

Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et le réseau hydrographique du bassin versant du Grand Morin

Nicolas Flipo¹, Stéphanie Even¹, Michel Poulin¹

¹ Centre de Géosciences, Ecole des Mines de Paris.

Michel.Poulin@ensmp.fr

1. Introduction	1
2. CAWAQS : CATCHment WATER Quality Simulator.....	2
3. Synthèse des principaux résultats obtenus	6
4. Bibliographie	8

1. Introduction

Une modélisation des transferts d'azote dans les sols et les aquifères du bassin de la Marne a été réalisée à l'aide des modèles STICS de l'INRA (N. Brisson et al., 1998) et MODCOU (E. Gomez, 2002, 2003). Cette modélisation a été étendue à l'ensemble du bassin de la Seine pour étudier l'impact du changement climatique sur l'hydrosystème (C. Baubion, 2004; Ducharne A. et al., 2004).

M. Sébilo (2003) a étudié la capacité dénitrifiante des zones ripariennes du bassin de la Seine à l'aide d'une approche isotopique. Il a également estimé les pertes d'azote par dénitrification à l'échelle du bassin versant du Grand Morin à partir :

- des concentrations en nitrate infiltré estimées par E. Gomez (2002),
- d'une estimation de la dénitrification benthique à l'aide du logiciel RIVERSTRAHLER,
- d'analyses isotopiques,
- d'une représentation simplifiée des flux d'eau.

Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de N. Flipo (2005) s'inscrivent dans la continuité des travaux de E. Gomez et de M. Sébilo. Nous en présentons ici sommairement la méthodologie et les principaux résultats. Ces travaux sont présentés intégralement en annexe (Flipo N., 2005). L'objectif est d'estimer les flux hydrique et d'azote à l'échelle du bassin versant du Grand Morin afin d'affiner notre compréhension des processus dans les différents compartiments du système, sols, zone non saturée, système aquifère, réseau hydrographique, et aux interfaces, zones humides et fond des cours d'eau.

La méthodologie adoptée a consisté à appliquer l'approche couplée de E. Gomez à un sous bassin de la Marne, le bassin versant du Grand Morin, afin d'estimer l'impact des apports diffus azotés sur la ressource en eau, et en premier lieu sur les aquifères. La surface du bassin versant du Grand Morin, de l'ordre de 1200 km², et la disponibilité de données hydrogéologiques sur les horizons aquifères en relation avec le réseau hydrographique permettent d'aborder le cycle hydrologique et de quantifier les flux de nitrates avec une précision améliorée par rapport à ce qu'il est possible d'obtenir à l'échelle globale du bassin de la Marne ou de la Seine.

Cet ensemble d'études relatives aux compartiments souterrains du bassin versant du Grand Morin a été complété par l'étude du fonctionnement écologique des cours d'eau afin d'estimer le rôle des producteurs primaires et des bactéries du biofilm benthique dans le bilan d'azote global.

Outre le critère de taille, 1200 km² pour le réseau de surface et 2500 km² pour les aquifères, le Grand Morin a été choisi comme site d'étude en raisons des connaissances acquises antérieurement par différentes institutions citées ci-après et par les équipes du PIREN Seine. Ce bassin versant nous est apparu comme un site pilote intéressant pour ce qui concerne l'étude des flux hydrique et de pollutions

diffuses d'origine agricole. En effet, le CEMAGREF a instrumenté depuis plus de 40 ans une partie du bassin de l'Orgeval, affluent représentatif des secteurs de plateau du Grand Morin. Certains sites expérimentaux y sont suivis depuis le début des années 1960. Dans le cadre du projet européen ISMAP (ISMAP, 1997) les concentrations en pesticides et nitrates des cours d'eau du bassin ont été régulièrement suivies de 1988 à 1996. Par ailleurs, la station limnimétrique de Pommeuse est une station de référence de la DIREN pour l'annonce des crues. Enfin, le PIREN Seine a réalisé sur ce bassin versant différentes campagnes d'échantillonnage des eaux de surface concernant l'azote, le phosphore, le carbone, et, plus récemment, le périphyton, les polluants organiques persistants et les métaux. Ce bassin versant constitue, à moyenne échelle, un espace représentatif de l'exploitation agricole du bassin de la Marne. Les zones rurales représentent 73 % de la surface du bassin.

Pour interpréter et faire la synthèse des informations disponibles et quantifier les flux d'azote à l'échelle du bassin, il a été décidé de construire un modèle permettant de représenter à la fois les flux hydriques, déterminants primordiaux de tous les processus, ainsi que les cycles des composants biogéochimiques essentiels de l'hydrosystème : carbone, azote, phosphore, silice.

La construction de l'outil de modélisation aborde plusieurs problématiques scientifiques :

- Représentation des flux hydriques sous leurs différentes formes et dans les différentes composantes du système : pluie, prélèvement par la végétation, évaporation, ruissellement de surface et de subsurface, infiltration, écoulements dans la zone non saturée du sol, dans la zone saturée, et en rivière,
- Modélisation des transferts de matière dans les différentes composantes, souterraines et superficielles, du système, en considérant les transformations chimiques et biologiques pertinentes.

2. CAWAQS : CATCHMENT WATER QUALITY SIMULATOR

La plate-forme de modélisation développée pour le Grand Morin (Flipo N., 2005) s'appelle CAWAQS (CATCHMENT WATER QUALITY SIMULATOR). Cet ensemble de logiciels est décrit de manière détaillée en annexe. Nous n'en donnerons ici que les principes généraux essentiellement à l'aide de figures et de schémas.

Le modèle CAWAQS fait le lien entre les différents concepts et outils utilisés par le PIREN Seine. Il s'appuie sur un découpage de l'espace en objets homogènes, bassins versants élémentaires raccordés aux tronçons de rivière, et fait dialoguer plusieurs modèles entre eux (Figure 1).

Le modèle STICS (Figure 2) simule les flux d'azote à la base de la zone racinaire des principales productions végétales des régions de grandes cultures. Les modèles NEWSAM et ProSe (Figure 3) assurent le transfert de ces flux dans les eaux de surface et souterraines.

Deux regroupements de niveaux aquifères ont été considérés : un ensemble supérieur ou Oligocène et un ensemble plus profond ou Eocène (Figure 4). La plate-forme de modélisation simulant le transfert de l'azote du sol vers l'ensemble du réseau hydrographique via le milieu saturé s'applique sur un domaine de 2700 km², le bassin versant du Grand Morin (1200 km²) étant étendu pour ce qui concerne les horizons géologiques jusqu'aux limites appropriées.

CAWAQS permet de simuler les échanges nappes rivières y compris au niveau des têtes de bassin. Le fait de simuler explicitement les cours d'eau amont à faible hauteur d'eau et très pentus a nécessité d'adapter le module hydrodynamique de ProSe. Une représentation simplifiée des ordres de Strahler inférieurs à 2 a été implantée dans le logiciel (Figure 5). Le comportement hydraulique des cours d'eau d'ordres 1 et 2 est simulé à l'aide de la formulation simplifiée de Manning. Les ordres supérieurs sont simulés en résolvant les équations de Saint-Venant.

Par ailleurs, le modèle mis en place par E. Gomez (2002) ne représentait explicitement les cours d'eau que pour un bassin contributif d'une surface minimale de 250 km². Afin de remonter jusqu'aux bassins versants des cours d'eau d'ordre 1 de Strahler il a fallu redéfinir les limites des différentes couches modélisées (Oligocène, Eocène). A cet effet, un mailleur automatique pour NEWSAM, Av-Xmaille (Théry, 2004), a été développé, ainsi que le programme GIS2WAQS qui

permet de transcrire aux formats d'entrée de CAWAQS l'information spatiale élaborée sous SIG. Une fois construit, le modèle du Grand Morin a été calé et validé, aussi bien du point de vue hydrologique que de celui du transport.

Les données dont nous disposons concernant les concentrations de nitrate dans les aquifères présentent une forte variabilité spatiale. De plus certaines parties du bassin sont largement sous échantillonnées. Afin d'appréhender au mieux le transfert des nitrates dans le domaine souterrain, une approche conjointe alliant géostatistique et modélisation déterministe a été développée. Nous avons eu recours au krigeage, technique géostatistique qui permet de modéliser le comportement d'une variable aléatoire régionalisée. Le krigeage a permis d'interpréter les données dont nous disposons en fournissant une cartographie, sur l'ensemble du domaine, des teneurs en nitrates les plus probables associées à leur intervalle de confiance. Les estimations par krigeage ont servi en premier lieu à initialiser les concentrations du domaine souterrain, et par la suite à confronter les résultats de CAWAQS avec les données de calage et de validation. Cette approche a également permis de caler la porosité du domaine souterrain afin que CAWAQS représente des teneurs en nitrates réalistes dans les aquifères.

CAWAQS permet de simuler le transport des nitrates en rivière, ainsi que les transformations biogéochimiques. Dans les cours d'eau à faible profondeur, la qualité de l'eau en rivière est fortement contrainte par les processus benthiques. Sur la base de campagnes de terrain (N. Flipo, 2001), un modèle de comportement du périphyton a été développé. Ce modèle a été implanté dans ProSe. Simultanément aux campagnes d'échantillonnage du périphyton, des campagnes de caractérisation de la colonne d'eau ont été menées par le CEMAGREF.

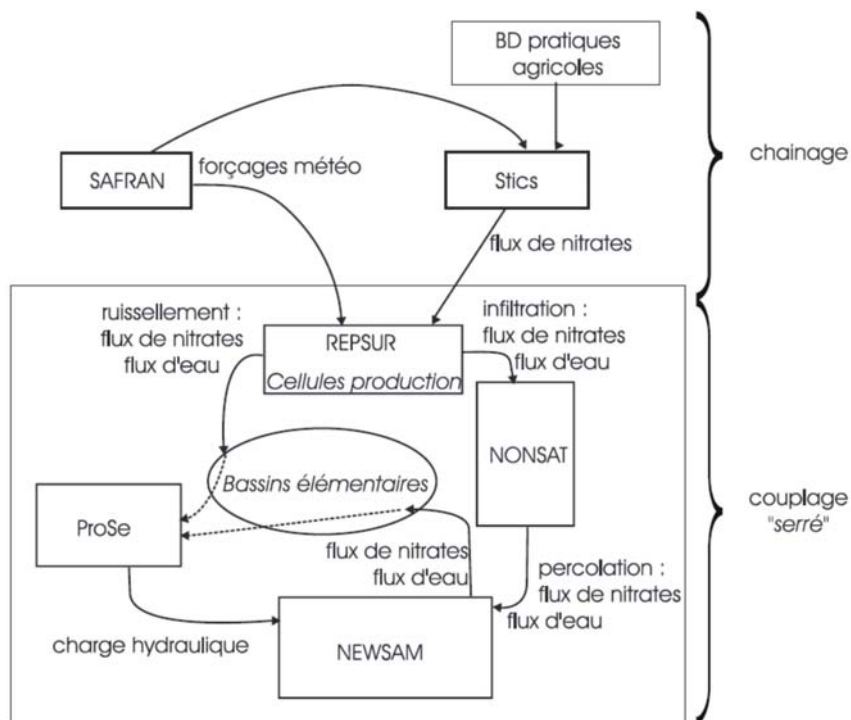


Figure 1 : Représentation simplifiée de CAWAQS

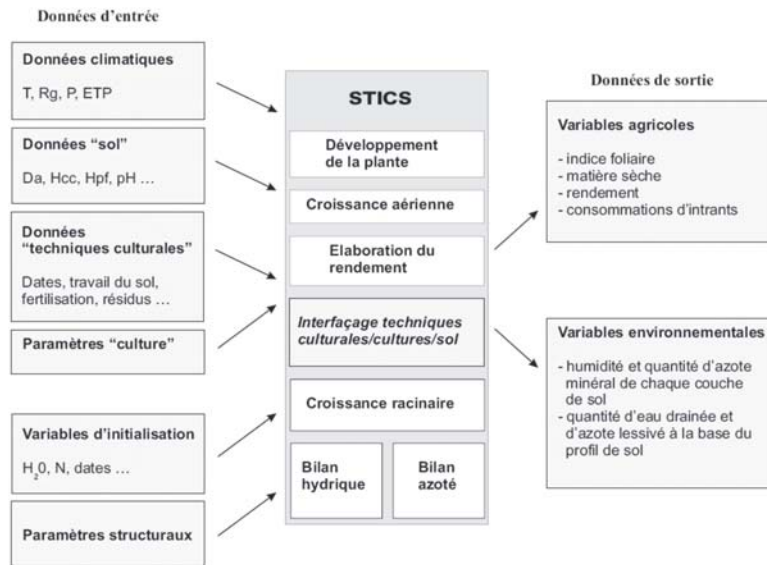


Figure 2 : Organisation générale du modèle agronomique STICS (Gomez E., 2002)

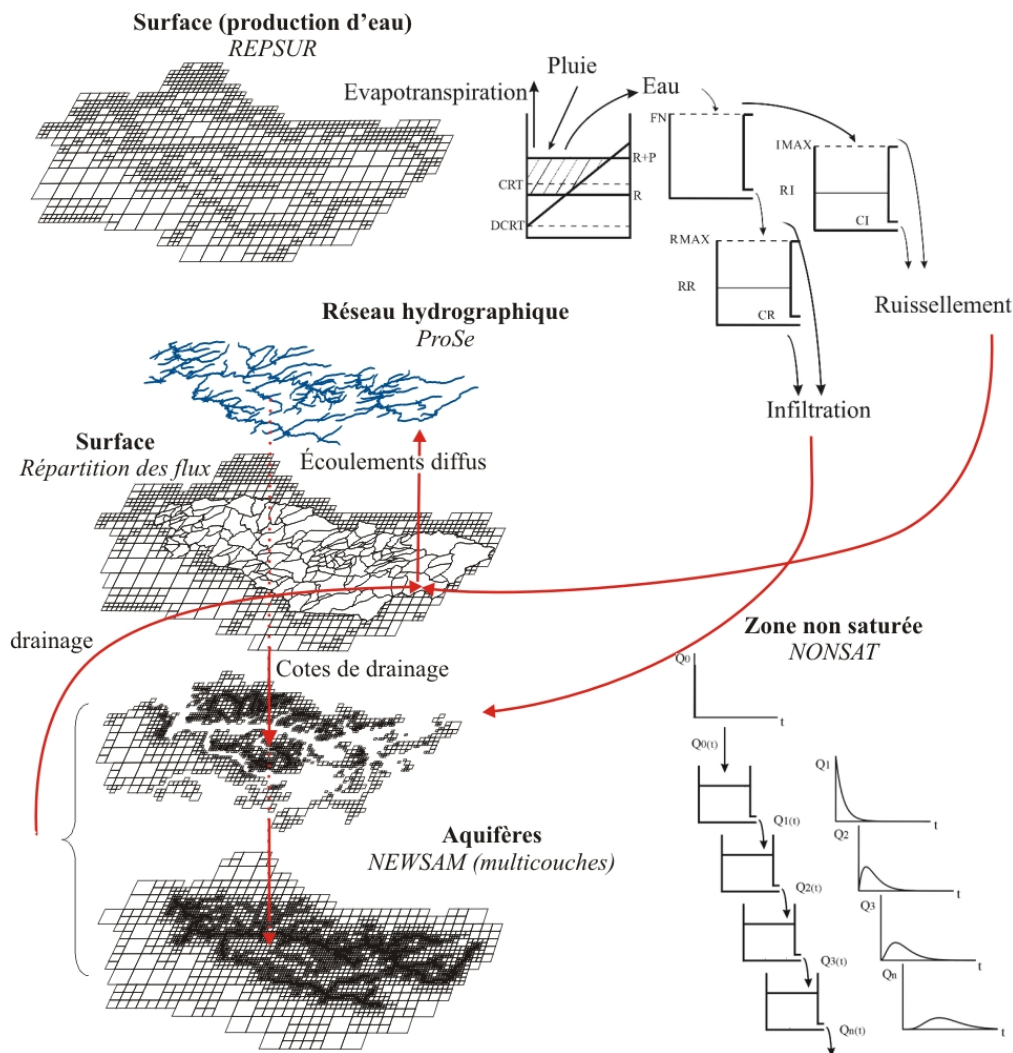


Figure 3 : Structure hydrologique de CAWAQS

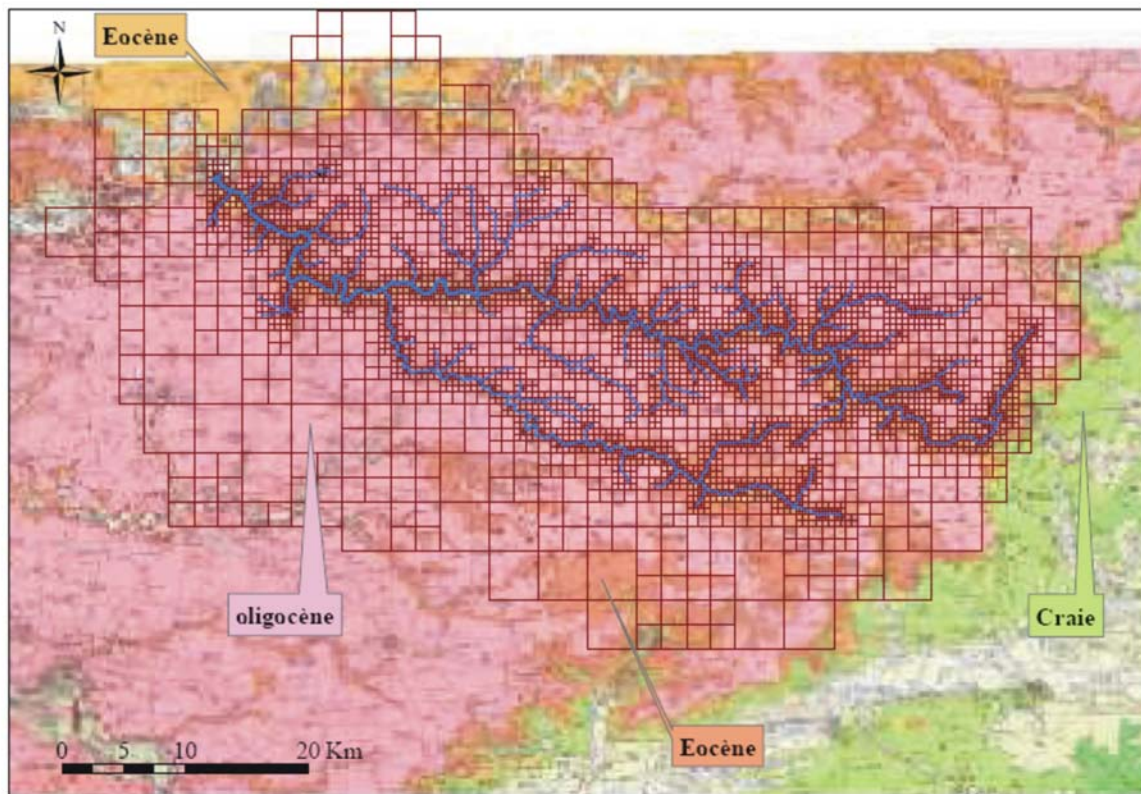
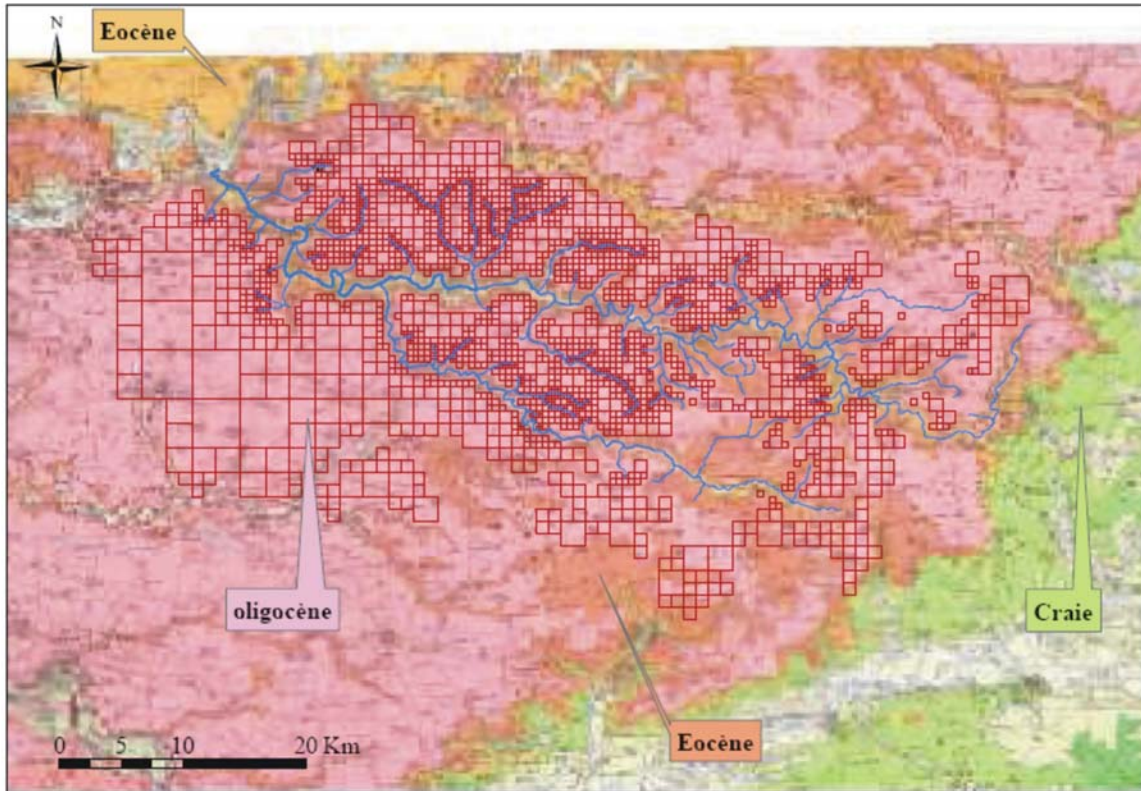


Figure 4 : Découpage spatial des aquifères Oligocène et Eocène

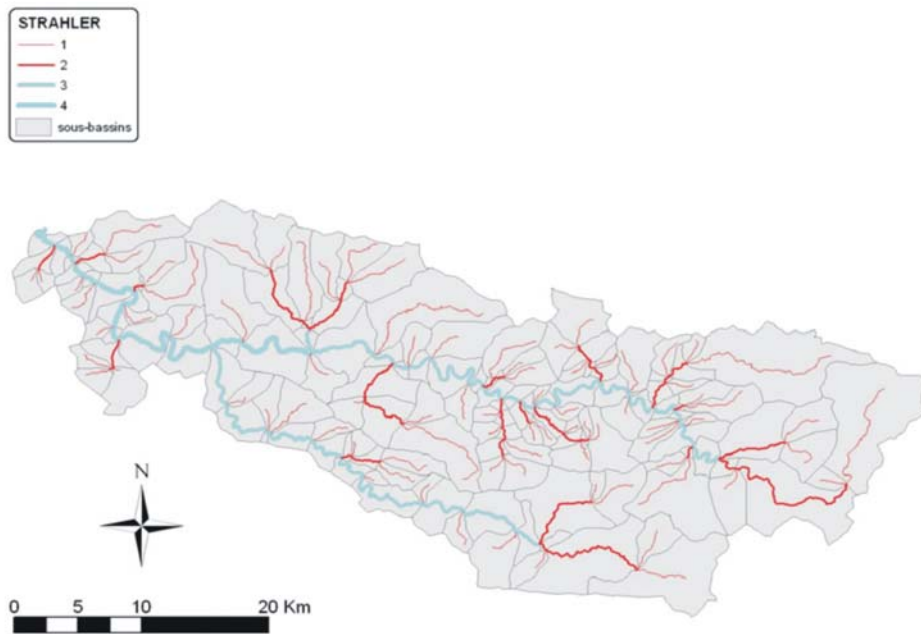


Figure 5 : Modélisation du réseau hydrographique du Grand Morin

3. Synthèse des principaux résultats obtenus

L'ensemble de ces développements a permis de simuler le fonctionnement hydrologique du Grand Morin sur la période 1971-2001. Le transfert des nitrates a été étudié sur la période 1977-1996.

Le tableau 1 récapitule l'ensemble des simulations effectuées :

Tableau 1: Tableau synoptique des simulations réalisées sur le Grand Morin: Périodes des simulations STICS : 1^{er} Janvier au 31 Décembre; Périodes des simulations hydrologiques et de transfert de nitrates en aquifères et rivières : 1^{er} Août au 31 Juillet; Biogéochimie en rivière : du 1^{er} Mai au 1^{er} Septembre 2001

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Flux d'azote (STICS)																															
Hydrologie (calage)																															
Hydrologie (validation)																															
Hydrologie (bilans)																															
Transfert d'azote en aquifère (calage)																															
Transfert d'azote en aquifère (bilans)																															
Transfert d'azote en rivière																															
Biogéochimie en rivière																															

Une synthèse des résultats est présentée dans le tableau 2.

Après calage et validation du modèle hydrologique, le comportement des aquifères a été étudié sur la période 1971-2001. Les simulations indiquent que la contribution de chaque aquifère aux débits de base des rivières n'est pas proportionnelle à la surface de son impluvium propre. Ainsi l'Oligocène contribue en moyenne à 25 % des débits des rivières et l'Eocène à 75 %. Le débit moyen du Grand Morin à son exutoire est de 8 m³.s⁻¹.

Le bassin versant du Grand Morin est caractérisé par un flux élevé d'infiltration des excédents de nitrates provenant des zones cultivées (4332 tN.an⁻¹), soit 3466 kgN.km⁻².an⁻¹. Il en résulte un fort enrichissement des aquifères, en moyenne de 0.09 mgN.L⁻¹.an⁻¹ (~ 0.4 mgNO₃.L⁻¹.an⁻¹). Cependant les volumes des formations géologiques sont très différents. On retiendra donc plutôt une augmentation de l'ordre de 0.21 mgN.L⁻¹.an⁻¹ (soit 0.92 mgNO₃.L⁻¹.an⁻¹) pour les eaux superficielles de l'Oligocène. Cette augmentation est très rapide. Par contre, dans la partie ouest du bassin, du fait de l'épaisseur de

l'Eocène (100 m), les accroissements des concentrations en nitrates sont plus lents. Cependant, même dans ce secteur, les teneurs en nitrates de l'Eocène étaient supérieures à $4.5 \text{ mgN.L}^{-1}.\text{an}^{-1}$ ($20 \text{ mgNO}_3.\text{L}^{-1}.\text{an}^{-1}$) en 1996.

En plus de la caractérisation de l'état de la contamination en nitrate des aquifères, des flux de dénitrification ont été estimés. En extrapolant à une année complète les résultats obtenus sur les 40 kilomètres aval du Grand Morin durant l'été 2001, on peut estimer un flux potentiel de 140 tN.an^{-1} d'ammonium dénitrifiés dans les compartiments benthiques par le processus de nitrification-dénitrification. Pour les 40 derniers kilomètres du Grand Morin, les résultats des simulations réalisées avec ProSe, relatifs aux concentrations en ammonium et en nitrates en rivière, comparés aux observations, semblent montrer une forte activité de dénitrification par nitrification-dénitrification dans le biofilm. De jour la dénitrification dans le biofilm, par diffusion de la colonne d'eau vers le biofilm, semble négligeable. Par contre, il est probable qu'une activité de dénitrification ait lieu dans le biofilm benthique durant la nuit du fait de l'anoxie observée dans les sédiments et de la respiration dans le biofilm. Cependant la plus grande partie de la dénitrification a probablement lieu à la traversée des interfaces riches en matière organique et anoxiques et en particulier dans les zones de drainage des aquifères par les cours d'eau. Des campagnes de terrain et des expériences menées en laboratoire devraient permettre de confirmer et quantifier ces processus benthiques.

Finalement, les simulations réalisées avec CAWAQS ont permis d'estimer, sur la période 1991-1996, un flux de dénitrification des apports diffus de 800 tN.an^{-1} , soit environ 20 % du flux d'azote issu de la zone racinaire. Sur les 4000 tN.an^{-1} issues de la zone racinaire, les résultats de simulations indiquent que 39 % sont stockés dans les aquifères et 41 % sont exportés par les rivières.

Tableau 2 : Synthèse des résultats relatifs au bassin versant du Grand Morin

	Quantification	Caractéristiques
Surface totale	1202 km ²	
Impluvium Oligocène	427 km ²	36 % de la surface
Impluvium Eocène	775 km ²	64 % de la surface
Epaisseur moyenne Oligocène	8 m	
Epaisseur Eocène	15 à 100 m	d'est en ouest
Epaisseur non saturée	~15 m	période 1971-2001
Forêts	18 %	de la surface totale
Zones urbaines	2 %	de la surface totale
Terres arables	80 %	dont 81.25 % de SAU
Pluie	700 mm	période 1971-2001
ETR	477 mm	période 1971-2001
Infiltration	197 mm	période 1971-2001
Infiltration Oligocène	85 mm	période 1971-2001
Infiltration Eocène	113 mm	période 1971-2001
Ruissellement	22 mm	période 1971-2001
Débordement de nappes	38 mm	période 1971-2001
Débit à l'exutoire	$8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	période 1971-2001
Temps de vidange zone non saturée	max ~ 300 j	période 1971-2001
Flux racinaire STICS	4332 tN.an^{-1}	période 1971-1999
Flux ruissellé	678 tN.an^{-1}	période 1977-1996
Flux infiltré Oligocène	1450 tN.an^{-1}	période 1977-1996
Flux infiltré Eocène	2194 tN.an^{-1}	période 1977-1996
Concentration infiltrée Oligocène	13.6 mgN.L^{-1}	période 1977-1996
Concentration infiltrée Eocène	17.2 mgN.L^{-1}	période 1977-1996
Concentration drainée* Oligocène	11 mgN.L^{-1}	période 1977-1996
Concentration drainée* Eocène	8.9 mgN.L^{-1}	période 1977-1996
ΔC Oligocène	$0.21 \text{ mgN.L}^{-1}.\text{an}^{-1}$	période 1977-1996
ΔC Eocène	$0.085 \text{ mgN.L}^{-1}.\text{an}^{-1}$	période 1977-1996
ΔC moyen	$0.09 \text{ mgN.L}^{-1}.\text{an}^{-1}$	période 1977-1996
Flux passif exutoire	2616 tN.an^{-1}	période 1977-1996
Flux observé exutoire	1670 tN.an^{-1}	période 1991-1996
Flux dénitrification totale†	940 tN.an^{-1}	période 1991-1996
Flux nitrification-dénitrification	84 tN.an^{-1}	mai 2001 - septembre 2001

* Concentration des eaux d'alimentation des cours d'eau
† 800 tN.an^{-1} pour le flux de nitrates diffus, et 140 tN.an^{-1} par nitrification-dénitrification estimés à partir des campagnes de terrain de l'année 2001.

4. Bibliographie

- Baubion C. (2004). Impact du changement climatique sur le bassin de la Seine. *Rapport de Master*. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 76 p.
- 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., Tatot 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.
- Ducharne A., Théry S., Billen G., Beaudoin N., Benoit M., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Mermet L., Poux, X., Sauboua E., Schott C., Viennot P., Alkhair A., Baubion C., Curie F., Ducos G., Gomez E., Lebonvallet S., Olive G., Sicart P.E. (2004). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et climatique du bassin de la Seine. *Rapport du projet GICC*.
- Flipo N. (2001). Site atelier du Grand Morin : modélisation biogéochimique et étude d'un compartiment benthique. *Rapport de master*. DEA HHGG. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Flipo N. (2005). Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : application au bassin du Grand Morin. *Rapport de thèse*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Gomez E. (2002). Modélisation du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. *Rapport de thèse*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Gomez E., Ledoux E., Viennot P., Mignolet C., Benoit M., Bornerand C., Schott C., Mary B., Billen G., Ducharne A., Brunstein D. (2003). Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique : Application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche*, **3-2003**:38-45.
- ISMAP. (1997). Synthèse des travaux des partenaires français. *Rapport final*. Projet EUREKA EU 479.
- Théry S., Flipo N. (2004). Av-Xmaille2, mailleur pour NEWSAM.
- Sébilo M. (2003). Utilisation du traçage isotopique naturel pour caractériser et quantifier les processus de nitrification et de dénitrification à l'échelle du réseau hydrographique de la Seine. *Rapport de thèse*. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.