



étude de l'influence  
de la variabilité climatique  
sur le transfert des nitrates  
dans un bassin versant

applications aux sources de la Voulzie  
(Provins - Seine-et-Marne)



# étude de l'influence de la variabilité climatique sur le transfert des nitrates dans un bassin versant

applications aux sources de la Voulzie  
(Provins - Seine-et-Marne)

D. Thiery

décembre 1987  
87 SGN 869 EAU

## RESUME

Le texte qui suit constitue une partie d'une recherche réalisée dans le cadre du contrat CLI-88-F (RS) entre la Communauté Economique Européenne et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières sur le thème "Influence de la variabilité du climat sur les performances des méthodes d'évaluation des ressources en eau".

Pour analyser l'influence de la variabilité climatique sur la concentration en nitrates dans les eaux, un modèle global de simulation des transferts de nitrates -le modèle BICHE du BRGM- a été ajusté sur le site des sources de la Voulzie qui sont utilisées pour l'alimentation en eau de la ville de Paris. Le modèle utilise les données suivantes :

- la séquence des pluies mensuelles
- la séquence des évapotranspirations potentielles mensuelles
- la séquence des fertilisations azotées
- la séquence des consommations des cultures.

Il est calé (c'est-à-dire ajusté) :

- du point de vue hydrologique sur la séquence des débits mesurés pendant 37 ans de 1947 à 1983,
- du point de vue chimique sur les concentrations en nitrates mesurées au point de confluence des sources pendant la même période.

Après calage du modèle au pas de temps mensuel deux simulations, réalisées avec les mêmes épandages d'engrais et les mêmes cultures, ont montré que l'influence de la variabilité climatique sur les concentrations dans la source était considérable. Par rapport à une concentration de 35 mg/l en 1974, on arrive en 1983, avec les pluies observées, à une concentration de 55 mg/l (soit une augmentation de 20 mg/l en 10 ans). Par une simple permutation de l'ordre des années, avec ces mêmes pluies, on arrive avec deux scénarios à des concentrations en 1983 qui sont respectivement de 47 mg/l et 42 mg/l.

La recherche qui est décrite dans ce texte montre que le modèle BICHE permet efficacement de prendre en compte l'effet de la variabilité climatique sur la concentration en nitrates dans les eaux souterraines.

## SOMMAIRE

	Pages
RESUME	1
INTRODUCTION	3
1 - LES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES	4
2 - LES DONNEES CHIMIQUES DISPONIBLES	4
3 - ANALYSE DES DONNEES	5
3.1 - Pluies mensuelles	5
3.2 - Débits à l'exutoire	5
3.3 - Concentrations en nitrates	7
4 - MODELISATION HYDROLOGIQUE	7
4.1 - Méthode et modèle utilisé	7
4.2 - Principe du calage du modèle hydrologique	7
4.3 - Calage au pas de temps mensuel	8
5 - MODELISATION CHIMIQUE	11
5.1 - Méthode et modèle utilisé	11
5.2 - Les données agricoles	12
5.3 - Les paramètres de transfert chimique du modèle	15
5.4 - Calage du modèle	17
5.5 - Résultats du calage	17
5.6 - Exploitation du modèle	21
CONCLUSION	24
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	25
LISTE DES FIGURES	
Figure 1 - Situation des 3 forages de l'ensemble des sources de la Voulzie	2
Figure 2 - Groupe des sources de la Voulzie. Concentration en nitrates, chlorures et sulfates de 1945 à 1984	6
Figure 3 - Simulation au pas de temps mensuel du débit des sources de la Voulzie	10

	<b>Pages</b>
Figure 4 - Simulation de la concentration mensuelle dans la source	19
Figure 5 - Bilan annuel de 1947 à 1983	20
Figure 6 - Mise en évidence de l'influence de la variabilité climatique sur la concentration en nitrates dans les sources de la Voulzie	22

#### **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 - Caractéristiques des ajustements des 4 calages hydrologiques mensuels sur 442 mois	9
Tableau 2 - Paramètres du calage hydrologique mensuel sur le bassin de la Voulzie	9
Tableau 3 - Ajustement et statistique pour le calage hydrologique mensuel sur le bassin de la Voulzie	11
Tableau 4 - Bassin des sources de la Voulzie. Apports et besoins en nitrates.	17
Tableau 5 - Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange	18
Tableau 6 - Paramètres chimiques divers	18
Tableau 7 - Caractéristiques de l'ajustement.	21

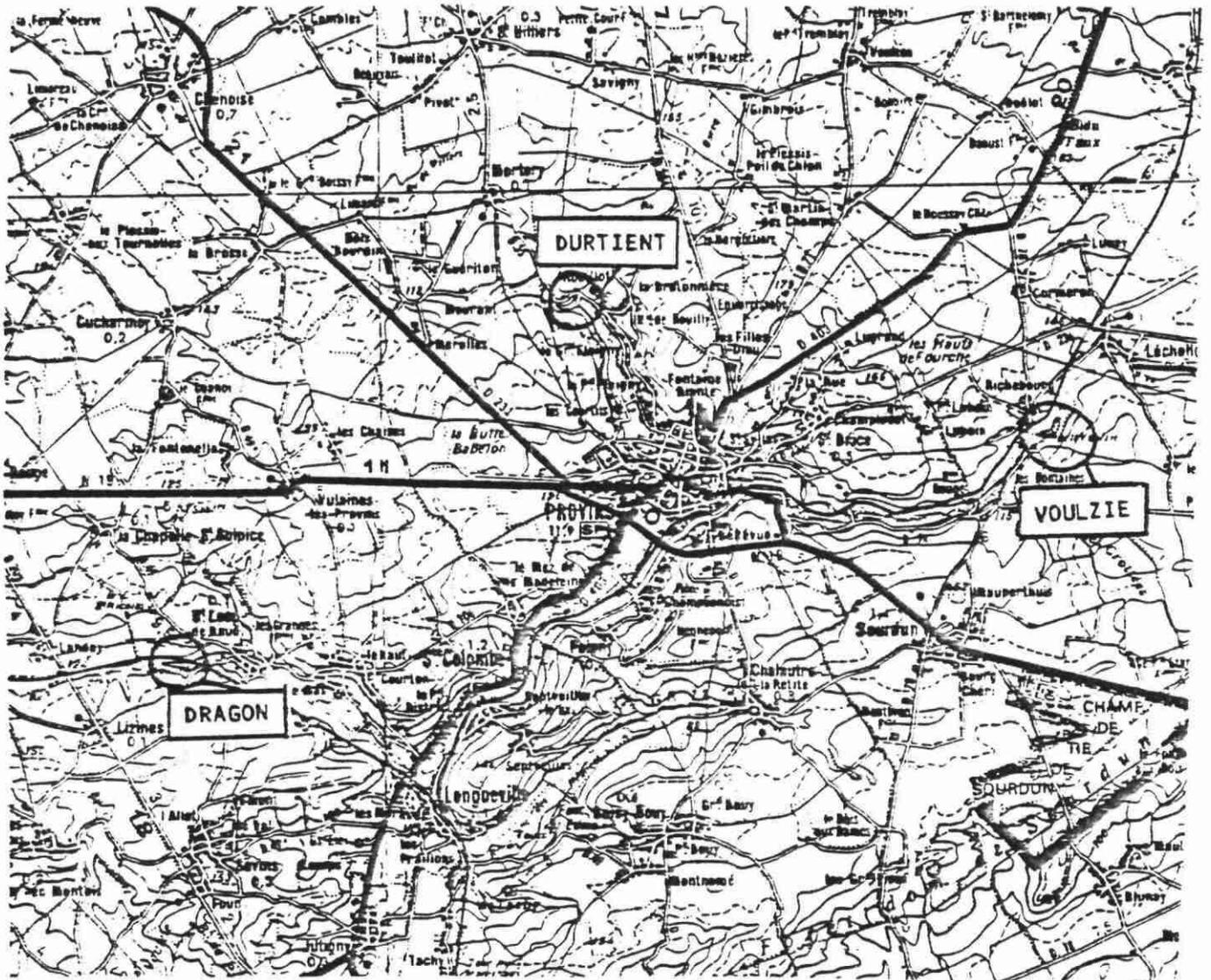


Figure 1 - Situation des 3 forages de l'ensemble des sources de la Voulzie

## INTRODUCTION

La variabilité des précipitations alimentant les systèmes hydrologiques se traduit évidemment par une variabilité des débits de sources, des débits de cours d'eau ou des niveaux piézométriques. Elle se traduit également -mais de manière souvent moins apparente a priori- par une variabilité de la qualité chimique des eaux. Une étude de la qualité de l'eau d'une source ou d'un captage et surtout une prévision de son évolution doit bien entendu prendre en compte cette variabilité. D'une part il est important de savoir si une augmentation de concentration d'un élément dans l'eau est dû à une augmentation des rejets en nappe ou à une diminution (provisoire) des pluies efficaces ou aux deux. D'autre part dans un schéma de rejets chimiques donné il est important d'être en mesure de prévoir les concentrations possibles dans l'eau captée suivant les séquences de précipitations possibles dans le futur.

Le BRGM a mis au point le modèle BICHE pour la simulation globale des transferts de nitrates dans les eaux souterraines et a modélisé -à la demande du Ministère de l'Environnement- ces transferts dans le bassin des sources de la Voulzie qui alimentent en eau la ville de Provins (Seine et Marne) (rapport 85 SGN 663 EAU - par D. Thiery et J.J. Seguin). La recherche qui suit montre comment un tel modèle - adapté pour fonctionner au pas de temps mensuel- permet de mettre en évidence l'influence de la variabilité climatique sur les concentrations en nitrates dans le groupe de sources. Elle a pour but de montrer également que les variations de concentrations dues à la variabilité climatique peuvent -pour certaines périodes du moins- être plus grandes que celles dues aux variations d'épandage d'engrais ou aux modifications du plan d'occupation des sols.

Cette recherche a été réalisée sur les fonds propres du département EAU du BRGM dans le cadre du contrat n° CLI-88-F (RS), entre la Communauté Economique Européenne et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

## 1 - LES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES

### . Pluies mensuelles

- \* A Voulzie (à 1 km de l'ensemble des captages de la Voulzie) de 1947 à 1983
  - \* à Paris, de 1907 à 1979
  - \* à Orléans, de 1908 à 1979
- fournies par la Météorologie Nationale

### . Evapotranspiration potentielle mensuelle

- \* Calculée par la formule mensuelle de Turc, à partir des données de la Météorologie Nationale :
  - . à Paris, de 1947 à 1983

### . Débits moyens mensuels

- \* de 1947 à 1983, à l'exutoire de l'ensemble des sources de la Voulzie. Ils sont mesurés par les services de la Ville de Paris.

## 2 - LES DONNEES CHIMIQUES DISPONIBLES

On dispose des relevés, par la Ville de Paris, de concentration en nitrates, en trois points :

- au captage de la Petite Traconne de 1965 à 1980
- au captage "bassin aval" de 1965 à 1980
- à l'exutoire des sources de La Voulzie de 1947 à 1983.

Les données à la source de la Voulzie sont mesurées très régulièrement plusieurs fois par mois par les services de la Ville de Paris.

Toutes les données ont été interpolées au pas de temps mensuel.

### 3 - ANALYSE DES DONNEES

#### 3.1 - PLUIES MENSUELLES

Les pluies mensuelles à Voulzie ne sont disponibles que de 1947 à 1984. Avant 1947, elles ne sont pas connues, on les a donc estimées à partir des données de pluie à Paris-Montsouris et à Orléans (tabl. A.16 et A.17 en Annexe). La période commune aux trois stations s'étend de 1947 à 1979, soit 33 ans, c'est-à-dire 396 mois.

Les données mensuelles ont été transformée classiquement, en prenant leur racine carrée (pour les rendre plus gaussiennes).

On obtient alors l'équation de régression (en racine carrée) :

- équation	$Voulzie = 0.3868 \text{ Orléans} + 0.5194 \text{ Paris} + 1.043$	
- corrélation partielle	0.33	0.42
- t de Student	7.0	9.3

Le coefficient de corrélation multiple est de 0.816, et les coefficients de Student montrent que les deux variables explicatives Paris et Orléans ont chacune une influence significative.

La série calculée à Voulzie à partir des données d'Orléans et de Paris a été utilisée pour la période de démarrage de 1907 à 1946.

#### 3.2 - DEBITS MENSUELS A L'EXUTOIRE

Les variations de débit sont régulières, ce qui permet de supposer une bonne qualité des données. Cependant, la Ville de Paris a signalé qu'à partir de 1978, les débits mesurés sont sous-estimés de quelques centaines de litres par seconde (25 % du débit mesuré), car une des sources n'est plus prise en compte dans la somme du débit. Le débit est très amorti, et même en année très sèche, il ne descend jamais en dessous de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit la moitié du débit moyen ( $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

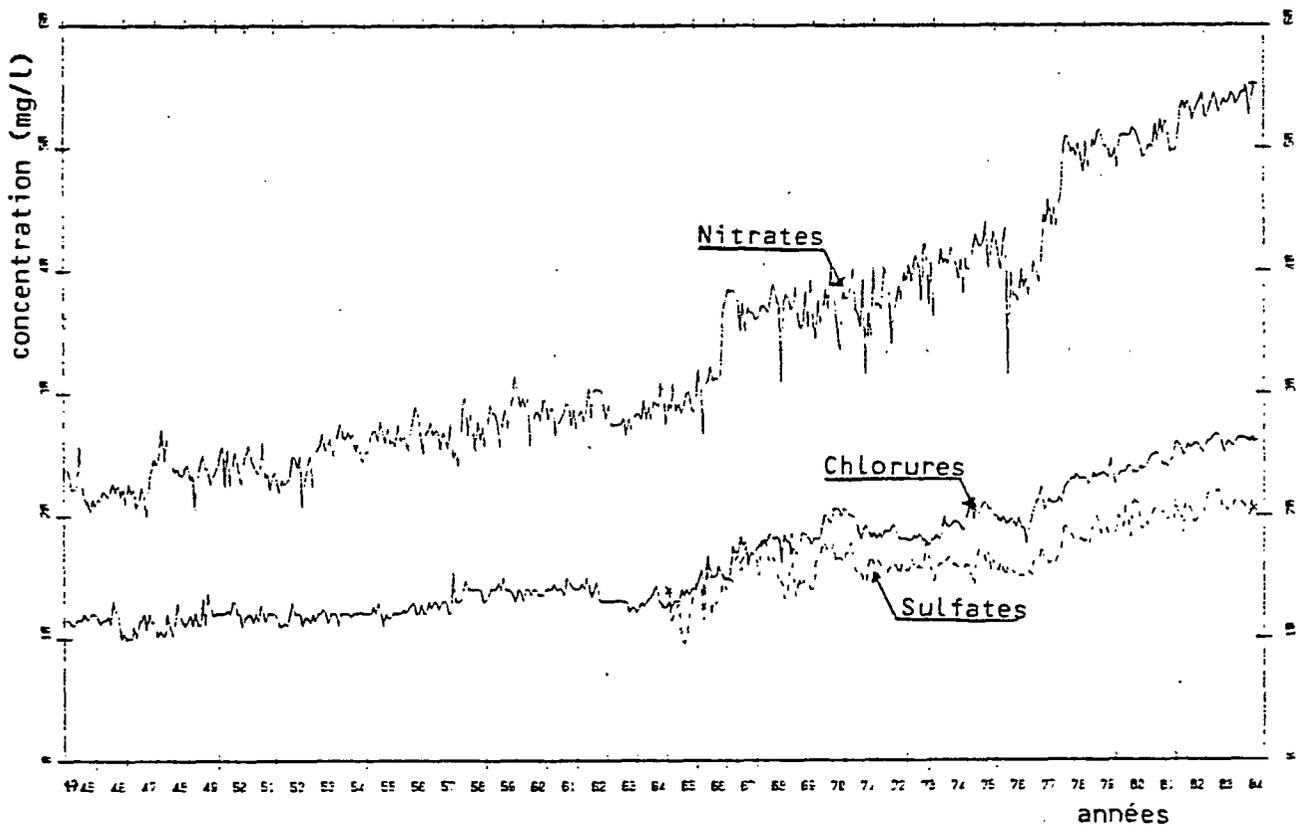
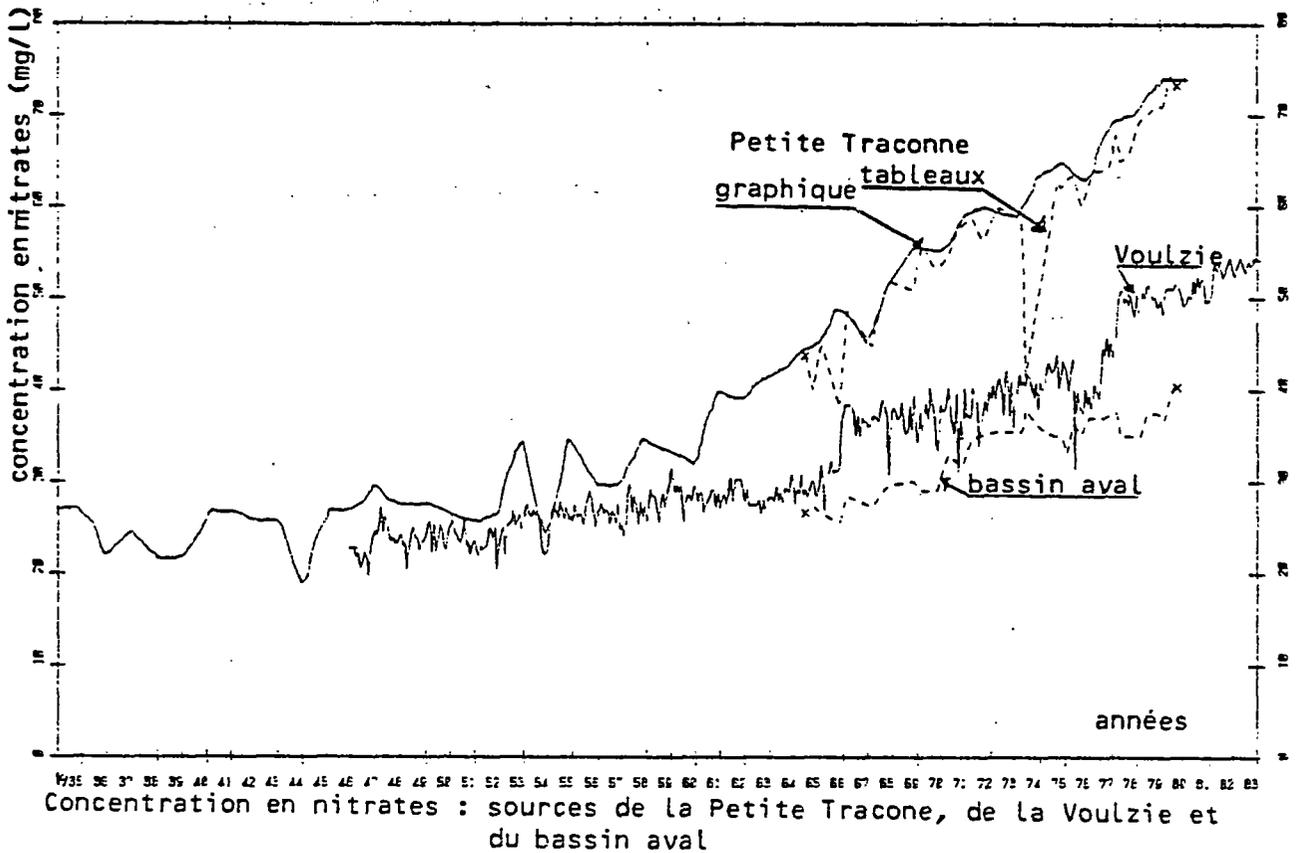


Figure 2 - Groupe des sources de la Voulzie - Concentration en nitrates, chlorures et sulfates de 1945 à 1984.

On remarque, dans les dernières années, les séquences classiques :

- séquence très sèche pendant la période 1970-1973,
- séquence très sèche en 1976,
- séquence beaucoup plus abondante pendant la période 1977-1983.

### **3.3 - CONCENTRATIONS EN NITRATES**

La figure 2 montre une augmentation régulière de la concentration en nitrates de 1945 à 1984 qui passe de 20 mg/l à 55 mg/l, pour le groupe des sources de la Voulzie, soit 0,9 mg/l par an. On note en particulier 2 accroissements brutaux : en 1966 et en 1977.

## **4 - MODELISATION HYDROLOGIQUE**

### **4.1 - METHODE ET MODELE UTILISES**

Pour le calage hydrologique, on a utilisé le modèle GARDENIA du Département EAU du BRGM (modèle Global A Réservoir pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères) qui réalise un bilan entre pluie et évapotranspiration (ETP) pour calculer le débit à l'exutoire d'un bassin (P.A. Roche, D. Thiery ; 1984 - Voir Annexe I). Les données peuvent être au choix : journalières , pentadaires, décadaires, mensuelles. Les pas de temps pour chaque type de données (pluie, ETP, débits) peuvent être différents. Le calage a été réalisé ici sur les variations de débit mensuel à partir des données de pluies et d'ETP mensuelles.

Pour utiliser le modèle, on a calculé au préalable une série d'évapotranspiration potentielle à partir des données mensuelles de température de l'air et d'insolation selon la formule mensuelle de Turc.

### **4.2 - PRINCIPE DU CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE**

Le calage du modèle consiste à ajuster 6 paramètres pour réaliser la meilleure simulation des variations de débit observées.

Les paramètres à ajuster étaient les suivants :

- |   |       |
|---|-------|
| - capacité de la réserve superficielle du sol                     | RUMAX |
| - correction globale de pluie                                     | CPLU  |
| - temps de demi-montée  | THG   |
| - temps de demi-tarissement                                       | TG1   |
| - temps de demi-transfert vers la deuxième composante souterraine | TG12  |
| - temps de demi-tarissement de la deuxième composante souterraine | TG2.  |

#### 4.3 - CALAGE AU PAS DE TEMPS MENSUEL

La période observée s'étend de 1947 à 1983. Pour permettre l'initialisation des réservoirs, 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, comme on l'a expliqué au chapitre 3.1.

Un premier calage a été réalisé en essayant de simuler au mieux les débits mensuels observés. Il est apparu que le calage était globalement satisfaisant avec cependant une nette sous-estimation pendant la période de 1966 à 1970, alors que la période 1978-1983 était bien simulée. Etant donné qu'on savait que les mesures de 1978-1983 étaient sous-estimées, on a pensé que ces débits biaisés étaient peut-être responsable de la sous-estimation de 1966-1970. On a alors tenté d'ajuster le modèle sur les débits mesurés corrigés :

- ou bien par augmentation de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  de tous les débits de 1978 à 1983,
- ou bien par augmentation de 25 % de tous les débits de 1978 à 1983.

Au total, trois calages ont été réalisés.

L'examen des graphiques mensuels et annuels des débits simulés au pas de temps mensuels pour ces 3 hypothèses (non reproduits ici) montre que la correction du débit de 1978 à 1983 ne permet pas de beaucoup mieux simuler la période 1966-1970 qui reste sous-estimée.

Le calage choisi est donc le calage réalisé sur les débits mensuels non corrigés. Les caractéristiques de l'ajustement pour les 442 mois (soit 36,8 années) simulés sont regroupées dans le tableau 1.

	Moyenne du débit (m <sup>3</sup> /s)	Ecart-type (m <sup>3</sup> /s)	Corrélation avec le débit observé	
			O B S E	O B 2 5
Débit calculé	1,10	0,21	0,80	0,87
OBSE	1,10	0,29	--	0,95
OB25	1,15	0,36	0,95	--

OBSE = Débit observé OB25 = Débit majoré de 25 % de 1978 à 1983

**Tableau 1 - Caractéristiques des ajustements des 3 calages hydrologiques mensuels sur 442 mois**

On remarque que le calage réalisé sur les débits non corrigés est plus proche de la série des observations corrigées, ce qui confirme dans une certaine mesure la validité de la correction.

Les caractéristiques et les paramètres du calage mensuel sont rassemblés dans les tableaux 2 et 3.

Correction de pluie	Capacité en eau du sol	Temps de 1/2 montée	Temps de 1/2 tarissement rapide	Temps de 1/2 transfert profond	Temps de 1/2 tarissement lent
CPLU (%)	RUMAX (mm)	THG (mois)	TG1 (mois)	TG12 (mois)	TG2 (mois)
8,4	155	2,85	17,4	4,4	102

**Tableau 2 - Paramètres du calage hydrologique mensuel sur le bassin de la Voulzie**

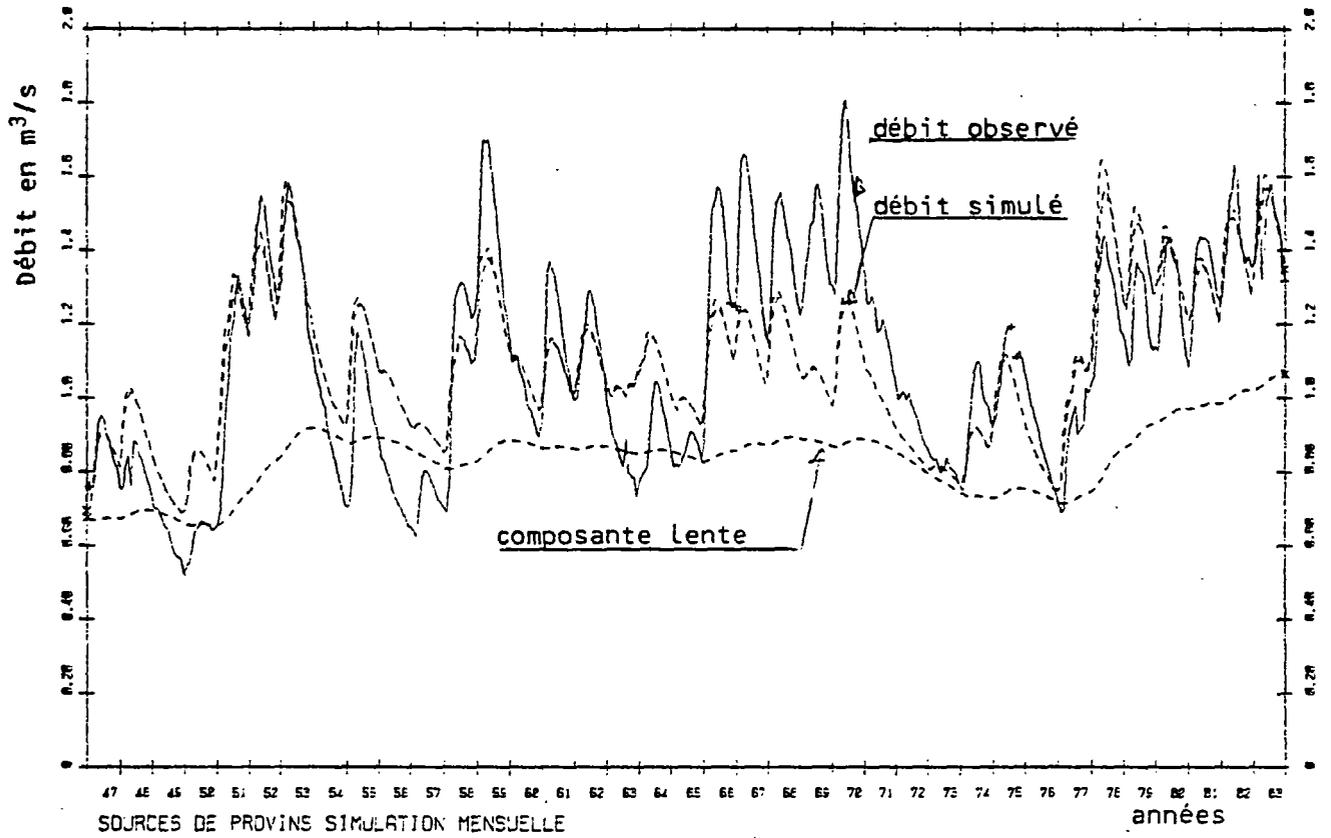


Figure 3 - Simulation au pas de temps mensuel du débit des sources de la Vouzie

	Coefficient d'ajustement (corrélation)	Débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	Débit minimal (m <sup>3</sup> /s)	Débit maximal (m <sup>3</sup> /s)
CALCULE	0,796	1,11	0,69	1,65
OBSERVE	--	1,10	0,52	1,81

**Tableau 3 - Ajustement et statistiques pour le calage mensuel sur le bassin de la Voulzie**

Il apparaît ainsi que 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).

**Remarque** - Cl. Megnier (1976) avait estimé le temps de demi-tarissement des débits à une valeur de l'ordre de 15 à 22 mois, ce qui est comparable aux valeurs identifiées avec le modèle.

## 5 - MODELISATION CHIMIQUE

### 5.1 - METHODE ET MODELE UTILISE

La modélisation a été réalisé avec le modèle BICHE du BRGM (D. Thiery et J.J. Seguin ; 1985). C'est un modèle à réservoirs (identique au modèle GARDENIA) dans lequel on effectue à chaque pas de temps un bilan des apports, des consommations et des transferts en nitrates. Une description succincte du modèle BICHE est donnée en Annexe II.

Les données nécessaires au fonctionnement du modèle sont de deux types : les données climatiques, les données agricoles. Les données climatiques sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle qui sont utilisées pour les calculs hydrologiques.

## 5.2 - LES DONNEES AGRICOLES

Elles sont de quatre types :

- a - la séquence d'épandage de nitrates, sous forme d'engrais pour la fertilisation du sol ; cette séquence se réduit généralement à un ou deux épandages par an ;
- b - la séquence des besoins des plantes ;
- c - la séquence de la minéralisation du sol : la matière organique présente dans le sol, en très grande quantité, produit chaque année, une certaine quantité de nitrates de mars à septembre, avec un maximum vers juillet et août ;
- d - les résidus culturaux : à l'automne, les racines des plantes libèrent brutalement une certaine quantité de nitrates qui était fixée auparavant (selon la nature des débris végétaux enfouis, il y a soit libération nette d'azote, soit blocage temporaire par les micro-organismes du sol et reminéralisation ultérieure).

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 ; la région agricole concernée est la Brie Champenoise ;
- des fiches de livraison annuelles d'engrais (constituées à partir des statistiques du Syndicat 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 valeurs des besoins ont été établies 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 échelle régionale, une approche plus fine.

Pour les différents postes du bilan azoté, on obtient en définitive les valeurs suivantes exprimés en kg d'azote nitrique  $\text{NO}_3^-$  (azote 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 1983
- besoins	836 kg/an/ha de 1976 à 1983 mal connue avant 1976
- minéralisation du sol	220 kg/an/ha de 1947 à 1983
- résidus culturaux (automne)	88 kg/an/ha de 1947 à 1983

Nous avons vérifié, sur les différentes périodes, la cohérence des données agricoles.

**- Période finale 1976 à 1983**

Un calcul élémentaire (en supposant une consommation égale aux besoins) donnerait les valeurs suivantes :

- apport total	682 + 220 + 88 =	990 kg/an/ha
- consommation		836 kg/an/ha
- soit un excédent de		154 kg/an/ha

La concentration à l'équilibre  $C_e$  correspondant à un excédent EX et à une pluie efficace moyenne PE, est donnée par la relation :

$$C_e = EX / PE$$

avec      EX    excédent en  $\text{kg/m}^2/\text{s}$   
           PE    pluie efficace en  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$   
            $C_e$     concentration en  $\text{kg/m}^3$

Si on utilise les unités suivantes :

EX    en  $\text{kg/ha/an}$   
 PE    en  $\text{mm/an}$   
 C     en  $\text{mg/l}$

on a la relation :  $C_e = 100 \cdot EX / PE$

Pour une pluie efficace de 150 mm/an, on obtiendrait donc une concentration de l'ordre de :

$$100 \times 154 / 150 = 103 \text{ mg/l.}$$

Cette concentration, de 100 mg/l, est cohérente avec les concentrations mesurées qui atteignent 55 mg/l en 1984 et sont visiblement loin d'être en équilibre.

#### - Période avant 1965

La concentration est de 30 mg/l, et est encore en augmentation. On peut estimer qu'elle atteindrait 37 à 40 mg/l à l'équilibre.

La somme des apports est de :  $220 + 220 + 88 = 528 \text{ kg/ha/an}$ . Les besoins annuels ne sont pas connus, mais il est certain que la valeur de 836 de 1976 à 1983 doit être réduite de façon à présenter un excédent  $EX = C \cdot PE / 100$  de  $37 \cdot 150 / 100$ , soit environ 55 kg/ha/an, d'où des besoins déterminés par :

- apports	528 kg/ha/an
- excédent	55 kg/ha/an
	<hr/>
- besoins	473 kg/ha/an

#### - Période de 1965 à 1975

Au vu des graphiques de concentration (fig. 3), on a considéré que l'excédent passait progressivement de 55 kg/ha/an en 1964 à 154 kg/ha/an à partir de 1968, soit les valeurs suivantes d'excédent annuel :

- 1964	55 kg/ha/an
- 1965	80 kg/ha/an
- 1966	100 kg/ha/an
- 1967	130 kg/ha/an
- 1968	154 kg/ha/an
- 19..	154 kg/ha/an
- 1975	154 kg/ha/an.

On en a donc déduit les besoins correspondants soit, après lissage, les valeurs suivantes des besoins annuels des nitrates (en kg/ha/an) :

Année	Besoins	Excédent
1947 à 1964	473	55
1965	550	66
1966	570	90
1967	590	149
1968	610	147
1969	630	140
1970	650	208
1971	670	162
1972	690	181
1973	700	215
1974	720	116
1975	740	70
1976 à 1983	836	154

soit un excédent moyen de 155 kg/ha/an de 1968 à 1976.

### 5.3 - LES PARAMETRES DE TRANSFERTS CHIMIQUES DU MODELE

Les transferts de nitrates font intervenir un maximum de 13 paramètres dans le modèle. Le schéma de fonction et la définition des paramètres sont détaillés dans l'annexe II ainsi que dans le rapport BRGM 85 SGN 663 EAU.

Les paramètres peuvent être regroupés comme suit :

• **Ajustement des apports et des consommations :**

- |  |        |
|--|--------|
| • coefficient de correction sur l'épandage               | COREPA |
| • coefficient de correction sur les besoins en nitrates  | CORBES |
| • coefficient de correction sur la minéralisation du sol | CORMIN |

Les apports et les consommations étant connus approximativement, on permet au modèle de les ajuster globalement jusqu'à environ 10 ou 20 % si nécessaire.

• **Volumes d'eau retenue dans les réservoirs :**

- |  |       |
|--|-------|
| • volume retenu dans le réservoir superficiel              | RUFIX |
| • volume retenu dans le réservoir intermédiaire            | HFIX  |
| • volume retenu dans le réservoir souterrain rapide        | G1FIX |
| • volume retenu dans le réservoir souterrain lent éventuel | G2FIX |

Ces volumes correspondent à de l'eau qui est retenue par capillarité, ou est fixée sur la matrice rocheuse et absorbe ou libère des nitrates suivant si sa concentration est inférieure ou supérieure à la concentration de l'eau libre.

• **Temps de demi-échange dans les cinétiques d'échange entre l'eau retenue et l'eau libre :**

- |   |      |
|---|------|
| • temps de demi-échange dans le réservoir superficiel       | TERU |
| • temps de demi-échange dans le réservoir intermédiaire     | TEH  |
| • temps de demi-échange dans le réservoir souterrain rapide | TEG1 |
| • temps de demi-échange dans le réservoir souterrain lent   | TEG2 |

• **Divers**

- |  |        |
|--|--------|
| • concentration maximale de la pluie lors de la dilution de l'engrais solide réparti à la surface du sol | CONMAX |
| • temps de demi-libération des nitrates par les racines à l'automne                                      | TERAC  |

Il s'agit d'un nombre maximal de paramètres, certains pouvant être neutralisés (par exemple en donnant une cinétique instantanée ou bien une concentration maximale infinie).

## 5.4 - CALAGE DU MODELE

On a ajusté les paramètres de transfert de nitrates, de façon à obtenir la meilleure simulation des concentrations observées (on n'a pas cherché à reproduire le flux de nitrates observé, car ses 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.

Le calage a été réalisé au pas de temps mensuel, avec les paramètres hydrologiques déterminés par le calage hydrologique. Les calculs ont commencé en 1907.

## 5.5 - RESULTATS DU CALAGE

### 5.5.1 - PARAMETRES DU MODELE

Les paramètres identifiés sont rassemblés dans les tableaux 4, 5 et 6.

	Correction	1907-1964	1965-1967	1968-1975	1976-1984
Epandage COREPA	+ 11,6 %	246	406	584	761
Minéralisation du sol CORMIN	+ 11,9 %	246	246	246	246
Résidus culturels	—	88	88	88	88
Besoins en nitrates CORBES	+ 2,8 %	486	586	695	859
Excédent théorique	—	94	154	223	236

Tableau 4 - Bassin des sources de La Voulzie. Apports et besoins en nitrates.  
Valeurs annuelles (en kg/ha/an)

Réservoirs	Volume d'eau retenue (mm)	Temps de demi-échange (mois)
Superficiel	2 550	3,7
Intermédiaire	1 536	0,80
Souterrain rapide	1 481	instantané
Souterrain lent	1 114	instantané

**Tableau 5 - Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange**

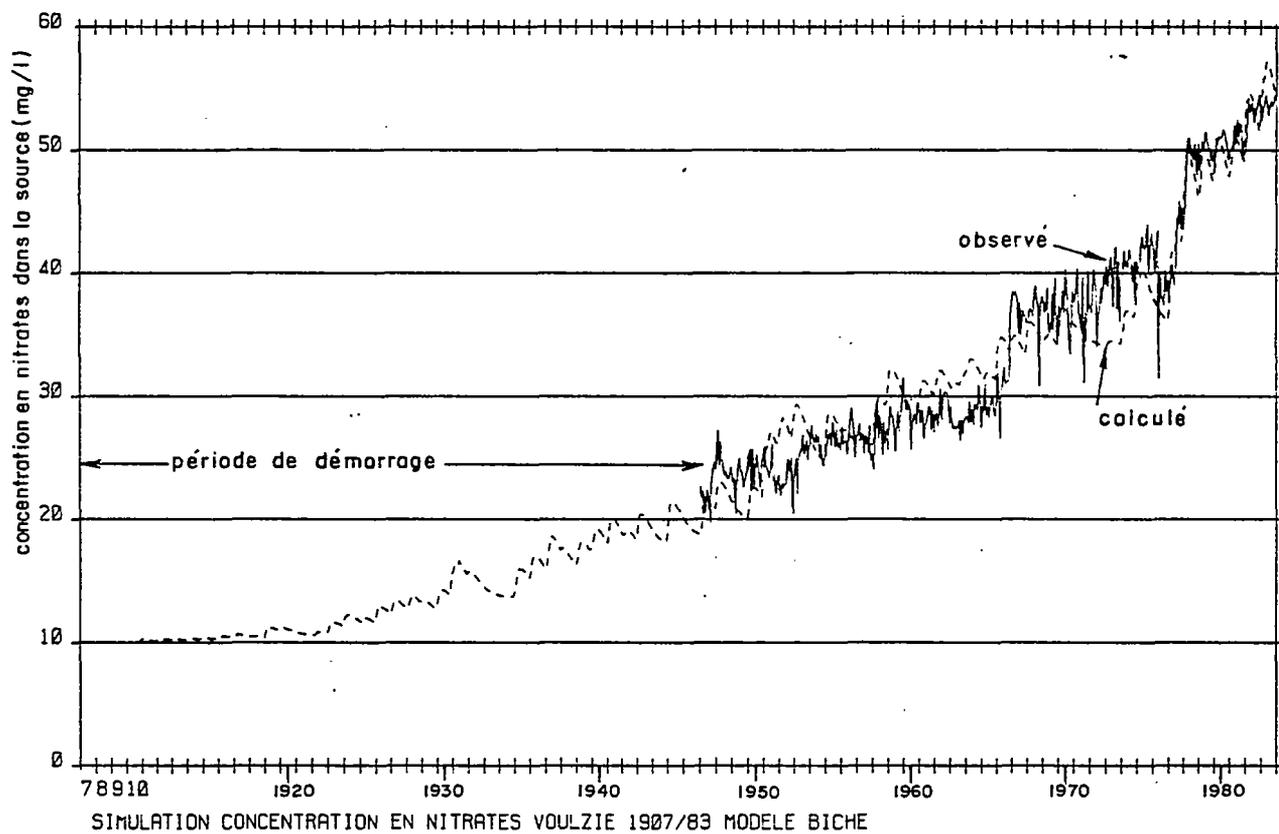
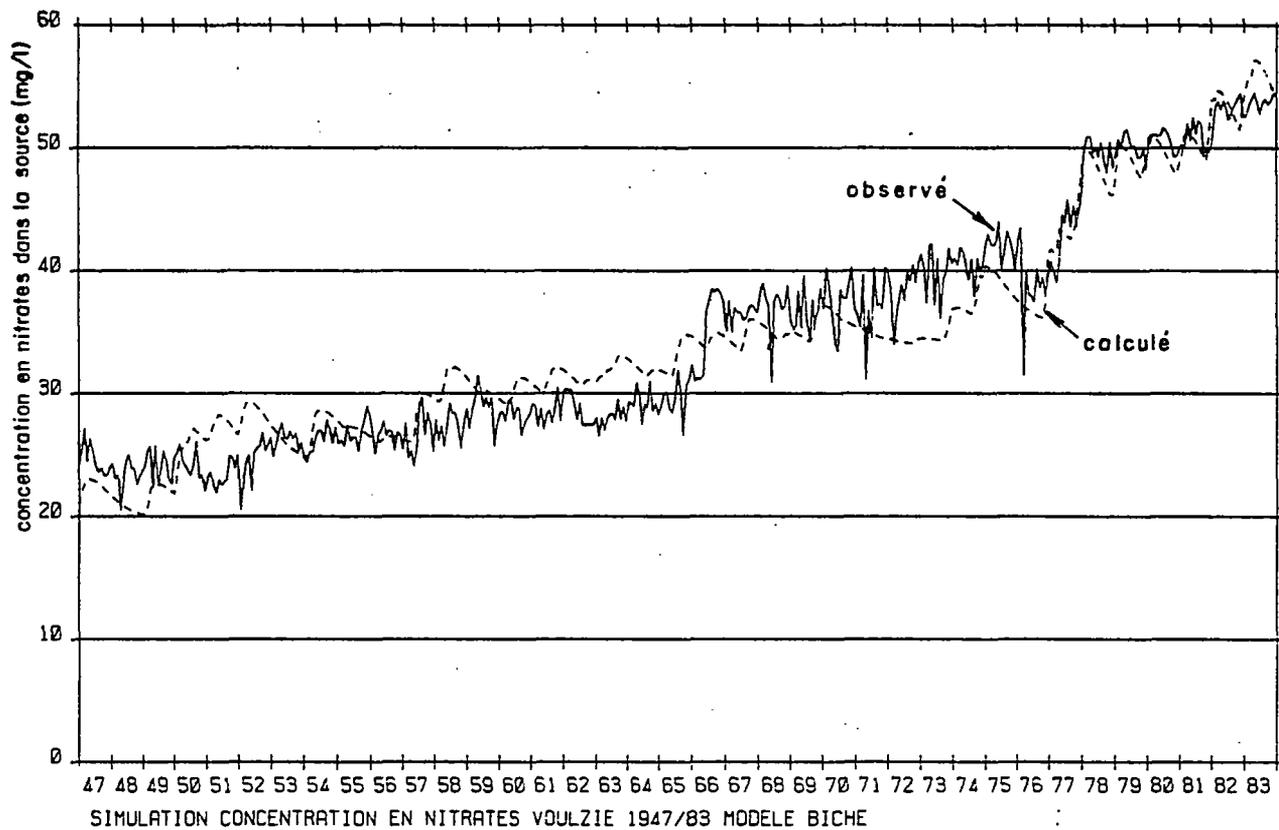
Concentration maximale pour la dissolution par la pluie	152 mg/l
Temps de demi-libération par les racines	instantané (non optimisé)

**Tableau 6 - Paramètres chimiques divers**

### 5.5.2 - CARACTERISTIQUES DE L'AJUSTEMENT

Le coefficient d'ajustement est égal à 0.953

Les caractéristiques de l'ajustement pendant les 37 années de mesures sont rassemblées dans le tableau 7.



**Figure 4 - Simulation des concentrations mensuelles dans les sources de la Voultzie avec le modèle BICHE**

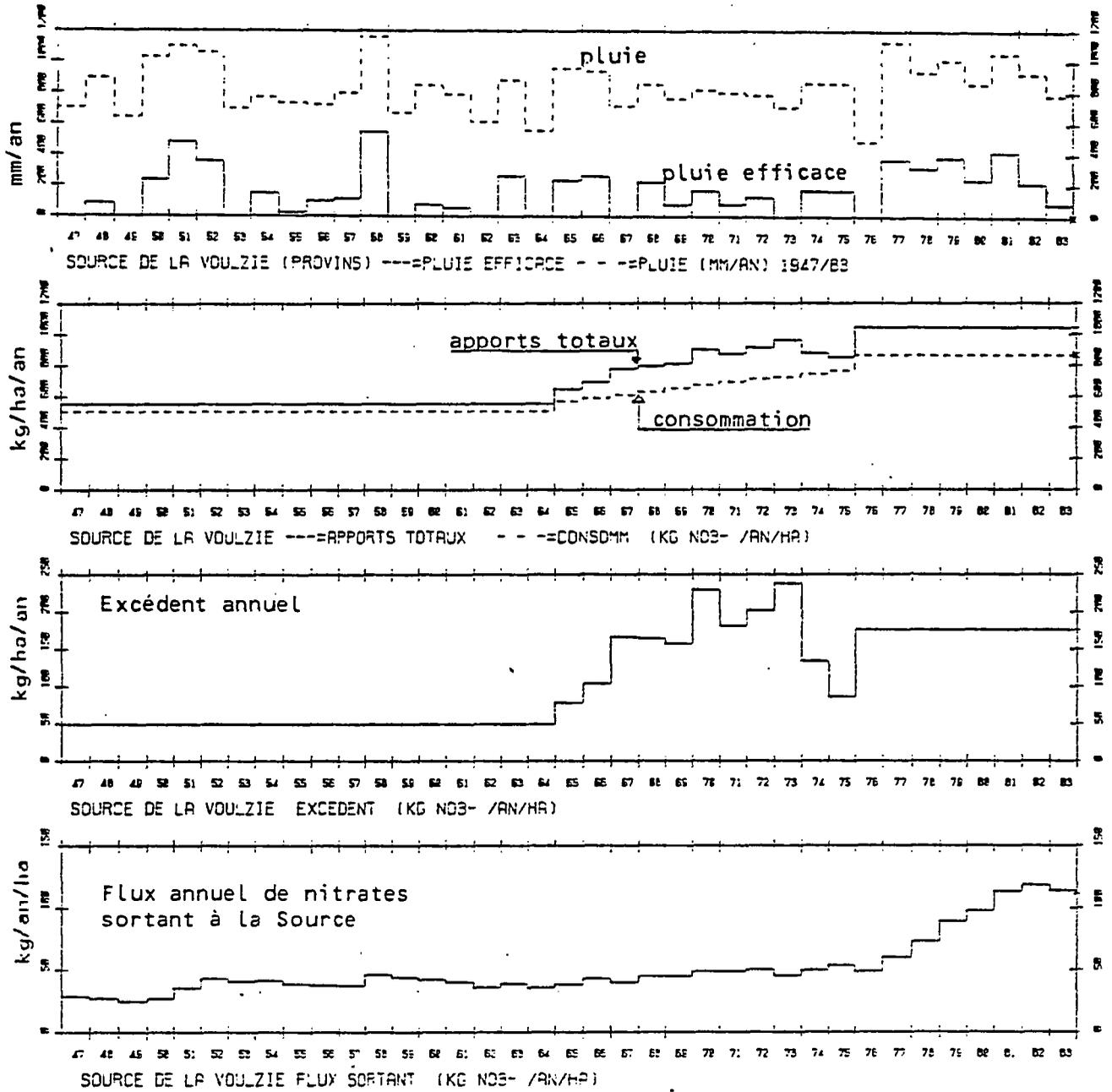


Figure 5 - Bilan annuel de 1947 à 1983

	Observée	Calculée
Concentration minimale	20.5	20.1
Concentration moyenne	34.5	34.5
Concentration maximale	54.5	57.2
Ecart-type de la concentration	9.5	8.8

**Tableau 7 - Caractéristiques de l'ajustement  
Valeurs mensuelles en mg/l**

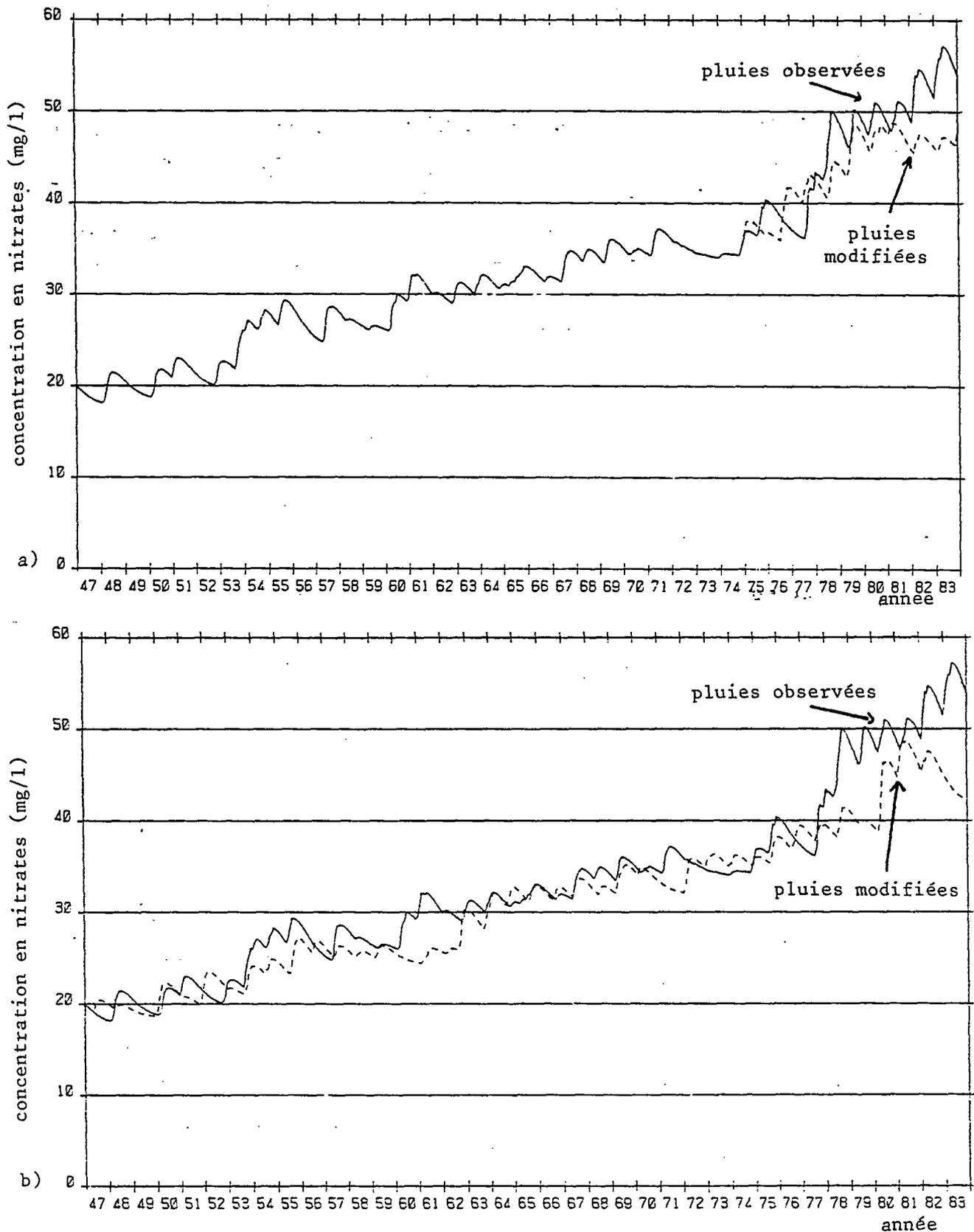
Le calage est satisfaisant comme le montre la figure 4.

La figure 5 présente la décomposition annuelle du fonctionnement du modèle de 1947 à 1983, dans l'hypothèse d'un départ en 1907 avec une concentration de 10 mg/l. Elle montre que l'excédent de nitrates augmente à partir de 1965. Mais comme il y a des pluies efficaces assez peu abondantes, il se produit un stockage dans les réservoirs superficiels et intermédiaires. Le flux sortant est donc peu différent. A partir de 1977, les pluies efficaces sont plus abondantes, et on observe une augmentation brutale du flux sortant.

## 5.6 - 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 de variations d'épandage et de besoins des plantes, ces variations pouvant être dues à des modifications volontaires des quantités de fertilisant apportées ou à des changements des cultures ou de l'occupation des sols (voir D. Thiery et J.J. Seguin, 1985).

Il peut également servir à mettre en évidence l'influence de la variabilité climatique sur les concentrations dans la source. Dans ce but on a réalisé deux simulations avec les paramètres hydrologiques et chimiques identifiés lors du calage mais avec des séquences de pluies différentes.



**Figure 6 - Mise en évidence de l'influence des variations climatiques sur la concentration en nitrates dans les sources de la Voulzie.**

**a) Séquence de pluie 1974/1983 remplacée par 1983/1974**

**b) séquence de pluie 1947/1983 remplacée par 1983/1947**

**N.B. Les pluies d'un mois donné (par exemple Avril) restent bien entendu le même mois (par exemple Avril)**

Il est évident que, à long terme, si les précipitations sont plus abondantes, on observera globalement un effet de dilution, la concentration étant inversement proportionnelle à la pluie efficace. En fait, en plus de cet effet, il faut prendre en compte la succession des années sèches et humides. Pour mettre en évidence l'effet de la succession des périodes sèches et humides on a réalisé deux simulations avec exactement la même moyenne de pluie sur les 77 années de la simulation mais avec une répartition différente dans le temps.

Pour la première simulation on a simplement changé la séquence des pluies de 1974 à 1983 en la remplaçant par la séquence 1983-1974 (mais en conservant bien entendu chaque mois à sa place). La figure 6-a montre que les concentrations sont assez modifiées puisqu'on observe plus une croissance très brutale en 1977 mais une augmentation plus régulière (commençant en 1976) n'atteignant que 47 mg/l en 1983 au lieu de 55 mg/l.

Pour la deuxième simulation on a remplacé toute la séquence de pluies 1947-1983 par la séquence inversée 1983-1947. La figure 6-b montre qu'on obtient alors également une croissance des concentrations mais que l'augmentation importante des concentrations ne se produit qu'en 1980 et qu'elle est de courte durée. La concentration en 1983 n'est que de 42 mg/l (au lieu de 55 mg/l pour la simulation de référence).

Ces simulations montrent très nettement l'influence de la variabilité climatique sur les concentrations en nitrates dans une source. Les variations de concentrations ne doivent pas être attribuées uniquement à des variations d'épandages (ou de changement d'occupation des sols) en présence de pluies moyennes mais également à la succession des pluies.

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.

## CONCLUSION

Cette application a montré comment il était possible d'utiliser un modèle global de simulation des transferts de nitrates (le modèle BICHE) pour étudier l'influence de la variabilité climatique sur la qualité de l'eau d'une source. Le modèle a d'abord été ajusté de façon à reproduire des historiques de concentrations mesurés dans une source. Un tel modèle qui fait intervenir des paramètres globaux doit être calé :

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

Le calage hydrologique est réalisé sur les variations de débit, au point de jonction des 3 captages du groupe de la Voulzie (Voulzie, Durteint, Dragon). Le calage chimique est réalisé sur la concentration en nitrates au même point.

Après calage le modèle a été utilisé pour mettre en évidence, sur 2 scénarios de séquences de pluies, comment la variabilité climatique affectait la concentration en nitrates dans la source, les épandages d'engrais et le plan d'occupation des sols étant inchangés. Ces simulations ont montré que certaines séquences comme une augmentation de l'excédent de nitrate pendant une année sèche (1976) suivie d'une année humide (1977) produisaient de fortes augmentations de concentrations qui se maintiennent pendant de longues périodes.

L'utilisation d'un modèle global de transfert de nitrates dans un bassin versant (modèle BICHE) permet de prendre en compte efficacement l'effet de la variabilité climatique et de réaliser des prévisions d'évolutions conditionnelles.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRGM** - Protection des captages d'eau potable de la Ville de Paris - Captage de la région de Provins (Voulzie, Durtient, Dragon).
- Lapierre (J.C.)** 1977.- Etude hydrochimique d'une émergence de nappe : La Petite Traconne - Agence Financière de Bassin Seine-Normandie, octobre 1977.
- Megnien (CL.)** 1976.- Hydrogéologie du Centre du Bassin Parisien - Contribution à l'étude de quelques aquifères principaux - Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Curie Paris VII, décembre 1976 - tome 1, pp. 329-335.
- Roche (P.A.), Thiery (D.)** 1984.- Simulation globale de bassins hydrologiques - Introduction à la modélisation et Description du modèle GARDENIA - Rapport BRGM 84 SGN 337 EAU, décembre 1984.
- Thiery (D.), Seguin (J.J.)** 1985.- 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.
- Thiery (D.), Seguin (J.J.)** 1985.- 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.



**Annexe I**

**PRINCIPE DU MODELE HYDROLOGIQUE GARDENIA**

## 1 - DOMAINE D'APPLICATION DU MODELE

Le modèle **GARDENIA** (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères) est un modèle global qui permet de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) à partir de la séquence des précipitations sur son bassin d'alimentation, ou bien :
- le niveau en un point unique d'une nappe à partir également des précipitations.

Il est exploité de façon courante pour l'extension des données, tant dans l'espace que dans le temps :

- génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calage préalable sur une période relativement courte ;
- étude des relations entre les paramètres du modèle et les facteurs physiographique décrivant le bassin ;
- transposition à des bassins versants non jaugés.

Dans la pratique, il permet de dimensionner différents types d'ouvrages (fondations, barrages) ou d'aménagements (captages en rivière, micro-centrales électriques), d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, de réaliser des prévisions en temps réel, etc...

En effet, le modèle une fois calé est en mesure :

- de reconstituer pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, ou le niveau piézométrique d'une nappe à partir des pluies, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures ;
- de simuler au choix :
  - des débits résultant de longues séries de précipitations, ou de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrages) ;
  - des niveaux piézométriques de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations possibles pour les mois futurs.

Il offre en plus la possibilité d'analyser d'une part les différents termes d'un cycle hydrologique (infiltration, évapo-transpiration, écoulement), d'autre part les

différentes composantes d'un écoulement (rapide, lent et très lent) dont il propose une décomposition (fig. A1).

Implanté sur le site central du BRGM, il est adaptable, par son écriture en Fortran standard, à tout autre ordinateur muni d'un compilateur de Fortran 77. Il existe en particulier une version sur micro-ordinateur compatible IBM/PC.

Le pas de temps des calculs peut être au choix, journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel ; le choix du pas de temps mensuel permet en particulier de mettre le modèle à la portée de nombreuses études, par la facilité d'analyse et de critique des données et le faible coût du traitement informatique (économie de temps et de place en mémoire). Pour une étude plus fine, ou après un premier dégrossissage, on pourra utiliser un pas de temps plus fin (1 jour ou 5 jours par exemple).

Enfin, ce programme est conçu pour enchaîner le traitement de plusieurs bassins, avec des options communes pour ces bassins. Il constitue donc un outil tout particulièrement adapté pour les synthèses régionales où l'on désire réaliser, avec une certaine cohérence, l'analyse de plusieurs bassins versants.

## 2 - PARAMETRES DU MODELE

Le modèle **GARDENIA** fait intervenir un nombre maximal de 8 paramètres "hydrologiques" (capacité de réserves superficielles, temps de tarissement, coefficient sur les pluies...), et éventuellement 7 paramètres pour tenir compte de stocks neigeux.

Ces paramètres sont les suivants :

\* 6 paramètres dimensionnels caractéristiques des différents réservoirs du modèle :

- . **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),

\* 2 coefficients correctifs destinés à prendre en compte, la non représentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées, vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant :

- . **CORPL (%)** Coefficient de correction des pluies chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées,
- . **CETP (%)** Coefficient de correction de l'évapo-transpiration potentielle, dont le but est similaire,

auxquels il faut éventuellement ajouter :

\* 7 paramètres caractéristiques pour simuler la gestion d'un stock de neige résultant de précipitations hivernales :

- . **GRADT (°C)** Constante de correction de la température destinée à tenir compte d'un éventuel écart entre la température moyenne la mieux représentative du bassin versant et la température fournie au modèle à partir d'une pondération effectuée sur différentes observations faites aux stations météorologiques les plus proches,
- . **DENSIM (%)** Pourcentage de rétention maximale d'eau liquide d'un stock neigeux,
- . **EVNE (%)** Coefficient caractérisant la sublimation du manteau neigeux dans une atmosphère où l'ETP n'est pas totalement satisfaite par les apports pluviométriques. Dans le modèle, un stock de neige, s'il est suffisamment fourni, perd par sublimation un volume d'eau équivalent à :  $PN \times (1 + EVNE/100)$ , où PN représente l'ETP résiduelle non satisfaite par la pluie,

---

(\*) Dans le cas d'un réservoir souterrain G unique avec deux exutoires, TG12 est le seuil de séparation entre les deux exutoires (il est exprimé en mm).

**Nota :** Dans un calcul de niveau de nappe, s'il y a 2 composantes souterraines, le choix d'un réservoir unique G à deux exutoires est imposé.

- . **FONP (%)** Pourcentage caractéristique de la fonte d'un stock neigeux, par une pluie PN à la température TEMP ; la quantité de neige susceptible de fondre par ce phénomène vaut :  $PN \times (1 + FONP/100) \times TEMP/80$  ; (80 correspond à la chaleur latente de fusion de la glace).
- . **TFONT (°C)** Seuil de température en dessous duquel la neige ne fond plus (proche de 0°C),
- . **DJOU**  
(mm/°C. jour) Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action d'un excès de température de 1°C au-dessus de TFONT (c'est le "degré-jour"),
- . **FSOL**  
(1/10<sup>e</sup> mm/jour) Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action des calories dégagées par le sol.

En outre, deux autres paramètres peuvent, sur option, être calculés par le modèle, à partir de l'équation de régression linéaire qui transforme :

- soit le niveau du réservoir souterrain du modèle en niveau piézométrique observé,
- soit la somme des vidanges des réservoirs du modèle en débit observé à l'exutoire.

Ces deux paramètres sont suivant le cas :

- le coefficient d'emménagement "équivalent" et le niveau de base local,
- ou la surface du bassin versant et un débit extérieur constant (ce débit extérieur constant étant le plus souvent imposé égal à zéro).

### 3 - LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE

Les paramètres globaux qui caractérisent le modèle, ne peuvent pas être mesurés sur le bassin. Les valeurs optimales de ces paramètres sont déterminées par un processus itératif à partir des valeurs initiales par recherche du meilleur ajustement entre observations et valeurs de sorties calculées par le modèle.

Pour ajuster le modèle, il faut disposer des données suivantes :

- une série de précipitations (pluies) (continue),
- une série d'évapotranspiration potentielle (ETP) (continue), qui peut être calculée à partir d'une série continue d'insolation et de température de l'air (et éventuellement d'humidité relative),
- une série continue de température de l'air (uniquement pour prendre en compte la fonte de la neige),
- une série (par forcément continue) de débits à l'exutoire du bassin ou de niveaux en un piézomètre.

Ces 3 (ou 4) séries doivent être disponibles sur la même période d'observations, et il est bon de disposer de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pendant au moins un an avant les mesures de débit (pour faciliter l'initialisation du modèle).

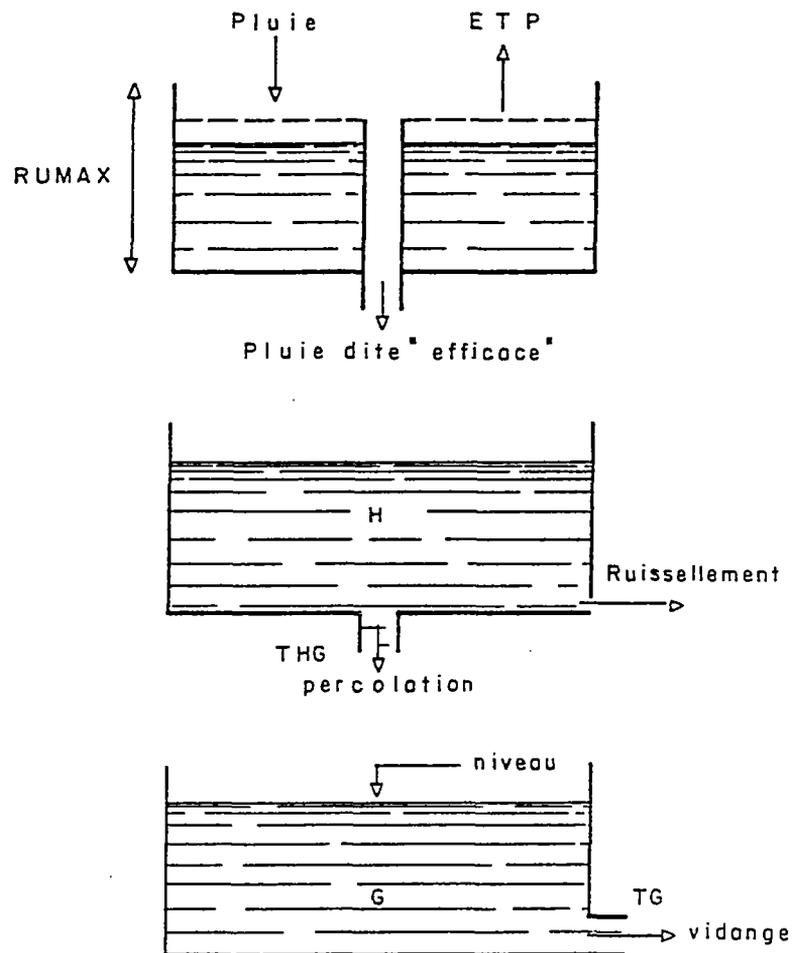


Figure A1 - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA



**Annexe II**

**PRINCIPE DU MODELE BICHE**

## 1. - BUT DU MODELE BICHE

Le modèle BICHE (Bilan CHimique des Eaux) se propose de simuler une concentration en nitrates mesurée au choix :

- dans un cours d'eau ou une source,
- ou dans un piézomètre d'observation.

Ce modèle est global, il ne permet donc de calculer la concentration qu'en un point unique à partir des données relatives au bassin versant correspondant et un jeu de paramètres globaux.

Pour utiliser le modèle BICHE, il faut disposer d'une série d'observations. En effet, les paramètres globaux ne peuvent pas être mesurés sur le terrain, mais doivent être calés par approximations successives de façon à reproduire le mieux possible ces observations.

## 2. - LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE

Le modèle BICHE fait intervenir des paramètres de deux types :

- des paramètres "hydrologiques" (capacité de réserves superficielles, temps de tarissement, coefficient sur les pluies...) au nombre de 8 ;
- des paramètres "chimiques" (cinétiques d'échange dans chaque réservoir, capacité en eau "immobile" de chaque réservoir, coefficients sur les apports et les besoins) au nombre maximum de 13, et généralement de l'ordre d'une dizaine.

Il est évident que les paramètres hydrologiques ont une influence sur les transferts de masse, et donc sur la concentration observée. Par contre, les paramètres chimiques n'ont aucune influence sur les transferts d'eau, donc sur les niveaux et les débits calculés.

La méthode préconisée consiste donc à réaliser un calage en deux étapes :

- a - calage des paramètres hydrologiques sur une série d'observations (pas forcément continue) de débits ou de niveaux aquifères ;

- b -** les paramètres hydrologiques étant déterminés, calage des paramètres chimiques sur une série d'observations (pas forcément continue) de concentrations mesurées dans un débit à l'exutoire ou dans un niveau piézométrique.

Il apparaît ainsi que pour ajuster le modèle il faut réaliser deux calages successifs. Il faut donc disposer des données suivantes :

**a - Calage hydrologique**

- . une série de précipitations (pluies) (continue),
- . une série d'Evapotranspiration Potentielle (ETP) (continue), qui peut être calculée à partir d'une série continue d'insolation et de température de l'air,
- . une série (pas forcément continue) de débits à l'exutoire du bassin ou de niveaux en un piézomètre.

Ces trois séries doivent être disponible sur la même période d'observations, et il est bon de disposer de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pendant au moins un an avant les mesures de débit (pour faciliter l'initialisation du modèle).

**b - Calage chimique**

- . une série de précipitations (pluies) (continues),
- . une série d'ETP (continue),
- . une série (pas forcément continue) de concentrations dans le débit sortant à l'exutoire du bassin ou dans un piézomètre d'observation sur le bassin,
- . une série d'épandages de nitrate (continue),
- . une série de besoins en nitrates des plantes, consommations potentielles (continue),
- . une série de minéralisations du sol (continue),
- . une série de libérations des nitrates par les résidus cultureaux (continue).

Ces 7 séries doivent être disponibles sur la même période d'observations.

**Remarque 1** - Les séries d'épandages de nitrate et de minéralisation du sol ne sont pas à proprement parler des séries, mais présentent des valeurs nulles ou négligeables sauf à quelques dates pendant lesquelles se produit l'épandage d'engrais ou la libération des nitrates par les résidus cultureaux.

**Remarque 2** - Il n'est pas absolument nécessaire que les périodes de calage hydrologique et de calage chimique soient les mêmes.

**Remarque 3** - On peut utiliser sur option le modèle BICHE uniquement pour calculer des niveaux ou des débits ; il n'y a alors évidemment pas de calage chimique.

### 3. - LES DONNEES "D'ENTREE" DU MODELE

Le bassin versant est considéré comme une entité caractérisée pour chaque pas de temps par des données globales suivantes :

#### a - données hydrologiques

- une lame d'eau (mm), une évapotranspiration potentielle (mm) ;

#### b - données chimiques

- une série d'apports de nitrates par épandage d'engrais (kg/ha)
- une série de besoins en nitrates des plantes (kg/ha)
- une série de minéralisation du sol (kg/ha)
- une série de libération de nitrates par les résidus culturaux (kg/ha).

**Remarque** - Comme on le voit, les données sont globales : on introduit comme entrée une "lame d'eau". De la même manière l'épandage d'engrais, les besoins en nitrates des plantes, la minéralisation doivent être considérés comme des "lames de nitrates", c'est-à-dire une valeur moyenne sur le bassin versant en kg/ha.

#### 3.1 - LA LAME D'EAU

La lame d'eau sur le pas de temps est une **moyenne pondérée** des précipitations des différentes stations relatives au bassin versant. Il est nécessaire d'effectuer au préalable une critique des données permettant la reconstitution des données brutes manquantes s'il y en a.

### **3.2 - L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)**

La valeur utilisée en France est généralement celle qui est calculée par la formule mensuelle de Turc à partir des données d'insolation, de température et éventuellement d'humidité. Toute autre méthode de calcul peut bien entendu être utilisée (Thornthwaite, Penman, etc...).

### **3.3 - L'EPANDAGE D'ENGRAIS ET DE FUMIER**

L'engrais ou le fumier est épandu généralement au printemps en une ou deux fois. La valeur épandue peut être déterminée par des enquêtes chez les agriculteurs ayant des champs sur le bassin versant connu ou supposé. Il est évident que comme pour la pluie, il faut déterminer une "lame de nitrate", c'est-à-dire finalement le nombre total de kilogrammes de nitrates épandus sur la totalité du bassin versant, divisé par la superficie du bassin versant.

Si on ne peut obtenir de valeurs exactes, on prendra les valeurs moyennes correspondant au type de culture pratiquée, et on pondèrera par la superficie de ces cultures divisée par la surface totale du bassin versant présumé. Le calage hydrologique permet généralement d'estimer correctement la superficie du bassin versant.

Il convient de ne pas oublier d'exprimer cet épandage en kilogramme de nitrates par hectare, et on se souviendra à ce propos que 1 kg d'azote correspond approximativement à 4,4 kg de nitrates.

### **3.4 - LA CONSOMMATION PAR LES PLANTES**

La consommation en nitrates par les plantes est bien entendu variable suivant le type de culture et le rendement à l'hectare. Cette consommation est généralement exprimée en kilogramme d'azote ou de nitrate par quintal produit. En première approximation, la consommation en nitrates d'un blé est de l'ordre de 3 kg d'azote par quintal de grain produit, soit pour un rendement de 50 quintaux à l'hectare de 150 kg d'azote par hectare. On retiendra donc une valeur de l'ordre de 660 kg de nitrate par hectare et par an. Cette consommation se produit environ de mars à juillet, avec un maximum en mai-juin.

### **3.5 - LA MINERALISATION PAR LE SOL**

La minéralisation du sol est due à la transformation des matières organiques (décomposition de débris végétaux) avec production de nitrates. Cette minéralisation dépend du type de sol, et aussi de la température ambiante. Elle ne dépend que très peu des cultures précédentes, car le sol contient une très forte quantité de matières organiques qui peuvent se décomposer pendant de nombreuses années sans qu'il soit réellement appauvri.

La quantité qui se minéralise chaque année est une très faible partie de cette quantité de matière organique. Il est assez difficile de connaître la quantité de nitrates minéralisée dans le sol. En première approximation, on peut estimer que cette minéralisation a lieu de mars à octobre avec un maximum au milieu de la période, soit vers le mois de juillet. La valeur annuelle est de l'ordre de 220 à 350 kg de nitrates par hectare et par an (50 à 80 kg d'azote par hectare).

### **3.6 - LIBERATION PAR LES RESIDUS DE CULTURES**

A l'automne, vers le mois de septembre, les plantes libèrent généralement une certaine quantité de nitrates qui était fixée dans et autour des racines, ainsi que dans les débris enfouis. La quantité nette d'azote libérée est de l'ordre d'une dizaine de kg par hectare, soit environ 44 kg de nitrates par hectare.

## **4 - LE FONCTIONNEMENT DU MODELE**

### **4.1 - RESERVOIRS DU MODELE**

Comme le modèle GARDENIA (rapport 84 SGN 337 EAU), dont il est issu, le modèle BICHE comprend au maximum 4 réservoirs ; cependant par l'intermédiaire des paramètres (et des options), il est possible d'utiliser un schéma simplifié ne faisant intervenir que 2 ou 3 réservoirs. Le schéma des réservoirs est précisé sur la figure 1.

Le modèle réalise en fait un bilan entre les apports et les consommations pour chacun des pas de calcul.

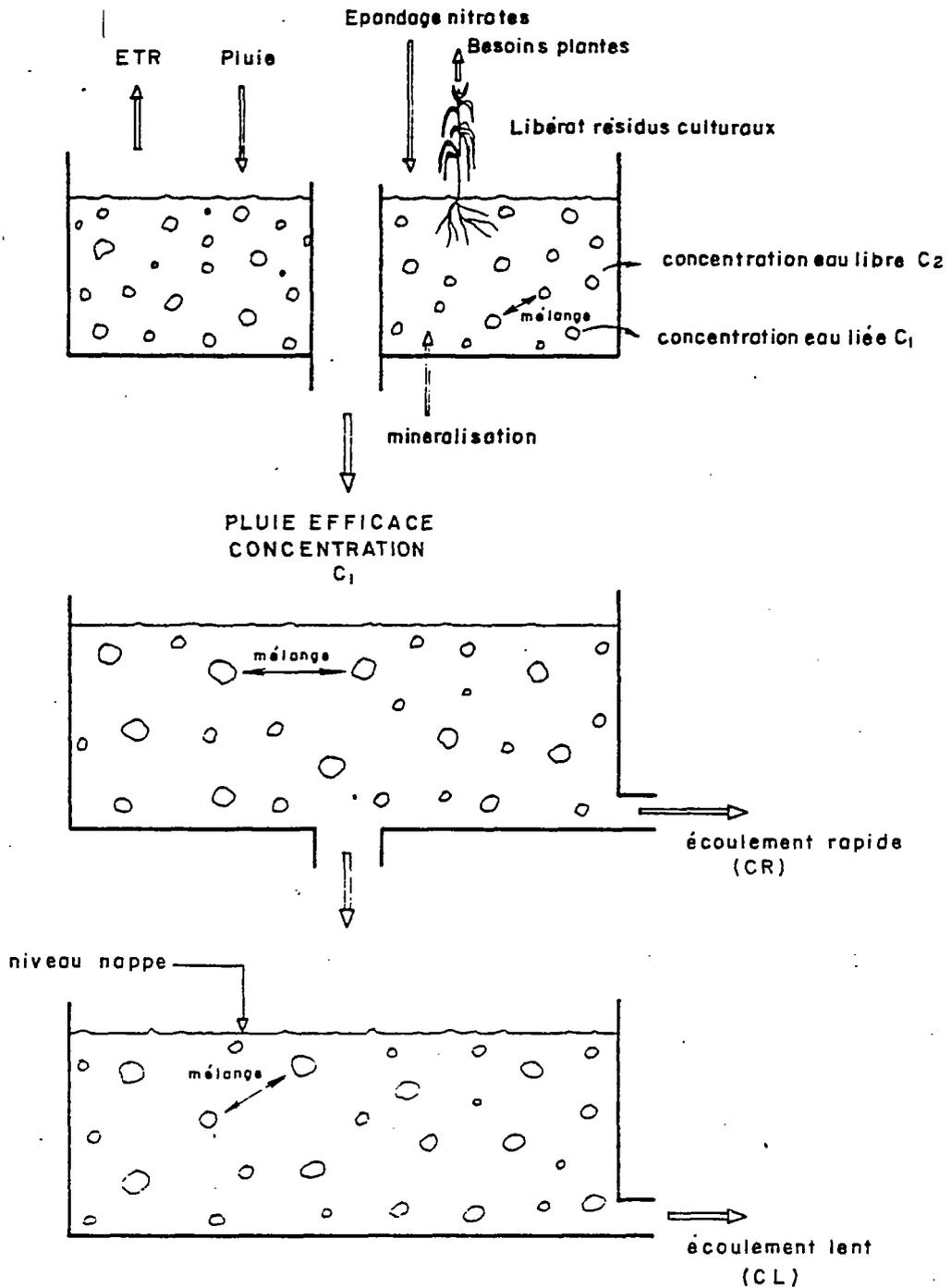


Figure 1 - Modèle BICHE - Principe du fonctionnement chimique

#### 4.2 - FONCTION "PRODUCTION" ET FONCTION "TRANSFERT"

Le calcul comporte deux parties traditionnellement appelées :

- fonction "production"
- fonction "transfert".

La fonction **Production** détermine quelle quantité d'eau et de nitrates sera apportée au modèle et quelle quantité sera évaporée (eau), consommée ou s'infiltrera dans les horizons inférieurs pour ressortir "plus tard".

La fonction **Transfert** détermine à quel moment l'eau et les nitrates qui n'ont pas été consommés, ressortiront à l'exutoire du bassin ou arriveront à la nappe. Le transfert s'effectue par passage à travers les 2 ou 3 réservoirs inférieurs du modèle et par fixation ou libération de nitrates dans l'eau liée des réservoirs.

réalisation  
service  
reprographie  
du BRGM

