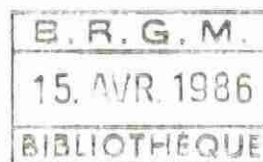




MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
DIRECTION DE LA PRÉVENTION DES POLLUTIONS
Service de l'Eau

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



85 SGN 663 EAU



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
DIRECTION DE LA PRÉVENTION DES POLLUTIONS
Service de l'Eau

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

D. Thiery
J.-J. Seguin

décembre 1985
85 SGN 663 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département Eau
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - Tél.: (33) 38.64.34.34

RESUME

Ce rapport réalisé à la demande du Ministre de l'Environnement dans le cadre de son programme d'études relatif à la protection des eaux souterraines (Convention 43/83) est composé de 2 parties :

- d'une part une description du modèle mathématique global BICHE de simulation des transferts de nitrates dans un bassin versant
- d'autre part -en annexe- trois exemples d'application du modèle : à un système de sources karstiques dans le département de la Meuse, aux sources de Provins, à un captage de Pithivier en Beauce.

Le modèle BICHE permet de simuler en continu l'évolution des concentrations en nitrates à l'exutoire d'un bassin versant hydrologique ou dans un piézomètre du bassin. C'est un modèle global qui effectue un bilan (au pas de temps journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel) entre les quantités de nitrates apportées (par épandage et par minéralisation du sol), consommées (par les plantes) et infiltrées (par les pluies efficaces). Les données nécessaires au modèle sont :

- les pluies et l'évapotranspiration potentielle sur le bassin versant,
- les données d'épandage d'engrais, de besoins des plantes et de minéralisation sur le bassin versant.

Les exemples d'application ont montré qu'il était possible de reproduire les historiques de concentrations observées et de prévoir l'évolution qui résulterait de différents scénarios d'épandages et d'occupation des sols. Pour obtenir des résultats fiables il faut disposer d'historiques de concentrations d'autant plus longs que le système a une réaction lente (3 à 5 ans pour un petit bassin rapide, 5 à 10 ans pour l'exemple de la Beauce et plusieurs dizaines d'années pour l'ensemble des sources de Provins). Pour rendre le modèle plus efficace et déterminer la précision à attendre des résultats il serait particulièrement intéressant de lui adjoindre une possibilité d'analyse de sensibilité automatique des résultats.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	
MODELE BICHE	
1 - BUT DU MODELE BICHE	5
2 - LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE	5
3 - LES DONNEES "D'ENTREE" DU MODELE	7
3.1 - La lame d'eau	8
3.2 - L'évapotranspiration potentielle (ETP)	9
3.3 - L'épandage d'engrais et de fumier	9
3.4 - La consommation par les plantes	10
3.5 - La minéralisation par le sol	10
3.6 - Libération par les résidus de culture	10
4 - LE FONCTIONNEMENT DU MODELE	11
4.1 - Réservoirs du modèle	11
4.2 - Fonction "Production" et fonction "Transfert"	15
4.3 - Initialisation	15
5 - LE BILAN DANS LA RESERVE SUPERFICIELLE	16
5.1 - Dissolution de l'engrais solide	16
5.2 - Libération par les résidus de cultures	17
5.3 - Apports de la réserve superficielle	17
5.4 - Consommation dans la réserve superficielle	17
5.5 - Mélange dans la réserve superficielle	17
5.6 - Vidange de l'excédent de la réserve superficielle	18
6 - TRANSFERT DANS LES RESERVOIRS INTERMEDIAIRES ET SOUTERRAINS	18
6.1 - Le réservoir intermédiaire	18
6.2 - Le réservoir souterrain G1	20
6.3 - Le réservoir souterrain lent G2	21
6.4 - Réservoir souterrain unique G	21
7 - LES GRANDEURS CALCULEES PAR LE MODELE	22
7.1 - Simulation hydrologique	22
7.2 - Simulation chimique	22

	Pages
8 - CALAGE DU MODELE	23
9 - LES PARAMETRES DU MODELE	26
9.1 - Les paramètres hydrologiques	26
9.2 - Les paramètres chimiques	27
10 - MODE D'EMPLOI DU MODELE BICHE	28
10.1 - Définition du nombre et du contenu des fichiers de paramètres	28
10.2 - Questions préliminaires posées par le programme	29
10.3 - Description du fichier des paramètres	31
11 - LES FICHIERS DES DONNEES HYDROCLIMATIQUES ET CHIMIQUES	43
12 - LES RESULTATS PRODUITS PAR LE MODELE	49
13 - EXEMPLE D'APPLICATION	51
14 - SIMULATION DU MELANGE ENTRE LES DEUX PHASES D'UN RESERVOIR	66
15 - ANALYSE DE LA MONTEE EN CONCENTRATION DANS UN RESERVOIR CONSTITUE DE DEUX PHASES	67
15.1 - Equation de continuité	67
15.2 - Système d'équations différentielles	69
15.3 - Résolution de l'équation caractéristique	71
15.4 - Résolution approchée dans le cas (le plus général) ou $k \ll 1$	72
15.5 - Calcul des constantes	73
15.6 - Cas particulier d'une cinétique instantanée	75
15.7 - Cas particulier d'une cinétique infiniment lente	76
15.8 - Cas particulier d'un flux liquide nul	76
15.9 - Exemples	77
15.10 - Liste de variable	80
16 - APPLICATIONS DU MODELE BICHE	81
CONCLUSION	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES	83
ANNEXE I - Application au site de Rembercourt-aux-Pots	85
ANNEXE II - Application au bassin des sources de la Voulzie	119
ANNEXE III - Application au captage AEP de Pithiviers (Beauce)	153

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 - Modèle GARDENIA à Schéma de fonctionnement hydrologique	12
Figure 2 - Schémas de transfert hydrologiques simplifiés	13
Figure 3 - Modèle BICHE - Principe du fonctionnement chimique	14
Figure 4 - Bilan dans la réserve superficielle	16
Figure 5 - Alimentation du réservoir souterrain G1	19
Figure 6 - Alimentation du réservoir souterrain G2	20
Figure 7 - Alimentation du réservoir souterrain G	21
Figure 8 - Bordereau pour des données pentadaires, décadaires ou mensuelles	44
Figure 9 - Bordereau pour des données journalières	45
Figure 10 - Bordereau de données journalières séquentielles	46
Figure 11 - Fichiers pour le programme BICHE	50
Figure 12 - Simulations concentration en nitrates - Voulzie 1947/83, 1907/83	64
Figure 13 - Analyse de sensibilité de deux paramètres du modèle BICHE	65
Figure 14 - Mise en régime avec phase mobile et phase fixe $\alpha = 0.05$ - Fort amortissement	78
Figure 15 - Mise en régime avec phase mobile et phase fixe $\alpha = VM/(VM+VF) = 0.20$ - Faible amortissement	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Exemple de données hydroclimatiques	47
Tableau 2 - Exemple de fichier de données agricoles	48
Tableau 3 - Fichier de paramètres pour une simulation hydrologique (sans prise en compte des transferts de nitrates)	52
Tableau 4 - Principaux résultats d'une simulation hydrologique	53
Tableau 5 - Fichier de paramètres pour une simulation des transferts de nitrates	54
Tableau 6 - Fichier de paramètres pour une simulation des transferts de nitrates (suite)	55
Tableau 7 - Paramètres en fin de calage	57
Tableau 8 - Devenir des nitrates depuis la fin de la période de démarrage	58
Tableau 9 - Bilan mensuel de l'année 1983	59
Tableau 10 - Bilan annuel de l'année 1983 et bilan annuel moyen	60
Tableau 11 - Exemple de fichiers de résultats : TABLEAU.LST, TABLCHIM.LST, MINMAXMOY.LST, MOYBILAN.LST	62

INTRODUCTION

Le département EAU du BRGM dispose déjà depuis un certain nombre d'années de modèles globaux de simulation PLUIE-DEBIT ou PLUIE-NIVEAU. Ces modèles globaux représentent le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau aquifère en un point. Ils sont globaux, car ils considèrent une "entrée" globale (une "lame d'eau" sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et une "sortie" unique (qui est suivant le cas le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point). Ils simulent le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premiers décimètres du sol dans lesquels se produit l'évapotranspiration,
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide,
- une ou deux zones aquifères qui produisent l'écoulement souterrain.

L'ensemble du système est décrit par un nombre maximum de 8 paramètres globaux (capacité du sol pour l'évapotranspiration, temps de demi-vidange des réservoirs, etc...). Le modèle hydrologique de ce type le plus récent est le modèle GARDENIA, décrit dans le rapport BRGM 84 SGN 337 EAU (modèle Global A Réservoir pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères).

Il nous a paru intéressant d'utiliser une même démarche globale pour simuler les transferts de nitrates apportés sous forme d'engrais et de minéralisation du sol, consommés en partie par les plantes et entraînés par les pluies vers les horizons inférieurs pour ressortir plus tard par les exutoires.

On a donc adapté le modèle pour lui permettre de simuler à partir d'un nombre limité de paramètres (une dizaine) la concentration mesurée dans un débit (de cours d'eau ou de source) ou dans un piézomètre d'observation.

Ce travail a été réalisé dans le cadre des travaux méthodologiques du département EAU.

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.

Le modèle a été écrit pour simuler les transferts de nitrates dans le sol, mais il pourrait être utilisé pour simuler tout autre type de transfert :

- transfert de polluants dont on connaît un épandage chronique ; il faut toutefois qu'il n'y ait pas de fixation irréversible du polluant dans le sol ;
- transfert naturel ou artificiel de calories ; on pourrait par exemple simuler la température dans une nappe ou dans le débit d'une source connaissant la température de l'air et les précipitations.

Toutefois, quelques modifications mineures permettraient de réaliser plus facilement de telles simulations de transfert de calories ou de polluants qui se fixent de façon irréversible, précipitent ou se décomposent.

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.

On pourrait en théorie envisager d'ajuster simultanément tous les paramètres pour simuler au mieux les concentrations mesurées. Le nombre total de paramètres qui serait de l'ordre de vingt serait alors tellement important qu'ils risqueraient d'être mal identifiés, et on obtiendrait des solutions probablement peu satisfaisantes. 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 n'est pas interdit cependant d'ajuster légèrement certains paramètres hydrologiques comme la capacité de rétention du sol lors de cette deuxième phase.

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 cultureux (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 cultureux.

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.

Les 4 séries de données "agricoles" sont groupées dans cet ordre dans un fichier unique (tab. 2).

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.

La lame d'eau se calcule par l'une des méthodes d'interpolation suivantes :

- moyenne arithmétique
- polygones de Thiessen
- autres pondérations arbitraires (avec ou sans correction des différences d'altitude)
- analyse en composantes principales
- krigeage.

Si plusieurs stations sont disponibles, il est conseillé de les utiliser toutes, pour l'analyse et la critique des données. Ensuite, on choisira un système de pondération qui réduira l'influence des erreurs aléatoires pouvant affecter certaines stations.

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...).

Les mesures sur le terrain, réalisées à l'aide de bacs ou d'évaporomètres sont parfois disponibles, mais rarement détaillées. Elles nécessitent d'être analysées avant exploitation.

Si l'on ne possède aucune donnée susceptible de fournir l'ETP pendant la période d'observation, on peut éventuellement utiliser les **moyennes interannuelles de chaque mois** sans commettre d'erreurs trop importantes (comparativement aux incertitudes portant sur l'évaluation des lames d'eau).

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 pondérera 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. Pour fixer les idées, un épandage d'engrais pour une culture de céréales avec un rendement moyen est de l'ordre de grandeur de 450 kg/ha de nitrates par an (100 kg/ha d'azote).

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 MINÉRALISATION 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 - LIBÉRATION 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.

Toutes les données "d'entrée" doivent être continues, c'est-à-dire ne comporter aucune donnée manquante. Ces données peuvent être échantillonnées suivant un des pas de temps suivants :

- 1 jour,
- 1 pentade : 365/72 jours,
- 1 décade : 365/36 jours = 2 pentades,
- 1 "mois" : 365/30 jours = 3 décades = 6 pentades.

Remarque - Le programme de calcul TRANSDON permet de calculer des données pentadaires, décadaires ou mensuelles à pas de temps égaux.

Chaque type de donnée peut être choisi à un pas de temps différent, mais les pluies doivent être au pas de temps le plus fin. Par exemple, on peut imaginer le cas suivant :

- pluies journalières,
- données "agricoles" mensuelles,
- concentrations observées pentadaires,
- débits observés pentadaires.

Le pas de temps de calcul sera le pas de temps le plus fin, c'est-à-dire celui de la pluie.

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 les figures 1 à 3.

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

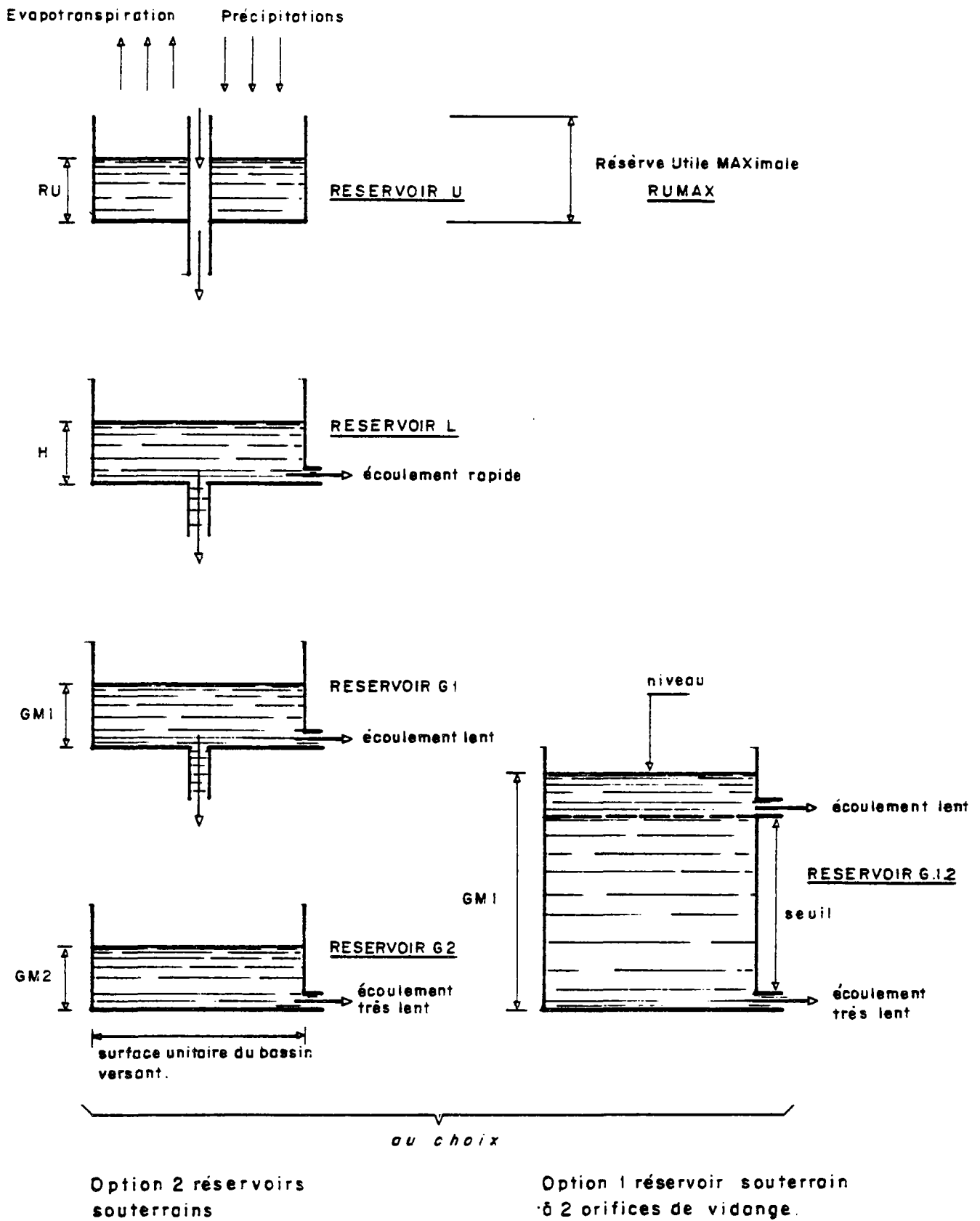


Figure 1 - Modèle GARDENIA - Schéma de fonctionnement hydrologique

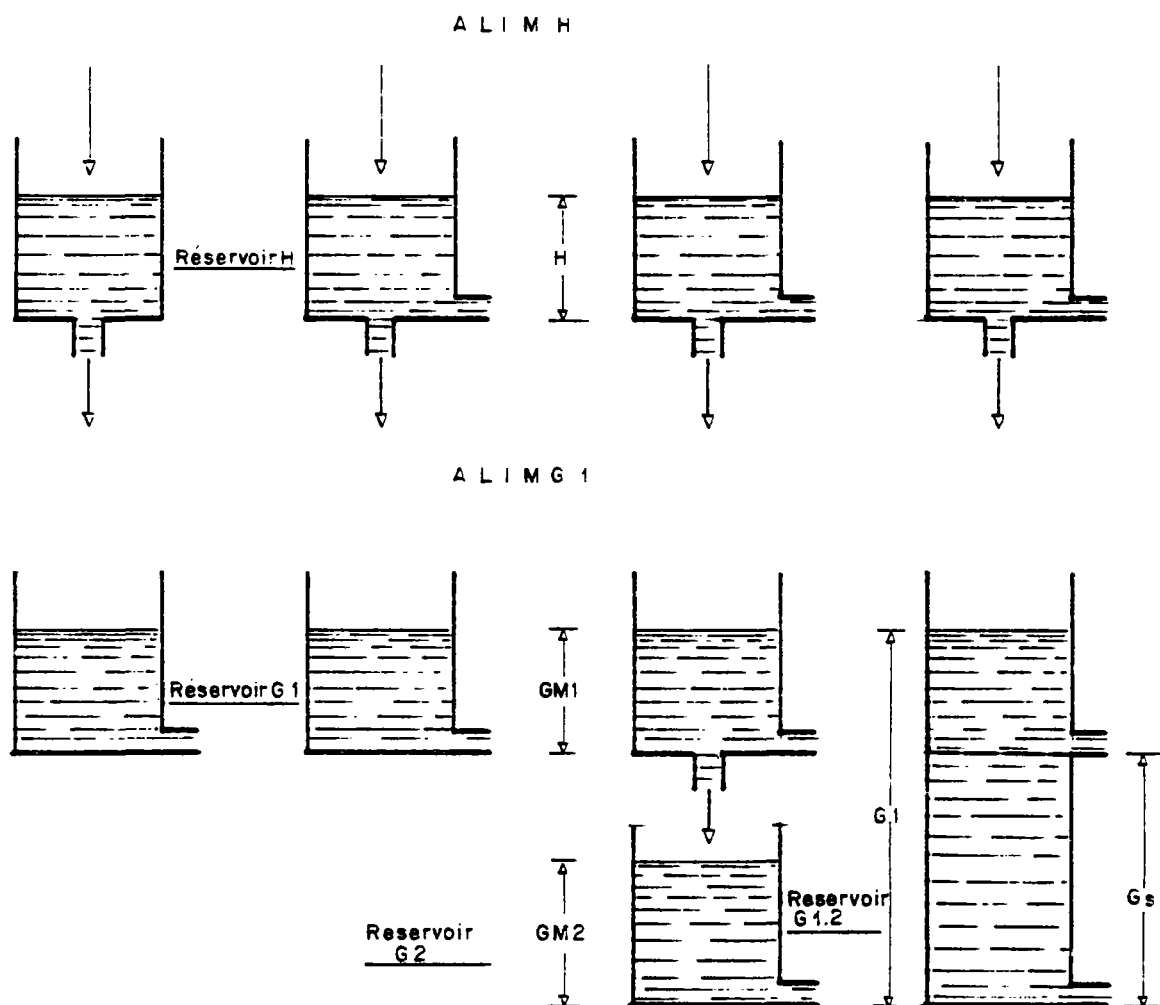


Figure 2 - Schémas de transferts hydrologiques simplifiés

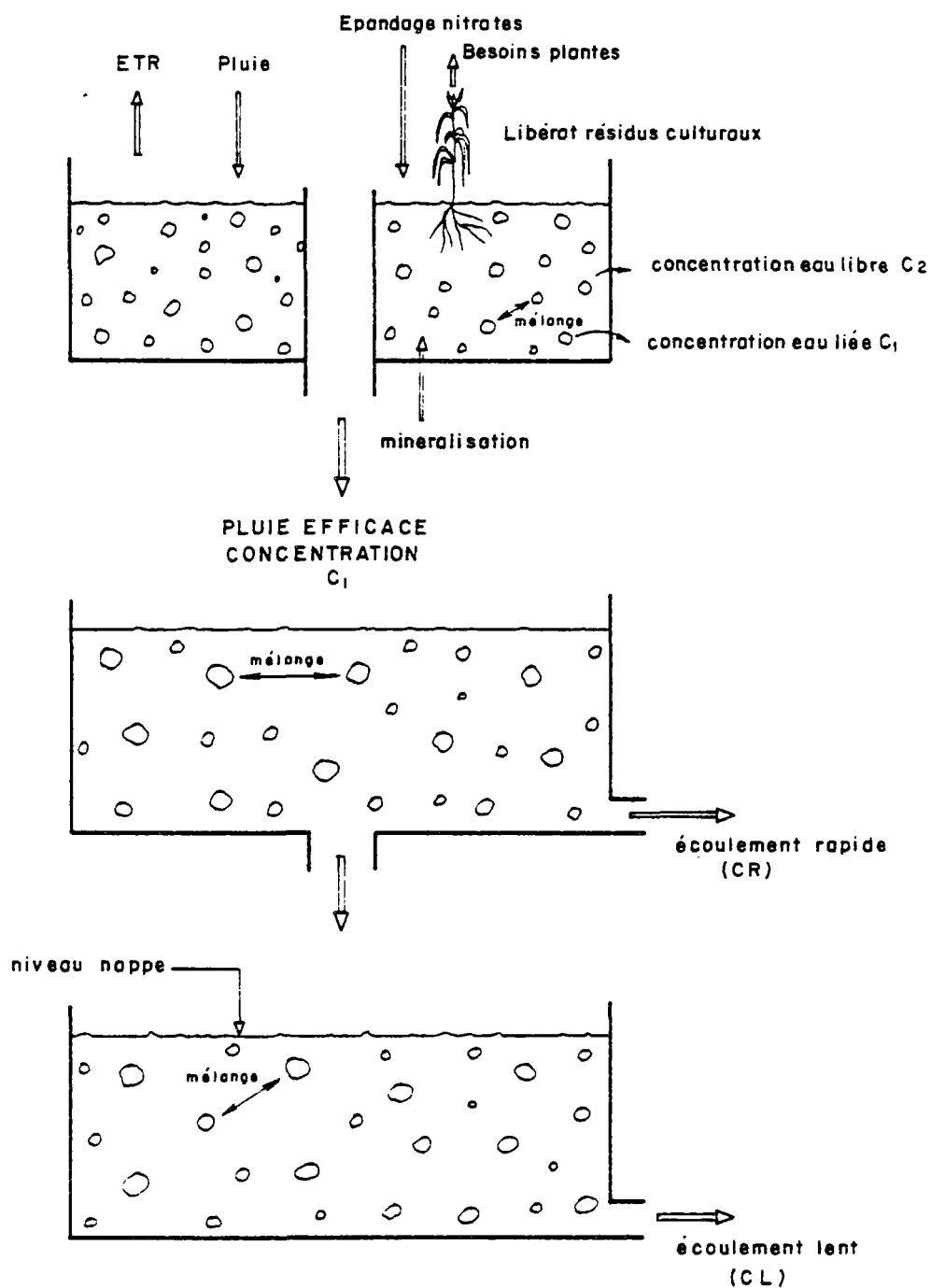


Figure 3 - Modèle BICHE - Principe du fonctionnement chimique

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.

4.3 - INITIALISATION

Il est évident que l'inertie hydrologique et chimique d'un système étant parfois considérable, le calcul des premières valeurs dépend énormément des conditions des années précédentes. Pour éviter les problèmes qui pourraient en résulter on a introduit dans le modèle la possibilité de prendre en compte quelques années de démarrage avant les premières observations hydrologiques ou chimiques. Cependant, la mise en régime étant parfois extrêmement lente (5, 10 années ou même plus pour les transferts de nitrates), on a procédé de la manière suivante :

- le modèle est placé en équilibre hydrologique en début de calcul, c'est-à-dire que le débit sortant est égal à la pluie (efficace) entrante ;
- l'utilisateur peut choisir, quand il y a un calcul de transferts de nitrates, :
 - . soit de se placer en équilibre chimique : le flux de nitrates sortant est égal au flux entrant diminué de la consommation des plantes,
 - . soit de partir d'un état fixe, défini par la concentration dans les réservoirs, de façon à prendre en compte le régime transitoire de la "montée en régime". Il arrive en effet que la durée du régime transitoire soit plus longue que la durée de la période d'observation.

5 - LE BILAN DANS LA RESERVE SUPERFICIELLE

Le principe du modèle BICHE est précisé sur la figure 4.

La fonction "production" est réalisée uniquement dans la réserve superficielle (nous n'employons pas -à dessein- le terme "réserve utile" ou "réserve facilement utilisable" qui est celui utilisé par les agronomes pour faire un bilan au niveau des racines des plantes, ce qui n'est pas exactement la même chose).

5.1 - DISSOLUTION DE L'ENGRAIS SOLIDE

On suppose que l'engrais est épandu à la SURFACE du sol en une ou plusieurs fois, et constitue un STOCK de nitrates. Quand surviennent des pluies P, une partie ou la totalité du stock est dissout et pénètre dans la réserve superficielle. Une pluie P ne peut dissoudre le STOCK que jusqu'à une concentration maximale CONMAX et ne faire pénétrer qu'une quantité NITMAX dans la réserve superficielle :

$$\text{NITMAX} = P \cdot \text{CONMAX}$$

L'excédent éventuel serait dissout lors des précipitations futures. Ce paramètre permet en fait de retarder la dissolution des nitrates.

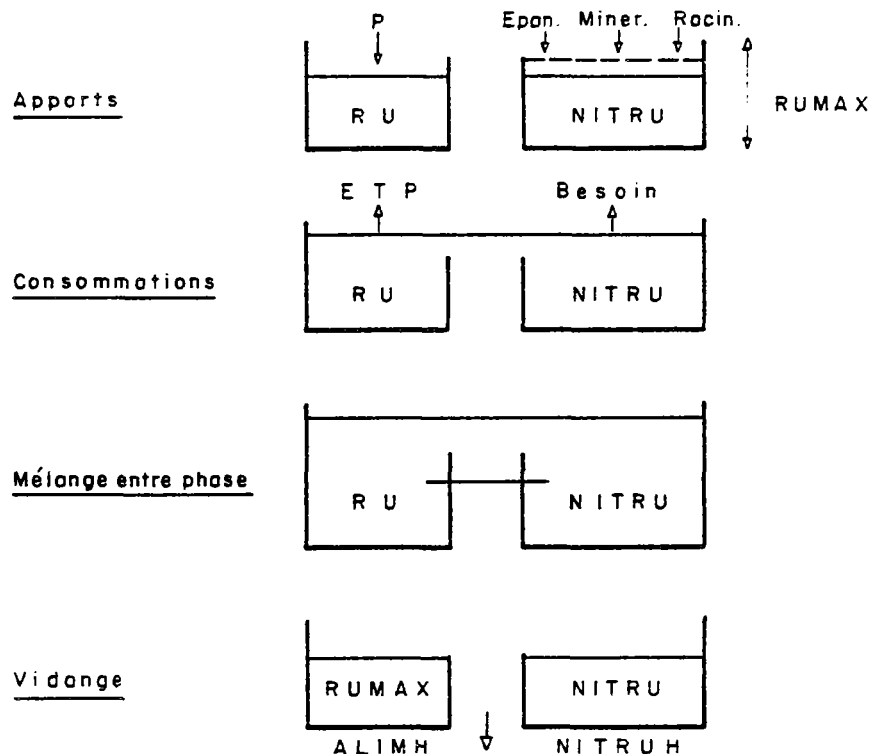


Figure 4 - Bilan dans la réserve superficielle

5.2 - LIBERATION PAR LES RESIDUS DE CULTURE

On considère qu'à une certaine date se produit une libération "brutale" (de nitrates et de matière organique) RACIN par les racines des plantes. Cette quantité libérée est rendue disponible progressivement dans l'eau libre de la réserve superficielle de manière exponentielle selon une cinétique linéaire de constante de temps TRACIN. Si le stock libéré par les racines est égal à STORAC, on a donc à chaque pas de temps dt la quantité RACLIB qui est libérée :

$$RACLIB = STORAC \cdot dt / TRACIN$$

5.3 - APPORTS DE LA RESERVE SUPERFICIELLE

Les apports de la réserve superficielle sont les suivants :

- apports en eau : pluie,
- apports en nitrates : engrais dissous, minéralisation, libération par les racines.

Remarque - A ce stade, après apport de la pluie, la quantité d'eau dans la réserve superficielle peut dépasser la valeur maximale RUMAX.

5.4 - CONSOMMATION DANS LA RESERVE SUPERFICIELLE

On observe alors les consommations suivantes :

- consommation d'eau : évapotranspiration potentielle (dans la limite de la quantité d'eau disponible),
- consommation de nitrates : besoin en nitrates des plantes (dans la limite de la quantité de nitrates disponible).

5.5 - MELANGE DANS LA RESERVE SUPERFICIELLE

Après les apports et les consommations en eau et en nitrates, il subsiste une masse NITRU de nitrates dans un volume RU d'eau. Il y a également une masse NITFIX de nitrates dans un volume RUFIX d'eau immobile qui subsistait à la fin du pas de temps précédent ; il y a alors un mélange entre la phase mobile (NITRU, RU) et la phase immobile ou fixe (NITFIX, RUFIX), selon une cinétique linéaire comme on le précisera plus loin ; si $RU = 0$, la totalité de la masse NITRU passera dans la phase fixe. Après ce mélange, il reste une masse NITRU dans un volume d'eau RU, soit une concentration CONRU :

$$CONRU = NITRU / RU$$

Remarque - On appellera par suite, par abus de langage, "eau liée" cette eau qui est retenue dans la microporosité, qui ne s'écoule pas par gravité et n'est pas reprise par évapotranspiration.

5.6 - VIDANGE DE L'EXCEDENT DE LA RESERVE SUPERFICIELLE

Si la hauteur RU de la réserve superficielle dépasse la valeur de rétention RUMAX, l'excédent ALIMH sort de cette réserve et pénètre dans le réservoir intermédiaire H :

$$\text{ALIMH} = \text{RU} - \text{RUMAX}$$

La concentration de l'excédent étant CONRU, il y a donc en même temps une vidange de nitrates NITRUH de la réserve RU vers le réservoir H :

$$\text{NITRUH} = \text{ALIMH} \cdot \text{CONRU}$$

Si le volume d'eau RU est inférieur à la valeur RUMAX, on a :

$$\text{ALIMH} = 0 \text{ et } \text{NITRUH} = 0$$

6 - TRANSFERT DANS LES RESERVOIRS INTERMEDIAIRES ET SOUTERRAINS

6.1 - LE RESERVOIR INTERMEDIAIRE

Le réservoir intermédiaire H est alimenté en eau et en nitrates par la réserve superficielle ; il est vidangé par deux exutoires :

- par percolation dans le réservoir souterrain G1 suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

$$\text{ALIMG} = H \cdot dt / \text{THG}$$

(dt étant le ps de temps) ;

- par écoulement à l'extérieur sous forme de "débit retardé" QH suivant une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER qui est en fait la hauteur de H pour laquelle la percolation ALIMG et l'écoulement QH sont égaux :

$$\text{QH} = H \cdot dt / (\text{THG} \cdot \text{RUIPER} / H)$$

Cet écoulement non linéaire est prépondérant quand l'état de remplissage H est élevé ; la percolation est plus importante quand l'état de remplissage H est plus bas (le rapport QH/ALIMG est égal à H/RUIPER) (fig. 5).

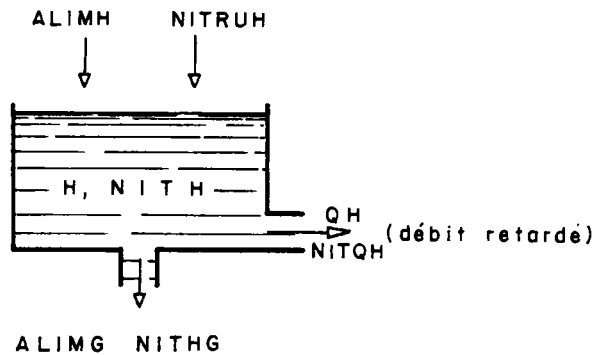


Figure 5 - Alimentation du réservoir souterrain G1

L'évapotranspiration et la consommation des plantes n'agissent pas dans ce réservoir, qui ne sert qu'au transfert. Comme dans la réserve superficielle, il y a deux phases : une phase formée d'un volume H (variable) d'eau libre contenant une masse $NITH$ de nitrates et une phase de volume $HFIX$ (constant) d'eau liée contenant une masse $NITFIX$ de nitrate. Le calcul s'effectue de la manière suivante :

- apport d'eau $ALIMH$ (provenant de la réserve superficielle),
- apport de nitrates $NITRUH$,
- mélange entre les phases suivant une cinétique linéaire, d'où une concentration $CONH$ dans l'eau liée : $CONH = NITH / H$
- vidange $ALIMG$ et QH à la concentration $CONH$, soit les transferts de masses suivants : $NITHG = ALIMG \cdot CONH$
 $NITQH = QH \cdot CONH$

6.2 - LE RESERVOIR SOUTERRAIN G1 (fig. 6)

Le réservoir souterrain G1 est alimenté en eau et en nitrates, par le réservoir intermédiaire H. Il est vidangé par deux exutoires dans le cas le plus général :

- par percolation dans le réservoir souterrain lent G2, suivant une vidange exponentielle de constante de temps TG12 :

$$ALIMG2 = G1 \cdot dt / TG12$$

cette percolation peut être supprimée dans les cas simples où il n'est pas nécessaire de faire intervenir deux composantes souterraines ;

- par écoulement vers l'extérieur sous forme de débit souterrain QG1, suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG1 :

$$QG1 = G1 \cdot dt / TG1$$

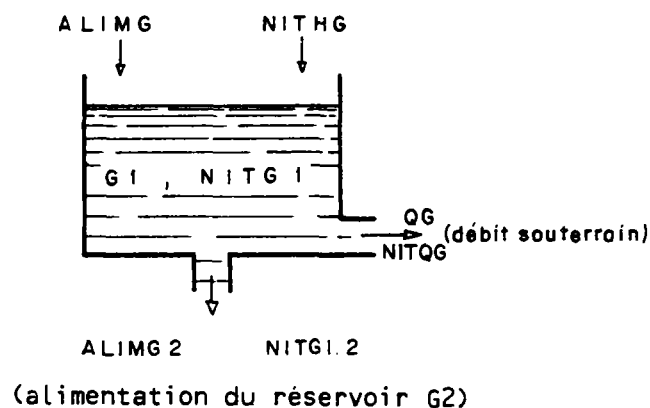


Figure 6 - Alimentation du réservoir souterrain G2

Comme dans le réservoir intermédiaire H, il y a deux phases : une phase formée d'un volume G1 (variable) d'eau libre contenant une masse NITG1 de nitrates et une phase de volume G1FIX (constant) d'eau liée contenant une masse NITFIX de nitrates. Comme pour le réservoir intermédiaire H, le calcul s'effectue de la manière suivante :

- apport d'eau ALIMG1 (provenant du réservoir H),
- apport de nitrates NITHG1,
- mélange entre les phases suivant une cinétique linéaire, d'où une concentration CONG1 dans l'eau liée : $CONG1 = NITG1 / G1$
- vidange ALIMG2 (éventuellement) et QG1 à la concentration CONG1 : soient les masses de nitrates :
 - . $NITG12 = ALIMG2 \cdot CONG1$, vers G2
 - . $NITQG1 = QG1 \cdot CONG1$, vers l'extérieur.

6.3 - LE RESERVOIR SOUTERRAIN LENT G2

Ce réservoir, quand il existe, est alimenté en eau et en nitrates par le réservoir souterrain G1 ; il est vidangé uniquement sous forme de débit souterrain lent QG2. Un tel débit souterrain est parfois nécessaire pour représenter une composante très lente dans un écoulement.

6.4 - RESERVOIR SOUTERRAIN UNIQUE G

Il est parfois plus avantageux d'utiliser un seul réservoir G à deux exutoires séparés par un seuil. Un tel réservoir simule par exemple la mise en service d'un deuxième griffon (orifice) quand le niveau d'eau dépasse la valeur d'un seuil. Il peut également simuler une cote de débordement ou bien simplement représenter le fait qu'une courbe de tarissement descend plus rapidement au début (quand les deux exutoires débitent simultanément) qu'à la fin quand seul l'exutoire le plus profond est en service. Cette configuration est particulièrement intéressante pour la simulation des niveaux aquifères et des concentrations dans les piézomètres (fig. 7).

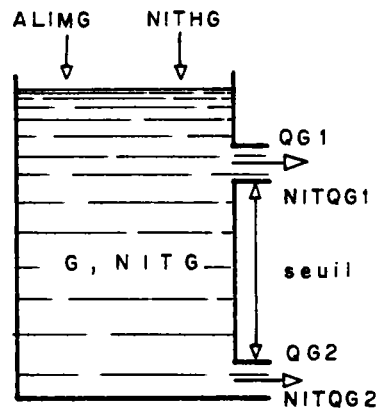


Figure 7 - Alimentation du réservoir souterrain G

Un tel réservoir, qui remplace donc le réservoir G1 et l'éventuel réservoir G2, produit donc suivant le cas, un ou deux débits par lequel il se vidange :

- . $QG2 = G \cdot dt / TG2$
- . $QG1 = (G - SEUIL) \cdot dt / TG1$,
si G est supérieur au SEUIL.

Dans ce réservoir unique, il y a deux phases : une phase de volume G (variable) d'eau libre contenant une masse NITG de nitrates et une phase de volume GFIX (constant) d'eau liée contenant une masse NITFIX de nitrates. Dans un but de simplification, on a considéré qu'il n'y avait qu'une cinétique d'échange et qu'une masse d'eau liée dans ce réservoir et non pas une cinétique et une masse d'eau liée pour chacune des parties du réservoir.

7 - LES GRANDEURS CALCULEES PAR LE MODELE

Elles sont différentes suivant l'utilisation du modèle.

7.1 - SIMULATION HYDROLOGIQUE

Deux cas sont possibles ; la valeur calculée peut être :

- soit le débit Q à l'exutoire du bassin versant : c'est la somme des trois composantes de l'écoulement :

$$Q = Q_H + Q_{G1} + Q_{G2}$$

- soit le niveau piézométrique N représentatif de l'aquifère étudié :
 $N = G1$ ou $N = G$ (suivant le cas).

Le débit est proportionnel à la somme des écoulements sortant des réservoirs.

Le niveau piézométrique est proportionnel au niveau N dans le réservoir souterrain.

7.2 - SIMULATION CHIMIQUE

Là encore deux cas sont possibles ; la valeur calculée peut être :

- soit la concentration $CONQ$ dans le débit Q à l'exutoire :

$$CONQ = (N_{ITH} + N_{ITG1} + N_{ITG2}) / Q$$

- soit la concentration $CONG$ dans le réservoir G qui représente l'aquifère :

$$CONG = N_{ITG1} / G1$$

$$CONG = N_{ITG} / G \quad \text{selon le cas}$$

On remarque qu'on ne peut pas calculer la concentration quand le débit Q calculé ou le niveau G calculé sont nuls. Pour éviter des problèmes numériques, on a considéré qu'on ne connaissait pas la concentration calculée quand Q ou G (selon le cas) est inférieur à 1/10 de millimètre (par pas de temps pour Q).

8 - CALAGE DU MODELE

Le modèle est caractérisé par un certain nombre de paramètres globaux qui ne peuvent pas être mesurés sur la bassin. Les valeurs optimales de ces paramètres sont alors déterminées par un **processus itératif** à partir de valeurs initiales par recherche de la meilleure corrélation entre observations et valeurs de sortie calculées par le modèle.

La méthode d'optimisation est fondée sur une adaptation de l'algorithme non linéaire de **Rosembrock**. Le but de la méthode est de **minimiser une fonction critère F**, en faisant **varier successivement p paramètres**.

La fonction critère retenue est une caractéristique de l'écart entre les débits, charges ou les concentrations calculés et observés, liés par la relation :

$$Y = AX + B + \epsilon$$

où

ϵ écart de simulation

- **pour un calcul de débit**

X somme des vidanges des réservoirs du modèle en mm/pas de temps

Y débit mesuré à l'exutoire en m³/s

A surface du bassin versant en mètres-carré (divisée par la durée du pas de temps)

B débit extérieur constant (généralement 0) en m³/s.

- **pour un calcul de niveau piézométrique**

X niveau en mm dans le réservoir souterrain

Y niveau piézométrique mesuré en mètres au dessus d'un niveau de référence

A inverse du coefficient d'emmagasinement (divisé par 1000)

B niveau de base local en mètres.

Remarque - A est l'inverse du coefficient d'emmagasinement (divisé par 1000) uniquement si le point d'observation est situé loin d'une limite à potentiel imposé (cours d'eau), sinon A sera plus petit (le coefficient d'emmagasinement apparent qui en serait déduit serait alors trop élevé).

- pour un calcul de concentration
- X concentration dans le débit de sortie du modèle ou dans le réservoir souterrain du modèle en mg/l (c'est-à-dire 100 fois kg/ha)
- Y concentration mesurée en mg/l
- A = 1 (coefficient d'amplitude unité)
- B = 0 (concentration constante nulle)

A et B peuvent être imposés ou calculés par le modèle. La fonction F1 à minimiser est :

$$F1 = - \sqrt{1 - \frac{\sum p (Y - AX - B)^2}{VARY}}$$

où

p est un éventuel coefficient de pondération,

et

VARY est la variance des observations.

On voit immédiatement que si A et B sont calculés par le modèle, à la pondération près, F1 est l'opposé du coefficient de corrélation R entre la série observée Y et la série calculée AX+B (on prend l'opposé du coefficient de corrélation car pour maximiser R, on minimise F1 = -R). Quand Y et X sont affines, R est égal à +1. Si A et B sont imposés, F1 est l'opposé d'un coefficient "d'ajustement" et n'atteint sa valeur minimale que quand Y et AX+B sont égaux (et non plus affines).

La méthode d'optimisation est itérative. Pour déterminer rapidement le jeu optimal de paramètres, il est conseillé :

- d'attribuer à chaque paramètre une valeur initiale aussi réaliste que possible ;
- de fixer un nombre d'itérations MAXIT suffisant (environ 100 à 150).

Assez rapidement, la valeur du critère d'optimisation F1 ne diminue pratiquement plus. La solution optimale est atteinte lorsque chaque paramètre atteint une valeur stable.

Il serait possible d'optimiser tous les paramètres à la fois, mais ce n'est pas forcément souhaitable. En effet, il est plus sûr que l'utilisateur contrôle le réalisme et la validité des paramètres obtenus. la convergence est d'autant plus lente, qu'il y a plus de paramètres à optimiser : cela conduit donc à des temps de calcul très longs, alors qu'une optimisation fixant temporairement une partie des paramètres à des valeurs réalistes permet d'améliorer rapidement la qualité des ajustements. Les paramètres qui étaient fixés peuvent alors être libérés pour terminer le calage.

En pratique, le nombre de paramètres à optimiser simultanément ne devrait pas trop dépasser une dizaine, mais le modèle permet d'en optimiser jusqu'à 20.

L'optimisation des paramètres est réalisée par le sous-programme de calcul ROSACE qui est une version améliorée de la méthode d'optimisation non linéaire de ROSEMBROCK. Cette méthode procède par tâtonnements successifs en évoluant plus rapidement dans les directions qui produisent les améliorations les plus significatives du calage. Le calage s'effectue par une suite d'optimisations de ce type, l'utilisateur restant seul juge de la qualité de la décomposition de l'écoulement qui a été trouvée par le modèle pour optimiser un critère qui reste toujours une évaluation très globale de la "qualité" d'une simulation.

Une option permet de privilégier plus ou moins les faibles valeurs de débits par une pondération effectuée au moment du calcul du critère d'ajustement. Cette option n'a pas lieu d'être si on simule les concentrations.

Pour chaque paramètre, on peut préciser une valeur minimale et une valeur maximale. Lors des calculs d'optimisation les paramètres resteront toujours compris entre ces deux valeurs, ce qui permet d'éviter un calage avec des valeurs peu réalistes. On évite ainsi que les premiers calculs d'optimisation "se perdent" vers des valeurs peu physiques qu'ils auront du mal à quitter ensuite.

9 - LES PARAMETRES DU MODELE

Ils sont au nombre de 8 paramètres hydrologiques + 13 paramètres chimiques, soit 21 paramètres (+ 2 paramètres d'amplitude). Si on ne simule pas les transferts chimiques, il y a uniquement 8 paramètres (+ 2 paramètres d'amplitude).

9.1 - LES PARAMETRES HYDROLOGIQUES

Ils se divisent comme suit :

- Les paramètres dimensionnels (caractéristiques des différents réservoirs) sont :
 - . RUMAX (mm) Réserve superficielle maximale, du réservoir RU
 - . THG (mois) Temps de 1/2 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 1/2 tarissement du réservoir G1
 - . TG12(1) (mois) Temps de 1/2 montée du réservoir G2 (temps de 1/2 transfert de G1 à G2)
 - . TG2 (mois) Temps de 1/2 tarissement du réservoir G2 (temps de 1/2 tarissement de base).

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

- Les coefficients correctifs sont 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 (en %) Coefficient de correction des pluies pour compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées.
 - . CETP (en %) Coefficient de correction d'ETP, dont le but est similaire

(1) 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).

9.2 - LES PARAMETRES CHIMIQUES

Ils sont au nombre de 13 et se divisent ainsi :

- 4 **volumes d'eau liée** dans les 4 réservoirs : RUFIX, HFIX, G1FIX et G2FIX ; ces volumes exprimés en mm correspondent aux réservoirs RU, H, G1 et G2 ; dans le cas d'un réservoir souterrain G unique à deux exutoires, c'est la valeur G1FIX qui sera seule utilisée ;
- 5 **cinétiques d'échanges ou de mélange** exprimés en demi-temps d'échange : TRACIN, TMELRU, TMELH, TMELG1, TMELG2 ; ces temps sont exprimés en mois ; TRACIN correspond au temps de demi-mobilisation du stock libéré par les résidus cultureux (racines) à l'automne. Les quatre autres temps sont les temps de demi-mélange entre les phases libres et liées des 4 réservoirs RU, H, G1 et G2. Dans le cas d'un réservoir souterrain G unique à deux exutoires seule la valeur TMELG1 sera utilisée et non celle de TMELG2 ;
- 3 **coefficients correctifs** destinés à corriger les entrées "chimiques" qui ne sont généralement connues que très approximativement d'après des enquêtes auprès des agriculteurs, et d'après examen des sols : **COREPA**, **CORBES** et **CORMIN** ; ces coefficients de corrections sont exprimés en pourcent, et s'appliquent respectivement à l'épandage, aux besoins des plantes et à la minéralisation du sol ;
- 1 **concentration maximale de la pluie CONMAX** : la dissolution par la pluie de l'engrais solide épandu à la surface du sol est réglée par le paramètre **CONMAX** qui est la concentration maximale en nitrates que peut prendre la pluie ; cette valeur est exprimée en mg/l ; par exemple, une valeur de 200 indique qu'une pluie de 150 mm ne pourra pas dépasser la concentration de 200 mg/l, soit $200 \text{ mg/l} \text{ fois } 150 \text{ l/m}^2 = 300 \text{ kg/ha}$.

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

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

Comme on l'a dit plus haut, ces deux paramètres sont, suivant le cas :

- le coefficient d'emmagasinement "équivalent" et le niveau de base ;
- la surface du bassin versant et un débit extérieur constant.

Pour un calcul de concentration, ces paramètres seront fixés. L'amplitude est égale à 1 ; le terme constant est égal à zéro.

10 - MODE D'EMPLOI DU MODELE BICHE

Le programme BICHE est écrit en interactif, c'est-à-dire qu'un certain nombre de questions sont posées à l'utilisateur (sur la console) et qu'un certain nombre de "menus" lui sont présentés parmi lesquels il doit choisir celui qui lui convient le mieux.

10.1 - DEFINITION DU NOMBRE ET DU CONTENU DES FICHIERS ET DE PARAMETRES

Les données climatiques, hydrologiques et agricoles(1), et les paramètres sont sur des fichiers qui sont au nombre de 1 à 5, suivant les options choisies. Il est en général conseillé d'avoir un fichier pour chaque type de données, soit :

- un fichier pour les paramètres de départ du modèle,
- un fichier pour la pluie,
- un fichier pour l'évapo-transpiration potentielle,
- un fichier pour les données agricoles(1) (s'il y a lieu de modéliser les transferts de nitrates),
- un fichier pour les débits, niveaux ou concentrations observés (s'il y en a), c'est-à-dire pour le calage.

Il est possible de regrouper toutes les données dans un seul et même fichier, mais ce n'est pas souhaitable, car ce système manque de souplesse, surtout quand plusieurs bassins sont étudiés simultanément.

Remarque 1 - Si aucun fichier de paramètres n'existe, une option permet de le créer à la console, mais c'est un processus assez lent qui n'est utilisé en général que pour la première fois. Le fichier généré après calcul est en effet sauvegardé (sous le nom de CREPARA.OUT) et pourra être réutilisé éventuellement après modification à l'éditeur de texte (et changement de nom).

Remarque 2 - Il est possible de traiter simultanément plusieurs bassins à la fois. Les fichiers de pluies seront placés les uns après les autres de même pour les fichiers d'ETP, de données agricoles et de débits (ou niveaux) observés. Le fichier de paramètres comporte 23 paramètres et options communs à tous les cas, suivis de 33 paramètres et options pour chaque cas.

(1) On appelle ici données agricoles les données concernant l'épandage de nitrates sous forme d'engrais, de besoin des plantes, de libération par les racines et de minéralisation du sol, soit 4 types de données.

Remarque 3 - Il est possible de regrouper dans un même fichier (à la suite) et dans cet ordre, les fichiers de :

- 1 - Pluie
- 2 - ETP
- 3 - Observations de niveau, de débit ou de concentration (si elles existent)
- 4 - Données agricoles (s'il y a simulation des transferts de nitrates).

Si on traite simultanément plusieurs bassins, on mettra les données bassin par bassin :

Pluie 1, ETP 1, Observations 1, Données agricoles 1
 Pluie 2, ETP 2, Observations 2, Données agricoles 2 - etc ...

10.2 - QUESTIONS PRELIMINAIRES POSEES PAR LE PROGRAMME

Dès le début, plusieurs questions sont posées à l'utilisateur sur la console :

* Question 1 - Désire t'on refaire un passage identique au précédent ?

Si on a déjà fait un passage, toutes les réponses aux questions posées (présence de neige, noms des fichiers à lire) ont été enregistrées sur un fichier (de nom **BICCOMAND.DAT**). On peut alors réaliser un passage identique avec par exemple d'autres fichiers de données ou bien réaliser un complément de calage. Il suffit pour cela par exemple de changer ces noms de fichiers -à l'éditeur de texte-dans le fichier **BICCOMAND.DAT**. Il n'est alors plus nécessaire de répondre aux questions suivantes, car la réponse sera lue automatiquement. On supprimera ainsi le temps passé à répondre aux questions et on limitera les erreurs dues à de mauvaises réponses.

* Question 2 - Désire t'on prendre en compte les transferts de nitrates ?

Si on répond OUI, il faut disposer d'un fichier de données agricoles.

* Question 3 - Dispose t'on d'un fichier de paramètres ?

S'il y a un fichier de paramètres, le programme demandera le nom de ce fichier et y lira les valeurs des options et des paramètres hydrologiques.

S'il n'y a **pas** de fichier de paramètres, l'utilisateur devra donner à la console les valeurs de toutes les options et de tous les paramètres, ce qui peut être assez long, mais est très pratique pour une première utilisation.

Après chaque passage, et en particulier après une première utilisation où l'utilisateur a donné les paramètres en interactif, un fichier de paramètres actualisé est créé par le programme sous le nom de **CREPARA.OUT**. Il est alors utile de changer le nom de ce fichier (pour le sauvegarder). Ce fichier pourra être utilisé :

- pour un complément de calage si nécessaire (il n'y aura plus à redonner à la console la valeur de tous les paramètres et options),
- pour calculer des débits ou des niveaux, à partir de séries climatiques observées (ou générées) si le calage est reconnu comme satisfaisant.

*** Question 4 - Les données sont-elles sur des fichiers séparés ?**

*** Question 5 - L'écoulement très lent (s'il existe) se perd-il par infiltration profonde ?**

La réponse standard est : NON.

*** Question 6 - Y a t'il une reprise par évapo-transpiration potentielle dans les réservoirs H, H+G1, H+G1+G2 ?**

La réponse standard est : 0, c'est-à-dire aucune reprise.

*** Question 7 - Désire t'on faire uniquement une analyse de sensibilité des paramètres ?**

La réponse standard est NON (OUI après calage).

*** Question 8 - Les cultures sont-elles irriguées ?**

Si on répond OUI on considérera que l'irrigation apportée est juste égale au déficit d'Evapo-transpiration.

*** Question 9 - Désire t-on une modélisation chimique avec montée en régime transitoire ?**

Si on répond NON le système est placé en équilibre chimique au début de la simulation. Si on répond OUI on simule une "montée en régime" à partir des concentrations spécifiées dans les réservoirs du modèle.

10.3 - DESCRIPTION DU FICHIER DES PARAMETRES

(exemples tabl. 3, 5 et 6)

Ce fichier peut avoir différentes formes suivant :

- s'il y a modélisation des transferts de nitrates ou non,
- si on fournit des bornes pour les paramètres ou non.

Le fichier de paramètres est divisé en deux parties :

- 35 lignes définissant 23 paramètres généraux communs à tous les bassins,
- suivies pour chaque bassin étudié de 18 lignes définissant 15 paramètres et options,
- suivies (pour chaque bassin) de :
 - a - s'il n'y a pas de calcul de transfert de nitrates :
 - . 10 lignes définissant les paramètres hydrologiques et les coefficients d'amplitude,
 - . suivies éventuellement, POUR LE PREMIER BASSIN SEULEMENT, de 8 lignes définissant les bornes des paramètres hydrologiques
 - b - s'il y a calcul de transfert de nitrates :
 - . 25 lignes définissant les 8 paramètres hydrologiques + les 13 paramètres chimiques + les 2 coefficients d'amplitude + les 2 concentrations initiales,
 - . suivies éventuellement, POUR LE PREMIER BASSIN SEULEMENT, de 21 lignes définissant les bornes des 8 + 13 paramètres hydrologiques et chimiques.

DESCRIPTION DES PARAMETRES

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
1	Titre donnant des détails sur la simulation, les hypothèses faites, la date.
2	Nombre de bassins à étudier successivement dans cette simulation (les données de chaque bassin doivent se suivre). Valeur standard : 1
3	Simulation de débit ou de niveau ? 0 = débit ou Concentration dans le débit ou dans le niveau ? 1 = niveau
4	Présence d'une séquence d'observation de débit, de niveau ou de concentration 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 1 pour le calage, 0 pour une extension de donnée
5	Ecriture sur fichier de la pluie efficace calculée ? 0 = Non Valeur standard : 0 1 = Oui
6	Ecriture sur fichier des débits, niveaux ou concentration calculés ? 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 0 pour le calage, 1 pour une extension de données
7	Edition des bilans mensuels ? 0 = Non Valeur standard : 1 ou 2 1 = Oui annuel 2 = Oui mensuel
8	Analyse statistique des pluies efficaces calculées ? 0 = Non Valeur standard : 0 1 = Oui
9	Analyse statistique des débits, niveaux ou concentrations calculés ? 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 0
10	Réduction du "listing généré" (fichier CREALIS.LST) ? 0 = pas de réduction ; 1 = réduction ; 2 = suppression* (* il n'y aura alors ni graphique sur imprimante, ni édition des bilans, ni analyses statistiques) Valeur standard : 0 ou 1

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
11	Dessin sur imprimante des débits, niveaux ou concentrations calculés et observés ? 0 = Non ; 1 = Oui (fichier CREALIS.LST) Valeur standard : 0 si on dispose d'une table traçante 1 si on ne dispose pas d'une table traçante
12	Analyse de la différence entre simulation et observation 0 = Non ; 1 ou plus = Oui Valeur standard : 0
13	Dessin sur table traçante des débits, niveaux ou concentrations observés ? 0 = Non ; 1 = Oui ; 2 = Oui* * avec en plus détail des composantes souterraines (pour un calcul de débits seulement)
14	Fourniture de valeurs limites pour les paramètres hydrologiques et chimiques ? 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 1 Dans ce cas des paramètres supplémentaires doivent être placés après la ligne 63 (ou 79 s'il y a calcul des transferts de nitrates) et uniquement pour le premier bassin.
15	Pondération des écarts : 0 ou 1 = pas de pondération 2 ou 3 = pondération donnant plus de poids aux faibles valeurs (étiages) -2 ou -3 = pondération donnant plus de poids aux fortes valeurs Valeur conseillée : 0 pour des niveaux ou les concentration, 2 pour des débits
18	<u>LIGNES 16 A 35</u> : Définition des pas de temps Durée du pas de temps des pluies : 0 = journalier 2 = décadaire 1 = pentadaire 3 = mensuel
20	Format des données de pluies 0 = séquentiel 1 = "standard" Le format le plus classique est le format séquentiel. Le format "standard" correspond à un type de fichier qui rassemble à la fois des données pentadaires, décadaires et mensuelles

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
23 et 25	Durée du pas de temps et format des données agricoles. Quand il n'y a pas de calcul de transfert de nitrates, ces lignes doivent quand même exister ; leurs valeurs ne sont alors pas prises en compte.
28 et 30	Durée du pas de temps et format des données d'évapotranspiration potentielle ETP (données généralement mensuelles)
33 et 35	Durée du pas de temps et format des données de débits, de niveaux ou de concentrations observés.
	Les lignes 16, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 37 sont des lignes de commentaires ou de séparations.
38	Titre donnant le nom du bassin, de la station de jaugeage, du point de mesure des niveaux ou des concentrations
39 et 40	Valeur maximale et minimale des observations de débit, de niveau ou de concentrations. Les valeurs inférieures au minimum ou supérieures au maximum ne seront pas prises en compte et seront considérées comme absentes.
41 et 42	Largeur et hauteur en centimètres du dessin sur table traçante des débits calculés (et éventuellement observés). Largeur maximale = 300 cm - Hauteur maximale = 65 cm Valeurs maximales conseillées : largeur = 25 cm (pour format 21 x 29,7) hauteur = 18 cm
43	Ligne de séparation
44	Nombre d'années de données Ce nombre d'années doit être le même pour toutes les données : pluie, évapo-transpiration potentielle, débit, niveau ou concentration observés, données agricoles.

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
45	Nombre d'années de démarrage des calculs. Le débit, le niveau, et surtout la concentration, du premier mois de la première année dépendent bien évidemment des données climatiques et agricoles de plusieurs mois auparavant. Le premier mois d'observation ne peut donc pas être simulé correctement à partir du premier mois de pluie (ETP et température). On considère donc que les débits, les niveaux ou les concentrations sont calculés correctement à partir d'un certain nombre d'années dites "années de démarrage". Les valeurs calculées pendant ces années de démarrage ne sont pas prises en compte pour la comparaison avec les valeurs calculées. Les séries de données climatiques agricoles et de données observées (débit ou niveau) ayant le même nombre d'années, les premières années sont donc perdues. Pour éviter cet inconvénient, il est conseillé de rassembler les données climatiques et agricoles (pluie, ETP, épandage, besoins...) pendant une (ou quelques) année(s), avant la première année de débit, de niveau ou de concentration observé. On créera alors l'(ou les) année(s) correspondante(s) de débits, de niveaux ou de concentrations observés au moyen de valeurs fictives qui ne seront pas prises en compte dans les calculs, mais serviront seulement à occuper une place dans les fichiers de données. The diagram shows two horizontal bars representing data series. The top bar is a single solid bar labeled 'années observées' above it and 'données climatiques' to its right. The bottom bar is labeled 'données de débits' to its right and is divided into two sections. The left section is labeled 'années fictives' below it, with a bracket underneath labeled 'période de démarrage'. The right section is labeled 'années effectivement observées' below it. A bracket above the entire bottom bar spans both sections and is labeled 'années observées'. EXEMPLE 1. Période d'observation des débits 1975-1978, soit 4 ans. On rassemble également la pluie et l'ETP de 1974, et on crée une année 1974 fictive de débits (avec par exemple des valeurs égales à -1). Il y a alors au total 5 années et le nombre d'années de démarrage est de 1. Nota. Quand les données climatiques ne sont pas disponibles avant la première année d'observation de débit (ou de niveau), le modèle peut créer artificiellement de telles années avec pour chacun des pas de l'années, la moyenne interannuelle des valeurs observées. Cette procédure est cependant moins précise que la précédente et doit être évitée si possible. Pour l'utiliser, il suffit d'affecter d'un signe négatif le nombre de démarrage donné comme paramètre 45. EXEMPLE 2. Avec les données précédentes : observations de débits, de pluies et d'ETP sur les 4 années de la période 1975-1978, on indique - 1 année de démarrage. L'année 1974 sera alors créée automatiquement. Il y a au total 4 années d'observations. Valeurs standard + 1 pour une simulation des débits + 2, + 3, + 4 ou plus pour une simulation de niveau (suivant l'inertie de la nappe qui sera appréciée par la (ou les) constante(s) de temps de tarissement).

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
45	On peut aussi, et c'est ce qui est le meilleur, cumuler les vraies et les fausses années de démarrage. <u>EXEMPLE 3.</u> Avec les données précédentes : observations de débits (ou nitrates), de pluies, d'ETP (et de données agricoles sur les 4 années de la période 1975-1978 ; on rassemble également les données climatiques et agricoles de l'année 1974, on crée une année fictive de débits (ou de nitrates) (avec par exemple des valeurs égales à -1), et on indique par exemple - 3 années de démarrage. Les années 1971 à 1973 seront alors créées automatiquement. Il y aura alors au total 5 années d'observations, c'est-à-dire 5 années de données réelles et -3 années de démarrage.
46	Nom de la première année. C'est le nom de la première année d'observation de données climatiques (pluies et ETP). Dans l'exemple 1 et 3, la première année est 1974 ; dans l'exemple 2, la première année est 1975.
47	Nombre d'année de prévision (NPREV). Le calcul de prévision n'est pas encore adapté dans le programme BICHE. Il faut donc imposer 0 années de prévision. Valeur obligatoire : 0
48	Numéro du premier pas observé pour les pluies. Cette valeur est utilisée pour le dessin sur table traçante : la dernière année, les valeurs observées ne sont pas tracées après le dernier mois. Valeur standard : 0 qui signifie "dernière année complète"
49	Numéro du dernier pas observé pour l'ETP. Valeur standard : 0 qui signifie "dernière année complète"
50	Nombre maximal d'itérations pour le calage. Plutôt que de réaliser le calage avec un seul "passage" comprenant un très grand nombre d'itérations, il est souvent souhaitable de réaliser plusieurs passages avec environ 100 itérations pour chacun avec un examen approfondi des résultats entre chaque passage. Valeur standard : 70 pour un passage de calage hydrologique 140 pour un passage de calage chimique 0 pour une extension de données
51	Nombre de jours de pluies par mois exprimé en pourcentage Valeurs obligatoire : 100 % (0 % est compris entre 100 % par le programme)

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
52	Option pour les composantes souterraines de l'écoulement : 0 ou 1 = 1 composante souterraine 2 = 2 composantes souterraines "en cascade" 3 = 2 composantes souterraines réalisées par un réservoir unique ayant deux orifices séparés par un seuil de séparation <u>Nota.</u> Pour un calcul de niveau de nappe, si on sépare deux composantes, il faut utiliser obligatoirement l'option 3. Valeur standard : 0 ou 2 (si nécessaire) pour un calcul de débits ou de concentrations dans un débit 0 ou 3 pour un calcul de niveaux ou de concentration dans un piézomètre <u>Nota.</u> Il est conseillé de ne conserver qu'une seule composante souterraine (option 0) à chaque fois que possible pour privilégier la stabilité du calage.
53	Utilisation pour chaque année d'évapo-transpiration potentielle d'une valeur moyenne interannuelle pour chacun des pas de l'année ? 0 = Non ; 1 = Oui L'option 1 ne sera utilisée que quand on ne dispose pas de données l'ETP pour toutes les années, ce qui sera parfois le cas en extension ou en simulation de scénarios Valeur standard : 0 pour un calage, 0 ou 1 pour une extension de données
54	<u>LIGNES 54 A 61</u> : 8 paramètres hydrologiques Coefficient de correction homothétique des pluies en pourcentage (toutes les pluies de tous les pas de temps sont corrigées globalement d'un même pourcentage). Exemple : 15 signifie + 15 %, c'est-à-dire multiplication par 1.15 - 20 signifie multiplication par 0.80 Valeur standard : 0 % Optimisation : (0 = Non ; 1 = Oui) 0 sauf si les pluies exactes sont mal connues en région montagneuse par exemple.
55	Capacité de la réserve superficielle disponible pour l'évapo-transpiration (appelée parfois "réserve utile" par abus de langage). Valeur de départ : 70 mm Optimisation : 1
56	Coefficient de correction homothétique de l'ETP en pourcentage (toutes les ETP de tous les pas de temps sont corrigées globalement d'un même pourcentage). Valeur de départ : 0 % Optimisation : 1 (mais limiter la correction à ± 20 %)

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
57	Hauteur d'égale répartition entre écoulement superficiel et percolation alimentant l'écoulement souterrain. Quand le niveau dans le réservoir intermédiaire est égal à n fois cette hauteur, l'écoulement superficiel est égal à n fois la percolation. Réciproquement, quand le niveau est égal à $1/n$ fois cette hauteur, la percolation est égale à n fois l'écoulement superficiel <u>REMARQUE.</u> Pour un calcul de niveau, il faut être assez prudent pour éviter que la majeure partie des précipitations efficaces ne soit évacuée en écoulement superficiel, la faible composante souterraine étant compensée par un fort coefficient d'amplitude (faible "coefficient d'emmagasinement apparent"). Valeur de départ : 70 mm (difficile à préciser... peut atteindre 500 ou plus) Optimisation : 1
58	Temps de demi-montée : c'est le temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement du débit souterrain. Ce temps est exprimé en mois. Valeur de départ : 0,5 mois pour un calcul de débit (1 à 5 mois pour un calcul de niveau de nappe libre) Optimisation : 1
59	Temps de demi-tarissement de la composante souterraine rapide (en mois). C'est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge, le débit de la composante souterraine rapide est divisé par deux. Valeur de départ : 2 mois pour un calcul de débit 4 à 8 mois pour un calcul de niveau de nappe libre Optimisation : 1
60	* Si la ligne 52 a la valeur 2 (2 composantes souterraines), ce paramètre indique le temps de demi-transfert du réservoir souterrain de la composante rapide à celui de la composante lente. Il est exprimé en mois. Valeur de départ : 1 mois Optimisation : 1 * Si la ligne 52 a la valeur 3 (2 composantes dans un seul réservoir), ce paramètre indique le seuil au dessus duquel apparaît un débit souterrain "rapide". Valeur de départ : 50 mm Optimisation : 1 * Si la ligne 52 a la valeur 0 ou 1 (1 seule composante souterraine), ce paramètre n'est pas utilisé. Valeur fictive : 50 par exemple Optimisation : 0

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
61	* Si la ligne 52 a la valeur 2 ou 3 (c'est-à-dire 2 composantes souterraines) : temps de demi-tarissement de la composante souterraine lente. C'est le temps nécessaire pour qu'en l'absence d'alimentation du réservoir correspondant, le débit de la composante souterraine lente soit divisé par deux. Ce temps de demi-tarissement doit être au moins égal au temps de tarissement de la composante rapide. Valeur de départ : 3,5 mois pour un calcul de débit 4 à 8 mois pour un calcul de niveau de nappe libre Optimisation : 1 <u>Nota.</u> Il convient de veiller à ce que ce paramètre n'atteigne pas de valeurs trop élevées (15 ou 20 mois), sinon il faut disposer d'une longue période de calage et d'une longue période de démarrage pour éviter les ennuis dus à une très grande inertie. * Si la ligne 52 a la valeur 0 ou 1 (une seule composante souterraine), ce paramètre n'est pas utilisé. Valeur de départ : 50 par exemple Optimisation : 0
	<u>LIGNES 61.1 A 61.13</u> : 13 paramètres chimiques pour la simulation des transferts de nitrates. Ces paramètres sont à définir uniquement si on a répondu 1 ou 2 à la première question (si on a répondu 2, ils ne doivent pas figurer dans le fichier des paramètres). Ces 13 paramètres sont placés entre les lignes 61 et 62
61.1	Temps de demi-mélange dans la réserve superficielle C'est le temps au bout duquel le mélange entre les concentrations des phases d'eau libre et d'eau liée est à moitié réalisé. Ce temps est exprimé en mois. Valeur de départ : 0,2 mois Optimisation : 1
61.2	Temps de demi-mélange dans le réservoir intermédiaire Valeur de départ : 0,2 mois Optimisation : 1
61.3	Temps de demi-mélange dans le réservoir souterrain rapide Valeur de départ : 0,2 mois Optimisation : 1
61.4	Temps de demi-mélange dans le réservoir souterrain lent Valeur prise en compte uniquement si NRESER (paramètre de la ligne 52) a la valeur 2. Dans le cas d'un réservoir à deux exutoires, c'est la valeur précédente qui est utilisée dans tout le réservoir et qui doit seule être optimisée. Valeur de départ : 0,2 mois Optimisation : 1

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
61.5	Concentration maximale de la pluie en mg/l Valeur de départ : 200 mg/l (ordre de grandeur n'ayant pas un sens très précis) Optimisation : 1
61.6	Coefficient de correction des besoins en pourcent (15 signifie + 15 %, c'est-à-dire multiplication par 1.15 - 20 signifie - 20 %, c'est-à-dire multiplication par 0.80) Valeur de départ : 0 % Optimisation : 1
61.7	Temps de demi-libération par les racines Valeur de départ : 0,2 mois Optimisation : 0
61.8	Volume d'eau immobile (ou liée) dans la réserve superficielle en mm Valeur de départ : 200 mm Optimisation : 1
61.9	Volume d'eau immobile dans le réservoir intermédiaire, en mm Valeur de départ : 100 mm Optimisation : 1
61.10	Volume d'eau immobile dans le réservoir souterrain rapide, en mm Valeur de départ : 100 mm Optimisation : 1
61.11	Volume d'eau immobile dans le réservoir souterrain lent, en mm Valeur prise en compte uniquement dans le cas de 2 réservoirs souterrains. Dans le cas d'un réservoir à 2 exutoires, c'est la valeur précédente qui est utilisée (et qui doit être optimisée). Valeur de départ : 100 mm Optimisation : 1
61.12	Coefficient de correction sur l'épandage de nitrates, en pourcent Valeur de départ : 0 Optimisation : 1
61.13	Coefficient de correction sur la minéralisation du sol en pourcent Valeur de départ : 0 Optimisation : 1

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
62	* Pour un calcul de débit : débit extérieur Q_0 (en m^3/s). Ce débit est un débit non contrôlé par la mesure à l'exutoire. Le débit observé Q_{OBS} se déduit du débit calculé Q_{CAL} par la relation : relation: $Q_{OBS} = Q_{CAL} + Q_0 + \text{écart}$ Ce débit extérieur doit être en principe imposé à 0, sauf cas très particulier : fuite du bassin, exportation ou importation d'eau par un canal, prélèvement, échanges latéraux de bassin à bassin. Valeur standard : 0 m^3/s Optimisation : 0 * Pour un calcul de nappe libre : Niveau de base (niveau absolu en mètre). Ce niveau de base correspond au niveau qui serait atteint (au bout d'un temps suffisamment lent en l'absence totale d'alimentation). Valeur de départ : niveau de base estimé Optimisation : 1 Il convient impérativement de laisser calculer ce niveau de base. Le calcul étant effectué par régression linéaire, la valeur de départ n'a pas d'importance. * Pour un calcul de concentration : concentration constante Valeur de départ : 0 Optimisation : 0
63	* Pour un calcul de débit : superficie du bassin versant SURF (en km^2). Cette superficie est généralement la superficie du bassin versant telle qu'elle est déterminée à partir d'une carte topographique. La valeur de ce paramètre doit alors être imposée à cette valeur mesurée. Cependant, dans un certain nombre de cas, cette superficie est inconnue ou mal connue : - bassin d'alimentation d'une source, - exutoire ne contrôlant qu'une partie du bassin versant (exutoires multiples), - parties endorhéiques dans le bassin versant. Dans ces cas, il peut être utile de faire calculer au modèle la superficie la plus appropriée. Il convient de remarquer qu'il est dangereux de calculer au modèle à la fois : - un coefficient sur les pluies, - un coefficient sur l'ETP, - la surface du bassin versant. En effet, on montre que si on multiplie par un facteur k : la pluie, l'ETP, la réserve utile, on obtient une "pluie efficace" multipliée par k et, (en multipliant le seuil de séparation par k) on obtient un débit équivalent en divisant la superficie du bassin versant par le facteur k. Il faut donc imposer les paramètres les mieux connus (par exemple, la correction sur les pluies) et optimiser la surface (cas d'une source) ou bien le contraire (bassin de superficie connue, mais stations pluviométriques peu représentatives ou à des altitudes variées). Valeur standard : superficie mesurée Optimisation : 0

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
63	* Pour un calcul de niveau de nappe. Coefficient d'emmagasinement apparent global (sans unité). Dans la plupart des cas, le coefficient d'emmagasinement apparent n'est pas très bien connu, et il pourra être calculé par le modèle. Il sera intéressant de comparer ce coefficient avec un coefficient d'emmagasinement de nappe libre ou à une valeur de porosité efficace pour voir si l'ORDRE de GRANDEUR est à peu près identique. Il faut cependant garder à l'esprit que si le point d'observation de niveau est proche d'un cours d'eau (ou d'un lac) qui impose un niveau constant le coefficient d'emmagasinement apparent sera considérablement surestimé. Comme on l'a souligné à propos du paramètre de la ligne 57, il faudra veiller à ce que le coefficient d'emmagasinement apparent calculé ne soit pas extrêmement faible pour compenser le fait que la majorité de l'écoulement s'effectue en débit superficiel. Valeur de départ : valeur estimée Optimisation : 1 sauf si la valeur est bien connue Il convient de laisser le modèle calculer ce coefficient. * Pour un calcul de concentration : coefficient d'amplitude. Valeur de départ : 1,0 Optimisation : 0
64	Concentration initiale dans l'eau libre en mg/l. Cette information n'est utilisée que dans le cas où on ne fait pas un calcul à partir d'un état d'équilibre chimique (régime transitoire). Valeur de départ : à voir dans chaque cas.
65	Concentration initiale dans l'eau liée en mg/l. Cette information n'est utilisée que dans le cas où on ne fait pas un calcul à partir d'un état d'équilibre chimique (régime transitoire). Valeur de départ : à voir dans chaque cas.
	<u>NOTA.</u> Les deux lignes 64 et 65 ne doivent être définies que dans le cas où on fait un calcul de transfert de nitrates.
62.1 à 62.8 ou 64.1 à 64.13	(s'il y a transferts de nitrates). Valeurs minimales et maximales admises pour les 8 paramètres hydrologiques et les 13 paramètres chimiques. Ces valeurs ne figurent que si on a donné la valeur 1 à la ligne n° 14, et de toute façon ne figurent que pour le bassin n° 1 (si on simule plusieurs bassins, les valeurs limites utilisées dans les calculs seront celles du bassin n° 1).

11 - LES FICHIERS DES DONNEES HYDROCLIMATIQUES ET CHIMIQUES

Toutes les données hydroclimatiques et chimiques sont au pas journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel, et ont la même structure de "paquet de données". Un paquet de données est composé :

- a - pour les données pentadaires, décadaires et mensuelles bordereau 1 : figure 8
 - . d'une ligne titre (de 80 caractères) précisant le type de données, les unités, le lieu, la période, etc... ;
 - . suivi par année de :
 - 6 lignes de 12 valeurs pour 72 pentades par an si les données sont pentadaires (2 mois de 6 pentades par ligne),
 - 3 lignes de 12 valeurs pour 36 pentades par an, si les données sont décadaires (4 mois de 3 décades par ligne),
 - 1 ligne de 12 valeurs pour 12 mois par an, si les données sont mensuelles.
- Chaque ligne contient 12 valeurs codées chacune sur 6 colonnes (caractères), soit 72 colonnes par lignes :
- exemple :** 5 années pentadaires = 31 lignes
 8 années pentadaires = 25 lignes
 15 années mensuelles = 16 lignes.
- b - pour les données journalières bordereau 2 : figure 9
 - . d'une ligne titre (de 80 caractères) PAR ANNEE,
 - . suivie de 2 lignes par mois (soit 24 lignes pour les 12 mois) avec pour chaque mois :
 - les valeurs du jour 1 au jour 16, sur la première ligne,
 - les valeurs du jour 17 au jour 28, 29, 30 ou 31 sur la deuxième ligne.

Remarque 1 - Pour faciliter l'introduction des données journalières, on peut utiliser le bordereau 3 (fig. 10), mais après saisie les données devront être rendues séquentielles par le programme **TRANSDON**.

Remarque 2 - Dans tous les cas, chaque année doit être complète, c'est-à-dire comporter 365 ou 366 jours, ou 72 pentades, ou 36 décades, ou 12 mois.

Les "mois", "décades" ou "pentades" doivent en principe être homogénéisés pour correspondre à des pas de temps égaux. Ceci peut être fait avec le programme de calcul **TRANSDON** qui permet en particulier de calculer une série pentadaire de 72 valeurs à partir de 365 ou 366 valeurs journalières.

Un exemple de données de chaque type est reproduit sur le tableau 1.

Un exemple de données "agricoles" est reproduit sur le tableau 2.

PROGRAMME G A R D E N I A			
UTILISATEUR:	DATE:	ETUDE:	

TYPE DE DONNEE												PERIODE = 19 / 19												UNITE																																																																																																																																															
1 6 7 12 13 18 19 24 25 30 31 36 37 42 43 48 49 54 55 60 61 66 67 72 79																																																																																																																																																																							
1																									19	1																																																																																																																																													
2																									19	2																																																																																																																																													
3																									19	3																																																																																																																																													
4																									19	4																																																																																																																																													
5																									19	5																																																																																																																																													
6																									19	6																																																																																																																																													
7																									19	7																																																																																																																																													
8																									19	8																																																																																																																																													
9																									19	9																																																																																																																																													
10																									19	10																																																																																																																																													
11																									19	11																																																																																																																																													
12																									19	12																																																																																																																																													
13																									19	13																																																																																																																																													
14																									19	14																																																																																																																																													
15																									19	15																																																																																																																																													
16																									19	16																																																																																																																																													
17																									19	17																																																																																																																																													
18																									19	18																																																																																																																																													
19																									19	19																																																																																																																																													
20																									19	20																																																																																																																																													
21																									19	21																																																																																																																																													
22																									19	22																																																																																																																																													
23																									19	23																																																																																																																																													
24																									19	24																																																																																																																																													
25																									19	25																																																																																																																																													
JANV												FVVR												MARS												AVRI												MAI												JUIN												JUIL												AOUT												SEPT												OCTO												NOVE												DECE												IDEN												ANNEE											

Figure 8 - Bordereau pour des données pentadaires, décadaires ou mensuelles

PROGRAMME G A R D E N I A			
UTILISATEUR:	DATE:	ETUDE:	

TYPE DE DONNEE		ANNEE = 19 36 44																UNITE	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
J																			
F																			
M																			
A																			
M																			
J																			
J																			
A																			
S																			
O																			
N																			
D																			
		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			

Figure 9 - Bordereau pour des données journalières

TYPE DE DONNEES		ANNEE=19		UNITE=								
JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	
												0.1
												0.2
												0.3
												0.4
												0.5
												0.6
												0.7
												0.8
												0.9
												1.0
												1.1
												1.2
												1.3
												1.4
												1.5
												1.6
												1.7
												1.8
												1.9
												2.0
												2.1
												2.2
												2.3
												2.4
												2.5
												2.6
												2.7
												2.8
												2.9
												3.0
												3.1

Figure 10 - Bordereau de données journalières séquentielles

TYPE DE DONNÉE PLUIE MENSUELLE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES

115.0	132.2	24.2	75.9	81.2	57.3	41.3	33.1	102.5	127.6	77.6	125.6	1968
95.2	106.4	71.4	44.4	121.6	28.5	69.2	50.5	25.4	3.3	159.3	116.0	1969
126.4	165.6	81.1	78.8	25.5	33.9	53.5	71.7	120.2	34.1	109.5	86.8	1970

TYPE DE DONNÉE PLUIE DECADEIRE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES

90.6	11.4	12.0	49.0	41.2	45.0	0.5	21.7	3.0	23.1	15.6	36.4	1968 1
40.3	3.9	36.9	9.7	10.6	36.8	13.7	27.6	0.1	24.2	8.7	0.5	1968 2
16.4	57.2	28.7	42.1	61.0	25.9	52.4	2.6	21.1	1.5	52.9	71.2	1968 3
11.6	53.4	30.0	25.9	36.2	44.3	31.8	31.4	8.2	10.1	14.5	19.7	1969 1
30.7	23.0	67.9	1.1	20.0	7.4	66.6	1.3	1.3	29.1	10.6	10.8	1969 2
0.4	9.8	15.2	0.0	2.6	0.7	65.9	72.6	20.8	45.9	34.4	35.7	1969 3
32.1	24.6	71.7	53.6	62.5	49.3	35.0	14.0	32.1	27.4	30.6	20.8	1970 1
9.4	16.0	0.0	0.0	8.2	25.7	17.9	20.0	15.6	23.7	32.1	15.9	1970 2
18.0	15.2	4.0	27.1	3.1	3.8	64.0	82.6	42.9	35.4	20.9	30.5	1970 3

TYPE DE DONNÉE PLUIE PENTADAIRE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES

35.5	55.1	8.8	2.6	0.3	12.7	19.0	29.0	38.0	3.6	42.5	0.0	1968 1
0.0	0.5	6.5	12.0	4.8	0.5	24.0	0.0	1.4	11.9	4.8	33.8	1968 2
13.7	26.7	1.6	2.3	25.7	1.2	7.0	2.7	9.0	0.9	25.2	12.4	1968 3
0.1	13.6	27.4	0.2	0.0	0.1	0.3	23.9	5.7	3.0	0.1	0.1	1968 4
16.5	0.2	19.3	37.5	8.7	20.3	0.0	40.9	58.9	3.3	2.2	22.2	1968 5
40.1	13.7	1.7	1.0	15.2	5.9	1.1	0.4	15.9	36.9	69.2	2.2	1968 6
3.3	8.5	31.2	22.3	9.5	20.5	14.5	11.4	6.5	27.7	35.8	8.5	1969 1
12.2	19.6	24.5	6.6	1.4	6.8	0.0	10.1	2.4	12.1	16.5	3.3	1969 2
24.9	5.8	15.9	7.1	50.8	17.1	1.1	0.0	3.0	17.0	7.3	0.1	1969 3
37.9	28.7	0.0	1.3	0.1	1.2	26.7	2.4	10.2	0.4	9.8	1.0	1969 4
0.4	0.0	1.1	9.7	1.7	13.5	0.0	0.0	2.4	0.2	0.7	0.0	1969 5
6.5	59.4	39.7	32.9	12.6	8.0	38.8	7.1	19.2	15.2	35.2	0.5	1969 6
8.6	23.5	15.7	8.9	39.7	32.0	25.3	28.5	39.7	22.8	28.0	21.3	1970 1
10.1	24.9	2.7	11.3	21.5	10.6	3.7	23.7	16.1	14.5	15.5	5.2	1970 2
0.9	6.6	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	5.7	16.7	9.0	1970 3
1.9	16.0	3.8	16.2	7.7	7.9	17.4	6.4	7.3	24.9	14.9	0.9	1970 4
5.4	12.7	57.9	0.3	0.0	4.0	14.8	12.4	0.6	2.5	1.8	2.1	1970 5
32.6	25.4	41.8	40.5	25.9	16.9	31.8	3.6	4.5	16.4	5.6	24.9	1970 6

TYPE DE DONNÉE PLUIE MENSUELLE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES CAS NO 1

115.0	132.2	24.2	75.9	81.2	57.3	41.3	33.1	102.5	127.6	77.6	125.6	1968
95.2	106.4	71.4	44.4	121.6	28.5	69.2	50.5	25.4	3.3	159.3	116.0	1969
126.4	165.6	81.1	78.8	25.5	33.9	53.5	71.7	120.2	34.1	109.5	86.8	1970

TYPE DE DONNÉE PLUIE MENSUELLE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES CAS NO 2

115.0	132.2	24.2	75.9	81.2	57.3	41.3	33.1	102.5	127.6	77.6	125.6	1968
95.2	106.4	71.4	44.4	121.6	28.5	69.2	50.5	25.4	3.3	159.3	116.0	1969
122.4	165.6	81.1	78.8	25.5	33.9	53.5	71.7	120.2	34.1	189.5	86.8	1970

Tableau 1 - Exemple de données hydroclimatiques

FERTILISATION AZOTEE EN KG/HA NITRATES (NO3-)												
0.0	0.0	0.0	0.0	220.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1907
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	0.0	220.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1948
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	0.0	220.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1964
0.0	0.0	0.0	0.0	308.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1965
0.0	0.0	0.0	0.0	352.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1966
0.0	0.0	0.0	0.0	431.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1967
0.0	0.0	0.0	0.0	448.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1968
0.0	0.0	0.0	0.0	462.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1969
0.0	0.0	0.0	0.0	550.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1970
0.0	0.0	0.0	0.0	523.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1971
0.0	0.0	0.0	0.0	563.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1972
0.0	0.0	0.0	0.0	607.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1973
0.0	0.0	0.0	0.0	528.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1974
0.0	0.0	0.0	0.0	501.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1975
0.0	0.0	0.0	0.0	682.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1976
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	0.0	682.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1983
CONSOMMATION DES CULTURES KG/HA DE NITRATES (NO3-)												
0.0	0.0	0.0	12.8	64.2	192.6	192.6	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1907
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	12.8	64.2	192.6	192.6	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1948
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	12.8	64.2	192.6	192.6	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1964
0.0	0.0	0.0	14.5	72.4	217.1	217.1	28.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1965
0.0	0.0	0.0	15.0	75.0	225.0	225.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1966
0.0	0.0	0.0	15.5	77.6	232.9	232.9	31.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1967
0.0	0.0	0.0	16.1	80.3	240.8	240.8	32.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1968
0.0	0.0	0.0	16.6	82.9	248.7	248.7	33.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1969
0.0	0.0	0.0	17.1	85.5	256.6	256.6	34.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1970
0.0	0.0	0.0	17.6	88.2	264.5	264.5	35.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1971
0.0	0.0	0.0	18.2	90.8	272.4	272.4	36.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1972
0.0	0.0	0.0	18.4	92.1	276.3	276.3	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1973
0.0	0.0	0.0	18.9	94.7	284.2	284.2	37.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1974
0.0	0.0	0.0	19.5	97.4	292.1	292.1	38.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1975
0.0	0.0	0.0	22.0	110.0	330.0	330.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1976
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	22.0	110.0	330.0	330.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1983
MINERALISATION AUTOMNALE DES RESIDUS CULTURAUX KG/HA DE NITRATES (NO3-)												
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.0	0.0	0.0	0.0	1907
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.0	0.0	0.0	0.0	1983
MINERALISATION DU SOL KG/HA DE NITRATES (NO3-)												
0.0	0.0	0.0	8.8	22.0	35.2	44.0	44.0	44.0	22.0	0.0	0.0	1907
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	19...
0.0	0.0	0.0	8.8	22.0	35.2	44.0	44.0	44.0	22.0	0.0	0.0	1983

Nota : quand les données étaient identiques elles ont été remplacées par ...

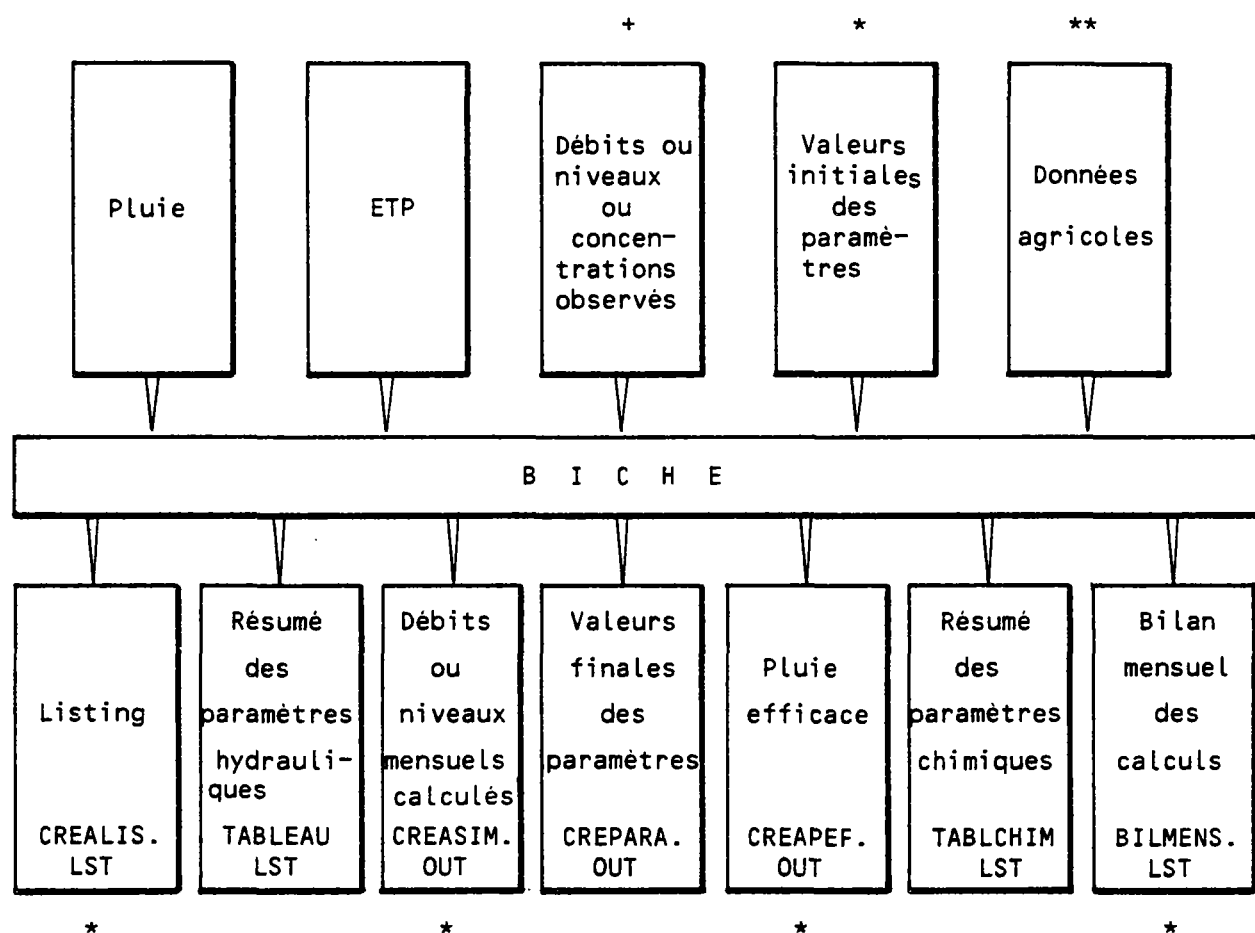
Tableau 2 - Exemple de fichier de données agricoles

12 - LES RESULTATS PRODUITS PAR LE MODELE

Le modèle BICHE calcule une série de débits ou de niveaux ou de concentrations, à partir de données climatiques et agricoles et d'un jeu de paramètres.

Après les calculs, on obtient les résultats suivants (fig. 11)

- coefficient d'ajustement pondéré et non pondéré entre les débits niveaux ou concentrations calculés et les débits, niveaux ou concentrations observés s'ils existent ;
- bilan mensuel de toutes les années avec pluie, ETP, ETR, écoulement superficiel, écoulement souterrain rapide et lent, ou concentration et état des principaux réservoirs, etc ... (édition sur option uniquement) (**BILMENS.LST**) ;
- dessin sur imprimante des débits, niveaux ou concentrations calculés et observés s'ils existent (sur option) ;
- dessin sur table traçante de ces mêmes valeurs avec éventuellement (pour les calculs de débit) décomposition de l'écoulement en composante superficielle et souterraine (sur option) ;
- édition sur un fichier séparé de la "pluie efficace" calculée, cette "pluie efficace" comprend le ruissellement et l'infiltration ; ce fichier peut être utilisé comme entrée pour un modèle hydrodynamique par exemple (sur option) (**CREAPEF.OUT**) ;
- édition sur fichier séparé des débits, niveaux ou concentrations calculés (sur option) ; ce fichier peut être utilisé pour une analyse statistique détaillée ou pour simuler le fonctionnement d'une micro-centrale ou d'un barrage, ou d'une station de dénitrification (**CREASIM.OUT**) ;
- édition sur fichier séparé des valeurs finales des paramètres du modèle : pour un complément de calage ou pour une extension de données (**CREPARA.OUT**) ;
- édition sur fichier séparé de deux tableaux récapitulatifs des paramètres hydrologiques (**TABLEAU.LST**), et éventuellement chimiques (**TABLCHIM.LST**), de tous les bassins étudiés simultanément : pour une étude comparative ;
- édition sur fichier séparé des valeurs minimales, maximales et moyennes simulées et calculées : fichier **MINMAXMOY.LST** ;
- édition sur fichier séparé des bilans annuels moyens période de démarrage exclue : fichier **MOYBILAN.LST**.



+ pour le calage uniquement (pas nécessaire pour une simulation de scénarios)

* optionnel

* * uniquement une modélisation des transferts de nitrates

Figure 11 - Fichiers pour le programme BICHE

13 - EXEMPLE D'APPLICATION

A titre d'illustration on donne un exemple d'application du modèle BICHE aux sources de la Voulzie (près de Provins).

Le tableau 3 présente le fichier des paramètres hydrologiques. Les principaux résultats produits par la simulation hydrologique sont rassemblés sur le tableau 4. Les abréviations apparaissant dans les bilans mensuels sont les suivantes :

Bilans mensuels

ETP	= Evapo-Transpiration Potentielle
ETR	= Evapo-Transpiration Réelle
P.EFF	= Pluie Efficace
Q CAL	= Débit Calculé
Q OBS	= Débit Observé (les valeurs absentes sont notées -2)
Q RAT	= Composante Rapide du débit (Réservoir H)
Q S1	= Composante Souterraine 1 (rapide) du débit (Réservoir G1)
Q S2	= Composante Souterraine 2 (lente) du débit (Réservoir G2)
R SUP	= Etat du réservoir superficiel (RU) en fin du mois.
R RAP	= Etat du réservoir H
R INT	= Etat du réservoir G1
R LENT	= Etat du réservoir G2.

Bilan annuel moyen (exprimé en mm/an)

PLF	= Pluie Efficace
Q SO1, Q SO2	= Composantes lentes du débit (réservoirs G1 et G2)
DIFF STO	= Différence de stockage entre la fin de la période de simulation et la fin de la période de démarrage exprimée en mm/an.

Les tableaux 5 et 6 présentent le fichier des paramètres pour la simulation avec transfert de nitrates.

Les paramètres hydrologiques sont ceux résultant de la fin du calage hydrologique. On a rajouté des valeurs de paramètres de transferts de nitrates (qui sont en cours de calage). La simulation se fait avec montée en régime à partir d'une concentration égale à 10 mg/l dans tous les réservoirs. (On remarque que la superficie du bassin versant n'intervient pas en tant que paramètre).

```

SIMULATION HYDROLOGIQUE VOULZIE
1 NOMBRE DE CAS DES FICHIERS UTILISES : 0
0=DEBITS, 1=CHARGES : 0
SEQUENCE DE VALEURS OBSERVEES : 1
STOCKAGE DES PLUIES EFFICACES : 0
STOCKAGE DES VALEURS CALCULEES : 0
IMPRESSION DU BILAN 0=PAS 1=ANN 2=MEN : 2
ANALYSE DES PLUIES EFFICACES : 0
ANALYSE DES VALEURS CALCULEES : 0
ALLEGEMENT DU LISTING(1=ALLE. 2=SUPPRIM) : 0
DESSIN SUR IMPRIMANTE : 0
DIFFERENCE SIMULATION-OBSERVATION : 0
DESSIN SUR TABLE TRAC 1=OUI; 2=DETAILS : 0
FOURNITURE DES BORNES DES PARAMETRES : 1
INTENSITE DE PONDERATION (0 1 OU 2...) : 0
***** FICHIER PLUIE *****
PAS DE TEMPS DES DONNEES
0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3
TYPE DE FORMAT DE LECTURE
0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0
***** FICHIER AGRIC. *****
PAS DE TEMPS DES DONNEES
0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3
TYPE DE FORMAT DE LECTURE
0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0
***** FICHIER ETP *****
PAS DE TEMPS DES DONNEES
0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3
TYPE DE FORMAT DE LECTURE
0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0
***** FICHIER OBSERVAT. *****
PAS DE TEMPS DES DONNEES
0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3
TYPE DE FORMAT DE LECTURE
0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0
*****
***** SOURCES DE PROVINS : SOURCE DE LA VOULZIE *****
VALEUR MAXIMALE (m/s) : 2.00000
VALEUR MINIMALE (m/s) : 0.00000
LARGEUR DU DESSIN (cm) : 16.00000
HAUTEUR DU DESSIN (cm) : 10.00000
*****
NOMBRE ANNEES DONNEES POUR LES ENTREES : 77
NOMBRE ANNEES DEMARRAGE <0 SI ABSENTES : 41
DATE PREMIERE ANNEE DE SIMULATION : 1907
NOMBRE ANNEES DE PREVISION : 0
DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES) : 0
DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP) : 0
NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS : 70
DUREE DES PLUIES EN MOY. PAR PAS (%) : 0
OPTION SOUT. 2:2 RES. 0.1:1 RES. 3:SEUIL : 2
OPTION =1 SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE : 0
COEF. DE CORRECTION DES PLUIES (%) : 8.40000 OPTIMISATION DU PARA0
CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF. (MM) : 155.00000 OPTIMISATION DU PARA1
COEF. DE CORRECTION DE L ETP (%) : 7.20000 OPTIMISATION DU PARA1
HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM) : 9999.00000 OPTIMISATION DU PARA0
TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL. (MOIS) : 2.85000 OPTIMISATION DU PARA1
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1. (MOIS) : 17.40000 OPTIMISATION DU PARA1
TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1.-->2. (MOIS) : 4.40000 OPTIMISATION DU PARA1
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2. (MOIS) : 102.00000 OPTIMISATION DU PARA1
DEBIT EXTERIEUR (M3/S) : 0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
SURFACE DU BASSIN VERSANT (KM2) : 2.500E+02 OPTIMISATION DU PARA0
COEF. DE CORRECTION DES PLUIES (%) : INF= -20.00000 SUP= 20.00000
CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF. (MM) : INF= 0.00100 SUP= 500.00000
COEF. DE CORRECTION DE L ETP (%) : INF= -30.00000 SUP= 30.00000
HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM) : INF= 0.00100 SUP=9999.00000
TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL. (MOIS) : INF= 0.15000 SUP= 30.00000
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1. (MOIS) : INF= 0.15000 SUP= 50.00000
TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1.-->2. (MOIS) : INF= 0.15000 SUP= 50.00000
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2. (MOIS) : INF= 0.15000 SUP= 180.00000
*****
*****

```

**Tableau 3 - Fichier de paramètres pour une simulation hydrologique
(sans prise en compte des transferts de nitrates)**

SIMULATION HYDROLOGIQUE VOULZIE

ETAT HYDRAULIQUE DES RESERVES EN MM ANNEE : -42

RESERVE SUPERFICIELLE : 155.00 MM
 RESERVOIR INTERMEDIAIRE : 51.73 MM
 RESERVOIR SOUTERRAIN RAPIDE : 60.43 MM
 RESERVOIR SOUTERRAIN LENT : 1300.54 MM

ANNEE -41 BILAN EN MM

ANN.	MOIS	PLUIE	ETP	ETR	P. EFF	G CAL	G OBS	G RAP	G S 1	G S 2	R SUP	R RAP	R INT	R LENT
-41	JANV	24.	10.	10.	15	12.	-2.	0.	3.	9.	155.	52.	61.	1303.
-41	FEVR	45.	16.	16.	29	12.	-2.	0.	3.	9.	155.	63.	64.	1305.
-41	MARS	30.	40.	40	0	12.	-2.	0.	3.	9.	145.	49.	63.	1307.
-41	AVRI	66.	69.	69.	0.	12.	-2.	0.	3.	9.	142.	39.	60.	1309.
-41	MAI	89.	96.	96.	0	12.	-2.	0.	3.	9.	135.	30.	56.	1310.
-41	JUIN	56.	116.	116.	0.	11.	-2.	0.	2.	9.	75.	24.	51.	1310.
-41	JUIL	44.	120.	119.	0.	11.	-2.	0.	2.	9.	0	19.	46.	1310.
-41	AOÛT	25.	103.	25.	0.	11.	-2.	0.	2.	9.	0.	15.	41.	1308.
-41	SEPT	27.	77.	27.	0.	11.	-2.	0.	2.	9.	0.	11.	36.	1306.
-41	OCTO	131.	42.	42.	0.	10.	-2.	0.	1.	9.	89.	9.	31.	1302.
-41	NOVE	42.	18.	18.	0.	10.	-2.	0.	1.	9.	112.	7.	27.	1298.
-41	DECE	56.	10.	10.	4.	10	-2.	0.	1.	9.	155.	8.	24.	1294.
-41-	-41	635.	716.	588.	47.	134.	-2.	0.	27.	107.				

ANNEE 1948 BILAN EN MM

ANN.	MOIS	PLUIE	ETP	ETR	P. EFF	G CAL	G OBS	G RAP	G S 1	G S 2	R SUP	R RAP	R INT	R LENT
1948	JANV	138.	15.	15.	123.	10	8.	0.	2.	7.	155.	105.	49.	1041.
1948	FEVR	50.	17.	17.	33.	11.	9.	0.	3.	7.	155.	107.	64.	1045.
1948	MARS	30.	64.	64.	0.	11.	9.	0.	3.	7.	122.	84.	71.	1050.
1948	AVRI	96.	78.	78.	0.	11.	8.	0.	3.	7.	140.	66.	73.	1056.
1948	MAI	41.	114.	114.	0.	11.	9.	0.	3.	7.	67.	52.	71.	1062.
1948	JUIN	64.	104.	104.	0.	11.	9.	0.	3.	7.	26.	40.	67.	1066.
1948	JUIL	61.	108.	87.	0.	10.	9.	0.	3.	7.	0.	32.	61.	1070.
1948	AOÛT	147.	89.	89.	0	10.	9.	0.	3.	7.	58.	25.	56.	1073.
1948	SEPT	48.	75.	75.	0.	10.	8.	0.	2.	7.	32.	19.	50.	1074.
1948	OCTO	21.	45.	45.	0.	9.	8.	0.	2.	7.	8.	15.	44.	1075.
1948	NOVE	53.	21.	21.	0	9.	8.	0.	2.	7.	39.	12.	39.	1074.
1948	DECE	56.	12.	12.	0.	9.	8.	0.	2.	7.	84.	9.	34.	1073.
1948-1948		805.	742.	721.	156.	121.	102.	0.	32.	87.				
1947-1948		837.	766.	622.	156.	119.	103.	0.	32.	86.				

ANNEE 1983 BILAN EN MM

ANN.	MOIS	PLUIE	ETP	ETR	P. EFF	G CAL	G OBS	G RAP	G S 1	G S 2	R SUP	R RAP	R INT	R LENT
1983	JANV	67.	17.	17.	50.	15	15.	0.	4.	11.	155.	116.	82.	1582.
1983	FEVR	59.	13.	13.	45	16.	17.	0.	5.	11.	155.	126.	95.	1588.
1983	MARS	44.	48.	48.	0.	16.	14.	0.	5.	11.	152.	99.	100.	1595.
1983	AVRI	154.	73.	73.	77.	17.	15.	0.	5.	11.	155.	138.	112.	1604.
1983	MAI	89.	89.	89.	0.	17.	16.	0.	6.	11.	155.	108.	116.	1614.
1983	JUIN	54.	116.	116.	0	17.	16.	0.	5.	11.	93.	84.	113.	1623.
1983	JUIL	54.	131.	131.	0	16.	17.	0	5.	11.	16.	66.	107.	1631.
1983	AOÛT	31.	100.	47.	0.	16.	16.	0.	5.	11.	0.	52.	99.	1637.
1983	SEPT	44.	80.	44.	0.	16.	16.	0.	4.	11.	0.	40.	90.	1642.
1983	OCTO	31.	36.	31.	0.	15.	15.	0.	4.	11.	0.	32.	80.	1645.
1983	NOVE	46.	21.	21.	0	15.	14.	0.	3.	11.	25.	25.	71.	1647.
1983	DECE	35.	12.	12.	0.	14.	14.	0.	3.	11.	48.	19.	62.	1647.
1983-1983		709.	736.	644.	173	189	184	0.	54	133				
1982-1983		945.	741.	664.	262.	186.	183.	0.	52.	131.				

BILAN MOYEN SUR LA PERIODE DE CALCUL (DEMARRAGE EXCLU)

PLUIE MM	ETR MM	PLF MM	GRAP MM	G S01 MM	G S02 MM	DIFF STD MOY (MM)
757.5	601.8	158.6	1.5	33.0	106.1	49.3

OBSERVE CALCULE

VALEUR MINI	0.52	0.69	M3/S
VALEUR MAXI	1.81	1.65	M3/S
VALEUR MOYENNE	1.11	1.11	M3/S
ECART-TYPE	0.29	0.21	M3/S

PLUIE EFFICACE MOYENNE
 LA PLUIE EFFICACE EST LA SOMME DE
 L'ECOLEMENT ET DE L'INFILTRATION

JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE
45.	36.	26	5	2	4	0.	1.	0	0.	7.	31

Tableau 4 - Principaux résultats d'une simulation hydrologique

SIMULATION VOULZIE 1907/83 AU PAS MENSUEL

1=NOMBRE DE CAS DES FICHIERS UTILISES
 0=DEBITS, 1=CHARGES : 0
 SEQUENCE DE VALEURS OBSERVEES : 1
 STOCKAGE DES PLUIES EFFICACES : 0
 STOCKAGE DES VALEURS CALCULEES : 0
 IMPRESSION DU BILAN 0=PAS 1=ANN 2=MEN: 1
 ANALYSE DES PLUIES EFFICACES : 0
 ANALYSE DES VALEURS CALCULEES : 0
 ALLEGEMENT DU LISTING(1=ALLE. 2=SUPPRIM): 0
 DESSIN SUR IMPRIMANTE : 0
 DIFFERENCE SIMULATION-OBSERVATION : 0
 DESSIN SUR TABLE TRAC. 1=OUI; 2=DETAILS: 0
 FOURNITURE DES BORNES DES PARAMETRES : 1
 INTENSITE DE PONDERATION (0 1 OU 2...) : 0

***** FICHER PLUIE *****

PAS DE TEMPS DES DONNEES

0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3

TYPE DE FORMAT DE LECTURE

0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0

***** FICHER AGRIC. *****

PAS DE TEMPS DES DONNEES

0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3

TYPE DE FORMAT DE LECTURE

0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0

***** FICHER ETP *****

PAS DE TEMPS DES DONNEES

0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3

TYPE DE FORMAT DE LECTURE

0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0

***** FICHER OBSERVAT. *****

PAS DE TEMPS DES DONNEES

0=JOURN. 1=PENTA. 2=DECA. 3=MENS. : 3

TYPE DE FORMAT DE LECTURE

0= SEQUENTIEL 1= MULTIPLE : 0

SOURCES DE PROVINS CONCENTRATION VOULZIE

VALEUR MAXIMALE	:	80.00000	mg/l
VALEUR MINIMALE	:	0.00000	mg/l
LARGEUR DU DESSIN (cm)	:	16.00000	
HAUTEUR DU DESSIN (cm)	:	10.00000	

NOMBRE ANNEES DONNEES POUR LES ENTREES: 77
 NOMBRE ANNEES DEMARRAGE <0 SI ABSENTES: 41
 DATE PREMIERE ANNEE DE SIMULATION : 1907
 NOMBRE ANNEES DE PREVISION : 0
 DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES) : 0
 DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP) : 0
 NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS : 130
 DUREE DES PLUIES EN MOY. PAR PAS (%) : 0
 OPTION SOUT. 2:2 RES. 0:1:1 RES. 3:SEUIL: 2
 OPTION =1 SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE: 0

Tableau 5 - Fichier de paramètres pour une simulation des transferts
 de nitrates

COEF. DE CORRECTION DES PLUIES	(%)	8.40000	OPTIMISATION DU PARA0
CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.	(MM)	155.00000	OPTIMISATION DU PARA0
COEF. DE CORRECTION DE L ETP	(%)	7.20000	OPTIMISATION DU PARA0
HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL	(MM)	9999.00000	OPTIMISATION DU PARA0
TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL.	(MOIS)	2.85000	OPTIMISATION DU PARA0
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1.	(MOIS)	17.40000	OPTIMISATION DU PARA0
TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1.-->2.	(MOIS)	4.40000	OPTIMISATION DU PARA0
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2.	(MOIS)	102.00000	OPTIMISATION DU PARA0
TEMPS DE MELANGE DS RES. SUPERF	(MOIS)	3.25273	OPTIMISATION DU PARA1
TEMPS DE MELANGE DS RES. INTERM.	(MOIS)	0.18875	OPTIMISATION DU PARA1
TEMPS DE MELANGE DS RES. SOU T 1	(MOIS)	0.16000	OPTIMISATION DU PARA1
TEMPS DE MELANGE DS RES. SOU T 2	(MOIS)	0.15000	OPTIMISATION DU PARA1
COEFFICIENT DE SATUR DE LA PLUIE (MG/L)		1038.04077	OPTIMISATION DU PARA1
COEFFICIENT DE CORRECTION DE BESOIN (%)		2.25391	OPTIMISATION DU PARA1
TEMPS DE LIBERA. PAR LES RACINES (MOIS)		0.16000	OPTIMISATION DU PARA0
VOLUME EAU LIEE RES. SUPERF.	(MM)	2386.47632	OPTIMISATION DU PARA1
VOLUME EAU LIEE RES. INTERM.	(MM)	1481.25317	OPTIMISATION DU PARA1
VOLUME EAU LIEE RES. SOU T 1	(MM)	1444.81213	OPTIMISATION DU PARA1
VOLUME EAU LIEE RES. SOU T 2	(MM)	1277.11548	OPTIMISATION DU PARA1
COEFFICIENT DE CORRECTION SUR EPAND (%)		11.43438	OPTIMISATION DU PARA1
COEFFICIENT DE CORRECTION SUR MINER (%)		11.98750	OPTIMISATION DU PARA1
CONCENTRATION CONSTANTE	(MG/L)	0.00000	OPTIMISATION DU PARA0
COEFFICIENT D AMPLITUDE	(----	1.00000	OPTIMISATION DU PARA0
CONCENTRATION INITIALE EAU LIBRE	(MG/L)	10.00000	
CONCENTRATION INITIALE EAU LIEE	(MG/L)	10.00000	
COEF. DE CORRECTION DES PLUIES	(%)	INF= -20.00000	SUP= 20.00000
CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.	(MM)	INF= 0.00100	SUP= 500.00000
COEF. DE CORRECTION DE L ETP	(%)	INF= -30.00000	SUP= 30.00000
HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL	(MM)	INF= 0.00100	SUP=9999.00000
TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL.	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 30.00000
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1.	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 50.00000
TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1.-->2.	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 50.00000
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2.	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 180.00000
TEMPS DE MELANGE DS RES. SUPERF	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 99.99000
TEMPS DE MELANGE DS RES. INTERM.	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 99.99000
TEMPS DE MELANGE DS RES. SOU T 1	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 99.99000
TEMPS DE MELANGE DS RES. SOU T 2	(MOIS)	INF= 0.15000	SUP= 99.99000
COEFFICIENT DE SATUR DE LA PLUIE (MG/L)		INF= 0.15000	SUP=9000.00000
COEFFICIENT DE CORRECTION DE BESOIN (%)		INF= -30.00000	SUP= 99.99000
TEMPS DE LIBERA. PAR LES RACINES (MOIS)		INF= 0.15000	SUP= 99.99000
VOLUME EAU LIEE RES. SUPERF.	(MM)	INF= 0.00000	SUP=6000.00000
VOLUME EAU LIEE RES. INTERM.	(MM)	INF= 0.00000	SUP=6000.00000
VOLUME EAU LIEE RES. SOU T 1	(MM)	INF= 0.00000	SUP=6000.00000
VOLUME EAU LIEE RES. SOU T 2	(MM)	INF= 0.00000	SUP=6000.00000
COEFFICIENT DE CORRECTION SUR EPAND (%)		INF= -30.00000	SUP= 99.90000
COEFFICIENT DE CORRECTION SUR MINER (%)		INF= -30.00000	SUP= 99.90000

Tableau 6 - Fichier de paramètres pour une simulation des transferts
de nitrates (suite)

Le tableau 7 présente les paramètres obtenus en fin de calage. Le coefficient d'ajustement R est égal à 0.95 (maximum possible 1.00 pour un ajustement parfait). Il donne également les caractéristiques des flux de pluie (135 mm/an sur toute la période y compris le démarrage) et de nitrates sortants (76 kg/ha/an).

Le tableau 8 montre le devenir des nitrates (épandus ou minéralisés) depuis la fin de la période de démarrage : 783 kg/ha produits, 631 consommés, 50 sortent par les exutoires, 100 sont stockés. Il indique également la répartition du stock de nitrates et la concentration dans chaque réservoir.

Le tableau 9 présente le bilan mensuel pour l'année 1983. Les abréviations sont les suivantes :

- EPAND = épandages
- CHAUM = libérations de nitrates par les résidus culturaux
- MINER = minéralisation du sol
- CONSO = consommation par les cultures
- SORTI = flux de nitrates sortant par les exutoires
- C CAL = concentration en nitrates calculée dans le débit (ou dans le réservoir souterrain)
- C OBS = concentration observée
- MA QH = flux de nitrates dans la composante rapide du débit (réservoir H)
- MA Q1 = flux de nitrates dans la composante lente n° 1 du débit (réservoir G1)
- MA Q2 = flux de nitrates dans la composante lente n° 2 du débit (réservoir G2)
- MA RU = stock de nitrates dans la phase liée du réservoir superficiel RU
FIXE
- MA H = stock de nitrates dans la phase liée du réservoir intermédiaire H
FIXE
- MA G1 = stock de nitrates dans la phase liée du réservoir souterrain G1
FIXE
- MA G2 = idem pour le réservoir G2.

APRES OPTIMISATION

COEFFICIENT SUR LES PLUIES 8.40 POURCENT
 CAPACITE DE LA RESERVE SUPER 155.00 MILLIMETRES
 COEFFICIENT CORRECTEUR D ETP 7.20 POURCENT
 HAUTEUR RUISSEL=PERCOLATION 9999.0000 MM
 TEMPS DE DEMI-MONTEE H -> 0 2.8500 MOIS
 TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT 1 17.4000 MOIS
 TEMPS 1->2 4.4000 MOIS
 TEMPS DEMI TARISS. TRES LENT 102.0000 MOIS
 COEF MELANGE DS RES. SUPERF 3.7034 MOIS
 COEF MELANGE DS RES. INTERM 0.8012 MOIS
 COEF MELANGE DS RES. SOUT 1 0.1500 MOIS
 COEF MELANGE DS RES. SOUT 2 0.1600 MOIS
 COEF DE SATURATION DE PLUIE 151.8 MG/L
 COEF DE CORRECT DE BESOINS 2.8 POURCENT
 TEMPS DE 1/2 LIBER DES RACIN 0.1600 MOIS
 VOLUME EAU LIEE RES. SUPERF 2550.4 MM
 VOLUME EAU LIEE RES. INTERM 1535.9 MM
 VOLUME EAU LIEE RES. SOUT 1 1481.2 MM
 VOLUME EAU LIEE RES. SOUT 2 1113.8 MM
 COEF DE CORRECT DE EPANDAGE 11.6 POURCENT
 COEF DE CORRECT DE REMINERA 11.9 POURCENT

NOMBRE DE VALEURS RETENUES 432 PAS DE TEMPS

R EST UN COEFFICIENT D' AJUSTEMENT ET NON UN COEFFICIENT DE CORRELATION

CONCENTRATION CONSTANTE 0.00 MG/L

COEFFICIENT D AMPLITUDE 1.000E+00

R CARRE= 0.9081

R = 0.9530

MOYENNE QUADRATIQUE DE L'ECART= 2.875 MG/L

GAIN GLOBAL D AJUSTEMENT PONDERE = 1.24E-05

EN MOYENNE

PLUIE EFFICACE CALCULEE 134.7 MM/AN
 FLUX DE MASSE CALCULE 75.9 KG/HA/AN
 MASSE FIXEE QD-LA RESERVE SUP EST SECHE 0.0 KG/HA/AN
 DUREE AVEC UNE RESERVE SUP SECHE 1.6 MOIS/AN

	OBSERVE	CALCULE	
VALEUR MINI.	20.50	20.09	MG/L
VALEUR MAXI.	54.54	57.15	MG/L
VALEUR MOYENNE	34.53	34.51	MG/L
ECART-TYPE	9.49	8.81	MG/L

PLUIE EFFICACE MOYENNE
 LA PLUIE EFFICACE EST LA SOMME DE
 L ECOULEMENT ET DE L INFILTRATION

JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE
45.	34.	26.	5.	3.	4.	0.	1.	0.	0.	7.	31.

Tableau 7 - Paramètres en fin de calage

CONCENTRATIONS INITIALES DANS LES RESERVOIRS (MG/L)
AU DEBUT DE LA SIMULATION

RESERVE SUPERFICIELLE	:	10.0	EAU LIEE :	10.0
RESERVE INTERMEDIAIRE	:	10.0		
RESERVE SOUTERRAINE 1	:	10.0		
RESERVE SOUTERRAINE 2	:	10.0		

EN MOYENNE : APPORTS ANNUELS = 782.7 KG/HA

DONT : 80.6 % CONSOMMES PAR LA VEGETATION
6.4 % SORT PAR LES EXUDOIRES
13.0 % EST STOCKE

BESOINS ANNUELS = 630.9 KG/HA

SOIT 100.0 % DES BESOINS SONT SATISFAITS

STOCKAGE PENDANT LA SIMULATION = 3670.9 KG/HA

REPARTI COMME SUIV	:	EN KG/HA		% des APPORTS ANNUELS	
	:	EAU LIEE	EAU LIBRE	EAU LIEE	EAU LIBRE
RESERVE SUPERFICIELLE	:	932.1	82.4	119.1	10.5
RESERVE INTERMEDIAIRE	:	831.3	13.6	106.2	1.7
RESERVE SOUTERRAINE 1	:	671.2	37.7	85.8	4.8
RESERVE SOUTERRAINE 2	:	327.1	598.6	41.8	76.5
ENGRAIS SOLIDE (SURFACE)	:	177.0		22.6	
RACINES ET CHAUME	:	0.0		0.0	

STOCK FINAL = 7014.6 KG/HA

REPARTI COMME SUIV	:	EN KG/HA		% des APPORTS ANNUELS	
	:	EAU LIEE	EAU LIBRE	EAU LIEE	EAU LIBRE
RESERVE SUPERFICIELLE	:	2821.5	109.7	360.5	14.0
RESERVE INTERMEDIAIRE	:	1387.3	17.6	177.2	2.2
RESERVE SOUTERRAINE 1	:	1121.7	47.1	143.3	6.0
RESERVE SOUTERRAINE 2	:	537.7	795.1	68.7	101.6
ENGRAIS SOLIDE (SURFACE)	:	177.0		22.6	
RACINES ET CHAUME	:	0.0		0.0	

SOIT LES CONCENTRATIONS EN MG/L :

	:	EAU LIEE	EAU LIBRE
RESERVE SUPERFICIELLE	:	110.6	70.8
RESERVE INTERMEDIAIRE	:	90.3	90.3
RESERVE SOUTERRAINE 1	:	75.7	75.7
RESERVE SOUTERRAINE 2	:	48.3	48.3

Tableau 8 - Devenir des nitrates depuis la fin de la période de démarrage

ANNEE 1983 BILAN MENSUEL CHIMIQUE KG/HA

ANN.	MOIS	PLUIE	P. EFF	EPAND	CHAUM	MINER	CONSO	SORTI	C CAL	C OBS	MA QH	MA Q1	MA Q2
		MM	MM	KG/HA	KG/HA	KG/HA	KG/HA	KG/HA	MG/L	MG/L	KG/HA	KG/HA	KG/HA
1983	JANV	67.2	49.8	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	54.8	52.5	0.4	2.9	5.0
1983	FEVR	58.5	45.2	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	55.9	53.4	0.5	3.4	5.0
1983	MARS	44.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	55.9	54.0	0.3	3.5	5.1
1983	AVRI	153.9	77.5	0.0	0.0	9.8	22.6	9.7	57.1	54.5	0.5	4.0	5.1
1983	MAI	88.9	0.0	761.1	0.0	24.6	113.0	9.7	57.2	53.7	0.3	4.1	5.2
1983	JUIN	54.2	0.0	0.0	0.0	39.4	339.1	9.5	56.9	52.8	0.2	4.1	5.2
1983	JUIL	54.2	0.0	0.0	0.0	49.2	339.1	9.3	56.6	53.7	0.1	3.9	5.3
1983	AOUT	31.4	0.0	0.0	0.0	49.2	45.2	9.0	56.2	54.0	0.1	3.6	5.3
1983	SEPT	44.4	0.0	0.0	88.0	49.2	0.0	8.7	55.7	53.5	0.0	3.2	5.4
1983	OCTO	31.4	0.0	0.0	0.0	24.6	0.0	8.3	55.2	53.9	0.0	2.9	5.4
1983	NOVE	45.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	54.6	54.5	0.0	2.6	5.4
1983	DECE	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	54.1	54.2	0.0	2.3	5.4

MA RU	MA H	MA G1	MA G2	R SUP	R RAP	R S 1	R S 2
FIXE	FIXE	FIXE	FIXE				
KG/HA	KG/HA	KG/HA	KG/HA	MM	MM	MM	MM
2816.	1403.	1092.2	516.7	155.0	116.2	81.	1581.9
2802.	1402.	1097.6	518.6	155.0	126.1	94.	1588.1
2786.	1402.	1101.9	520.6	151.5	98.6	99.	1595.0
2754.	1392.	1105.9	522.9	155.0	137.6	112.	1604.1
2737.	1388.	1109.7	525.3	155.0	107.6	115.	1613.8
2653.	1387.	1112.8	527.6	93.1	84.1	113.	1622.9
2457.	1387.	1115.3	529.7	15.9	65.9	107.	1630.9
2532.	1387.	1117.2	531.7	0.0	51.6	98.	1637.4
2736.	1387.	1118.8	533.5	0.0	40.4	89.	1642.2
2809.	1387.	1120.0	535.1	0.0	31.6	80.	1645.4
2812.	1387.	1120.9	536.5	24.6	24.8	70.	1646.8
2821.	1387.	1121.7	537.7	47.7	19.4	62.	1646.7

Tableau 9 - Bilan mensuel de l'année 1983

Tableau 10 - Bilan annuel de l'année 1983 et bilan annuel moyen

Le tableau 10 donne le bilan annuel pour 1983 ainsi que le bilan moyen de la fin de la période de démarrage à la fin de la période de calcul. Les abréviations supplémentaires sont les suivantes :

M SOR = flux de nitrates sortant par les exutoires
 M RAP = flux de nitrates sortant du réservoir intermédiaire H
 M Q1 = flux de nitrates sortant du réservoir souterrain G1
 M Q2 = flux de nitrates sortant du réservoir souterrain G2
 SOLID = stock de nitrates sous forme solide à la surface du sol en fin d'année
 RUFIX = stock de nitrates dans la phase liée (FIX) et libre (LIB) dans le réservoir
 RULIB superficiel RU
 HFIX = idem pour le réservoir intermédiaire H
 HLIB
 G1 FIX = idem pour le réservoir souterrain G1
 G1 LIB
 G2 FIX = idem pour le réservoir souterrain G2
 G2 LIB
 RACIN = stock de nitrates dans les résidus cultureux
 STOCK = stock total de nitrates (phases liées et libres)
 LIBERA = libération de nitrates par les résidus cultureux
 FLUX LIQ = flux de nitrates sortant par les exutoires.

Le tableau 11 reproduit les fichiers de résultats :

TABLEAU.LST (paramètres hydrologiques)

TABLCHIM.LST (paramètres de transferts de nitrates)

MINMAXMOY.LST = Comparaison des valeurs minimales maximales, moyennes observées et calculées ainsi que des écarts types. Lors d'une simulation hydrologique les valeurs comparées sont des débits ou des niveaux. Pour une simulation avec transferts de nitrates ce sont les concentrations en nitrates.

MOYBILAN.LST = Bilan moyen de la fin de la période de démarrage à la fin de la période de calcul.

Les abréviations sont les suivantes :

AJUST.PON = coefficient d'ajustement pondéré
 AJUST.NAT = coefficient d'ajustement naturel (non pondéré)
 COR PLU = coefficient de correction sur les précipitations

Fichier TABLEAU.LST

```

SIMULATION VOULZIE AVEC DISSOLUTION ..

*AJUST. PON*AJUST. NAT* COR PLU * RES SUP * COR ETP:
*      *      *      % *      MM *      % *
  0.9530    0.9530    8.40    155.00    7.20

+ RUI=PER * T1/2 MON* T1/2 TA1* T1-->2 * T1/2 TA2*
+      MM *      MOIS*      MOIS*      MOIS*      MOIS*
9999.0000    2.8500    17.4000    4.4000    102.0000

```

Fichier TABLCHIM.LST

```

SIMULATION VOULZIE AVEC DISSOLUTION ..
NUMERO* AMPLIT. * CONST.*AJUST. PON*TP SUP*TP INT*TP S 1*TP S 2*SAT PL:
  1  1.000E+00    0.00    0.9530  3.703  0.791  0.150  0.160  151.8

+COR BE*TP RAC*FIX SU*FIX IN*FIX S1*FIX S2*COR EP*COR MI*
  2.8  0.160 2550.4 1535.9 1481.2 1113.8  11.6  11.9

```

Fichier MINMAXMOY.LST

```

SIMULATION VOULZIE AVEC DISSOLUTION ..
NO  XMIN OBS  XMIN SIM  XMAX OBS  XMAX SIM
  1   20.50   20.09   54.54   57.15

XMOY OBS  XMOY SIM  SIGM OBS  SIGM SIM  NBRE OBS
 34.53   34.51    9.49    8.81    432

```

Fichier MOYBILAN.LST

```

SIMULATION VOULZIE AVEC DISSOLUTION ..
NO  PLUIE MM  ETR MM  PLF MM  GRAP MM  G SO1 MM  G SO2 MM
  1   757.5   601.8   158.6    1.5    33.0   106.1

DIFF STO  EPAND  MINERA  LIBERA  CONSOM FLUX LIQ
  102.0   448.6   246.1    88.0   630.9   49.9

```

Tableau 11 - Exemple de fichiers de résultats : TABLEAU.LST,
TABLCHIM.LST, MINMAXMOY.LST, MOYBILAN.LST

RES SUP	= capacité de la réserve superficielle
COR ETP	= coefficient de correction sur l'ETP
RUI = PER	= hauteur d'équi-ruissellement
$T\frac{1}{2}$ MON	= temps de demi percolation
$T\frac{1}{2}$ TA1	= temps de demi tarissement des réservoirs G1 et G2
$T\frac{1}{2}$ TA2	
T1 -> T2	= temps de demi transfert de G1 à G2 (ou bien seuil de séparation entre G1 et G2)
TP SUP	= temps de demi mélange dans les réservoirs :
TP INT	superficiel (RU), Intermédiaire (H), souterrain n° 1 (G1),
TP S1	souterrain (G2) et temps de demi libération par les résidus cultureux
TP S2	(Racines)
TP RAC	
SAT PL	= coefficient de saturation de la pluie
COR BE	= coefficient de correction : des Besoins (BE),
COR EP	des Epanchages (EP),
COR MI	de la Minéralisation (MI).
FIX RU	= masse d'eau liée dans les réservoirs :
FIX IN	superficiel (RU), intermédiaire (IN),
FIX S1	souterrain 1 (G1) et
FIX S2	souterrain 2 (G2).
X MIN	= valeur minimale (MIN),
X MAX	maximale (MAX) et
X MOY	moyenne (MOY)
OBS	= observé / simulé
SIM	
SIGM	= écart type.

La figure 12 permet la comparaison des concentrations observées (en trait continu) et calculées (en trait interrompu) : période totale avec démarrage : 1907/1983 et période observée uniquement : 1947/1983. Cette figure montre que le modèle permet de reproduire correctement l'évolution de la concentration observée. La figure 13 présente une analyse de sensibilité simultanément sur les paramètres de saturation de la pluie (en abscisse de -75 % à +75 % de la valeur optimale) et du volume d'eau liée dans la réserve superficielle (en ordonnée de -90 % à +90 % de la

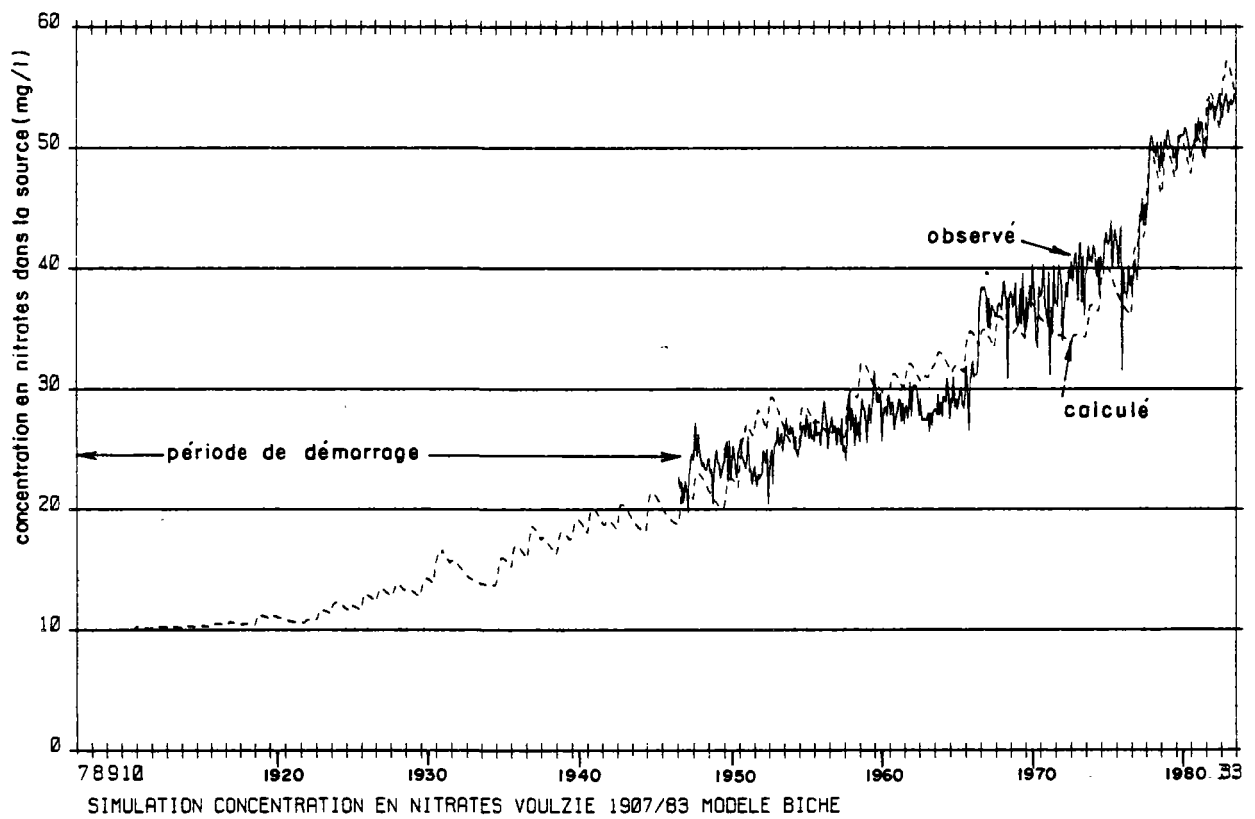
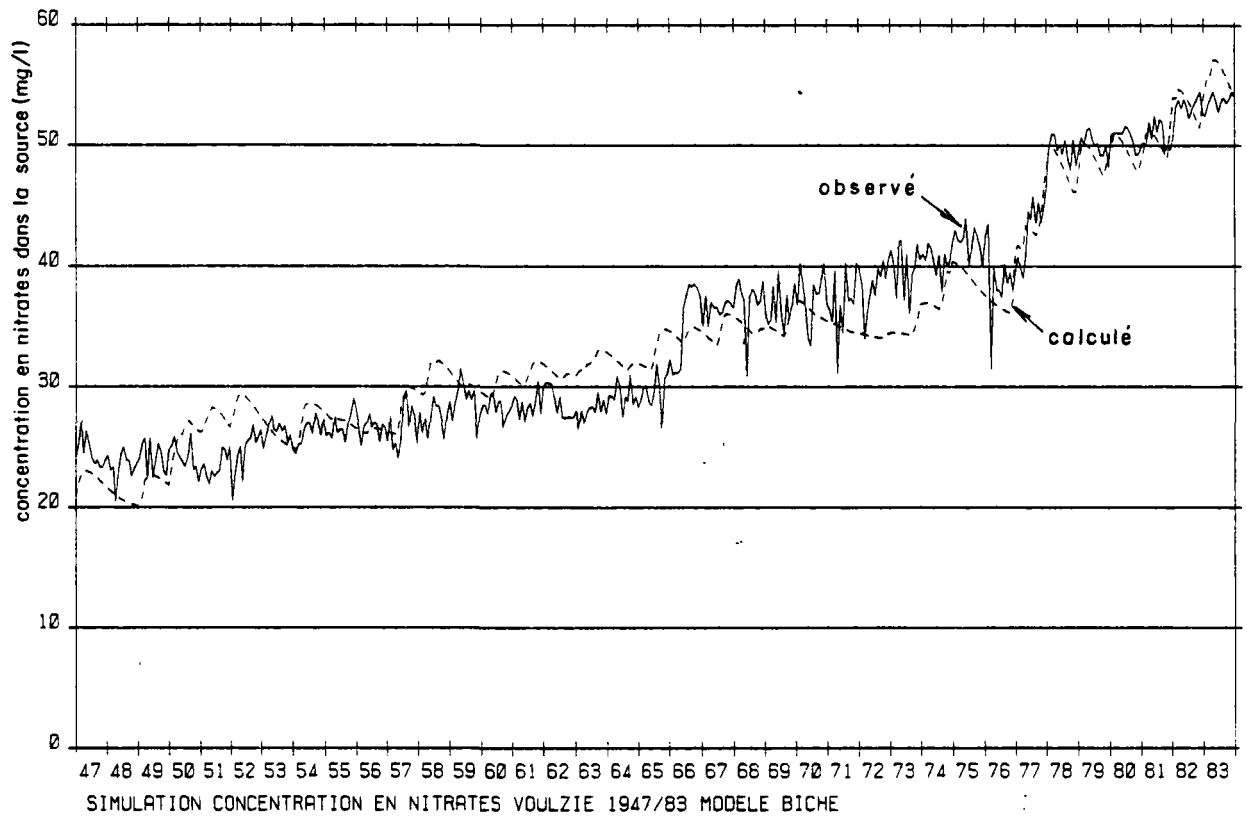


Figure 12

valeur optimale). Cette figure montre qu'il existe une certaine compensation entre ces paramètres puisque dans toute une zone le coefficient d'ajustement est aussi élevé (égal à 0.95). Une faible saturation de la pluie (80 mg/l) est compensé par un fort volume d'eau liée (4000 mm) ce qui donne une inertie équivalente. Elle fait apparaître également que le volume d'eau liée doit être au moins égal à 2300 mm sous peine de voir une dégradation sensible de l'ajustement qui devient extrêmement mauvais pour un volume inférieur à 1500 mm.

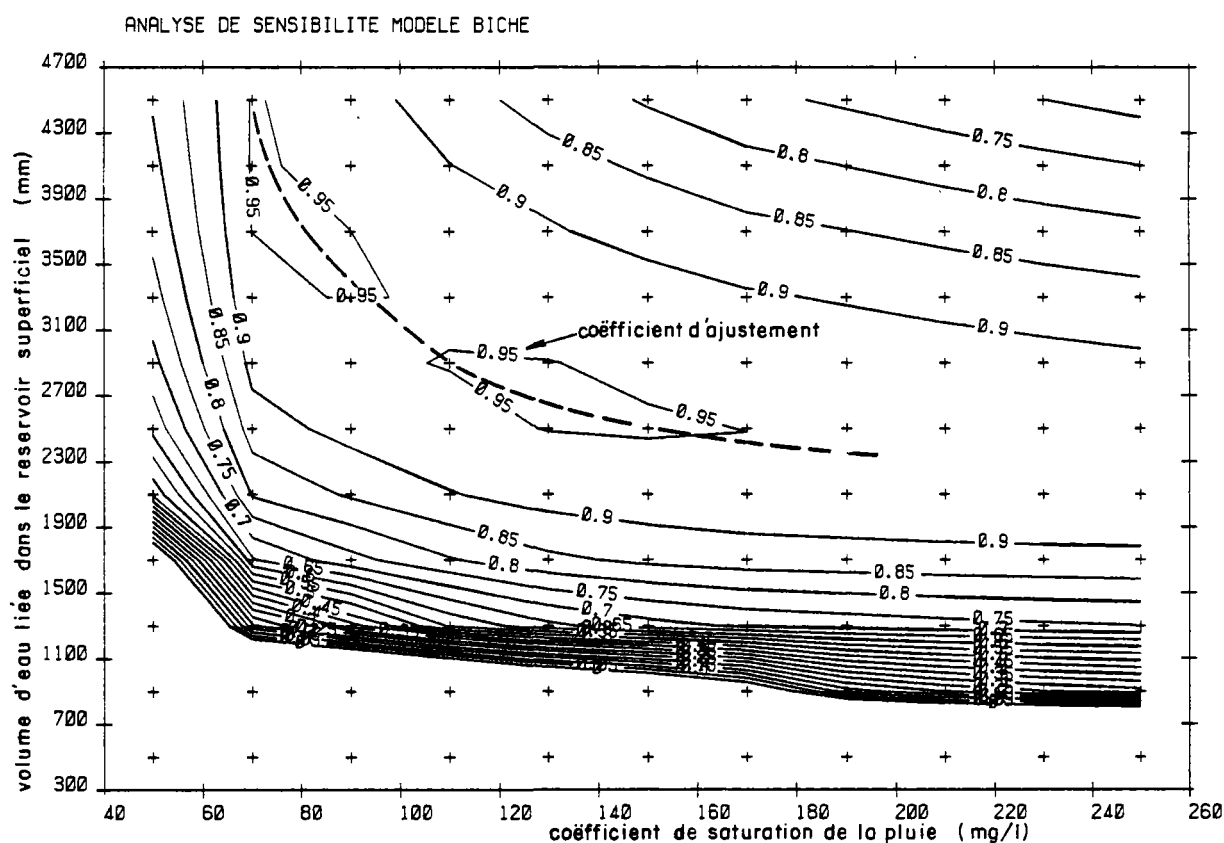


Figure 13 - Analyse de sensibilité de deux paramètres du modèle BICHE

14 - SIMULATION DU MELANGE ENTRE LES DEUX PHASES D'UN RESERVOIR

On dispose dans un réservoir :

- d'une phase d'eau libre de masse m_1 et de volume V_1
- d'une phase d'eau liée de masse m_2 et de volume V_2
- avec une cinétique d'échange t_e .

Après un temps infini, ou bien si la cinétique est instantanée ($t_e = 0$), on obtiendrait la concentration d'équilibre :

$$C_{eq} = \frac{(m_1 + m_2)}{(V_1 + V_2)}$$

Pendant un pas de temps dt (petit devant t_e), les échanges sont :

- proportionnels à la différence de concentration,
- proportionnels à la durée du pas de temps dt .

Soit en supposant que la concentration C_2 dans la phase d'eau liée est supérieure à celle C_1 de la phase d'eau libre (c'est-à-dire $C_{eq} > C_1$), on obtient la masse qui passe de la phase d'eau liée vers la phase d'eau libre dm_{21} :

$$dm_{21} = V_1 (C_{eq} - C_1) dt / t_e$$

$$\text{d'où} \quad m_1 = m_1 + dm_{21}$$

$$m_2 = m_2 - dm_{21}$$

15 - ANALYSE DE LA MONTEE EN CONCENTRATION DANS UN RESERVOIR CONSTITUE DE DEUX PHASES

On dispose dans un réservoir :

- d'une phase d'eau libre de volume V_1 contenant une masse m_1
- d'une phase d'eau liée de volume V_2 contenant une masse m_2 .

La cinétique d'échange est t_e .

On suppose en première approximation que le réservoir est en équilibre hydraulique. Il a donc un volume V_1 constant. Il reçoit une pluie efficace représentant un débit Q qu'il vidange. Il reçoit également un flux de masse M .

A l'instant initial, les deux phases ne contiennent aucune masse, soit :

$$m_1(0) = 0$$

$$m_2(0) = 0$$

On s'intéresse à la mise en régime chimique du réservoir, c'est-à-dire à l'évolution de la masse, donc de la concentration dans la phase libre du réservoir, donc dans le débit Q qui se vidange.

15.1 - EQUATION DE CONTINUITE

Les équations de continuité de la masse et du volume dans la phase d'eau libre s'écrivent :

$$m_1(t) \rightarrow m_1'(t) = m_1 + M \cdot dt \quad (1)$$

$$V_1 \rightarrow V_1' = V_1 + Q \cdot dt \quad (2)$$

A l'équilibre, on aurait la concentration C_{eq} :

$$C_{eq} = \frac{m_1 + m_2 + M \cdot dt}{V_1 + V_2 + Q \cdot dt} = \frac{m_1' m_2'}{V_1' + V_2} \quad (3)$$

Les échanges pendant le temps dt sont donc :

$$\frac{dm_2}{dt} = -m_{21} = -V'_1 (C_{eq} - m'_1/V'_1) \cdot dt/te \quad (4)$$

en notant m_{21} les échanges de la phase liée (2) vers la phase libre (1), soit en utilisant l'équation (3).

$$m_{21} = \frac{V'_1 \cdot m_2 - m'_1 V_2}{(V'_1 + V_2) \cdot te} \quad (5)$$

On note alors :

$$m''_1 = m'_1 + m_{21}$$

soit la concentration dans la phase d'eau libre

$$C''_1 = m''_1 / V'_1$$

d'où un transfert de masse TM qui s'écoule de la phase d'eau libre lors de la vidange :

$$TM = C''_1 \cdot Q \cdot dt$$

Il reste donc après la vidange :

$$m_1(t + dt) = m''_1 - C''_1 \cdot Q \cdot dt$$

soit en développant :

$$m_1(t + dt) = m'_1 + \frac{V'_1 \cdot m_2 - m'_1 V_2}{V'_1 + V_2} \cdot \frac{dt}{te} \cdot 1 - \frac{Q}{V'_1} dt$$

et en se limitant aux termes du premier ordre :

$$\frac{dm_1}{dt} = -\frac{Q}{V_1} - \frac{V_2}{(V_1 + V_2) \cdot te} m_1 + \frac{V_1}{(V_1 + V_2) \cdot te} m_2 + M \quad (6)$$

et d'après les équations (4) et (5) en se limitant au premier ordre :

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{V_2}{(V_1 + V_2).te} \cdot m_1 - \frac{V_1}{(V_1 + V_2).te} m_2 \quad (7)$$

15.2 - SYSTEME D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES

On arrive donc à un système linéaire de deux équations du premier ordre à coefficients constants :

$$\frac{dm_1}{dt} = a_1 m_1 + b_1 m_2 + c_1 \quad (8)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = a_2 m_1 + b_2 m_2 + c_2 \quad (9)$$

. Résolution du système

Pour résoudre ce système, on dérive la première équation, et on remplace dm_2/dt par sa valeur dans l'équation (9) ; on remplace également m_2 par sa valeur déduite de l'équation (8).

$$\frac{d^2 m_1}{dt^2} = a_1 \frac{dm_1}{dt} + b_1 \left(a_2 m_1 + \frac{b_2}{b_1} \frac{dm_1}{dt} - a_1 m_1 - c_1 \right) + c_2$$

soit :

$$\frac{d^2 m_1}{dt^2} - (a_1 + b_2) \frac{dm_1}{dt} + (a_1 b_2 - a_2 b_1) m_1 = b_1 c_2 - b_2 c_1 \quad (10)$$

équation du deuxième ordre en m_1 à coefficients constants.

• **Solution particulière**

$$m_1 = \text{constante} = \frac{b_1 c_2 - b_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

$$\text{soit } m_1 = \frac{M V_1}{Q}$$

qui est bien la masse à l'équilibre.

La solution de l'équation du deuxième ordre s'écrit sous la forme :

$$\lambda e^{r_1 t} + \mu e^{r_2 t}$$

r_1 et r_2 sont déterminés par l'équation caractéristique associée :

$$r^2 - (a_1 + b_2) r + (a_1 b_2 - a_2 b_1) = 0$$

soit la solution :

$$r = -\left(\frac{Q}{2V_1} + \frac{1}{2t_e}\right) \pm \left[\left(\frac{Q}{2V_1} + \frac{1}{2t_e}\right)^2 - \frac{Q}{(V_1 + V_2)t_e}\right]^{1/2}$$

On détermine les constantes λ et μ par les conditions initiales dans la solution complète :

$$m_1 = \lambda e^{r_1 t} + \mu e^{r_2 t} + \frac{M V_1}{Q}$$

$$m_1(0) = 0$$

$$m_2(0) = 0$$

soit en calculant m_2 à partir de l'équation (8) complète :

$$m_2 = \frac{1}{b_1} \frac{dm_1}{dt} - \frac{a_1 m_1}{b_1} - \frac{c_1}{b_1}$$

soit :

$$m_1(o) = \lambda + \mu + \frac{M V_1}{Q} = 0$$

$$m_2(o) = r_1 \lambda + r_2 \mu - a_1 \lambda - a_1 \mu - a_1 \frac{M V_1}{Q} - C_1 = 0$$

15.3 - RESOLUTION DE L'EQUATION CARACTERISTIQUE

Le discriminant s'écrit :

$$D = B^2 - A$$

avec

$$A = \frac{Q}{(V_1 + V_2) t_e}$$

$$B = \frac{Q}{2 V_1} + \frac{1}{2 t_e}$$

On étudie donc le rapport :

$$k = \frac{A}{B^2}$$

$$k = \frac{4 V_1}{V_1 + V_2} \cdot \frac{V_1}{Q \cdot t_e (1 + V_1/Q \cdot t_e)^2}$$

On pose alors :

$$\alpha = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad \text{(rapport du volume d'eau libre sur le volume total d'eau)}$$

$$\beta = \frac{V_1 / Q}{t_e} \quad \text{(rapport du temps de renouvellement sur le temps d'échange)}$$

On obtient alors :

$$k = 4 \alpha \cdot \frac{\beta}{(1 + \beta)^2}$$

or on remarque immédiatement que :

$$\alpha < 1$$

et $\beta / (1 + \beta)^2 < 1$

La valeur maximale étant 0.25 pour $\beta = 1$, donc k est toujours inférieur à 1, le discriminant est toujours positif (il est nul pour le cas particulier $V_2 = 0$ et $t_e = V_1/Q$). L'équation caractéristique admet donc deux racines. On vérifie immédiatement qu'elles sont toutes deux négatives. La solution n'admettra donc pas d'oscillations.

15.4 - RESOLUTION APPROCHEE DANS LE CAS (LE PLUS GENERAL) OU $k \ll 1$

$$k \ll 1$$

si $\alpha \ll 1$, ou $\beta \ll 1$ ou $\beta \gg 1$

On obtient alors les racines de l'équation caractéristique :

$$r = -\frac{Q}{2V_1} (1 + \beta) \pm \left[\left(\frac{Q}{2V_1} \right)^2 (1 + \beta)^2 - \frac{\alpha}{\beta t_e^2} \right]^{1/2}$$

$$r = -\frac{(1+\beta)}{2\beta \cdot t_e} \pm \left\{ \frac{(1+\beta)^2}{(2\beta \cdot t_e)^2} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\beta \cdot t_e^2} \cdot \frac{(2\beta \cdot t_e)^2}{(1+\beta)^2} \right] \right\}^{1/2}$$

$$r = -\frac{1+\beta}{2\beta \cdot t_e} \pm \frac{1+\beta}{2\beta \cdot t_e} \left(1 - \frac{4\alpha\beta}{(1+\beta)^2} \right)^{1/2}$$

$$r = -\frac{1+\beta}{2\beta \cdot t_e} \pm \frac{1+\beta}{2\beta \cdot t_e} \cdot \left(1 - \frac{2\alpha\beta}{(1+\beta)^2} \right)$$

$$r_1 = -\frac{\alpha}{(1+\beta)t_e} \quad (12)$$

$$r_2 = -\frac{1+\beta}{\beta \cdot t_e} + \frac{\alpha}{(1+\beta)t_e} \quad (13)$$

15.5 - CALCUL DES CONSTANTES

$$\lambda + \mu + \frac{M V_1}{Q} = 0 \quad (14)$$

$$(r_1 - a_1) \lambda + (r_2 - a_1) \mu - M \left(a_1 \cdot \frac{V_1}{Q} + 1 \right) = 0 \quad (15)$$

soit en remplaçant dans (15) μ par sa valeur obtenue dans l'équation (14) :

$$(r_1 - a_1) \lambda + (r_2 - a_1) \cdot (-\lambda - M V_1/Q) - M (a_1 \cdot V_1/Q + 1) = 0$$

$$(r_1 - r_2) \lambda = M (r_2 \cdot V_1/Q + 1)$$

or :

$$a_1 = - \left[\frac{Q}{V_1} + \frac{V_2}{(V_1 + V_2) \cdot t_e} \right] = - \left(\frac{1}{\beta \cdot t_e} + \frac{1 - \alpha}{t_e} \right) = - \frac{1}{\beta \cdot t_e} \cdot (1 + \beta - \alpha\beta)$$

$$r_1 - r_2 = \frac{1 + \beta}{\beta \cdot t_e} - \frac{2\alpha}{(1 + \beta)t_e} = \frac{1}{t_e} \left(\frac{1 + \beta}{\beta} - \frac{2\alpha}{1 + \beta} \right)$$

$$r_2 \frac{V_1}{Q} + 1 = \left(\frac{\alpha}{1 + \beta} - \frac{1 + \beta}{\beta} \right) \beta + 1$$

soit en remplaçant dans l'équation en λ :

$$\frac{1}{t_e} \cdot \frac{[(1 + \beta)^2 - 2\alpha\beta]}{\beta(1 + \beta)} \lambda = M \cdot \beta \cdot \frac{\alpha\beta - (1 + \beta)^2 + (1 + \beta)}{\beta(1 + \beta)}$$

$$\lambda = M \cdot \beta \cdot t_e \cdot \beta \cdot \frac{\alpha - (1 + \beta)}{(1 + \beta)^2 - 2\alpha\beta}$$

ou encore :

$$\lambda = \frac{M V_1}{Q} \cdot \beta \cdot \frac{\alpha - (1 + \beta)}{(1 + \beta)^2 - 2\alpha\beta}$$

$$\mu = - \frac{M V_1}{Q} \left[1 + \beta \cdot \frac{\alpha - (1 + \beta)}{(1 + \beta)^2 - 2\alpha\beta} \right] \quad (16)$$

La solution s'écrit donc :

$$m_1 = \frac{M V_1}{Q} \left[1 + K_1 e^{r_1 t} - (K_1 + 1) e^{r_2 t} \right]$$

avec :

$$K_1 = \beta \cdot \frac{\alpha - (1 + \beta)}{(1 + \beta)^2 - 2\alpha\beta}$$

L'étude de la dérivée montre qu'elle ne s'annule jamais et qu'on obtient donc pas de pic.

15.6 - CAS PARTICULIER D'UNE CINETIQUE INSTANTANEE

Si la cinétique est instantanée, on a :

$$t_e = 0$$

c'est-à-dire : $\beta = \infty$

et $\beta \cdot t_e = V_1 / Q$

On obtient alors :

$$r_1 = - Q / (V_1 + V_2)$$

$$r_2 = - \infty$$

$$\lambda = M V_1 / Q$$

$$\mu = 0$$

$$\text{d'où} \quad m_1 = \frac{M V_1}{Q} \left[1 - e^{-Q \cdot t / (V_1 + V_2)} \right] \quad (17)$$

C'est donc une augmentation de concentration qui tend exponentiellement vers $M V_1 / Q$.

La constante de temps d'établissement du régime est donc

$$T = \frac{Q}{V_1 + V_2}$$

soit un temps de demi-tarissement

$$t_d = T \ln(2) = 0.693 Q / (V_1 + V_2)$$

On déduit immédiatement la concentration C_1 dans la phase liquide :

$$C_1(t) = \frac{M}{Q} \left[1 - e^{-Q \cdot t / (V_1 + V_2)} \right] \quad (18)$$

C'est également la concentration du flux qui s'écoule à la sortie du réservoir.

15.7 - CAS PARTICULIER D'UNE CINETIQUE INFINIEMENT LENTE

$$t_e = \infty$$

Il est évident que V_2 n'intervient plus, et on a alors une mise en équilibre dans le seul réservoir V_1 :

$$C_1(t) = \frac{M}{Q} \left[1 - e^{-Q \cdot t / V_1} \right]$$

15.8 - CAS PARTICULIER D'UN FLUX LIQUIDE NUL

Si on suppose que (pendant un certain temps) l'alimentation en eau claire Q (et aussi la vidange) est nulle l'équation 10 devient

$$\frac{d^2 m_1}{dt^2} - (a_1 + b_2) \frac{dm_1}{dt} = b_1 c_2 - b_2 c_2$$

d'où la solution particulière :

$$\frac{dm_1}{dt} = \text{constante} = \frac{b_2 c_1 - b_1 c_2}{a_1 + b_2} = M V_1 / (V_1 + V_2)$$

soit :

$$m_1 = M V_1 t / (V_1 + V_2) \quad \text{qui correspond bien à une augmentation linéaire de la concentration}$$

L'équation caractéristique (11) n'a plus qu'une racine

$$r = a_1 + b_2 = - \frac{1}{t_e}$$

d'où l'équation complète

$$m_1 = \lambda e^{rt} + \mu + M V_1 t / (V_1 + V_2)$$

d'où les constantes λ et μ d'après les conditions initiales :

$$\begin{aligned} m_1(0) &= 0 \\ m_2(0) &= 0 \end{aligned} \quad \text{avec} \quad m_2 = \frac{1}{b_1} \frac{dm_1}{dt} - \frac{a_1 m_1}{b_1} - \frac{c_1}{b_1} \quad \text{d'après (8)}$$

$$m_1(0) = \lambda + \mu = 0$$

$$m_2(0) = r\lambda + M V_1/(V_1 + V_2) - a_1\lambda - a_1\mu - C_1 = 0$$

$$\text{soit} \quad \lambda = - \frac{t_e V_2}{V_1 + V_2}$$

$$m_1 = \frac{V_2 \cdot t_e \cdot M}{V_1 + V_2} (1 - e^{rt}) + \frac{V_1 M T}{V_1 + V_2}$$

m_2 donné d'après 8.

15.9 - EXEMPLES

Pour une cinétique quelconque, on obtient un résultat situé entre les deux cas limites précédents.

15.9.1 - EXEMPLE AVEC UN FORT AMORTISSEMENT

(fig. 14)

$$V_1 = 50 \text{ mm}$$

$$V_2 = 950 \text{ mm}$$

$$Q = 50 \text{ mm/mois (soit 600 mm/an de pluies efficaces)}$$

On a alors :

$$\alpha = 0.05$$

$$\beta = 1 / t_e$$

On a alors tracé les courbes de mises en régime pour les valeurs suivantes :

$t_e = 0$	0.2	0.5	1	2	5	∞
$\beta = \infty$	5	2	1	0.5	0.2	0

et on a reporté la concentration réduite C' en fonction du temps réduit t' :

$$C' = Q C_1 / M$$

$$t' = Q \cdot t / V_1$$

Les courbes sont graduées suivant t'_e avec :

$$t'_e = \frac{Q \cdot t_e}{V_1}$$

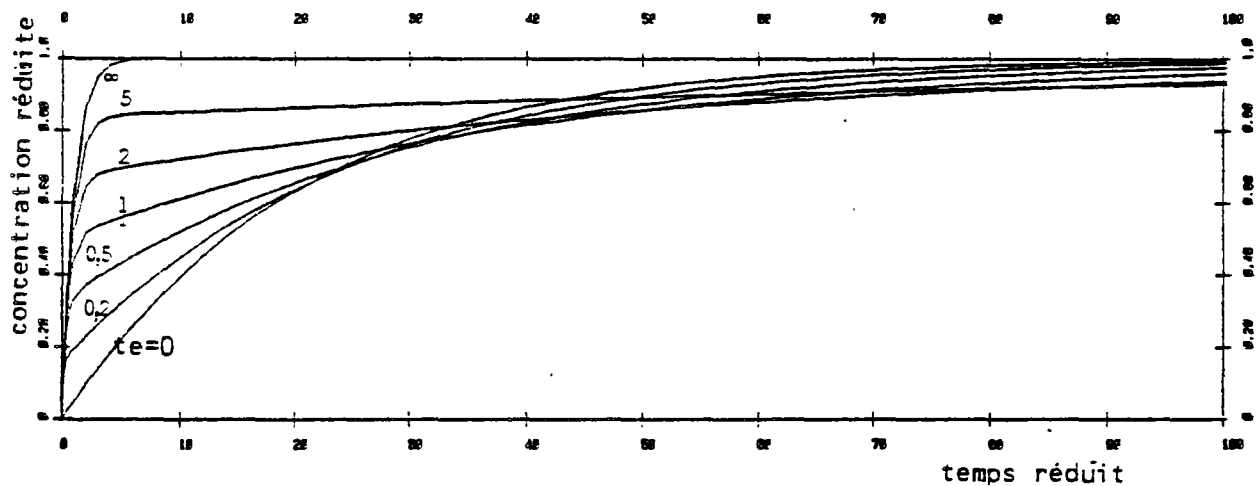


Figure 14 - Mise en régime avec phase mobile et phase fixe $\alpha = 0.05$
Fort amortissement

15.9.2 - EXEMPLE AVEC UN FAIBLE AMORTISSEMENT

(fig. 15)

On a effectué les mêmes calculs avec les valeurs suivantes :

$$V_1 = 50 \text{ mm} \quad V_2 = 200 \text{ mm}$$

$$\text{soit } \alpha = 0.20$$

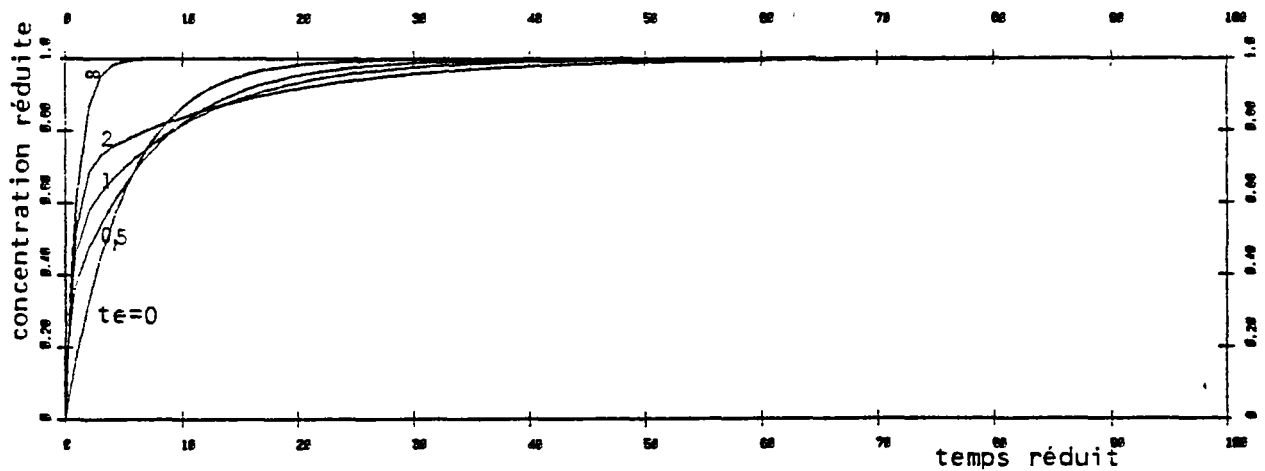


Figure 15 - Mise en régime avec phase mobile et phase fixe

$$\alpha = VM/(VM+VF) = 0.20$$

Faible amortissement

15.10 - LISTE DE VARIABLE

a_1, a_2	{	constantes
b_1, b_2		
c_1, c_2		
C_1, C_2	= concentrations dans l'eau libre et l'eau liée	
k	= constante	
m_1	= masse d'eau libre	
m_2	= masse d'eau liée	
M	= flux de masse apportée	
Q	= débit d'alimentation	
r	{	solutions de l'équation caractéristique (inverse d'un temps)
r_1		
r_2		
t	= temps	
t_d	= temps de demi établissement de l'équilibre	
t_e	= constante de temps d'échange	
V_1	= volume d'eau libre	
V_2	= volume d'eau liée	
α	= rapport du volume d'eau libre au volume total = constante	
β	= rapport du temps de renouvellement au temps d'échange = constante	
λ	{	constantes d'intégration
μ		

16 - APPLICATIONS DU MODELE BICHE

Trois applications du modèle BICHE sont décrites dans les Annexes I, II et III.

Annexe I : Application à un ensemble de sources karstiques près de Rembercourt aux Pots (Meuse). Le système karstique contrôle un bassin total d'environ 400 hectares. Les débits et les concentrations ont été suivis pendant 2 ans et demi de 1980 à 1982. Après calage trois scénarios d'augmentation ou de diminution des épandages ont été simulés.

Annexe II : Application aux sources de la Voulzie près de la ville de Provins (Seine et Marne) qui contrôlent un bassin de 250 km² environ et sont utilisées pour l'alimentation en eau de la ville de Paris. Après calage 2 scénarios ont été simulés : le maintien des conditions actuelles ou une réduction extrêmement forte des épandages.

Annexe III : Application à un forage AEP de la ville de Pithivier en Beauce. Les niveaux (en un piézomètre proche) et les concentrations sont suivies pendant une dizaine d'années. Après ajustement du modèle on a simulé le maintien des conditions actuelles pendant une cinquantaine d'années.

CONCLUSION

Le modèle BICHE décrit dans ce rapport a fait l'objet d'un certain nombre d'applications dont 3 sont décrites dans les annexes I à III. Il est apparu qu'il était possible de modéliser les évolutions de concentrations en nitrates dans les sources ou les nappes souterraines à condition de disposer d'historiques de mesures de concentrations pendant une durée suffisamment longue (surtout pour les systèmes à réaction lente) et d'historiques d'occupation des sols et d'épandages. A titre d'exemple un historique d'au moins 5 à 10 ans était nécessaire pour le site de Beauce et de plusieurs dizaines d'années pour l'ensemble des sources de Provins. Le modèle peut être utilisé pour faire un bilan à pas de temps fin (1 à 5 j), moyen (mensuel) ou même annuel pour un premier dégrossissage pour les systèmes lents. Il convient cependant d'être prudent en faisant un bilan annuel car il y a un risque de sous estimation des précipitations efficaces. Le modèle s'est révélé être un outil efficace permettant la compréhension du fonctionnement actuel des transferts de nitrates dans un système en intégrant tout l'historique de mesures. Il est ainsi beaucoup plus objectif qu'un simple examen de quelques augmentations de concentrations qui sont souvent "expliquées" par une augmentation des épandages ou une augmentation des pluies... ou une diminution des pluies. Après calage le modèle permet la simulation de scénarios de modification d'occupation des sols et d'épandages d'engrais.

Pour une utilisation optimale du modèle il convient de disposer d'un ordre de grandeur du coefficient d'emménagement en nappe libre quand on dispose de mesures de niveaux piézométriques au lieu de mesures de débit de sources de façon à réaliser un bilan fiable compte tenu de l'éventuel ruissellement superficiel souvent difficile à estimer dans l'absolu.

Après un calage du modèle sur des historiques de concentrations en nitrates il est apparu qu'il était nécessaire de faire -à chaque fois que c'est possible- une analyse de sensibilité pour voir l'influence des hypothèses sur les évolutions de concentrations prévues. Il faut en particulier examiner si plusieurs calages simulant pratiquement aussi bien les concentrations observées ne conduisent pas à des extrapolations assez différentes lors de la simulation de scénarios de modifications. Une telle analyse de sensibilité qui pourrait être rendue semi automatique permettrait de préciser la confiance à accorder aux prévisions réalisées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES

BRGM - Protection des captages d'eau potable de la Ville de Paris - Captage de la région de Provins (Voulzie, Durtient, Dragon).

Desprez (N.) 1983.- Région Centre - Annuaire piézométrique 1982-1983 - Rapport BRGM 83 SGN 768 CEN, novembre 1983.

Desprez (N.) 1984.- Nappe du calcaire de Beauce - Evolution de la teneur en nitrates sur quelques AEP en région Centre (Loiret - Loir-et-Cher - Eure-et-Loir) - Rapport BRGM 84 SGN 038 CEN, février 1984.

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.

Roche (P.A.), Thiery (D.) 1984.- Hydrologie de bassin et Modélisation globale - Note technique SGN/EAU n° 83/26, décembre 1984.

Thiery (D.) 1983.- Description du modèle CREACHIM - Note technique SGN/EAU n° 83/15, novembre 1983.

Thiery (D.) 1984.- Modélisation des transferts de nitrates dans cinq bassins versants à Rembercourt-aux-Pots (Meuse) - Note technique SGN/EAU n° 83/01, janvier 1984.

Thiery (D.), Schwartz (J.), Seguin (J.J.) 1985.- Modélisation des transferts de nitrates dans le bassin des sources de la Voulzie (Seine-et-Marne) - Note technique SGN/EAU n° 85/04, février 1985.

Thiery (D.), Schwartz (J.), Seguin (J.J.) 1985.- Modélisation des transferts de nitrates sur deux sites de la nappe de la Beauce - Note technique SGN/EAU n° 85/03, février 1985.

Thiery (D.), Seguin (J.J.) 1985.- First modelisation of nitrates transfer over a river basin with a lumped model - Application to Rembercourt basin (France) - IAH 18th Congress Cambridge, September 1985.

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.

* *

*

ANNEXE I

Application au site de Rembercourt-aux-Pots

(d'après la Note Technique 84/01)

SOMMAIRE

	Pages
RESUME	89
INTRODUCTION	91
1 - LES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES	91
2 - LES DONNEES CHIMIQUES DISPONIBLES	92
3 - ANALYSE DES DONNEES	92
3.1 - Comparaison des valeurs d'une même variable pour les 5 sources	92
3.2 - Analyse qualitative d'après les graphiques	95
4 - MODELISATION HYDROLOGIQUE	96
4.1 - Calage au pas de temps pentadaire	97
4.2 - Résultats du calage hydrologique	101
5 - MODELISATION CHIMIQUE	101
5.1 - Méthode et modèle utilisé	101
5.2 - Les données agricoles	101
5.3 - Calage du modèle	102
5.4 - Résultat du calage	103
5.5 - Exploitation du modèle	10_
CONCLUSION	111
LISTE DES FIGURES	
Figure 1 - Localisation du site étudié de Rembercourt aux Pots	90
Figure 2 - Comparaison des débits observés (+) et simulés (-) sur la période 1979-1982, sources 3 à 5	98
Figure 3 - Comparaison des débits observés (+) et simulés (-) sur la période 1979-1982, sources 6 à 8	100
Figure 4 - Comparaison des concentrations calculées et observées de 1979 à 1982	104
Figure 5 - Composantes du bilan de la source 7	106
Figure 6 - Flux annuel de nitrates (kg/ha), source 7	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux 1 - Définition des 8 points de contrôle	91
Tableaux 2 - Caractéristiques statistiques des débits	92
Tableaux 3 - Matrice de corrélation des débits	93
Tableaux 4 - Caractéristiques statistiques des concentrations en nitrates	93
Tableaux 5 - Matrice de corrélation entre les nitrates	94
Tableaux 6 - Paramètres obtenus en fin de calage (pas journalier)	96
Tableaux 7 - Paramètres obtenus à la fin du calage en données pentadaires	97
Tableaux 8 - Calage avec une réserve superficielle égale à 70 millimètres	99

ANNEXES - Représentation graphique des données utilisées	113
--	-----

RESUME

Un modèle global de simulation des transferts de nitrates -le modèle BICHE du BRGM- a été ajusté sur le site des sources karstiques de Rembercour-aux-Pots (Meuse). Ce modèle utilise comme données :

- la séquence des pluies journalières
- 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 aux sources pendant deux ans et demi (1980/1982),
- du point de vue chimique sur les concentrations en nitrates mesurées dans les sources pendant la même période.

Après calage, le modèle a été utilisé pour estimer l'évolution des concentrations au cours des années à venir en supposant :

- * une augmentation de 50 % des épandages de fertilisant : ce scénario fait apparaître une très forte augmentation du flux de nitrates (qui peut être pratiquement doublé -> certaines années),
- * une réduction des épandages au 1/4 de leur valeur actuelle : la réduction du flux de nitrates est très faible à cause de la minéralisation du sol et de la libération par les résidus culturaux,
- * une réalisation de prairie sur 50 ou 100 % du bassin : le flux de nitrates est pratiquement divisé par deux après 4 ans pour 50 % de prairie et il devient quasi nul après 4 ans pour 100 % de prairies.

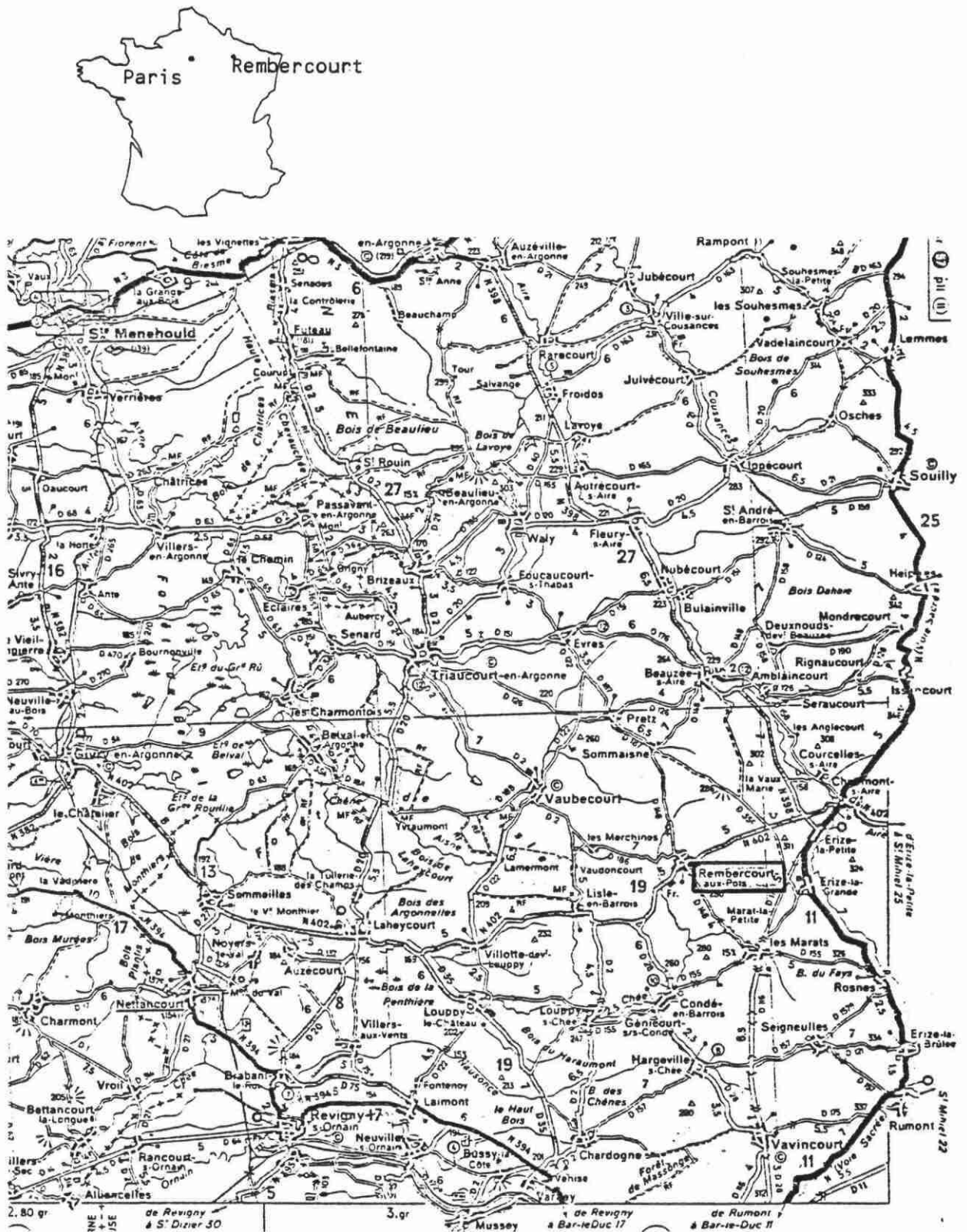


Figure 1 - Localisation du site étudié de Rembercourt aux Pots

INTRODUCTION

Le site de Rembercourt-aux-Pots est un bassin versant expérimental situé à proximité de la commune de Rembercourt aux Pots dans le département de la Meuse (fig. 1). Il est formé d'un ensemble de sources d'origine karstique qui contrôlent une superficie totale d'environ 400 hectares. Le bassin a été suivi de Septembre 1980 à Décembre 1982 par la Direction Départementale de l'Agriculture de la Meuse en collaboration avec l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie et la Chambre Départementale d'Agriculture.

1 - LES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES

On dispose sur le site des données suivantes :

- * Pluie journalière de 1971 à 1982 fournie par la Météorologie Nationale ;
- * Débit instantané en 8 points de contrôle :
Ces débits sont mesurés de manière très discontinue environ une fois par semaine de septembre 1980 à décembre 1982 (soit 2 ans $\frac{1}{2}$).
Les débits des points de mesure 1 à 7 ont été mesurés à l'aide de réservoirs triangulaires. Le débit du point 8 (qui est plus élevé) a été calculé d'après des jaugeages au moulinet
- * Température de l'eau : aux mêmes dates que les débits.
- * Température moyenne mensuelle de l'air de 1971 à 1982 à Rembercourt-aux-Pots.
- * Insolation mensuelle de 1971 à 1976 sont définis dans le tableau 1 ci-dessous.

N° du point	Nom	Altitude (m)
1	Fontaine des 3 Evêques (section amont)	273,13
2	Fontaine des 3 Evêques (section aval)	273,13
3	Fontaine de la Gailletelle (amont)	270,39
4	Fontaine de la Gailletelle (aval)	269,05
5	Fontaine de la Drigette	261,23
6	Fontaine de Saint-Louvent	255,48
7	Fontaine de la Sente	248,53
8	Exutoire	243,43

Tableau 1 - Définition des 8 points de contrôle

2 - LES DONNEES CHIMIQUES DISPONIBLES

En chacun des 7 premiers points de contrôle, on dispose de données chimiques (relevées également environ une fois par semaine) et en particulier des concentrations en nitrates.

3 - ANALYSE DES DONNEES

La période étudiée s'étend de septembre 1980 à décembre 1982, soit 852 jours. Parmi ces 852 jours, il y en a 160 parmi lesquels au moins une des données (débit ou concentration chimique) n'est pas nulle soit 1 jour sur 5.3.

Nous avons donc étudié uniquement ces 160 jours après correction de quelques décalages flagrants de plus ou moins un jour dus aux reports de données.

Parmi les 7 sources pour lesquelles on dispose de données chimiques, il est vite apparu que les deux premières (sources des 3 Evêques), de débit très faible, présentent des mesures peu exploitables. Elles ont donc été éliminées.

3.1 - COMPARAISON DES VALEURS D'UNE MEME VARIABLE POUR LES 5 SOURCES

a - Analyse des débits séparément en variables naturelles

Les caractéristiques statistiques sont reproduites dans le tableau 2.

	DEB 3	DEB 4	DEB 5	DEB 6	DEB 7
Moyenne (l/s)	5.35	8.58	8.02	8.76	13.47
Ecart-type (l/s)	5.5	9.4	5.3	7.8	7.2
Asymétrie	1.7	1.4	0.9	1.3	0.4
Moyenne géométrique (l/s)	2.84	4.46	6.12	5.93	11.35

Tableau 2 - Caractéristiques statistiques des débits

Le tableau 3 présente la matrice de corrélation entre les débits.

	DEB 3	DEB 4	DEB 5	DEB 6	DEB 7
DEB 3	1.000				
DEB 4	0.868	1.000			
DEB 5	0.809	0.837	1.000		
DEB 6	0.830	0.957	0.835	1.000	
DEB 7	0.796	0.834	0.876	0.873	1.000

Tableau 3 - Matrice de corrélation des débits

Il apparaît (ce qui n'est pas surprenant) que les débits des 5 sources sont très liés (coefficients de corrélation supérieurs à 0.80). En prenant le logarithme des débits (pour rendre la distribution plus gaussienne), tous les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.90. Les débits des sources 4 et 6 ont un coefficient de corrélation (en valeurs naturelles) qui atteint 0.96.

On remarque également (à l'hypothèse de Normalité près) que la borne supérieure choisie à 50 l/s pour l'analyse correspond à environ 6 écarts-types au dessus de la moyenne soit une valeur très exceptionnelle.

b - Analyse des concentrations en nitrates, en variables naturelle.

Les caractéristiques statistiques sont reproduites dans le tableau 4.

	NIT 3	NIT 4	NIT 5	NIT 6	NIT 7
Moyenne (mg/l)	22.6	25.5	20.2	27.3	19.0
Ecart-type (mg/l)	2.8	3.4	6.3	3.9	4.0
Asymétrie	0.4	0.5	0.4	0.4	0.6

Tableau 4 - Caractéristiques statistiques des concentrations en nitrates

On remarque que :

- les sources 3,5 et 7 ont les concentrations moyennes les plus faibles : de 19 à 22,5 mg/l environ,
- les sources 4 et 6 ont des concentrations plus élevées : de 25.5 à 27 mg/l environ.

L'écart-type est compris entre 3 et 4 mg/l, sauf pour la source n° 5 qui a des valeurs beaucoup plus dispersées, l'écart-type atteignant 6 mg/l.

Le tableau 5 présente la matrice de corrélation entre les concentrations en nitrates.

	NIT 3	NIT 4	NIT 5	NIT 6	NIT 7
NIT 3	1.000				
NIT 4	0.423	1.000			
NIT 5	0.295	0.538	1.000		
NIT 6	0.331	0.204	0.138	1.000	
NIT 7	0.356	0.274	0.794	0.175	1.000

Tableau 5 - Matrice de corrélation entre les nitrates

Il apparaît que les coefficients de corrélation entre sources sont très peu élevés, bien que les cultures soient à peu près identiques, et que les pluies et les débits par unité de surface soient relativement liés.

Seuls les nitrates des sources 5 et 7 sont liés avec un coefficient de corrélation de 0.79. Les sources 4 et 5 (0.54) et 3 et 4 (0.42) ont des valeurs un peu liées également.

Il convient de remarquer que le coefficient de corrélation de 0.80 entre les valeurs de la source 5 et de la source 7 ne résulte pas de quelques valeurs isolées, mais bien d'un comportement identique comme l'a montré le graphique des valeurs d'une source en fonction de celles de l'autre.

3.2 - ANALYSE QUALITATIVE D'APRES LES GRAPHIQUES

Indépendant des analyses statistiques, il nous a paru intéressant d'examiner les séquences de données chronologiques pour essayer de détecter des valeurs suspectes, et d'autre part de visualiser les variations de chaque variable.

Il convient de remarquer que le terme "suspect" n'est pas employé ici dans un sens péjoratif visant à dénigrer la qualité des données. Nous appelons suspect un comportement résultant d'épiphénomènes ou de conditions exceptionnelles qui ne pourraient pas être représentées par un modèle relativement simple : par exemple une crue résultant de précipitations tellement élevées que l'écoulement se produit en surface à 100 % et ne pénètre pas dans le bassin, ne produisant donc aucun tarissement.

Un tel écoulement pourrait dissoudre des restes d'engrais sous forme solide, qui parviendraient directement à la source sans transiter par le bassin souterrain et donc sans aucun amortissement, donc avec une concentration extrêmement élevée mais qui retrouverait après quelques heures les valeurs précédentes.

Les données disponibles sont au pas journalier. Dans un but de simplification de la représentation, de réduction des calculs et pour réaliser un léger lissage, on a calculé des données pentadaires, c'est-à-dire par pas de temps de 5 jours.

Etant donné que, à l'exception des précipitations, on ne dispose que de données discontinues échantillonnées toutes les semaines environ, et plus souvent en périodes de crues, il n'est pas possible de calculer des moyennes pentadaires réelles. On a donc effectué pour chaque pentade la moyenne du ou des valeurs observées durant les 5 jours. Pour les précipitations, on a fait la somme des précipitations des jours de la pentade. Toutes les pentades sont égales à 365/72 ou 366/72. Les pentades sont au nombre de 72 par an, et leur durée est légèrement supérieure à 5 jours, le calcul résulte donc d'une légère interpolation. Les graphiques des données de pluies, de débit et de concentration en nitrates sont placés en Annexe.

4 - MODELISATION HYDROLOGIQUE

Cinq paramètres doivent être ajustés pour reproduire le mieux possible les débits observés :

- (1) la superficie du bassin versant (qui est inconnue)
- (2) la capacité de la réserve superficielle équivalente
- (3) la hauteur d'équi-ruissellement (RUIPER) pour laquelle le ruissellement est égal à la percolation
- (4) le temps de demi-percolation
- (5) le temps de demi-tarissement.

Un premier calage a été réalisé au pas de temps journalier (à partir des pluies journalières et de l'évapo-transpiration potentielle ETP mensuelle calculée par la formule mensuelle de L. TURC). Le calage a consisté à maximiser un coefficient de corrélation pondéré entre les débits observés et les débits calculés, la pondération donnant plus de poids aux bas débits.

Les paramètres obtenus sont résumés dans le tableau 6.

Source	Superficie (km ²)	Capacité réserve superficielle (mm)	RUIPER (mm)	Temps 1/2 percolation (mois)	Temps 1/2 tarissement (mois)	Ajustement pondéré (pond=2)	Ajustement naturel	Nombre de valeurs (jours)
3	0.204	20.3	28.3	0.60	0.15	0.856	0.804	134
4	0.329	22.5	6.5	1.64	0.15	0.845	0.821	121
5	0.347	21.2	31.3	0.67	1.08	0.886	0.862	124
6	0.398	27.1	11.3	0.93	3.83	0.870	0.869	137
7	0.586	14.0	22.5	4.08	2.26	0.889	0.815	127

Tableau 6 - Paramètres obtenus en fin de calage (pas journalier)

L'examen de ce tableau montre des coefficients d'ajustements (similaires à des coefficients de corrélation) assez élevés compris entre 0.85 et 0.89. On remarque les valeurs suivantes pour les paramètres :

- * capacité des réserves superficielles de l'ordre de 20 millimètres, soit faibles,
- * superficies entre 0.2 et 0.6 km² (20 à 60 hectares), les superficies les plus élevées étant celles des sources n° 6 et 7,
- * débit souterrain significatif surtout pour les sources n° 6 et 7 (temps de 1/2 percolation ou de 1/2 tarissement élevés).

4.1 - CALAGE AU PAS DE TEMPS PENTADAIRE

Dans un but de réduction des calculs, on a réalisé un calage sur les valeurs pseudo-pentadaires de débits à partir des précipitations pentadaires. On réalise ainsi uniquement 72 bilans par an, au lieu de 365, soit une réduction de 5 fois environ.

a - Calage optimal

Les paramètres obtenus à la fin du calage sont rassemblés dans le tableau 7.

Source	Superficie (km ²)	Capacité réserve superficielle (mm)	RUIPER (mm)	Temps 1/2 percolation (mois)	Temps 1/2 tarissement (mois)	Ajustement pondéré (pond=2)	Ajustement naturel	Nombre de pentades
3	0.194	16.1	146.7	0.37	0.15	0.796	0.681	120
4	0.296	11.0	29.3	0.75	0.15	0.802	0.789	115
5	0.322	6.2	47.7	2.03	0.15	0.866	0.801	118
6	0.362	10.7	11.9	2.30	4.50	0.805	0.757	123
7	0.565	3.2	30.1	5.91	0.15	0.897	0.829	120
8	5.77	15.6	189.6	0.54	0.11	0.821	0.786	115

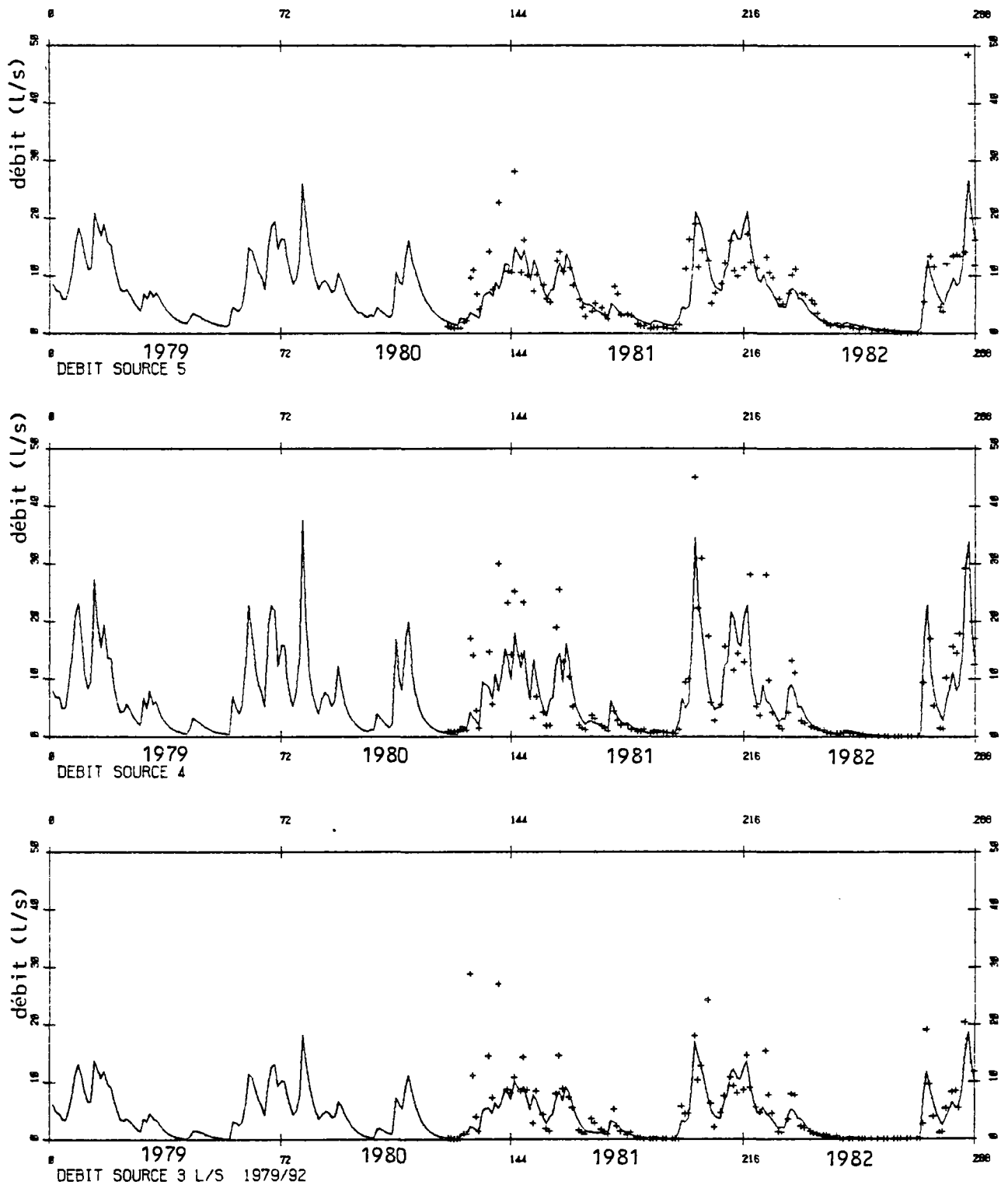
Tableau 7 - Paramètres obtenus à la fin du calage en données pentadaires

Les coefficients d'ajustement pondérés sont tous compris entre 0.80 et 0.90. Les capacités de réserves superficielles sont légèrement plus petites que précédemment, et les superficies identifiées sont comparables à 10 % près.

b - Influence de la capacité de la réserve superficielle

Afin de vérifier l'identification de la capacité de la réserve superficielle qui est très importante pour les calculs de bilan chimique, on a réalisé un calcul d'optimisation en imposant une réserve superficielle de 70 mm qui aurait semblé a priori une valeur plus raisonnable. Lors de ce calcul, on a réoptimisé les autres paramètres en imposant cependant aucune correction de pluie ni d'ETP.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 8.



**Figure 2 - Comparaison des débits observés (+) et simulés (-)
sur la période 1979-1982, sources 3 à 5**

Source	Superficie (km ²)	Capacité réserve superficielle (mm)	RUIPER (mm)	Temps 1/2 percolation (mois)	Temps 1/2 tarissement (mois)	Ajustement pondéré (pond=2)	Ajustement naturel
3	0.208	70	9999	0.18	0.15	0.760	0.631
4	0.307	70	36	0.45	0.15	0.733	0.747
5	0.356	70	38	2.60	0.15	0.791	0.718
6	0.388	70	17	1.28	15.0	0.743	0.688
7	0.651	70	31	6.76	0.15	0.791	0.693

Tableau 8 - Calage avec une réserve superficielle égale à 70 millimètres

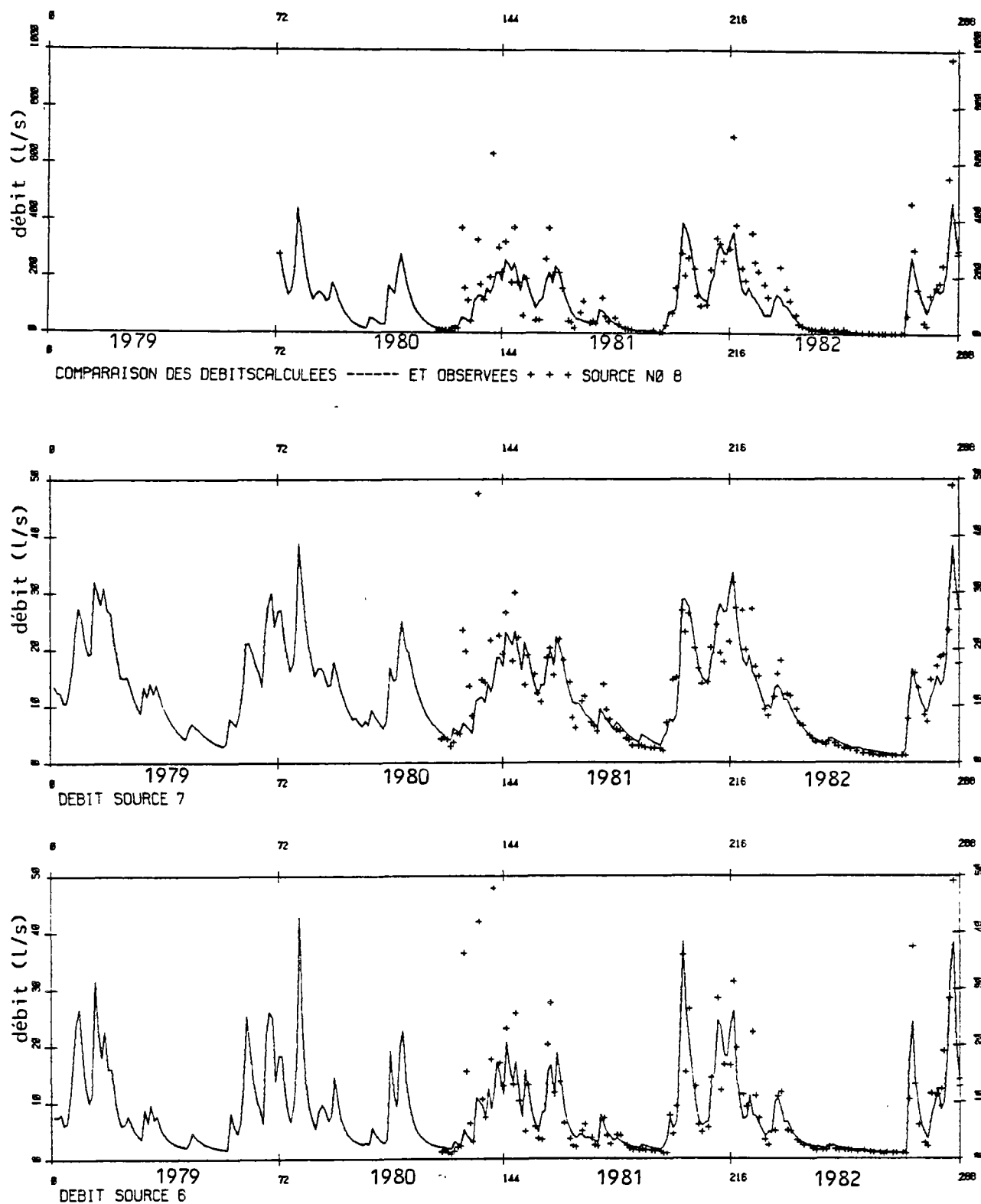
On constate que les superficies identifiées sont très comparables, mais les coefficients d'ajustement sont nettement moins bon (le meilleur est de 0.79 contre 0.90 ; le moins bon est de 0.73 contre 0.80).

Les réserves superficielles qui sont d'environ 20 à 25 mm pour un calcul journalier, et 10 à 15 mm pour un calcul pentadaire, sont donc bien identifiées, et donnent une simulation **hydrologique** bien meilleure qu'avec 70 mm.

Les figures 2 et 3 montrent la comparaison des débits calculés (en continu) et observés (croix) sur la période 1979-1982. Il apparaît que le calage est satisfaisant mais que les forts débits sont généralement sous-estimés par le modèle. En fait, il n'est pas exclu qu'en cas de fortes précipitations un écoulement superficiel se produise sur un bassin superficiel de superficie supérieure au bassin souterrain. Pour les calculs, on a privilégié le bassin souterrain, en donnant plus d'importance aux faibles débits.

Un calcul a également été réalisé sur le point de jaugeage numéro 8 (le bassin total), en ne considérant que les débits supérieurs à 30 l/s et sans privilégier les plus bas débits. Les résultats sont les suivants :

- superficie du bassin : 7.3 km² (au lieu de 5.8)
- réserve utile : 15.7 mm (au lieu de 15.6)
- coefficient d'ajustement total : 0.734 au lieu de 0.786
(et 0.821 en ajustement pondéré)
- nombre d'observations : 76 pentades (au lieu de 115)



**Figure 3 - Comparaison des débits observés (+) et simulés (-)
sur la période 1979-1982, sources 6 à 8**

4.2 - RESULTATS DU CALAGE HYDROLOGIQUE

Le calage des paramètres hydrologiques du modèle a montré qu'un pas de temps de calcul par pentades (5 j) est suffisant. Les surfaces des bassins versants sont bien identifiées ; elles sont de l'ordre de 25 à 40 ha (0.25 à 0.40 km²) pour les sources 3 à 6, de 60 ha (0.60 km²) pour la source 7, et de 577 ha (5.77 km²) pour le point numéro 8. La capacité de réserve superficielle du sol qui permet les meilleures simulations varie de 10 à 20 mm (ce qui est relativement faible). Seules les sources 6, 7 et 8 ont une composante d'écoulement souterraine importante.

5 - MODELISATION CHIMIQUE

5.1 - METHODE ET MODELE UTILISE

La modélisation a été réalisée avec le modèle BICHE du BRGM (Bilan CHimique des Eaux). C'est un modèle à réservoirs (identique au modèle GARDENIA) dans lequel on effectue à chaque pas de temps un bilan des apports, des concentrations et des transferts en nitrates.

Les données nécessaires au fonctionnement du modèle sont de deux types : des données climatiques, des données agricoles.

Les données climatiques sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle qui sont utilisées pour les calculs hydrologiques.

5.2 - LES DONNEES AGRICOLES

Les données agricoles sont de quatre types. Elles ont été introduites dans le modèle au pas de temps mensuel. Les valeurs retenues, après enquête sur le type de sol, les cultures pratiquées et les doses d'engrais épandues, sont les suivantes :

* **épandage** : 330 kg de nitrates en mars (de chaque année) ($\approx$ 75 kg d'azote)

* **besoins des plantes** (en kg de nitrates)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
0	0	220	176	132	88	44	0	0	0	0	0	660

* **minéralisation du sol** (en kg de nitrates)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
0	0	21	43	64	74	64	43	21	0	0	0	330

* **restitution par les résidus de récolte** : 44 kg en septembre

La quantité de nitrates apportée chaque année est donc de 704 kg pour la modélisation. La somme des besoins est de 660 kg pour la modélisation.

5.3 - CALAGE DU MODELE

Pour chaque bassin, on ajuste les paramètres de transfert de nitrates de façon à obtenir la meilleure simulation des concentrations obtenues (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 faibles permettent un calage beaucoup plus fiable).

Après un premier calage des paramètres de transfert de nitrates, on a également légèrement réajusté la capacité de la réserve superficielle du sol qui peut être légèrement modifiée sans changer significativement le calage hydrologique.

5.4 - RESULTAT DU CALAGE

Les bassins étant assez comparables, on ne donne ici que les résultats relatifs au bassin n° 7.

5.4.1 - PARAMETRES IDENTIFIES

Les paramètres identifiés sont les suivants :

a - correction d'apports et de consommation

Epandage	- 20 %
Minéralisation	- 16.6 %
Besoins	+ 15 %
soit les valeurs annuelles suivantes, en kg/ha de nitrates	
Epandage	264
Minéralisation	275
Besoins	759

b - volumes d'eau retenue et temps de demi-échange

Réservoirs	Volume d'eau retenue	Temps de demi-échange
Superficiel	21 mm	0.37 mois
Intermédiaire	446 mm	0.13 mois
Souterrain	104 mm	0.35 mois

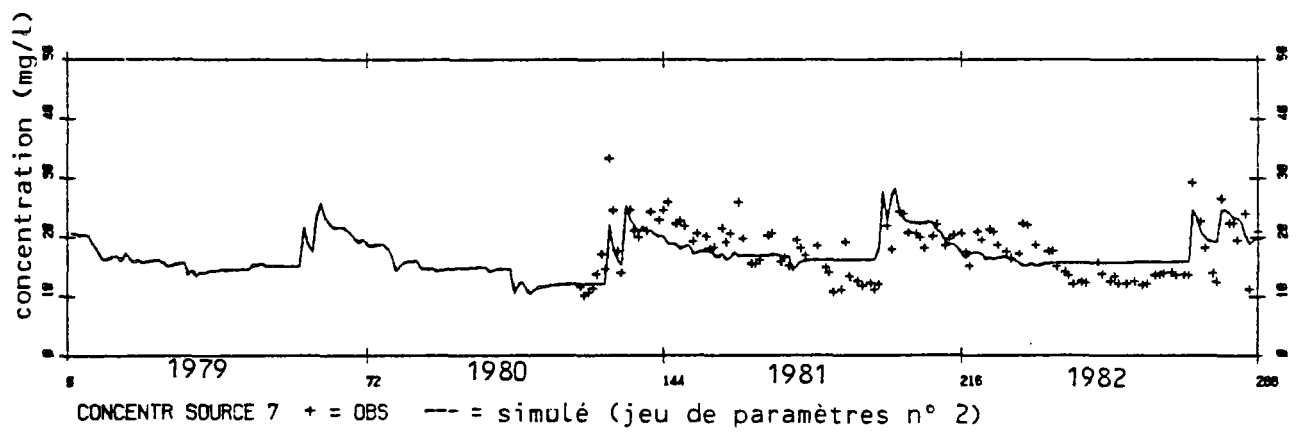


Figure 4 - Comparaison des concentrations calculées et observées de 1979 à 1982

c - paramètres divers

Concentration maximale pour la dissolution par la pluie	139 mg/l
Temps de demi-libération par les racines	0.3 mois non optimisé
Capacité de la réserve superficielle (ré-ajustée)	27.5 mm

5.4.2 - CARACTERISTIQUES DE L'AJUSTEMENT

Le coefficient d'ajustement (analogue à un coefficient de corrélation mais sans homothétie ni décalage d'origine) est égal à 0.64.

On observe également les caractéristiques suivantes (en mg/l) sur les 118 pentades observées.

	Observé	Calculée
Concentration minimale	10.2	10.6
Concentration maximale*	33.4	28.3
Concentration moyenne	17.83	17.76
Ecart-type de la concentration	4.5	3.0

* les valeurs mesurées supérieures à 50 mg/l (c'est-à-dire 7 écarts-types au-dessus de la moyenne) ont été éliminées

On a reproduit sur la figure 4 la comparaison des concentrations calculées (en trait continu) et observées (matérialisé par des croix) de 1979 à 1982. Cette figure montre que l'ajustement n'est pas parfait mais cependant acceptable. La figure 5 montre les différentes composantes du bilan.

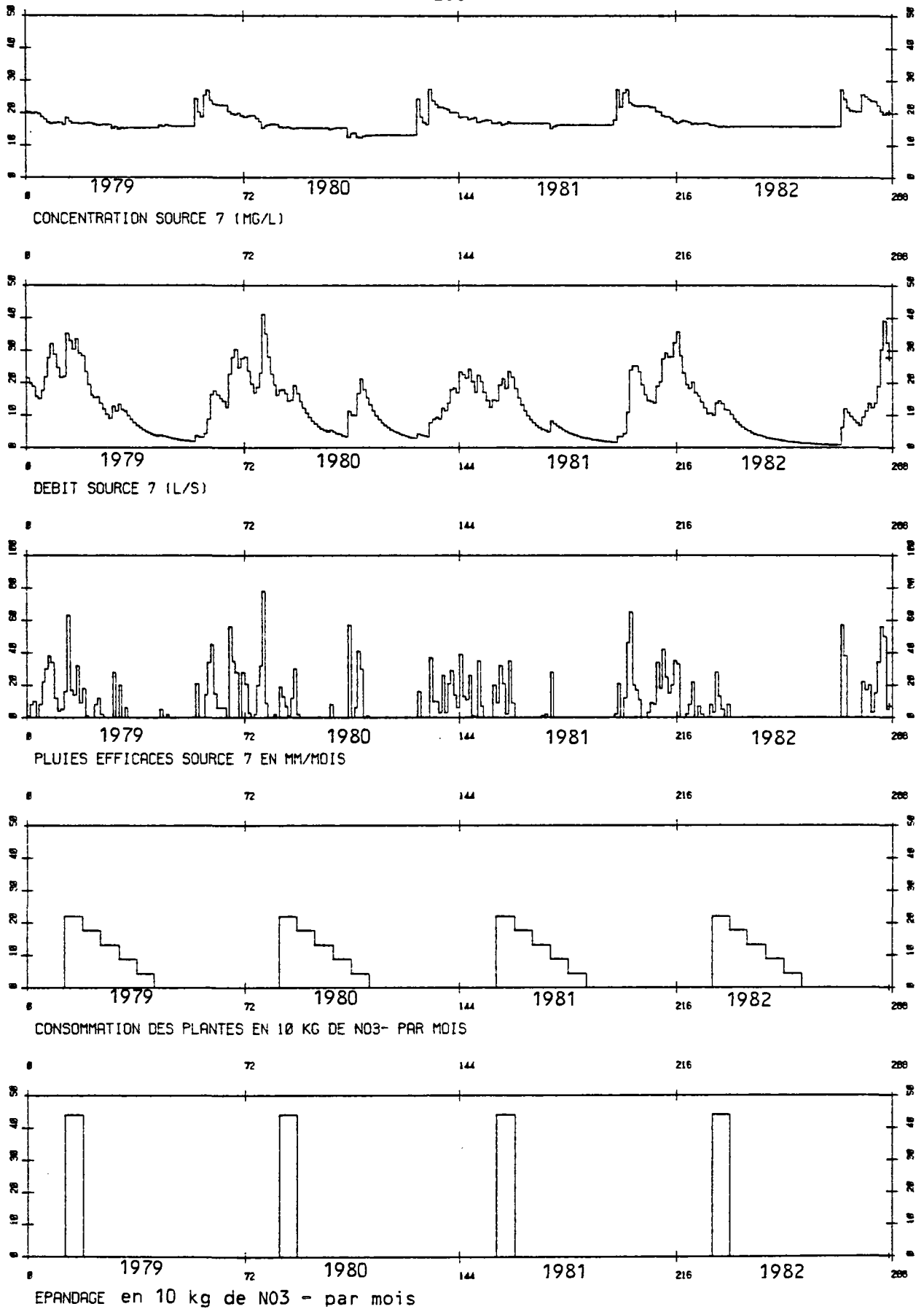


Figure 5 - Composantes du bilan de la source 7

5.4.3 - INTERPRETATION DES RESULTATS DU MODELE

Ces figures montrent que le modèle reproduit correctement les remontées de concentration à partir du mois de septembre ou d'octobre selon les années. L'analyse de l'état des réservoirs du modèle montre qu'on observe une augmentation de la masse de nitrates dans la réserve superficielle à partir du mois d'août quand les plantes n'ont plus de besoins, mais que la minéralisation se poursuit. Quand cette réserve superficielle est asséchée par évapotranspiration, ce qui est généralement le cas à partir de juin, cette masse de nitrates passe dans la phase d'eau immobile (eau de la micro-porosité) ; en septembre se produit en plus une libération de nitrates par les résidus de cultures. Quand les pluies resaturent la réserve superficielle (en septembre ou en octobre suivant les années), cette masse de nitrates passe en partie dans l'eau mobile et s'écoule dans la pluie efficace pour ressortir plus ou moins rapidement aux exutoires.

On obtient la décomposition suivante des termes du bilan de nitrates.

Pour les 4 années simulées, on observe les résultats suivants (en kg de nitrates par hectare et par an) :

Année	Pluie efficace (mm)			
		F	C	E
1979	719	583	466	125
1980	569	583	484	95
1981	695	583	474	123
1982	463	583	482	87

F : masse fournie - C : masse consommée - E : masse écoulée

On remarque que le flux est très variable d'une année à l'autre. Il est beaucoup plus important en année humide : 125 et 123 kg/ha en 1979 et en 1981 pour une pluie efficace de 700 mm environ, qu'en année sèche : 95 et 87 kg/ha en 1980 et 1982 pour une pluie efficace de 450 à 550 mm.

On remarque également qu'il a été nécessaire d'augmenter les besoins des plantes, mais que la consommation calculée par le modèle est inférieure aux besoins. Cette consommation est de 477 kg/ha/an ; la différence provient du déphasage entre l'épandage et les besoins maximaux, car une partie des nitrates sont entraînés par des précipitations du printemps et sont perdus pour les plantes. Cette augmentation des besoins est peut-être un peu artificielle, mais on retiendra que le modèle équilibre les bilans avec une consommation globale de 480 kg/ha/an.

5.5 - 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 apportés ou à des changements des cultures ou de l'occupation des sols.

5.5.1 - SIMULATION D'UNE AUGMENTATION DE 50 % DE L'EPANDAGE DE FERTILISANTS

On a simulé après les 4 années de 1979 à 1982, une augmentation de 50 % des apports en fertilisants pendant 6 années. Les pluies utilisées sont celles de la période 1979-1982 de manière périodique, c'est-à-dire 1979, 1980, 1981, 1982, 1979, 1980 ... Les flux de nitrates calculés ont été reproduits sur la figure 6.a.

On voit que le flux augmente et atteint 213 kg/ha/an la cinquième année qui est une année humide suivant une année sèche. Ce flux est près du double de celui qu'on obtiendrait avec le même épandage de fertilisant que précédemment et qui ne serait que de 123 kg/ha/an.

5.5.2 - SIMULATION D'UNE REDUCTION TRES IMPORTANTE DE L'EPANDAGE

On a simulé pendant 6 années un épandage réduit au 1/4 de sa valeur. Les flux calculés ont été reproduits sur la même figure que précédemment. On voit qu'ils sont plus faibles de 10 % environ qu'avec un épandage normal. Il est intéressant de remarquer qu'une forte réduction de l'épandage ne produit qu'une faible réduction du

flux de nitrate à la source 7. Ceci est dû à la minéralisation du sol et à la libération par les résidus culturaux à l'automne (qui serait en fait légèrement diminuée elle aussi).

5.5.3- SIMULATION DE LA REALISATION DE PRAIRIE SUR 50 % OU 100 % DE LA SURFACE DU BASSIN

Si on suppose qu'après la quatrième année on réalise une prairie sur 100 % de la surface du bassin versant, on considère que l'épandage de fertilisant et la minéralisation du sol sont consommés à 100 % par la prairie et qu'il n'y a pas de résidus cultureux. Les flux de nitrates calculés lors de cette simulation sont reproduits sur la figure 6.b. On voit que le système se lave progressivement par les pluies efficaces et que le flux de nitrates est divisé par trois au bout de deux ans et est quasi-nul après la quatrième année.

Dans un autre scénario on suppose qu'on réalise une prairie sur 50 % de la surface du bassin versant (à proximité de la source), on a donc :

- un épandage
- une minéralisation inchangés sur 50 % de la superficie
- une libération par les résidus culturaux
- des besoins.

Sur les 50 % restants, l'épandage, la minéralisation et les besoins produisent un bilan nul. On peut donc considérer que l'épandage, la minéralisation, la libération par les racines, les besoins sont nuls sur 50 % de la superficie. Globalement, sur toute la superficie, épandage, minéralisation, libération par les racines et besoins sont divisés par deux. Les flux de nitrates calculés pour cette simulation sont reproduits sur la même figure. On voit que le flux diminue progressivement pour atteindre 50 kg/ha/an après 4 ans, ce qui correspond à 50 % environ du flux qui était obtenu avec l'épandage de référence.

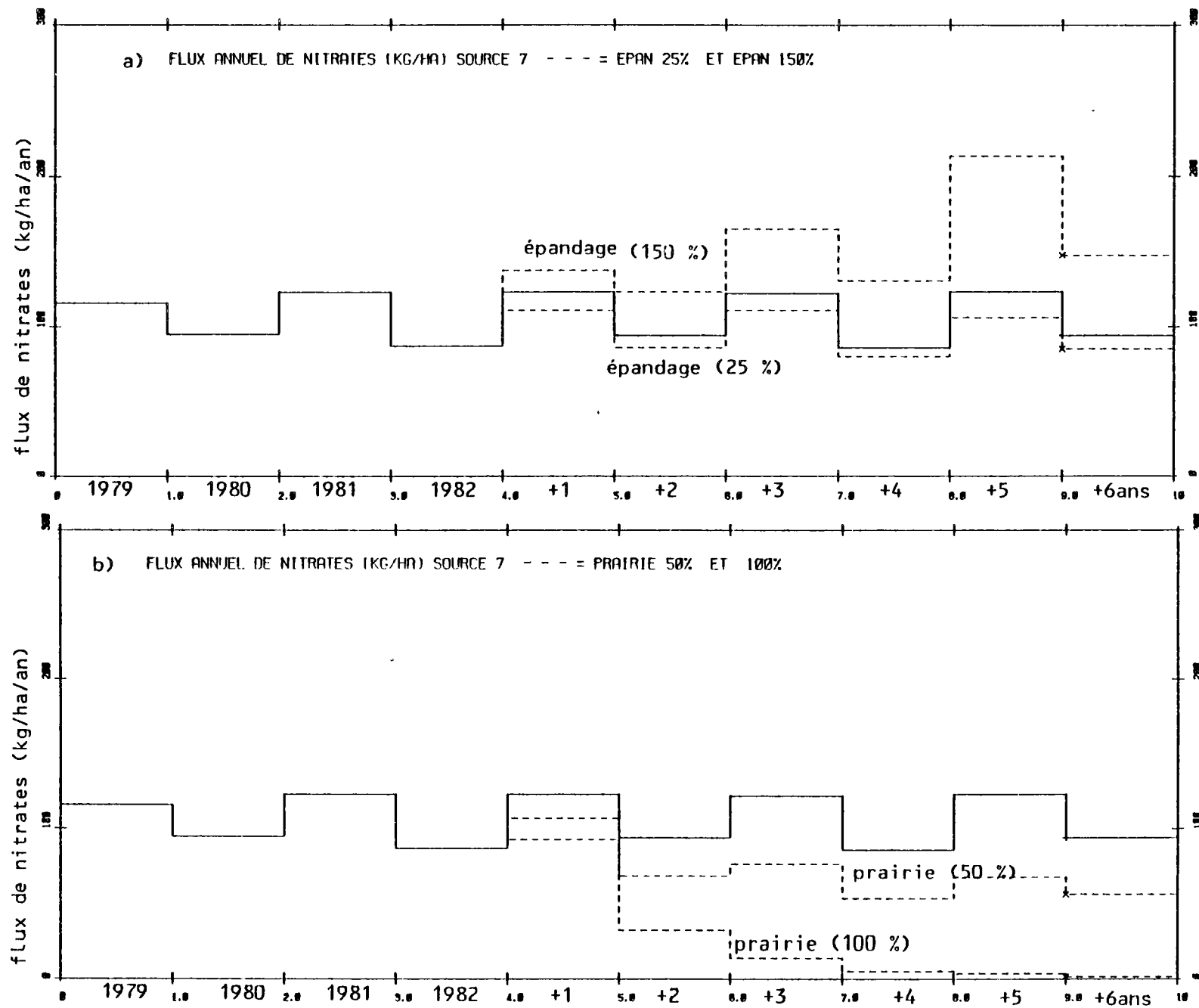


Figure 6 - Flux annuel de nitrates (kg/ha), source 7

CONCLUSION

Cette application a montré comment il était possible d'analyser les données hydrologiques, climatiques et chimiques disponibles sur les sources du bassin de REMBERCOURT-AUX-POTS. Une première analyse a permis de vérifier les données et de comparer d'une part les sources entre elles, et d'autre part pour chaque source les valeurs des différentes variables.

Après cette première phase, on a conçu le modèle global de simulation de transferts de nitrates BICHE décrit dans la première partie de ce rapport ; et on l'a appliqué à la source 7 qui est la mieux simulée.

Le calage du modèle étant à peu près satisfaisant, on a simulé différentes hypothèses de modifications de l'occupation du sol et de l'épandage de fertilisant. Il est certain que les résultats obtenus pourraient être améliorés si on disposait d'une part d'un historique de données plus long, et surtout de données suivies à un pas de temps plus fin (au pas de temps journalier par exemple).

Ces premiers résultats sont néanmoins encourageants, et montrent qu'il est possible de représenter globalement l'évolution de la concentration à l'exutoire d'un bassin versant au moyen d'un modèle global simple.

* *

*

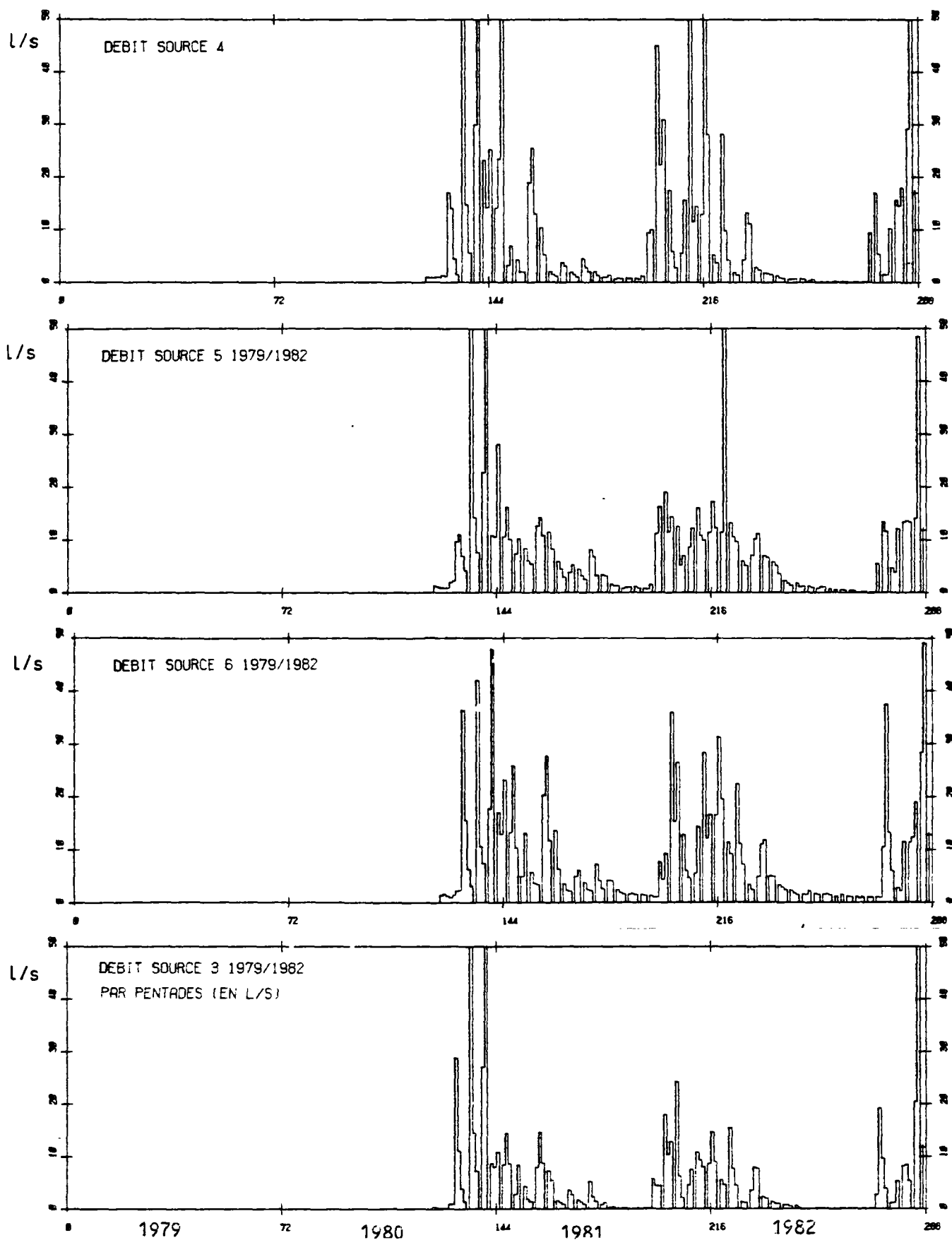
DONNEES UTILISEES

Représentation graphique des données de :

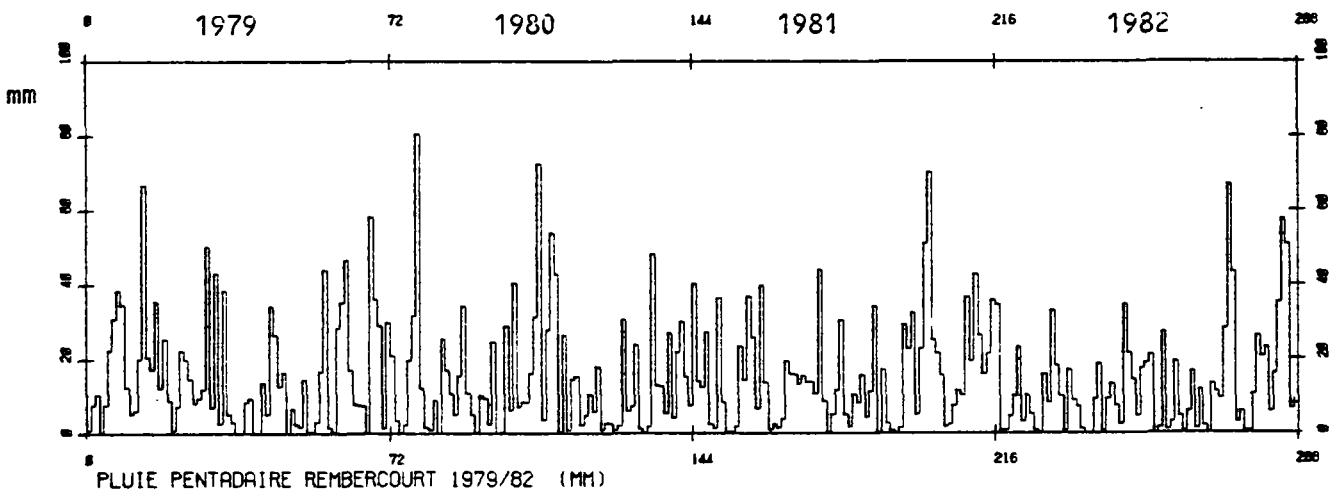
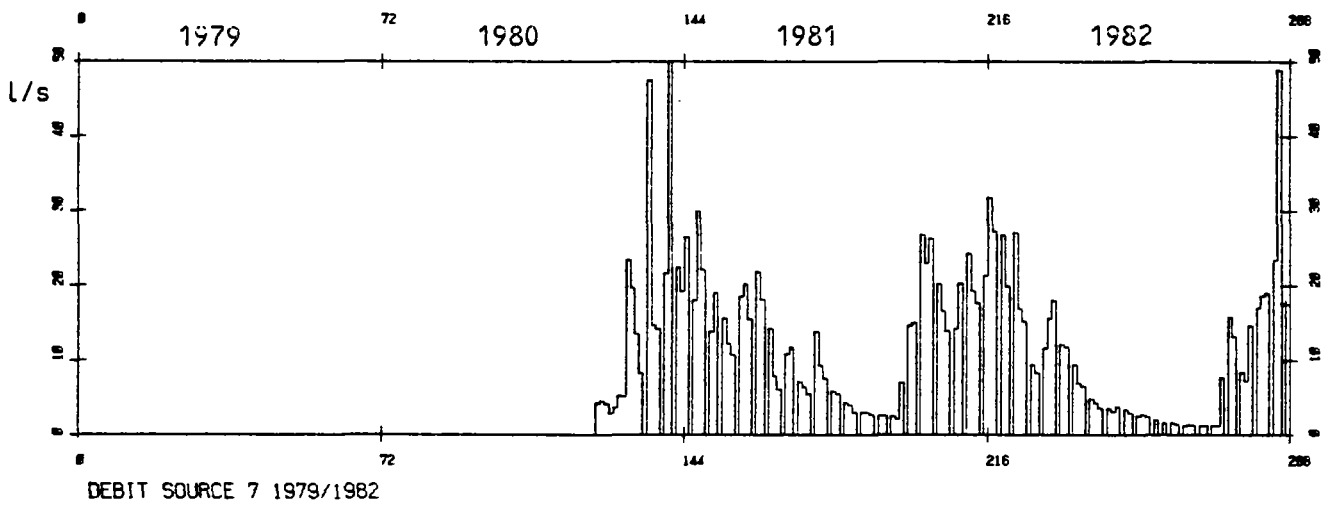
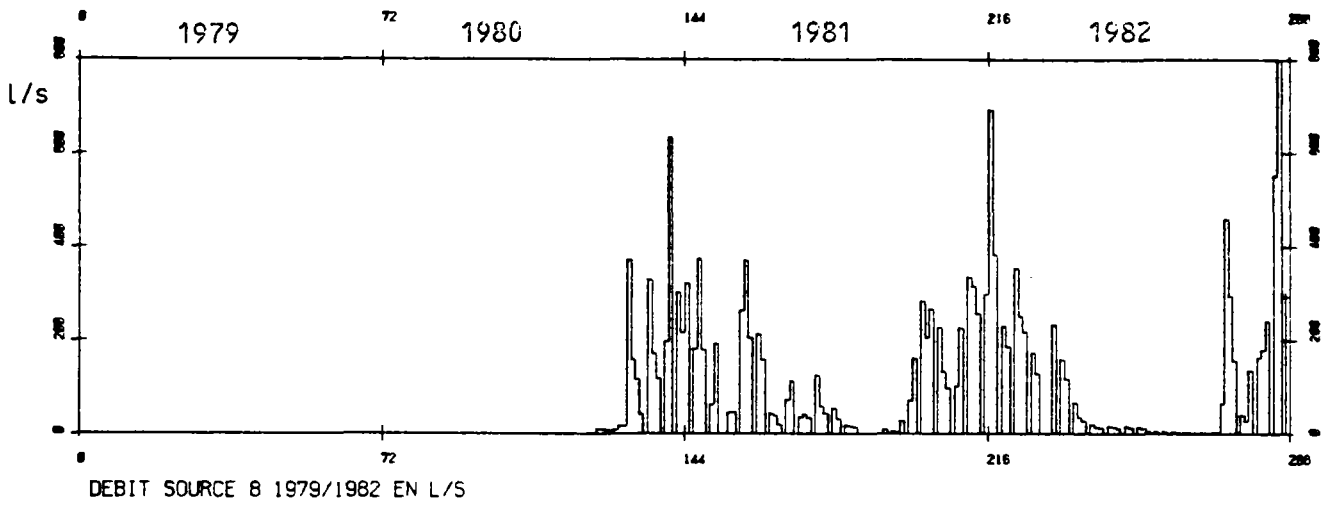
*débit	A.1 à A.2
* précipitation	A.2
* concentration en nitrates	A.3 et A.4

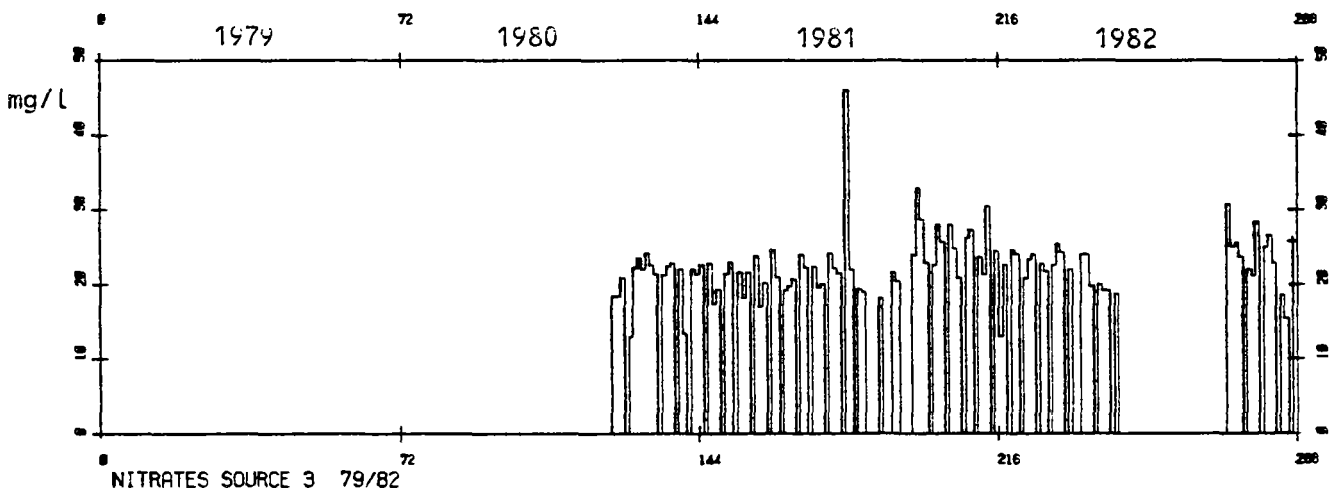
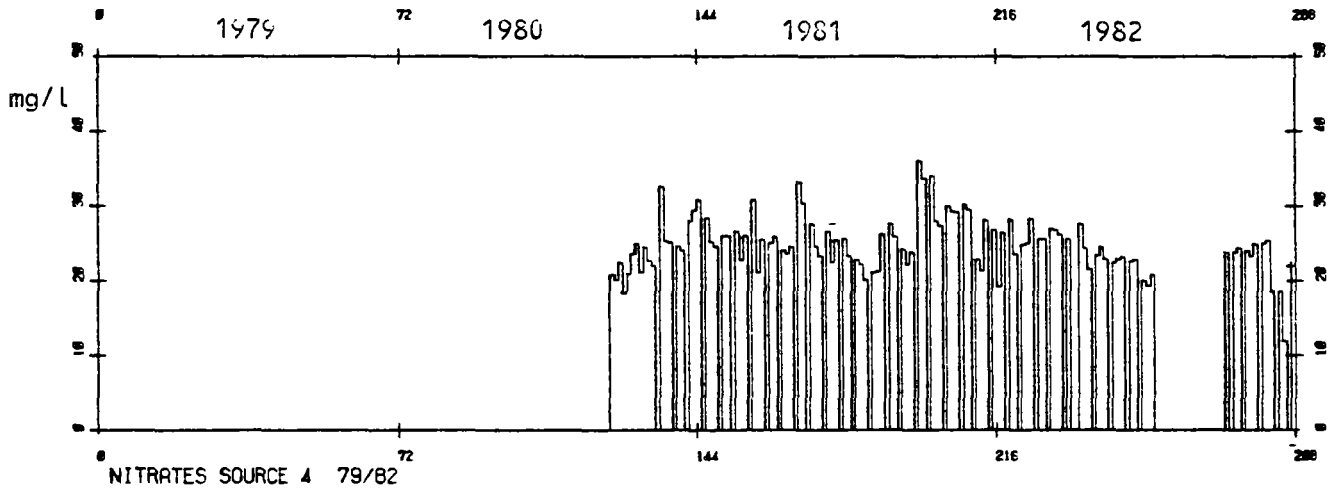
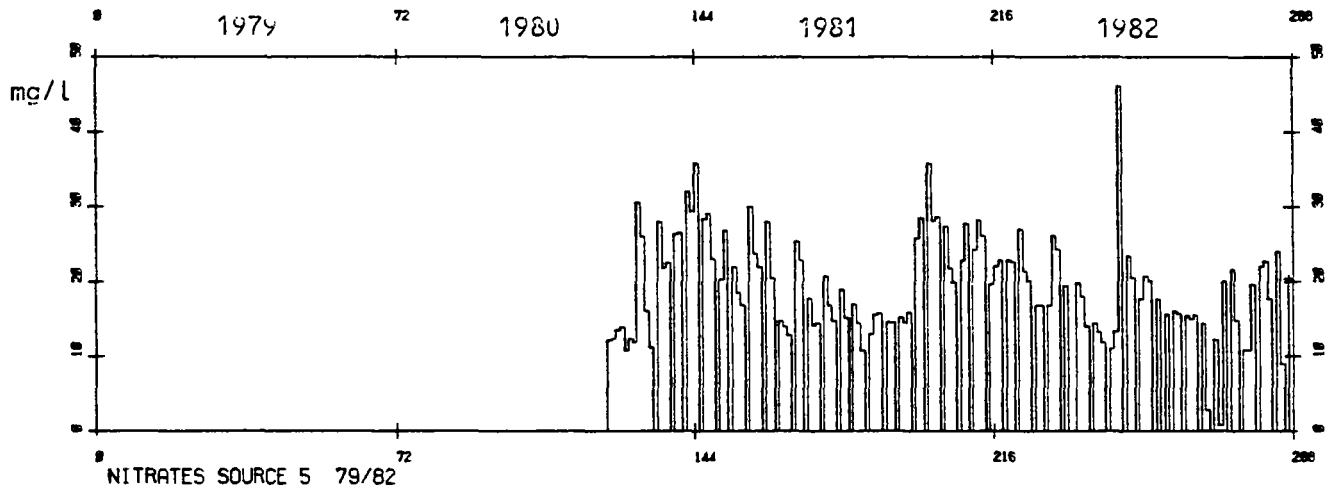
* *

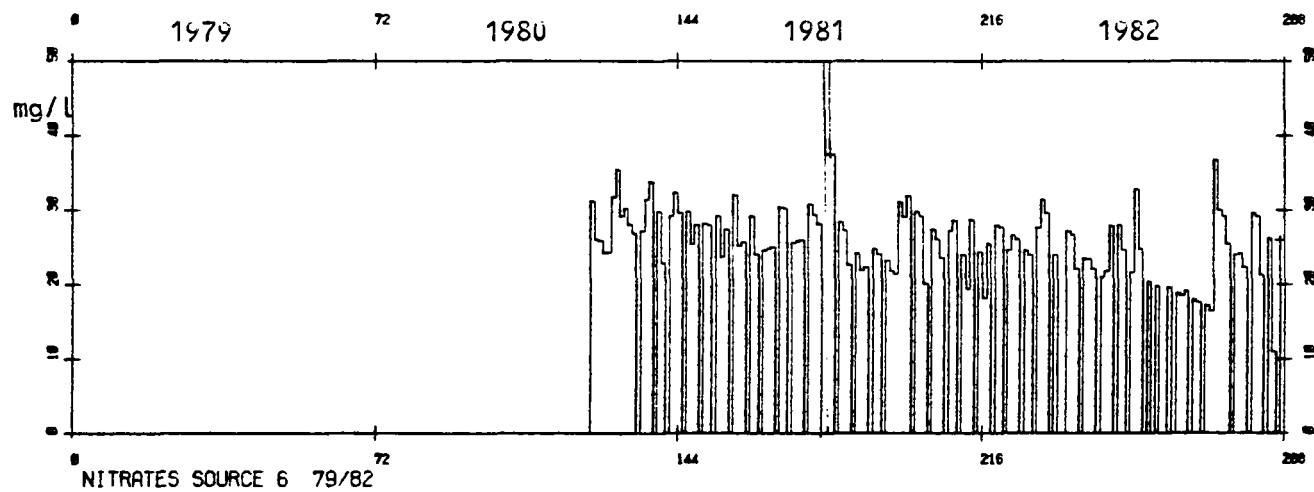
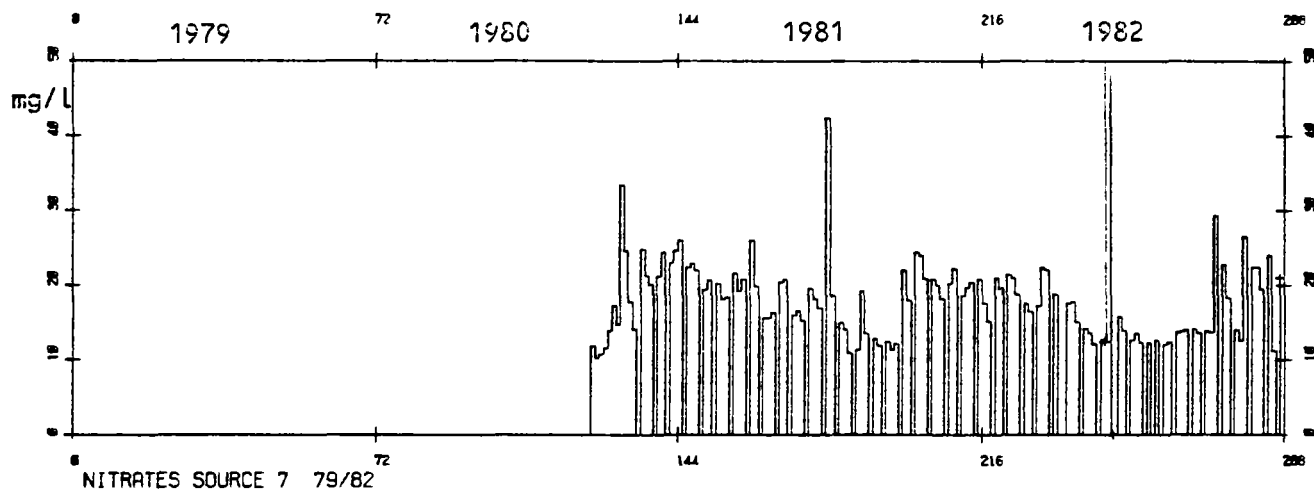
*



A.1







ANNEXE II

**Application au bassin des sources de la Voulzie
(Provins - Seine et Marne)**

(d'après la Note Technique 85/04)

SOMMAIRE

	Pages
RESUME	123
INTRODUCTION	125
1 - LES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES	126
2 - LES DONNEES CHIMIQUES DISPONIBLES	126
3 - ANALYSE DES DONNEES	127
3.1 - Pluies mensuelles	127
3.2 - Débits à l'exutoire	127
3.3 - Concentrations en nitrates	129
4 - MODELISATION HYDROLOGIQUE	129
4.1 - Méthode et modèle utilisé	129
4.2 - Principe du calage du modèle hydrologique	129
4.3 - Calage au pas de temps mensuel	130
4.4 - Calage au pas de temps annuel	135
5 - MODELISATION CHIMIQUE	137
5.1 - Méthode et modèle utilisé	137
5.2 - Les données agricoles	137
5.3 - Les paramètres de transfert chimique du modèle	141
5.4 - Calage du modèle	142
5.5 - Résultats du calage	142
5.6 - Exploitation du modèle	145
CONCLUSION	151
 LISTE DES FIGURES	
Figure 1 - Situation des 3 forages de l'ensemble des sources de la Voulzie	124
Figure 2 - Groupe des sources de la Voulzie. Concentration en nitrates, chlorures et sulfates de 1945 à 1984	128
Figure 3 - Simulation au pas de temps mensuel du débit des sources de la Voulzie	132

	Pages
Figure 4a - Comparaison des simulations mensuelles calées sur les débits observés et sur les débits corrigés de 25 %, de 1978 à 1983	133
Figure 4b - Comparaison des débits annuels simulés aux pas de temps annuel et mensuel	133
Figure 5 - Simulation de la concentration annuelle dans la source	144
Figure 6 - Bilan annuel de 1947 à 1983	146
Figure 7 - Bilan annuel de 1907 à 1983	147
Figure 8 - Bilan annuel de 1907 à 1983 prolongé pendant 103 ans avec le même excédant de nitrates et les pluies de 1907 à 1983	148
Figure 9 - Evolution des concentrations, en supposant un même excédent de nitrates pendant 40 années suivant 1983	150
Figure 10 - Simulation pendant 48 ans de 2 scénarios après 1983 :	150
a) Epandages inchangés	
b) Epandages ramenés au taux de 1964	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 -Trois hypothèses de calage hydrologique mensuel	131
Tableau 2 -Caractéristiques des ajustements des 4 calages hydrologiques mensuels sur 442 mois	131
Tableau 3 -Paramètres des 4 calages hydrologiques mensuels sur le bassin de la Voulzie	134
Tableau 4 -Ajustement et statistiques pour les 4 calages hydrologiques mensuels, sur le bassin de la Voulzie	134
Tableau 5 -Paramètres hydrologiques du calage annuel comparés au calage mensuel	135
Tableau 6 -Caractéristiques des pluies efficaces annuelles de la période 1907-1983, calculés avec les paramètres des différents calages	136
Tableau 7 -Bassin des sources de la Voulzie. Apports et besoins. Valeurs annuelles des nitrates	142
Tableau 8 -Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange	143
Tableau 9 -Paramètres chimiques divers	143
Tableau 10 -Caractéristiques de l'ajustement. Valeurs annuelles	145

RESUME

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, le modèle a été utilisé pour estimer l'évolution des concentrations au cours des années à venir en supposant un scénario avec les mêmes cultures, les mêmes fertilisations et les mêmes pluies que ces 77 dernières années. Cette simulation montre une stabilisation très lente : la concentration passerait de 55 mg/l en 1984 à 95 mg/l après 40 ans avant de se stabiliser vers 115 mg/l après 100 ans. Un second scénario montre que même en réduisant les épandages d'engrais pour les ramener à leurs valeurs de 1964 on observerait une stabilisation (à la valeur actuelle de 55 mg/l) pendant une quinzaine d'années avant que la concentration ne décroisse et atteigne 40 mg/l après 40 ans environ.

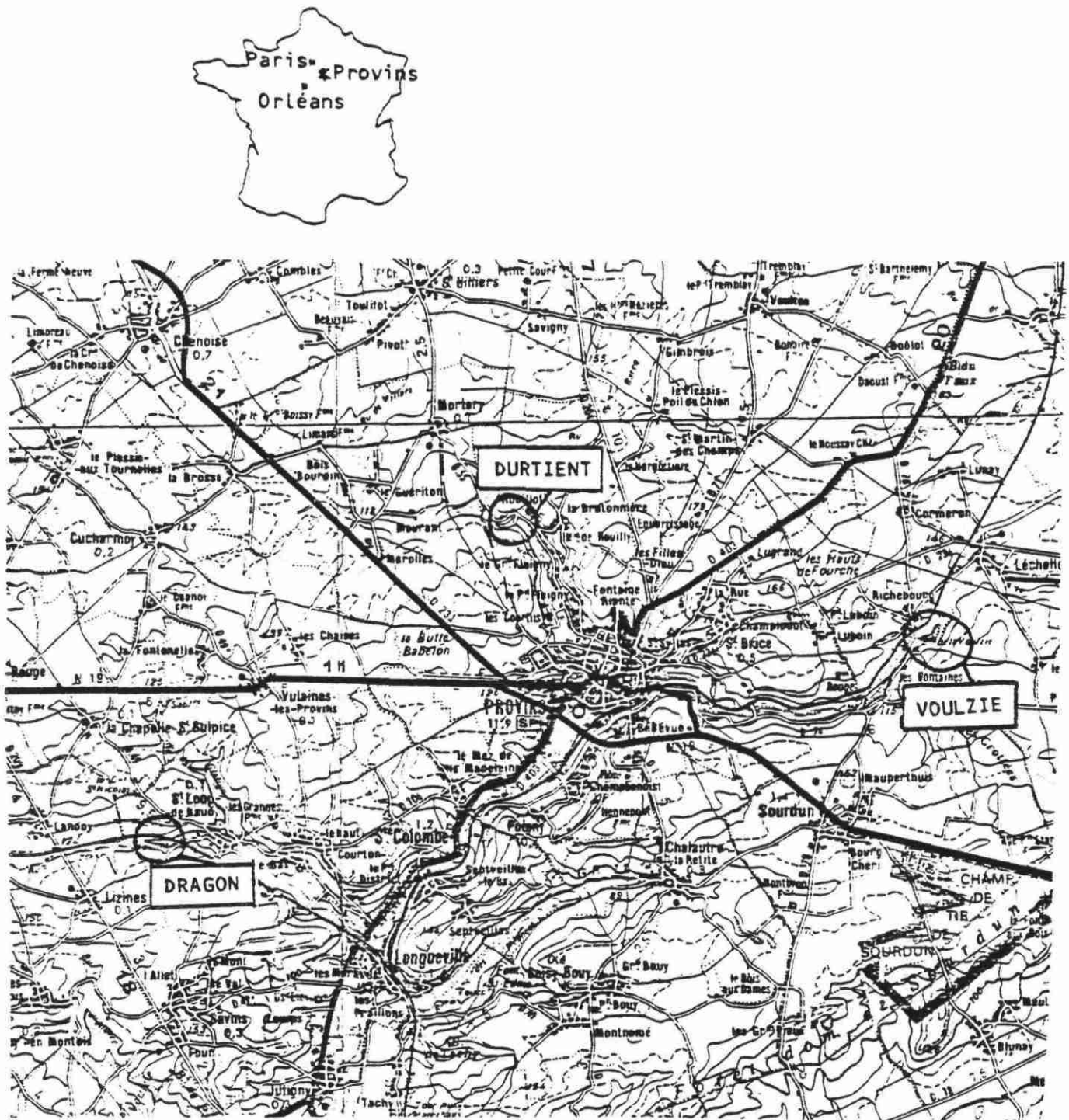


Figure 1 - Situation des 3 forages de l'ensemble des sources de la Voulzie

INTRODUCTION

Cette application a été réalisée à la demande du Ministère de l'environnement - Direction de la Prévention des Pollutions, Service de l'eau.

Elle a pour objet la modélisation de l'évolution au cours du temps des teneurs en nitrates des nappes d'eau souterraine et fait suite à la modélisation des transferts des nitrates dans 5 bassins versants à Rembercourt-aux-Pots (Meuse) décrite dans l'annexe I.

Le site des sources de la Voulzie présente une très longue série de mesures (pendant une quarantaine d'années). Le bassin versant est grand (250 km²), les temps de réaction sont lents. Les variations de concentrations présentent surtout une composante pluriannuelle avec peu de fluctuations saisonnières.

Cette annexe décrit la démarche entreprise et les résultats obtenus sur l'ensemble des sources de la Voulzie près de la ville de Provins (Seine-et-Marne). Les débits étudiés et les concentrations correspondent au **POINT DE JONCTION** des débits des 3 captages appelés par abus de langage "Groupe de Sources de la Voulzie". La situation des 3 captages : La Voulzie, La Durteint et le Dragon, est précisée sur la figure 1.

Ces sources de la Voulzie, utilisées pour l'alimentation en eau de la ville de Paris, font l'objet d'une surveillance par le Service de contrôle des eaux de cette même ville. Nous remercions celui-ci de nous avoir permis d'accéder à ses données. Ces dernières ont été recueillies sous forme de fichier informatisé par notre Service Géologique Régional Ile-de-France.

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). La matrice de corrélation de ces variables s'écrit comme suit :

	Voulzie	Orléans
Orléans	0.770	
Paris	0.790	0.832

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

- équation	Voulzie = 0.3868 Orléans + 0.5194 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.

3.2 - DEBITS MENSUELS A L'EXUTOIRE

Les variations de débit sont régulière, 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 m³/s, soit la moitié du débit moyen (1,1 m³/s).

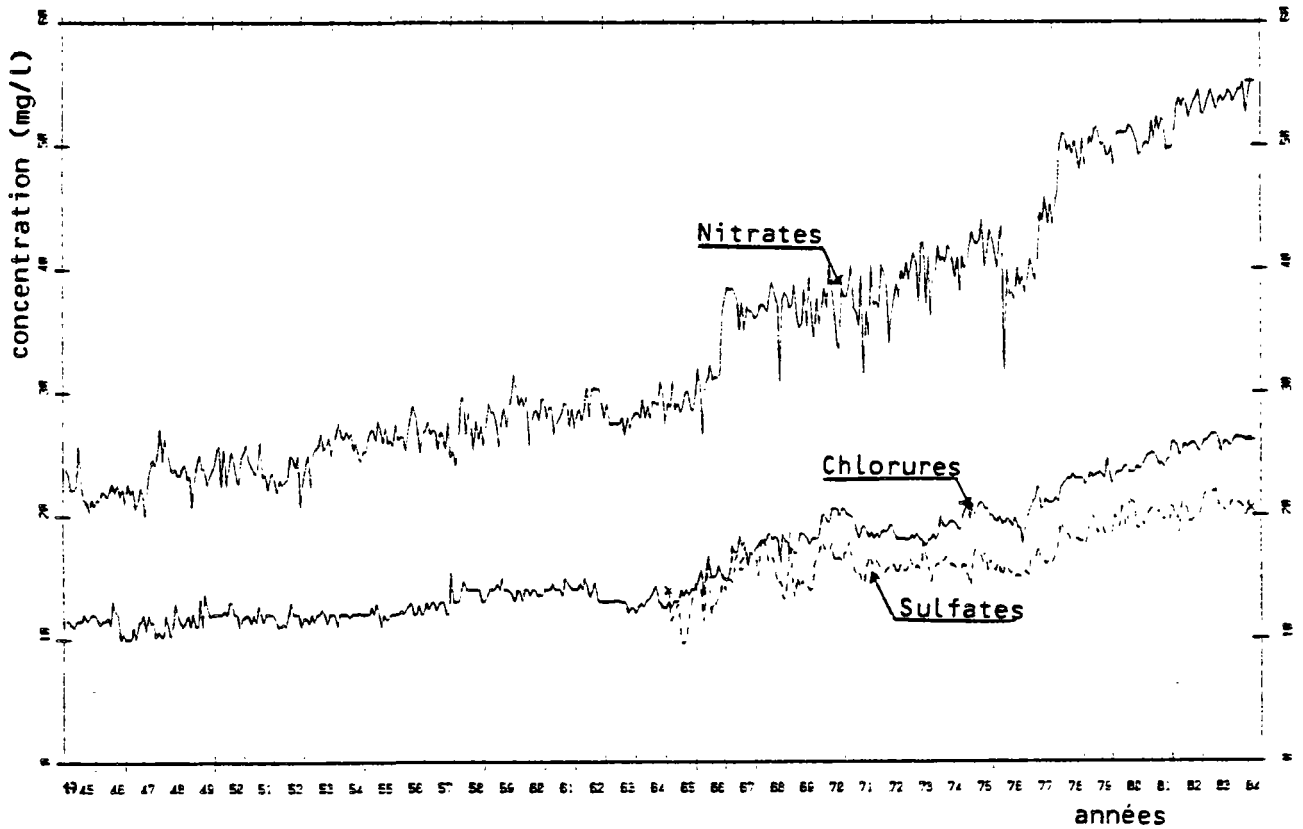
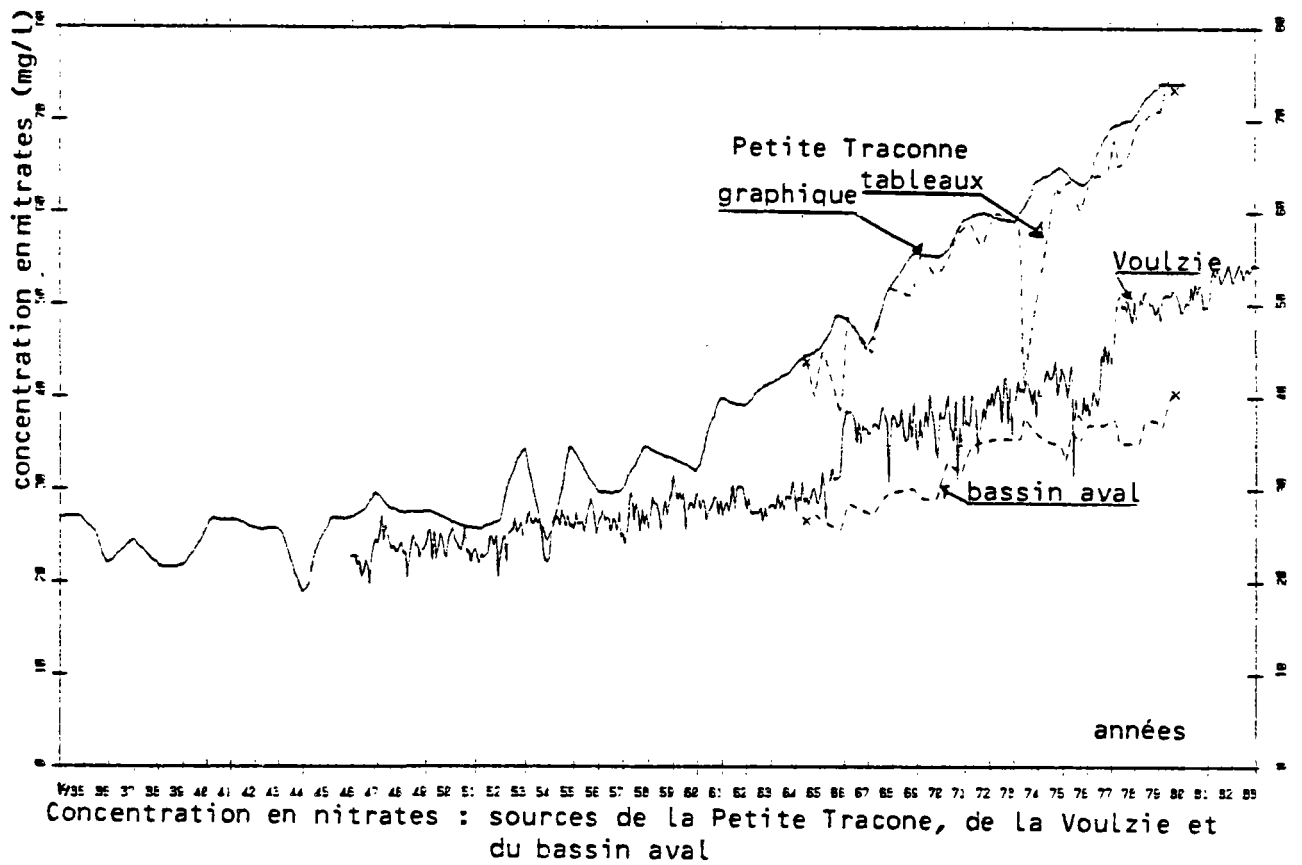


Figure 2 - Groupe des sources de la Voulzie - Concentration en nitrates, chlorures et sulfates de 1945 à 1984.

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. 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 7 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
- correction globale de l'évapotranspiration potentielle	CETP
- 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 (fig. 4.a). 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 avec les notations du tableau 1.

Notation	Hypothèses
MENS	Calage mensuel sur les débits observés OBSE
+ 25 %	Calage mensuel sur les débits OB25 observés et majorés de 25 % de 1978 à 1983
+ 0,2	Calage mensuel sur les débits observés et majorés de 0,2 m ³ /s de 1978 à 1983

Tableau 1 - Trois hypothèses de calage hydrologique mensuel

Les graphiques mensuels et annuels des débits simulés au pas de temps mensuels pour ces hypothèses sont reproduits sur les figures 3 et 4.

Ces figures montrent que la correction du débit de 1978 à 1983 ne permet pas de beaucoup mieux simuler la période 1966-1970 qui reste sous-estimée.

Les caractéristiques de l'ajustement pour les 442 mois (soit 36,8 années) simulés sont regroupées dans le tableau 2.

Hypothèse de calage	Moyenne du débit (m ³ /s)	Ecart-type (m ³ /s)	Corrélation avec le débit observé	
			O B S E	O B 2 5
MENS	1,10	0,21	0,80	0,87
+ 25 %	1,16	0,27	0,79	0,85
+ 0,2	1,14	0,25	0,79	0,86
OBSE	1,10	0,29	--	0,95
OB25	1,15	0,36	0,95	--

Tableau 2 - Caractéristiques des ajustements des 3 calages hydrologiques mensuels sur 442 mois

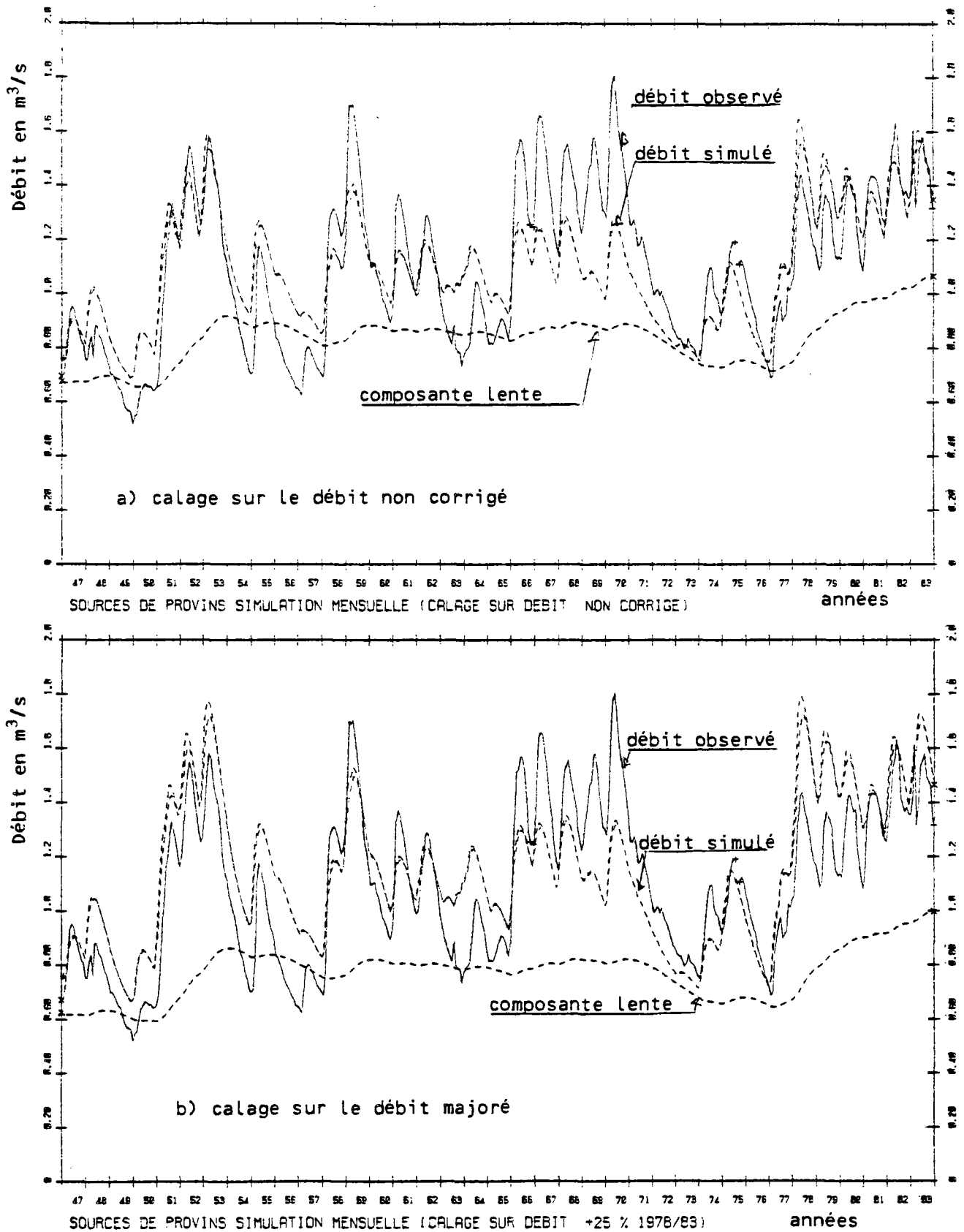


Figure 3 - Simulation au pas de temps mensuel du débit des sources de la Vouzie

a) calage sur le débit non corrigé

b) calage sur le débit majoré de 25 % de 1978 à 1983

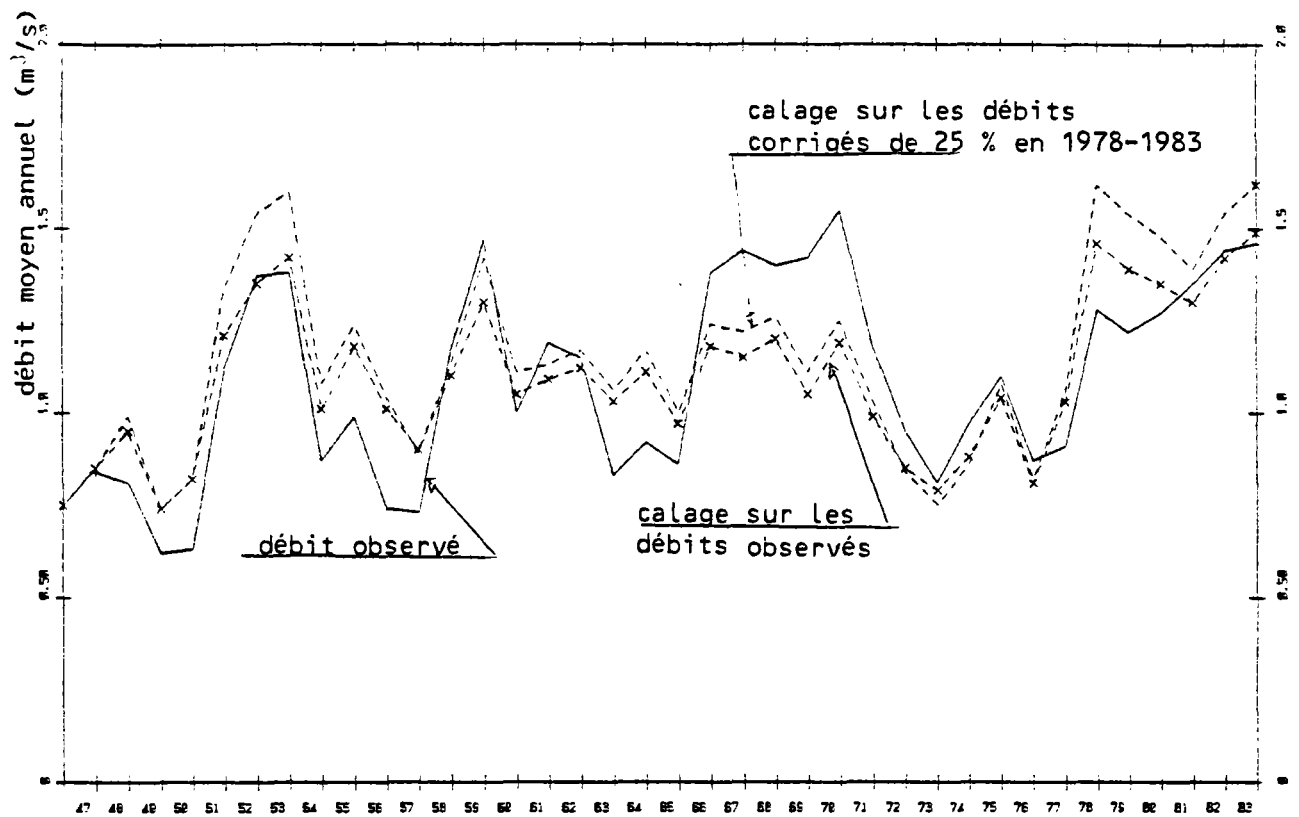


Figure 4a - Comparaison des simulations mensuelles calées sur les débits observés et sur les débits corrigés de 25 % de 1978 à 1983
 Le calage sur les débits corrigés est très peu amélioré.

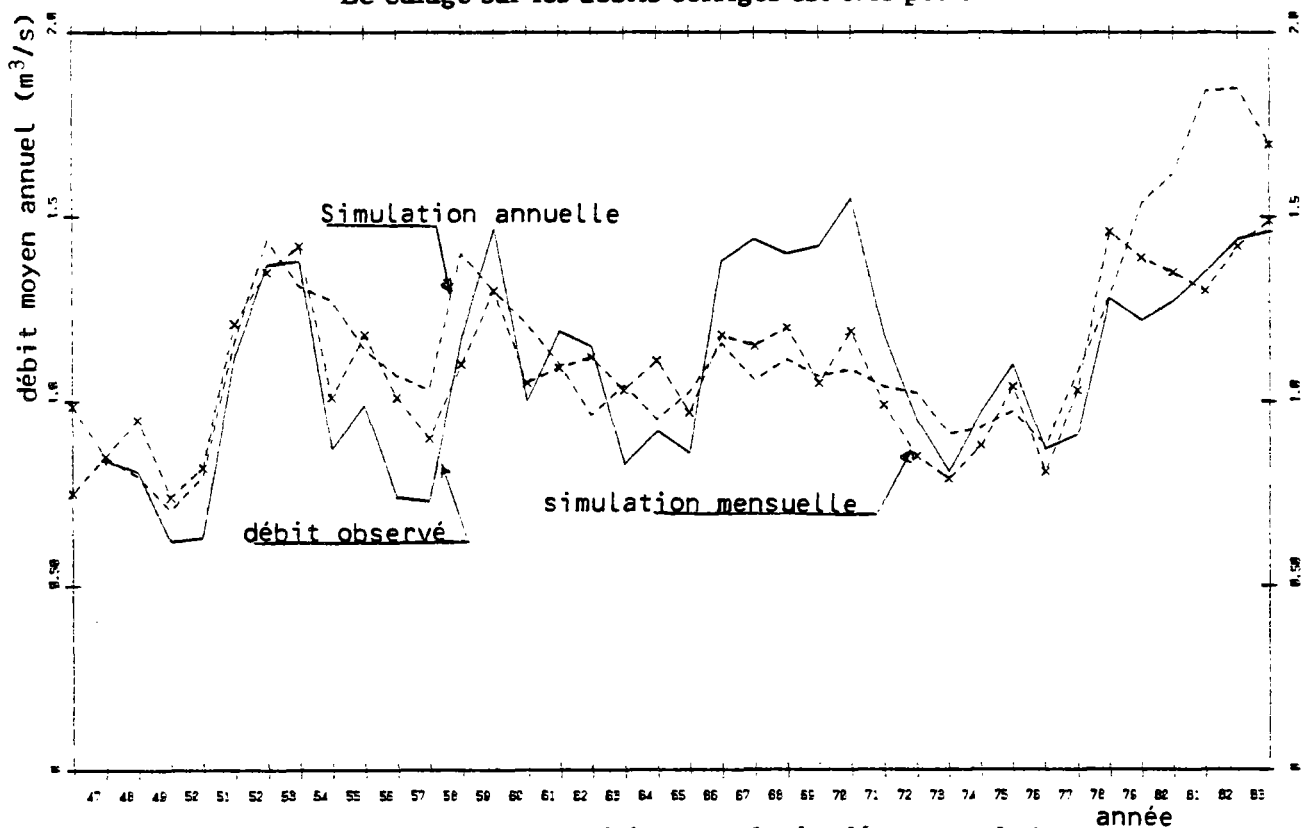


Figure 4b - Comparaison des débits annuels simulés au pas de temps annuel et au pas de temps mensuel.
 Le pas de temps annuel donne une simulation nettement moins bonne.

Les coefficients de corrélation entre les différents calages sont les suivants :

NATU + 25 %		
+ 25 %	0,99	
+ 0,2	0,998	0,998

On remarque que la correction de 25 % des débits de 1978 à 1983 améliore toutes les simulations. Même les calages réalisés sur les débits non corrigés sont plus proches de la série corrigée (calage NATU : coefficient de corrélation de 0,87 au lieu de 0,80), ce qui confirme dans une certaine mesure la validité de la correction.

Les caractéristiques et les paramètres des calages mensuels sont rassemblés dans les tableaux 3 et 4.

Hypothèse de calcul	Correction de pluie CPLU (%)	Correction d'ETP CETP (%)	Capacité en eau du sol RUMAX (mm)	Temps de 1/2 montée THG (mois)	Temps de 1/2 tarissement rapide TG1 (mois)	Temps de 1/2 transfert profond TG12 (mois)	Temps de 1/2 tarissement lent TG2 (mois)
MENS	8,4	7,2	155	2,85	17,4	4,4	102
+ 25 %	8,9	5,2	158	3,04	15,8	6,6	87
+ 0,2	8,9	6,7	156	2,74	15,0	5,7	86

Tableau 3 - Paramètres des 3 calages hydrologiques mensuels sur le bassin de la Voulzie

	Coefficient d'ajustement (corrélation)	Moyenne calculée (m ³ /s)	Débit minimal calculé (m ³ /s)	Débit maximal calculé (m ³ /s)
MENS	0,796	1,11	0,69	1,65
+ 25 %	0,846	1,16	0,67	1,79
+ 0,2	0,843	1,14	0,67	1,73
OBSE	--	1,10	0,52	1,81
OB25	--	1,15	0,52	1,99

Tableau 4 - Ajustement et statistiques pour les 3 calages mensuels sur le bassin de la Voulzie

Il apparaît ainsi que les valeurs des paramètres sont très réalistes : correction de pluies et d'évapotranspiration potentielle de 7 à 8 %, et capacité en eau du sol de 150 mm. Les temps de demi-tarissement sont de 16 mois, et ceux de la composante très lente de 90 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.

4.4 - CALAGE AU PAS DE TEMPS ANNUEL

Etant donné la lenteur de réaction des débits aux précipitations et de l'évolution des concentrations, on a tenté une simulation annuelle des débits. Une simulation chimique annuelle suffira alors pour modéliser l'évolution des concentrations en nitrates. Pour l'initialisation des réservoirs, on a commencé les calculs en 1907, soit 40 ans avant le début des observations, comme pour le calage mensuel.

4.4.1 - PARAMETRES

Après ajustement, on a obtenu des jeux de paramètres qui sont un peu différents, car il est évident qu'un bilan annuel tend à sous-estimer les pluies efficaces. Les paramètres obtenus, pour ce calage annuel notés ANNU, sont résumés dans le tableau 5, et sont comparés à ceux obtenus au pas de temps mensuel (NATU).

Calage	Correction de pluie CPLU (%)	Correction d'ETP CETP (%)	Capacité en eau du sol RUMAX (mm)	Temps de 1/2 montée THG (mois)	Temps de 1/2 tarissement rapide TG1 (mois)	Temps de 1/2 transfert profond TG12 (mois)	Temps de 1/2 tarissement lent TG2 (mois)	Coefficient d'ajustement (corrélation)
ANNU	19,9	2,3	100	21	33	17	60	0,797
MENS	8,4	7,2	155	2,85	17,4	4,4	102	--

Tableau 5 - Paramètres hydrologiques du calage mensuel (ANNU) comparés au calage mensuel (MENS)

Il apparaît que pour compenser la sous-estimation des pluies efficaces due à ce pas de temps trop grossier, il a été nécessaire d'augmenter les pluies à + 20 % (au lieu de + 8 %), de diminuer l'ETP à + 2 % (au lieu de + 7 %), et de diminuer la capacité en eau du sol qui devient 100 mm au lieu de 150 mm.

4.4.2 - PLUIES EFFICACES CALCULEES

Les pluies efficaces annuelles ont été calculées avec les paramètres des différents calages pour les 77 ans de la période 1907-1983. Les caractéristiques obtenues sont rassemblées dans le tableau 6.

	Moyenne (mm/an)	Ecart-type (mm/an)
MENS	135	94
ANNU	157	134

Tableau 6 - Caractéristiques des pluies efficaces annuelles de la période 1907-1983 avec un pas mensuel MENS ou Annuel ANNU

4.4.3 - CONCLUSION SUR LE CALAGE ANNUEL

En utilisant un calage au pas de temps annuel :

- on retrouve un débit annuel ayant un coefficient de corrélation de 0,82 avec celui calculé à partir d'un pas mensuel, et des pluies efficaces annuelles ayant un coefficient de corrélation de 0,80 avec celles calculées au pas mensuel,
- les valeurs moyennes des pluies efficaces calculées sont très comparables (entre 135 et 140 mm/an avec un bilan mensuel, et 157 mm/an avec un bilan annuel).

Il apparaît donc que pour simuler l'évolution annuelle du débit de l'ensemble des sources de la Voulzie, il est suffisant d'utiliser un pas de temps annuel.

5 - MODELISATION CHIMIQUE

5.1 - METHODE ET MODELE UTILISE

La modélisation a été réalisé avec le modèle BICHE du BRGM. C'est un modèle à réservoirs (identique au modèle GARDENIA) dans lequel on effectue à chaque pas de temps un bilan des apports, des concentrations et des transferts en nitrates.

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 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 kg/m ² /s
	PE	pluie efficace en m ³ /m ² /s
	C_e	concentration en kg/m ³

Si on utilise les unités suivantes :

EX	en kg/ha/an
PE	en mm/an
C	en 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
- 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 la première partie de ce rapport.

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 annuel, 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 7, 8 et 9.

	Correction	1907-1964	1965-1967	1967-1976	1976-1984
Epandage COREPA	+ 5,3 %	232	383	569	718
Minéralisation du sol CORMIN	+ 6,7 %	235	235	235	235
Résidus culturaux TERAC	—	88	88	88	88
Besoins en nitrates CORBES	+ 3,5 %	505	590	718	865
Excédent	—	50	116	174	176

**Tableau 7 - Bassin des sources de La Voulzie. Apports et besoins
Valeurs annuelles de nitrates (en kg/ha/an)**

Réservoirs	Volume d'eau retenue (mm)	Temps de demi-échange (mois)
Superficiel	2 409	12,4
Intermédiaire	1 072	15,2
Souterrain rapide	1 036	6,6
Souterrain lent	1 059	instantané

Tableau 8 - Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange

Concentration maximale pour la dissolution par la pluie	non limitée (non optimisée)
Temps de demi-libération par les racines	instantané (non optimisé)

Tableau 9 - Paramètres chimiques divers

5.5.2 - CARACTERISTIQUES DE L'AJUSTEMENT

Le coefficient d'ajustement est égal à 0.978

Les caractéristiques de l'ajustement pendant les 37 années de mesures sont rassemblées dans le tableau 10.

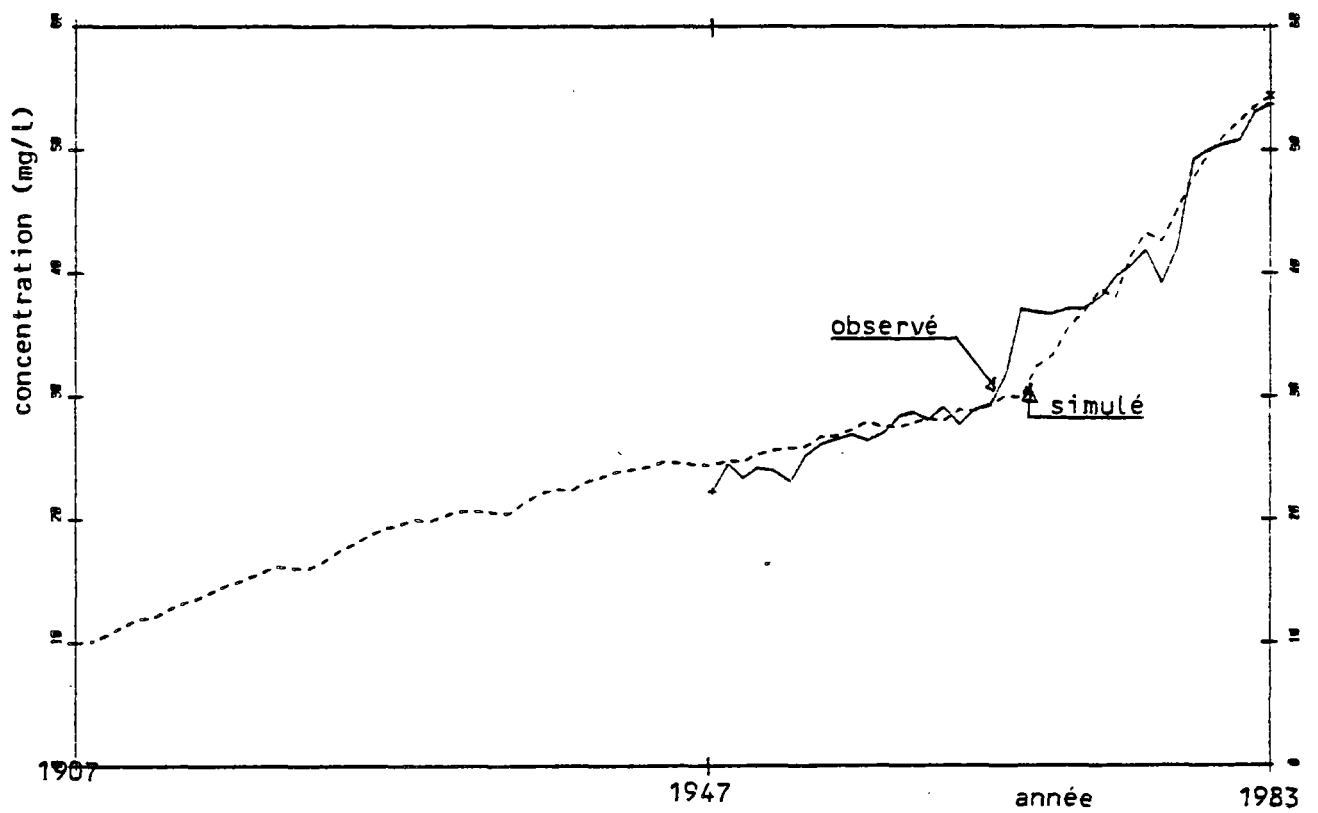
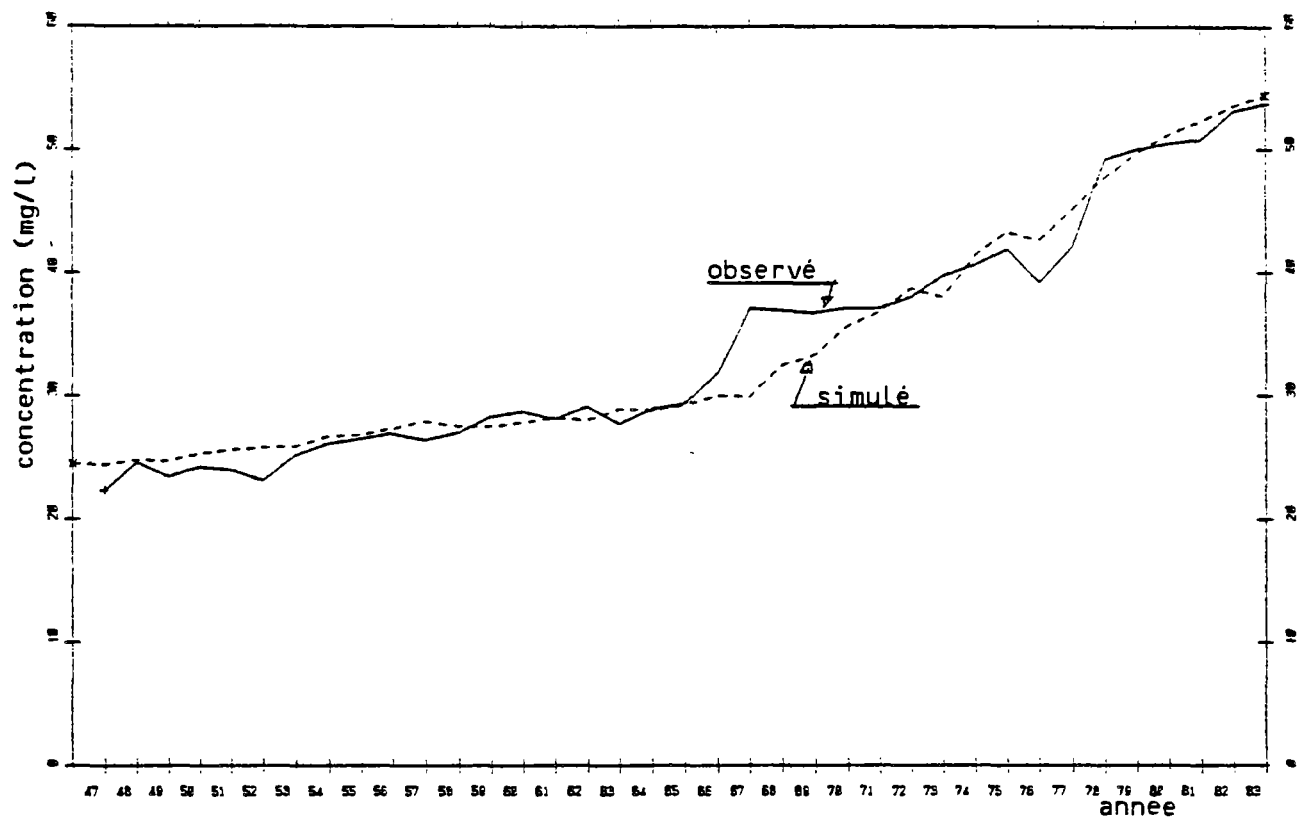


Figure 5 - Simulation de la concentration annuelle dans la source

	Observée	Calculée
Concentration minimale	22.3	24.4
Concentration moyenne	34.2	34.2
Concentration maximale	53.7	54.4
Ecart-type de la concentration	9.5	9.4

**Tableau 10 - Caractéristiques de l'ajustement
Valeurs annuelles**

Le calage est satisfaisant comme le montre la figure 5.

Les figures 6 et 7 présentent la décomposition du fonctionnement du modèle de 1947 à 1983, et de 1907 à 1983, dans l'hypothèse d'un départ en 1907 avec une concentration de 10 mg/l. Elles montrent 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 du flux sortant. la concentration calculée dans la source augmente quant à elle régulièrement à partir de 1968.

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.

On a choisi comme scénario des épandages et des besoins inchangés pendant 103 ans suivant 1983. Les pluies après 1983 ne sont bien entendu pas connues. On a donc supposé pour le calcul qu'après 1983, on retrouvait périodiquement les 77 ans de

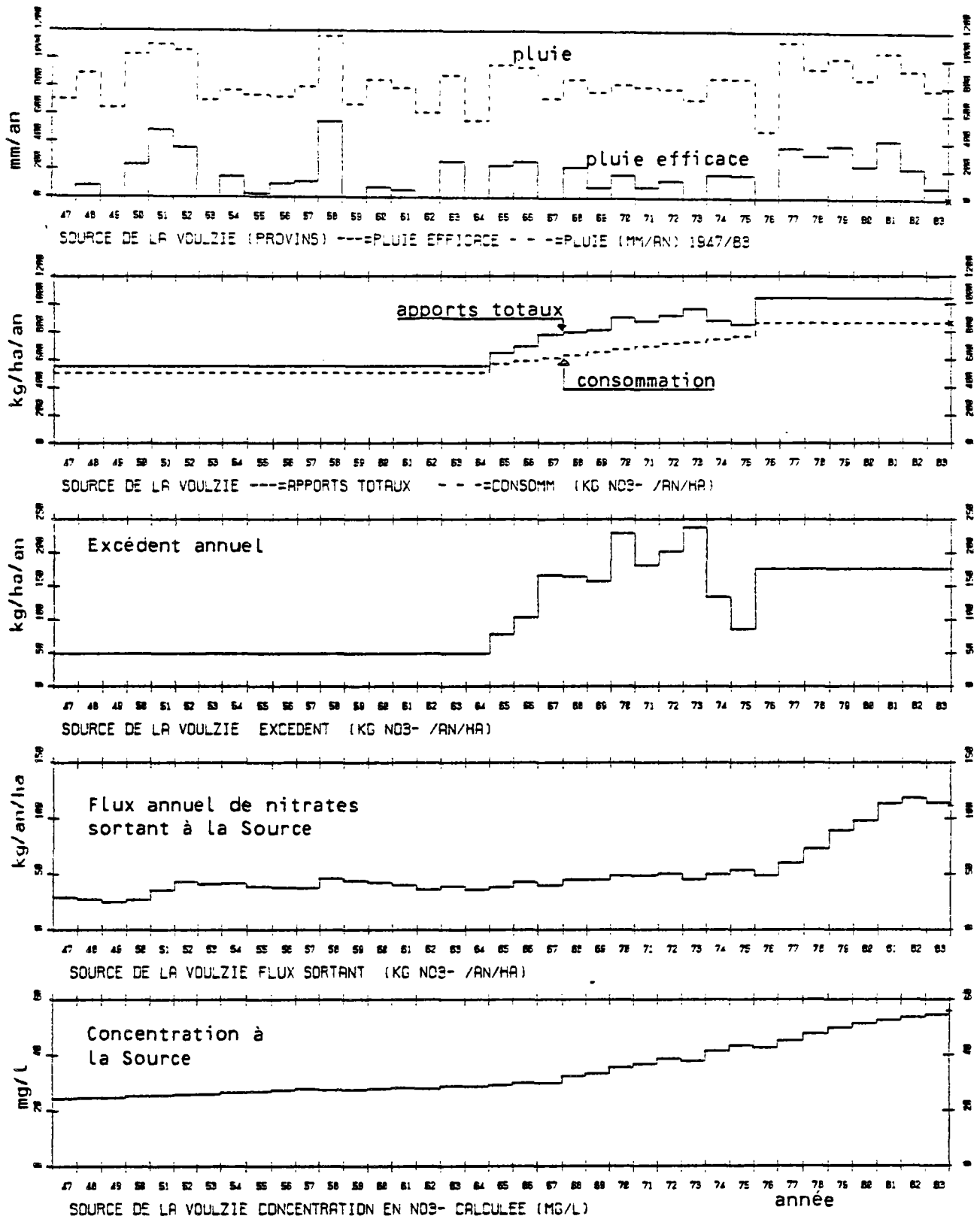


Figure 6 - Bilan annuel de 1947 à 1983

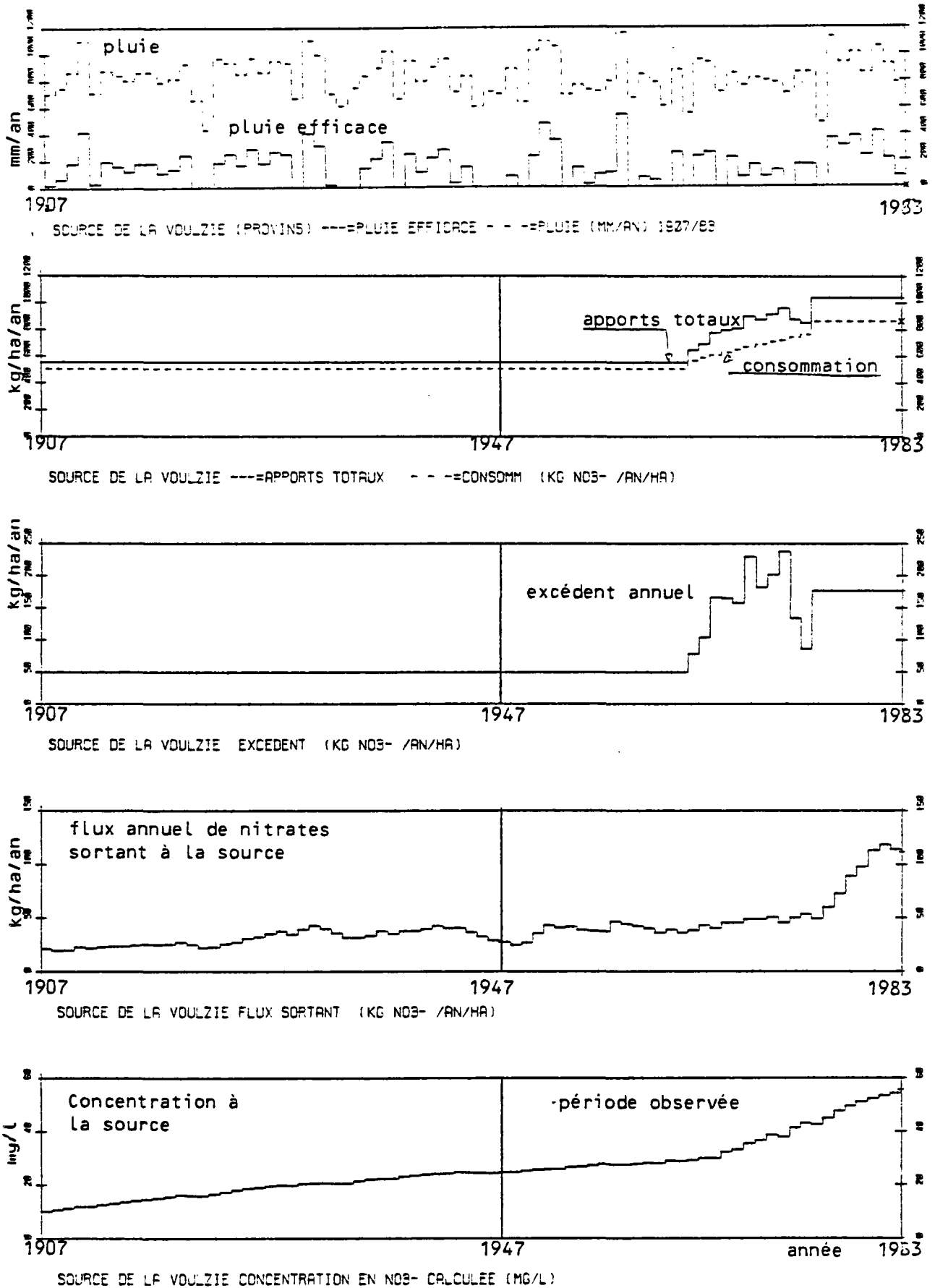


Figure 7 - Bilan annuel de 1907 à 1983

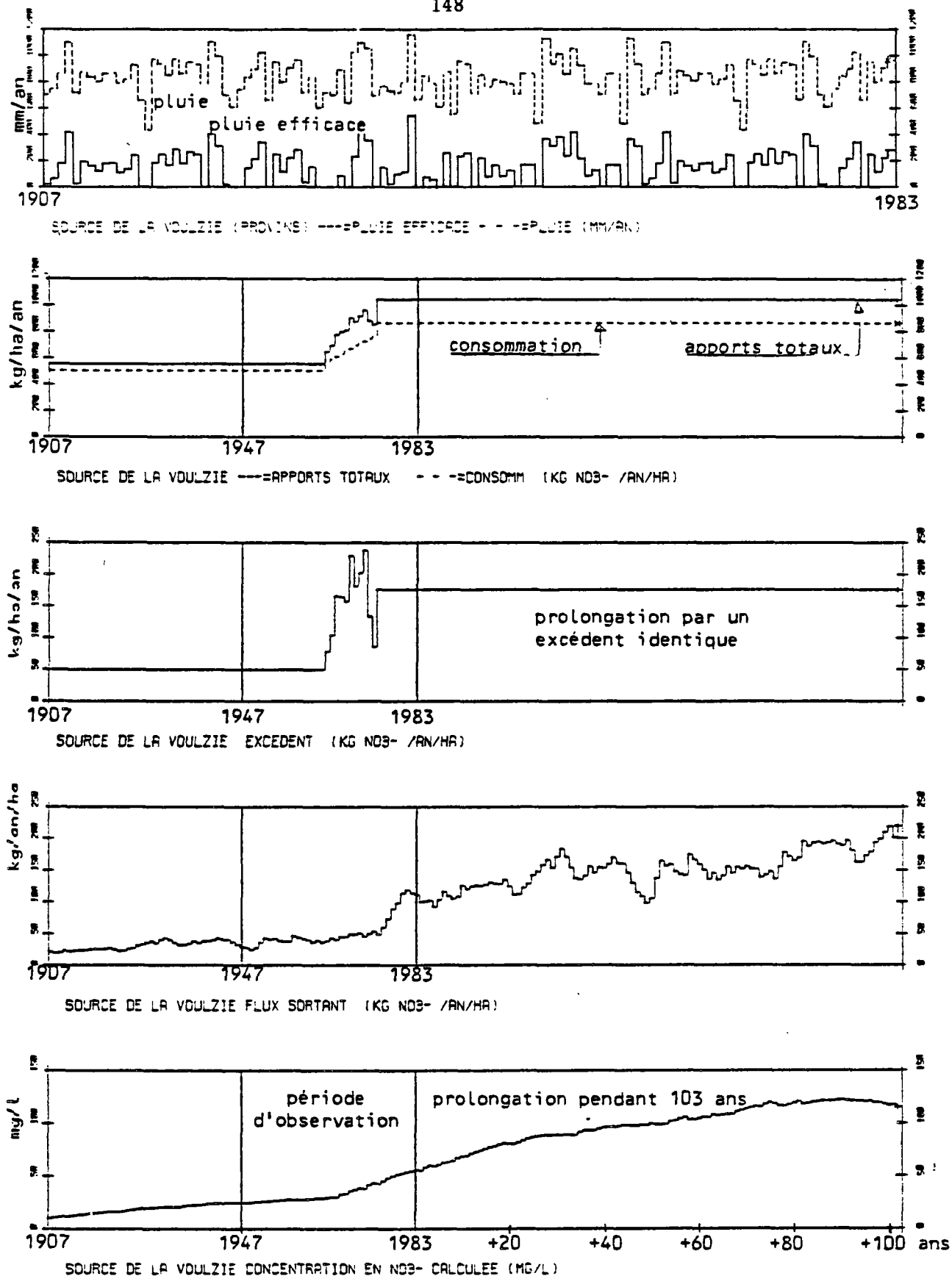


Figure 8 - Bilan annuel de 1907 à 1983, prolongé pendant 103 ans avec le même excédent de nitrates et les pluies de 1907-1983

la séquence observée de 1907-1983. On a alors simulé deux scénarios d'épandage (et de besoins) :

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

La figure 8 montre le bilan obtenu pour le premier scénario. Elle fait apparaître une augmentation relativement régulière de la concentration qui atteint une quasi-stabilisation après environ 80 ou 90 ans. La concentration d'équilibre atteint 115 mg/l environ, ce qui correspond bien à un excédent de nitrates de 176 kg/ha/an dans une pluie efficace moyenne de 150 mm/an.

La figure 9 montre l'évolution des concentrations calculées pour les 40 années suivant 1983 selon le premier scénario. La concentration atteindra environ 95 mg/l après 40 ans. Cette figure montre également que la période 1947-1983 n'a pas permis d'atteindre un équilibre ou un quasi-équilibre.

Selon le second scénario la concentration se maintiendrait pendant une quinzaine d'années vers 55 mg/l avant de décroître lentement pour atteindre 40 mg/l après 40 ans (fig. 10).

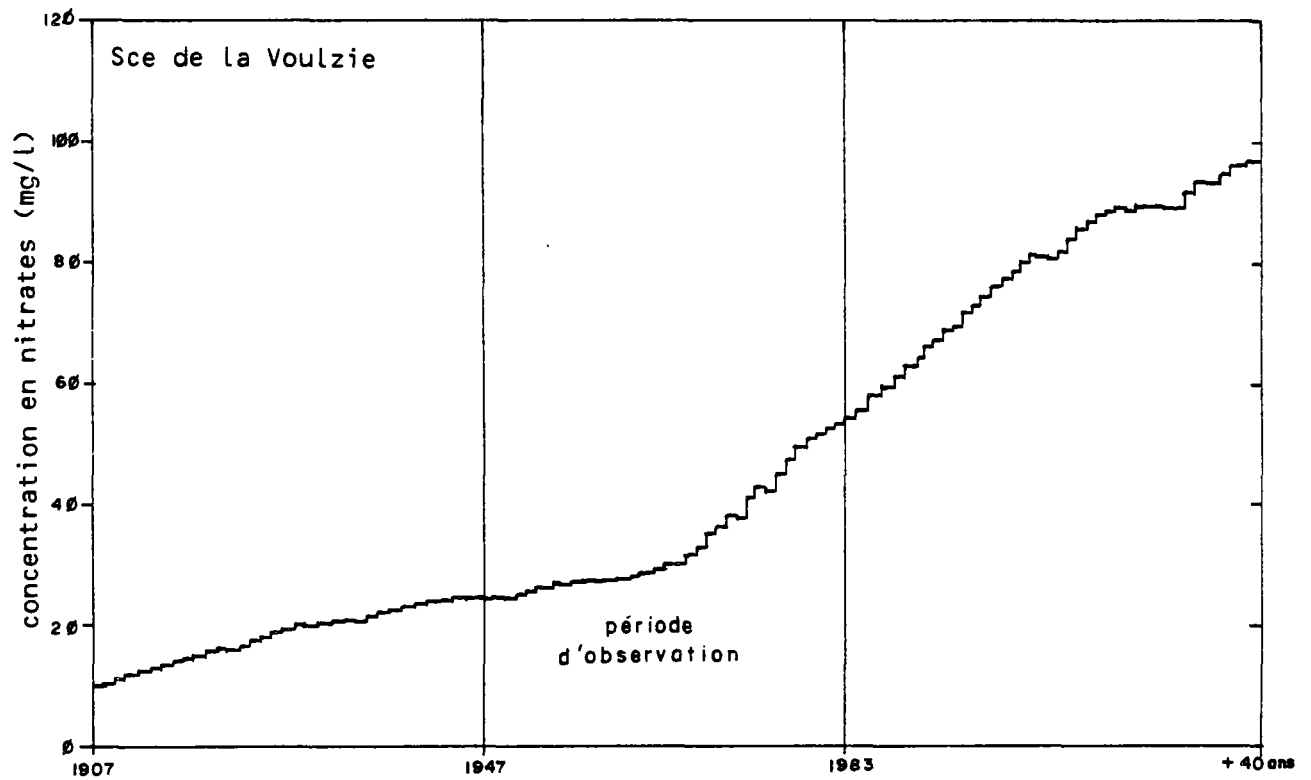
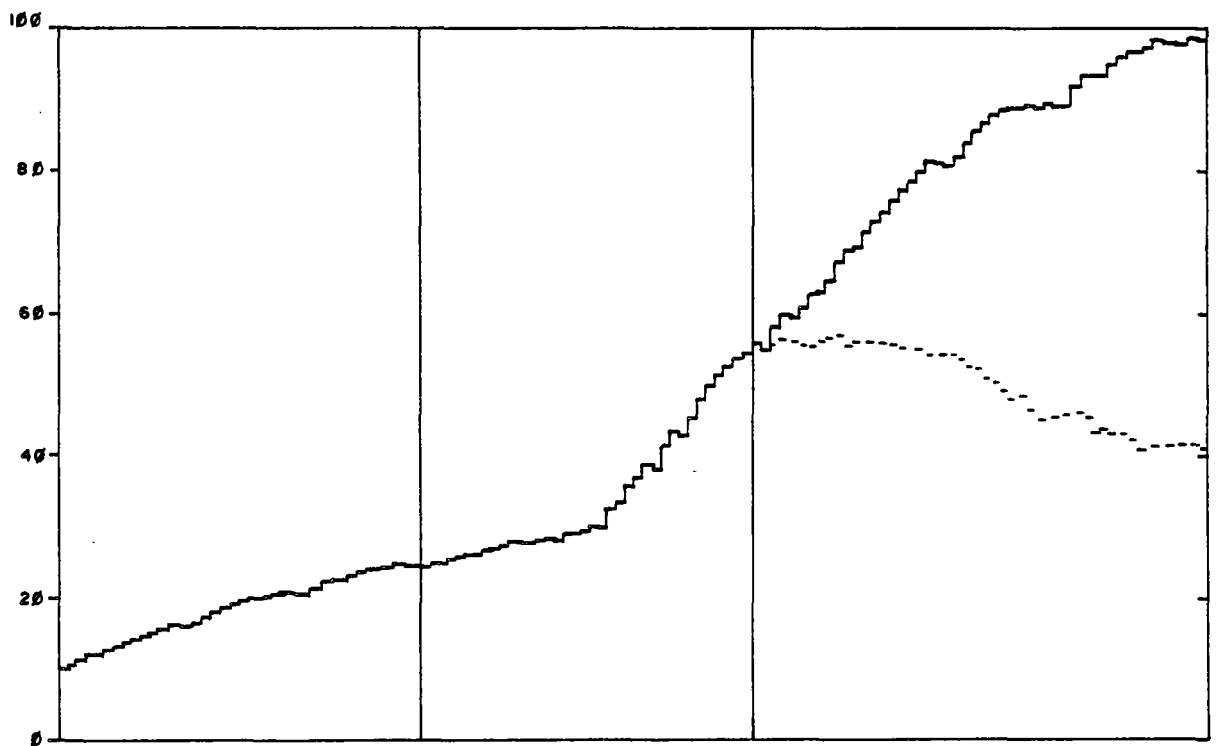


Figure 9 - Evolution des concentrations, en supposant un même excédent de nitrates pendant 40 années suivant 1983



**Figure 10 - Simulation pendant 48 ans de 2 scénarios après 1983 -
épandages inchangés - épandages ramenés au taux de 1964**

CONCLUSION

Cette application a montré comment il était possible d'utiliser un modèle global de simulation des transferts de nitrates (le modèle BICHE) pour 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, on a estimé avec le modèle l'évolution probable des concentrations en supposant que les pluies des 100 prochaines années seront périodiquement identiques aux pluies des 77 dernières années, et en supposant des cultures et des fertilisations identiques à celles de la période 1976-1983. Ces calculs ont montré que les concentrations augmenteraient avec ces hypothèses jusqu'à environ 95 mg/l dans 40 ans, et se stabiliseraient vers 115 mg/l après 100 ans.

Un second scénario montre qu'en ramenant les épandages à leur valeur de 1964 (c'est-à-dire en supposant une réduction extrême bien improbable) la concentration, se maintiendrait à sa valeur actuelle 55 mg/l pendant une quinzaine d'années avant de décroître lentement pour atteindre 40 mg/l après 40 ans.

Le calage hydrologique a été réalisé au pas de temps mensuel, mais les simulations chimiques au pas de temps annuel. Une simulation au pas de temps mensuelle plus délicate, et plus coûteuse, ne permettrait pas d'obtenir des résultats significativement plus précis, vu la lenteur de réaction du système. Par contre, une meilleure connaissance des fertilisations et des rendements des cultures permettrait une meilleure fiabilité du calage.

* *

*

ANNEXE III

Application au captage AEP de Pithiviers (Beauce)

(d'après la Note Technique 85/03)

SOMMAIRE

	Pages
RESUME	157
INTRODUCTION	159
1 - LES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES	159
2 - LES DONNEES CHIMIQUES DISPONIBLES	161
3 - ANALYSE DES DONNEES	161
3.1 - Niveaux piézométriques	161
3.2 - Concentrations en nitrates	161
4 - MODELISATION HYDROLOGIQUE	163
4.1 - Méthode et modèle utilisés	163
4.2 - Principe du calage du modèle hydrologique	163
4.3 - Calage au pas de temps mensuel	163
4.4 - Calage au pas de temps annuel	165
5 - MODELISATION CHIMIQUE	169
5.1 - Méthode et modèle utilisés	169
5.2 - Les données agricoles	169
5.3 - Les paramètres de transferts chimiques du modèle	172
5.4 - Calage du modèle	173
5.5 - Exploitation du modèle	177
CONCLUSION	182
 LISTE DES FIGURES	
Figure 1 - Localisation du site étudié	158
Figure 2 - Piézométrie mensuelle 1973-1984 à Pithiviers-le-Vieil	160
Figure 3 - Concentration en nitrates à Pithiviers de 1976 à 1984	162
Figure 4 - Simulation au pas de temps mensuel des variations de niveaux au piézomètre de Pithiviers, de 1973 à 1982	164
Figure 5 - Simulation au pas de temps annuel des variations de niveau annuel à Pithiviers-le-Vieil, de 1973 à 1982	166

	Pages
Figure 6 - Comparaison des pluies efficaces annuelles à Pithiviers, estimées avec un calcul au pas de temps mensuel et au pas de temps annuel	168
Figure 7 - Simulation de la concentration en nitrates à Pithiviers, de 1937 à 1984	176
Figure 8 - Bilan annuel de 1973 à 1984 à Pithiviers, en kg NO ₃ /ha/an	178
Figure 9 - Bilan annuel de 1937 à 1984 à Pithiviers, en kg NO ₃ /ha/an	179
Figure 10 - Bilan annuel à Pithiviers avec prolongation pendant 48 ans, avec le même excédent de nitrates, et les pluies de 1937 à 1984	180
Figure 11 - Simulation à Pithiviers d'un prolongement de l'état actuel pendant 48 ans	181

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Calage hydrologique au pas de temps mensuel	165
Tableau 2 - Calage hydrologique au pas de temps annuel	167

RESUME

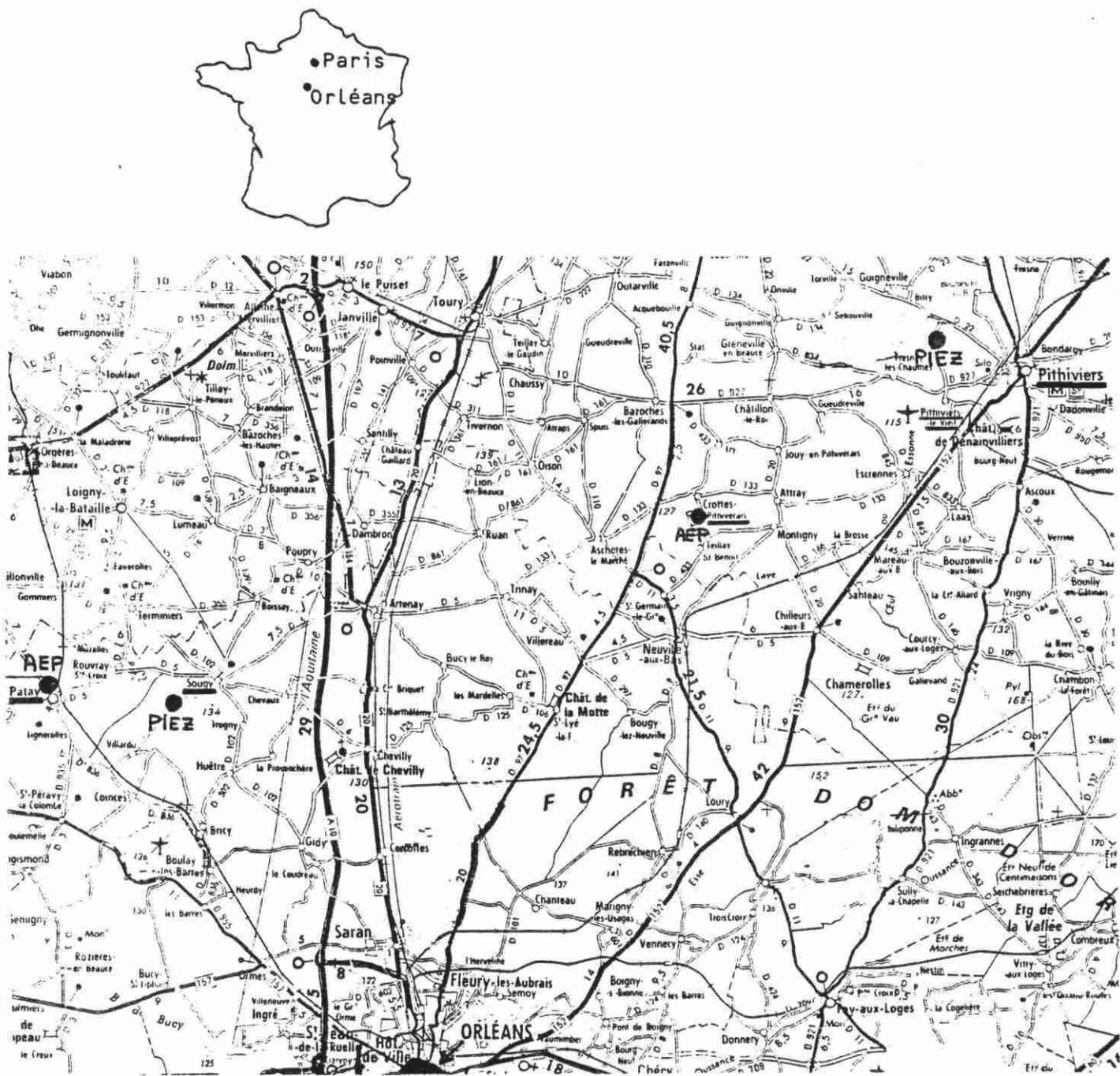
Un modèle global de simulation des transferts de nitrates -le modèle BICHE du BRGM- a été ajusté sur un captage de la nappe de la BEAUCE : à Pithiviers. Ce modèle utilise comme données :

- 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 mesures de niveau en un piézomètre proche pendant 10 ans,
- du point de vue chimique sur les concentrations en nitrates mesurées dans un forage AEP pendant 10 ans.

Après calage, le modèle a été utilisé pour estimer l'évolution des concentrations au cours des années à venir en supposant un scénario avec les mêmes cultures, les mêmes fertilisations et les mêmes pluies que ces dernières années. Cette simulation montre une stabilisation des concentrations dans une quarantaine d'années vers 80 mg/l.



PIEZ = piézomètre (mesures du niveau de la nappe)

AEP = alimentation en eau potable (mesures de la concentration en nitrates)

Figure 1 - Situation du site étudié

INTRODUCTION

Cette application a pour objet la modélisation de l'évolution au cours du temps des teneurs en nitrates des nappes d'eau souterraine.

L'originalité de cette application est qu'on s'intéresse à des cas où on connaît non pas les débits et concentrations à l'extérior d'un bassin versant, mais :

- les variations de niveaux en un point du bassin équipé d'un piézomètre,
- la concentration en nitrates en un point proche.

Cette note décrit la démarche entreprise et les résultats obtenus sur un site de Beauce localisé près de la commune de Pithiviers.

Les piézomètres de contrôles sont les suivants :

- mesure du niveau à Pithiviers-le-Vieil, n° 328-1-19,
- mesure de la concentration à Crottes-en-Pithiviers, n° 327-7-3.
(fig. 1).

1 - LES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES

- * **Pluies mensuelles** (fournies par la Météorologie Nationale) :
 - . à Pithiviers, de 1960 à octobre 1984.
- * **Evapotranspiration potentielle** (calculée par la formule mensuelle de **Turc**, à partir des données de la Météorologie Nationale)
 - . à Orléans, de 1946 à 1984.
- * **Niveau mensuel**
 - . à Pithiviers-le-Vieil (n° 328-1-19), de 1973 à 1982.

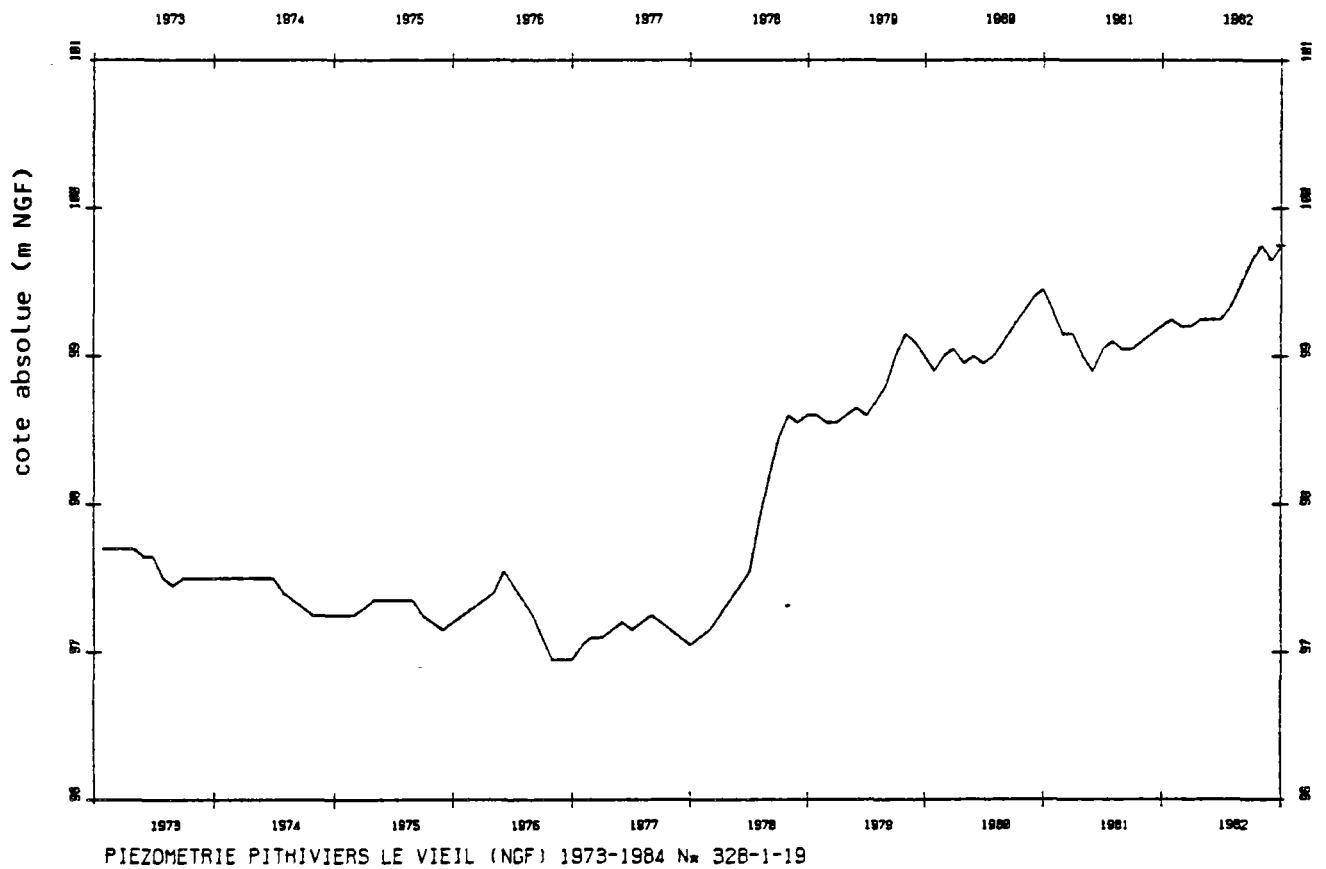


Figure 2 - Piézomètre mensuelle 1973-1984 à Pithiviers-le-Vieil

2 - LES DONNEES CHIMIQUES DISPONIBLES

On dispose de mesures ponctuelles de concentration en nitrates, dans un forage AEP à Crottes en Pithiviers (n° 327-7-3), de 1975 à octobre 1984.

Ces mesures, centralisés par la DDASS, sont relevées 2 à 3 fois par ans avant 1981, puis tous les mois à partir de 1981.

3 - ANALYSE DES DONNEES

3.1 - NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

La figure 2 représente les variations de niveaux à Pithiviers-le-Vieil. Sur la période 1973-1982, on voit nettement apparaître deux périodes :

- un niveau quasi-constant de 1973 à 1977
 - . à la cote 97,5
- une remontée nette de 1978 à 1982,
 - . de + 2,5 m

3.2 - CONCENTRATIONS EN NITRATES

Pour permettre une meilleure visualisation et pour obtenir une meilleure fiabilité des calculs par une augmentation du nombre de points, on a interpolé par une courbe parabolique entre les valeurs mesurées. Les séries mensuelles obtenues sont dessinées sur la figure 3 ; les croix correspondent aux valeurs mesurées.

La figure 3 montre que les concentrations apparaissent beaucoup plus variables de 1981 à 1984 tout simplement parce que les mesures sont plus fréquentes. Globalement, on note une augmentation de concentration moyenne de 28 mg en 1976 à 45 mg en 1984.

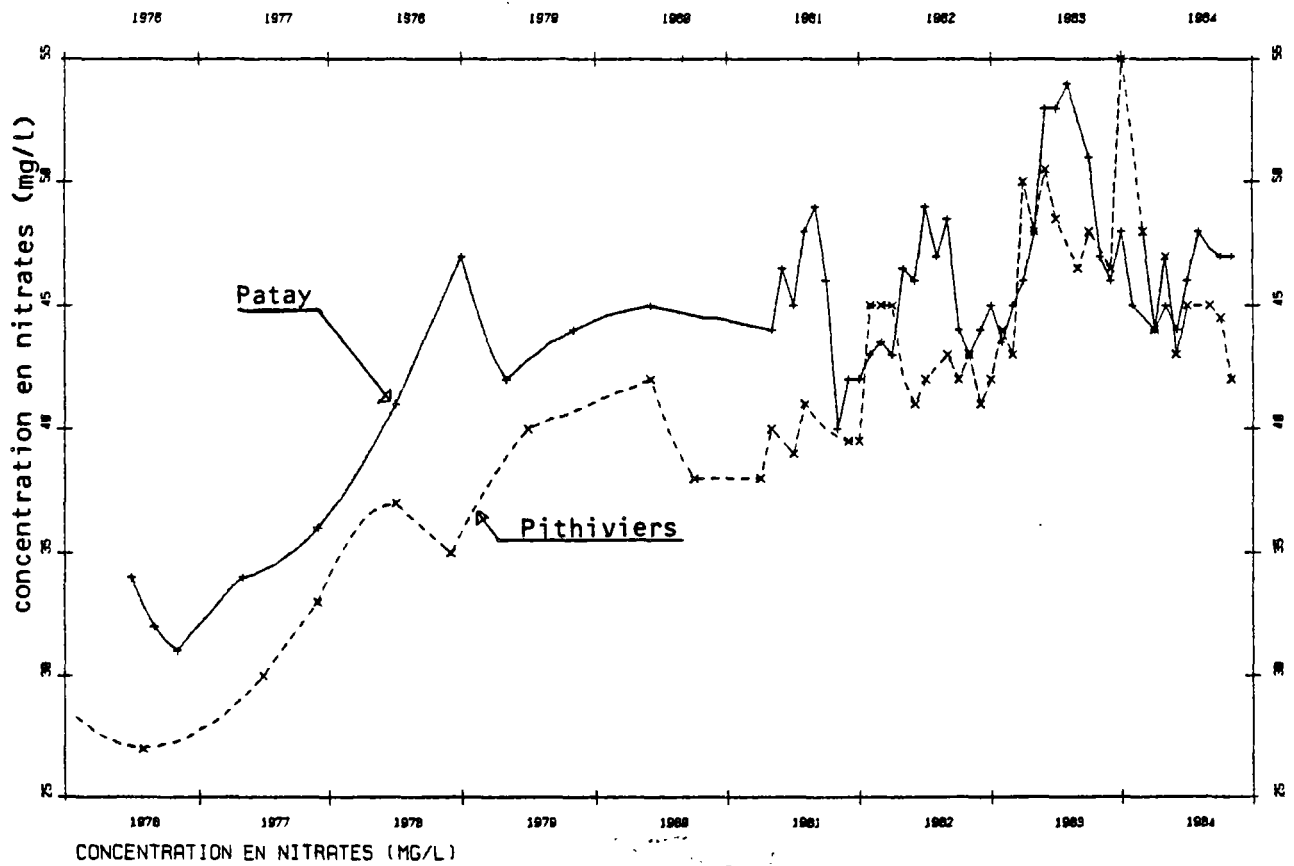


Figure 3 - Concentrations en nitrates à Patay et à Pithiviers, de 1976 à 1984

Les croix indiquent les valeurs observées, les autres valeurs sont interpolées (le piézomètre de Patay, situé à une quarantaine de kilomètres est donné à titre d'illustration).

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 DEbits et des Niveaux Aquifères) qui réalise un bilan entre pluie et évapotranspiration (ETP) pour calculer un niveau piézométrique dans un bassin. 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 niveaux mensuels à partir des données de pluie et d'ETP mensuelles.

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

4.2 - PRINCIPE DU CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE

Le calage du modèle consiste à ajuster 7 paramètres pour réaliser la meilleure simulation des variations de niveaux observés. Les paramètres à ajuster étaient les suivants :

- la capacité de la réserve superficielle du sol	RUMAX
- la correction globale de pluie	CPLU
- la correction globale d'évapotranspiration potentielle	CETP
- le temps de demi-montée	THG
- le temps de demi-tarissement	TG
- le niveau de base	GO
- le coefficient d'emmagasinement	EMM

On n'a admis aucun ruissellement superficiel (RUIPER = 9999 mm).

4.3 - CALAGE AU PAS DE TEMPS MENSUEL

La période observée s'étend de 1973 à 1982. Pour permettre l'initialisation des réservoirs, et donc une simulation correcte des premières années, on a commencé la simulation en 1967, soit 6 ans auparavant.

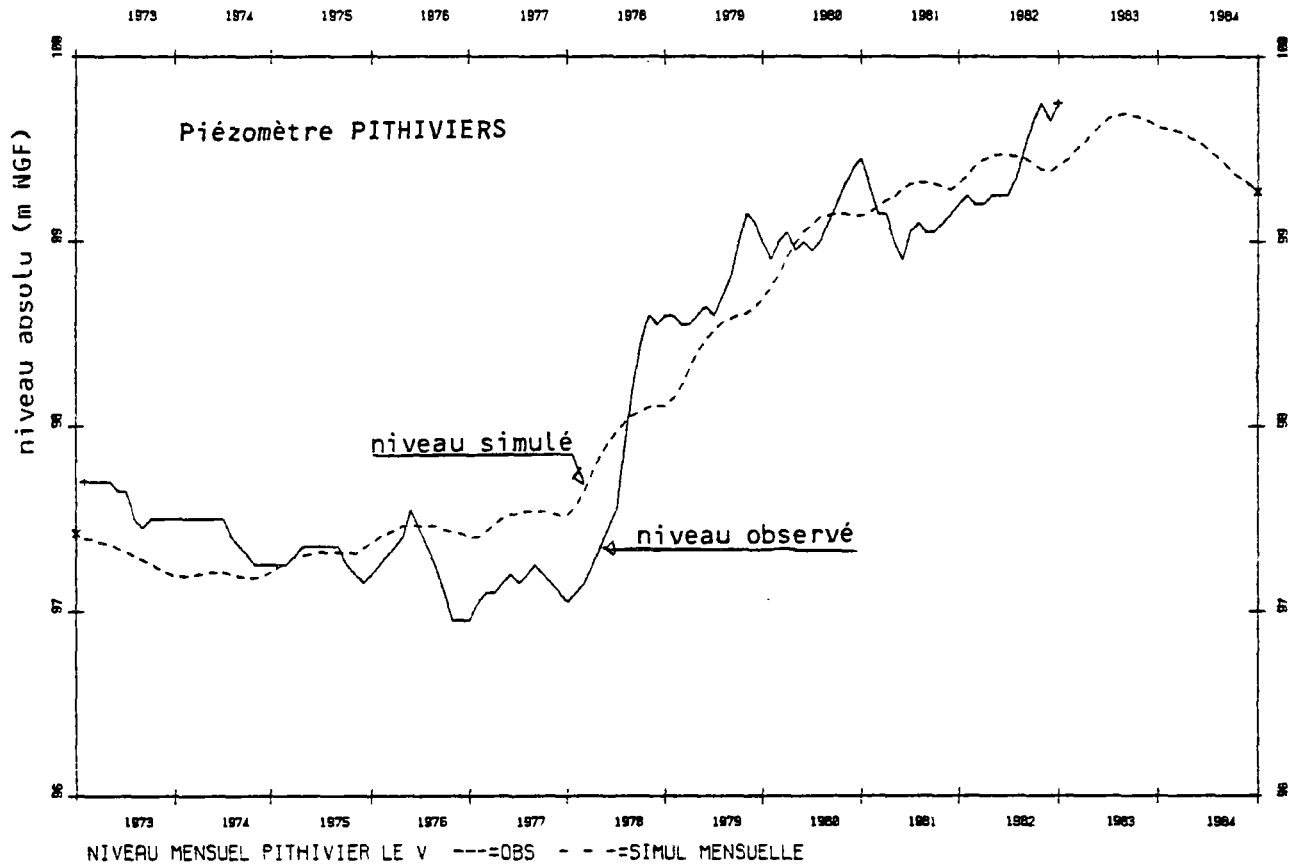


Figure 4 - Simulation au pas de temps mensuel des variations de niveaux au piézomètre Pithiviers, de 1973 à 1982

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 1. Le coefficient de corrélation est noté R, il est calculé sur les 120 valeurs observées et calculées.

	R	RUMAX	CPLU	CETP	THG	TG	GO	EMM
Unités	--	mm	%	%	mois	mois	m NGF	%
Pithiviers	0.953	70.1	0.0	0.0	7.4	26.1	95.61	14.00

Tableau 1 - Calage hydrologique au pas de temps mensuel

Les graphiques de la figure 4 montrent que les niveaux mensuels sont bien reproduits sur les 10 années de 1973 à 1983 ; on note les valeurs suivantes.

	Observé	Calculé
Niveau minimal (m NGF)	96.95	97.18
Niveau moyen (m NGF)	98.09	98.09
Niveau maximal (m NGF)	99.75	99.47
Pluie annuelle (mm)		610
Pluie annuelle (mm)		610
Pluie efficace annuelle (mm)		151

4.4 - CALAGE AU PAS DE TEMPS ANNUEL

Etant donné la lenteur de réaction hydrodynamique de la nappe aux précipitations et de l'évolution des concentrations, on a tenté une simulation annuelle des niveaux. Une simulation annuelle des concentrations suffira alors pour modéliser l'évolution des concentrations en nitrates. Pour l'initialisation des réservoirs, on a

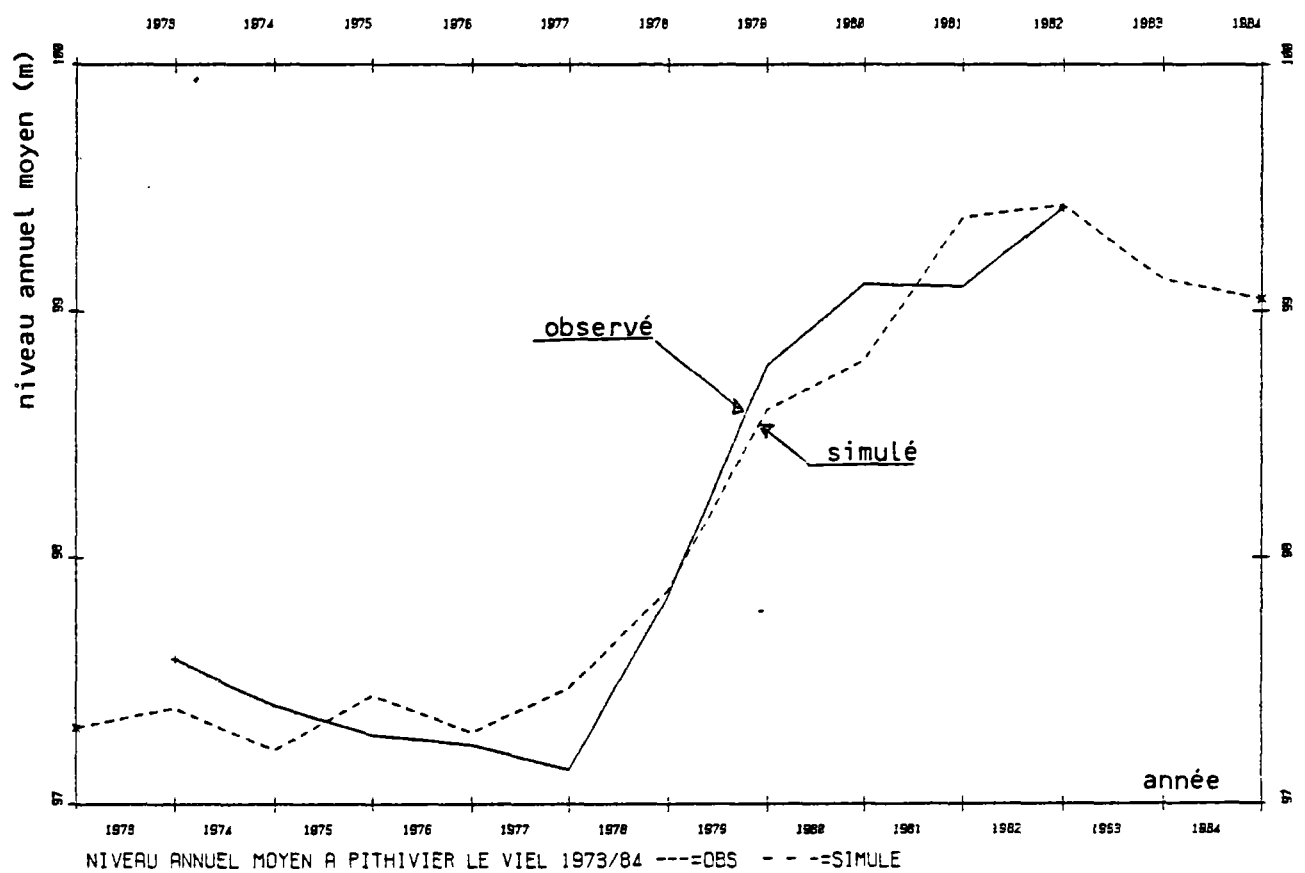
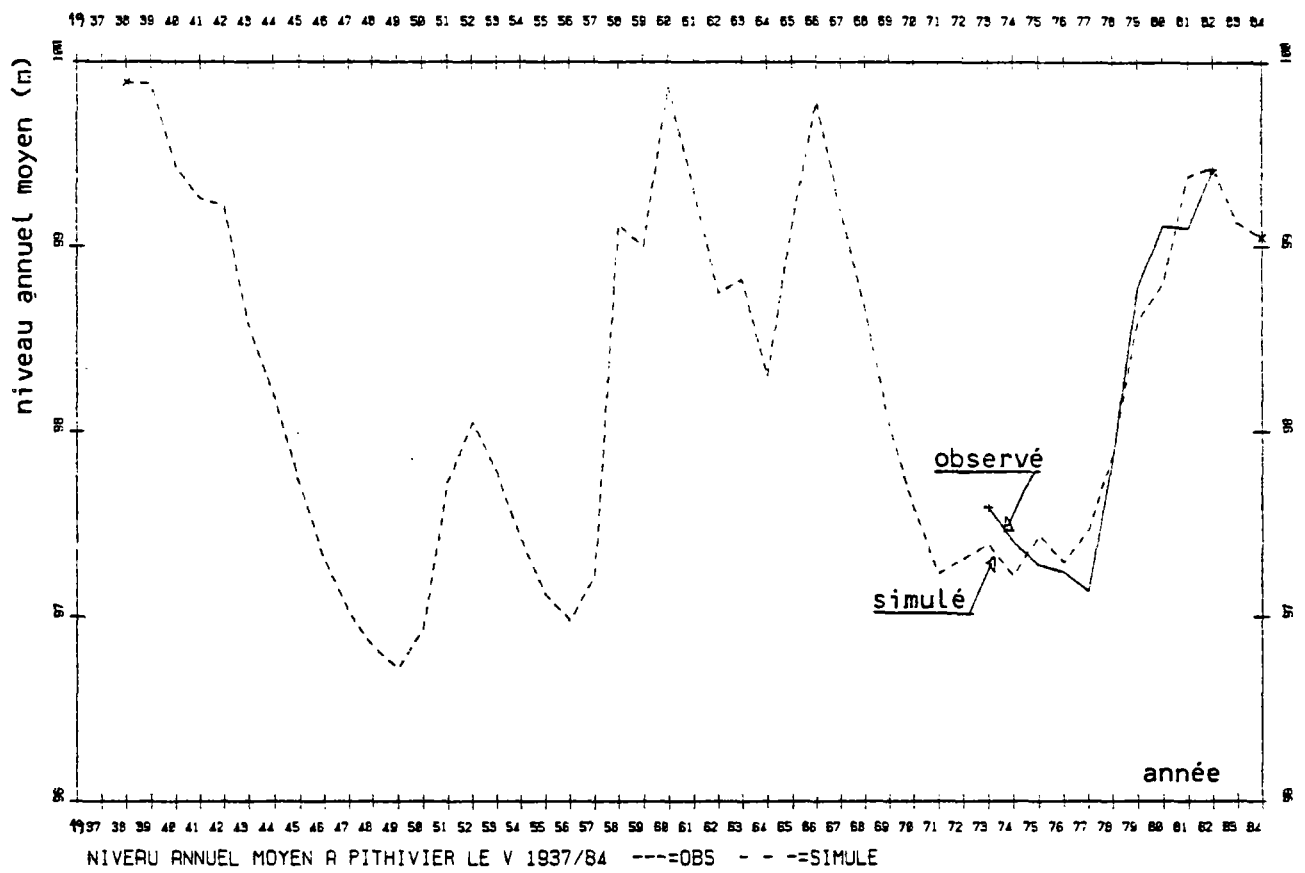


Figure 5 - Simulation au pas de temps annuel des variations de niveau annuel à Pithiviers-le-Viel, de 1973 à 1982

commencé les calculs en 1937, soit 40 ans avant le début des observations. Les données de pluies à Pithiviers avant 1967 qui ne sont pas connues ont été remplacées par celles d'Orléans (qui sont peu différentes au pas mensuel ou annuel).

Après ajustement, on a obtenu un jeu de paramètres un peu différent, car il est évident qu'un bilan annuel tend à sous-estimer les pluies efficaces. Les paramètres obtenus sont résumés dans le tableau 2.

	R	RUMAX	CPLU	CETP	THG	TG	GO	EMM
Unités	--	mm	%	%	mois	mois	m NGF	%
Pithiviers	0.972	21.0	+10.0	-11.6	11.9	13.2	96.55	14.00

Tableau 2 - Calage hydrologique au pas de temps annuel

Le graphique de la figure 5 montre que les niveaux moyens annuels sont reproduits correctement. Il est évident cependant que le calage est moins fiable qu'au pas de temps mensuel. Une analyse de sensibilité montrerait probablement que la valeur de la capacité de la réserve superficielle n'a ici que très peu d'influence et n'est pas déterminée avec beaucoup de précision.

Sur les 10 valeurs annuelles de 1973 à 1983, on note les valeurs suivantes :

	Observé	Calculé
Niveau minimal (m NGF)	97.14	97.22
Niveau moyen (m NGF)	98.09	98.09
Niveau maximal (m NGF)	99.42	99.43
Ecart-type (m)	0.86	0.83

La figure 6 compare les pluies efficaces annuelles de 1967 à 1984 calculées à Pithiviers, par les modélisations respectivement au pas de temps mensuel et au pas de temps annuel. Il apparaît que les résultats obtenus sont assez proches à cause des corrections introduites pour les calculs au pas annuel; cependant, en année déficitaire, les résultats obtenus au pas de temps annuels sont généralement plus faibles. En fait, la comparaison sur la période 1937-1984 montre une valeur moyenne de 141 mm/an avec un pas de temps mensuel, et de 102 mm/an avec un pas de temps annuel, ce qui est assez différent.

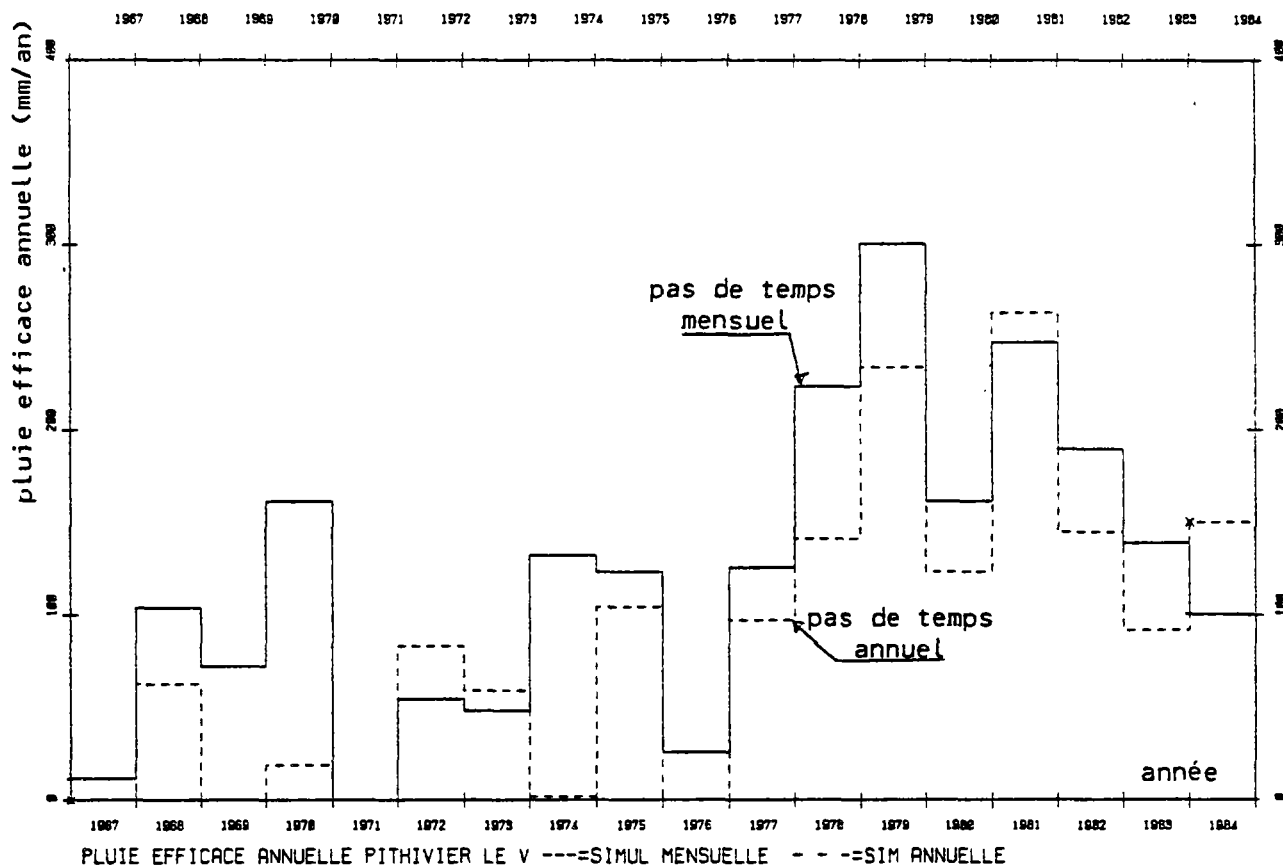


Figure 6 - Comparaison des pluies efficaces annuelles à Pithiviers, estimées avec un calcul au pas de temps mensuel et au pas de temps annuel

5 - MODELISATION CHIMIQUE

5.1 - METHODE ET MODELE UTILISE

On utilise le modèle BICHE. Ce modèle est un modèle à réservoirs (identique au modèle GARDENIA) dans lequel on effectue à chaque pas de temps un bilan des apports, des concentrations et des transferts en nitrates. Le fonctionnement du modèle BICHE est décrit dans la première partie de ce rapport.

Les données nécessaires au fonctionnement du modèle sont de deux types : données climatiques et données agricoles.

Les données climatiques sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle qui sont utilisées pour les calculs hydrologiques.

5.2 - LES DONNEES AGRICOLES

Les données agricoles 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 une certaine quantité de nitrates qui était fixée auparavant (selon la nature des débris végétaux, 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 du Loiret ; elles ont été extraites :

- des deux derniers recensements généraux de l'Agriculture (RGA 1970-1971 et RGA 1980-1981) pour l'occupation du sol dans la région où sont situés les piézomètres d'observation ;
- des résultats d'une enquête relative aux doses moyennes d'unités fertilisantes à l'hectare appliquées sur les grands types de cultures selon les régions agricoles du département.

Les valeurs d'épandages introduites dans le modèle correspondent à une moyenne des doses d'engrais azotés par culture, pondérée par les taux d'occupation du sol pour les cultures recensées.

Les valeurs de consommation ont été établies à partir du taux moyen d'azote des cultures multipliées 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, teneur en eau, taux de calcaire et d'argile...) 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.

	Azote N (kg/ha/an)	soit l'équivalent en Azote nitrique NO_3^- ($\text{NO}_3^- = 4.4\text{N}$) (kg/ha/an)
Epandage	100 avant 1970	440
	125 de 1970 à 1974	550
	150 de 1975 à 1984	660
Besoins des cultures	190 de 1975 à 1984 mal connu avant 1975	836 à partir de 1975
Minéralisation de la matière organique stable	50 de 1970 à 1984	220
Restitution des cultures (automne)	20 de 1970 à 1984	88

- De 1975 à 1984

Un calcul élémentaire en supposant une consommation égale aux besoins donnerait les valeurs suivantes exprimées en azote nitrique NO_3^- :

- apport total	$660 + 220 + 88 = 968 \text{ kg/ha/an}$
- consommation	836 kg/ha/an
- soit un excédent de	132 kg/ha/an
(soit 30 kg N/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 kg/m^3

Si on utilise les unités suivantes :

EX en kg/ha/an
 PE en mm/an
 C_e en mg/l

on a la relation :

$$C_e = 100 \cdot EX / PE$$

Pour une pluie efficace de 140 mm/an, on obtiendrait donc à l'équilibre une concentration dans la nappe de l'ordre de :

$$100 \times 132 / 140 = 94 \text{ mg/l}$$

ou même 132 mg/l pour une pluie efficace moyenne de 100 mm/an, ce qui paraît a priori beaucoup trop élevé compte-tenu des observations réalisées de 1976 à 1984. On a donc diminué les valeurs de minéralisation de la matière organique et les restitutions des cultures qui sont les données les moins bien connues :

- la minéralisation a été fixée à 170 kg/an/ha,
- la restitution des cultures a été fixée à : 60 kg/an/ha.

Il convient de remarquer que cette diminution est peut-être rendue nécessaire par une sous-estimation des pluies efficaces qui ne sont pas parfaitement déterminées surtout avec des calculs au pas annuel.

La valeur initiale (avant ajustement du modèle) de l'excédent est donc de 60 kg/ha/an de nitrates.

- Avant 1970

La somme des apports estimés correspond à :

$$440 + 170 + 66 = 676 \text{ kg/ha/an}$$

soit très inférieure à la consommation de la période 1975 / 1984 (fixée à 836 kg/ha/an). En fait, la consommation est mal connue. Etant donné que la concentration d'équilibre avant 1970 ne doit pas dépasser 10 ou 15 mg/l, on a fixé l'excédent à 15 kg/ha/an, soit des consommations de 661 kg/ha/an de 1961 à 1969.

- Avant 1961

Les épandages avaient été estimés à 220 kg/ha/an, soit une somme des apports de :

$$220 + 170 + 66 = 456 \text{ kg/ha/an}$$

Les consommations ont donc été fixées à 441 kg/ha/an, pour avoir également un excédent de 15 kg/ha/an.

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 fonctionnement et la définition des paramètres sont détaillés la première partie de ce rapport.

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 | G1FIX |

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 | TEG1 |

- Divers :

- | | |
|--|--------|
| . concentration maximale de la pluie lors de la dissolution de l'engrais solide réparti à la surface du sol, | CONMAX |
| . temps de demi-libération des nitrates par les résidus culturaux 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

Pour chacun des deux sites, on ajuste 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 faibles permettent un calage beaucoup plus fiable).

Les concentrations en nitrates ne sont pas connues avant 1975 ou 1976, on a donc fait l'hypothèse d'une concentration initiale égale à 15 mg/l en 1937, soit 40 ans avant les premières mesures.

Le calage a été réalisé au pas de temps annuel avec les paramètres hydrologiques déterminés par le calage hydrologique. Les calculs ont commencé en 1937.

a - Apports et besoins

	Correction en %	Nitrates Valeur annuelle en kg/ha/an			
		1937-1960	1961-1969	1970-1974	1975-1984
Epandage	+ 2,0	224	449	561	673
Minéralisation	0,0	170	170	170	170
Résidus automnaux	--	66	66	66	66
Besoins	- 0,9	437	655	719	828
Excédent	--	23	30	78	81

En moyenne, sur la période 1937-1984, on obtient (en mm/an) :

Pluie (corrigée)	653
Evapotranspiration réelle	551
Pluie efficace	102

b - Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange

Réservoirs	Volume d'eau retenue	Temps de demi-échange
Superficiel	519 mm	5,3 mois
Intermédiaire	1268 mm	5,5 mois
Souterrain	838 mm	instantané

c - Paramètres divers

Concentration maximale pour la dissolution par la pluie	non limitée (non optimisée)
Temps de demi-libération par les racines	instantané (non optimisé)

d - Caractéristiques de l'ajustement

Le coefficient d'ajustement est égal à 0,964 et l'ajustement est satisfaisant comme le montre la figure 7.

On observe également les caractéristiques suivantes (en mg/l) sur 10 années observées (valeurs annuelles) :

	Observée	Calculée
Concentration minimale	27,5	29,4
Concentration moyenne	37,8	38,0
Concentration maximale	48,9	45,8
Ecart-type de la concentration	6,5	5,7

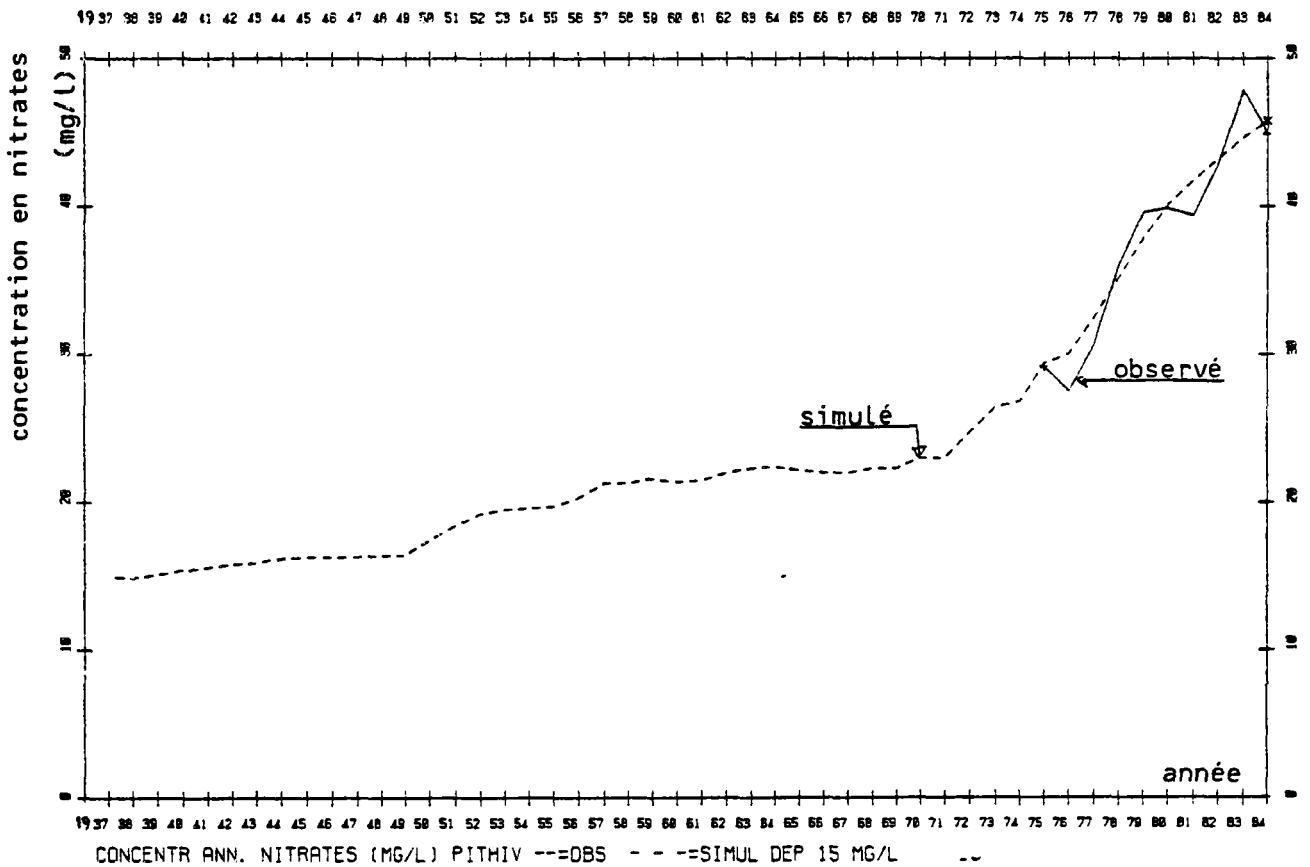
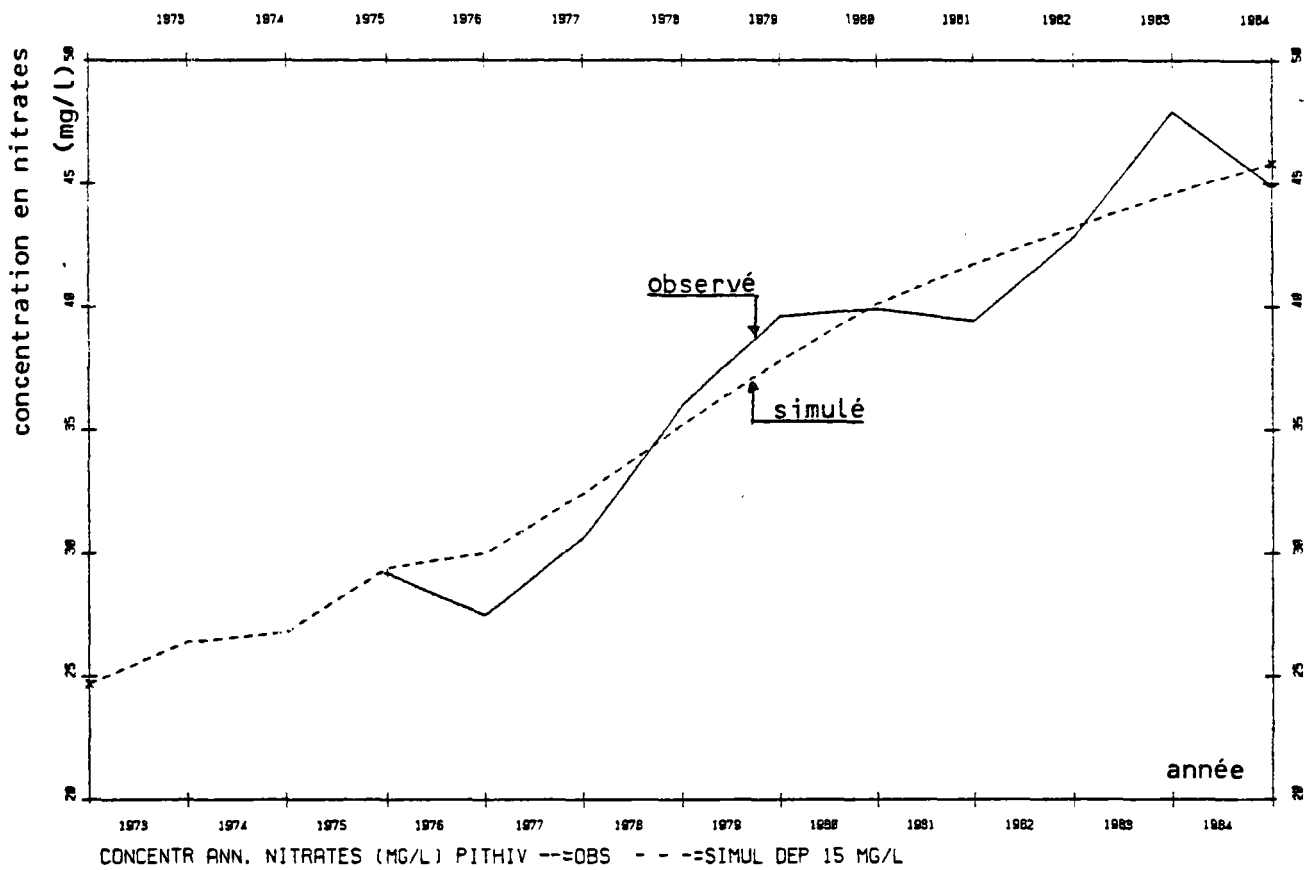


Figure 7 - Simulation de la concentration en nitrates à Pithiviers
de 1937 à 1984

Les figures 8 et 9 présentent la décomposition du fonctionnement du modèle de 1973 à 1984, et de 1937 à 1984. Il apparaît nettement que le flux de nitrates sortant reproduit (en les lissant) les variations de pluies efficaces annuelles (exemple 1950-1954, 1957-1961, 1965-1968).

A partir de 1970, l'excédent de nitrates augmente, mais comme il y a peu de pluies efficaces, il se produit un stockage dans les réservoirs superficiels et intermédiaires. Le flux sortant est donc faible.

A partir de 1977, les pluies efficaces sont plus abondantes, et on observe une augmentation de la concentration et aussi du flux sortant.

La figure 9 montre également que la période d'observation est relativement courte devant l'inertie du phénomène.

5.5 - 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.

On a choisi comme scénario des épandages et des besoins inchangés, pendant 48 ans suivant 1984. Les pluies de cette période ne sont bien entendu pas connues. On a donc supposé pour le calcul qu'après 1984 on retrouvait les 48 ans de la séquence observée de 1937-1984.

La figure 10 montre le bilan obtenu. On voit apparaître d'abord une quasi-stabilisation de 0 à + 13 ans, car pendant cette période les pluies efficaces sont faibles ; il y a donc stockage dans le réservoir superficiel. La concentration augmente alors à la suite de 3 années plus humides qui entraînent les nitrates stockés. Vers + 30 ans, on voit apparaître une légère décroissance des concentrations, car les pluies sont abondantes et correspondent à un apport d'eau claire.

Au cours des années + 40 à + 48, on voit à nouveau une augmentation, puis une diminution des concentrations qui sont alors pratiquement stabilisées. La valeur à l'équilibre est de l'ordre de 80 mg/l, ce qui correspond bien à un excédent de

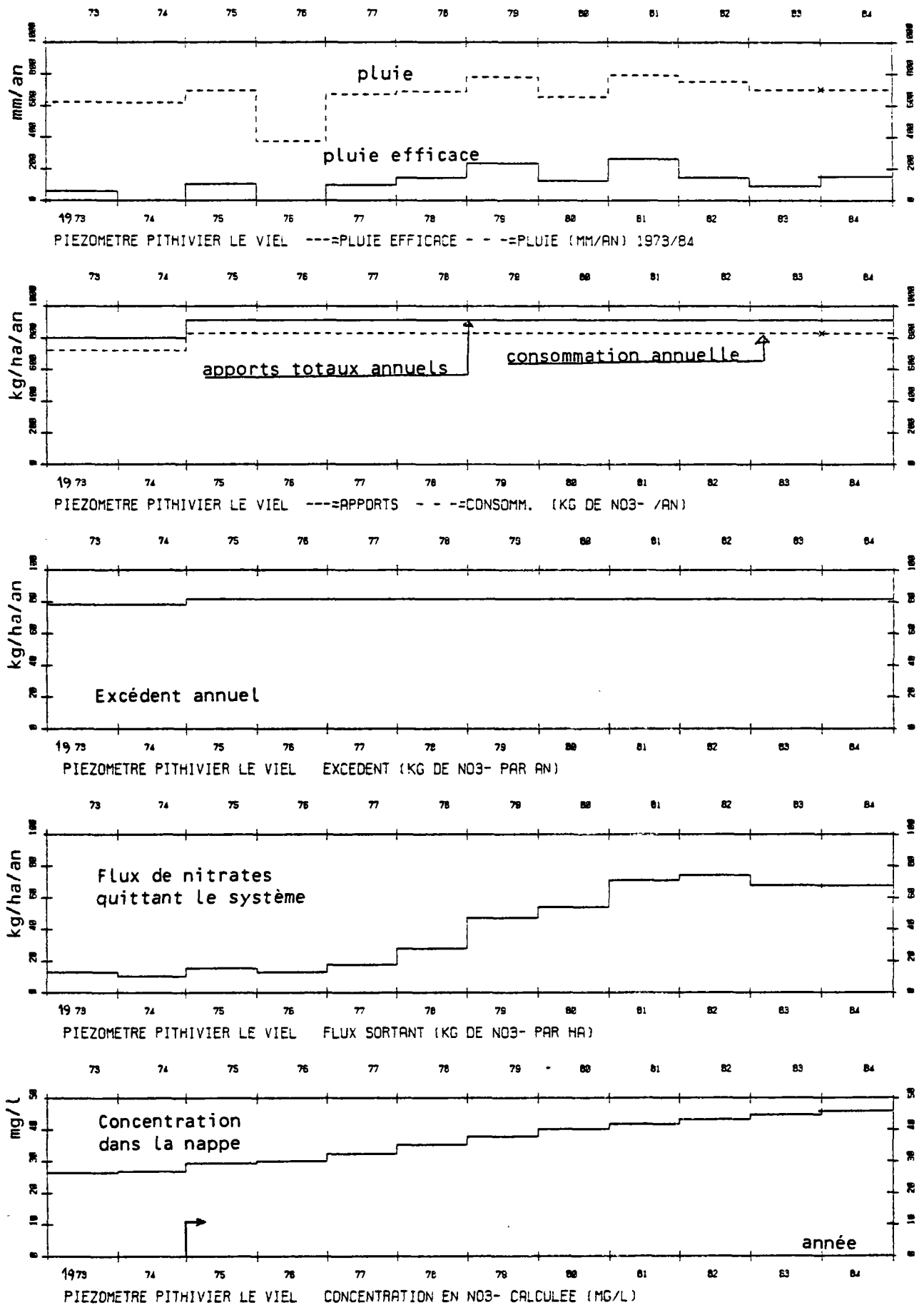


Figure 8 - Bilan annuel de 1973 à 1984 à Pithiviers, en kg NO₃/an/ha

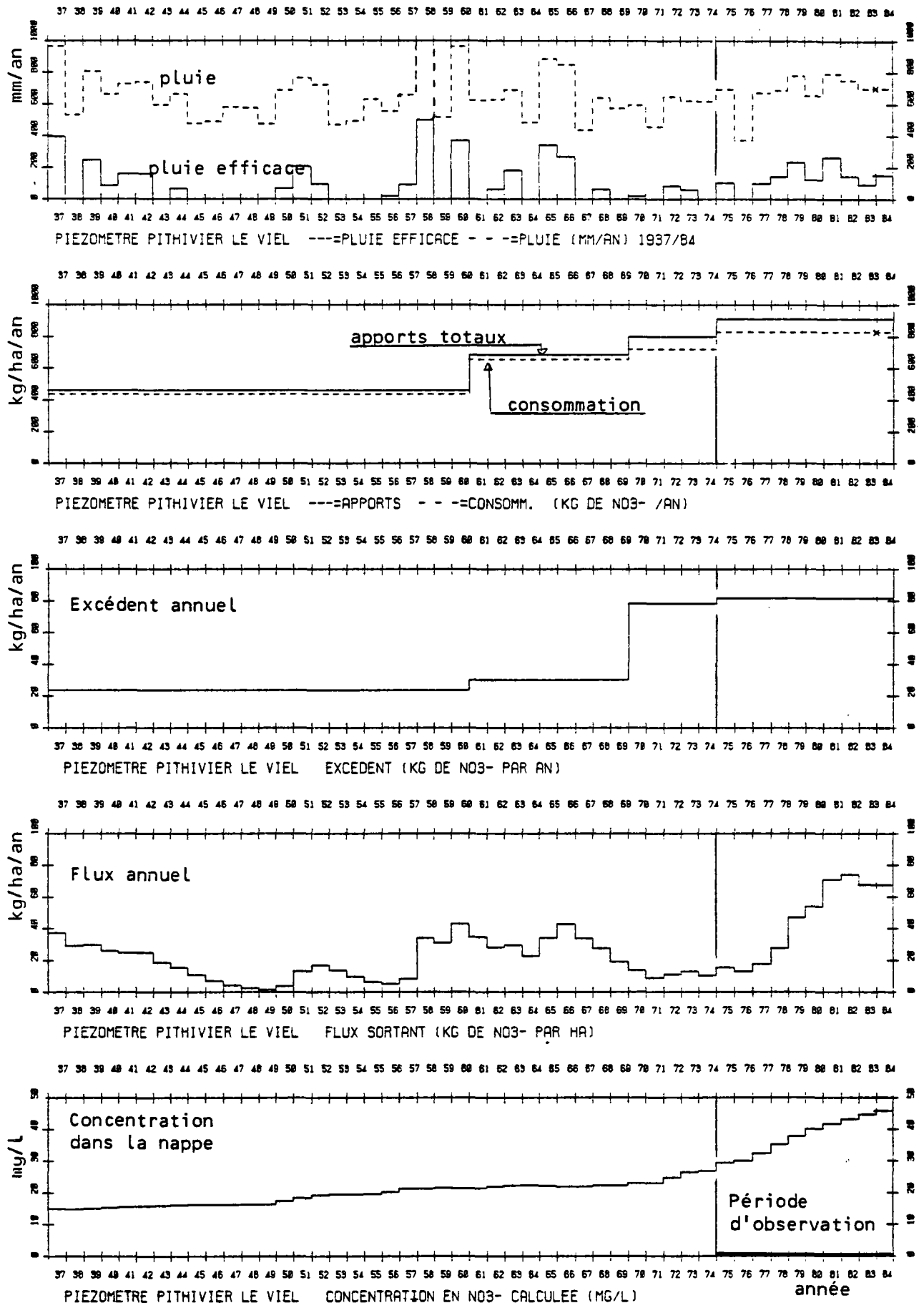


Figure 9 - Bilan annuel de 1937 à 1984 à Pithiviers, en kg NO₃/an/ha

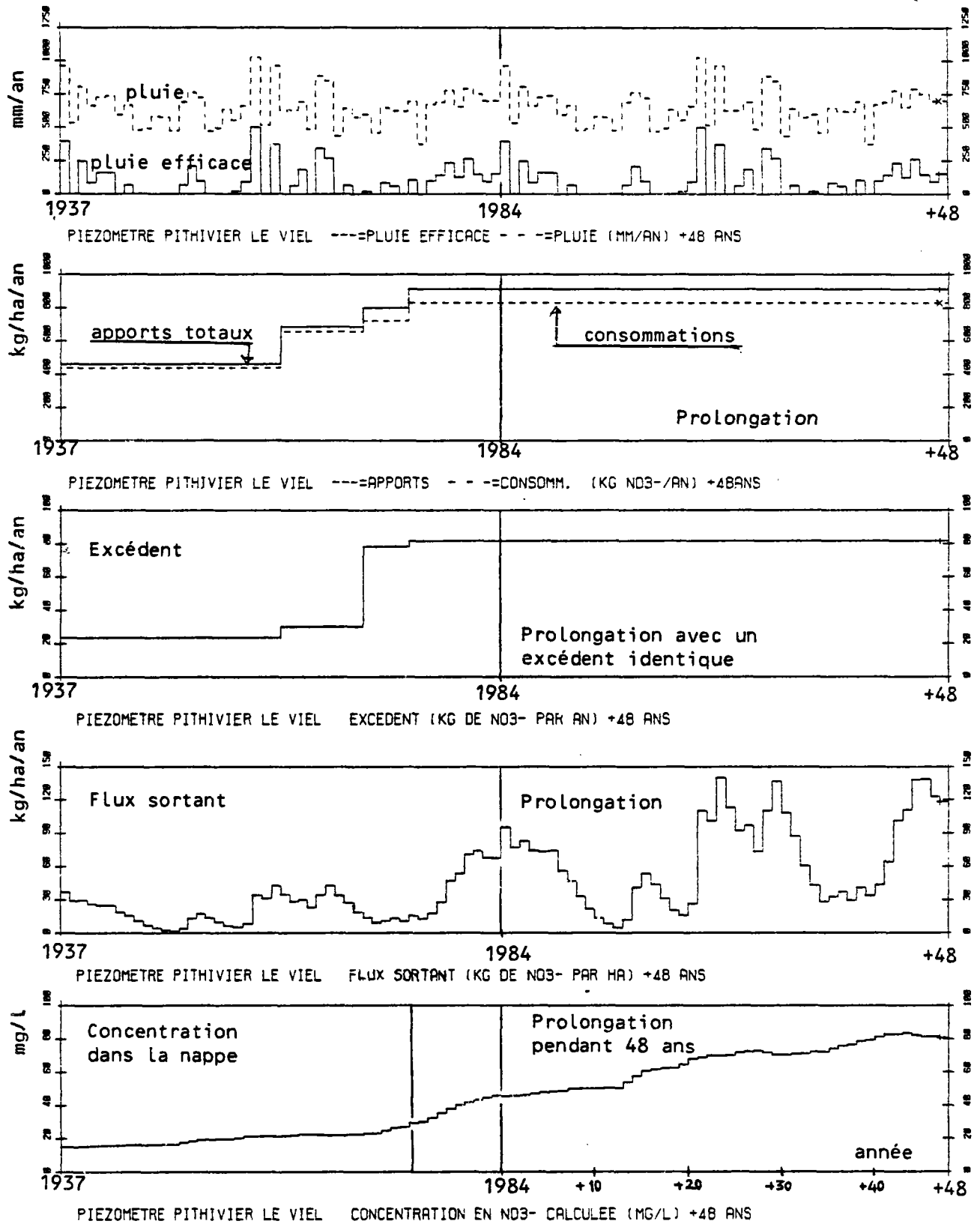


Figure 10 - Bilan annuel à Pithiviers avec prolongation pendant 48 ans, avec le même excédent de nitrates, et les pluies de 1937 à 1984

81 kg/an/ha, pour une pluie efficace égale en moyenne à 102 mm/an (obtenue au pas annuel).

La figure 11 montre le détail de l'évolution des concentrations calculées. Cette figure fait apparaître la durée des observations : 1975-1984, soit 10 ans, ce qui reste très court devant l'inertie du système.

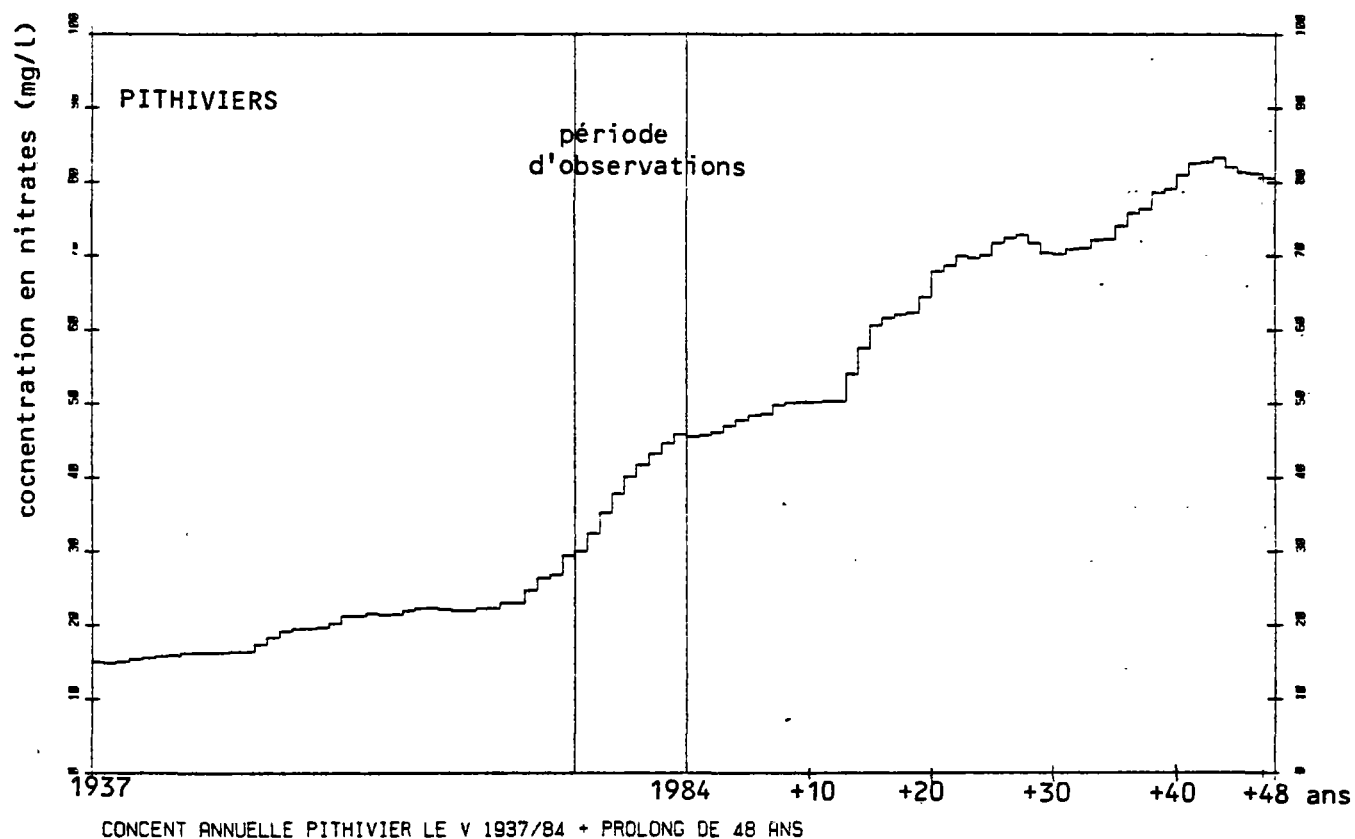


Figure 11 - Simulation à Pithiviers d'un prolongement de l'état actuel pendant 48 ans

CONCLUSION

Cette application a montré comment il était possible d'utiliser un modèle global de simulation des transferts de nitrates (le modèle BICHE), pour reproduire des historiques de concentrations mesurés dans l'eau prélevée dans un forage AEP. 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 niveaux observés dans un piézomètre voisin, et le calage chimique sur les concentrations mesurées.

Après calage, on a estimé avec le modèle l'évolution probable des concentrations, en supposant que les pluies des 50 prochaines années seront identiques aux pluies des 50 dernières années et en supposant des cultures et des fertilisations identiques à celles de la période 1974-1984. Ces calculs ont montré que les concentrations pourraient augmenter jusqu'à 80 mg/l de nitrates.

Le calage hydrologique a été réalisé au pas de temps mensuel, mais les simulations chimiques au pas de temps annuel. Une simulation au pas de temps mensuelle quoique plus délicate, et plus coûteuse, pourrait être envisagée et permettrait d'obtenir des résultats plus précis en particulier car elle permettrait un meilleur calcul de la pluie efficace.

* *

*

