

# Bilan des transferts d'azote dans le bassin de la Seine: l'approche du modèle SENEQUE

Gilles Billen & Josette Garnier (UMR Sisyphe, Paris)

André Mariotti (UMR 162 Biogéochimie Isotopique, Paris)

Parallèlement à la démarche de modélisation entièrement déterministe du cycle de l'eau et de l'azote dans les sols, les aquifères et les eaux de surface, qui fait l'objet des travaux du thème 1 du PIREN-Seine, et en attendant son aboutissement, les perfectionnements récemment apportés au modèle SENEQUE permettent déjà d'offrir une vision générale du bilan d'azote dans le réseau hydrographique de la Seine, permettant notamment de raisonner, à l'échelle du bassin, une politique de maîtrise de la contamination nitrique des eaux de surface. Nous faisons ici le point sur ces acquis et proposons une première quantification du rôle de rétention des nitrates qu'exercent les zones humides riveraines.

## 1 Le modèle SENEQUE

### 1.1 Principes généraux

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 des variations géographiques et saisonnières (avec une résolution décadaire) du débit, de la qualité de l'eau et du fonctionnement écologique du réseau hydrographique de la Seine, y compris ses annexes hydrauliques, en fonction des contraintes constituées 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.

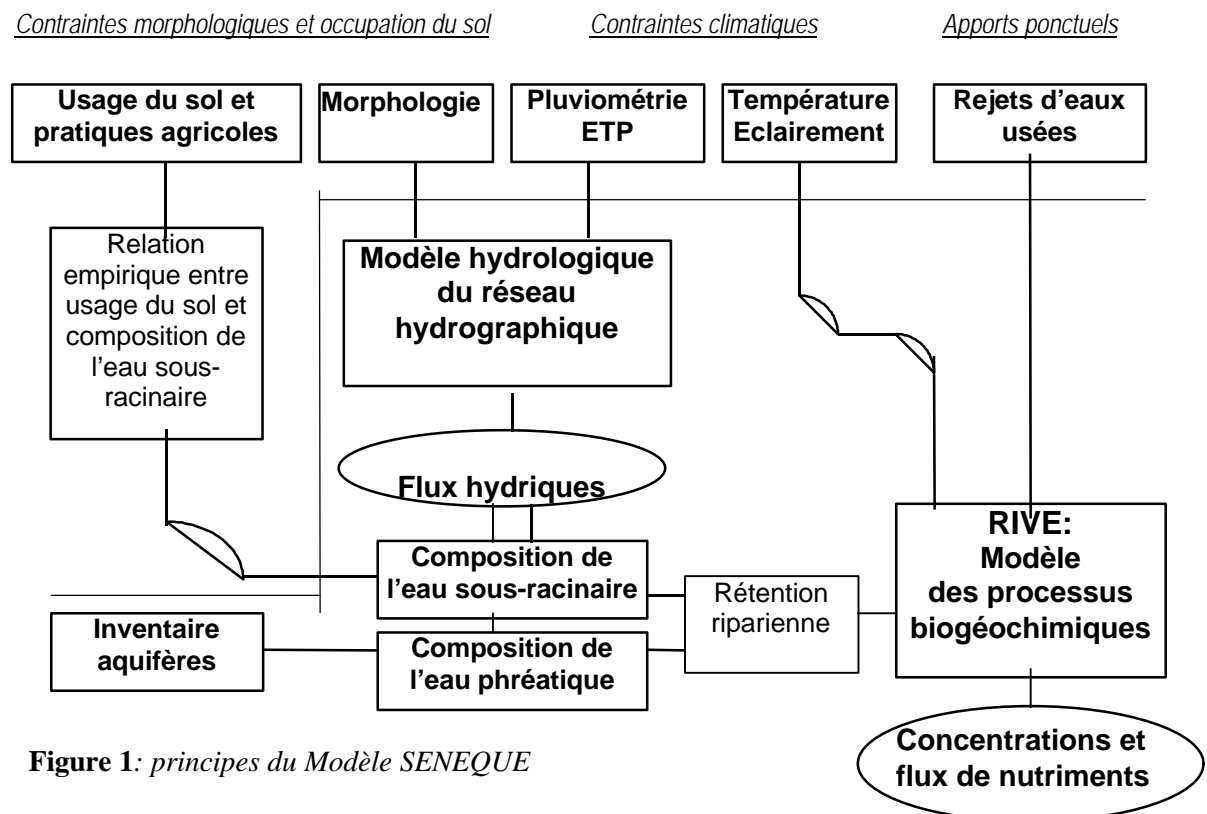


Figure 1: principes du Modèle SENEQUE

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 la complexité du chevelu hydrographique est remplacée par un schéma régulier de confluence de tributaires d'ordre croissant, aux caractéristiques moyennes.

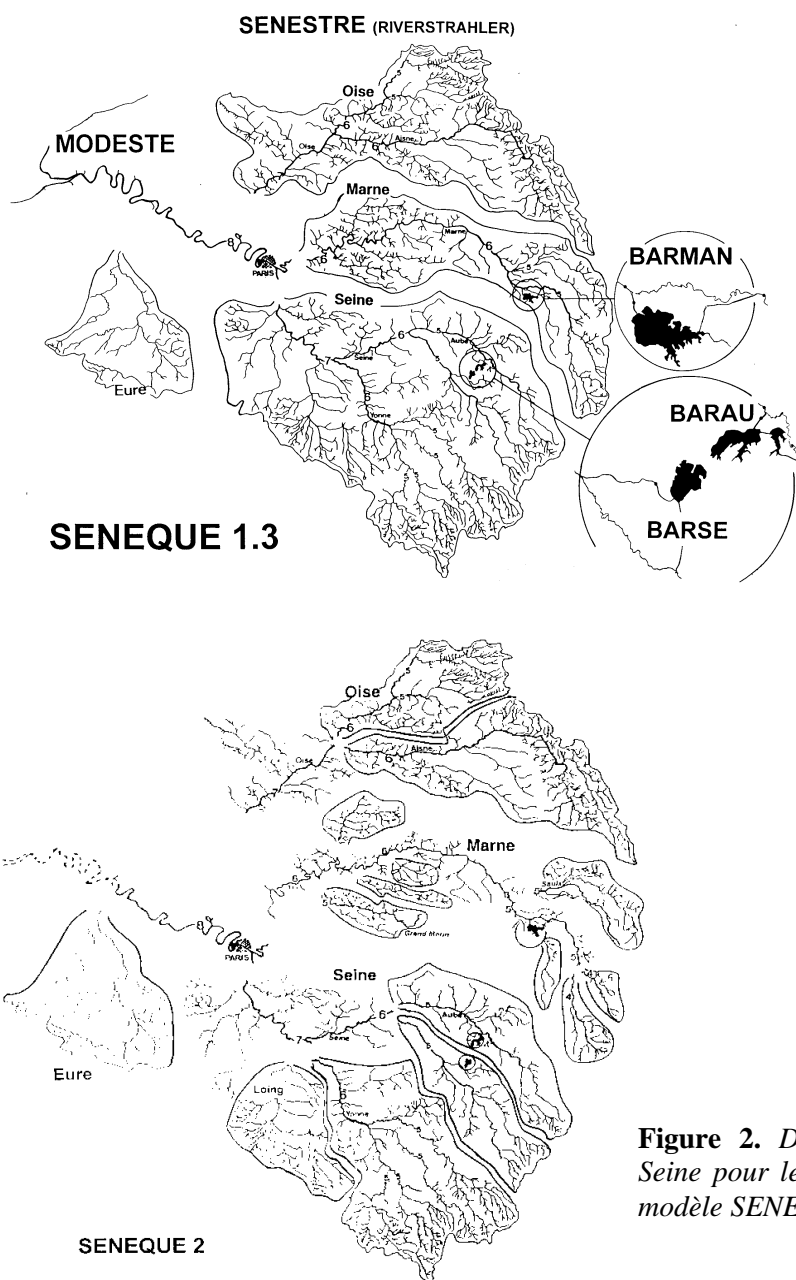
- \* un ou plusieurs axes fluviaux (ou branches), recevant les exutoires des sous-bassins, et représenté d'une manière plus fine, permettant la description de profils en long avec une résolution de l'ordre du km.

- \* des étangs répartis statistiquement dans le réseau hydrographique des sous-bassins

- \* des grands réservoirs en connexion, pour lesquelles on tient compte d'une morphologie précise et des valeurs réelles journalières des débits dérivés et restitués.

Deux versions de SENEQUE ont été utilisées dans le présent travail. La version SENEQUE 1.3 distingue 4 grands sous-bassins (Seine amont, Marne, Oise et Eure) et l'axe principal de la Seine depuis la confluence Marne. SENEQUE 2.0 envisage un découpage en 15 sous-bassins et 5 branches (Fig. 2).

Les deux versions de SENEQUE résultent du couplage d'un modèle détaillé de la cinétique des processus microbiologiques qui sont à la base du fonctionnement écologique de l'hydrosystème (RIVE), avec un modèle hydrologique (HYDROSTRAHLER), qui, en ce qui concerne les sous-bassins, calcule les composantes superficielles (ruissellement et écoulement de sub-surface) et phréatique (débit de base) du débit de chaque ordre, à partir des variations saisonnières de la pluviométrie et de l'évapotranspiration.



**Figure 2.** Découpage du bassin de la Seine pour les deux versions utilisées du modèle SENEQUE.

## 1.2 Apports ponctuels

Les données relatives aux apports ponctuels d'eau usées par les ouvrages d'assainissement et les industriels ont été fournies par l'AESN, pour les années 1991 et 1996. Ces apports sont répartis par ordre hydrologique pour les sous-bassins, tandis qu'ils sont pris en compte individuellement à leur position kilométrique exacte dans les branches.

## 1.3 Apports diffus : conditions limites

Dans la démarche RIVERSTRAHLER, les apports diffus représentent la condition limite amont du modèle: la composition des deux composantes (superficielle et phréatique) du débit en provenance du bassin versant doit être connue pour chaque sous-bassin. Dans les versions précédentes du modèle, cette composition était établie à partir d'un inventaire des concentrations mesurées dans les petits ruisseaux de têtes de bassin, c'est à dire "en aval" des zones riveraines. Cette approche a été

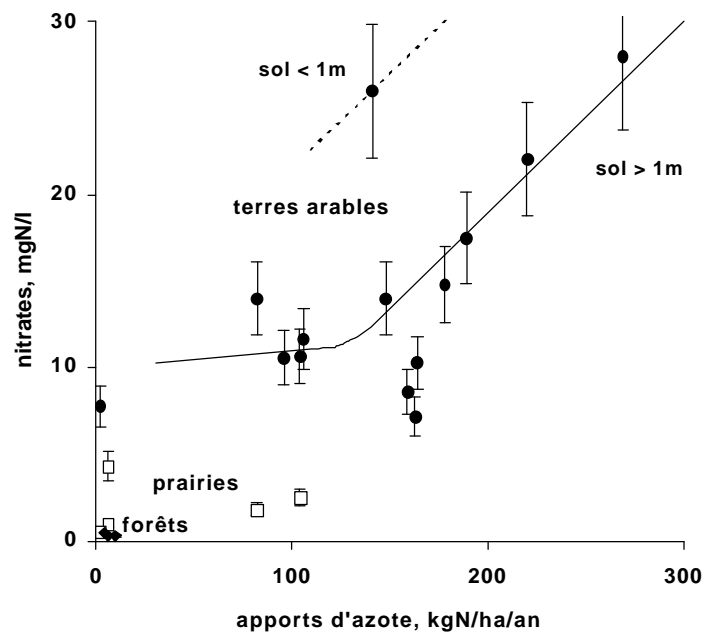
remplacée par une analyse des données expérimentales disponibles renseignant sur la composition de l'eau en dessous de la zone racinaire du sol, collectées à l'aide de dispositifs lysimétriques ou de bougies poreuses, sous des sols soumis à diverses pratiques agricoles ou couvertures végétales. La figure 3 synthétise les données de ce type disponibles sur le bassin de la Seine. Elles permettent de calculer, par la formule approximative suivante, la teneur moyenne en nitrates de l'eau après passage dans la zone racinaire, en fonction de l'usage du sol:

(1)  $\text{NO}_3\text{s}$  (mgN/l) =

$$\begin{aligned} & \% \text{forêt} * 0.4 \text{ mgN/l} \\ & + \% \text{prairie} * 3 \text{ mgN/l} \\ & + \% \text{arable} * (15 \text{ mgN/l} + 0.01 \text{ mgN/l} \cdot (\text{kgN/ha/yr})^{-1} * \text{fert} + 0.1 \text{ mgN/l} \cdot (\text{kgN/ha/yr})^{-1} * (\text{fert} - 130) \text{ (fert} > 130)) \end{aligned}$$

où fert représente la fertilisation azotée annuelle des terres arables (kgN/ha/yr), et où l'expression (fert > 130) vaut zero si fert < 130 et 1 si fert > 130

**Figure 3.** Effet des apports externes d'azote (engrais et retombées atmosphériques) sur la teneur moyenne en nitrates des eaux de drainage de sols agricoles et forestier du bassin de la Seine. (références: Ballif et al., 1995; Boniface et al., 1996; Benoît et al., 1995; Mariotti, 1982; Muxart et al., 1997)



A cause de l'inertie de leur réponse aux pollution diffuse, la composition des aquifères ne reflète pas nécessairement l'usage actuel du sol de leur zone d'alimentation. La concentration moyenne des eaux souterraines, qui constituent le débit de base des cours d'eau, ne peut donc être calculée par la formule (1), mais doit être déterminée empiriquement à partir des analyses disponibles de la qualité effective des principaux aquifères du bassin. En ce qui concerne le bassin de l'Yonne, Fritz (1994) a pu rassembler les données disponibles au BRGM pour les périodes 1975-1979 et 1985-1989, et proposer des valeurs moyennes de la teneur en nitrates de l'eau des principaux aquifères. Ces données ont été utilisées pour le bassin de la Seine amont. Pour les autres bassins, nous nous sommes basés sur les données cartographiques relatives à la période 1979-1981, publiées par l'AESN (1987) pour les bassins de la Marne, de l'Oise et de la Seine Aval. Les résultats sont fournis au tableau 1. Les données disponibles sur le long terme montrent une augmentation régulière des teneurs en nitrates des aquifères, particulièrement des plus contaminés d'entre eux, pour lesquels il n'est pas rare de relever un accroissement de l'ordre de 1 mgN/l en 10 ans. Ces variations ont été prises en compte dans la définition des conditions aux limites pour les eaux souterraines dans le modèle SENEQUE. Un dépouillement rigoureux de l'ensemble des données de qualité des eaux souterraines reste encore à réaliser.

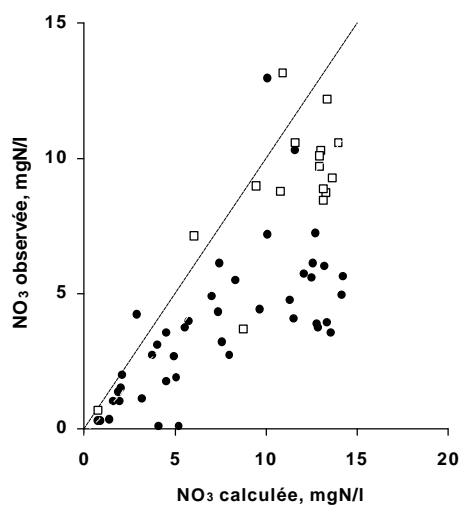
**Tableau 1:** *Superficie relative occupée dans le bassin des grands affluents de la Seine par les principaux aquifères, et teneur moyenne en nitrates (voir texte pour les sources).*

	Seine amont		Marne		Oise		Eure	
	%	mgN/l	%	mgN/l	%	mgN/l	%	mgN/l
	1985-89		1980		1980		1980	
Alluvions	10.0	5.0	12.3	3.0	10.8	5.0	5.5	5.0
Miocène/Oligocène	19.6	7.0	10.4	5.0	0.4		15.0	7.0
Eocene	3.9	11.3	10.7	9.0	0.7		0.6	9.0
Eocène/Paleocène	4.5	13.0	16.7	8.5	29.6	8.5	3.2	10.0
Crétacé sup.	18.9	6.4	14.4	4.7	44.3	6.0	64.7	6.8
Crétacé sup.	0.0		0.0		0.0		11.0	1.8
Crétacé inf.	7.5	5.0	5.7	3.0	5.0	5.5		
Jurassique sup. & moy.	22.5	10.0	22.7	2.0	5.8	3.3	0.0	
Jurassique sup. & moy.	2.3	5.9	4.4	5.0	1.9	3.3		
Jurassique inf.	5.3	5.5	2.6	3.0	0.1			
socle	5.4	1.8	0.0		1.5	1.8		
<b>teneur moyenne, mgN/l</b>	<b>6.7</b>		<b>4.8</b>		<b>6.3</b>		<b>5.9</b>	

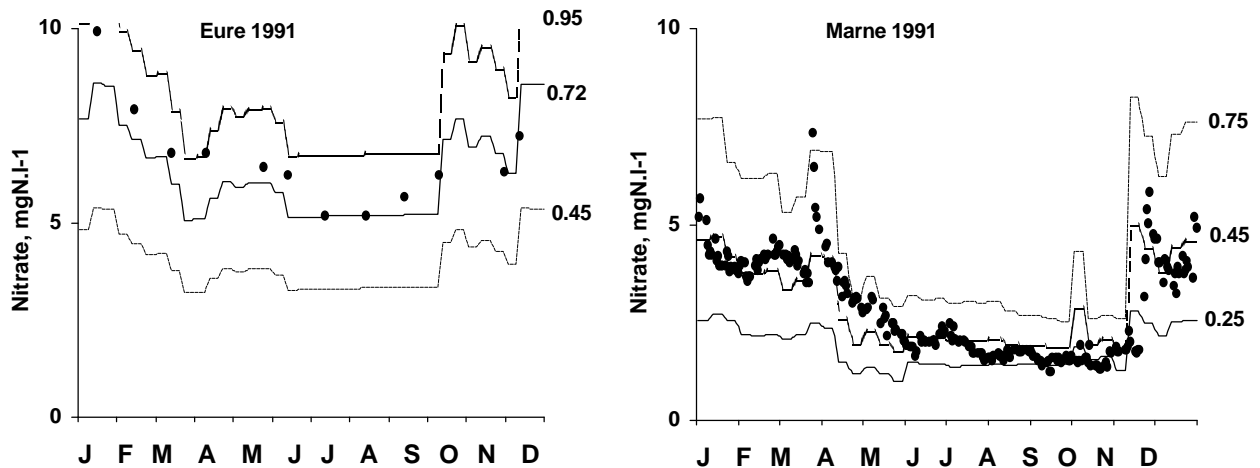
#### 1.4 Rétection riparienne

Le calcul de la concentration en nitrates de petits cours d'eau à partir de l'occupation des sols de leur bassin versant et de la composition moyenne des aquifères qui les alimentent sous estime largement les teneurs effectivement mesurées dans l'eau de ces cours d'eau. (Fig. 4). Elles ne s'en rapprochent que dans le cas de bassins versants agricoles équipés d'un réseau de drainage. On peut donc penser que cette différence résulte des processus de rétention ou d'élimination qui se déroulent dans les milieux qui bordent les rivières, avant que l'eau de la zone sous-racinaire du sol et des aquifères n'en atteigne le cours.

**Figure 4.** *Comparaison des teneurs moyennes en nitrates observées dans une série de petits cours d'eau d'ordre 1 et 2 du bassin de la Seine avec les teneurs dans l'eau de la zone sous-racinaire calculée à partir de l'usage du sol dans le bassin versant. Les carrés blancs correspondent à des bassins versants dont plus de 15% de la surface agricole est drainée. (d'après les données de Thibert (1996), Biger et al. (1997) et Cosson (1996)).*

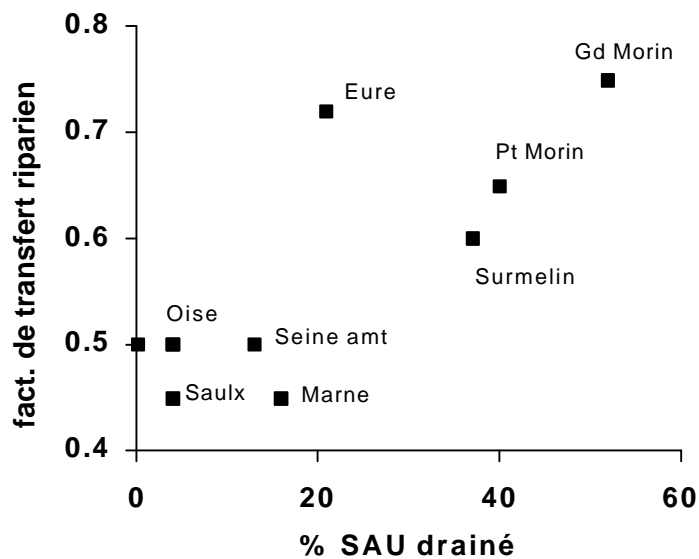


Pour cette raison, le modèle SENEQUE intercale un coefficient de transfert des nitrates à travers les zones ripariennes. La valeur de ce coefficient est déterminée pour chaque sous-bassin par ajustement sur les observations de concentrations en nitrates disponibles à l'exutoire. La figure 5 illustre cette procédure sur le cas de la Marne et de l'Eure.



**Figure 5.** Ajustement du coefficient de transfert riparien dans le modèle SENEQUE 1.3 pour la simulation des variations saisonnières des nitrates dans le bassin de la Marne et celui de l'Eure, pour les conditions hydrologiques de l'année 1991.

Les valeurs de ce coefficient de transfert ainsi déterminées pour une série de sous-bassins sont portées dans la figure 6 en fonction de l'importance du drainage agricole. Les bassins dans lesquels moins de 20% de la surface agricole est équipée de drains présentent des coefficients de transfert de l'ordre de 45 à 50%, indiquant une rétention riparienne de près de la moitié des l'azote d'origine diffuse, alors que les régions drainées plus intensivement, comme en Brie ou en Beauce, présentent des coefficients de transfert sensiblement plus élevés.

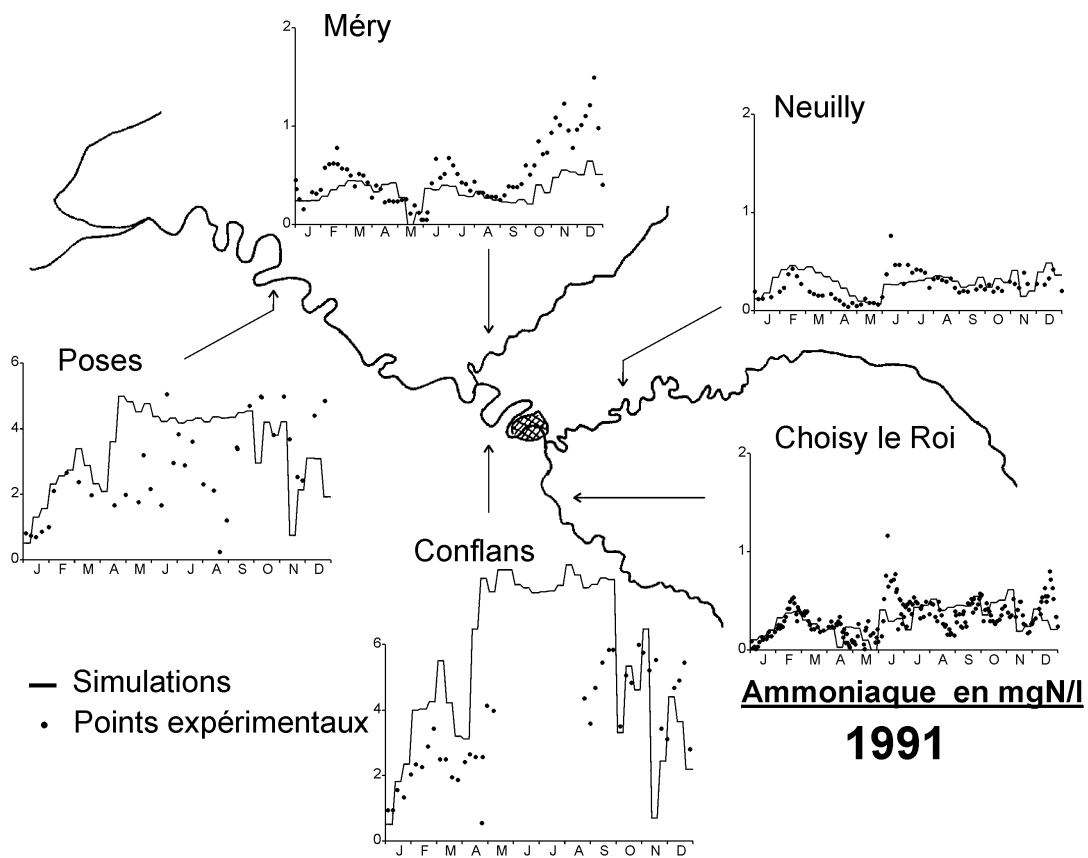
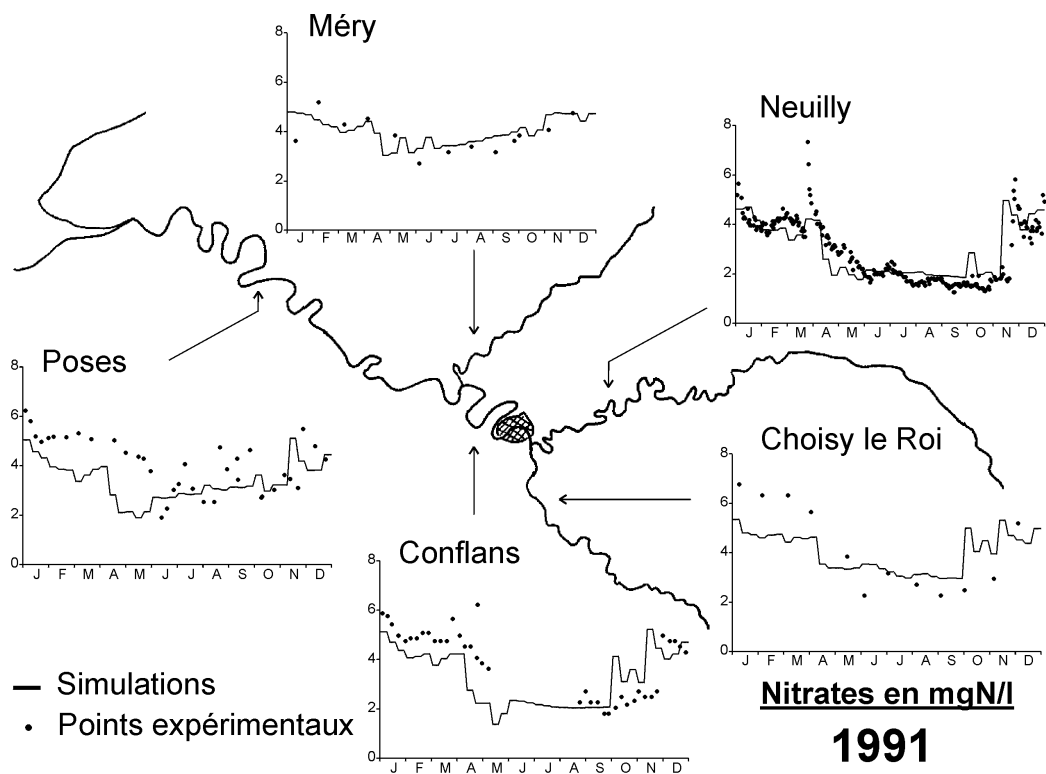


**Fig 6.** Coefficients de transfert ripariens déterminés par ajustement

## 2 Application du modèle et établissement du bilan d'azote

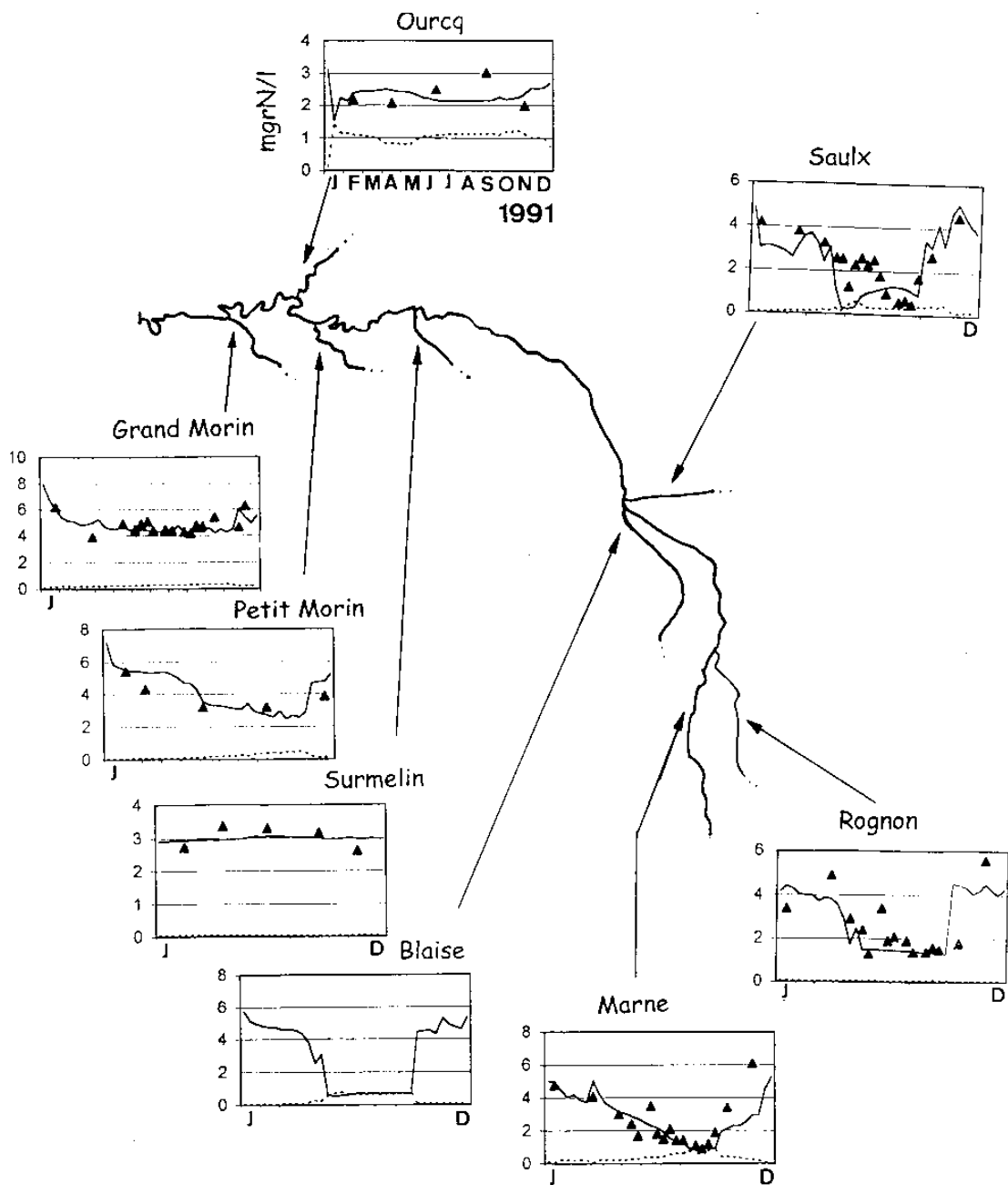
### 2.1 Variations saisonnières et géographiques

Les figures 7 et 8 montrent les résultats des simulations par SENEQUE 1.3 et 2.0 des variations saisonnières de la concentration en nitrates dans l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine, pour les années de référence 1991 et 1994, et les compare avec les observations disponibles. Les traits principaux des variations saisonnières et géographiques des nutriments sont bien rendus par le modèle. Notons que l'année 1991 est une année sèche, ce qui accentue l'amplitude des variations saisonnières. L'accord du modèle avec les observations est tout aussi correct pour d'autres années de référence plus humides (Fig. 9). Les variations saisonnières des nitrates sont marquées, dès les têtes de bassin, par une diminution sensible de concentration en période d'étiage: ceci reflète simplement la plus faible teneur en nitrates des nappes, qui assurent le débit de base, par rapport aux eaux superficielles, qui dominent le débit en période de hautes eaux. Chaque pic de débit est ainsi caractérisé par un accroissement de la teneur en nitrates.

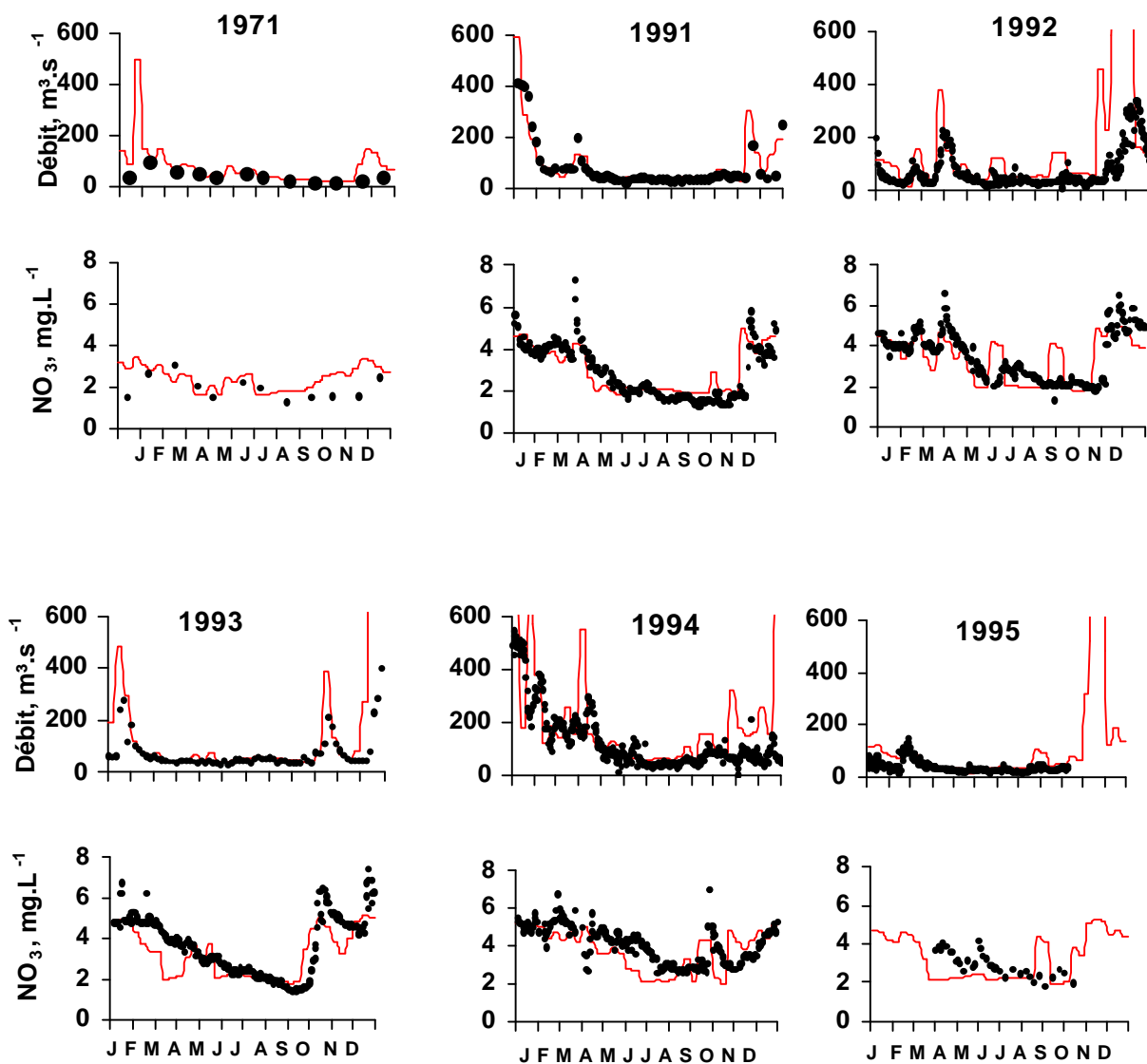


**Figure 7.** Simulation par le modèle SENEQUE 1.3 des variations saisonnières de la concentration en nitrates et en ammonium à quelques points nodaux du bassin de la Seine en 1991. Comparaison avec les observations disponibles.





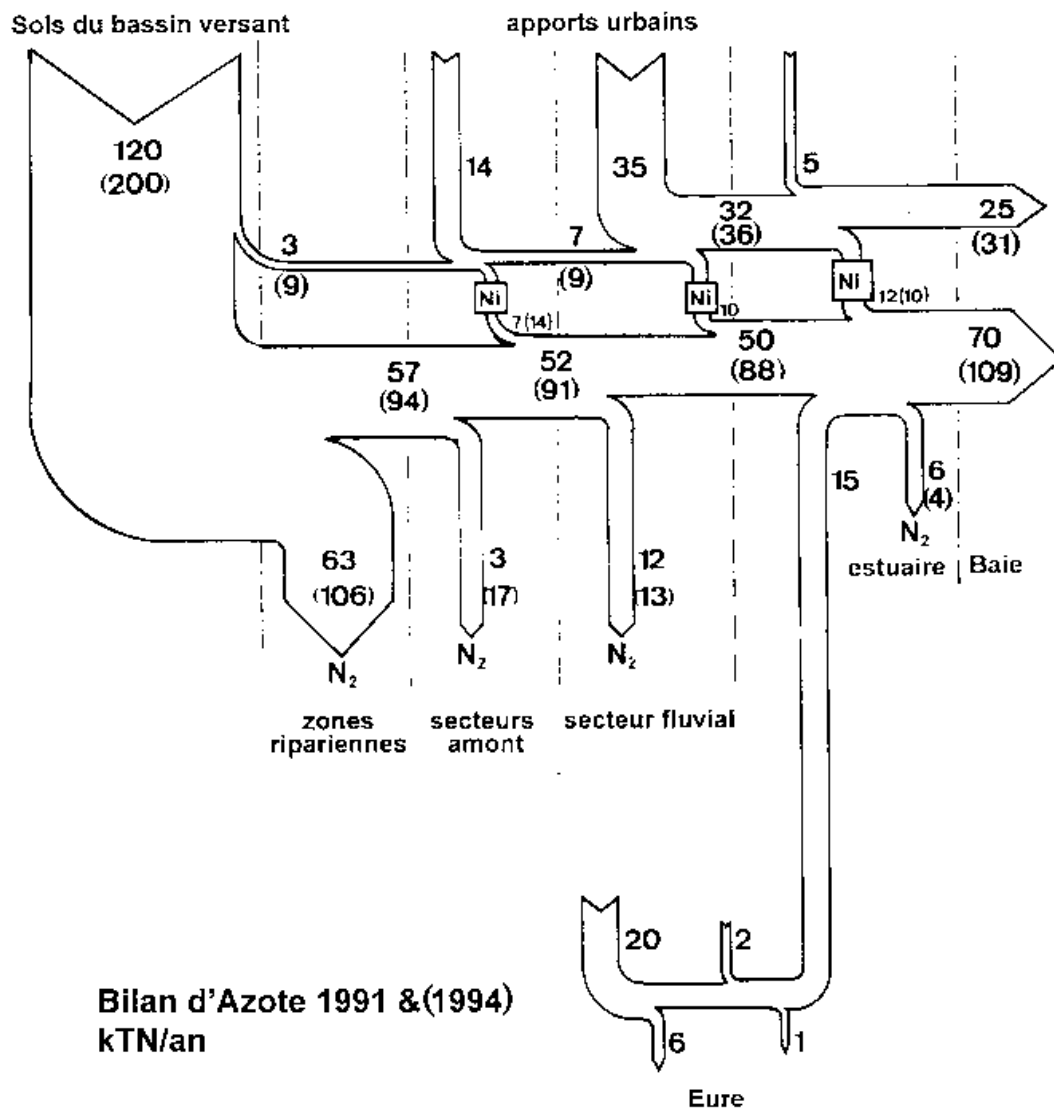
**Figure 8.** Simulation par le modèle SENEQUE 2.0 des variations saisonnières de la concentration en nitrates en quelques points nodaux du bassin de la Marne en 1991. Comparaison avec les observations disponibles.



**Figure 9.** Simulation par le modèle SENEQUE 1.3 des variations saisonnières du débit et de la concentration en nitrates à l'exutoire de la Marne, pour une série d'années récentes. Comparaison avec les données expérimentales disponibles.

## 2.2 Bilan des transferts d'azote

Un bilan complet des transferts d'azote à l'échelle du bassin de la Seine peut être calculé à l'aide du modèle SENEQUE. Il est présenté dans la figure 10, en  $10^3$  tonnes d'azote, pour une année sèche (1991) et une année humide (1994). Les apports diffus d'azote nitrique par lessivage direct des sols ou en provenance des aquifères représentent 2.5 à 4 fois les apports ponctuels d'eau usées (principalement sous forme d'azote réduit, ammoniacal ou organique). La rétention riparienne de ces apports diffus, bien que très variable selon les sous-bassins, peut être estimée à près de 40% pour l'ensemble du bassin. La charge azotée effective dans les eaux de surface (c'est-à-dire après rétention riparienne) est donc, selon les années, de 56-66 % d'origine diffuse et de 44-34% d'origine ponctuelle. La rétention par dénitrification benthique dans le cours même des rivières et dans les annexes hydrauliques représente 15-25% de la charge effective.



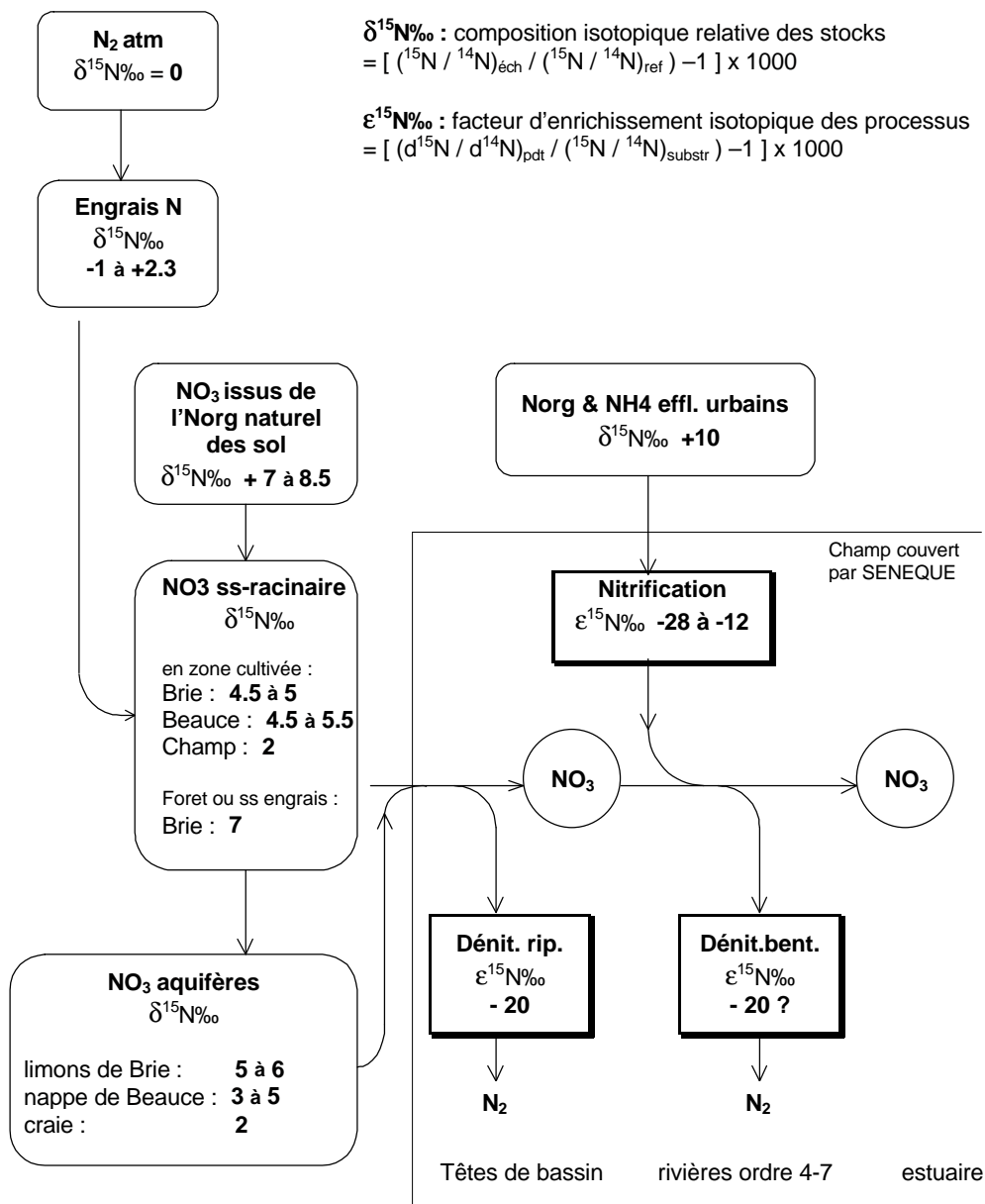
**Figure 10.** Bilan des apports, du transport et de la rétention d'azote dans le réseau hydrographique de la Seine durant une année sèche (1991) et une année humide (1994).

### 3 Extension du modèle à la composition isotopique de l'azote

L'importance du rôle des zones humides riveraines sur la rétention de l'azote diffus, telle qu'elle apparaît comme conclusion de la démarche SENEQUE, constitue un résultat très important sur le plan pratique. Ce résultat permet de penser que l'extension du drainage agricole, et le court-circuitage des zones riveraines qui en est résulté, ont constitué dans le passé un facteur clé de l'accroissement des teneurs en nitrates dans les eaux de surface. Il suggère également qu'une politique paysagère de réhabilitation de ces zones représente un excellent potentiel de maîtrise de la contamination nitrique.

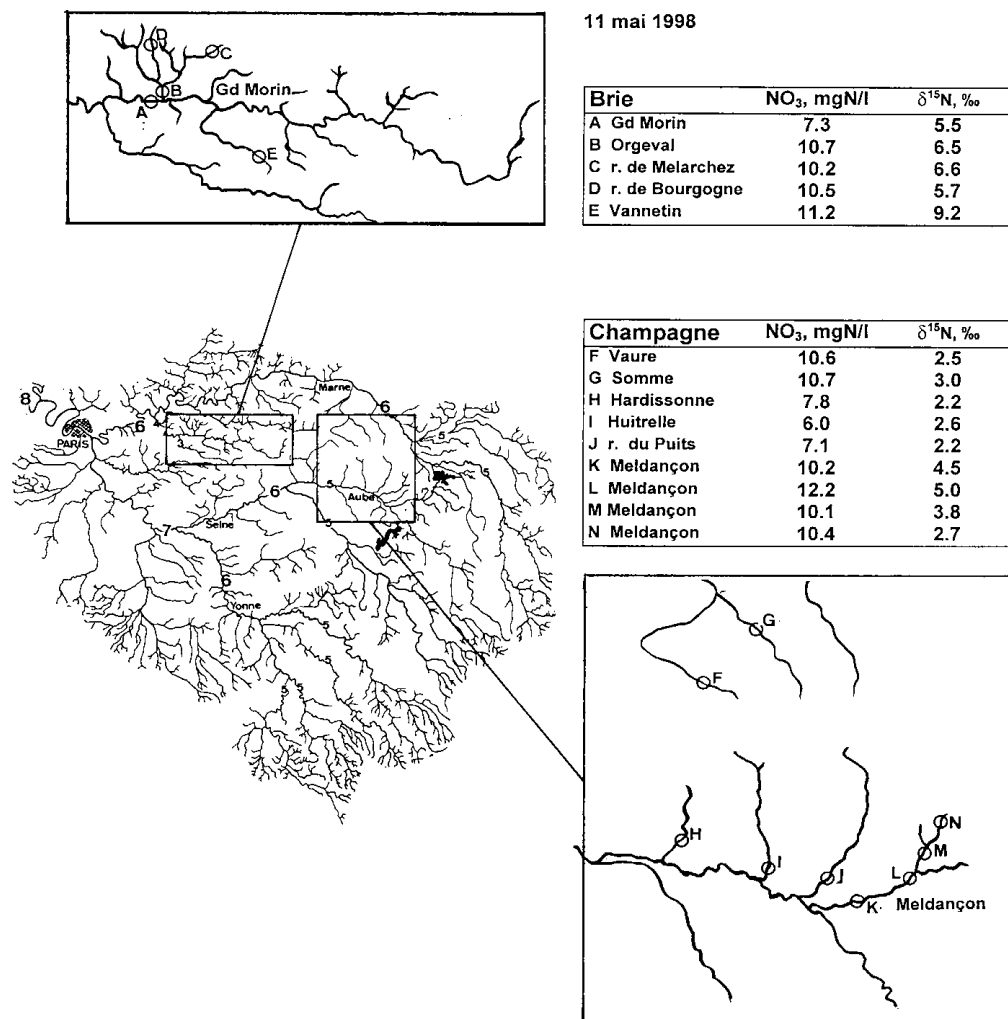
L'importance même de ce résultat conduit à s'interroger sur sa fiabilité. Il est vrai que la détermination des coefficients de transfert telle qu'elle a été réalisée est très sensible aux estimations qui sont faites de la teneur en nitrates des eaux sous-racinaires et souterraines. Une validation de la méthode sur des données indépendantes serait donc bienvenue.

Une telle validation devrait pouvoir être obtenue par l'examen des variations saisonnières et géographiques de la composition isotopique naturelle de l'azote. On sait en effet que le processus de dénitrification conduit à un enrichissement important en isotope lourd de l'azote des nitrates résiduels. Les processus de dénitrification (riparienne et benthique) devraient donc affecter de manière visible la composition isotopique des nitrates dans le réseau hydrographique. Nous avons donc entrepris d'adjoindre au modèle SENEQUE un module de calcul de la composition isotopique de l'azote. La figure 11 résume les principes d'un tel modèle, les facteurs d'enrichissement liés aux processus pris en compte, et la composition isotopique initiale des sources d'azote impliquées. Les premières mesures réalisées à titre de test de la méthode (Fig. 12) montrent l'existence de différences régionales significatives dont il faudra tenir compte dans la composition isotopique des nitrates des eaux souterraines, liées notamment au rôle de la matière organique des sols, très différent entre des régions telles que la Brie d'une part, et la Champagne crayeuse, d'autre part.



D'après Mariotti, 1982, 1983

**Figure 11.** Principes d'un modèle de la composition isotopique de l'azote dans le réseau hydrographique de la Seine. Facteurs d'enrichissement liés aux processus et composition isotopique des sources d'azote.



**Figure 12.** Composition isotopique des nitrates de quelques petits ruisseaux agricoles en Brie et en Champagne crayeuse.

## 4 Références

- AESN, 1987. Etat des eaux en 1981: Bilans et perspectives. Oise-Aisne, Le bassin de la Marne, Seine-Aval. Agence de l'Eau Seine-Normandie. Nanterre (France).
- Ballif, J.L. *et al.*, 1996. Les lysimètres en sols de craie de Chalons-sur-Marne. In "Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990". J.C. Muller, coordinateur. INRA editions, Paris.
- Benoît, M., Saintot, D., Gaury, F. 1995. Mesures en parcelles d'agriculteurs des pertes en nitrates. Variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l'eau d'un bassin d'alimentation. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 81: 175-188.
- Belamie, R., 1980. Influence of cropping practices and hydrological factors on the variation of nitrates in the discharges from a representative basin in the Paris region. Proceedings of the Helsinki symposium IAMS IAM publ. 130.

- Billen G., Garnier J. & Hanset P. 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The Riverstrahler model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia* 289: 119-137.
- Billen, G. & Garnier, J., 1997. The Phison River Plume: coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. *Aqu. Microb. Ecol.* 13: 3-17.
- Boniface, R. *et al*, 1996. Lysimètres en sols de Versailles. Bilan 1974-1990. In “Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990”. J.C. Muller, coordinateur. INRA editions, Paris.
- Fritz, M. 1994. Etude statistique sur la contamination en nitrates des cours d'eau et des nappes principales du bassin de l'Yonne et de la Seine en amont de Montereau. Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Garnier, J., Billen G. & Coste M. 1995. Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling. *Limnol. & Oceanogr.* 40: 750-765.
- Haycock, N.E., Pinay, G. & Walker, C., 1993. Nitrogen retention in river corridors: European perspective. *Ambio.* 22: 340-346.
- IFEN, 1997. Corine Land Cover. Base de données géographiques de l'occupation du sol. Institut Français de l'Environnement. Orléans.
- Krug, A., 1993. Drainage history and land use pattern of a swedish river system. Their importance for understanding nitrogen and phosphorus load. *Hydrobiol.* 251: 285-296.
- Mariotti, A. 1982. Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thesis. Université Pierre et Marie Curie.
- Muxart, T. (coord), 1996. Exportation de MES et de polluants. Chap. 7. Pp 75-124. In “ Thème Bassins versants ruraux”. Rapport PIREN-Seine 1996/1, 181pp.
- Ministère de l'Agriculture et des Forêts, 1988. Recensement Général de l'Agriculture, 1988.
- Vought, L.B.M., Dahl, J., Pedersen, C.L., Lacoursiere, J.O., 1994. Nutrient retention in riparian ecotones. *Ambio* 23: 342-347

Sommaire  général

**Introduction du thème :  
Transferts d'azote**

**Les principes du modèle couplé  
Illustration sur le bassin du Rhône  
Etat d'avancement sur le bassin de la Seine**

**La démarche de modélisation régionale des écoulements d'eau, de  
la production et du transfert d'azote sur le bassin de la Seine,  
structure du modèle d'écoulement**

**Spatialisation de la dynamique des activités agricoles dans le  
bassin de la Seine**

**Bilan des transferts d'azote dans le bassin de la Seine:  
l'approche du modèle SENEQUE**