

Modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine.

Eric Gomez, Emmanuel Ledoux (Ecole des Mines de Paris, UMR Sisyphe, Fontainebleau)

Bruno Mary, Gaël Ponsardin (INRA, Laon)

Daniel Brunstein (UMR 8591, Meudon)

Avec la collaboration de

Christine Lebas, Dominique Arrouays (INRA, Orléans)

Plusieurs modèles existants sont destinés à être associés pour permettre la modélisation du transfert des nitrates au regard de l'évolution des pratiques agricoles sur le bassin de la Seine. Les fonctionnalités de chacun des modèles sont intégrées dans une chaîne de modélisation.

Ainsi, le modèle hydrologique MODCOU, développé à l'Ecole des Mines, simule les écoulements superficiels et souterrains ; le modèle agronomique STICS, développé à l'INRA, simule le flux de nitrates à la base de la zone racinaire ; le modèle NEWSAM (Ecole des Mines) simule le transport de matière dissoute dans le domaine souterrain ; enfin, le modèle SENEQUE (Paris VI) se charge de simuler le transfert d'azote dans le réseau hydrographique.

Cet exposé présente la construction des différents outils d'intégration et l'architecture adoptée pour articuler les modèles entre eux.

STICS, initialement conçu pour fonctionner à l'échelle de la parcelle, est intégré dans une structure informatique pour fonctionner spatialement et de manière transitoire au cours du temps. La conceptualisation du couplage entre STICS et MODCOU est illustrée par le développement de nouveaux outils (transport dans la zone non-saturée et dans un réservoir-nappe) afin de simuler le transfert des nitrates dans les différents compartiments du système hydrologique de la Seine.

Cette procédure de couplage sera validée sur le bassin du Grand-Morin et de la Marne avant d'être appliquée sur l'ensemble du bassin de la Seine.

1. Rappels sur le fonctionnement des modèles utilisés

1.1. Le modèle hydrologique couplé MODCOU

Il permet de simuler les écoulements de surface, et les écoulements souterrains, en aquifère multicouches (Ledoux, 1980 ; Ledoux et al., 1984). On utilise pour cela la méthode des différences finies mise en œuvre sur des mailles carrées emboîtées.

La caractéristique essentielle de la méthode de modélisation consiste à décomposer le cycle de l'eau en étapes qui seront considérées, aussi longtemps que possible, comme indépendantes, et dont les manifestations seront contrôlables séparément. Ainsi, tout en disposant d'une modélisation qui prend en compte le domaine de surface et le domaine souterrain, on peut vérifier la validité des mécanismes internes. Le modèle est articulé en quatre parties principales concernant :

L'élaboration de la structure du système hydrologique – programme GEOCOU :

- discrétisation spatiale des domaines souterrain et de surface,
- définition de l'arbre d'écoulement du domaine de surface,
- distinction entre zones de ruissellement pur et zones figurant le réseau hydrographique principal,
- attribution des caractéristiques physiographiques à chaque élément du domaine de surface.

1.2. Le bilan hydrique des précipitations – programme MODSUR :

Le calcul du bilan hydrique a pour objectif la répartition de la lame d'eau au sol entre le ruissellement, l'évapotranspiration, l'infiltration et la quantité stockée dans le sol. Il est basé sur le calcul des fonctions de production fonctionnant sur le principe des modèles à réservoirs.

Le transfert dans la zone non-saturée – programme NONSAT :

Ce programme assure le transfert vers le milieu souterrain de l'infiltration calculée par MODSUR, au moyen d'une succession de réservoirs en cascade apparentés à un modèle de Nash.

Les transferts conjoints superficiels et souterrains - programme MODCOU :

Ce programme simule le devenir de l'eau disponible, à travers le domaine de surface et le domaine souterrain, en tenant compte de leurs interactions, au niveau des mailles rivières, définies dans la fonction d'échange surface-souterrain.

1.3. Le modèle NEWSAM

NEWSAM est subdivisé en deux modules :

Le module *Geosam* permet la caractérisation du domaine à modéliser et la mise en oeuvre de la structure du modèle. Il concerne, verticalement, la division du système aquifère en une ou plusieurs couches et, horizontalement, le maillage de chacune des couches. Rappelons que le modèle utilise des mailles carrées emboîtées de dimensions variables dans l'espace, comme le " modèle couplé ". Il est d'ailleurs compatible avec ce dernier.

Le module *Newsam* assure l'introduction des paramètres régissant les phénomènes pris en compte par le modèle et l'exécution des calculs proprement dits sur la structure définie dans le module précédent. Les calculs sont conduits en intégrant, par la méthode des différences finies, les équations aux dérivées partielles caractérisant l'écoulement de l'eau (équation de diffusivité) et le transport de masse en solution qui est calculé par l'équation de dispersion réduite au terme de convection. En effet, si la dispersion joue un rôle important lors d'une pollution ponctuelle, où le gradient de concentration est élevé au voisinage du front, elle devient négligeable lors d'une pollution diffuse, ce qui est notre cas, où il n'existe plus vraiment de front, ni de fort gradient. Il paraît donc réaliste et tolérable de prendre en compte uniquement la convection dans la modélisation régionale de pollution d'origine diffuse.

Ces équations sont bi-dimensionnelles à l'intérieur d'une couche et couplées par des équations verticalement mono-dimensionnelles décrivant la drainance à travers les couches semi-perméables, ce qui donne une description quasi tri-dimensionnelle du système aquifère.

1.4. Le modèle agronomique STICS

STICS (Simulateur mulTIdisciplinaires pour les Cultures Standard) permet de calculer des grandeurs agronomiques (biomasse végétale, rendement en produit récolté, teneur en protéines des grains, bilan azoté de la culture, ...) et des grandeurs environnementales (flux d'eau et de nitrate sortant de la zone racinaire) (Brisson et al., 1998). La limite supérieure du système est l'atmosphère, caractérisée par plusieurs variables climatiques (radiation solaire, température minimum et maximum, précipitation, évapotranspiration potentielle). La limite inférieure correspond à la profondeur maximale accessible au système racinaire, qui est fonction du type de sol et de la nature de la plante cultivée. C'est un modèle générique, qui fonctionne au pas de temps journalier, conçu pour pouvoir être transposé rapidement aux principales espèces cultivées. A ce jour, il est paramétrisé et validé pour le blé, le maïs, le tournesol, l'orge, la betterave à sucre, le colza, le pois, la pomme de terre et la vigne. Il reste à paramétriser les prairies, les forêts et les cultures intermédiaires pour couvrir les principales cultures présentes sur le bassin. Ce travail est assuré par l'équipe de l'INRA de Laon dirigée par B. Mary.

STICS est articulé en sept modules : développement, croissance aérienne, composantes du rendement, croissance racinaire, bilan hydrique, environnement thermique de la culture et bilan azoté. Ce dernier se compose de 4 sous-modules : absorption de nitrate par le système racinaire,

décomposition des matières organiques, minéralisation et humification, transfert de nitrate dans le profil de sol.

En résumé, STICS est un modèle dynamique fonctionnel de complexité intermédiaire entre des modèles mécanistes de la plante ou du sol et des modèles statiques simplifiés du bilan d'azote. Les premiers sont pour l'instant essentiellement des modèles à vocation de recherche, beaucoup plus lourds à mettre en oeuvre et à paramétrer. Les seconds suffisent à expliquer les grandes tendances de l'évolution observée depuis une cinquantaine d'années correspondant à une très forte variation du bilan azoté en agriculture.

1.5.Le modèle SENEQUE

Le modèle SENEQUE, qui représente l'application au bassin de la Seine du modèle RIVERSTRAHLER (Billen et al., 1994 ; Garnier et al., 1995), permet le calcul, au pas de temps décennaire, 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.

Quatre types d'objets sont distingués dans l'ensemble du bassin :

- le réseau hydrographique des sous-bassins, idéalisé selon une description basée sur la notion d'ordre hydrologique de Strahler, dans laquelle le chevelu hydrographique est remplacé par un schéma régulier de confluence de tributaires d'ordre croissant, aux caractéristiques moyennes,
- un ou plusieurs axes fluviaux (ou branches), recevant les exutoires des sous-bassins, et représenté d'une manière plus fine, permettant la description de profils en long avec une résolution de l'ordre du km,
- des étangs répartis statistiquement dans le réseau hydrographique des sous-bassins,
- des grands réservoirs en connexion, pour lesquels on tient compte d'une morphologie précise et des valeurs réelles journalières des débits dérivés et restitués.

Les apports ponctuels sont pris en compte par SENEQUE. Les apports diffus constituent les conditions limites du modèle. La teneur en nitrates des composantes superficielles et souterraines du débit des rivières doit être connue pour chaque sous-bassin.

Pour simuler les processus de rétention ou d'élimination des nitrates qui se déroulent dans les milieux qui bordent les rivières, un coefficient de transfert est ajusté, par calage, pour chaque sous-bassin afin de représenter la rétention riparienne.

2. Principes de la modélisation des flux d'eau et de nitrates sur le bassin de la Seine

2.1.Architecture de la modélisation

L'objectif est de réaliser une modélisation intégrée où STICS fournit, dans un premier temps, les flux de nitrates à la base de la zone racinaire. Ensuite, le débit d'infiltration à la base du sol, calculé par le modèle hydrologique MODCOU, permet de déterminer une concentration en nitrates à partir du flux calculé par STICS. Enfin, le débit d'alimentation et la concentration en nitrates précédemment définis constituent les données de forçage du modèle NEWSAM, qui se charge de simuler le transfert des nitrates en aquifère. Au niveau des rivières, la proportion de nitrates provenant de la nappe peut ainsi être intégrée au modèle SENEQUE.

Ce concept de modélisation, de la zone racinaire jusqu'aux aquifères, implique que les modèles soient compatibles entre eux de par leur structure. Or, on distingue 2 structures de modèles : d'une part, une structure spatialisée en mailles carrées emboîtées, utilisée par MODCOU et NEWSAM, et d'autre part une structure non-spatialisée, utilisée par STICS, où une unité de

simulation est définie par un type de sol, une succession de cultures avec son itinéraire technique, et des conditions météorologiques homogènes.

Il s'agit dans un premier temps de constituer des unités de simulation réparties spatialement sur le bassin de la Seine, en définissant des zones qui présentent des caractéristiques pédologiques, météorologiques et culturelles identiques. Ce principe de modélisation est illustrée par la figure 1.

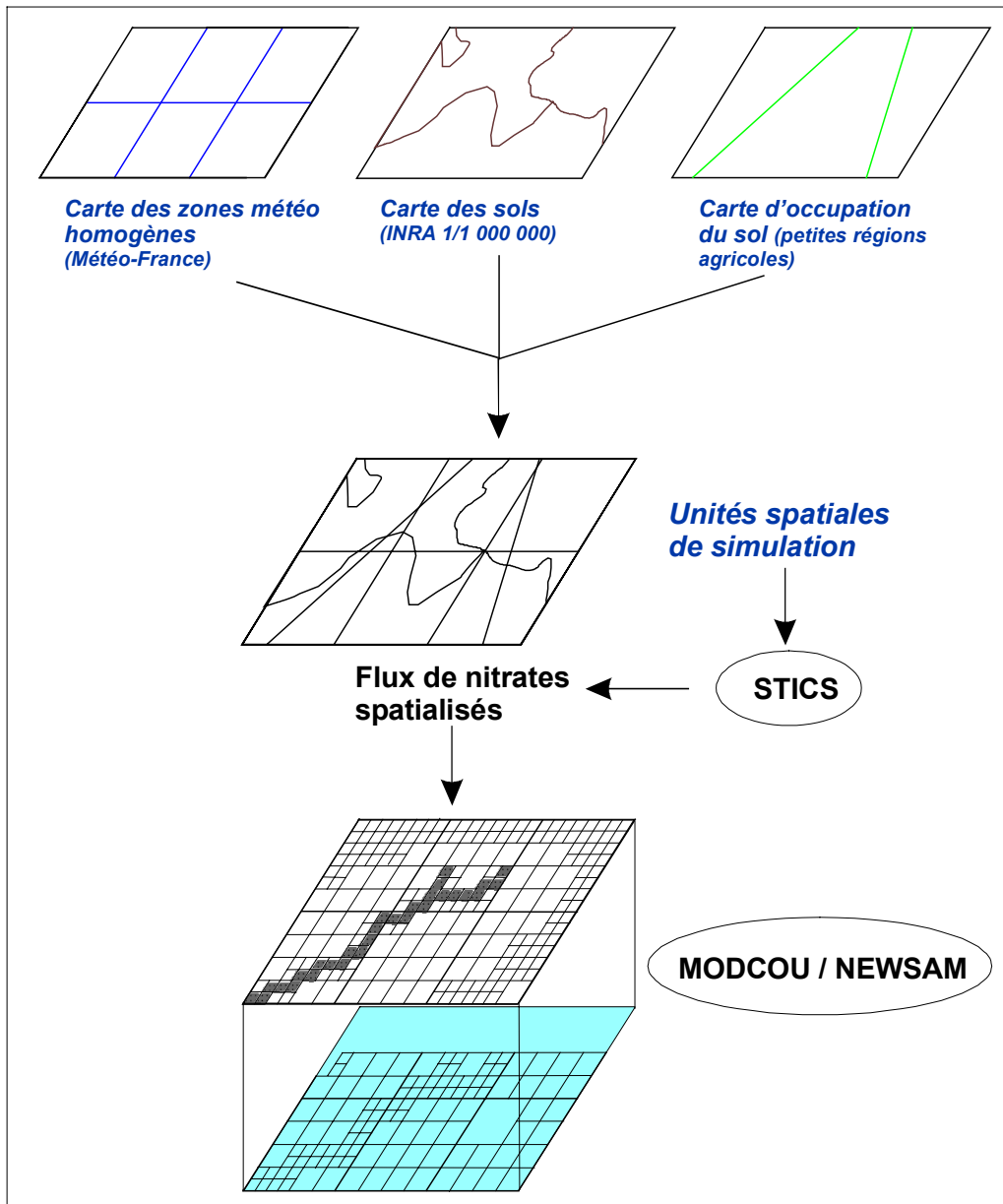


Figure 1. Structure de la modélisation

La création des unités spatiales de simulation permet de distribuer les flux de nitrates sur le maillage du modèle de surface du modèle hydrologique par correspondance entre ces deux maillages.

Il s'agit dans un deuxième temps de définir la structure spatiale du modèle hydrologique, c'est-à-dire d'établir la structure en mailles carrées emboîtées pour simuler les écoulements. On remarque toutefois que cette structure de modélisation nécessite que chaque maille de surface soit connectée à une maille souterraine. Le cas où cette situation ne se présente pas sera discuté plus loin.

2.2. Les écoulements

2.2.1. Domaine de surface

2.2.1.1. Discrétisation et banque de drainage

Le M.N.T. dont nous disposons couvre le bassin de la Seine, en coordonnées Lambert II étendu au pas de 1 km. Le logiciel Hydrodem (Leblois, 1993), utilisé sous le SIG Idrisi, permet d'établir différentes couches d'informations (directions de drainage, réseau hydrographique, limites de sous-bassins...), pour aboutir à la construction du maillage du modèle hydrologique. Le domaine modélisé atteint les limites hydrauliques du système figurées par les cours d'eau des bassins adjacents (la Somme, la Meuse, la Loire, le Loir et le Touques). Entre ces cours d'eau, le modèle s'appuie sur les limites à flux nuls constituant le bassin hydrologique de la Seine (Gomez *et al.*, 1999).

Le domaine ainsi décrit couvre une surface de 95560 km² et a été discrétisé grâce au générateur automatique de maillage SIGMOD (Golaz-Cavazzi, 1995), en 35698 mailles de 1 à 8 km de côté dont 6481 mailles rivières. Ce maillage permet de garder les limites des sous-bassins d'une superficie supérieure à 250 km², ainsi qu'un haut niveau de résolution au niveau du réseau hydrographique, afin de décrire correctement les relations nappes-rivières.

2.2.1.2. Fonctions productions

Pour différencier les fonctions productions, qui seront utilisées lors du calcul du bilan hydrique, la Base de Données Géographique des Sols de France (King *et al.*, 1995) a été exploitée à l'échelle 1/1000000, ainsi que la base de données géographique d'occupation du sol Corine Land Cover (Collectif, 1996c), dont les polygones, initialement à 25 ha, ont été agrégés à 1 km².

L'analyse de ces bases de données a permis de distinguer 6 catégories de sols, et 5 types d'occupation des sols (tableau 1).

Tableau 1. Définition des catégories de sols, et des types d'occupation des sols

B.D. Corine Land Cover	B.D. INRA
- Territoires artificialisés (villes)	- Dépôts alluviaux ou glaciaires (all)
- Forêts (f)	- Roches carbonatées (calc)
- Hors-forêts (cultures, végétation arbustive ou herbacée, pas ou peu de végétation)	- Matériaux argileux et marnes (arg)
- Zones humides (zhum)	- Roches sableuses, formations détritiques (sabl)
- Surfaces en eau (eau)	- Roches limoneuses (lim)
	- Socles cristallins et cristallophylliens (cris)

Le croisement de ces 2 cartes conduit à distinguer 15 fonctions productions, distribuées sur le maillage de base, dont la répartition est présentée sur la figure 2. A cet effet, le module MODSUR du modèle hydrologique, qui, initialement, était conçu pour fonctionner avec 14 fonctions productions, a été développé pour fonctionner avec 99 fonctions productions au maximum.

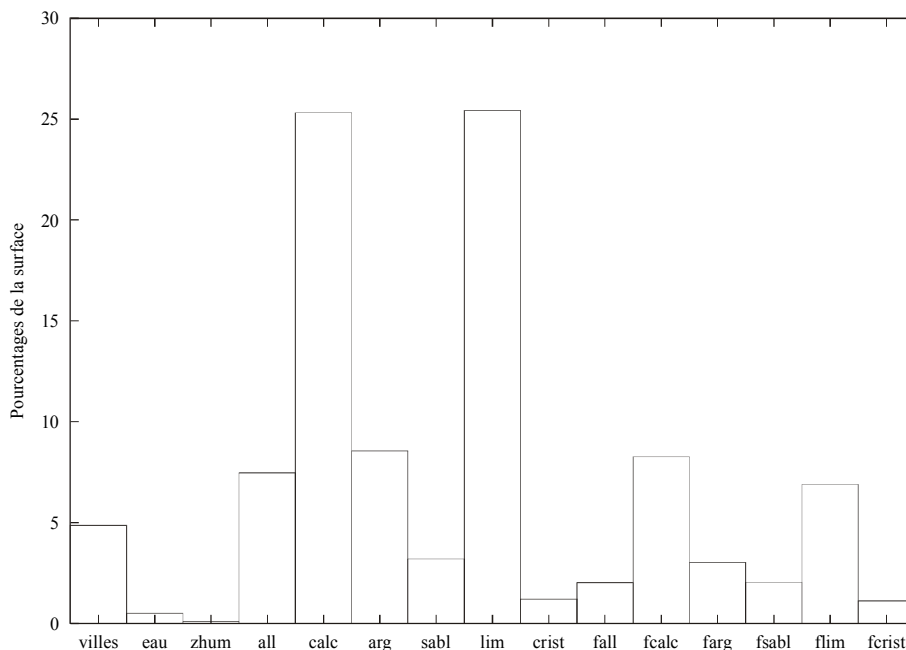


Figure 2. Répartition des zones de production dominantes sur le bassin de la Seine

2.2.1.3. Zones météorologiques

Les forçages atmosphériques utilisés par le modèle couplé et STICS sont les précipitations, l’ETP, la température minimum et maximum, et le rayonnement global. Ces variables sont fournies par Météo France au pas de temps journalier, sous la forme de champs interpolés, sur une grille d’un pas de 8 km (figure 3).

Ces données sont le résultat de la mise en œuvre du logiciel SAFRAN (Système d’Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) qui fournit au pas de temps horaire, avec une discrétisation verticale : température de l’air à la surface, vent, humidité de l’air, nébulosité, pression, précipitations liquides et solides, rayonnement atmosphérique et rayonnement solaire incident (direct et diffus) (Durand *et al.*, 1993). SAFRAN utilise une méthode d’interpolation qui prend en compte les sorties d’un modèle à méso-échelle (20 à 100 km²) et les observations disponibles qui proviennent des données relevées en 62 postes synoptiques et 1569 postes du réseau climatique d’Etat.

2.2.1.4. Mesures hydrométriques

Les 158 stations hydrométriques retenues drainent une surface supérieure à 250 km², sur le bassin, et serviront à effectuer le calage et la validation du modèle hydrologique. Les chroniques de débits journaliers ont été extraites de la base de données HYDRO.

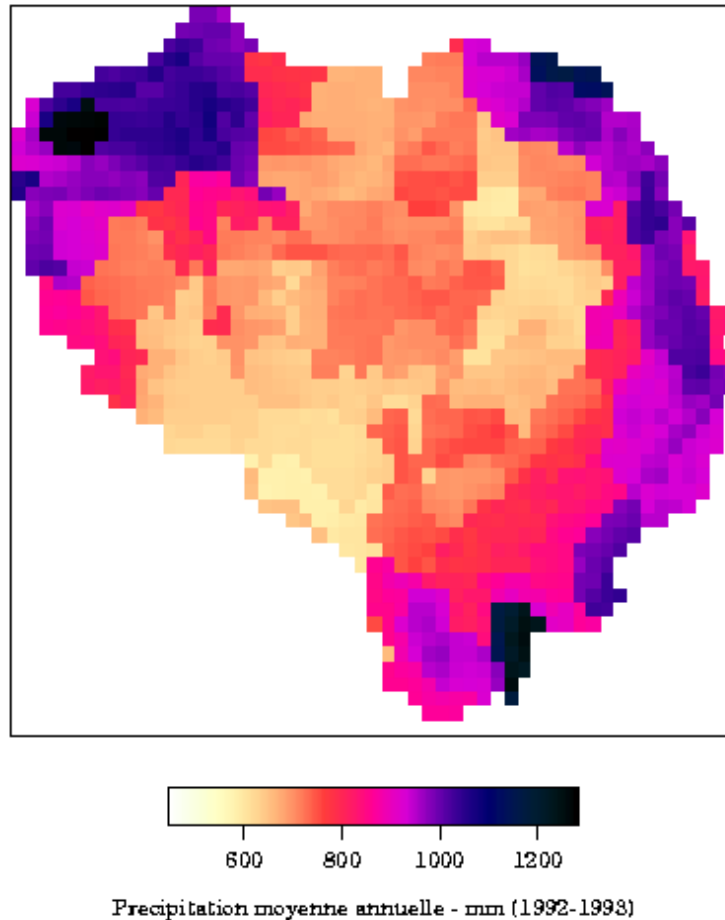


Figure 3. Précipitation moyenne annuelle sur le bassin de la Seine – mm (1992-1993)

2.2.2. Domaine souterrain

2.2.2.1. Description et choix des aquifères

Le bassin de la Seine est inclus dans le Bassin de Paris qui est constitué par un ensemble de terrains sédimentaires reposant sur un socle anté-permien et limité par les massifs hercyniens affleurants. Les couches géologiques les plus récentes se situent au centre du bassin, tandis que les plus anciennes occupent la périphérie. Plusieurs ensembles hydrogéologiques principaux sont présents sur la zone d'étude (Wei, 1990 ; Certes et al. 1997 ; Mégnien, 1970) : les nappes de l'Oligocène, de l'Eocène, de la Craie, de l'Albien, du Portlandien, du Lusitanien, du Dogger, et du Lias (figure 4).

Dans notre étude, on s'attachera à simuler les écoulements souterrains, en adoptant une structure multicouches, au niveau des terrains tertiaires et de la Craie. De l'Albien au Lias, les aquifères ne seront pas représentés sous forme de couches individualisées. En effet, la partie captive de ces aquifères, sous la Craie, se situe à plusieurs centaines de mètres sous la surface topographique. Or, sur une échelle de temps d'une cinquantaine d'années, qui correspond environ à la période de simulation, les nitrates transférés dans les aquifères profonds, dont l'écoulement est très lent, n'interfèrent pas avec les nitrates du réseau superficiel.

En revanche, dans la partie libre, à l'est du bassin, les nitrates transportés dans ces aquifères ont une incidence sur les nitrates du réseau de surface. Cependant, une prise en compte de ces aquifères dans la partie libre uniquement est exclue car elle ne permettrait pas de représenter de façon satisfaisante l'hydraulique souterraine.

Néanmoins, les écoulements et les transferts de nitrates seront pris en compte dans cette zone, grâce à un modèle à réservoir que nous détaillerons plus loin.

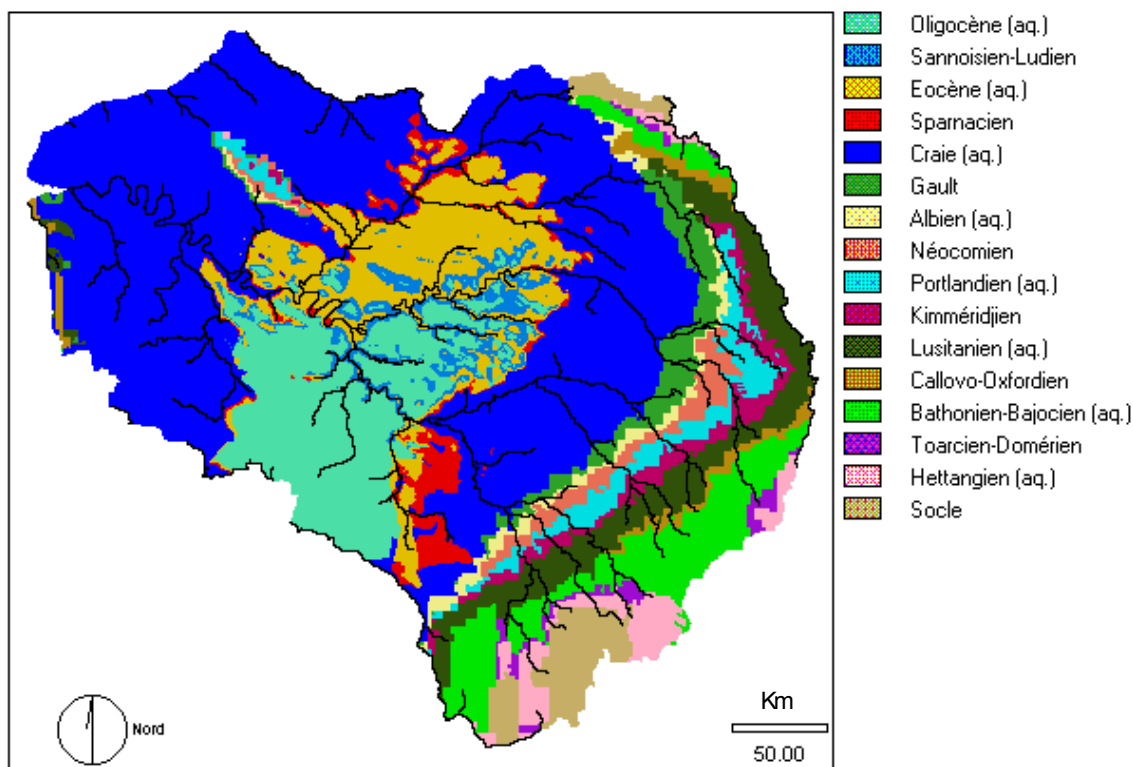


Figure 4. Carte hydrogéologique simplifiée

Le choix des aquifères modélisés est donc le suivant :

- aquifère de l'Oligocène (calcaires de Brie, sables stampien, calcaires de Beauce)
- aquifère de l'Eocène (nappe de Soissonnais et nappe des calcaires de Champigny)
- aquifère de la Craie (Crétacé supérieur)

2.2.2.2. Maillage

Pour les besoins de l'étude, le programme SIGMOD a été développé afin de permettre le maillage des couches souterraines. Le but est de réduire au maximum le nombre de mailles des couches souterraines en regroupant les mailles de la couche de surface suivant des critères topologiques et hydrologiques (figure 5). C'est-à-dire qu'au niveau de la partie affleurante d'un aquifère, les mailles correspondant aux mailles rivières sus-jacentes ne sont pas regroupées, pour représenter correctement les échanges nappes-rivières. En revanche, dans la partie captive et hors des mailles rivières, les mailles de la couche sus-jacente sont regroupées de manière à obtenir un réseau de mailles carrées emboîtées de tailles variables, tout en respectant les critères topologiques en 3 dimensions, pour permettre les échanges éventuels entre les nappes (une maille voisine, horizontalement ou verticalement, doit être 4 fois plus petite, 4 fois plus grande ou de la même taille que la maille courante).

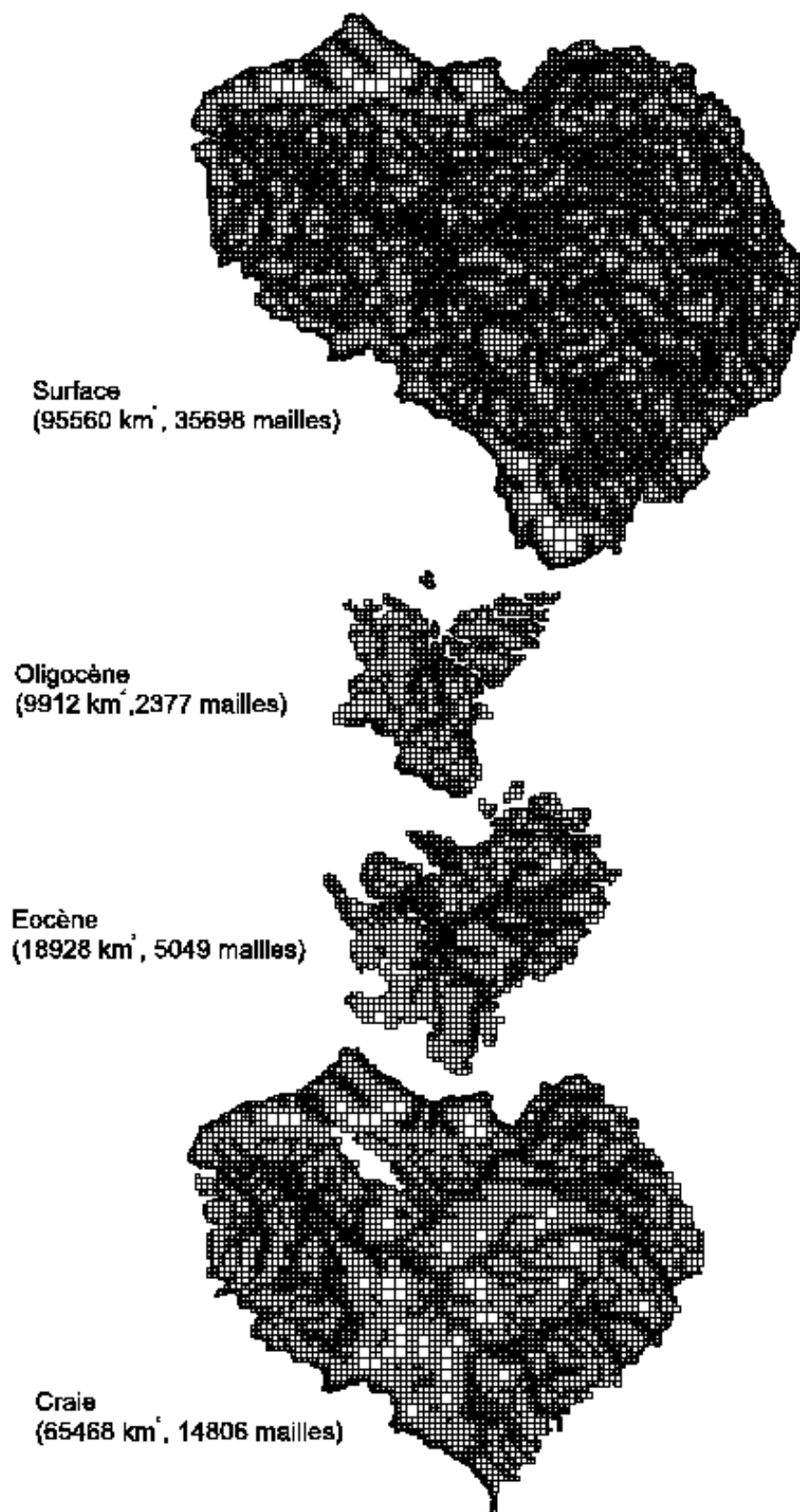


Figure 5. *Maillage des différentes couches*

Mesures piézométriques

Les chroniques piézométriques sont issues de la base de données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie, et serviront à caler la transmissivité et le coefficient d'emménagement des nappes modélisées. Environ 200 piézomètres sont disponibles sur l'ensemble du bassin.

2.2.3. Echanges nappes-rivières

Le pas du M.N.T. (1 km) ne permet pas de représenter correctement les cotes de drainage des nappes (cotes des surfaces libres des rivières). Elles ont donc été saisies à partir des cartes IGN aux échelles 1/100000 et 1/25000, des guides de la navigation, et des cotes annoncées par la banque HYDRO au niveau des stations de jaugeages. Les données saisies ont ensuite été interpolées linéairement, et en tenant compte de la topographie imposée par le M.N.T.

2.2.3.1. Les flux de nitrates

Pour employer STICS de façon spatialisée, la première étape consiste à créer des unités spatiales de simulation (figure 1). Rappelons qu'une unité spatiale de simulation est définie par des caractéristiques météorologiques, pédologiques et culturelles identiques.

Les données météorologiques fournies par Météo-France sont distribuées sur une grille d'un pas de 8 km.

La carte d'occupation des sols, ainsi que les techniques culturales associées, est réalisée grâce à la contribution de l'équipe dirigée par M. Benoit à l'INRA de Mirecourt.

La base de données associée à la carte des sols est réalisée par l'équipe dirigée par D. King à l'INRA d'Orléans.

Cependant, comme nous le verrons par la suite, le trop faible niveau de résolution des unités spatiales de simulation ne permet pas d'obtenir des zones homogènes à la fois d'un point de vue pédologique, météorologique et culturelle. Par conséquent, chaque zone comporte une distribution d'unités de simulation.

2.2.4. Cartes d'occupation des sols et techniques culturales associées

Les données des statistiques agricoles sont organisées sur un maillage en petites régions agricoles (PRA). Malgré sa moins bonne précision spatiale que le maillage cantonal, le maillage en PRA présente l'avantage de concorder avec les grands ensembles géologiques (Benoit et al., 1999). Outre la définition spatiale des PRA, il convient de définir sur chacune de ces unités l'évolution des successions culturales et des pratiques agricoles au cours du temps.

Les informations sur l'occupation des sols et les pratiques agricoles proviennent d'enquêtes auprès de conseillers des Chambres d'Agriculture et de coopératives. Pour chaque PRA sont déterminées (Bornerand, 2000) :

- d'abord, les périodes d'activités agricoles homogènes : c'est-à-dire, des périodes où, soit les cultures principales sont identiques, soit les itinéraires techniques sont peu variables. Les 20 à 30 dernières années sont ainsi découpées en quelques périodes,
- ensuite, pour chacune de ces périodes, les experts définissent l'organisation des cultures les unes à la suite des autres, on obtient donc les successions culturales en proportions variables dans la PRA,
- enfin, pour chaque période et chaque culture (selon son précédent et son suivant dans la succession), les experts détaillent l'ensemble des itinéraires techniques : semis, récolte, rendement, travail du sol et fertilisation azotée.

Ainsi, plusieurs successions culturales sont présentes sur chaque PRA et sur chaque période homogène, en proportions variables. Toutefois, leur répartition spatiale n'est pas connue à l'échelle du bassin de la Seine. Donc, la solution consiste à utiliser une distribution aléatoire des successions culturales par PRA, ainsi que des pratiques agricoles associées aux cultures, sur une période donnée.

2.2.5. Carte des sols

Nous avons utilisé la Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1000000 qui est constituée de 2 ensembles : l'ensemble géométrique où sont indiquées les limites géographiques entre les unités de sol, et l'ensemble sémantique où sont indiqués les attributs descriptifs de ces unités.

L'objet élémentaire principal de la base sémantique est l'Unité Typologique de Sol (UTS). Il s'agit d'un concept permettant de regrouper par classe tous les sols de même nature. Il est très souvent difficile de délimiter géographiquement les UTS à l'échelle du 1/1000000. Il est donc procédé à des regroupements en Unités Cartographiques de Sols (UCS) représentés sous forme de polygones.

Ainsi, de la même façon que pour les PRA, chaque UCS comporte une distribution aléatoire d'UTS.

Une base de données est associée à la carte des sols. Elle comprend, pour chaque unité typologique de sol, une description par horizon de sol de la texture, de la teneur en calcaire, de la teneur en cailloux, de la teneur en graviers, et de la profondeur, ainsi qu'une description de la nature des matériaux parentaux et du type de sol. A partir de cette base, des règles de pédotransfert permettent d'estimer les paramètres pédologiques nécessaires aux simulations (Le Bas, Arrouays, 2000 : comm. pers.).

2.2.6. Définition des unités générales de simulation

Le croisement de la grille météorologique, de la carte des sols (UCS) et de la carte d'occupation des sols (PRA), à l'aide du SIG Arc-Info, aboutit à la définition de 11610 zones homogènes, nommées unités spatiales de simulation (figure 6). Ce nombre, initialement plus élevé, a été obtenu en éliminant les unités de surface inférieure à 10 ha, par ajout de cette surface à l'unité adjacente de taille maximale. Toutefois, une même PRA peut être scindée en plusieurs morceaux non-connexes. Par exemple, sur une zone météo donnée et sur un type de sol donné, il peut exister plusieurs polygones, qui appartiennent en fait à la même PRA. Il en résulte plusieurs unités qui ont en fait des caractéristiques identiques. Cette situation se rencontre souvent sur le bassin. La solution, pour diminuer le nombre de zones homogènes, consiste alors à regrouper les unités qui présentent les mêmes caractéristiques météorologique, pédologiques et culturelles. De cette façon, on obtient 7903 zones homogènes, appelées unités générales de simulation (UGSM).

Comme nous l'avons vu précédemment, chaque unité générale de simulation peut comporter une distribution aléatoire de types de sols, et de successions culturelles, correspondant à différentes unités de simulation (USM), sur lesquelles s'effectueront les calculs à l'aide de STICS.

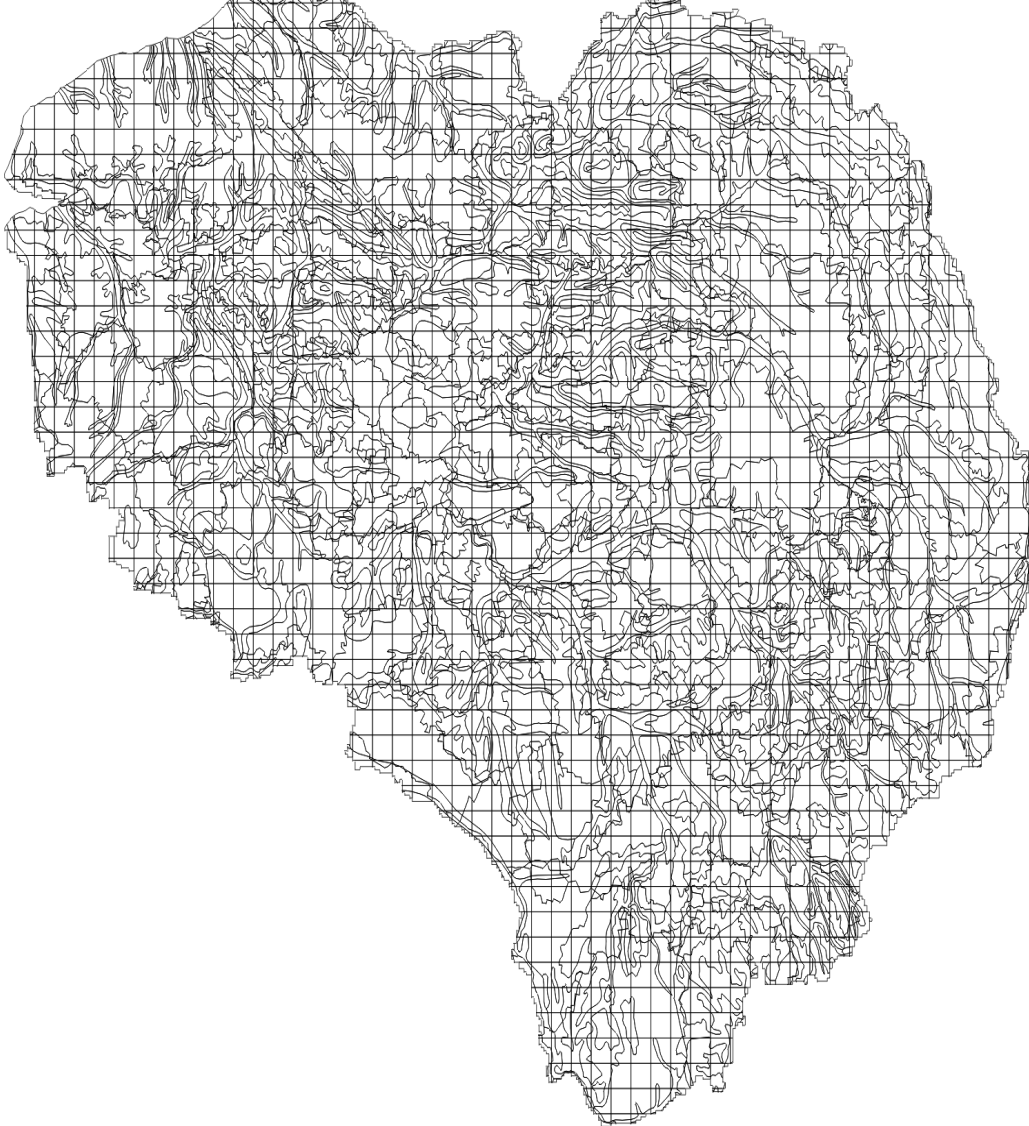


Figure 6 : *11610 unités spatiales de simulation*

3. Construction des outils d'intégration

Il s'agit à présent d'assurer la simulation du transfert des nitrates de la partie superficielle jusqu'aux aquifères. Plusieurs questions se posent : comment réaliser des simulations avec STICS de façon spatialisée ? Comment transférer les nitrates dans la zone non-saturée ? Comment transporter les nitrates dans les aquifères, lorsque ceux-ci ne sont pas représentés par le modèle hydrologique ?

3.1. Spatialisation de STICS

STICS, initialement destiné à effectuer des simulations à l'échelle de la parcelle, a déjà été employé de façon spatialisée, sur des zones de plusieurs centaines d'hectares, à l'aide du Système d'Information Géographique Arc-Info (Schnebelen, 2000 ; Ponsardin, 1999). Dans notre étude, STICS est employé sur le bassin de la Seine sans avoir recourt à un SIG pour les questions de spatialisation. En revanche, le SIG Arc Info est utilisé pour constituer la base de données nécessaire au fonctionnement de STICS.

Son emploi à l'échelle du bassin de la Seine nécessite de réaliser des simulations sur les UGSM précédemment définies. Comme nous l'avons vu, chaque UGSM contient des USM en proportions variables sur lesquelles STICS calcule les flux de nitrates. Ces flux sont additionnés au prorata des surfaces qu'occupent les USM, afin d'obtenir les flux de nitrates lessivés à la base de la zone sous-racinaire pour chaque UGSM.

Par correspondance entre le maillage des unités spatiales de simulation et celui du modèle hydrologique, et connaissant la proportion d'unités spatiales de simulation par UGSM, les flux de nitrates, après avoir subi un retard dans la zone non-saturée, sont distribués sur les mailles du modèle MODCOU / NEWSAM.

Sur une période choisie, la méthode de spatialisation consiste à créer des fichiers météorologiques, pédologiques et culturaux au cours de la simulation de STICS. En effet, chaque UGSM est rattachée à une zone météo, à plusieurs types de sols et à plusieurs successions culturales. Les simulations sont réalisées succession culturelle par succession culturelle, en simulant, successivement et de manière enchaînée, sur chaque type de sol, les cultures qui composent chaque succession, sur la période de simulation choisie.

En outre, STICS a besoin de données concernant les pratiques agricoles ainsi que les caractéristiques pédologiques qui auront été préalablement créées à partir respectivement des enquêtes auprès des agriculteurs (Bornerand C., 2000), et d'une étude pédologique (Arrouays et Le Bas, 2000 : comm. pers.).

3.2. Transport des nitrates dans la zone non-saturée

STICS calcule des flux de nitrates à la base de la zone sous-racinaire, c'est-à-dire à une profondeur maximale de 2 mètres. Les nitrates traversent ensuite une zone non-saturée plus ou moins épaisse avant de rejoindre l'aquifère sous-jacent. La durée de transfert des nitrates dépend de l'épaisseur et de la perméabilité des terrains traversés.

Lors d'une recharge brusque de la nappe, on observe un déphasage entre la montée du niveau de la nappe et son alimentation en nitrates. Ceci s'explique par le fait que dans le cas d'une réponse à une recharge, on a affaire à un transfert de pression au travers de la zone non-saturée, tandis que dans le cas du transfert, on a affaire à un transport de masse.

Les processus biochimiques se produisant essentiellement dans la couche superficielle du sol, le transport des nitrates est considéré conservatif dans la zone non-saturée.

Pour simuler le retard du transfert des nitrates dans la zone non-saturée, le module NONSAT du modèle hydrologique a été développé en prenant en compte un mélange complet dans chaque réservoir, suivi d'une vidange par effet piston. Rappelons que, dans ce programme, la zone non-saturée est assimilée à une succession de réservoirs de Nash qui se déversent les uns dans les autres suivant une vidange exponentielle. Le nombre de réservoirs (N) reflète l'épaisseur, tandis que le coefficient de vidange (τ) représente la perméabilité (figure 7).

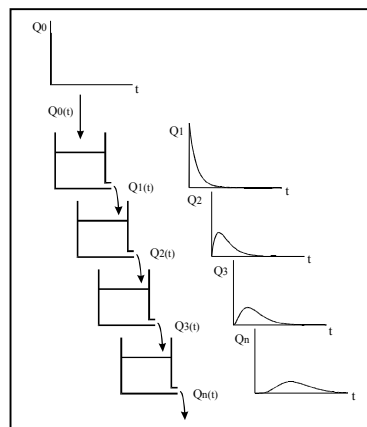


Figure 7. Principe du modèle de Nash.

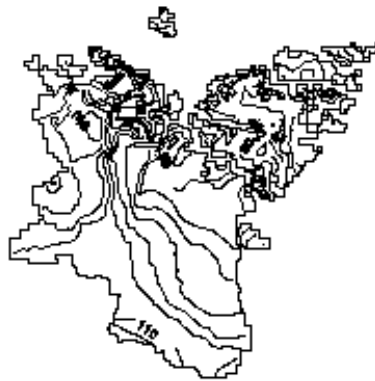
Ainsi, le débit à l'instant t à la sortie du Nième réservoir résultant d'une recharge brusque d'amplitude δQI appliqué au premier réservoir à l'instant τ ($\tau < t$) s'exprime par la relation :

$$Q_N(t) = \frac{\delta QI(\tau)}{\tau(N-1)!} \times e^{-(t-\tau)/\tau} \times \left(\frac{t-\tau}{\tau} \right)^{N-1}$$

Ces deux paramètres sont ajustés par calage, notamment au moyen des historiques piézométriques.

Le domaine à modéliser est divisé en zones homogènes, c'est-à-dire en zones qui ont le même nombre de réservoirs et le même coefficient de vidange. A partir de la profondeur moyenne de la nappe, issue du calage du modèle souterrain en régime permanent (figure 8), le nombre de réservoirs est déterminé, d'une part, d'après l'épaisseur des réservoirs, par différence entre l'altitude de la surface topographique et la piézométrie simulée, et d'autre part, par les types de sols (figure 9). Cependant, à l'est du bassin, où les aquifères ne sont pas représentés, les différents types de sols sont utilisés pour établir les zones homogènes auxquelles sont attribuées les 2 paramètres, par calage.

Nappe de l'Oligocène



Nappe de l'Eocène



Nappe de la Craie

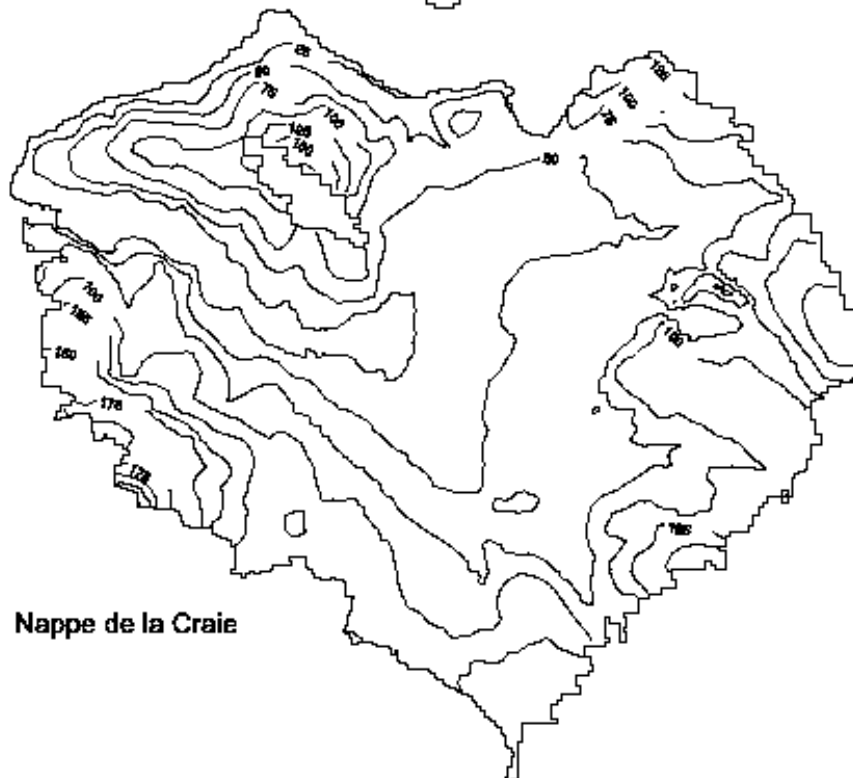


Figure 8 : Piézométrie en régime permanent des aquifères Oligocène, Eocène, de la Craie.

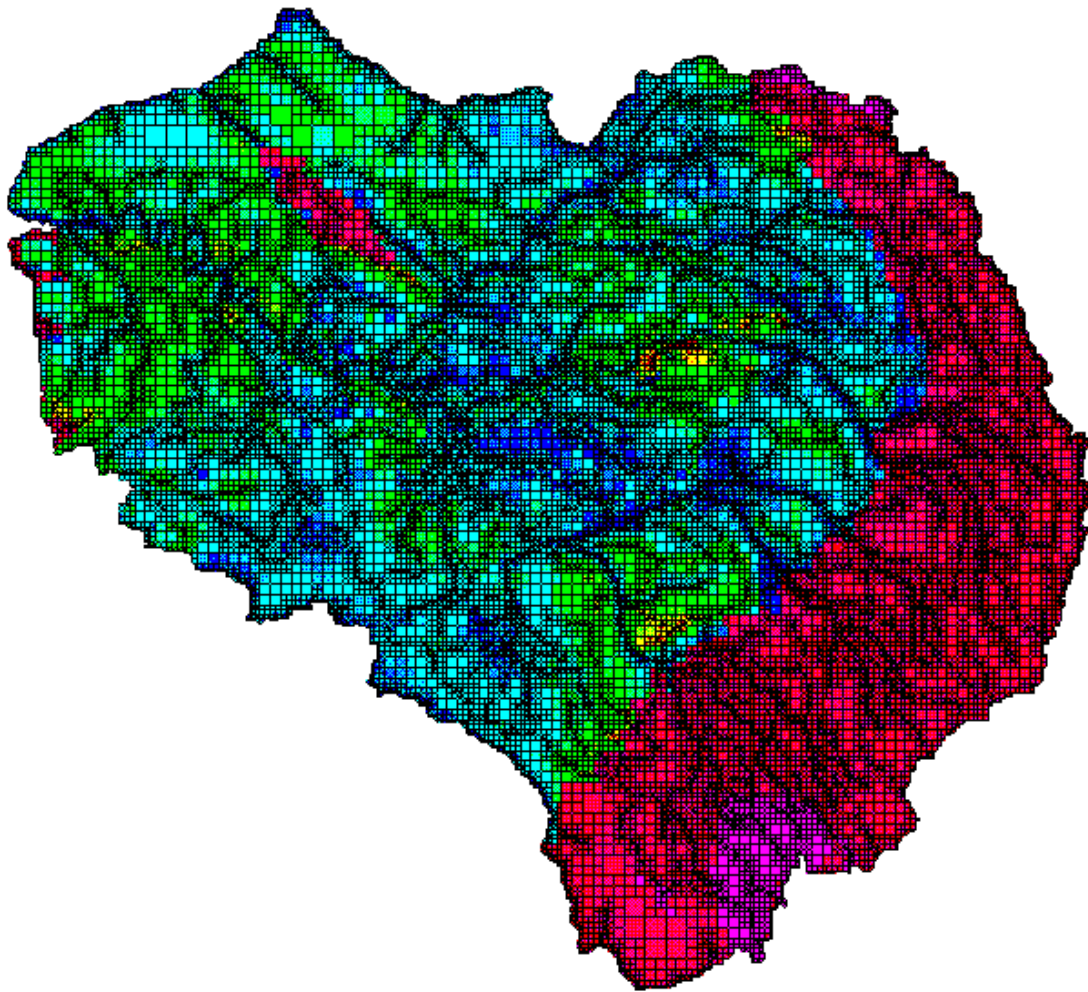


Figure 9 : 129 zones non-saturées homogènes

Sur chaque zone, la concentration en nitrates est initialisée, en considérant une concentration homogène, sur la totalité de l'épaisseur de la zone non-saturée. Le transfert des nitrates est ensuite calculé en admettant un mélange complet au sein de chaque réservoir de Nash.

3.3. Transport dans le domaine souterrain (Est)

A la base de la zone non-saturée, les nitrates rejoignent la nappe. Cela signifie, pour le modèle, que les couches souterraines sont alimentées par les flux de nitrates calculés sur chaque maille de la couche de surface. Le transfert des nitrates dans l'aquifère est alors calculé grâce au modèle NEWSAM. Cependant, lorsqu'une maille de surface n'est pas connectée à une maille souterraine, ce qui est le cas à l'est du bassin, le calcul du transfert des nitrates est représenté par un modèle à réservoir à 4 paramètres (figure 10) :

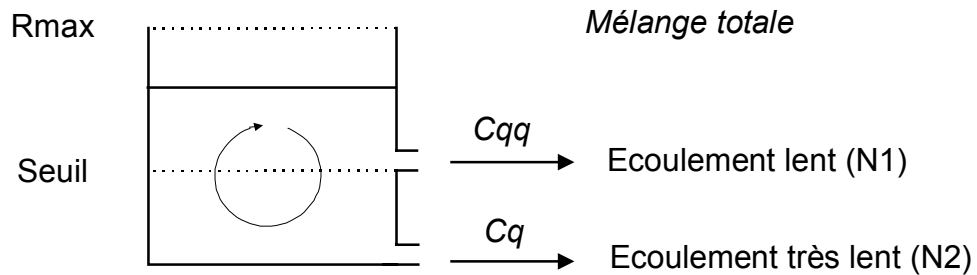


Figure 10 : Schéma de fonctionnement du réservoir nappe

- le seuil, exprimé en mm, représente le niveau de la nappe dans une situation d'étiage,
- c_{qq} et c_q sont des coefficients de transfert qui régulent l'écoulement dans la nappe suivant une vidange exponentielle,
- R_{max} correspond au niveau de débordement de la nappe (mm).

Le réservoir est divisé en une fraction d'eau dédiée à l'écoulement lent (au-dessus du seuil) qui correspond à la vidange de la nappe, et une fraction d'eau dédiée à un écoulement très lent (au-dessous du seuil) qui correspond à l'écoulement produit dans la partie profonde de l'aquifère. A chaque pas de temps, on admet un mélange complet dans le réservoir. Lorsque le niveau de la nappe se trouve au-dessus du seuil, la vidange se fait par l'orifice N1. Le volume situé sous le seuil, participe dans une moindre mesure à l'écoulement, mais intervient dans le mélange. Dans le cas où le niveau est situé sous le seuil, la vidange se fait par l'orifice N2 et tout le volume participe à l'écoulement et au mélange.

4. Tests des programmes développés

Les données concernant les successions culturales, les pratiques agricoles, et les types de sols ne sont actuellement pas disponibles sur l'ensemble du bassin. Les programmes seront testés avec des données fictives. De ce fait, les résultats ne seront pas interprétés mais serviront uniquement à s'assurer de la bonne exécution des programmes.

4.1. STICS spatialisé

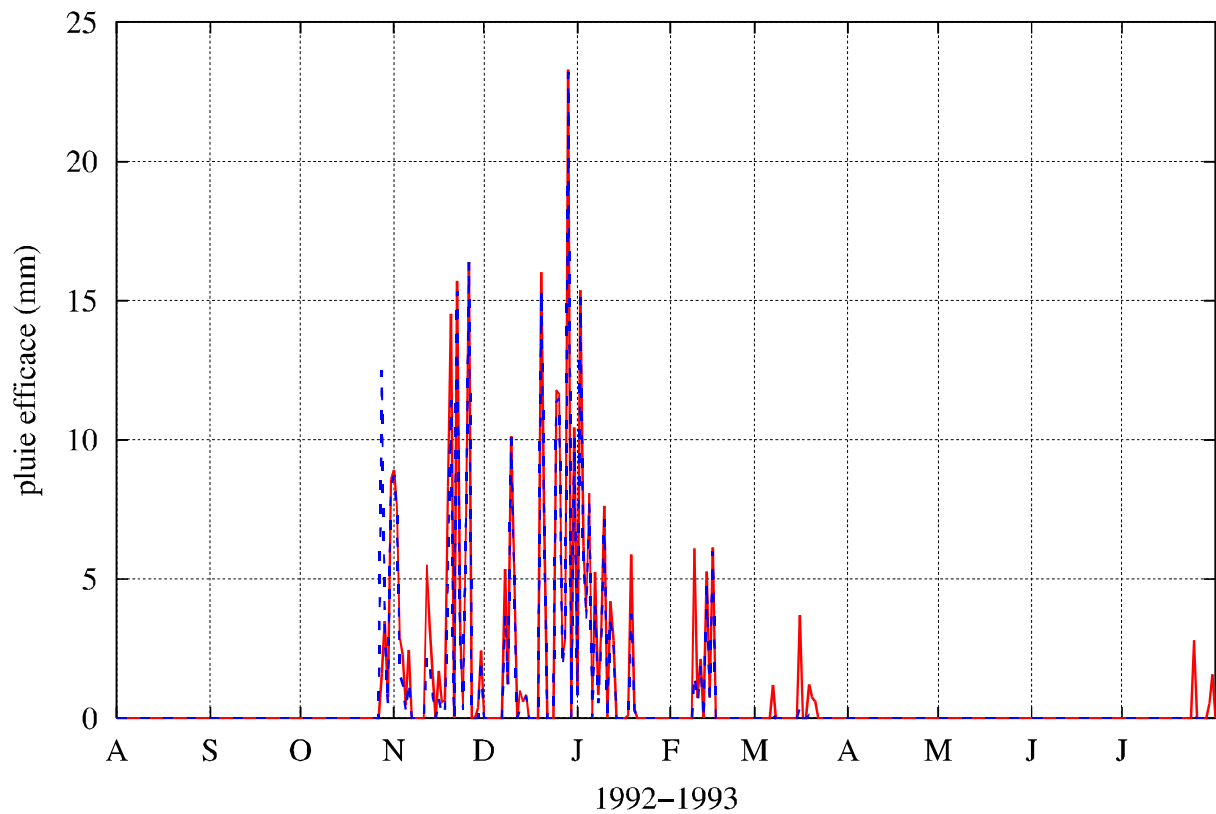
Pour cet exemple, nous avons choisi une unité générale de simulation qui correspond à une UCS et à une PRA fictives, ainsi qu'à une zone météorologique de la période 1992-1993.

L'UCS contient un sol limoneux et un sol limoneux-argileux, tandis que la PRA contient 2 types de successions culturales : maïs-blé-solnu et soja-blé-solnu. Chaque culture est rattachée à un itinéraire technique.

2 cas ont été testés :

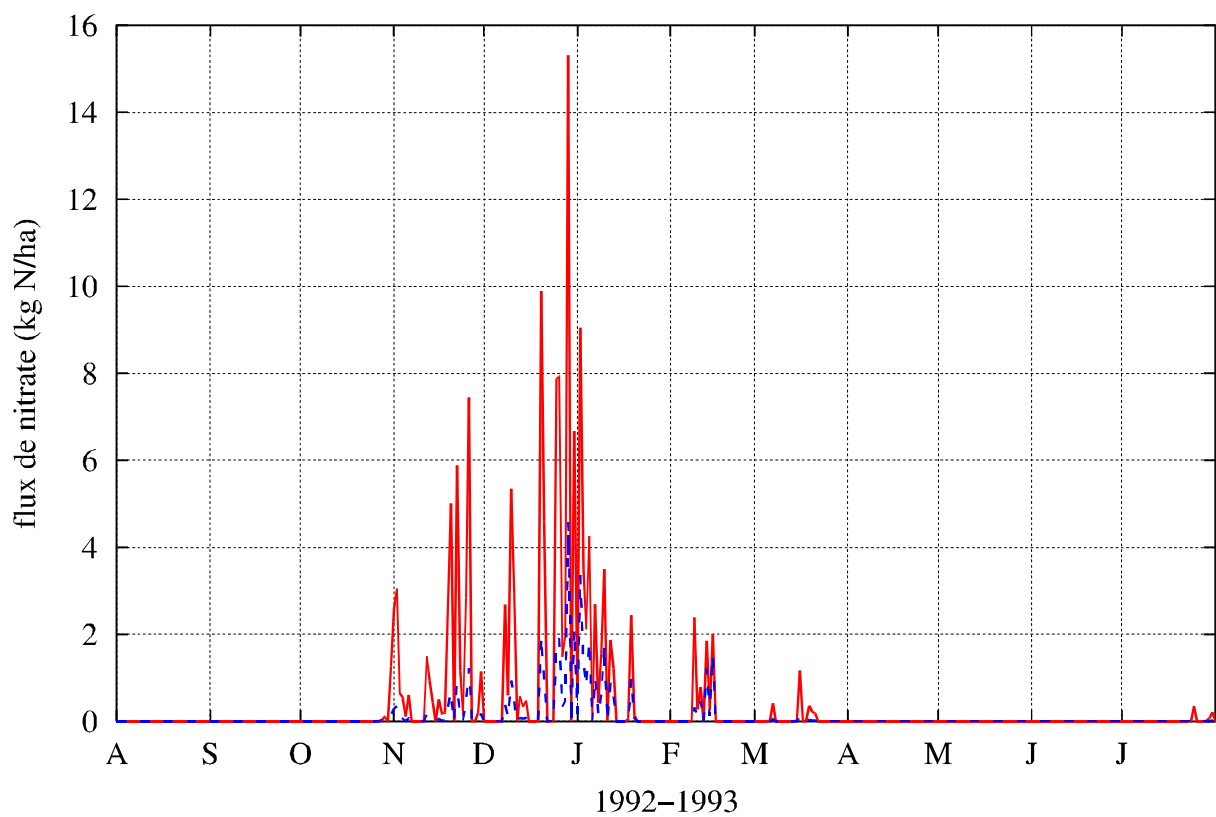
- l'effet de la distribution du sol sur le lessivage (figure 11) (90% limons-10% limons argileux et inversement, avec 50% maïs-blé-solnu et 50 % soja-blé-solnu)
- l'effet de la distribution des successions culturales (figure 12) (90% maïs-blé-solnu-10% soja-blé-solnu et inversement, avec 50 % limons et 50% limons argileux)

Dans les deux cas, on observe des différences de lessivage des nitrates à la base de la zone sous-racinaire suivant la distribution de succession culturales et de types de sols. Ces tests de sensibilité laissent présager de résultats intéressants lorsqu'on étudiera l'impact de l'agriculture à l'échelle du bassin de la Seine.



90% limons ———

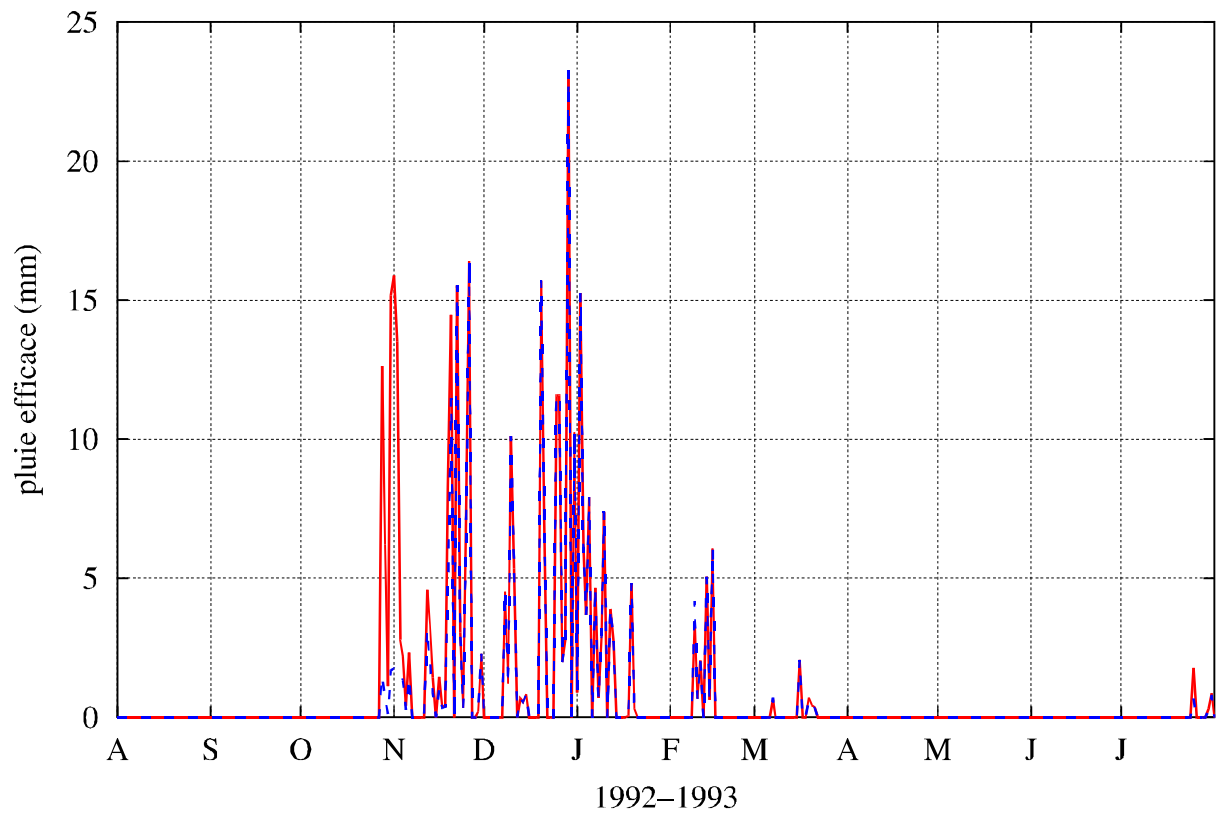
90% limons argileux - - - -



90% limons ———

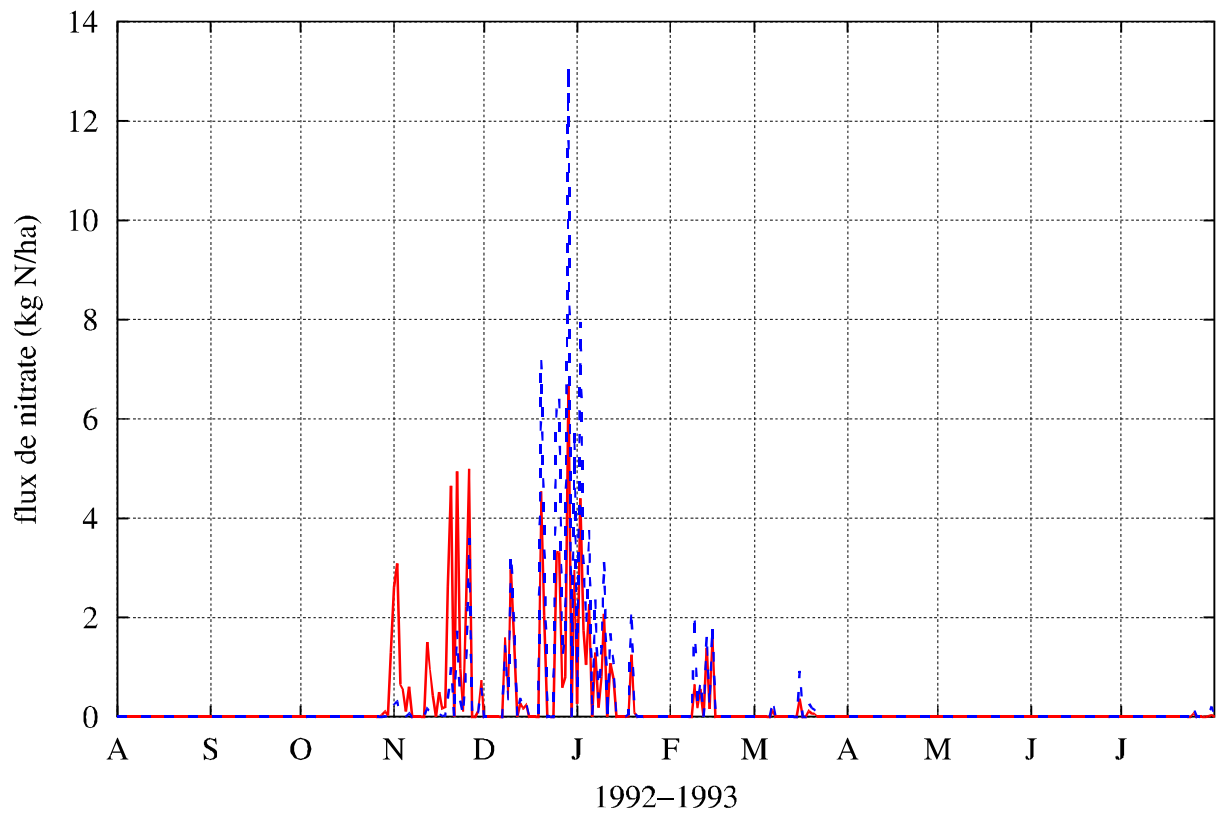
90% limons argileux - - - -

Figure 11 : Test de sensibilité de STICS en fonction d'un type de sol



90% maïs-blé-sol nu ———

90% soja-blé-solnu - - - -



90% maïs-blé-sol nu ———

90% soja-blé-solnu - - - -

Figure 12 : Test de sensibilité de STICS spatialisé en fonction d'une succession culturale

4.2. Transport des nitrates dans la zone non-saturée

Pour cet exemple, le signal d'entrée, représenté en bleu, qui correspond au flux d'infiltration à la base de la zone racinaire, comporte des valeurs théoriques contrastées sous la forme d'un créneau. Le nombre de réservoirs est fixé à 20 et le coefficient de vidange à 0,6 (figure 13).

Au début de la simulation, au mois d'août, les réservoirs constituant la zone non-saturée sont initialisés à une certaine valeur pour le niveau et la concentration. Les réservoirs se vident avec une dynamique contrôlée par le coefficient de vidange. Ensuite, le pic d'infiltration est décalé dans le temps et lissé par rapport au débit d'infiltration à la base de la zone sous-racinaire. On observe un décalage supplémentaire pour la concentration à la base de la zone non-saturée, qui a subi des mélanges successifs complets dans chacun des réservoirs, et qui est soumise à l'effet piston.

4.3. Transport des nitrates dans le réservoir-nappe

On utilise aussi une forme en créneau pour le signal d'entrée qui représente le flux d'alimentation de la nappe.

Au début et à la fin de la simulation, le débit vidangé par la nappe est contrôlé par la partie profonde du réservoir. Le niveau de la nappe est alors inférieur au seuil. Au delà du seuil, l'écoulement lent est prépondérant, la réponse de la nappe à la recharge étant essentiellement contrôlée par le coefficient c_{qq} .

Concernant la concentration en nitrate restituée par le réservoir-nappe, le mélange complet induit une décroissance par dilution, au début de la simulation. Ensuite, la concentration évolue en réponse à la concentration d'entrée en fonction des paramètres c_{qq} , c_q , et du mélange complet (figure 14). Le calage des paramètres permet ainsi de donner une inertie plus ou moins grande à l'aquifère.

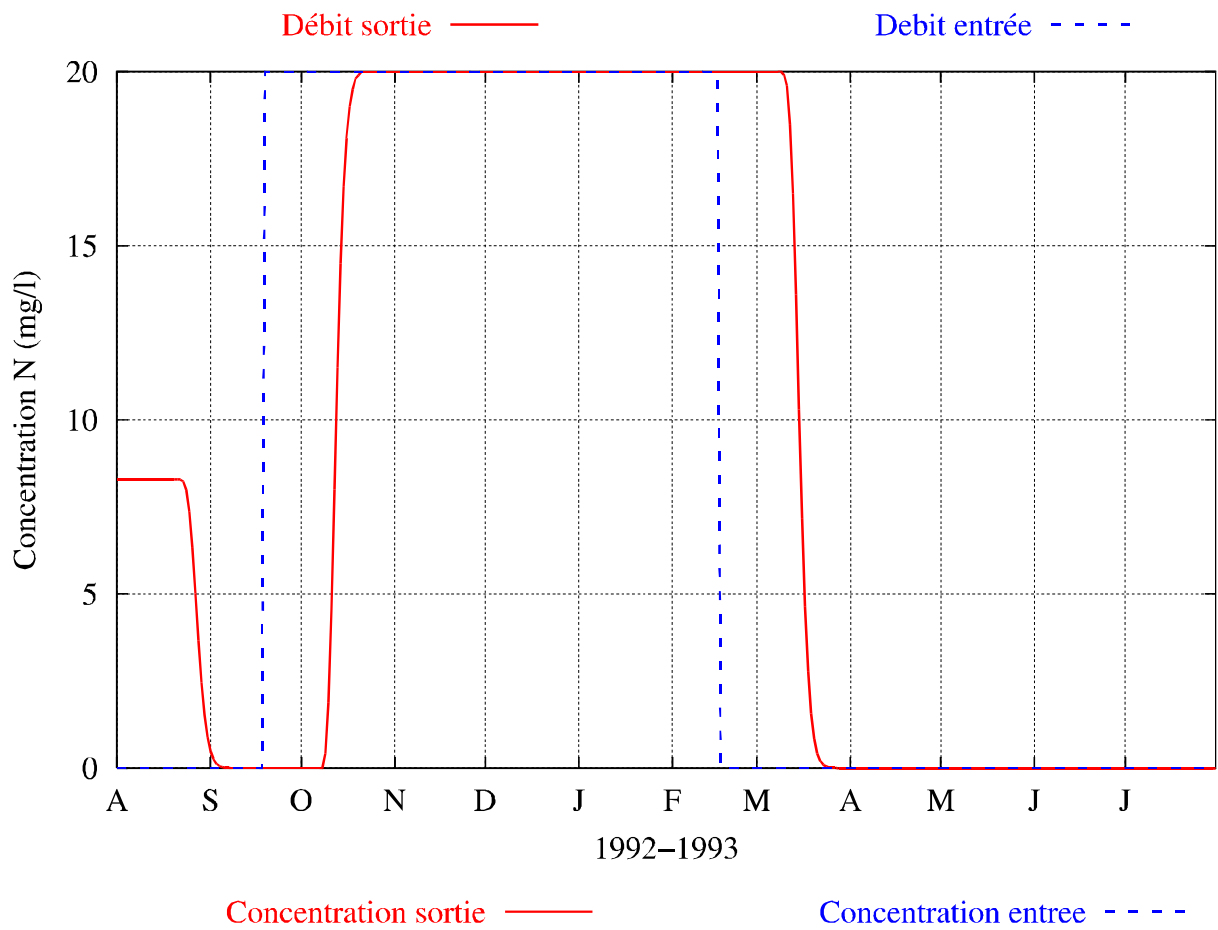
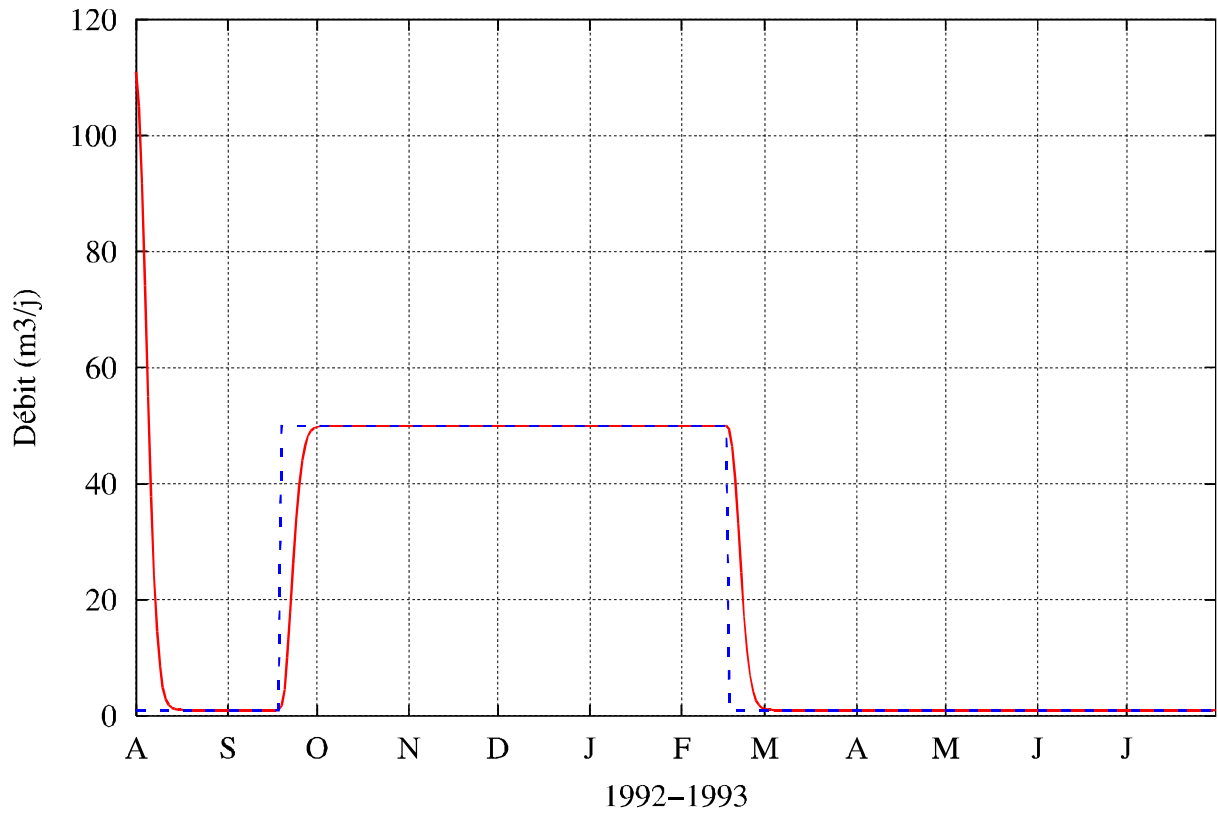
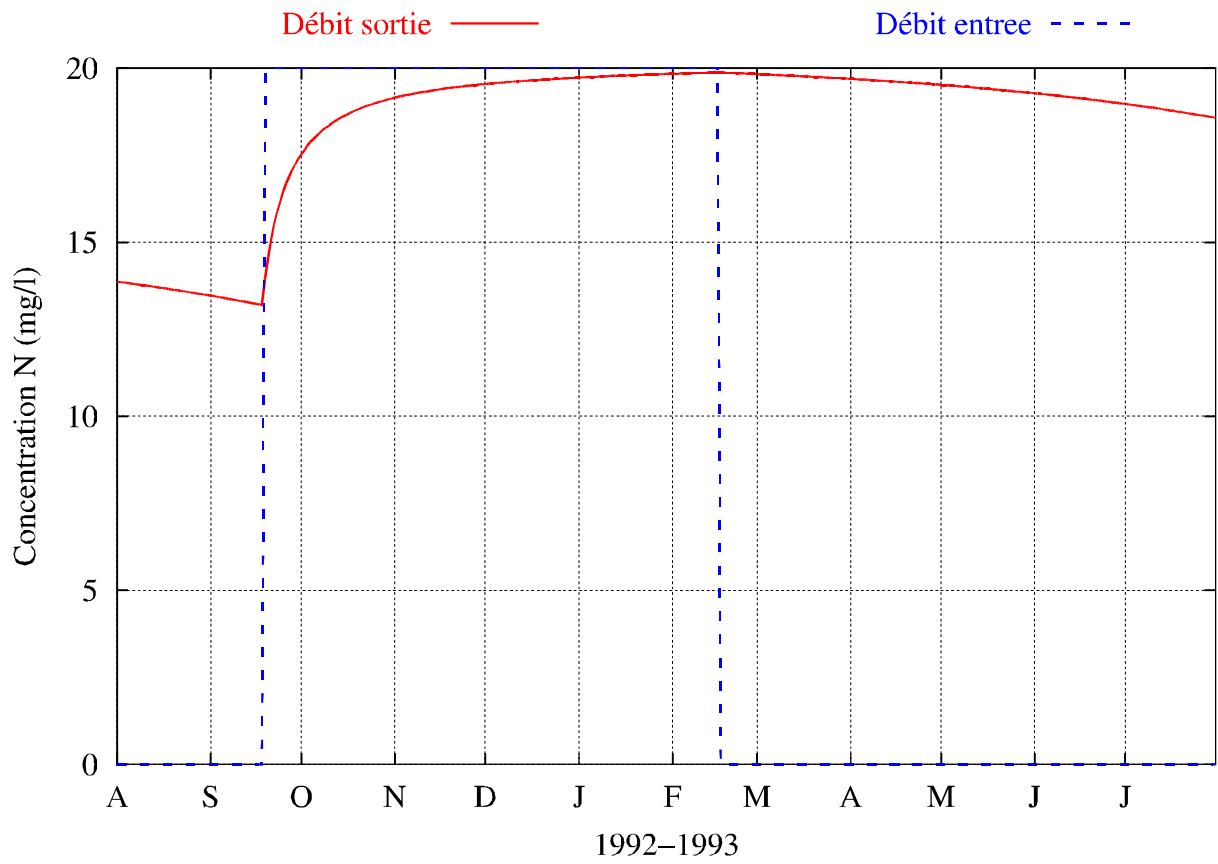
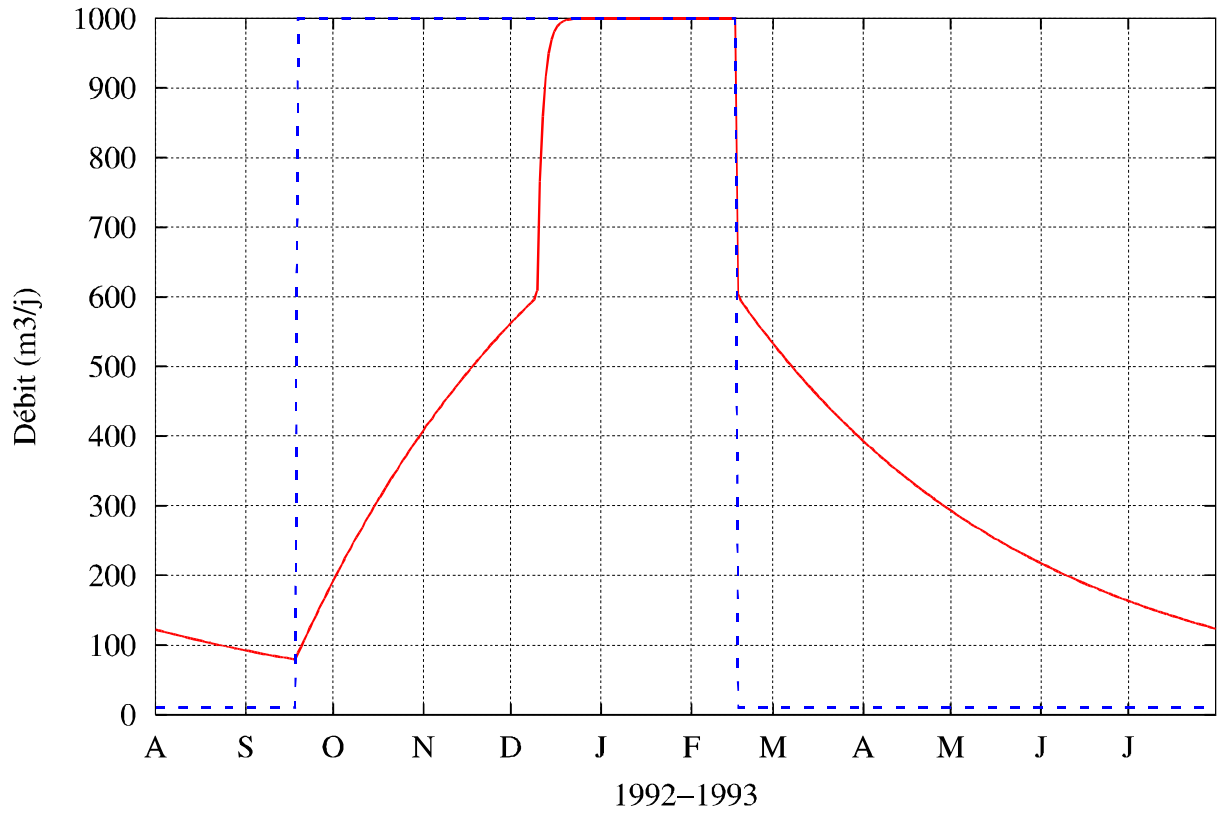


Figure 13 : Simulation du débit à la base de la zone non-saturée (sortie)



Concentration sortie ——— Concentration entree - - - -

Figure 14 : *Simulation du transfert des nitrates dans un réservoir nappe*

5. Conclusions et perspectives

La chaîne de modélisation ainsi établie peut être décomposée de la manière suivante : d'une part, la modélisation des écoulements, et d'autre part, la modélisation du transport des nitrates afin de contrôler séparément chacun des processus.

La modélisation des écoulements doit être correctement simulée pour garantir une modélisation satisfaisante du transfert des nitrates.

La modélisation du transport des nitrates se décompose en plusieurs étapes :

- le modèle agronomique STICS, mis à disposition par l'INRA, a été développé, pour permettre son emploi de manière spatialisée. Le bassin est cartographié en unités de simulation. La base de données associée à ces unités de simulation, qui concerne l'information spatialisée et temporelle pour les types de sols, les successions culturales et les itinéraires techniques, est en cours de constitution sur une période de trente ans,
- les flux de nitrates, simulés avec STICS au cours du temps, et sur chaque unité de simulation, sont distribués sur les quelques 35000 mailles de la couche de surface du modèle hydrologique. Ces flux sont ensuite transférés dans la zone non-saturée grâce au module de transport adjoint au programme NONSAT,
- enfin, les flux de nitrates produits à la base de la zone non-saturée servent d'entrée au modèle de transport en aquifère (NEWSAM). Lorsque l'aquifère n'est pas représenté, ce flux alimente le réservoir-nappe qui se charge du calcul de flux de nitrates dans la nappe.

Les tests sur les outils d'intégration sont satisfaisants. La suite de cette étude portera sur l'application de cette chaîne de modélisation sur le Grand Morin puis sur la Marne avant d'être appliqué sur l'ensemble du bassin, sur une période de trente ans environ, lorsque la base de données sera complète.

6. Références

- Benoit M., Bienaime E., Le Ber F., Mari J.F., Mignolet C., Riela-Cosserat R. (1999). Spatialisation de la dynamique des activités agricoles dans le bassin de la Seine. *Rapport d'activité du Programme PIREN-Seine*, UMR CNRS 7619 Sisyphe Paris Jussieu.
- 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.
- Bornerand C. (2000). Dynamique des pratiques culturales dans le bassin de la Marne depuis les années 70. *Mémoire de fin d'étude DAA*.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M., Ruget F., Nicoullaud 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 parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18,311-346.
- Certes C., Escalier des Orres P., Goblet P., Levassor A., Marivoet J. (1997). Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste : Everest project. *European Commission*.
- Collectif (1996c). *Corine land cover France : un nouvel outil au service de l'environnement et de la gestion de l'espace*. Ministère de l'Environnement.

- Durand Y., Brun E., Merindol G., Guyomarc'H G., Lessafre B., et Martin E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of glaciology* 18, 65-71.
- Garnier J., Billen G. & Coste M. (1995). Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling. *Limno. & Oceanogr.* 40, 750-765.
- Golaz-Cavazzi C. (1995). Exploitation d'un modèle numérique de terrain pour l'aide à la mise en place d'un modèle hydrologique distribué. *DEA UPMC*, 71p.
- Gomez E., Ledoux E. (2000). Modélisation intégrée des écoulements et du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. *Rapport d'activité du Programme PIREN-Seine*, UMR CNRS 7619 Sisyphe Paris Jussieu.
- 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.
- Leblois E. (1993). De l'hydrologie avec le SIG raster Idrisi. Rapport technique, *Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts*, 75p.
- Ledoux E. (1980) ; Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique ; *Thèse ENSMP-UPMC*.
- 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*, pp101-110.
- Mégrien C. (1970). Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. *Editions BRGM*.
- Ponsardin G. (1999). Test et paramétrisation spatialement distribuée de STICS 4.1. *Mémoire de fin d'étude DAA*.
- Schnebelen N. (2000). Analyse et modélisation de l'impact de la maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates. Application à l'aquifère des Calcaires de Beauce (site de Villamblain). *Thèse de doctorat*.
- Wei H.F. (1990). Modélisation tridimensionnelle du transfert d'eau, de chaleur et de masse dans l'aquifère géothermique du Dogger dans le Bassin de Paris. *Thèse ENSMP*.