

Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique : application au bassin de la Seine

An Integrated Modelling Tool for Nitrates Transport in a Hydrological System : Application to the River Seine Basin

Eric Gomez, Emmanuel Ledoux, Pascal Viennot

École des Mines de Paris, CIG, UMR Sisyphe

Catherine Mignolet, Marc Benoit, Cendrine Bornerand, Céline Schott

INRA, SAD, Mirecourt

Bruno Mary

INRA, Unité d'Agronomie, Laon

Gilles Billen, Agnès Ducharne

UMR Sisyphe 7619, Université Pierre et Marie Curie

Daniel Brunstein

CNRS, UMR – 1, Meudon

The regular increase of the nitric contamination of both groundwater and surface water has become preoccupying in the river Seine basin. A major research topic of the programme PIREN-Seine consists in developing a software for the basin-scale modelling of the transport of nitrogen from soil to surface water, accounting for its retardation due to the residence time in soil and aquifer systems, which can be very long. Prior to software development, an original work of data processing has been performed at INRA, in space and time, concerning pedological characteristics, land use and agricultural practices, in order to determine the spatial units to be included into the model. These data are input data for the STICS software (INRA) which simulates the functioning of the soil-water-vegetation system at a daily time-step, taking into account the growth of the crops and the nitrogen and water balances. A procedure for the spatialisation of STICS at the basin scale has been developed to compute the water and nitrate fluxes at the bottom of the root zone. These fluxes are integrated into the surface and groundwater coupled model MODCOU (ENSMP), which calculates, at a daily time-step, the water balance in the hydrological system, the flow in the rivers and the piezometric variations in the aquifers, as a function of climatic data (rainfall, PET). Then, the transport of nitrates and the resulting evolution of nitric contamination in groundwater and rivers is computed owing to the compatible software NEWSAM (ENSMP). Nitrogen fluxes reaching the rivers can be used by the SENEQUE software, which simulates the water quality and the ecological functioning in the hydrographical network. In a close future, this research will be used to simulate the response of nitric contamination to various scenarios, accounting for the modification of agricultural practices or anthropogenic climate change.

I ■ PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE

Depuis quelques dizaines d'années, l'hydrosystème que constitue le bassin de la Seine s'est progressivement altéré

du point de vue de la qualité de l'eau, en particulier concernant la contamination des eaux souterraines et de surface par les nitrates (Meybeck et al., 1998 [1]). Une des causes premières de cette forme de pollution diffuse réside dans la

manière dont l'activité agricole s'organise dans le territoire du bassin versant et évolue au cours du temps. Or, compte-tenu de l'inertie de l'hydrosystème due à une circulation lente de l'eau dans les aquifères profonds, notamment au sein de la nappe de la craie, l'impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux ne se manifeste souvent qu'après plusieurs dizaines d'années. Les dynamiques agricoles passées responsables de l'augmentation des teneurs en nitrate doivent donc être analysées sur le long terme.

S'interroger sur les dynamiques agricoles passées comprend trois objectifs : (i) un objectif d'analyse temporelle pour reconstituer l'évolution des activités agricoles depuis une trentaine d'années ; (ii) un objectif d'analyse spatiale pour mettre en évidence la différenciation spatiale de cette évolution au sein du bassin de la Seine ; (iii) un objectif de modélisation pour comprendre les conséquences de cette évolution sur le contenu en azote de l'hydrosystème, en se basant sur le passé, et tenter une projection dans l'avenir.

Les deux premiers objectifs soulèvent des questions de méthode originales et assez peu traitées en recherche agronomique, puisqu'ils sont posés à une échelle spatio-temporelle large, sur un laps de temps d'une trentaine d'années et sur une zone de près de 100 000 km². Les statistiques agricoles françaises peuvent être valorisées pour y répondre.

Le troisième objectif constitue un axe de recherche majeur dans le cadre du Programme PIREN-Seine ; il consiste dans le développement d'une chaîne de modélisation des transferts d'azote depuis les sols jusqu'aux eaux de surface, à l'échelle du bassin de la Seine, en tenant compte de l'inertie conférée par les temps de résidence parfois très longs de l'azote dans les sols et les aquifères.

En amont de cette chaîne de modélisation, se place ainsi un travail original de traitement des données spatialisées relatives aux caractéristiques pédologiques, à l'occupation des sols et aux pratiques agricoles, pour identifier les unités spatiales à prendre en compte, et pour développer un tableau de bord des indicateurs de risques de contamination nitrique à l'échelle du bassin. Ce travail fournit les données d'entrée pour un modèle agronomique générique et modulaire (STICS : Brisson et al., 1999 [2]), qui simule le fonctionnement du système sol-eau-plante-atmosphère au pas de temps journalier, en prenant en compte la croissance et le développement des cultures ainsi que les bilans en eau et en azote. Une procédure de spatialisation de STICS est mise en œuvre pour simuler les flux de nitrates à la base de la zone sous-racinaire sur l'ensemble du bassin de la Seine. Ces flux servent alors de données d'entrée pour un modèle hydrologique couplé (surface-souterrain, MODCOU (Ledoux, 1980 [3] ; Ledoux et al., 1984 [4]) qui calcule chaque jour des bilans hydriques locaux, à l'aide de modèles à réservoirs. Ce modèle simule les variations piézométriques dans le système d'aquifères multicouches superposés qui caractérise le bassin parisien, et les débits écoulés en fonction des forçages atmosphériques (pluie, ETP). Il calcule également la circulation des nitrates et l'évolution résultante de la contamination nitrique des eaux superficielles et souterraines grâce à un modèle compatible de transport en solution (NEWSAM). Ces données sont enfin utilisées par le modèle SENEQUE, qui représente l'application au bassin de la Seine du modèle RIVERSTRAHLER (Billen et al., 1994 [5]), et permet le calcul des variations saisonnières de la qualité de l'eau et du fonctionnement écologique du réseau hydrographique, y

compris ses annexes hydrauliques. Le rôle des zones humides riveraines dans l'élimination d'une partie des flux nitriques en provenance des sols et des aquifères est pris en compte sur la base d'une démarche empirique généralisée à l'ensemble du chevelu hydrographique.

Ces travaux sont le résultat d'une recherche collective menée dans le cadre du programme PIREN-Seine. Ils s'inscrivent dans un axe majeur du programme PIREN-Seine dont l'objectif est de formaliser et quantifier le lien qui existe entre la contamination nitrique des eaux de surface et des aquifères et les pratiques agricoles.

II ■ DYNAMIQUE SPATIALE ET TEMPORELLE DE L'ACTIVITÉ AGRICOLE DANS LE BASSIN DE LA SEINE

Les activités agricoles s'organisent selon deux dimensions principales : les filières agro-alimentaires et les terroirs. Les filières peuvent s'appréhender comme des flux de matières et d'informations depuis le consommateur jusqu'à la parcelle, en passant par l'exploitation agricole et l'artisanat ou l'industrie alimentaire. Les terroirs peuvent se représenter comme l'interaction localement cohérente des exploitations agricoles, d'un territoire aux potentialités agricoles données et des activités mises en œuvre par ces exploitants. Ainsi, tant sur la dimension filière que sur la dimension terroir, deux « nœuds » d'organisation sont au cœur des préoccupations des agronomes : (i) l'exploitation agricole mobilisant son territoire dont la production s'intégrera dans une filière ; (ii) la parcelle agricole, cellule agronomique de base du territoire et origine d'une filière alimentaire. Confrontés à la préservation des ressources en eau, ces deux niveaux d'organisation gardent leur cohérence fonctionnelle :

— l'exploitation agricole, unité économique et entité de gestion pour l'agriculteur, est l'entité fonctionnelle pilotant les activités sur des parcelles. L'analyse de la diversité des exploitations donne un cadrage général des orientations productives présentes sur le bassin, dont les choix résultent de nombreux facteurs dont certains apparaissent étroitement liés à la localisation géographique des exploitations. Contexte pédo-climatique, environnement socio-économique, gestions politiques locales ou encore mouvements urbains imprègnent la vie et le devenir des exploitations. Comprendre l'ensemble de ces relations permet d'éclairer les dynamiques agricoles passées et d'enrichir des scénarios prospectifs ;

— les parcelles constituent les cellules de base de l'élaboration de la qualité des ressources en eau, au travers de deux paramètres-clés du mécanisme de pollution diffuse : l'occupation du sol, traduite par les successions culturales, et les pratiques de conduite des parcelles (Mary et al., 1997 [6]), en particulier celles qui jouent fortement sur le cycle de l'azote tel qu'il est modélisé en agronomie (Brisson et al., 1998 [2]).

L'extension géographique de la zone d'étude, qui recouvre 23 départements, oblige à travailler à partir de sources statistiques nationales, qui apparaissent assez variées par le type d'information qu'elles apportent, mais qui sont en nombre restreint. Nous avons choisi deux sources d'informations, l'une pour le niveau de l'exploitation, et l'autre le niveau parcellaire :

— les trois derniers Recensements Généraux de l'Agriculture (RGA), conduits en 1970, 1979 et 1988, renseignent de

façon exhaustive sur les caractéristiques structurelles des exploitations (le RGA en cours en donnera une image actualisée). Leur diversité y est décrite grâce à une classification des orientations technico-économiques (OTEX), fondée sur la valeur monétaire des productions agricoles, estimée à partir de la répartition des cultures dans la SAU et de l'importance des troupeaux. Les informations, agrégées à la commune, sont disponibles sur tous les maillages administratifs ;

— l'enquête nationale Ter-Uti renseigne annuellement depuis 1982, l'occupation du sol sur un échantillon constant (modifié en 1991) de plus de 550 000 parcelles. Les informations sont agrégées et rendues disponibles à l'échelle des départements sur la décennie 80, et également à l'échelle des Petites Régions Agricoles (PRA) depuis 1992.

Pour mettre en évidence la différenciation spatiale des dynamiques agricoles, les informations descriptives des exploitations agricoles et des successions de cultures sont agrégées sur un maillage géographique. Ce maillage doit constituer un bon compromis entre la qualité des données statistiques disponibles, la précision spatiale de la maille et sa signification par rapport aux phénomènes décrits. Le meilleur compromis nous semble réalisé par le maillage en PRA – 147 PRA (fig. 1) recouvrent le bassin versant de la Seine – qui est *a priori* pertinent pour décrire des activités agricoles, puisqu'il a été délimité au début des années 50 sur la base de critères concernant les conditions physiques (sol et climat) et les conditions humaines (habitat, structure des exploitations, systèmes de culture, etc). Un intérêt complémentaire de ce choix est la très grande proximité entre ce découpage et la structure maillée du bassin de la Seine utilisée pour la simulation des écoulements et du transport d'azote.

● II.1 Démarches d'analyse de données temporelles

La méthode retenue pour régionaliser le bassin versant s'inspire du concept de région « homogène » développé par les géographes, qui théoriquement minimise la dispersion des critères choisis pour la décrire (Thisse, 1997 [7]). La région est ainsi conçue comme un territoire où les dynamiques agricoles sont « plus ou moins similaires ». La recherche de telles régions est basée sur l'hypothèse forte que l'ordre spatial correspond à l'ordre thématique,

c'est-à-dire que des PRA contiguës présentent des dynamiques agricoles voisines.

Pour délimiter ces régions, nous proposons une démarche en deux étapes :

— la première étape consiste à représenter graphiquement l'évolution des PRA sous la forme de trajectoires multifactorielles, en fonction de l'évolution de la répartition de leur SAU parmi les 13 OTEX distinguées sur le bassin au cours des périodes 1970-1979 et 1979-1988 ;

— dans une seconde étape, une typologie des trajectoires d'évolution des PRA est construite par comparaison visuelle de leur forme dans le plan factoriel, selon trois principaux critères : (i) la position initiale des PRA dans le plan factoriel qui distingue les PRA de culture, de polyculture-élevage ou d'élevage en 1970 ; (ii) l'orientation des vecteurs par rapport aux deux axes factoriels, qui traduit la régularité de l'évolution ; (iii) la longueur de la trajectoire qui reflète l'ampleur de l'évolution. Cette typologie est cartographiée dans une dernière étape.

Les méthodes mathématiques utilisées pour reconstituer les successions culturales et leur évolution, sont basées sur un modèle probabiliste, appelé modèle de Markov, possédant un nombre fini d'états : les distributions de cultures et un ensemble de transitions entre les états. Ce modèle explique la distribution des cultures dans une région une année donnée en fonction des distributions des années précédentes : ainsi, à chaque pas de temps, le système change d'état en fonction de l'état occupé précédemment, ou des n états selon l'ordre du modèle choisi (modèle d'ordre 1 à n). Les algorithmes actuellement mis au point permettent d'extraire des régularités dans l'utilisation des terres agricoles enregistrée par l'enquête Ter-Uti, concernant les cultures une par une (ordre 1), des couples de cultures (ordre 2) ou des triplets de cultures (ordre 3) se succédant.

● II.2 Dynamique spatio-temporelle des orientations productives des exploitations agricoles et des successions culturales

Huit types différents de trajectoires principales pour les PRA sont ainsi identifiés à partir de 1970 en distinguant : les PRA de cultures, les PRA de polyculture-élevage, et les PRA orientées vers l'élevage (fig. 1).

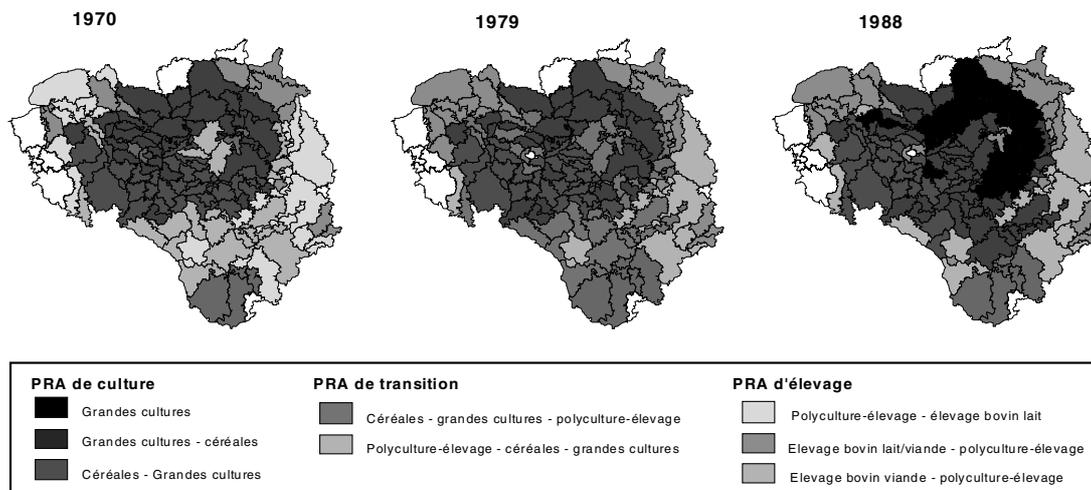


Figure 1 : Segmentation du bassin de la Seine selon les combinaisons des OTEX d'après les RGA de 1970, 1979 et 1988

L'évolution des successions de culture au sein d'une entité géographique, modélisée selon un processus de Markov, est traduite graphiquement sous la forme de diagrammes qui représentent les transitions entre cultures (modèle d'ordre 1), entre couples de cultures (modèle d'ordre 2) ou entre triplets de cultures (modèle d'ordre 3). Nous nous limiterons, à titre d'exemple, à l'exposé de résultats issus de modèles d'ordre 1. La figure 2 illustre un exemple de représentation de transition entre cultures sur le département de la Marne de 1982 à 1998.

Dans ce département, les trois-quarts du territoire sont occupés par 6 couverts végétaux : blé, orge, betterave, pois, prairie artificielle (essentiellement luzerne) et maïs sur la décennie 80 ; les mêmes couverts sauf pour le maïs remplacé par du colza pour les années 90. Les transitions majoritaires qui apparaissent concernent le blé, l'orge, le pois, qui apparaît de façon significative en 1985, et le « ? » constitué majoritairement de betterave. Un blé apparaît majoritairement précédé d'une betterave ou d'un pois, puis est majoritairement suivi d'une betterave ou d'une orge, qui est elle-même suivie d'une betterave. Ce motif semble se reproduire d'année en année, avec assez peu d'évolution si ce n'est l'apparition du colza de manière significative en 1995. Il traduit des successions de cultures sur deux ou trois ans : succession biennale composée d'une tête de rotation (betterave, pois, colza) suivie d'un blé ; succession triennale composée d'une culture tête de rotation suivie de deux céréales (blé et orge).

III ■ LA DÉMARCHE DE MODÉLISATION : PRINCIPES GÉNÉRAUX DES MODÈLES UTILISÉS

La modélisation des processus de transfert de l'azote dans le système hydrologique est basée sur le couplage de modèles existants ou élaborés au sein du Piren Seine.

STICS est un modèle agronomique qui simule le fonctionnement du système sol-plante-atmosphère au pas de temps journalier, en prenant en compte la croissance et le développement des cultures, ainsi que les bilans en eau et en azote. L'originalité de STICS réside dans son caractère générique (adaptable à différentes cultures) et modulaire (les grands compartiments sont séparés et reliés par quelques variables) (Brisson et al., 1998 [2]).

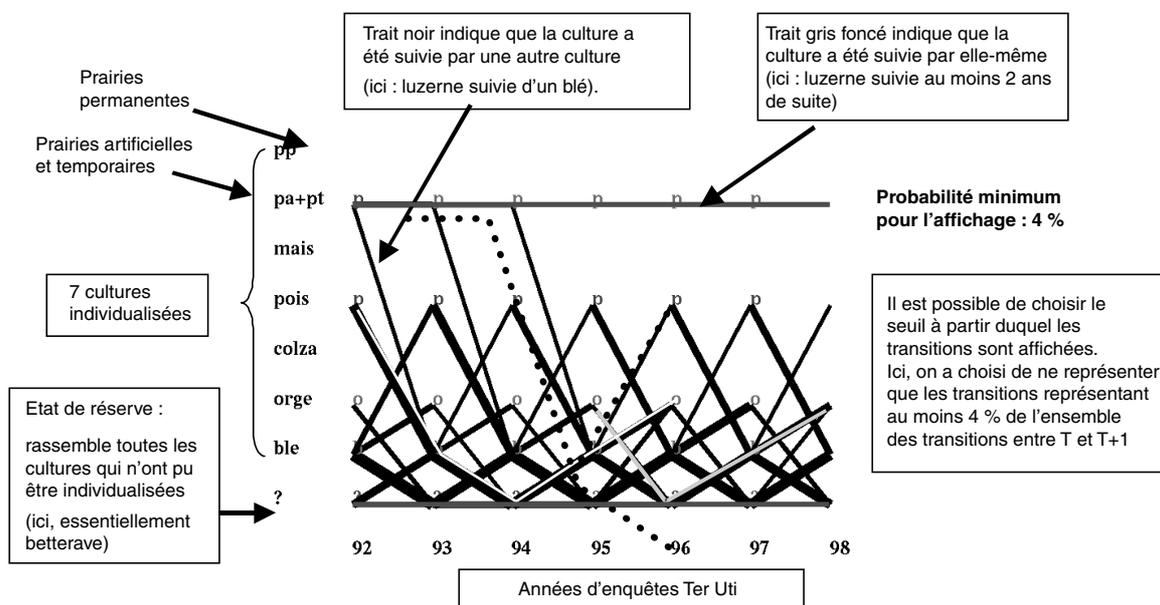
MODCOU est un modèle hydrologique couplé surface-souterrain (Ledoux et al., 1984, [4]) qui calcule chaque jour des bilan hydriques locaux, à l'aide de modèles à réservoirs. Il simule les variations piézométriques des aquifères et les débits écoulés en fonction des forçages atmosphériques (pluie, ETP). Il peut également calculer la circulation des nitrates et l'évolution résultante de la contamination nitrique des eaux superficielles et souterraines grâce à un module compatible : NEWSAM (Geng, 1989 [8], Cabon, 1993 [9]).

Le modèle SENEQUE, qui représente l'application au bassin de la Seine du modèle RIVERSTRAHLER (Billen et al., 1994 [5]), permet le calcul, au pas de temps décadaire, des variations du débit, de la qualité de l'eau et du fonctionnement écologique du réseau hydrographique, y compris ses annexes hydrauliques, en fonction des contraintes imposées par la morphologie des cours d'eau, les conditions météorologiques et climatiques, l'usage du sol du bassin versant et les rejets ponctuels d'eaux usées.

● III.1 Modélisation des flux d'eau et de nitrates sur le bassin de la Seine

III.1.1. Les écoulement d'eau

La zone d'étude comprend l'ensemble du bassin versant de la Seine et s'étend au-delà du bassin topographique pour atteindre les limites hydrauliques des aquifères figurées par



Interprétation :
 Pour lire un diagramme de Markov être trouver les principales successions, on peut suivre les traits de transitions les plus épais (ici, en blanc) être trouver ainsi une succession sur 5 ans du type : Pois-Blé-Betterave-Blé-Orge ou des successions en 3 ans (trait gris clair) du type Betterave-Blé-Orge. Il est par contre difficile de dire quelles sont les cultures implantées de préférence après 2 ans de luzerne et une année de blé (trait pointillé).

Figure 2 : Interprétation d'un diagramme de Markov

les cours d'eau des bassins adjacents. Le domaine ainsi défini occupe une surface de 95 560 km². Il est modélisé au moyen d'une structure discrétisée construite à partir de mailles carrées de taille variable allant de 1 à 8 km de côté.

La modélisation du domaine souterrain s'appuie également sur une structure maillée multicouche, pour représenter les aquifères présents au centre du bassin (Oligocène, Eocène et Craie), qui totalise 57930 mailles.

Les aquifères profonds qui affleurent à l'Est du bassin ne sont pas représentés par le modèle maillé et font l'objet d'un traitement simplifié.

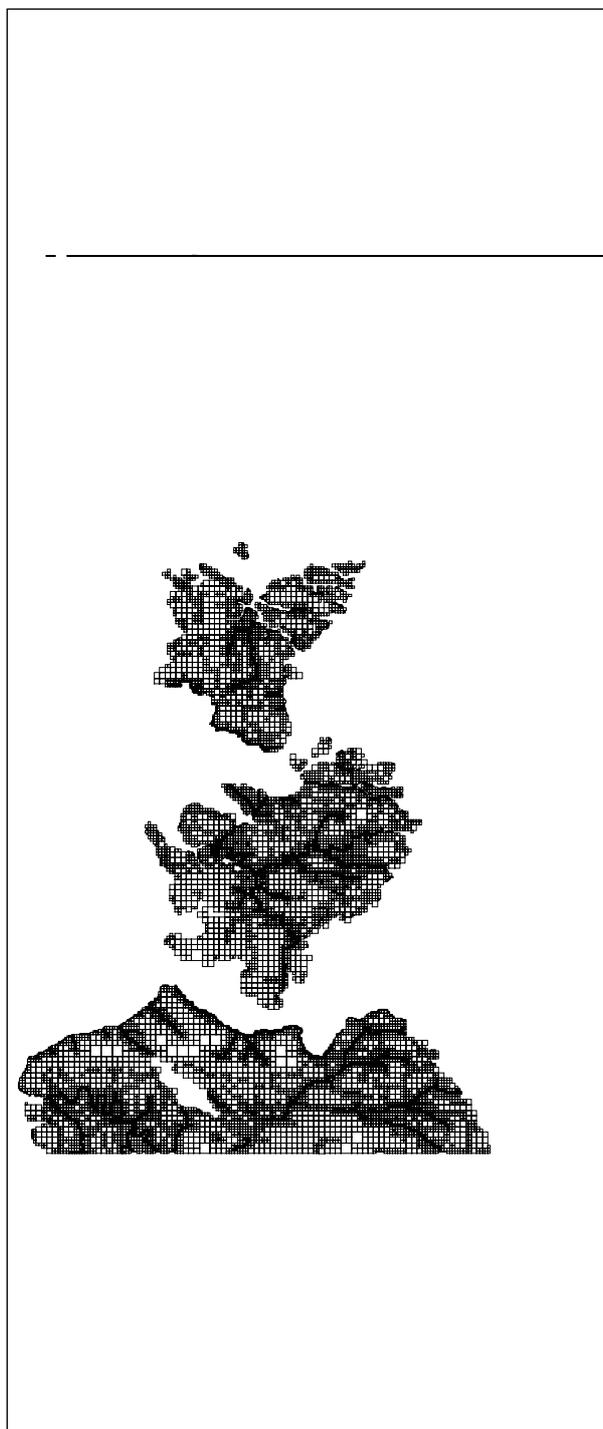


Figure 3 : Maillage de la couche de surface et des couches souterraines (Oligocène, Eocène, Craie)

La structure maillée du modèle hydrologique (fig. 3), permet la mise en œuvre d'algorithmes de calcul simulant le bilan hydrique des précipitations au sol, le ruissellement de surface, l'alimentation des nappes à travers la zone non-saturée, l'écoulement au sein du système aquifère et les échanges nappes-rivières. Pour le calcul du bilan hydrique, on considère qu'un couple sol-végétation répond de la même façon à un épisode pluvieux. Chaque couple sol-végétation est associé à un modèle à réservoirs (fonction production). Le calage des paramètres des fonctions productions a permis ainsi d'ajuster les bilans hydriques sur le bassin, pour la période 1971-1999 (Gomez et al., 2002 [10]), en accord avec les débits journaliers observés sur une centaine de stations hydrométriques. Finalement, une simulation complète, sur 30 ans prenant en compte le ruissellement et le débit de base, ainsi que les variations piézométriques, est mise en œuvre sur l'ensemble du bassin de la Seine.

III.1.2 Les flux de nitrates : couplage avec STICS

La méthode consiste à calculer au moyen de STICS de façon spatialisée sur l'ensemble du bassin de la Seine, les flux d'azote nitrique à la base de la zone racinaire, en définissant au préalable des unités spatio-temporelles de simulation (USM). Une unité de simulation est définie par une succession de cultures, un type de sol et des conditions climatiques homogènes sur la zone simulée. Pour ce faire, on dispose d'une carte des zones météorologiques homogènes, de la carte des types et épaisseurs de sols et de la carte d'occupation des sols, organisée en PRA selon les résultats de l'étude spatio-temporelles de l'activité agricole passée. En croisant ces informations au moyen du SIG Arc-Info, on aboutit à la définition de 11 610 unités spatiales de simulation qui après regroupement par caractéristiques identiques, se ramènent à 7 903 zones homogènes. Pour la détermination des types de sols, on a utilisé la Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1 000 000 (King et al., 1995 [11]) qui est structurée en 2 niveaux de résolution :

- l'unité cartographique de sol (UCS) sous forme vectorielle,
- l'unité typologique de sol (UTS) qui définit les caractéristiques pédologiques présentes au sein de chaque UCS.

Ainsi, chaque unité générale de simulation comporte une distribution de types de sols, et de successions culturales, correspondant à différentes unités de simulation (USM), sur lesquelles s'effectuent les calculs à l'aide de STICS (fig. 4).

Par correspondance entre le maillage des unités spatiales de simulation et celui du modèle hydrologique, les flux de nitrates, après avoir subi un retard dans la zone non-saturée, sont distribués sur les mailles du modèle MODCOU / NEWSAM, où ils sont transférés horizontalement au sein des aquifères. La concentration en nitrates de l'eau provenant de la nappe est finalement déterminée au niveau des mailles où ont lieu les échanges entre rivières et nappes. Cette information sera utilisé par SENEQUE, modèle qui simule le transfert des nitrates dans le réseau hydrographique.

IV ■ RÉSULTATS DE SIMULATION ET PERSPECTIVES

La chaîne de modélisation est actuellement capable de reconstituer avec un réalisme acceptable les débits des cours d'eau et les variations piézométriques des aquifères simulés sur une période passée de trente années (fig. 5 et 6). Les

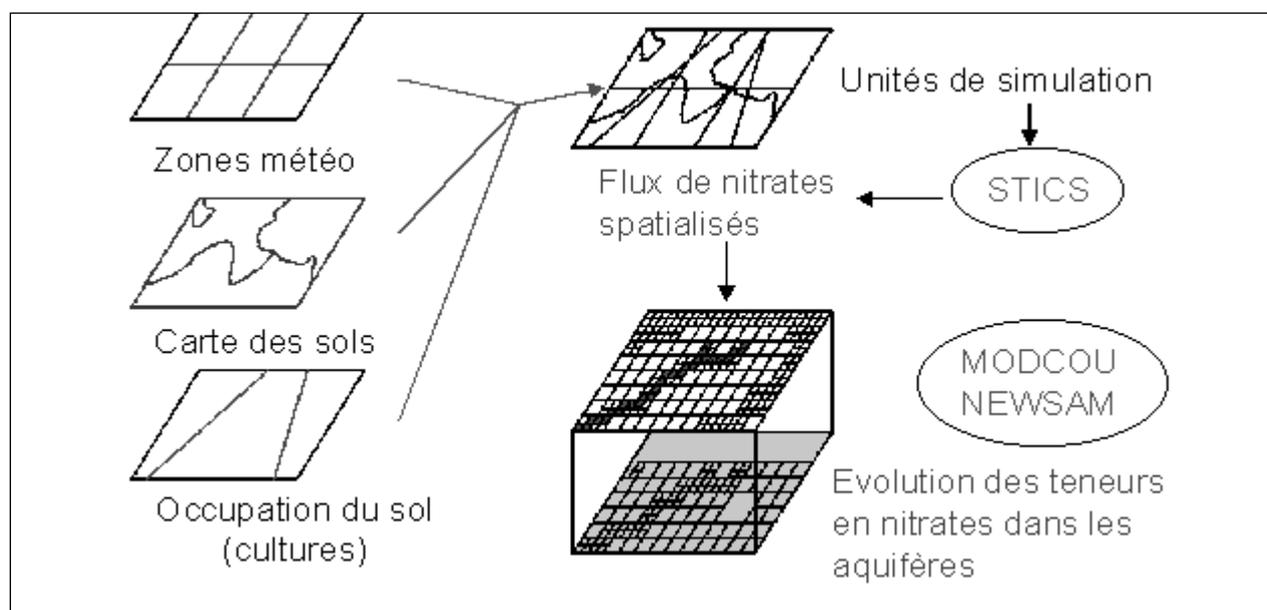


Figure 4 : Schéma de couplage de STICS, MODCOU et NEWSAM

bases de données des pratiques agricoles ont été constituées pour l'ensemble du bassin de la Marne ; elles sont en voie d'achèvement pour le reste du bassin. Les calculs de bilan d'azote réalisés sur le bassin de la Marne ont permis de quantifier la chronologie passée des flux de nitrates introduits à la base de la zone racinaire dans le système aquifère, qui apparaît en cohérence avec les concentrations actuellement observées dans les nappes.

Pour la première fois, un outil de modélisation couvrant l'ensemble des processus de circulation de l'azote dans un grand bassin versant et sur une grande échelle de temps est

ainsi mis en place. Il devrait contribuer à répondre à deux préoccupations principales, agricoles et météorologiques.

Du point de vue agricole, le modèle intégré permet de tester différents scénarios d'évolution des pratiques agricoles qui auront été définis au préalable. Cependant, avant de tester l'impact de scénarios, plusieurs simulations exploratoires seront menées avec différentes hypothèses afin de tester la sensibilité du modèle. Trois hypothèses principales ont été retenues : ajout de cultures intermédiaires, modification des doses de fertilisant minéral, variation de la proportion de prairie permanente dans la SAU.

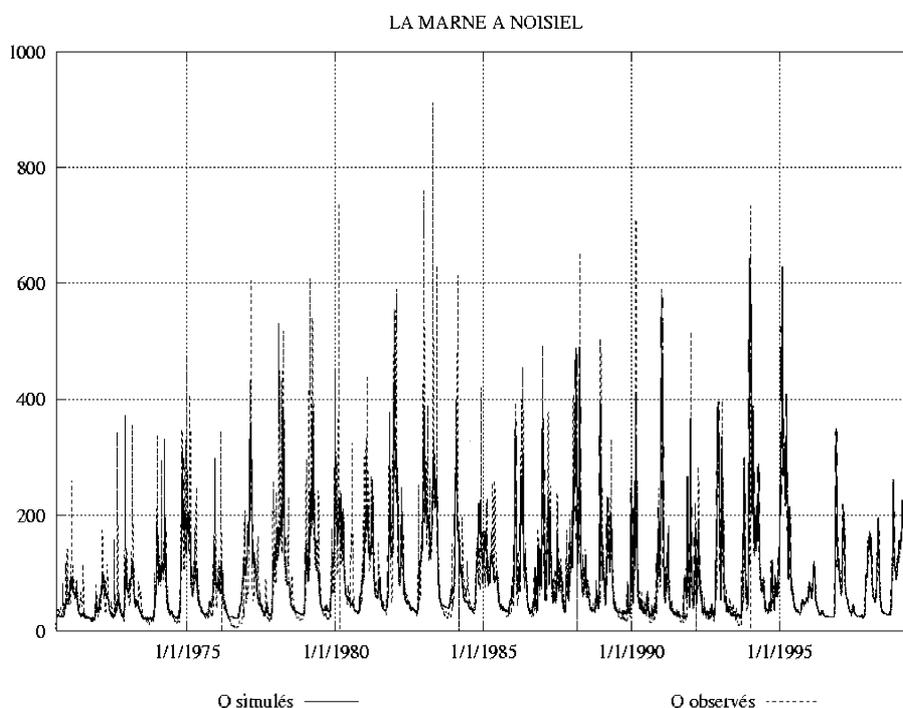


Figure 5 : Reconstitution du débit de la Marne à Noisiel sur la période 1975-85

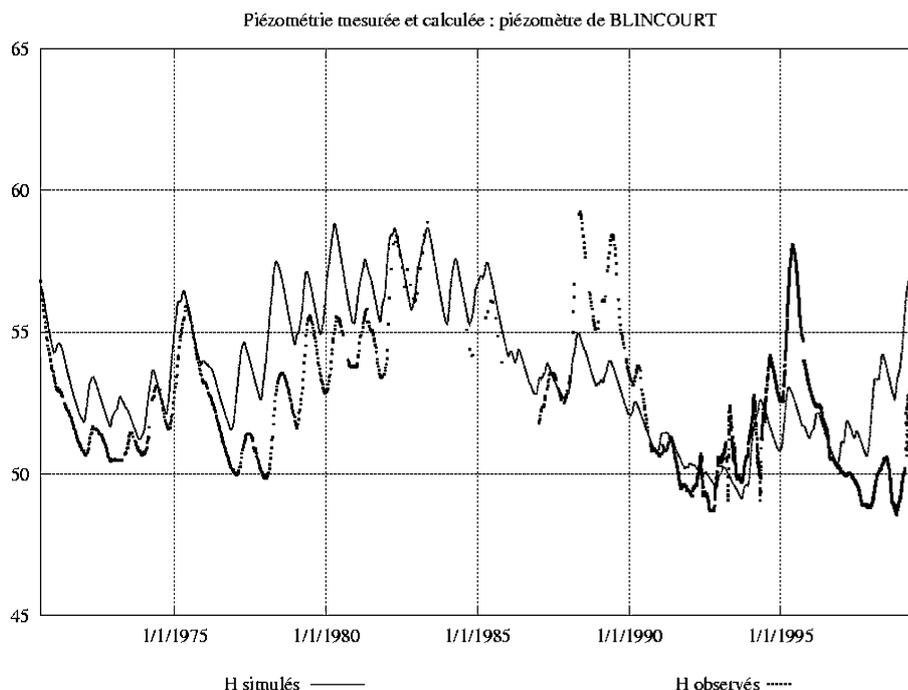


Figure 6 : Reconstitution de la piézométrie de la nappe de la craie à Blincourt sur le bassin de la Marne, sur la période 1975-85

À titre d'exemple, une simulation menée sur une courte période (1987-1990) a permis d'observer une faible diminution de la concentration en nitrates à la base de la zone racinaire de 96 à 92 mg.L⁻¹ en moyenne par année, soit une baisse de 4 %, consécutive à une réduction de 20 % de la dose de fertilisation minérale. L'impact d'une réduction modérée de la fertilisation semble donc très limité. C'est un résultat cohérent avec des simulations faites antérieurement sur le petit bassin hydrologique tertiaire de Bruyères, près de Laon (Beaudoin *et al.*, 1999 [12]) et avec des observations réalisées sur le site expérimental de Thibie, près de Châlons-en-Champagne (Mary et Laurent, 2002 [13]). Cependant, ces résultats

quantitatifs sont provisoires car il est nécessaire de préciser la pertinence du modèle par rapport à la très grande diversité de conditions de milieu rencontrée sur le bassin de la Seine. Il est également nécessaire de bien apprécier la qualité des données d'entrée. Il faudra poursuivre le test de ce type d'hypothèse sur de longues périodes de temps qui intégreront les conséquences sur la pollution des nappes souterraines.

Du point de vue météorologique, le modèle permettra de prédire l'évolution de la ressource en eau ainsi que de sa qualité en fonction de modifications du climat, qui pourraient être accompagnées ou non de modifications consécutives des pratiques agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MEYBECK M., DE MARSILY G., FUSTEC E. (1998). — La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Paris, Elsevier, 749 pages.
- [2] BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEFFROY M., RUGET F., NICOLLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J., MEYNARD J., DELÉCOLLE R. (1998). — STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1- theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- [3] LEDOUX E. (1980). — Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *Thèse ENSMP-UPMC*.
- [4] LEDOUX E., GIRARD G., VILLENEUVE J.P. (1984). — Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*, pp. 101-110.
- [5] BILLEN G., GARNIER J., HANSEN P. (1994). — Modelling phytoplankton development in whole drainage networks : The Riverstrahler model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia* 289, 119-137.
- [6] MARY B., BEAUDOIN N., BENOIT M. (1997). — Prévention de la pollution nitrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau. In : Lemaire G., Nicolardot N. (eds) : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, Reims, 19-20/10/1996. Paris, INRA Éditions, Collection Les Colloques, **83**, 289-312.
- [7] THISSE J.-F. (1997). — De l'indétermination des régions et de quelques inconvénients qui en résultent. *L'Espace Géographique*, **2**, 135-148.
- [8] GENG Q.Z. (1989). — Modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert des nitrates dans un système hydrologique. *Thèse de doctorat, École des Mines de Paris*.
- [9] CABON F. (1993). — Modélisation du cycle de l'azote dans le système sol-eau-plante du lysimètre au bassin hydrologique. *Thèse de doctorat, Université Paris VI*.
- [10] GOMEZ E., MIGNOLET C., MARY B., SCHOTT C., BRUNSTEIN D., BORNERAND C., LEDOUX E., BENOIT M. (2002). — Dynamique agricole et pollution nitrique diffuse : Modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine.

Rapport de synthèse du Programme PIREN-Seine 1998-2001,
UMR CNRS 7619 Sisyphe Paris Jussieu.

- [11] KING D., LE BAS C., JAMAGNE M., DAROUSSIN H.R. et J. (1995). — Base de données géographique des sols de France à l'échelle du 1/1000000. Notice générale d'utilisation. Rapport technique, UNRA. Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France.
- [12] BEAUDOIN N., COQUET Y., MARY B. (2002). — Estimation des pertes de nitrates et de pesticides en zone de grande culture. Étude à l'échelle du bassin hydrologique de Bruyères-et-Montberault. Compte rendu final ADEME n° 9701001, 68 p.
- [13] MARY B., LAURENT F. (2002). — La gestion durable de la fertilisation azotée. Colloque IIRB, Bruxelles, 2002.