



**HAL**  
open science

## Prévision des variations de concentrations en nitrates dans une source au moyen d'un modèle hydrologique global.

Dominique Thiéry, Jean-Jacques Seguin

► **To cite this version:**

Dominique Thiéry, Jean-Jacques Seguin. Prévision des variations de concentrations en nitrates dans une source au moyen d'un modèle hydrologique global.. 4ème Symposium international sur l'application de l'analyse des systèmes à la gestion des ressources en eau, Oct 1988, Rabat, Maroc. 15 p. hal-01070950

**HAL Id: hal-01070950**

**<https://brgm.hal.science/hal-01070950>**

Submitted on 2 Oct 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

4<sup>ème</sup> symposium sur l'application de l'analyse des systèmes  
à la gestion des ressources en eau

11-13 Octobre 1988 - Rabat, Maroc (Texte Français)

**PREVISION DES VARIATIONS DE CONCENTRATIONS EN NITRATES DANS UNE SOURCE  
AU MOYEN D'UN MODELE HYDROLOGIQUE GLOBAL**

par

***Dominique THIERY, Jean-Jacques SBUGUIN***

**BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES  
Service**

**B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 02 (FRANCE)**

**RESUME**

La prévision hydrologique par emploi de modèles globaux de bassins est largement pratiquée depuis de nombreuses années. La transposition de ce type de modèle à la simulation de l'évolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines est nettement plus récente.

Le principe de cette modélisation repose sur l'analyse des chroniques existantes de pluie, de débit de cours d'eau ou de niveau piézométrique, ainsi que de concentrations en nitrates dans une source ou dans un forage. Cette analyse permet d'établir, avec un modèle hydrologique global à réservoirs, un bilan entre les données d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisations) et celles de sortie (débit ou niveau piézométrique, concentration en nitrates), ainsi qu'une fonction de transfert. Les paramètres du modèle étant identifiés, il est alors possible de déterminer les concentrations correspondant à un scénario d'épandage de fertilisants et à un scénario climatique.

Le modèle Biche qui a été développé, permet ainsi de prévoir en continu l'évolution des concentrations en nitrates à l'exutoire d'un bassin versant ou dans un forage.

Cet article décrit une application dans les sources de la Voulzie à Provins (Seine-et-Marne) qui alimentent la ville de Paris et met en évidence l'influence de la variabilité climatique.

**INTRODUCTION**

L'alimentation en eau potable, à partir des nappes souterraines, doit prochainement respecter la norme européenne imposant une concentration en nitrates inférieure à 50 mg/litre. Il est donc extrêmement important de pouvoir déterminer l'évolution future des concentrations dans les ouvrages de captage existant, de façon à prévoir s'il est nécessaire de modifier l'ouvrage ou de réaliser un traitement de l'eau. Dans les régions agricoles, l'évolution des teneurs en nitrates est contrôlée par les épandages d'engrais, les consommations des cultures et par les conditions climatiques. C'est un phénomène complexe, compte tenu de la variabilité des

propriétés des sols et de la diversité de leur occupation ; néanmoins, cette diversité est intégrée par la nappe et la teneur en nitrates, au captage, résulte des caractéristiques de tout le bassin versant, ce qui justifie une approche globale. La prévision de l'évolution des concentrations dans une source a déjà été abordée généralement sur de courtes périodes (Prat, 1982 ; Thiéry et Seguin, 1985a) ou sur de tous petits bassins (Bergström et al., 1987).

Il a paru intéressant de développer un modèle -appelé **Biche** (Bilan Chimique dans les Eaux (Thiéry et Seguin, 1985b, 1985c)- permettant de réaliser aussi bien des prévisions à long terme de concentrations à l'exutoire de grands bassins que dans des captages de nappes souterraines.

## LE MODELE

L'évolution des niveaux dans les aquifères ou des débits dans les cours d'eau sont simulés depuis longtemps avec des modèles hydrologiques globaux. Ces modèles sont faciles à utiliser car les seules données nécessaires sont la pluie et l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) sur le bassin versant ou la zone aquifère étudiée. Les paramètres de modélisation sont globaux et, bien qu'ils intègrent la géomorphologie du site, ils ne peuvent être mesurés sur le terrain mais doivent être déterminés par essais de façon à permettre une simulation correcte. Une approche similaire a été développée pour représenter les transferts de nitrates à travers la zone non saturée par une succession de réservoirs.

Le modèle de transfert chimique dérive du modèle hydrologique global **Gardenia** du BRGM (Roche, Thiéry, 1984 ; Thiéry, 1988a) dans lequel un schéma analogique de transfert a été simulé par un mélange entre phases dans chacun des réservoirs du modèle. Au total, les transferts de nitrates sont simulés par un schéma de mélange couplé à une modélisation hydrologique globale.

## MODELISATION HYDROLOGIQUE

La modélisation hydrologique est identique à celle du modèle **Gardenia**. C'est un modèle à réservoirs qui simule le cycle de l'eau depuis la pluie sur le bassin jusqu'à l'écoulement à l'exutoire. Les données d'entrée sont la pluie sur le bassin et l'évapotranspiration potentielle et le calage est réalisé sur une série de débits à l'exutoire du bassin ou de niveaux piézométriques en un point. Le cycle de l'eau est représenté par un système de trois à quatre réservoirs représentant :

- l'évaporation dans les premiers centimètres du sol,
- l'écoulement rapide,
- l'écoulement souterrain sous forme d'une ou deux composantes.

Le premier réservoir U de capacité maximale RUMAX simule la couche superficielle constituée de sol végétal. Il reçoit la pluie et est vidangé par l'évapotranspiration. Quand il est saturé, l'eau en excédent percole vers le second réservoir H qui représente la zone intermédiaire (zone non saturée). Ce second réservoir produit une composante rapide non linéaire à l'exutoire du bassin ainsi qu'une percolation vers le troisième réservoir G1. La proportion d'écoulement rapide est proportionnelle au

niveau dans le réservoir H. Ce réservoir est contrôlé par deux paramètres THG, le temps de demi-percolation et RUIPER, le niveau H pour lequel l'infiltration et l'écoulement rapide sont égaux. Le troisième réservoir G1 simule la zone saturée de l'aquifère et produit l'écoulement souterrain avec un temps de demi-tarissement TG1. Quand c'est nécessaire, le réservoir G1 peut produire une infiltration profonde avec un temps de demi-percolation TG12 vers un quatrième réservoir représentant une zone aquifère plus profonde à tarissement lent. Ce quatrième réservoir G2 a un temps de demi-tarissement TG2. Le schéma du modèle Gardenia est présenté figure 1.

Les paramètres du modèle sont les suivants :

- . RUMAX (mm) : réserve superficielle maximale du réservoir RU
- . THG (mois) : temps de demi-montée du réservoir G1
- . RUIPER (mm) : hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation
- . TG1 (mois) : temps de demi-tarissement du réservoir G1
- . TG12 (mois) : temps de demi-montée du réservoir G2 (temps de demi-transfert de G1 à G2)
- . TG2 (mois) : temps de demi-tarissement du réservoir G2 (temps de demi-tarissement lent)
- . CORPL (%) : coefficient de correction globale des pluies chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées
- . CETP (%) : coefficient de correction globale de l'évapotranspiration potentielle, dont le but est similaire

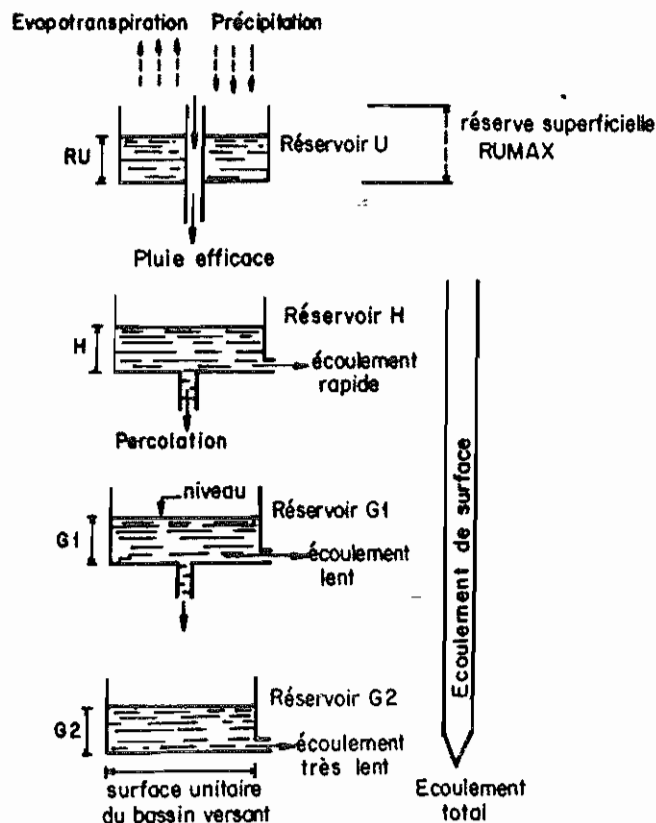


FIGURE 1 - Le modèle hydrologique global GARDENIA (BRGM, 1984)

## MODELISATION CHIMIQUE

Les données chimiques servant d'entrée au modèle sont :

- l'épandage de fertilisants sur la surface du bassin pendant la période de croissance des cultures,
- les besoins des cultures selon la saison,
- la minéralisation naturelle du sol,
- les résidus culturaux à l'automne après récoltes.

Le modèle calcule à chaque pas de temps le bilan des quantités de nitrates qui sont apportées (par épandage et par minéralisation), consommées par les plantes ou qui s'écoulent hors du système par les exutoires.

Comme pour la modélisation hydrologique, il faut ajuster simultanément :

- le flux moyen et la concentration de nitrates pendant une période donnée : ceci est réalisé par les paramètres de production,
- le temps de réaction du modèle : ceci est réalisé par les paramètres de synchronisation.

Les entrées ne sont pas connues précisément à cause de beaucoup de raisons :

- l'extension du bassin d'une source n'est pas connue exactement,
- les quantités de fertilisants épandus sur le bassin ne sont qu'estimés par des enquêtes dans un nombre limité d'exploitations ou par analyses des ventes d'engrais,
- les besoins des plantes ne sont que des estimations surtout pour les petites cultures ou les prairies,
- la minéralisation du sol est un phénomène complexe difficile à apprécier.

Trois coefficients globaux de correction permettent éventuellement d'ajuster les entrées pour équilibrer les sorties du modèle (concentrations) :

- COREPA : correction d'épandage des fertilisants (%)
- CORBES : correction des besoins des cultures (%)
- CORMIN : correction de la minéralisation globale du sol (%)

La synchronisation des valeurs calculées est réalisée en simulant la diffusion par des mélanges dans les réservoirs du modèle hydrologique (dont on admet en quelque sorte une réalité physique). Chaque réservoir est divisé en deux parties :

- une quantité variable d'eau libre qui représente la phase mobile PM,
- une quantité constante d'eau liée qui représente la phase stationnaire PS.

Les deux phases ont chacune une concentration (CM pour la concentration mobile et CS pour la concentration stationnaire) ; elles se mélangent avec la constante de temps de mélange TM. L'échange de masse entre phases pendant le pas de temps dt s'écrit :

$$dm = \frac{PM \cdot PS}{PM + PS} \cdot (CS - CM) \cdot \frac{dt}{TM}$$

Il y a donc deux paramètres par réservoir : une capacité d'eau liée PS et une constante de temps de mélange TM. Soit au total 6 paramètres pour les trois réservoirs (8 paramètres si un quatrième réservoir est nécessaire).

Un autre paramètre permet, en outre, de contrôler la dilution DILU, par la pluie P, de l'engrais qui est épandu sous forme solide à la surface du sol. Ce paramètre est la capacité de dilution CADIL de la pluie et est exprimé en terme de concentration maximale.

La dilution maximale DILU d'engrais solide consécutive à une pluie P s'écrit :

$$DILU = P.CADIL$$

Le schéma des transferts de masse dans le modèle **Biche** est donné en figure 2.

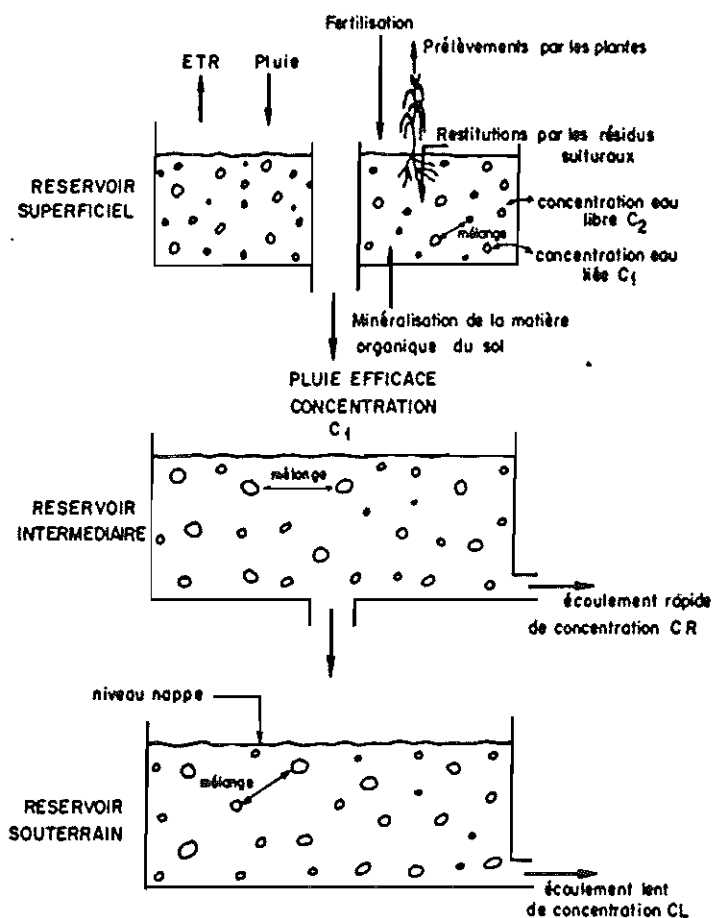


FIGURE 2 - Schéma du modèle BICHE

Le réservoir superficiel responsable de la fonction production réalise les opérations suivantes :

- apport de nitrates dans la phase mobile par dissolution du stock d'engrais à la surface du sol,
- apport de nitrates dans la phase mobile par minéralisation naturelle du sol,
- apport dans la phase mobile de l'azote nitrique des résidus culturaux (à l'automne),
- apport de pluie,
- consommation de nitrates selon les besoins des cultures,
- consommation d'eau par évapotranspiration,
- mélange entre la phase mobile et la phase stationnaire,
- infiltration de l'excès d'eau mobile (quand il y en a) vers le réservoir intermédiaire H.

Les principales simplifications opérées par le modèle ont porté sur le cycle de l'azote dont certains flux ont été négligés ou modélisés simplement :

- le processus de dénitrification, volatilisation, fixation par les argiles, fixation symbiotique et non symbiotique ne sont pas pris en compte : ils sont difficilement quantifiables, parfois négligeables, et peuvent d'ailleurs se compenser mutuellement ;
- les phénomènes de minéralisation-réorganisation sont appréhendés de façon simple.

Ces simplifications sont rendues nécessaires par l'échelle régionale qui implique généralement un large éventail de situations : mosaïque des sols et des cultures, diversité des pratiques culturales qui s'échelonnent tout au long d'une saison agricole, variété des rotations difficiles à saisir au travers d'un instantané statistique.

#### APPLICATION AU BASSIN DES SOURCES DE LA VOULZIE

Les sources de la Voulzie constituent un exutoire de la nappe des calcaires de Champigny. Il y a, en fait, 3 groupes de sources : Voulzie, Durteint et Dragon (fig. 3), appelés groupe des sources de la Voulzie (ou sources de Provins). Ces sources, dont le débit moyen est de l'ordre de 1 m<sup>3</sup>/s, sont captées pour l'alimentation en eau de la Ville de Paris. Les teneurs en nitrates, à leur point de jonction, sont élevées, supérieures à 50 mg/l ; leur évolution a été simulée au pas de temps mensuel à l'aide du modèle **Biché** jusqu'en 1983 (**Thiéry et Seguin, 1985c**).

Trois nouvelles années de mesures (1984, 1985 et 1986, soit 36 valeurs mensuelles supplémentaires) acquises depuis cette date, ont permis :

- de valider le calage déjà effectué,
- d'analyser l'influence des paramètres "chimiques" du modèle sur le calage,
- de montrer le rôle des épisodes pluvieux dans l'évolution des concentrations (**Seguin, 1988**).

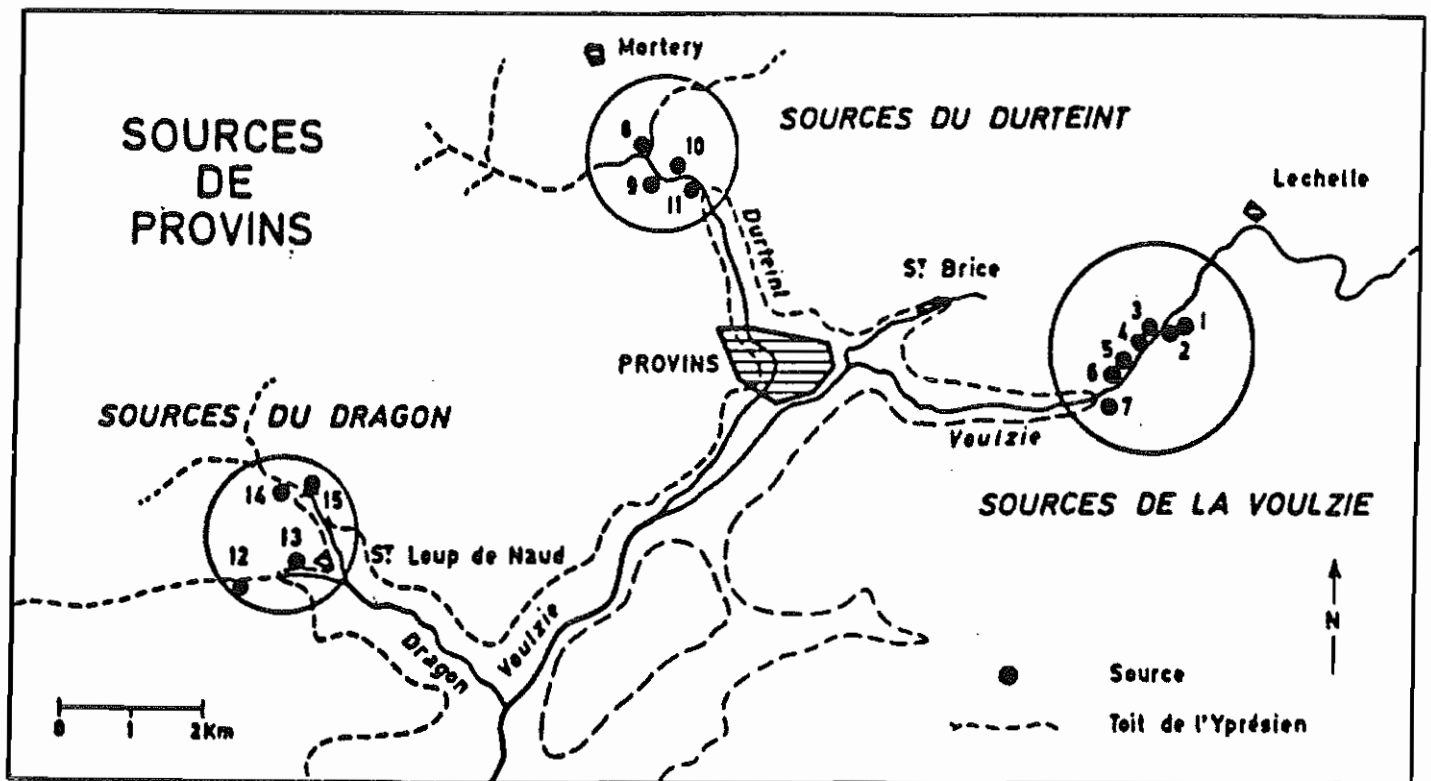


FIGURE 3 - Situation des trois principaux groupes de sources du bassin de Provins : Dragon, Durteint et Voulzie

#### Les données

##### - Données hydrologiques :

##### \* pluies mensuelles

- . à Voulzie (à 1 km de l'ensemble des captages de la Voulzie) de 1947 à 1986
- . à Paris, de 1907 à 1979 fournies par la Météorologie Nationale
- . à Orléans, de 1908 à 1979

##### \* évapotranspiration potentielle mensuelle

- . calculée par la formule mensuelle de Turc (Turc, 1961) à partir des données de la Météorologie Nationale : à Paris, de 1947 à 1986

##### \* débits moyens mensuels

- . de 1947 à 1986, à l'exutoire de l'ensemble des sources de la Voulzie. Ils sont mesurés par les services de la Ville de Paris



- Données chimiques :
  - \* concentrations en nitrates au point de jonction des 3 groupes de sources (mesures effectuées par la Ville de Paris de 1947 à 1986)
- Données agricoles :
  - \* Les données nécessaires à la constitution de la séquence d'épandages proviennent de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne ; elles ont été extraites :
    - . des deux derniers Recensements Généraux de l'Agriculture (RGA 1970 et RGA 1980) pour la répartition des cultures sur le bassin d'alimentation des sources
    - . des fiches de livraisons annuelles d'engrais (constituées à partir des statistiques du Syndicat inter-professionnel de l'Industrie des engrais azotés) ; ces livraisons d'engrais ne coïncident pas nécessairement avec les consommations des agriculteurs, mais ont permis cependant de constituer la série chronologique nécessaire au calage du modèle ; les doses d'engrais, actuellement épandues dans la région des sources de la Voulzie, ont été communiquées par la Chambre d'Agriculture et les valeurs introduites dans le modèle correspondent à une moyenne de ces doses d'engrais pondérée par les taux d'occupation du sol des principales cultures recensées.

Les besoins des cultures ont été estimés à partir du taux moyen d'azote des cultures multiplié par le rendement de la culture.

Les fournitures d'azote par le sol (minéralisation de la matière organique stable du sol et restitution des cultures) ont été considérées comme constantes : la complexité du phénomène de minéralisation (sous la dépendance des conditions climatiques et des caractéristiques physiques du sol : pH, température, taux de calcaire et d'argile, teneur en eau...) excluait, dans le cadre de cette modélisation à l'échelle régionale, une approche plus fine.

Pour les différents postes du bilan azoté, on obtient en définitive les valeurs suivantes exprimées en kg d'azote nitrique NO<sub>3</sub> (azote N x 4.4) par hectare :

- épandage	: 220 kg/an/ha avant 1965 300 à 500 kg/an/ha de 1965 à 1975 682 kg/an/ha de 1976 à 1986
- besoins	: 836 kg/an/ha de 1976 à 1986 mal connue avant 1976
- minéralisation du sol	: 220 kg/an/ha de 1947 à 1986
- résidus culturaux	: 88 kg/an/ha de 1947 à 1986

#### **MODELISATION HYDROLOGIQUE**

La période de calage s'étend de 1947 à 1983. Pour permettre l'initialisation des réservoirs du modèle, et donc une simulation correcte des premières années, on a commencé la simulation en 1907, soit 40 ans auparavant. Pendant cette période de démarrage, qui a une très grande importance vu la lenteur des réactions du système, on a utilisé les pluies calculées à partir des pluies à Paris-Montsouris et à Orléans.

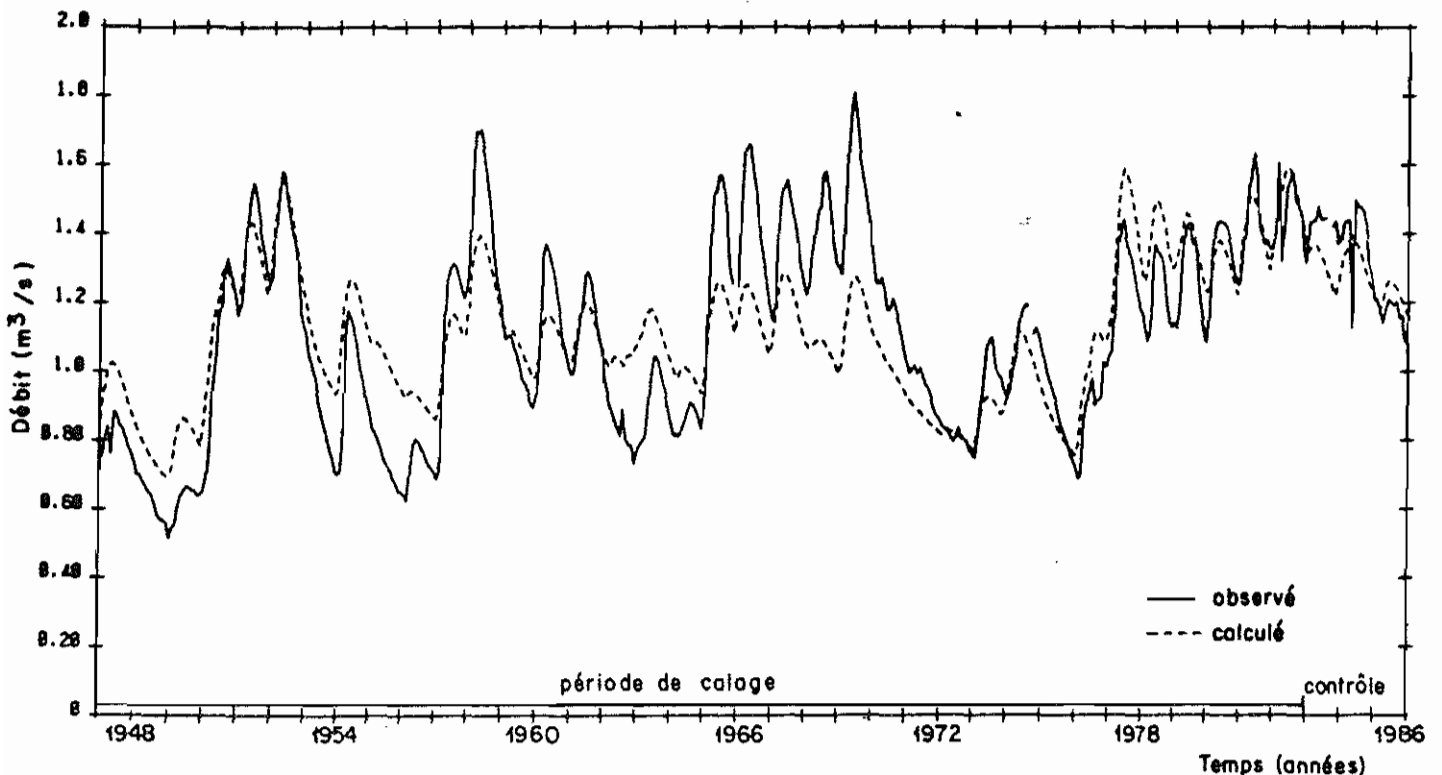
Le calage au pas de temps mensuel a été réalisé en essayant de simuler au mieux les débits mensuels observés. Il est satisfaisant (coefficient de corrélation égal à 0.80) avec, cependant, une sous-estimation pendant la période de 1966 à 1970 (voir figure 4). La période de contrôle 1984-1986 est également bien simulée.

Les paramètres identifiés par le calage sont donnés dans le tableau 1.

**TABLEAU 1 - Paramètres hydrologiques**

Coefficient de correction sur les pluies	(%)	8.4
Capacité de la réserve superficielle	(mm)	155
Coefficient de correction sur l'ETP	(%)	7.2
Temps de demi-montée percolation	(mois)	2.85
Temps de demi-tarissement du réservoir sout.1	(mois)	17.4
Temps de demi-montée sout.1 réservoir sout.2	(mois)	4.4
Temps de demi-tarissement du réservoir sout.2	(mois)	102

Les valeurs des paramètres sont très réalistes : correction de pluies de 8 % et capacité en eau du sol de 150 mm. Le temps de demi-tarissement est de 17 mois et celui de la composante très lente de 100 mois, ce qui ne peut être identifié que sur une très longue séquence d'observation (37 années) et à condition de laisser une très longue période d'initialisation (fixée ici à 40 ans).



**FIGURE 4 - Sources de Provins : simulation des débits (extrapolation = 1984, 1985 et 1986)**

## MODELISATION CHIMIQUE

La modélisation a été réalisée avec le modèle Biche. Pour caler le modèle sur la période 1947-1983, on a ajusté les paramètres de transfert de nitrates, de façon à obtenir la meilleure simulation possible des concentrations mensuelles observées (on n'a pas cherché à reproduire le flux de nitrates observé, car ces variations sont beaucoup plus semblables à celles du débit ; les variations de concentrations étant beaucoup plus régulières, permettent un calage beaucoup plus fiable).

Les concentrations en nitrates ne sont pas connues avant 1947 ; on a donc fait l'hypothèse d'une concentration initiale en 1907, soit 40 ans avant les premières mesures, égale à 10 mg/l. Les paramètres identifiés sont rassemblés dans les tableaux 2 à 4.

**TABLEAU 2 - Coefficient de correction sur les apports et les consommations**

Correction globale sur les épandages	+ 12 %
Correction globale sur la minéralisation du sol	+ 12 %
Correction globale sur les besoins des plantes	+ 3 %

**TABLEAU 3 - Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange**

Réservoirs	Volume d'eau retenue (mm)	Temps de demi-échange (mois)
Superficiel	2250	3.7
Intermédiaire	1536	0.80
Souterrain rapide	1481	instantané
Souterrain lent	1114	instantané

**TABLEAU 4 - Paramètres chimiques divers**

Concentration maximale pour la pluie	152 mg/l
Temps de demi-libération par les racines	instantané (non optimisé)

Le coefficient d'ajustement est égal à 0.953. Le calage est satisfaisant comme le montre la figure 5 qui permet de vérifier que les concentrations de la période de contrôle (1984-1986) sont également bien simulées. Afin de disposer d'une période de contrôle plus étendue, un calage (automatique) a été réalisé sur la seule période 1947-1976 avec contrôle a posteriori sur les 10 années suivantes. Les valeurs des paramètres obtenus sont peu différentes de celles du calage de référence, de même que la valeur du coefficient d'ajustement (qui passe à 0.956). La courbe d'évolution calculée est présentée par la figure 6 ; cette figure

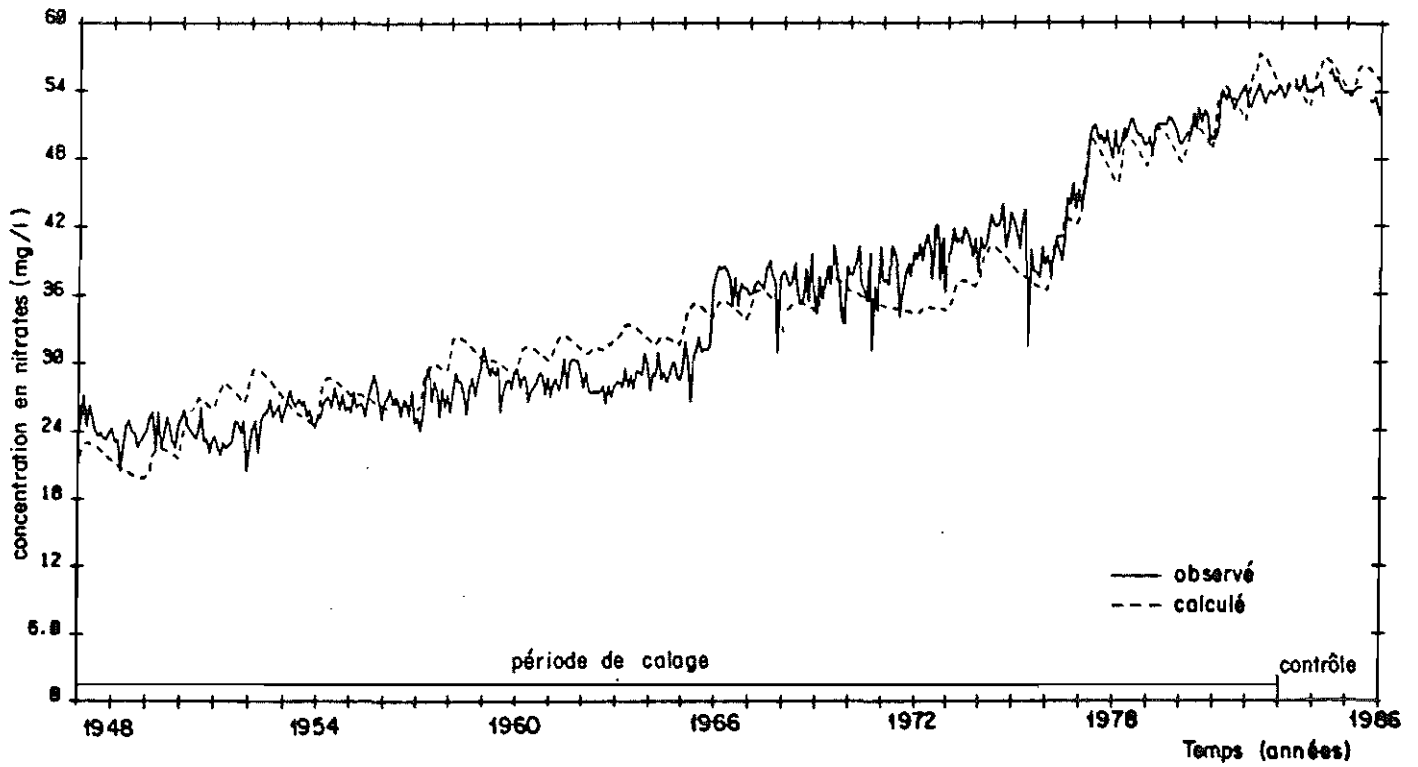


FIGURE 5 - Source de Provins : simulation des teneurs en nitrates

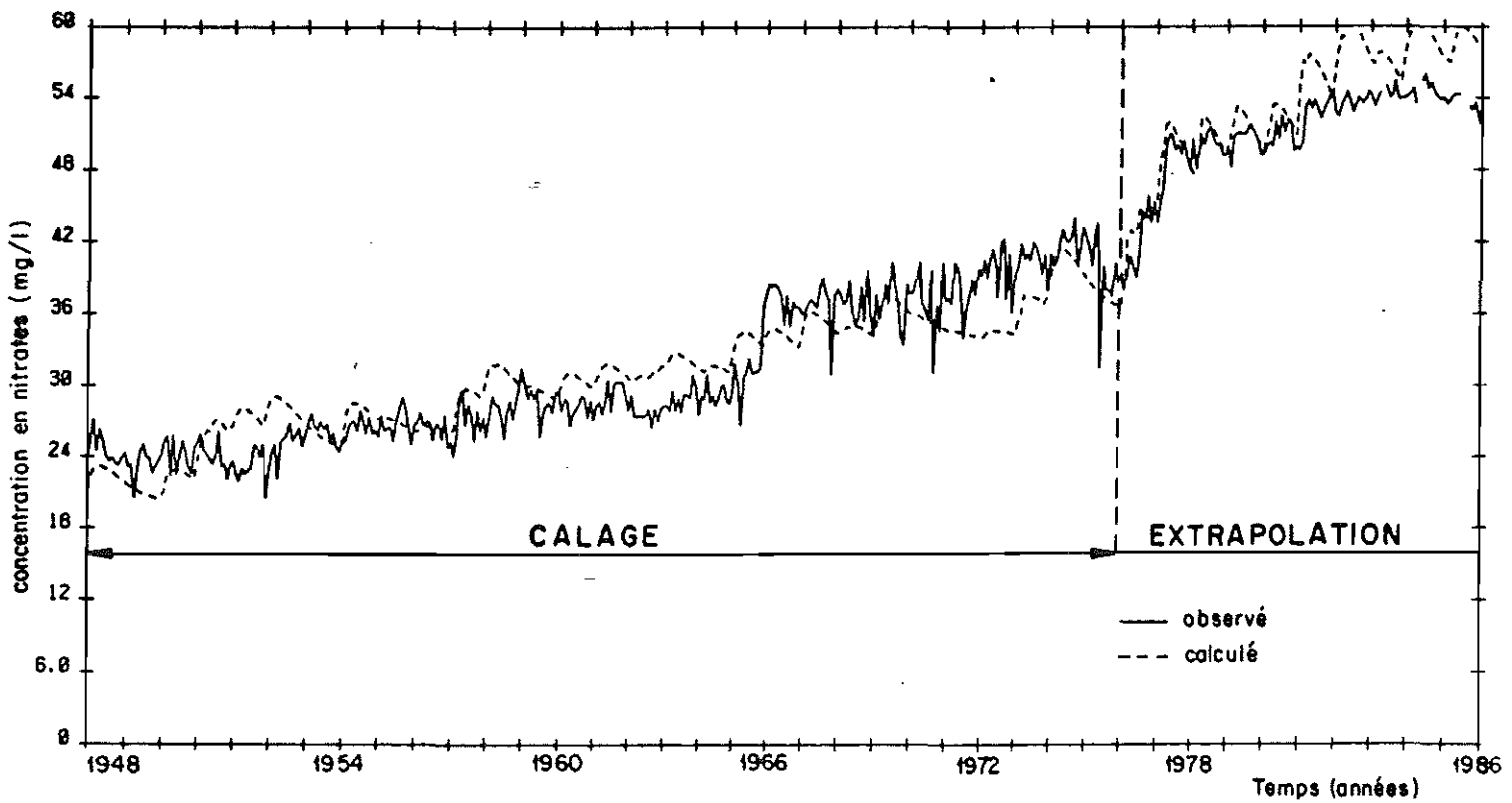


FIGURE 6 - Calage sur la période 1948/1976 et contrôle sur les 10 dernières années

montre que la reconstitution des teneurs sur la décennie 1977-1986 est excellente sur les 5 premières années ; la brusque montée des concentrations observée en 1978 est, en particulier, fort bien reproduite. De 1981 à 1986, les teneurs calculées sont un peu plus fortes que celles qui ont été observées, mais on ne note pas de divergence sur les tendances : il y a quasi stabilisation dans les deux cas.

#### EXPLOITATION DU MODELE

Une fois calé, le modèle peut servir à étudier des scénarios d'évolution de concentrations en fonction des variations pluviométriques ou en fonction des variations d'épandage et de besoins des plantes. Il peut également servir à mettre en évidence l'influence de la variabilité climatique sur les concentrations dans la source (Seguin, 1988 ; Thiéry, 1988b).

L'influence des épandages d'engrais a été étudiée de la manière suivante : on a supposé qu'après 1983, on retrouvait périodiquement les 77 années de précipitations observées de 1907 à 1983. Deux scénarios d'épandage (et de besoins) ont alors été simulés.

- a) situation inchangée : épandages et besoins de 1983 maintenus pendant 48 ans,
- b) épandages ramenés à partir de 1983 à leur valeur de 1964, c'est-à-dire réduction extrême (et quasiment improbable).

La figure 7 montre que, pour le premier scénario, la concentration va continuer à augmenter et atteindre 100 mg/l après 40 ans, au lieu de 54 mg/l en 1983 (la prolongation des calculs montre qu'elle se stabiliserait vers 115 mg/l après 80 ou 90 ans). Pour le second scénario, la concentration se maintiendrait pendant une quinzaine d'années avant de décroître lentement pour atteindre 40 mg/l après 40 ans.

Il apparaît ainsi que, compte tenu de l'inertie du système, une réduction, même très forte des épandages, ne produirait pas d'effets très nets avant plusieurs dizaines d'années.

Pour mettre en évidence l'effet de la succession des périodes sèches et humides, on a réalisé, avec la série d'épandages observés, une simulation avec les mêmes pluies sur les 80 années de la simulation, mais avec une répartition différente dans le temps : on a remplacé la séquence 1907-1986 par la succession des séquences 1927/1986 et 1907/1926. La figure 8 montre que les concentrations obtenues sont très différentes. On n'observe plus un accroissement brutal des concentrations de 1977 à 1986 comme c'était le cas avec la séquence des pluies observées. Cette simulation montre nettement que la brusque augmentation de concentration en 1977 ne doit pas être attribuée à un excédent (théorique) de nitrates de 236 mg/l (au lieu de 205 mg/l en moyenne les 3 années précédentes), mais surtout à des pluies (efficaces) très faibles en 1976 qui ont provoqué un stockage de nitrates (dans la zone non saturée) suivies de pluies efficaces très abondantes en 1977 qui ont remobilisé brutalement ces nitrates stockés.

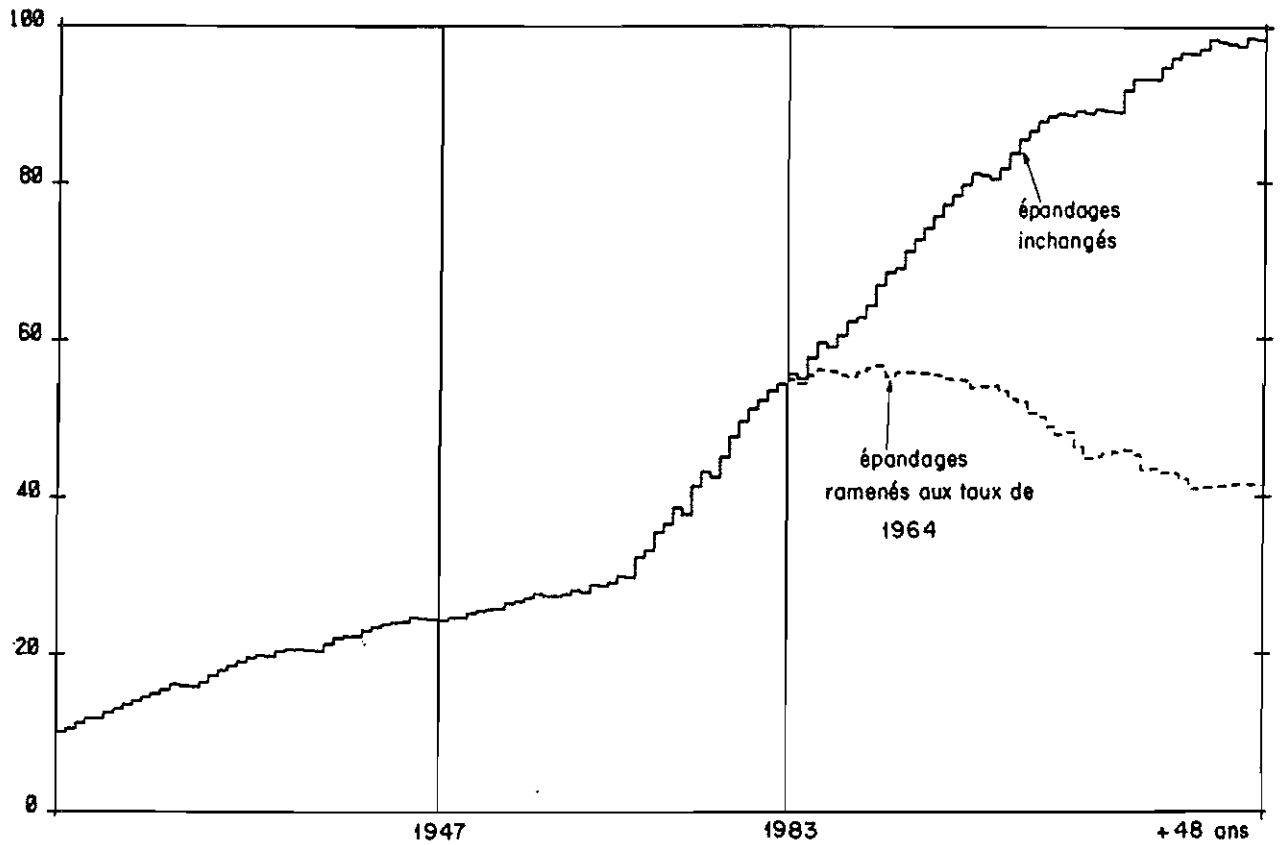


FIGURE 7 - Source de la Voulzie : simulation pendant 48 ans de 2 scénarios après 1983 - Epandages inchangés - Epandages ramenés au taux de 1964

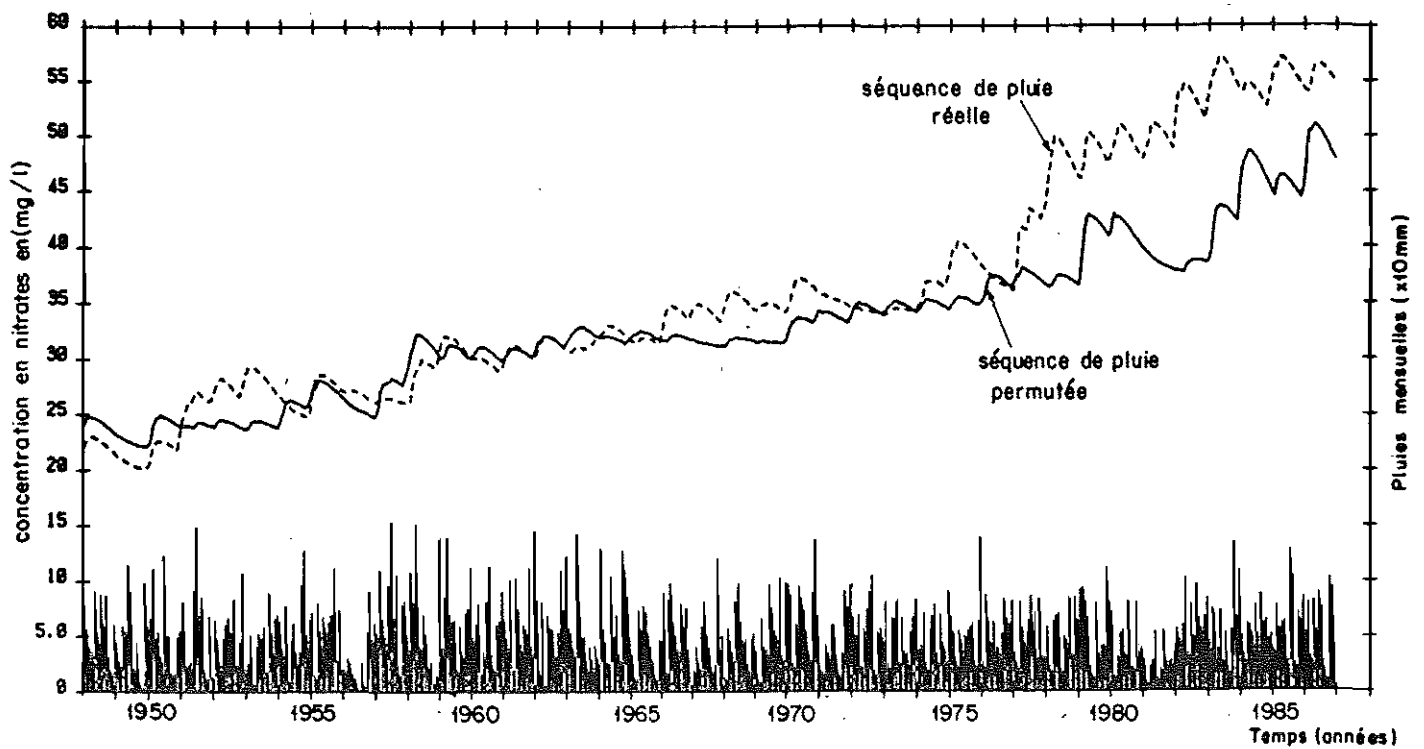


FIGURE 8 - Source de Provins : influence des pluies sur l'évolution des teneurs en nitrates

## CONCLUSION

Il est possible d'utiliser un modèle global simple de simulation des transferts de nitrates (le modèle **Biche**) pour reproduire les évolutions de concentration en nitrates mesurées dans une source ou dans un point d'une nappe et en prévoir l'évolution selon différents scénarios.

Un tel modèle, qui fait intervenir des paramètres globaux, doit être calé :

- du point de vue hydrologique,
- du point de vue chimique.

Il faut donc disposer de chroniques d'observations simultanées de précipitations, de débits de cours d'eau (ou de niveaux de nappes) et de concentration dans le cours d'eau (ou dans la nappe).

Il apparaît que la principale difficulté ne réside pas dans la schématisation du système par le modèle, mais plutôt dans le manque de données agricoles, qui ne sont toujours que des approximations très grossières, et de relevés de concentrations en nitrates. Les concentrations en nitrates sont, en effet, le plus souvent relevées pendant des périodes beaucoup trop courtes, compte tenu de l'inertie des systèmes et la variabilité spatiale montre que les concentrations en un point d'une nappe sont souvent des indicateurs insuffisants de la concentration moyenne d'une certaine aire de cette nappe.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Lapierre J.C.** (1977).- Etude hydrochimique d'une émergence de nappe : La Petite Traconne.- Agence financière de Bassin Seine Normandie, octobre 1977.

**Bergström S., Brandt M., Gustafson A.** (1987).- Simulation of runoff and nitrogen leaching from two fields in southern Sweden.- Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques, 32, 2, 6/1987.

**Megnien C.** (1976).- Hydrogéologie du centre du Bassin de Paris.- Contribution à l'étude de quelques aquifères principaux.- Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Pierre et Marie Curie. Paris 6.- Décembre 1976, t. 1, pp. 325-335.

**Prat M.** (1982).- Simulation numérique du transport de produits réactifs dans les sols.- Cas de l'azote dans les relations bassin versant-rivière.- Thèse Docteur-Ingénieur Institut National Polytechnique de Toulouse.

**Roche P.A., Thiéry D.** (1984).- Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA.- Rapport BRGM 84 SGN 337 EAU, novembre 1983.

**Seguin J.J.** (1988).- Modélisation globale des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Le modèle BICHE : analyse de sensibilité.- Rapport BRGM 88 SGN 369 3E.

**Thiéry D., Seguin J.J. (1985a).**- First modelisation of nitrates transfert over a river basin with a lumped model. Application to Rembercourt basin (France).- AIH, Cambridge, mem 18th congress, vol. 3, pp. 188-198.

**Thiéry D., Seguin J.J. (1985b).**- Modélisation des transferts de nitrates dans une nappe souterraine ou dans une source. Application à un site près de Pithiviers et aux sources de Provins.- Congrès International "Les nitrates dans les eaux" Paris 22-23-24 octobre 1985.

**Thiéry D., Seguin J.J. (1985c).**- Modélisation globale des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Description du modèle BICHE -trois exemples d'application.- Ministère de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions, Service de l'Eau.- Rapport BRGM 85 SGN 663 EAU, décembre 1985.

**Thiéry D. (1988a).**- Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model.- Journal of Hydrology 97 (1988), pp. 129-148.

**Thiéry D. (1988d).**- Influence de la variabilité du climat sur les performances des méthodes d'évaluation des ressources en eau.- Commission des Communautés Européennes. Contrat CLI-88-F (RS).- Rapport BRGM n° 88 SGN 155 3E.

**Turc L. (1961).**- Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. Ann. Agron., 12.