza-blé et de 0% pour une prairie permanente.



Champ de moutarde.

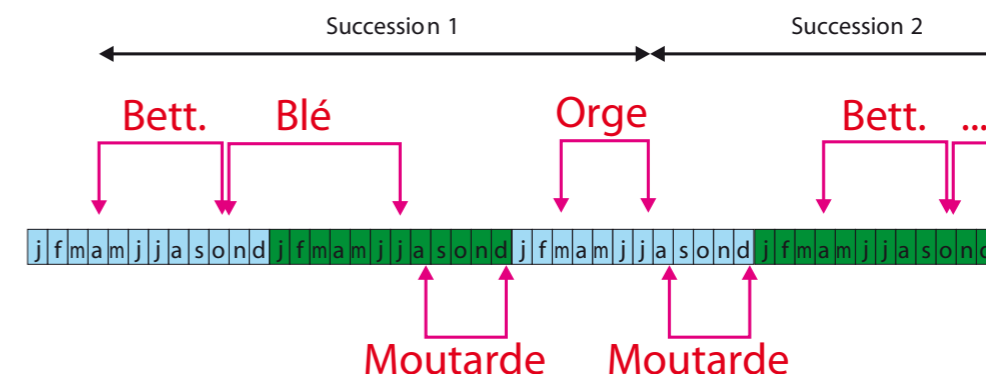


Figure 24 : Exemple d'insertion d'une culture intermédiaire dans un assolement Betterave-Blé-Orge.

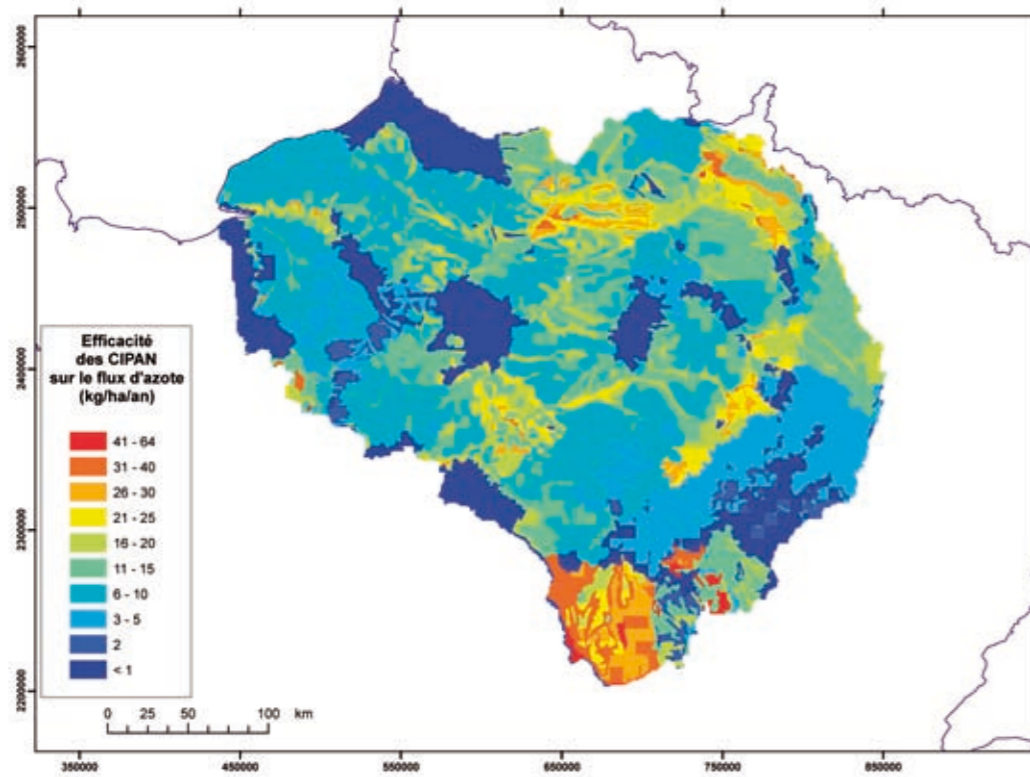


Figure 25 : Réduction des valeurs de flux d'azote sous racinaire liées à l'introduction de CIPAN (valeurs exprimées en kg par hectare de Surface Agricole Utile (SAU) et par an).

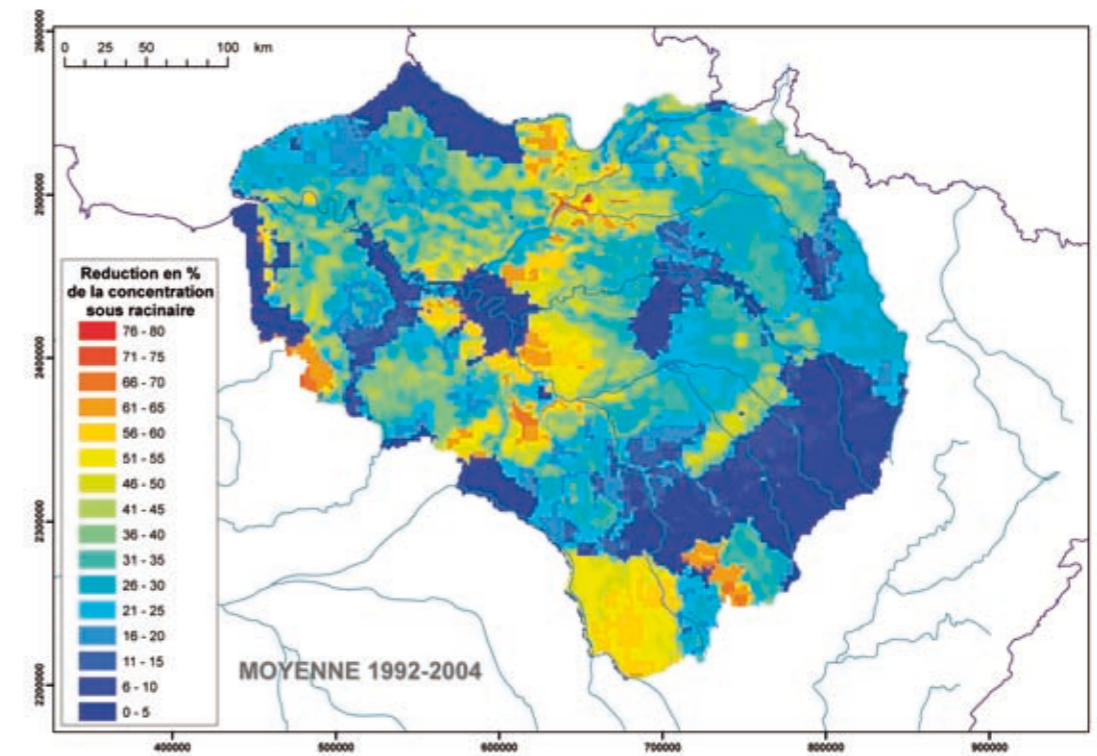


Figure 27 : Réduction relative (en %) de la concentration sous racinaire liée à l'introduction de CIPAN (à l'échelle de l'ensemble du territoire). Ce résultat tient compte de la proportion de SAU sur chaque maille du maillage de surface du modèle hydrogéologique et prend donc en compte la « dilution » par les surfaces non cultivées (zones urbanisées, routes, forêts, ...).

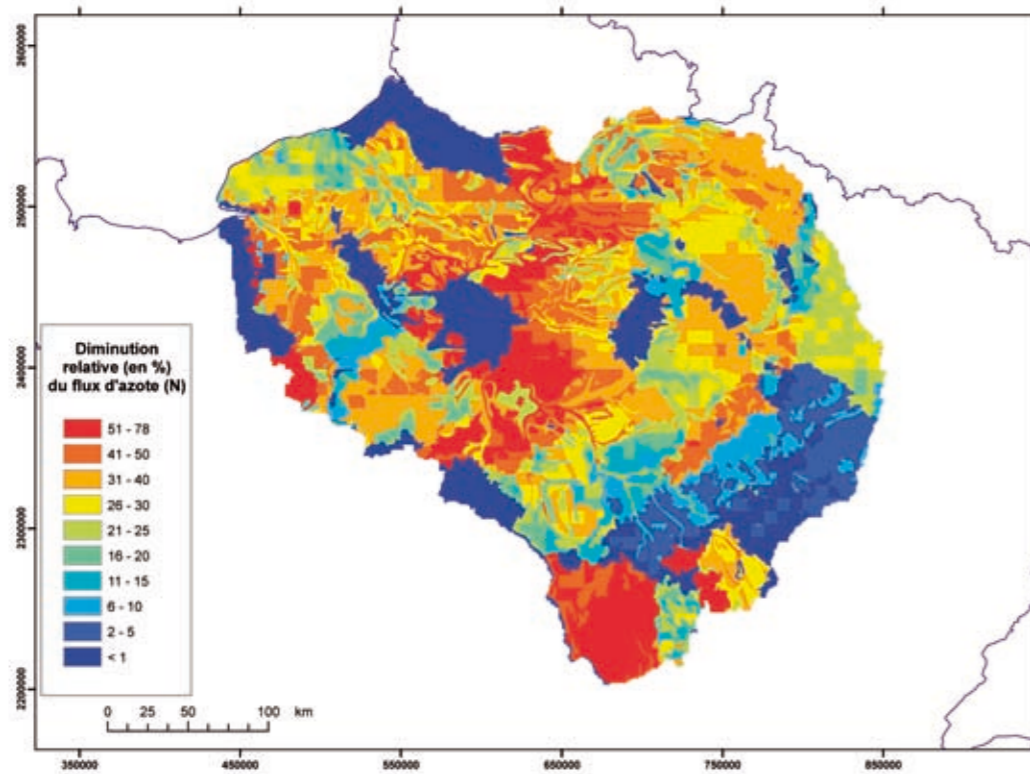
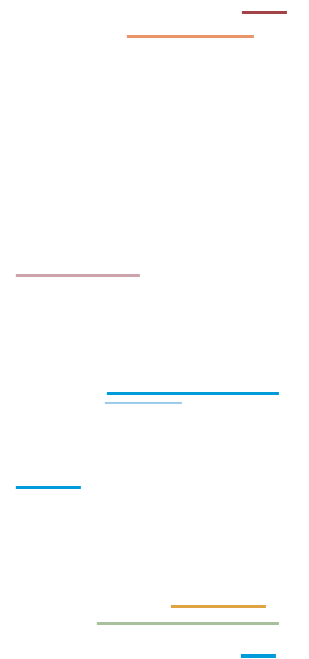


Figure 26 : Efficacité relative de l'introduction de CIPAN sur le flux d'azote sous racinaire (à l'échelle de la Surface Agricole Utile).

Si l'introduction de CIPAN dans les rotations de cultures provoque une diminution significative des concentrations en nitrates dans les premiers décimètres de sol, son effet sur les concentrations dans les aquifères est beaucoup moins rapide du fait des temps de transfert pouvant être très longs au travers de la zone non saturée.

À l'horizon 2015, les calculs montrent en effet que la mise en place de CIPAN généralisée sur l'ensemble du bassin de la Seine à compter de 2006, ne provoque que de faibles variations des concentrations en nitrates calculées dans les aquifères du bassin (figure 28).

À l'horizon 2050, en supposant une agriculture et un climat identiques à ceux connus ces dix dernières années, l'influence de l'introduction de CIPAN dans les rotations est beaucoup plus sensible (figure 29).



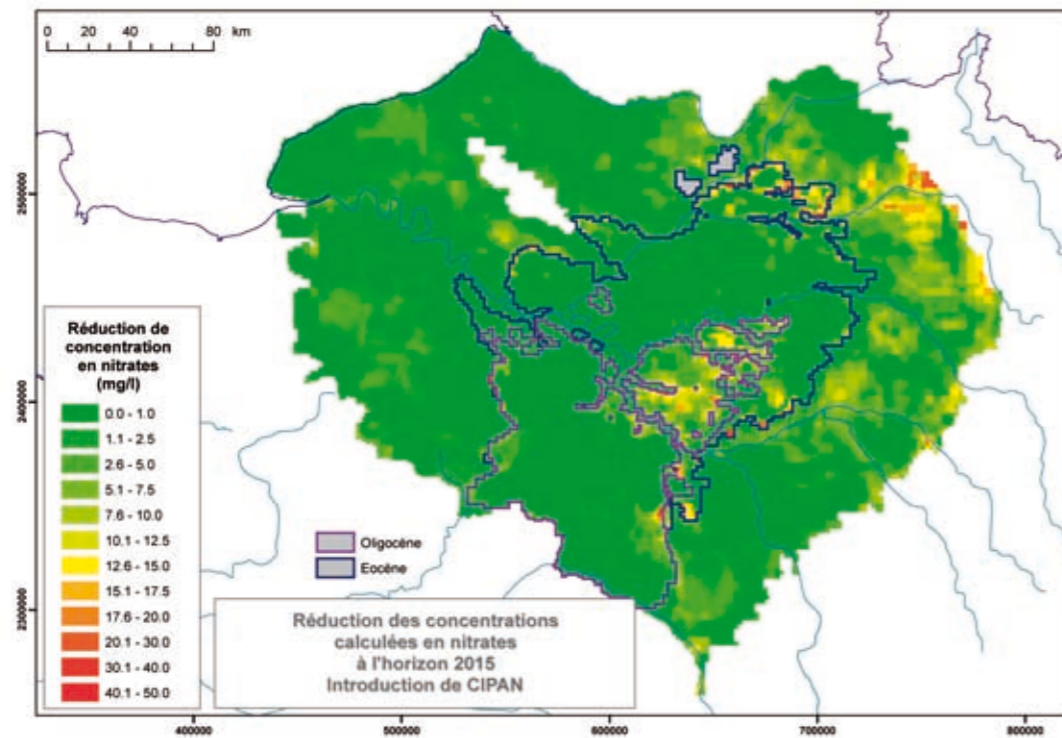


Figure 28 : Carte de réduction des concentrations en nitrates dans les aquifères liée à l'introduction de CIPAN à l'horizon 2015.

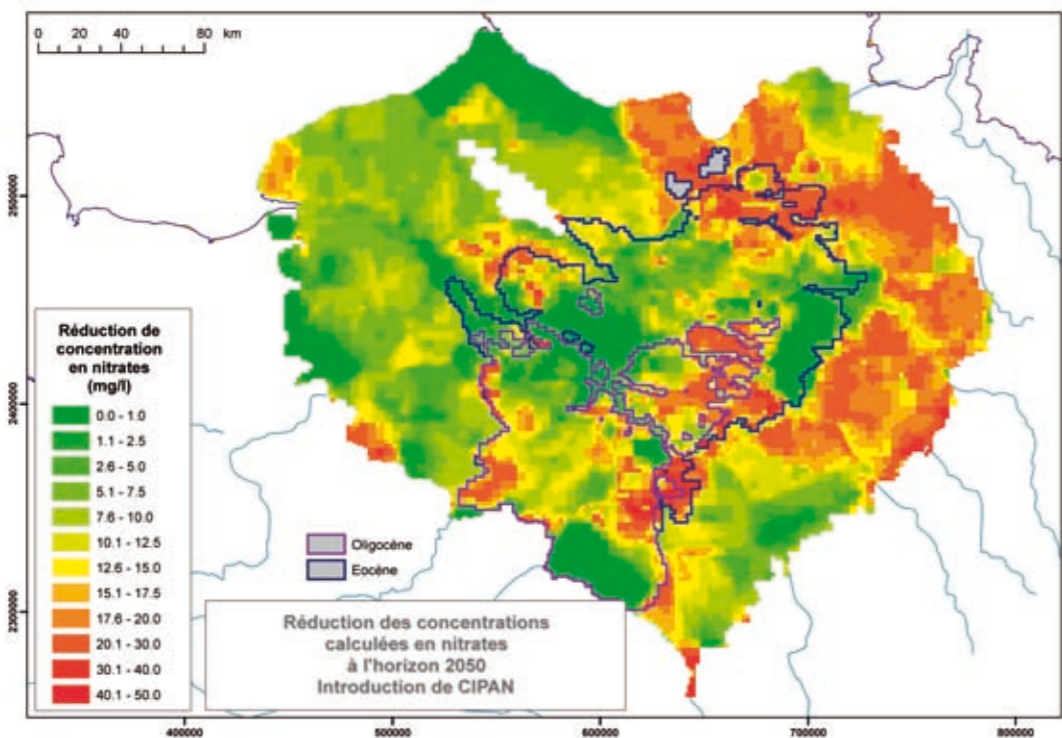


Figure 29 : Carte de réduction des concentrations en nitrates dans les aquifères liée à l'introduction de CIPAN à l'horizon 2050.

L'évolution comparée, en fonction du temps, de la médiane des concentrations calculées au droit des ouvrages de la base de données ONQES (figures 30 à 32 et encadré) permet de définir des tendances d'évolution de la pollution azotée à l'échelle du bassin.

On s'aperçoit que si la mise en place de CIPAN permet globalement de maintenir le niveau de pollution atteint à ce jour, elle ne l'infléchit pas sensiblement.

Seul un arrêt complet de tout apport azoté sur les cultures permettrait de retrouver, au bout de plusieurs décennies, de faibles concentrations en nitrates dans les aquifères, celles d'avant l'ère de l'agriculture intensive.

Si l'arrêt complet de tout apport azoté sur les cultures est bien sûr inconcevable, leur limitation par une fertilisation raisonnée doit permettre une réduction, même limitée, des doses et des périodes d'application de nitrates par les exploitants agricoles.

De plus, l'action d'une fertilisation raisonnée se produit tous les ans, sur toutes les parcelles cultivées du bassin (de la prairie temporaire à la grande culture) et dans toutes les rotations culturales.

Les CIPAN, eux, bien que plus efficaces sur la réduction des flux d'azote susceptibles d'être lessivés, n'agissent que là et l'année où ils peuvent être implantés dans les rotations ce qui, de fait, limite leur efficacité.

Les calculs montrent que si leur introduction permet bien de limiter la pollution globale des aquifères par les nitrates, elle ne permet pas d'inverser sensiblement la tendance, les niveaux de pollution restant pratiquement identiques à ceux connus au début des années 2000.

Il s'avère donc nécessaire de combiner systématiquement introduction de CIPAN et fertilisation raisonnée pour limiter significativement les flux d'azote sous racinaires et assurer ainsi une diminution significative et à grande échelle de la pollution diffuse par les nitrates des grandes formations aquifères du bassin.

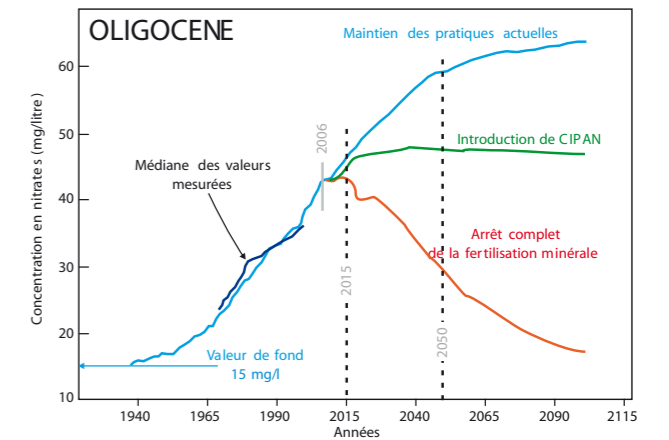


Figure 30 : Aquifère de l'Oligocène : évolution comparée de la médiane des concentrations calculées pour chaque scénario (Laisser Faire, CIPAN, arrêt total de la fertilisation azotée).

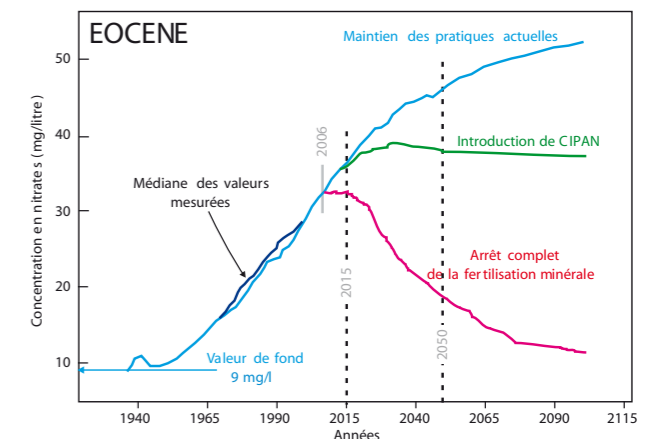


Figure 31 : Aquifère de l'Éocène : évolution comparée de la médiane des concentrations calculées pour chaque scénario (Laisser Faire, CIPAN, arrêt total de la fertilisation azotée).

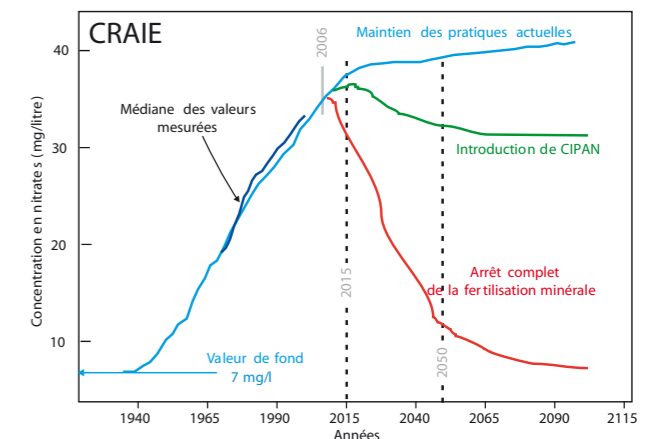


Figure 32 : Aquifère de la Craie : évolution comparée de la médiane des concentrations calculées pour chaque scénario (Laisser Faire, CIPAN, arrêt total de la fertilisation azotée).

La pollution nitrique des aquifères, observée depuis de nombreuses années est un phénomène complexe.

Elle met en jeu un ensemble de processus naturels qui trouvait un certain équilibre sous une agriculture traditionnelle.

L'intensification des systèmes de culture et d'élevage et l'utilisation intensive d'engrais minéraux dans la seconde moitié du XX^e siècle a rompu cet équilibre et a amplifié les processus.

Malgré un suivi régulier de la qualité des eaux depuis plusieurs décennies de bon nombre de captages (plus de 3000 points de mesures sur le bassin sont exploitables), il est difficile de caractériser finement et spatialement l'état actuel de la pollution des aquifères par les nitrates et la dynamique de cette pollution depuis les années soixante dix.

Ces difficultés sont essentiellement liées au fait que les grands aquifères du bassin (aquifères du Crétacé et du Tertiaire) sont composés de nombreuses variations verticales de types de roche. Les marnes, bien que peu représentées, occasionnent des stratifications verticales de concentration en nitrates parfois peu représentatives de l'état réel et global de la pollution de la formation aquifère (deux ouvrages peu éloignés et captant la même formation au sens large peuvent avoir des signaux de pollution très différents en fonction notamment de la profondeur à laquelle est effectuée la mesure).

De plus, certains captages sont abandonnés (leur nombre croît régulièrement depuis près de vingt ans) du fait de teneurs supérieures aux normes en vigueur, interrompant ainsi les séries de mesures et faussant quelque peu la photographie que l'on peut avoir de l'état de la pollution des nappes à un instant T. L'application de méthodes statistiques sur les séries de mesures a tout de même permis d'estimer à 0.64 mg/litre de nitrates l'accroissement annuel et pratiquement continu depuis plus de 30 ans de la pollution mesurée et ce, sur l'ensemble des grands aquifères du bassin.

Les modélisations mises en place dans le cadre du programme PIREN Seine et, plus particulièrement, le couplage entre un modèle hydrogéologique (MODCOU) et un modèle agronomique (STICS), ont permis de reproduire de manière très satisfaisante la dynamique de pollution des formations aquifères par les nitrates d'origine agricole.

En effet, sur la période 1970-2000, la variance des écarts entre les médianes des mesures en nitrates dans les ouvrages et celles calculées par le modèle n'excède pas 5 mg/litre. La dynamique d'évolution de cette pollution est liée à la dynamique propre de l'hydrogéologie du bassin et à celle des pratiques agricoles qui a pu être retracée et quantifiée depuis le début des années 70 au niveau de petites régions agricoles, représentatives de la diversité agricole du bassin (il y a 147 Petites Régions Agricoles sur le bassin).

Toutefois, localement, des écarts importants (supérieurs à 30 mg/litre de nitrates) entre valeur mesurée et valeur calculée sont observés. Ces écarts mettent en évidence la limite d'une modélisation régionale à grande échelle (le bassin de la Seine) dont le but est de reproduire au mieux la dynamique générale du système par rapport à des mesures locales, ponctuelles, représentatives de la complexité du milieu dans lequel elles sont effectuées. Des efforts visant à l'amélioration de la représentativité du modèle sont toutefois en cours de réalisation, notamment au niveau d'une prise en compte plus fine de la géométrie des différents niveaux aquifères des formations du Tertiaire.

Enfin, en raison de la fiabilité du modèle pour reproduire la dynamique de la pollution des aquifères par les nitrates depuis les années 1970, des études prospectives concernant l'impact de la mise en place de mesures agro-environnementales ont été menées. Il s'agit plus particulièrement de l'implantation de Cultures Intermédiaires Piège A Nitrates (CIPAN) dans les rotations.

Si la mise en place de ce type de cultures permet de diminuer immédiatement et sensiblement (de 25 à plus de 50%) les flux d'azote susceptibles d'être lessivés vers les cours d'eau ou les formations aquifères, une grande inertie de la zone non saturée, des temps de transfert pouvant être très longs (plusieurs décennies parfois) vers les aquifères et l'inertie propre de ces derniers limitent fortement leur efficacité à court terme.

Ces inerties limitent l'efficacité immédiate des mesures agro-environnementales sur l'état de pollution global des grands aquifères du bassin, les effets ne pouvant être sensibles que plusieurs années (voire dizaine d'années) après la mise en place de ce type de mesure.

Une réduction significative et généralisée de la pollution diffuse par les nitrates dans les aquifères du bassin de la Seine demande de combiner différentes techniques, désormais éprouvées par de nombreux essais in situ, au sein des systèmes agricoles, et de les inscrire dans le long terme.

Bibliographie

- A.E.S.N. (1976). Les bassins de la Seine et des cours d'eau normands – Hydrologie générale et conclusions. Agence de l'Eau Seine-Normandie, Nanterre, tome 1, fasc. 6.
- A.E.S.N. (2005). L'évolution de la qualité des milieux aquatiques du bassin Seine-Normandie à l'horizon 2015, notes de synthèse, 64 p.
- Beaudoin N, (2006). Caractérisation expérimentale et modélisation des effets des pratiques culturales sur la pollution nitrique d'un aquifère en zone de grande culture. Ph.D. thesis, INA-PG, Paris.
- Brisson N et al (1998), STICS, a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. Theory and parametrization applied to wheat and corn, *Agronomie*, 18, 311-346.
- Dorsainvil F., (2002). Évaluation par modélisation de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture. Ph.D. thesis, INA PG, 183 p.
- Gomez, E. (2002). Modélisation intégrée du transfert de nitrates à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse de l'École des Mines de Paris, 287 p.
- Ledoux, E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de l'École des Mines de Paris.
- Machet, J.M., Laurent, F., Chapot, J.Y., Doré, T., Dulout, A., (1997). Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères. In: Lemaire, G., Nicolardot, B. (Eds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. INRA Éditions, Paris, pp. 271-288.
- Meynard, J.M., Justes, E., Machet, J.M., Recous, S., (1997). Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. In: Lemaire, G., Nicolardot, B. (Eds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. INRA Éditions, Paris, pp. 183-200.
- Meybeck M., de Marsily G. & Fustec E., (1998). La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Ed. Elsevier.
- Viavattene C. (2006). Exploitation socio-économique de la modélisation souterraine du transfert des nitrates à l'échelle du bassin de la Seine. Thèse de l'École des Mines de Paris, 309 p.
- Viennot P., Ledoux E. (2004). Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine – Calage du comportement des nappes internes du bassin de la Seine – prévision des étiages, École des Mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique, rapport LHM/RD/04/30, 92 p.
- Viennot P., Monget J.M., Ledoux E., Schott C. (2007). Modélisation de la pollution nitrique des aquifères du bassin de la Seine : intégration des bases de données actualisées des pratiques agricoles, validation des simulations sur la période 1970-2004, simulations prospectives de mesures agro-environnementales, École des Mines de Paris, Centre de Géosciences, rapport R070209PVIE, 50 p.

Glossaire

Acides aminés : molécules organiques possédant un squelette carboné et deux fonctions : une amine (-NH₂) et un acide carboxylique (-COOH). Les acides aminés sont les unités structurales de base des protéines.

Acides nucléiques : macromolécules, c'est-à-dire de grosses molécules relativement complexes. Ils entrent dans la famille des biomolécules puisqu'ils sont d'une très grande importance dans le règne de la vie, « bio » signifiant vie en grec.

Adventice : espèce végétale étrangère à la flore indigène d'un territoire dans lequel elle est accidentellement introduite et peut s'installer.

Agrégation : d'une manière générale, le mot agrégation désigne l'action d'agréger, de regrouper des éléments (le mot a pour origine le mot latin aggregatio qui signifie réunion d'éléments).

Albedo : rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps n'ayant aucune réflexion, et 1 au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit.

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).

Assolement : division des terres d'une exploitation agricole en parties distinctes, appelées soles ou pies, consacrées chacune à une culture donnée pendant une saison culturale. L'assolement représente donc la diversité géographique des cultures à un moment donné.

Bassin versant ou bassin hydrographique : territoire associé à une rivière et regroupant tous les terrains sur lesquels ruissellent, s'infiltrent et courent toutes les eaux qui alimentent cette rivière.

Biomasse : quantité totale de matière (masse) de toutes les espèces vivantes présentes dans un milieu naturel donné.

Capacité au champ : correspond à la quantité d'eau retenue après 48 heures d'égouttement de l'eau libre vers la nappe phréatique par un sol préalablement gorgé d'eau (par des pluies ou un arrosage intensif).

Coefficient d'emmagasinement : rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère à la variation de charge hydraulique correspondante.

Cultures industrielles : cultures dont le produit principal n'est pas consommable en l'état et doit faire l'objet d'une transformation industrielle (colza, tournesol, betterave, etc).

Culture intermédiaire pièges à nitrates (CIPAN) : culture se développant entre deux cultures principales et qui a pour but de limiter les fuites de nitrates. Elle constitue un couvert végétal permettant d'éviter que les sols restent nus pendant l'hiver. Outre leur rôle de « pièges à nitrates », elle permet également de lutter contre les adventices, par effet de concurrence, en évitant la sélection d'une flore spécifique.

DCE : Directive Cadre sur l'Eau.

Dénitrification : processus biochimique bactérien provoquant la transformation du nitrate (NO₃⁻) en azote moléculaire (N₂). Ce processus intervient en milieu anaérobie.

Discrétiser, discrétisation : découpage en classes (ou groupes de valeurs) d'une série statistique en vue de sa représentation graphique ou cartographique.

Drainage : opération qui consiste à favoriser artificiellement l'évacuation de l'eau gravitaire présente dans la macro-porosité du sol à la suite de précipitations. Cette évacuation peut utiliser des fossés ou des drains.

Évapotranspiration potentielle (ETP) : ensemble des phénomènes et des flux d'évaporation physique et de transpiration biologique, notamment de la végétation, qui interviennent dans le bilan d'eau d'un territoire, d'un hydrosystème terrestre, comme facteur de flux sortant. Elle est exprimée le plus généralement en hauteur moyenne évaporée sur la surface considérée pendant une durée définie (millimètres par jour par exemple).

Eutrophisation : forme singulière mais naturelle de pollution de certains écosystèmes aquatiques qui se produit lorsque le milieu reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.

Interface : limite commune à deux systèmes permettant des échanges entre ceux-ci.

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

Lixiviation : percolation lente de l'eau à travers le sol, accompagnée de la dissolution des matières solides qui y sont contenues. Le liquide résultant est le lixiviat.

Maille : élément de la grille du modèle représentant l'unité spatiale de travail induit par la discrétisation du bassin.

Médiane : en théorie des probabilités et en statistiques, la médiane est un nombre qui divise en deux parties l'échantillon, la population ou la distribution de probabilités. Chaque partie contient le même nombre de valeurs. Contrairement à la moyenne arithmétique, la valeur médiane permet d'atténuer l'influence perturbatrice des valeurs extrêmes. Par exemple, pour la série de nombre : 1, 2,3,4,50 : la médiane est 3 (il y a autant de valeurs supérieures à 3 que d'inférieures) et la moyenne 12.

Nappe (d'eau souterraine) : ensemble de l'eau contenue dans une fraction perméable de la croûte terrestre totalement imbibée, conséquence de l'infiltration de l'eau dans les moindres interstices du sous-sol et de son accumulation au-dessus d'une couche imperméable ; ces nappes ne forment de véritables rivières souterraines que dans les terrains karstiques.

Nappe captive : nappe d'eau souterraine circulant entre deux couches de terrains imperméables.

Nappe d'accompagnement : nappe d'eau souterraine voisine d'un cours d'eau dont les propriétés hydrauliques sont très liées à celles du cours d'eau ; l'exploitation d'une telle nappe induit une diminution du débit d'étiage du cours d'eau, soit parce que la nappe apporte moins d'eau au cours d'eau, soit parce que le cours d'eau se met à alimenter la nappe.

Nappe libre : nappe d'eau souterraine circulant sous un sol perméable en contact avec l'atmosphère.

Nitrate : sel de l'acide nitrique. La formule de l'ion nitrate est NO₃⁻.

Nitrification : processus se déroulant dans les sols sous l'action de certains micro-organismes spécifiques et qui conduit à la transformation de l'ammoniac (ou de l'ammonium) en nitrate.

Niveau piézométrique : mesure ponctuelle du niveau atteint par l'eau dans le sol à l'aplomb d'un point précis. Le niveau piézométrique est donc l'altitude (NGF) ou la profondeur (par rapport à la surface du sol) de l'interface entre la zone saturée et la zone non saturée dans une formation aquifère (= la surface de la nappe).

Nodosités : petites boursoffures se formant sur les racines de nombreuses espèces de plantes, notamment les Fabacées, sous l'action de bactéries du genre Rhizobium vivant en symbiose avec la plante. Dans cette association symbiotique, la plante fournit les substances carbonées et les bactéries les substances azotées synthétisées à partir de l'azote atmosphérique.

Piézomètre : simple tube, qui permet, depuis la surface, d'accéder à l'eau d'une nappe et d'en relever le niveau piézométrique à l'aide d'une sonde (poids ou contacteur électrique).

Point de flétrissement : humidité du sol en deçà de laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau.

Pollution diffuse : pollution des eaux causée par des rejets issus de toute la surface d'un territoire et transmis aux milieux aquatiques de façon indirecte (ex: par ou à travers le sol).

Porosité : ensemble des interstices (connectés ou non) d'une roche ou d'un autre matériau pouvant contenir des fluides (liquide ou gaz).

Quartile : en statistique descriptive, un quartile est chacune des 3 valeurs qui divisent les données triées en 4 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/4 de l'échantillon de population.

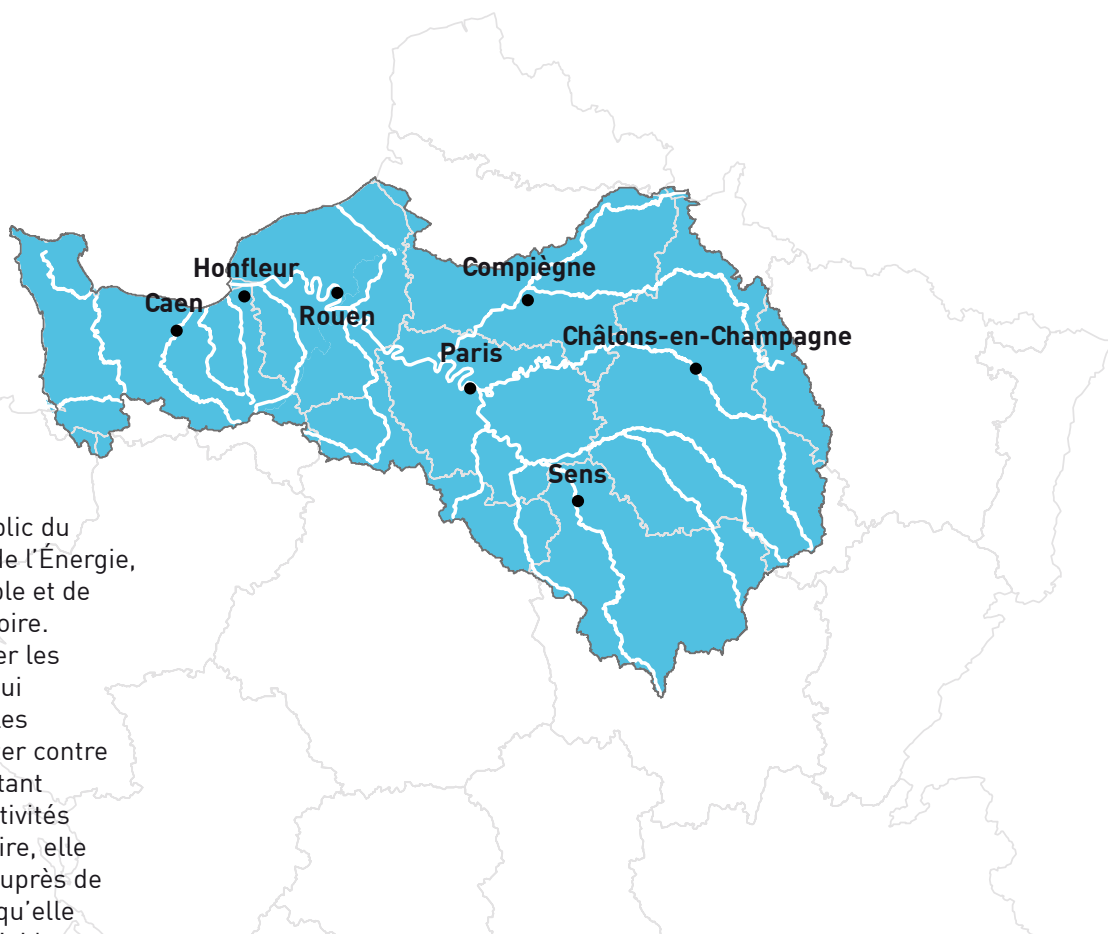
Rotation : succession des cultures, sur une même parcelle au fil du temps.

Transmissivité : paramètre régissant le flux d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu (mesuré selon une direction orthogonale à celle de l'écoulement), et par unité de gradient hydraulique.

Zone de production : zone du domaine modélisé dépendant du type de sol et du couvert végétal. A chacune des zones est associée une fonction de production qui répartit les précipitations entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration et stockage dans le sol. La modélisation de cette fonction est basée sur le principe des modèles à réservoirs.



**eau
seine**
NORMANDIE



L'Agence de l'eau Seine-Normandie

est un établissement public du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. 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

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

Les PARTENAIRES du PIREN-Seine

AGENCE DE L'EAU SEINE-
NORMANDIE (AESN)
www.eau-seine-normandie.fr

CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)
www.cnrs.fr

DIRECTION RÉGIONALE DE
L'ENVIRONNEMENT
(DIREN ÎLE-DE-FRANCE)
www.ile-de-france.ecologie.gouv.fr

EAU DE PARIS
www.eaudeparis.fr

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION
(IZA)
www.iza.com

LYONNAISE DES EAUX
www.lyonnaise-des-eaux.fr

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

SYNDICAT DES EAUX
D'ÎLE-DE-FRANCE (SEDIF)
www.sedif.com

SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL
POUR L'ASSAINISSEMENT DE
L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE
(SIAAP)
www.siaap.fr

UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS
DE GRANULATS (UNPG)
www.unicem.fr

VOIES NAVIGABLES DE FRANCE
(VNF)
www.vnf.fr

ENSEMBLE
DONNONS
VIE À L'EAU

Agence de l'eau

Numéro ISBN : 978-2-918251-02-6
Dépôt légal : janvier 2009

