



SECRETARIAT D'ÉTAT  
CHARGÉ DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE LA PRÉVENTION  
DES RISQUES TECHNOLOGIQUES  
ET NATURELS MAJEURS  
DIRECTION DE L'EAU ET DE LA PRÉVENTION  
DES POLLUTIONS ET DES RISQUES

# modélisation des transferts de nitrates dans un bassin versant

validation du modèle Biche et analyse de sensibilité

---

D. Thiery

août 1990  
R 30 976

## RÉSUMÉ

Les travaux décrits dans ce rapport ont deux objectifs : d'une part, la validation du modèle BICHE de transferts de nitrates dans un bassin versant, et d'autre part l'adaptation à ce modèle d'une méthode de calcul de l'intervalle de confiance des résultats obtenus. La validation du modèle a consisté à l'appliquer à 4 nouveaux sites :

- le bassin de KARUP à HOEGILD mill (Danemark)
- le bassin de FEUTEUN VEUR (Bretagne)
- le bassin de GARBSEN (Allemagne)
- le bassin de NOVA BES (Tchécoslovaquie)

Les résultats obtenus sur ces 4 bassins sont satisfaisants. Ils montrent en particulier que la concentration en nitrates du bassin de KARUP pourrait passer, à long terme, de 10 mg/l actuellement à plus de 100 mg/l. Sur le bassin de FEUNTEUN VEUR, le modèle explique correctement l'augmentation de concentration de 60 mg/l il y a 15 ans à près de 100 mg/l actuellement, avec un flux souterrain de 280 kg/ha/an. Sur le bassin de GARBSEN, le modèle a permis de très bien expliquer les variations de teneurs en sulfates obtenues par dénitrification en présence de fer.

La méthode de calcul des intervalles de confiance a été appliquée sur les données suivantes :

- piezomètre Tilloloy : niveaux
- sources de la Voulzie
- bassin du GARBSEN

La vérification pratique de la méthode a été réalisée sur les niveaux du piezomètre Tilloloy par génération de 30 séries à partir de la série observée, affectées d'écarts (autocorrélés) ayant la même structure que l'écart de simulation. Les écarts types des 30 jeux de paramètres, les coefficients d'intercorrélation ainsi que les intervalles de confiance sont très semblables à ceux prévus par la méthode théorique. On montre sur cet exemple ainsi que sur celui du GARBSEN que la réduction du nombre de paramètres à déterminer par calage permet de diminuer énormément l'incertitude sur la recharge de la nappe. L'application aux sources de la Voulzie montrent également que les extrapolations de concentrations en nitrates ne sont fiables que si le nombre de paramètres est très réduit.

# TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION	1
1 - CONTRÔLE ET AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE	3
1.1 - VÉRIFICATION SUR DES DONNÉES AUTOCORRÉLÉE	3
1.2 - RÉSULTATS OBTENUS ET AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE	5
2 - PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT DU MODÈLE BICHE	7
2.1 - MODELISATION HYDROLOGIQUE	7
2.2 - MODELISATION CHIMIQUE	10
3 - APPLICATION DU MODÈLE BICHE AU BASSIN DE HOEGILD MILL	13
3.1 - SITUATION DU BASSIN ÉTUDIÉ	13
3.2 - DONNÉES HYDROCLIMATIQUES DISPONIBLES	13
3.3 - CALAGE HYDROLOGIQUE PLUIE-DÉBIT	14
3.4 - CALAGE DES TRANSFERTS DE NITRATES	16
3.5 - CONCLUSIONS	17
4 - APPLICATION DU MODÈLE BICHE AU CAPTAGE DE FEUTEUN-VEUR EN PLOUVORN	18
4.1 - LES DONNÉES DISPONIBLES	18
4.1.1 - Données hydrogéologiques	18
4.1.2 - Données hydroagricoles	19
4.2 - MODÉLISATION HYDROLOGIQUE	19
4.2.1 - Calage sur les niveaux piezométriques mensuels de la nappe	19
4.2.2 - Simulation des débits mensuels du captage de FEUNTEUN-VEUR	20
4.2.3 - Conclusion	21
4.3- MODÉLISATION CHIMIQUE	21
4.3.1 - Calage au pas de temps mensuel des variations des teneurs en nitrate de la nappe	22
4.3.2 - Résultats et analyse des simulations	22
4.4 - REPRISE DU CALAGE SUR LA PÉRIODE 1976-1986	23
4.5 - CONCLUSIONS	25

5 - APPLICATION AU PIEZOMÈTRE TILLOLOY - VÉRIFICATION DU CALCUL DES ÉCARTS TYPES ET DES INTERVALLES DE CONFIANCE DES NIVEAUX ET DE LA RECHARGE	27
5.1 - AJUSTEMENT DU MODÈLE	27
5.2 - ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES INCERTITUDES SUR LA RECHARGE	27
5.3 - CALCUL DES DÉRIVÉES ET ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DES PARAMÈTRES	28
5.4 - APPLICATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL AUTOMATIQUE DE L'ÉCART TYPE	28
5.5 - VALIDATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL	32
5.5.1 - Principe de la validation	32
5.5.2 - Contrôle des écarts types des paramètres	33
5.5.3 - Contrôle des écarts types de simulation	33
5.6 - INFLUENCE DU NOMBRE DE PARAMÈTRES DU MODÈLE	36
5.7 - ESSAI D'INTERPRÉTATION DES RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES	37
6 - APPLICATION AU BASSIN DES SOURCES DE LA VOULZIE	38
6.1 - MODÉLISATION HYDROLOGIQUE	40
6.2 - MODÉLISATION CHIMIQUE	41
6.3 - ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU MODÈLE	45
6.4 - CALCUL DES DÉRIVÉES ET ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES	46
6.5 - CALCUL DES ÉCARTS TYPES DES PARAMÈTRES AVEC 12 VARIABLES	54
6.6 - CALCUL DES ÉCARTS TYPES AVEC 3 VARIABLES	60
6.7 - CALCUL DES ÉCARTS TYPES DE SIMULATION	60
7 - APPLICATION AU BASSIN DU GARBSEN	64
7.1 - PÉRIODE D'OBSERVATION	64
7.2 - CALAGE HYDROLOGIQUE	64
7.3 - ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES DÉRIVÉES	67
7.4 - CALCUL DES ÉCARTS TYPES DES PARAMÈTRES	67
7.5 - CALCUL DE L'INTERVALLE DE CONFIANCE à 95 % SUR LA RECHARGE	70
7.6 - CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE DES NIVEAUX	71
7.7 - CALAGE DES PARAMÈTRES CHIMIQUES	73
8 - CONCLUSION GÉNÉRALE	76
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	77

## LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1.1 - Comparaison des intervalles de confiances à 95 % calculés et simulés par génération de nombres aléatoires	6
Figure 2.1 - Principe du modèle hydrologique GARDENIA pour la simulation des niveaux piézométriques	9
Figure 2.2 - Schéma du modèle BICHE	11
Figure 3.1 - Simulation des débits à la station de HOEGILD HILL	15
Figure 3.2 - Simulation des concentrations en nitrates à la station de HOEGILD HILL	15
Figure 4.1 - Captage de FEUNTEUN VEUR - Calage hydrologique - Modélisation du débit total au captage	24
Figure 4.2 - Simulation des concentrations en nitrates - Calage obtenu en 1988 sur 3 années d'observations	26
Figure 4.3 - Simulation des concentrations en nitrates - Calage obtenu en 1989 sur 11 années d'observations	26
Figure 5.1 - Variation de la recharge annuelle en fonction des paramètres RSUP et CETP	29
Figure 5.2 - Variation du coefficient de corrélation en fonction des paramètres RSUP et CETP	29
Figure 5.3 - Piézomètre TILLOLOY - Niveaux observés et simulés	30
Figure 5.4 - Piézomètre Tilloloy : dérivées	30
Figure 5.5 - Piézomètre TILLOLOY - Dérivées	31
Figure 5.6 - Comparaison entre les valeurs prévues et observées des 15 coefficients de corrélation entre paramètres	34
Figure 5.7 - Couples de paramètres RSUP, CETP obtenus pour les 30 calages	34
Figure 5.8 - TILLOLOY - Ecart-type de simulation	35
Figure 5.9 - Niveaux résultants des 30 calages sur le piézomètre TILLOLOY	35
Figure 5.10 - TILLOLOY - Intervalles de confiance à 95 % des niveaux simulés	35
Figure 6.1 - Situation des trois principaux groupes de sources du bassin de Provins : Dragon, Durteint et Voulzie	38

Figure 6.2 - Sources de Provins : simulation des débits (extrapolation 1984, 1985 et 1986)	41
Figure 6.3 - Sources de la Voulzie - Simulation des concentrations en nitrates - Calage 12 paramètres chimiques	44
Figure 6.4 - Sources de la Voulzie - Simulation des concentrations en nitrates - Calage 3 paramètres chimiques	44
Figures 6.5 et 6.6 - Sources de la Voulzie - Décomposition du bilan annuel	47 à 48
Figures 6.7 à 6.11 - Sources de la Voulzie - Dérivées par rapport aux paramètres	49 à 53
Figure 6.12 - Coefficients de corrélation entre les influences des dérivées par rapport aux 12 paramètres	56
Figure 6.13 - Sources de la Voulzie - Analyse en composantes principales de l'influence des dérivées	57
Figure 6.14 - Sources de la Voulzie - Matrice de corrélation des paramètres (12 variables)	58
Figure 6.15 - Analyse en composantes principales de la matrice de corrélation des paramètres	59
Figure 6.16 - Sources de la Voulzie - Analyse de sensibilité - Influence des 3 paramètres MELRU, FIXRU et SATPL sur le coefficient d'ajustement	62
Figure 6.17 - Sources de la Voulzie - Calcul des intervalles de confiance des simulations avec 12 et avec 3 paramètres chimiques	63
Figure 6.18 - Sources de la Voulzie - Comparaison des simulations et des extensions obtenues avec 12 et avec 3 paramètres chimiques	63
Figure 7.1 - Bassin du GARBSEN - Simulation hydrologique sur les 2 piézomètres	66
Figures 7.2 et 7.3 - Bassin du GARBSEN - Dérivées des niveaux par rapport aux paramètres	68 et 69
Figure 7.4 - Bassin du GARBSEN - Intervalles de confiance des niveaux piézométriques calculés	72
Figure 7.5 - Bassin de GARBSEN - Simulation des concentrations en nitrates	75

## LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 1.1 - Vérification des écarts types	5
Tableau 6.1 - Paramètres hydrologiques	40
Coefficient de correction sur les apports et les consommations	41
Tableau 6.2 - Volume d'eau retenu et temps de demi-échange	42
Tableau 6.3 - Paramètres chimiques divers	42
Tableau 6.4 - Coefficient de correction sur les apports et les consommations calage optimal	42
Tableau 6.5 - Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange calage optimal	43
Tableau 6.6 - Paramètres chimiques divers calage optimal	43
Tableau 6.7 - Coefficient de correction sur les apports et les consommations calage 3 paramètres	43
Tableau 6.8 - Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange calage 3 paramètres	45
Tableau 6.9 - Paramètres chimiques divers calage 3 paramètres	45
Tableau 7.1 - Paramètres du calage hydrologique du bassin du GARBSEN	65
Tableau 7.4 - Ecarts types des paramètres des piezomètres du bassin du GARBSEN (avec correction d'ETP)	67
Tableau 7.5 - Ecarts types des paramètres des piezomètres du bassin du GARBSEN (sans correction d'ETP)	70
Tableau 7.6 - Ecarts types des paramètres du piezomètre n°2 du bassin de GARBSEN (sans correction d'ETP)	70
Tableau 7.7 - Calcul de l'intervalles de confiance à 95 % sur la recharge	71
Tableau 7.8 - Paramètres chimiques pour le bassin du GARBSEN	73
Tableau 7.9 - Bilan global moyen annuel	74

# INTRODUCTION

## VALIDATION DU MODÈLE BICHE

Depuis 1985, quelques applications ont été réalisées avec le modèle BICHE. Il s'agit principalement des sources de la Voulzie (Provins) et de la nappe de la Beauce près de Pithiviers. Ces modélisations sont décrites par D. THIERY et J.J. SEGUIN (1985 a, 1985b, 1985c, 1986 et 1988) et par J.J. SEGUIN (1988).

Au cours des années 1988 et 1989, il a paru intéressant de valider le modèle en l'appliquant à d'autres sites ; ces nouveaux sites sont :

- \* Le bassin de KARUP à HOEGILD MILL (Danemark).  
Les données de ce bassin ont été gracieusement fournies par la DGU (Danish Geological Survey) à l'occasion d'une coopération scientifique en particulier par le Dr Edmund GOSK. Cette modélisation est décrite en détail par J. MARTIN et D. THIERY (1988) (rapport BRGM 88 SGN 954 EEE) ; nous avons donné une description sommaire dans le chapitre 3 ;
- \* Le bassin de FEUNTEUN VEUR (Bretagne).  
Ce bassin a été modélisé au BRGM par L. PARANTHOINE et les résultats sont présentés en détail dans sa thèse (Paranthoine 1988). Nous avons résumé cette modélisation dans le chapitre 4 et nous avons repris et étendu le calage sur une période de 11 ans au lieu de 3 et obtenu un très bon calage (corrélation 0,95 au lieu de 0,71) ;
- \* Le bassin de GARBSEN (Allemagne Fédérale)  
La modélisation de ce bassin -situé dans la région de Hanovre - a été réalisée à Orléans dans le cadre d'une coopération scientifique avec l'Institut für Bodenkunde de l'université de Hanovre avec les Pr RICHTER et R. ANLAUF. Les résultats obtenus sont décrits succinctement au chapitre 7 et donneront lieu à une publication commune ;
- \* Le bassin de NOVA BES (Tchécoslovaquie)  
Cette modélisation a été réalisée dans le cadre d'une coopération scientifique avec STAVEBNI GEOLOGIE de Prague en particulier avec les Dr BENES et KOLAYA. Les premiers résultats obtenus par J. MARTIN, disponibles à la date de rédaction de ce rapport, sont décrits dans un rapport à paraître en 1990.

## ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES DES MODÈLES

En 1989 une méthode permettant de calculer les écarts types des paramètres d'un modèle de simulation et les intervalles de confiance de prévisions a été décrite en détail dans le rapport n° R30092 EAU 4S 89 "Ajustement automatique d'un modèle n'ayant pas d'expression analytique-calcul de l'intervalle de confiance des paramètres et des prévisions". Cette méthode inspirée de LEIJNSE (1982) peut s'appliquer à tout modèle et en particulier à des modèles hydrologiques ou hydrochimiques globaux.

En 1990, cette méthode a été programmée en FORTRAN et a donné le jour aux deux logiciels généraux ECARPARA et ECARTYPE qui ont été couplés au modèle BICHE. La méthode a été améliorée pour prendre en compte efficacement l'autocorrélation des observations successives. Elle a été appliquée dans les bassins suivants :

- Bassin de la VOULZIE,
- Bassin du GARBSEN,
- piézomètre de TILLOLOY en Picardie.

Les résultats de ces applications sont présentés pour mettre en évidence l'intérêt de la méthode.

La recherche décrite dans ce rapport a été réalisée en partie sur crédit du Secrétariat d'État chargé de l'Environnement et de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs et sur les fonds propres du BRGM dans le cadre du thème "Approches géostatistique en hydrogéologie et analyse de sensibilité des modèles" fiche projet EG26 en 1989 et EG21 en 1990.

# 1 - CONTROLE ET AMELIORATION DE LA METHODE DE CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE

La méthode de calcul des écarts types des paramètres est décrite en détail dans le rapport BRGM RS 30 092 EAU4S 89 "Ajustement automatique d'un modèle n'ayant pas d'expression analytique - Calcul de l'intervalle de confiance des paramètres et des prévisions" par D. THIERY.

Cette méthode avait été vérifiée en 1989 dans le cas où les observations sont indépendantes, c'est-à-dire dans le cas où les écarts de simulation sont indépendants. Dans le cas général, les écarts ne sont pas indépendants puisqu'un modèle hydrologique présente généralement des séquences pendant lesquelles les débits (ou les niveaux ou les concentrations) sont systématiquement trop forts (ou trop faibles). Les écarts sont donc nettement autocorrélés et cela est dû : à des erreurs sur les entrées, à une autocorrélation sur les débits (ou niveaux ou concentrations) calculés et à un schéma de fonctionnement simplifié.

Dans ce cas, l'autocorrélation des écarts était prise en compte par l'intermédiaire d'un "nombre équivalent" d'observations indépendantes. Le "nombre équivalent" était calculé par BAYLEY et HAMMERSLEY (1946) en supposant que les écarts suivaient un processus autorégressif d'ordre 1.

## 1.1 - VÉRIFICATION SUR DES DONNÉES AUTOCORRÉLÉES

Dans un but de vérification, on a donc supposé un modèle linéaire à deux paramètres  $a$  et  $b$ .  
 $y = ax + b + e$   $e$  étant l'écart de simulation

On a fixé les valeurs suivantes :

	Moyenne $m$	Ecart-type $\Delta$
$x$	2	1
$y$	100	20
$r_{xy}$	0,60	

On a ainsi généré une série de 400 valeurs de  $x$  par tirage de nombres gaussiens aléatoires.

Compte tenu du coefficient de corrélation  $r_{xy} = 0,60$

$$(a = r_{xy} \cdot s_y / s_x ; b = m_y - a \cdot m_x ; s_e = s_y \sqrt{1 - r_{xy}^2})$$

on a :  $a = 12$  et  $b = 76$  et  $s_e = 16$  ( $s_e$  étant l'écart type de l'écart  $e$ )

On a alors généré 200 séries indépendantes de 400 valeurs de  $y$  chacune en appliquant l'équation

$$y = 12 \cdot x + 76 \cdot b + e$$

avec  $e = r.e_p + t.\sqrt{1-r^2} s_e$   
 $t$  = nombre gaussien aléatoire  
 $e_p$  = écart précédent  
 $r$  = coefficient d'autocorrélation entre les écarts

On suppose que les écarts suivent un processus autorégressif d'ordre 1.

Les calculs ont été réalisés successivement pour les valeurs suivantes de l'autocorrélation  $r$  :

$r = 0, 0.4, 0.7$  et  $0.95$

Pour chacune des 200 séries on peut calculer un couple de paramètres  $a$  et  $b$ . On peut ensuite déterminer, sur l'échantillon de 200 couples  $(a,b)$ , les écarts types  $s_a$  et  $s_b$  ainsi que le coefficient de corrélation  $r_{ab}$ .

On a alors appliqué la méthode théorique du calcul des écarts types en notant que les dérivées sont données par  $dy/da = x$  ;  $dy/db = 1$ .

Dans chaque cas, on a appliqué la méthode simplifiée avec le nombre d'observations équivalentes et la méthode complète qui fait intervenir la matrice de variance covariance des écarts. Les résultats obtenus sont donnés ci-dessous dans le tableau 1.1 avec les notations suivantes :

échant = résultats obtenus sur l'échantillon de 200 séries de 400 valeurs

compl = méthode théorique complète

equiv = méthode théorique avec nombre équivalent d'observations indépendantes.

**Tableau 1.1 Vérification des écarts types**

	$s_a$	$s_b$	$r_{ab}$	Nombre équivalent
Autocorrélation 0				
théorique	0.800	1.79	- 0.894	
échant	0.783	1.71	- 0.884	
compl	0.804	1.74	- 0.889	
équiv	0.804	1.74	- 0.889	400
Autocorrélation 0.40				
échant	0.780	1.90	- 0.760	
compl	0.806	1.97	- 0.787	
équiv	1.23	2.67	- 0.889	171
Autocorrélation 0.70				
échant	0.775	2.32	- 0.579	
compl	0.812	2.45	- 0.633	
équiv	1.91	4.14	- 0.889	71
Autocorrélation 0.95				
échant	0.846	4.98	- 0.311	
compl	0.807	5.07	- 0.283	
équiv	5.08	11.03	- 0.889	10

## 1.2 - RÉSULTATS OBTENUS

Il apparaît ainsi que la méthode de calcul complète permet d'obtenir des résultats corrects très proches des séries générées par nombres aléatoires alors que la méthode approchée utilisant le concept de "nombre d'observations indépendantes équivalent" ne donne pas de résultats satisfaisants dans cet exemple à 2 variables. D'autres comparaisons et amélioratio de la méthode sur des cas réels avec des modèles à plus de 2 variables ont cependant montré qu'on obtenait le plus souvent des résultats acceptables avec la méthode approchée.

En 1990, on a donc amélioré la méthode de calcul en faisant toujours l'hypothèse d'un processus autorégressif d'ordre 1 des écarts mais en abandonnant la notion de nombre équivalent d'observations indépendantes. On est alors conduit à des calculs plus complexes faisant intervenir la matrice de variance des écarts. Ces calculs sont plus longs en temps machine et demandent une capacité mémoire qui peut être sensiblement plus importante mais la méthode est exacte (compte tenu de l'hypothèse d'un processus autorégressif qui n'est pas contraignante).

La figure 1.1 montre la comparaison entre les intervalles de confiance à 95 % calculés avec la méthode complète pour une autocorrélation de 0.95 et les intervalles de confiance obtenus avec les 200 séries simulées. Les résultats sont absolument concordants et les différentes courbes sur le graphique sont quasi indiscernables.

Contrôle des intervalles de confiance 95% R (XY)=0.60 (RHO=0.95) EPAIS=THEOR

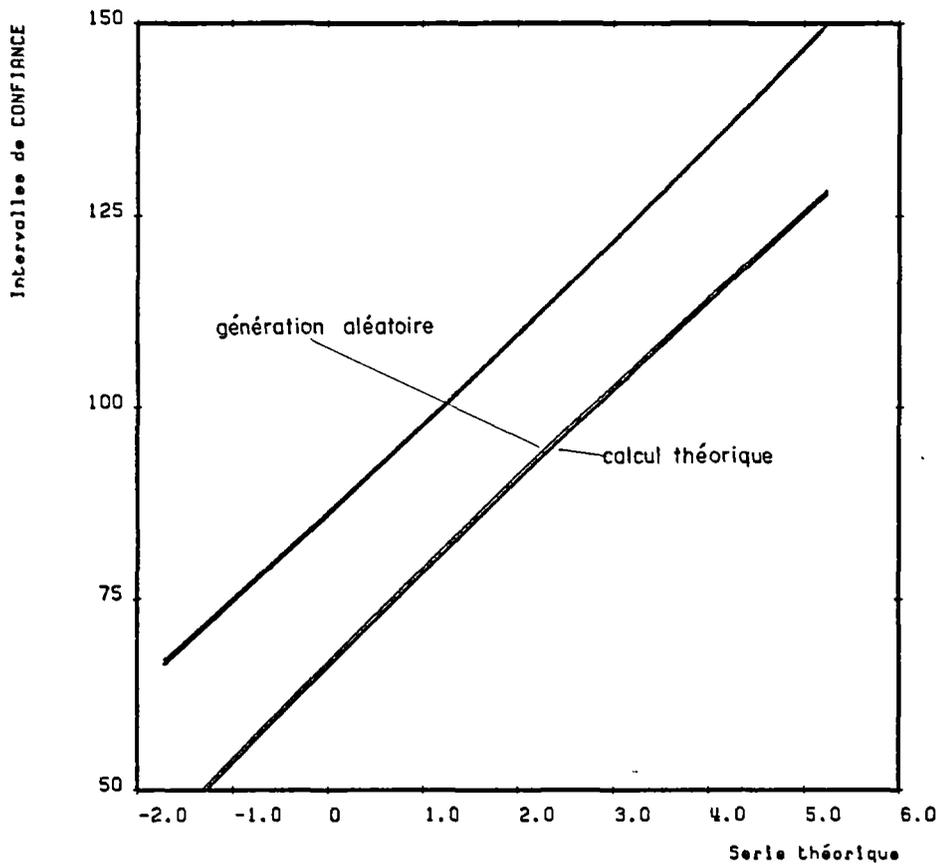


Figure 1.1 - Comparaison des intervalles de confiance à 95 % calculés et simulés par génération de nombres aléatoires

## 2 - PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT DU MODÈLE BICHE

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

### 2.1 - MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

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

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

(Voir figure 2.1)

Le premier réservoir U de capacité maximale RSUP simule la couche superficielle constituée de sol végétal. Il reçoit la pluie et est vidangé par l'évapotranspiration. Quand il est saturé, l'eau en excédent percole vers le second réservoir H qui représente la zone intermédiaire (zone non saturée). Ce second réservoir produit une composante rapide non linéaire à l'exutoire du bassin ainsi qu'une percolation vers le troisième réservoir G1. La proportion d'écoulement rapide est proportionnelle au niveau dans le réservoir H. Ce réservoir est contrôlé par deux paramètres THG, le temps de demi-percolation et RUIPER, le niveau H pour lequel l'infiltration et l'écoulement rapide sont égaux. Le troisième réservoir G1 simule la zone saturée de l'aquifère et produit l'écoulement souterrain avec un temps de demi-tarissement TG1. Quand c'est nécessaire, on peut choisir un schéma dans lequel le réservoir G1 peut produire une infiltration profonde avec un temps de demi-percolation TG12 vers un quatrième réservoir représentant une zone aquifère plus profonde à tarissement lent. Ce quatrième réservoir G2 a un temps de demi-tarissement TG2.

Quand on simule un niveau piézométrique, il ne doit y avoir qu'un seul réservoir souterrain G1, mais on peut considérer 2 écoulements dans le réservoir : un tarissement lent tout le temps et, en plus, un tarissement rapide quand la hauteur d'eau dans ce réservoir dépasse un seuil de remplissage SEUIL G.

Pour simuler les cas simples où on considère un ruissellement négligeable (à la sortie du réservoir H), il suffit de fixer RUIPER à une très grande valeur (10 000 mm par exemple).

Les paramètres du modèle sont les suivants :

- . RSUP (mm) : réserve superficielle maximale du réservoir U. C'est le déficit en eau maximal du sol.

- . THG (mois) : temps de demi-montée du réservoir G1. C'est le temps de "demi-percolation".
- . TG1 (mois) : temps de demi-tarissement du réservoir G1

Quand il y a du ruissellement superficiel, il faut ajouter :

- . RUIPER (mm) : hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation.

Quand on veut considérer une 2ème composante souterraine, il faut ajouter :

- . TG12 (mois) : temps de demi-montée du réservoir G2 (temps de demi-transfert de G1 à G2)
- . TG2 (mois) : temps de demi-tarissement du réservoir G2 (temps de demi-tarissement lent).

Dans le cas d'une simulation pluie-niveau, il faut en général rajouter :

- . EMMAG (%) : coefficient d'emménagement global équivalent (nappe libre)
- . NBASE (m) : niveau de base local

Quand les données d'entrées (pluies, évapotranspiration potentielle ETP) sont mal connues (gradient d'altitude, cultures diverses), on peut rajouter deux paramètres de corrections globales des données. Ce ne sont pas à proprement parler des paramètres :

- . CORPL (%) : coefficient de correction globale des pluies chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées.
- . CETP (%) : coefficient de correction globale de l'évapotranspiration potentielle, dont le but est similaire et tient compte également des facteurs cultureux.

On voit ainsi que le nombre de paramètres du modèle à ajuster varie généralement de 4 ou 5 à un maximum de 10. Classiquement, pour un modèle pluie-débit, il faut faire intervenir 4 paramètres (RSUP, THG, TG1 et RUIPER) et pour un modèle pluie-niveau 5 paramètres (RSUP, THG, TG1, EMMAG, NBASE) ou 6 si on rajoute RUIPER en cas de ruissellement non négligeable.

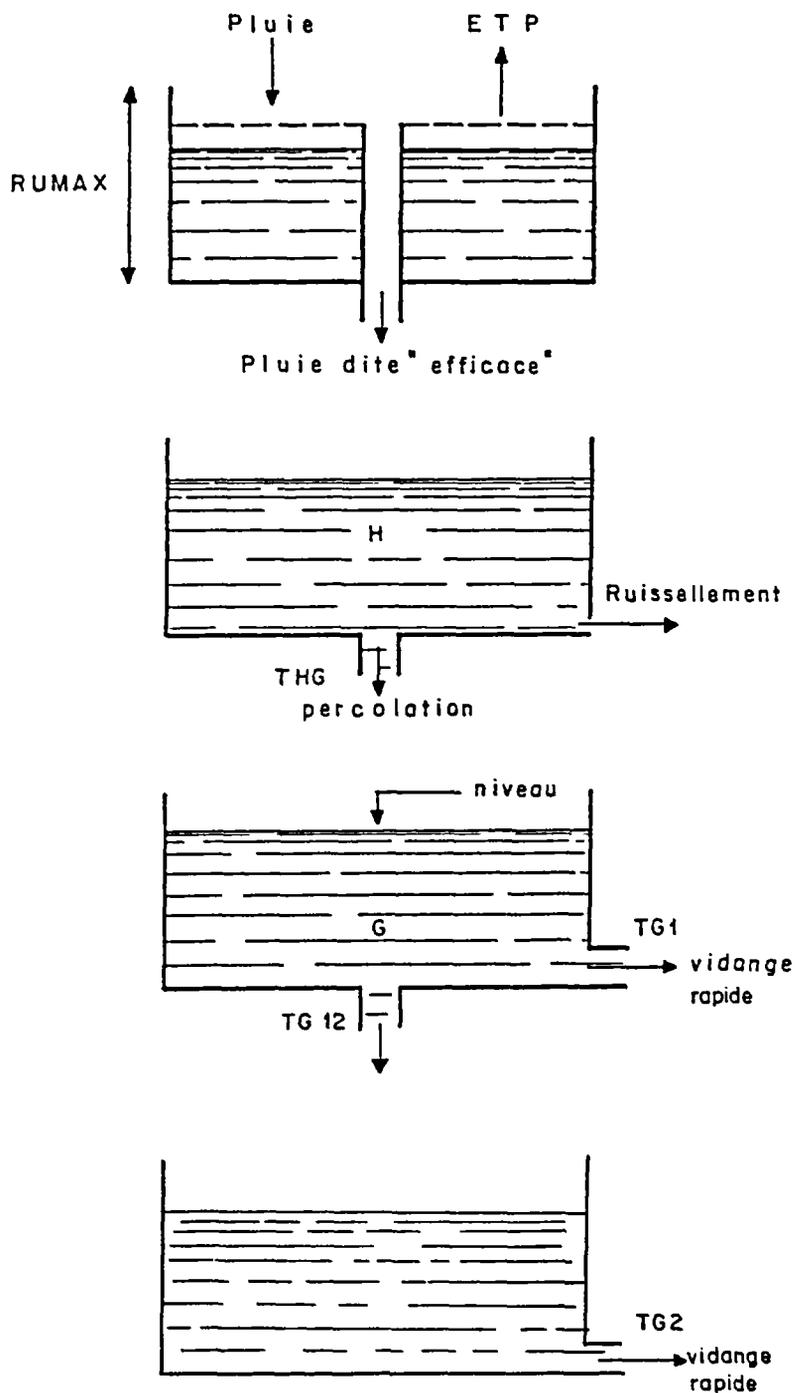


Figure 2.1 - Principe du modèle hydrologique GARDENIA pour la simulation des niveaux piézométriques

## 2.2 - MODÉLISATION CHIMIQUE

Les données chimiques servant d'entrée au modèle sont :

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

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

Comme pour la modélisation hydrologique, il faut ajuster simultanément :

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

Les entrées ne sont généralement pas connues précisément pour beaucoup de raisons :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$DILU = P.SATPL$$

Le schéma des transferts de masse dans le modèle BICHE est donné en figure 2.2.

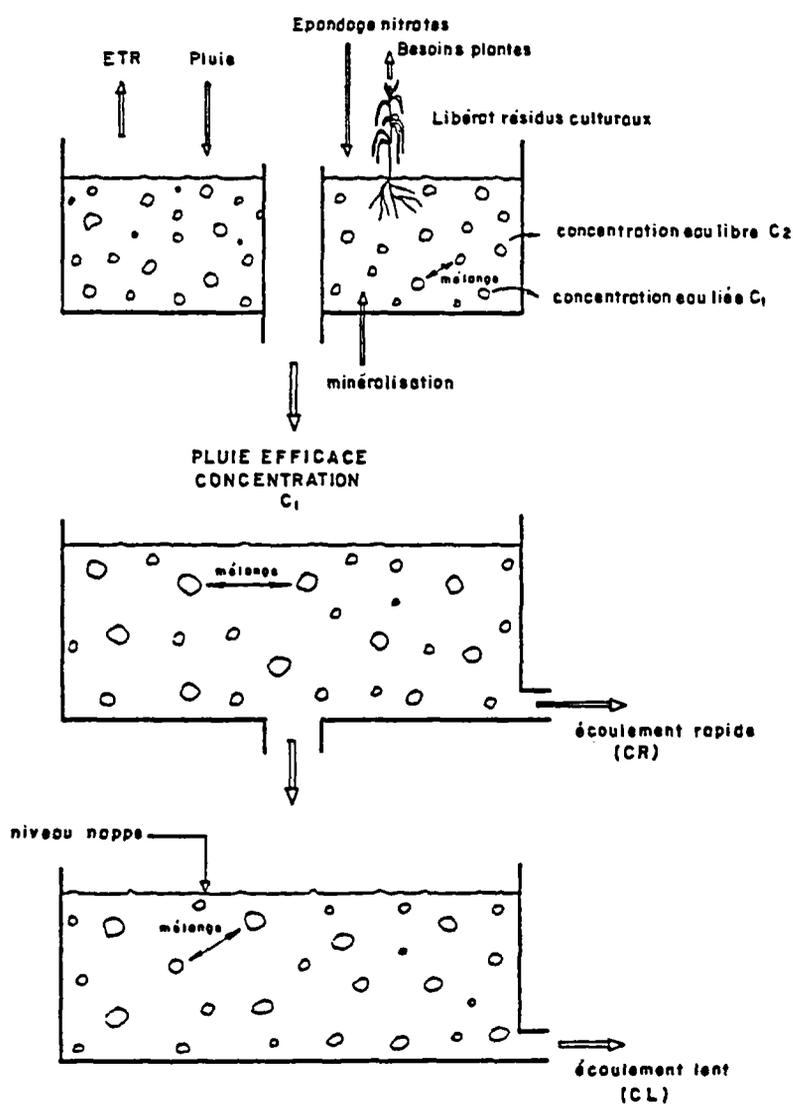


Figure 2.2 - Schéma du modèle BICHE

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

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

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

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

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

### **3 - APPLICATION DU MODÈLE BICHE AU BASSIN DE HOEGILD MILL**

Les résultats détaillés de cette application sont donnés dans le rapport 88SGN 954 EEE "Application du modèle BICHE à la simulation des transferts de nitrates à la station hydrométrique de HOEGILD MILL (Danemark)" par J. MARTIN et D. THIERY.

Nous en donnons ici un court résumé présentant les résultats principaux.

#### **3.1- SITUATION DU BASSIN ÉTUDIÉ**

La station hydrométrique de HOEGILD MILL est située dans le bassin de KARUP situé au centre du Danemark. Ce bassin situé dans une formation perméable présente un équipement hydroclimatologique complet avec :

- un réseau climatologique comportant 6 stations climatologiques et une dizaine de pluviomètres,
- un réseau hydrométrique avec 7 stations dont celle de HOEGILD MILL qui contrôle un ruisseau de 3 km de long drainant une nappe phréatique,
- un réseau piézométrique dense permettant de suivre les variations de la nappe phréatique qui s'étend en dehors du bassin de KARUP.

La qualité chimique des eaux des rivières et de la nappe est suivie en une vingtaine de points et en particulier à la station de HOEGILD MILL. Les données nécessaires au calage du modèle BICHE sont disponibles au pas de temps mensuel pour la période 1966-1976 en ce qui concerne les données hydroclimatologiques et les données agricoles. Ces dernières sont constantes sur toute la période. Les teneurs mensuelles en nitrates sont disponibles pour les années 1967 à 1976 comprises. Le bassin versant calculé de la station de HOEGILD MILL a été estimé à 8,7 km<sup>2</sup> à l'aide des isopièzes de la nappe. La superficie de son bassin topographique est approximativement de 11,7 km<sup>2</sup>.

Toutes les données nous ont été fournies gracieusement par la DGU (Danish Geological Survey) à l'occasion d'une coopération scientifique en particulier par le Dr Edmund GOSK que nous remercions particulièrement.

#### **3.2 - DONNÉES HYDROCLIMATOLOGIQUES DISPONIBLES**

**PLUVIOMETRIE :** La pluviométrie disponible est celle de la station 1317 située à 6 km au Sud-Ouest de la station hydrométrique de HOEGILD MILL. La valeur annuelle moyenne s'établit à 717 mm/an.

**EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE :** Les valeurs mensuelles utilisées pour les années 1966 et 1967 sont des valeurs moyennes.

### 3.3 - CALAGE HYDROLOGIQUE PLUIE-DÉBIT

Les principaux paramètres hydrologiques du modèle sont réunis dans le tableau ci-dessous :

Superficie (km <sup>2</sup> )	Coefficient d'ajustement		RSUP (mm)	RUIPER (mm)	Temps de demi- percolation (mois)	Demi-temps tarissement	
	Pondéré	Naturel				T1 (mois)	T2 (mois)
17,6	0,61	0,79	100	940	0,5	20	50

Paramètres obtenus lors du calage hydrologique  
(RSUP = capacité de rétention, RUIPER = hauteur d'équi-ruissellement).

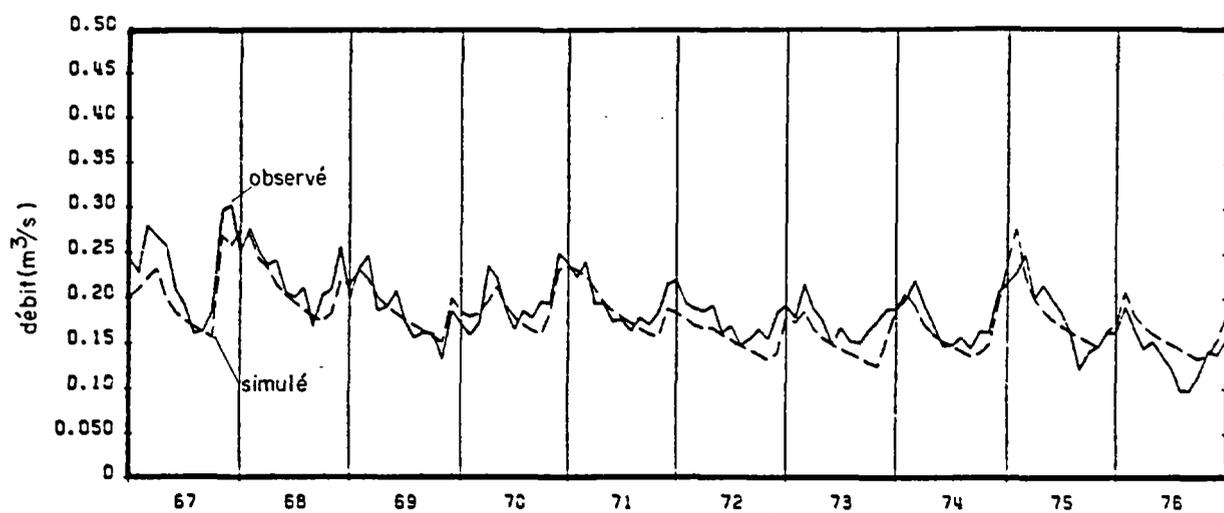
L'année 1966 a été utilisée comme année de démarrage ce qui, au vu des temps de tarissement, constitue une période trop courte.

L'examen de ces données permet de retenir :

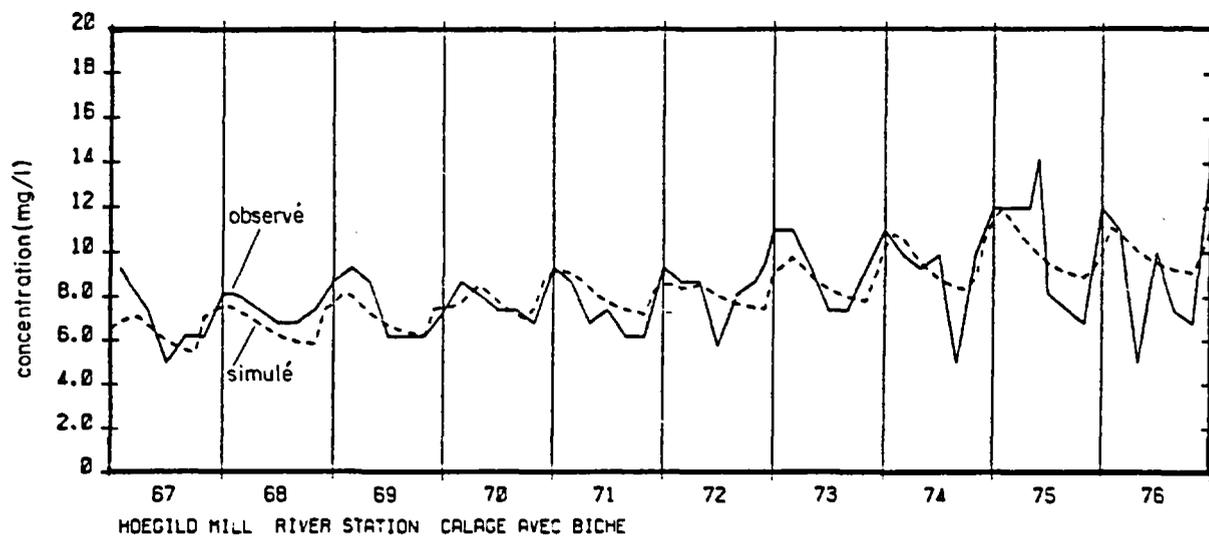
- que la superficie du bassin versant est de l'ordre de 17,6 km<sup>2</sup> soit sensiblement plus que celle du bassin versant topographique (11,7 km<sup>2</sup>) ou du bassin versant calculé (8,70 km<sup>2</sup>),
- que l'ajustement est correct (sans plus),
- que la capacité de la réserve superficielle est de l'ordre de 100 mm,
- que les temps de tarissement sont élevés indiquant une grande inertie.

Compte tenu de la durée de ces temps de tarissement, il apparaît qu'une période de plusieurs années de démarrage pourrait permettre d'améliorer le calage.

La figure 3.1 présente la série des débits observés et simulés.



**Figure 3.1 - Simulation des débits à la station de HOEGILD MILL**



**Figure 3.2 - Simulation des concentrations en nitrates à la station de HOEGILD MILL**

### 3.4 - CALAGE DES TRANSFERTS DE NITRATES

Il a été supposé dans notre cas que les données agricoles avaient été identiques depuis 1955. Compte tenu de l'évolution moyenne des teneurs à la station hydrométrique, sur la période 1967-1976, la teneur initiale, dans les réservoirs du modèle a été estimée à 2 g/l.

Le tableau ci-dessous donne les corrections sur les données agricoles apportées par le modèle pour obtenir un calage satisfaisant.

Données	Epandage	Minéralisation du sol	Besoins
Corrections en %	- 14,6	- 38,7	15,0

Corrections sur les apports et les besoins en nitrates introduites dans le modèle.

Les volumes des réservoirs et les temps de demi échange entre les phases fixes et libres sont rassemblés dans le tableau suivant :

Réservoirs	Volume d'eau liée (mm)	Temps de demi-échange (mois)
Superficiel	3 950	100
Intermédiaire	6 000	0,20
Souterrain rapide	6 000	2,2
Souterrain lent	5 500	5,2

Volume d'eau et temps de demi-échange des réservoirs du modèle.

La concentration maximale pour la dissolution par les pluies est fixée à 1 110 mg/l c'est-à-dire 11 kg/ha/mm de pluie.

Le coefficient d'ajustement obtenu est égal à 0,73 et la figure 3.2 montre que le calage est satisfaisant.

### 3.5 - CONCLUSIONS

L'utilisation du modèle BICHE avec les données du bassin contrôlé par la station hydrométrique de HOEGILD MILL du bassin représentatif de KARUP (Centre Danemark) permet de simuler l'évolution générale des teneurs en nitrates relevées à cette station de 1967 à 1976.

Les données hydroclimatologiques et agricoles sont connues de 1966 à 1976. Ces dernières sont constantes.

En moyenne, au cours de la période de calage l'excédent en nitrates atteint 328 kg/ha/an (soit 74 kg d'azote N), 305 étant stocké dans le milieu non saturé et la nappe, 23 sortant par la station hydrométrique.

A l'état d'équilibre, avec les mêmes données, tout l'excédent s'échappera par la rivière. Les teneurs en nitrates à la station pourraient passer de moins de 9 mg/l (moyenne 1967-1976) à 130 mg/l environ.

Une telle extrapolation est cependant très hasardeuse car des phénomènes de dénitrification pourraient éventuellement se produire.

## **4 - APPLICATION DU MODÈLE BICHE AU CAPTAGE DE FEUNTEUN-VEUR EN PLOUVORN**

Le modèle BICHE a été appliqué au BRGM par L. PARANTHOINE sur ce site et les résultats obtenus sont décrits dans sa thèse (1988) "Bilan de l'azote et estimation du temps de réponse sur deux bassins versants en région de socle (Plouvorn, Bassin Armoricaïn)". Nous présentons ici un simple résumé des résultats obtenus sur ce sujet ainsi qu'un recalage et une extension que nous avons réalisés en 1989.

### **4.1 - LES DONNÉES DISPONIBLES**

#### **4.1.1 - Données hydrogéologiques**

Depuis le mois de février 1985, une station météorologique a été installée sur le site de FEUNTEUN-VEUR ; cependant, l'absence de plusieurs paramètres nécessaires au bilan hydrique, et la nécessité de disposer de valeurs antérieures à 1983 a conduit à utiliser des données extérieures au site. La station météorologique offrant tous les paramètres nécessaires (température, insolation, pluie, ETP) est celle de GUIPAVAS située à 30 km au sud-ouest de PLOUVORN.

##### **Pluies mensuelles**

De janvier 1976 à janvier 1985 et les mois de juin, octobre et décembre 1985 : valeurs de GUIPAVAS corrigées suivant la corrélation établie entre PLOUVORN et GUIPAVAS.

De février 1985 à décembre 1986 : valeurs enregistrées sur le site de FEUNTEUN-VEUR.

##### **Evapotranspiration mensuelle (ETP)**

L'ETP utilisée lors de la simulation est l'ETP Penman de GUIPAVAS fournie par la Météorologie Nationale.

##### **Niveaux piézométriques mensuels**

Sur les 29 points du site de FEUNTEUN-VEUR qui ont fait l'objet d'un suivi piézométrique depuis 1984, 27 ont été retenus. Les niveaux sont exprimés en charge par rapport à l'exutoire de FEUNTEUN-VEUR, bien que tous ces points ne soient pas situés dans la zone d'alimentation du captage.

##### **Débits moyens mensuels**

La présence d'un captage à l'exutoire de la nappe de FEUNTEUN-VEUR n'a pas permis d'étudier les écoulements naturels de la nappe ; la simulation des débits a donc porté sur les volumes totaux exaurés, c'est-à-dire volumes pompés au captage et volumes écoulés par le trop-plein.

Au cours des trois années d'observation, l'existence permanente d'écoulements au trop-plein montre que le débit total n'est pas beaucoup modifié par l'exploitation de la source.

#### **4.1.2 - Données agricoles**

Elles sont de quatre types :

- a) Les séquences d'épandages de fertilisants exprimés sous formes de nitrate.
- b) Les séquences de consommations des nitrates par les plantes.
- c) Les séquences de la minéralisation du sol.
- d) Les quantités de nitrate provenant des résidus culturaux.

#### **4.2 - MODÉLISATION HYDROLOGIQUE**

La simulation de l'évolution des teneurs en nitrate du captage de FEUNTEUN-VEUR par le modèle BICHE, nécessite au préalable un calage des paramètres hydrologiques de l'aquifère.

Le débit de la source de FEUNTEUN-VEUR étant influencé par les pompages, il est apparu nécessaire de vérifier, sur des points non influencés, le bon fonctionnement du modèle hydrologique choisi.

##### **4.2.1 - Calage sur les niveaux piézométriques mensuels de la nappe**

La période observée en continu s'étend de 1984 (mars ou juillet selon les points) à décembre 1986.

Pour permettre une simulation correcte des années observées, on a commencé la simulation à partir de 1976, soit 8 années avant le début des mesures de niveaux. On a utilisé les pluies et l'ETP calculées d'après les données de GUIPAVAS.

Le modèle BICHE comprend au maximum 4 réservoirs, mais il est possible d'utiliser un schéma simplifié ne faisant intervenir que 2 ou 3 réservoirs.

Le réservoir le plus profond a volontairement été supprimé ; en effet, le bon équilibre observé par les bilans entrées-sorties réalisés sur le bassin pendant 3 ans, montre que les pertes par écoulements profonds, si elles existent, sont de faible importance.

Le modèle ainsi simplifié permet de réduire les paramètres à ajuster au nombre de 5 seulement.

Le ruissellement direct sur le bassin a été considéré comme nul et faute d'enregistrement *in situ*, les valeurs de l'ETP enregistrées à 30 km du site ont été utilisées sans coefficient de correction ; compte tenu des incertitudes, la capacité de rétention (déficit maximal) a été fixée à 100 mm.

De bons résultats ont été obtenus pour la simulation des variations piézométriques des 27 points du bassin, avec des coefficients d'ajustement compris entre 0,92 et 0,96.

#### 4.2.2 - Simulation des débits mensuels du captage de Feunteun-Veur

Malgré les variations artificielles imposées par les pompages d'exploitation, les exhaures enregistrées au captage ont été modélisés.

La durée des observations s'étend de novembre 1984 à décembre 1986. De la même façon que pour les niveaux piézométriques, la simulation des débits débute en 1976, les 8 premières années servant à améliorer l'initialisation des réservoirs du modèle.

Les coefficients de correction des données météorologiques ont été fixés à 0 et le ruissellement superficiel considéré comme nul.

La surface de l'aquifère est estimée à 0,44 km<sup>2</sup> d'après les cartes piézométriques de l'aquifère à 1/10 000.

Les paramètres à optimiser sont les suivants :

- Réserve superficielle initialisée à 100 mm
- Temps de demi-percolation (THG) initialisé à 1 mois
- Temps de demi-tarissement (TG1) initialisé à 3 mois
- Débit extérieur : ce débit est un débit non contrôlé à l'exutoire, il doit être en principe imposé à 0, sauf pour des cas particuliers : fuite du bassin, exportation ou importation d'eau par un canal, prélèvements, échanges latéraux de bassin à bassin...

*N.B. Lors d'une première tentative de simulation du débit de FEUNTEUN-VEUR, ce débit extérieur a été imposé à 0, cependant le calage n'a été possible qu'en laissant libre l'optimisation de ce paramètre.*

Les résultats obtenus lors du calage des paramètres sont reproduits dans le tableau ci-dessous :

Surface km <sup>2</sup>	Débit ext. l/s	R. nat.	RSUP mm	RUIPER mm	THG mois	TG1 mois
0,44	0,73	0,93	118	-	1,4	7

Valeurs des paramètres obtenus lors du calage du débit de la source de FEUNTEUN-VEUR (RSUP = capacité de rétention du sol ; RUIPER = hauteur d'équi-ruissellement ; R nat = coefficient de corrélation)

Le coefficient d'ajustement est égal à 0,93, ce qui est très satisfaisant compte tenu de l'influence marquée des pompages (voir figure 4.1).

La réserve superficielle (capacité de rétention) a été ajustée à 117 mm ; cette valeur s'accorde bien avec celles obtenues précédemment.

Le débit extérieur de 0,73 l/s (équivalent à 50 mm de précipitations efficaces sur l'année) correspond à 9 % du volume annuel exhauré à la source et pourrait correspondre à des fuites non contrôlées au niveau de la zone d'alimentation du captage. Pour préciser ce point, deux autres simulations ont été réalisées en appliquant une correction de  $\pm 20\%$  sur la surface estimée du bassin versant ; les résultats sont regroupés ci-après :

Surface km <sup>2</sup>	Variation surface	Débit ext. l/s	R. nat.	RSUP mm	THG mois	TG1 mois
0.35	- 20 %	2,1	0.91	138	1.3	5.9
0.53	+ 20 %	- 0,15	0.92	142	1.1	9.7

Valeurs des paramètres obtenus lors des simulations du débit de la source de FEUNTEUN-VEUR, pour une modification de  $\pm 20\%$  de la surface de la nappe.

On constate que les coefficients d'ajustement sont équivalents et qu'une augmentation de moins de 20 % de la surface annule ce débit extérieur.

Compte tenu de la faible importance des volumes mis en jeu et des marges d'incertitude liées aux autres paramètres du modèle, il n'a pas semblé nécessaire de tenter une simulation en introduisant un réservoir supplémentaire au modèle qui permettrait d'intégrer ces fuites.

#### 4.2.3 - Conclusion

Les résultats obtenus lors de la simulation des exhaures et des variations piézométriques de la nappe de FEUNTEUN-VEUR montrent qu'il est possible de simuler de façon fiable le bon fonctionnement de cet aquifère et ce, sans modification des hypothèses de départ, basées sur des observations de terrain.

### 4.3 - MODÉLISATION CHIMIQUE

Il est maintenant possible de modéliser l'évolution des teneurs en nitrate de la source de FEUNTEUN-VEUR, en ajustant les paramètres spécifiques au transferts de nitrates :

- Trois coefficients correctifs destinés à corriger globalement les entrées "chimiques" qui ne sont généralement connues que très approximativement : COREPA, CORBES, CORMIN ; ils sont exprimés en pourcent et s'appliquent respectivement à l'épandage, aux besoins des plantes et à la minéralisation du sol.
- Une concentration maximale de la pluie SATPL ; c'est la concentration maximale en nitrate que peut prendre la pluie lors de la dissolution de l'engrais solide épandu à la surface du sol.

#### 4.3.1 - Calage au pas de temps mensuel des variations des teneurs en nitrate de la nappe de feunteun-veur

Les valeurs des paramètres hydrologiques sont celles obtenues lors de la simulation du débit de la nappe.

Afin de limiter le nombre des paramètres à optimiser, ces valeurs ont été fixées dans un premier temps.

Les paramètres chimiques étaient, par contre, libres à l'optimisation ; leurs valeurs initiales ont été fixées comme suit :

- Les 3 volumes d'eau liée RUFIX, HFIX, G1FIX ont été initialisés à 200 mm. Les bornes imposées au paramètre sont [0-5000].
- Les 4 cinétiques d'échange TRACIN, TMELRU, TMELH, TMELG1 ont été initialisées à 0,2 mois. Les bornes imposées aux paramètres sont [0,15-10].
- La concentration maximale de la pluie SATPL a été initialisée à 500 mg/l (soit 5 kg/mm/ha). Les bornes imposées au paramètre sont [0-5000].

Les coefficients correcteurs des données agricoles : COREPA, CORBES, CORMIN ont été initialisés à 0 avec des limites de variation de  $\pm 30\%$ .

#### 4.3.2 - Résultats et analyse des simulations

Les valeurs des paramètres "chimiques" optimisés ainsi que le coefficient d'ajustement de la simulation sur la période 1984-1986 sont regroupés dans le tableau suivant :

R. nat.	RUFIX	HFIX	G1FIX	TRACIN	TMELRU	TMELH	TMELG	SATPL	CORMIN	COREPA	CORBES
0.55	506	580	520	instant.	0.4	instant.	0.4	520	0	0	0

Valeurs des paramètres "chimiques" optimisés lors de la simulation de l'évolution des teneurs en nitrate du captage de FEUNTEUN-VEUR. (R. nat. = coefficient de corrélation)

On remarque que le coefficient d'ajustement n'est pas très élevé. Afin d'améliorer le calage et considérant qu'il était préférable de ne pas modifier les données agricoles en l'absence de renseignements complémentaires, une nouvelle simulation a été tentée en libérant les 3 paramètres hydrologiques : RUMAX, THG et TG1;

Les résultats de la simulation sont regroupés ci-après et la visualisation graphique sur la figure 4.2

R. nat.	CORPLU %	RSUP mm	CORETP %	RUIPER mm	THG mois	TG1 mois
0,71	0	132	0	-	0,8	8,6

CORMIN %	COREPA %	CORBES %	TRACIN mois	SATPL mg/l	TMELRU mois	TMELH mois	TMELG1 mois	RUFIX mm	HFIX mm	GIFIX mm
1.5	4	- 0.6	instant.	230	0.2	instant.	1.7	520	580	510

Valeurs des paramètres optimisés lors de la simulation de l'évolution des teneurs en nitrate du captage de FEUNTEUN-VEUR (R. nat = coefficient de corrélation)

On constate une amélioration du coefficient d'ajustement ; cependant, les variations saisonnières des teneurs en nitrates, mises en évidence sur la période observée, sont assez mal simulées. Ceci est peut-être lié à la très faible amplitude de ces mouvements (4 mg/l/an).

Les modifications subies par les 3 paramètres hydrologiques au cours de cette simulation ne sont pas très importantes. Cependant, la qualité du calage hydrologique a été vérifiée avec les nouvelles valeurs des paramètres hydrologiques. Le graphique de la simulation (non représenté ici) et le coefficient d'ajustement qui passe de 0.92 à 0.90 montrent que le calage hydrologique n'est pratiquement pas dégradé alors que le calage chimique est sensiblement amélioré.

#### 4.4 - Reprise du calage sur la période 1976-1986

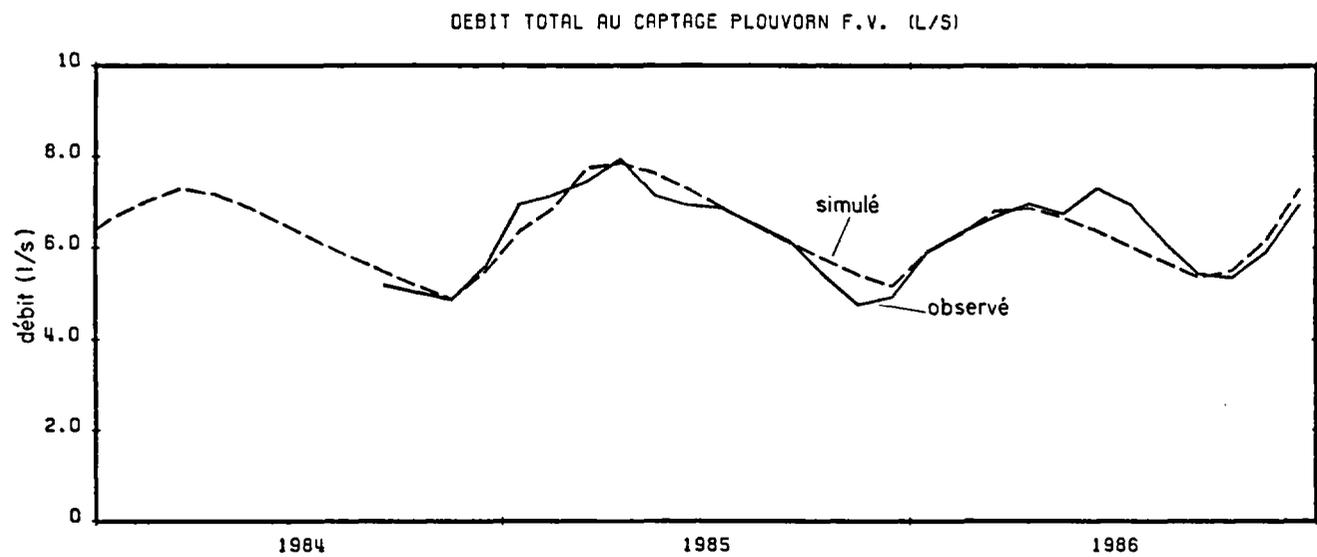
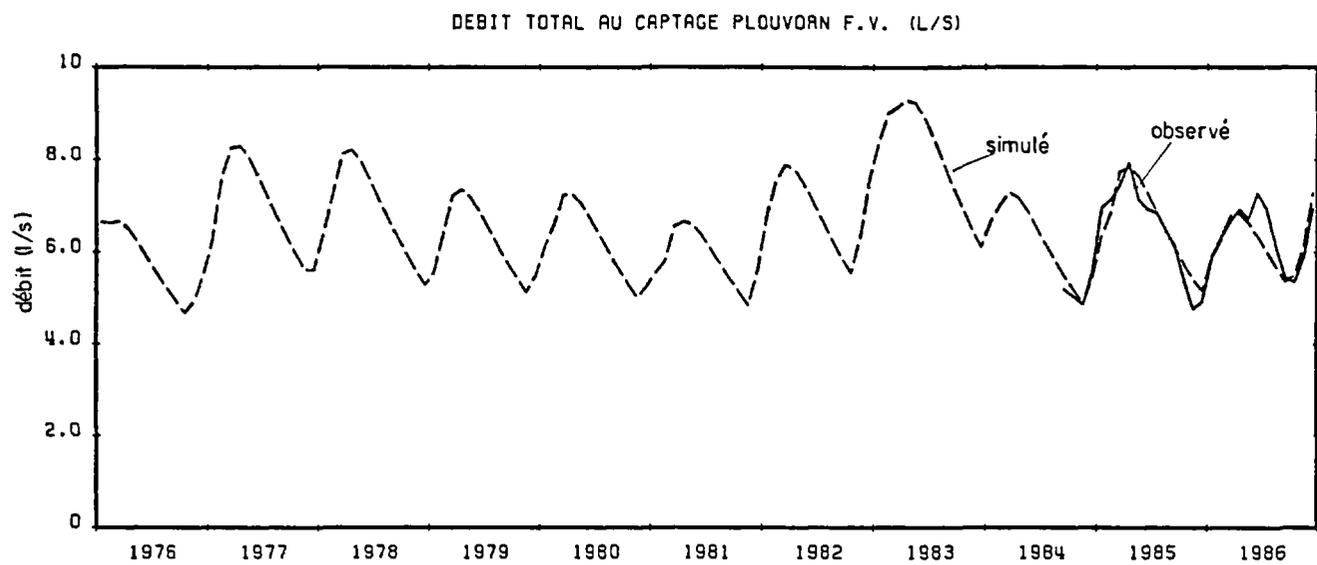
En 1989, nous avons repris le calage que L. PARANTHOINE avait réalisé au BRGM et nous l'avons étendu à la période 1976-1986 soit 11 ans au lieu de 3 ans. Pendant cette période, on dispose sur les 8 années supplémentaires uniquement de 7 mesures supplémentaires de teneurs en nitrates, mais présentant une plage de variation beaucoup plus étendue : de 60 mg/l à 100 mg/l.

En recalant le modèle sur toute la période, on obtient alors un très bon ajustement puisque le coefficient d'ajustement (qui correspond pratiquement à un coefficient de corrélation) atteint 0.95 pour les nitrates au lieu de 0.71 précédemment.

La figure 4.1 présente l'ajustement du modèle sur le débit au captage de PLOUVORN (coefficient d'ajustement de 0.91) et la figure 4.3 présente la simulation des concentrations en nitrates (coefficient d'ajustement de 0.95). Ce bon résultat est obtenu en n'utilisant que :

4 paramètres pour le calage hydrologique  
5 paramètres pour le calage chimique.

Le nombre de paramètres étant réduit, on peut penser que le calage est d'autant plus fiable et robuste.



**Figure 4.1 - Captage de FEUNTEUN VEUR : calage hydrologique : modélisation du débit total au captage**

Les caractéristiques du calage hydrologique sont les suivantes :

- . période de simulation : 1976-1986
- . période d'initialisation : 1976-1983
- . période de calage : 1984-1986 : 36 observations
- . aucune correction de pluie, d'ETP, ni de superficie
- . réserve superficielle : 200 mm
- . temps de demi-percolation : 0,9 mois
- . temps de demi-tarissement : 7,9 mois
- . débit extérieur : + 1.76 l/s
- . bilan annuel : pluie = 1 033 mm, ETR = 626 mm, débit souterrain = 330 mm, différence de stockage = 77 mm.

Les caractéristiques du calage chimique sont les suivantes :

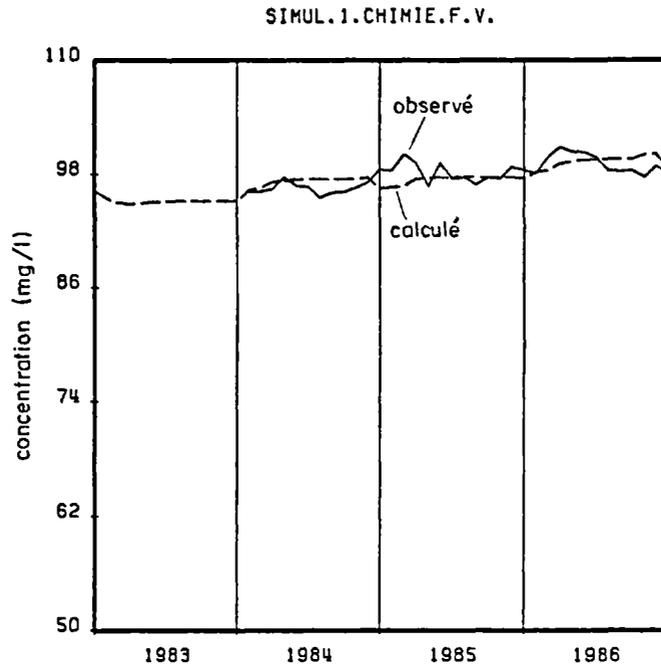
- . période de simulation : 1976-1986
- . période d'initialisation : 5 années fictives avant 1976
- . période de calage : 1976-1986 : 42 observations
- . aucune correction de besoin, d'épandage ou de minéralisation
- . temps de mélange : tous instantanés
- . saturation maximale des pluies : 1 030 mg/l
- . capacités en eau immobile
  - réserve superficielle : 548 mm
  - réservoir intermédiaire : 638 mm
  - réservoir souterrain : 458 mm
- . temps de libération des racines : 0,2 mois
- . concentration initiale en 1976 : 50 mg/l
- . le bilan annuel s'établit alors à :

Pluies efficaces	345 mm/an
Épandages	977 kg/ha/an (de NO <sub>3</sub> )
Minéralisation	220 kg/ha/an
Reliquats racines	195 kg/ha/an
Consommations	1 027 kg/ha/an
<hr/>	
Flux liquide	281 kg/ha/an
Stockage	+ 84 kg/ha/an

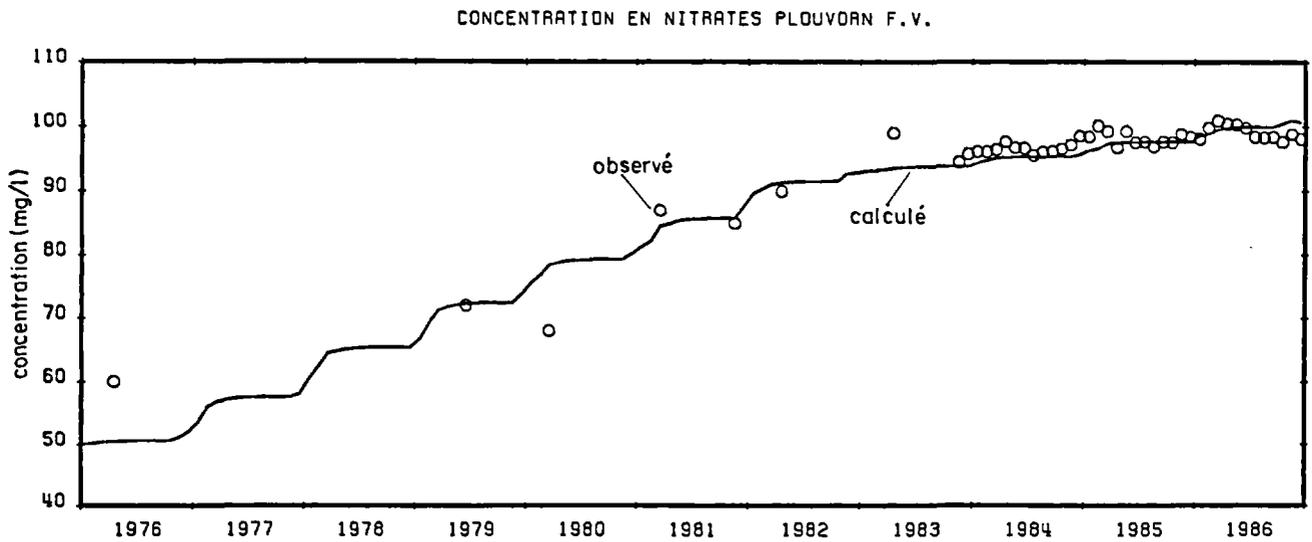
#### 4.5 - CONCLUSIONS

Malgré les conditions particulières, liées à l'exploitation de la source qui ne peut être prise en compte dans le calage hydrologique, la simulation, sur la période 1976-1986, des variations des teneurs en nitrates de la source de FEUNTEUN-VEUR, en utilisant le modèle BICHE, a fourni des résultats satisfaisants.

Le modèle BICHE, suivant le schéma simplifié à 3 réservoirs est tout-à-fait adapté pour simuler le fonctionnement du bassin de PLOUVORN (FEUNTEUN-VEUR).



**Figure 4.2 - Simulation des concentrations en nitrates. Calage obtenu en 1988 sur 3 années d'observations**



**Figure 4.3 - Simulation des concentrations en nitrates. Calage obtenu en 1989 sur 11 années d'observations.**

## 5 - APPLICATION AU PIÉZOMÈTRE TILLOLOY - VÉRIFICATION DU CALCUL DES ÉCARTS-TYPES ET DES INTERVALLES DE CONFIANCE DES NIVEAUX ET DE LA RECHARGE

L'évolution des niveaux du piézomètre Tilloloy a été modélisée à partir des précipitations et les résultats sont décrits en particulier par THIERY (1988). Le piézomètre Tilloloy (n° 81-3-43) en Picardie est observé au cours de la période 1966-1983 (soit 18 ans). En fait, on ne dispose pas d'observations pendant la période 1976-1978 et la période d'observation est de 170 mois (soit 14,1 ans). Le poste pluviométrique le plus proche est celui de La Neuvilleroy.

### 5.1 - AJUSTEMENT DU MODÈLE

Le calage du modèle sur la période d'observation aboutit au jeu de paramètres suivants :

R.SUP	= 105 mm
C.ETP	= + 0,7 %
THG	= 4,1 mois
TG	= 6,6 mois
EMMAG	= 1,3 %
N. BASE	= 70,37 m NGF

avec les caractéristiques suivantes :

- \* coefficient de corrélation = 0,979
- \* écart-type de l'erreur = 0,617
- \* auto-corrélation de l'erreur = 0,775
- \* nombre d'observations indépendantes équivalentes = 22
- \* recharge annuelle de la nappe = 146 mm/an

### 5.2 - ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES INCERTITUDES SUR LA RECHARGE

Une première analyse a consisté à faire varier indépendamment les deux paramètres qui ont une influence sur la recharge de la nappe. Ces deux paramètres sont :

R.SUP : la valeur du déficit maximal du sol

C.ETP : le facteur de correction globale de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Pour le paramètre R.SUP, on a choisi la plage [ 60, 150] mm et pour le paramètre CETP la plage [-10 %, +10 %]. La figure 5.1 montre que la recharge annuelle est comprise approximativement entre 100 mm/an pour le couple [R.SUP, C.ETP] égal à [150 mm, + 10 %] et 200 mm/an pour le couple [60 mm, - 10 %].

La figure 5.2 montre que ces valeurs sont atteintes pour des coefficients d'ajustement toujours supérieurs à 0,967 (alors que la meilleure valeur atteint 0,979).

Le problème consiste à déterminer précisément la plage qui pourrait être obtenue de manière aléatoire par différents échantillons d'observations.

La figure 5.3 montre que le calage obtenu est très bon sur toute la période 1966-1983.

### **5.3 - CALCUL DES DÉRIVÉES ET ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DES PARAMÈTRES**

Dans un but de compréhension et avant le calcul des écarts-types des paramètres, on a calculé les dérivées des niveaux piézométriques par rapport aux paramètres suivants :

- \* Déficit maximal du sol (capacité de la réserve superficielle) R.SUP
- \* Correction globale d'ETP : CETP
- \* Temps de demi-percolation : THG
- \* Temps de demi-tarissement : TG1
- \* Coefficient d'emmagasinement : EMMAG

Ces dérivées sont obtenues simplement en calculant successivement pour chaque paramètre les niveaux N pour deux valeurs du paramètre p très proches de la valeur de référence. La dérivée est alors le rapport  $dN/dp$  des écarts de niveaux aux écarts de paramètres. Les figures 5.4 et 5.5 présentent ces dérivées sur la période 1966-1983. On remarque en particulier la forte corrélation (négative) entre le coefficient d'emmagasinement (EMMAG) et le temps de demi-tarissement (TG1). Il est également intéressant de noter que l'influence du déficit maximal du sol (R.SUP) se fait sentir chaque année et que cette influence est peu liée à celle de la correction globale d'ETP (CETP).

### **5.4- APPLICATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL AUTOMATIQUE DE L'ÉCART-TYPE**

La méthode de calcul automatique mise au point permet de déterminer automatiquement l'intervalle de confiance des paramètres. Compte tenu des valeurs suivantes :

Nombre d'observations : 170

Nombre de variables : 6

Ecart type de l'erreur : 0.617

Auto-corrélation de l'erreur : 0.775

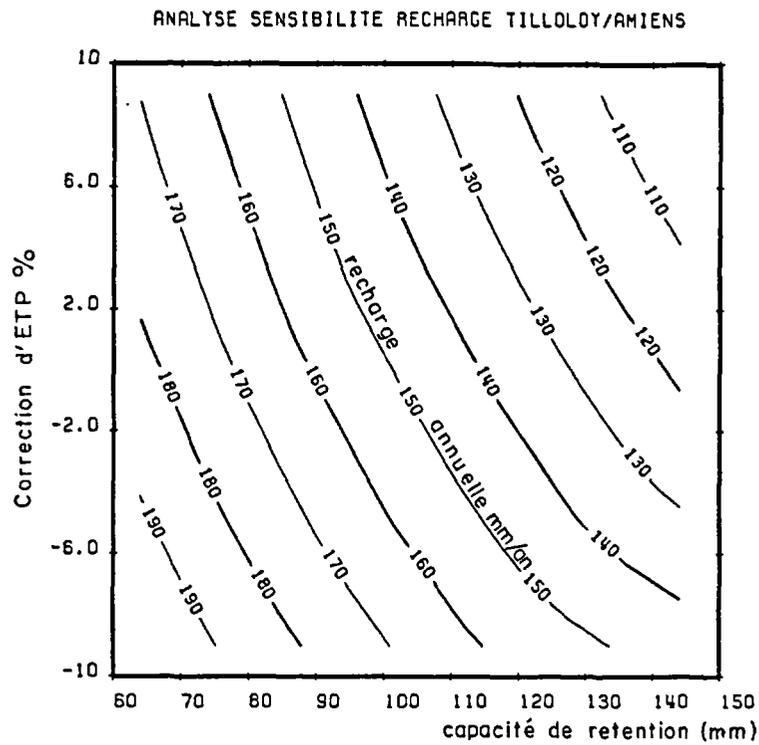


Figure 5.1 - Variation de la recharge annuelle en fonction des paramètres RSUP et CETP

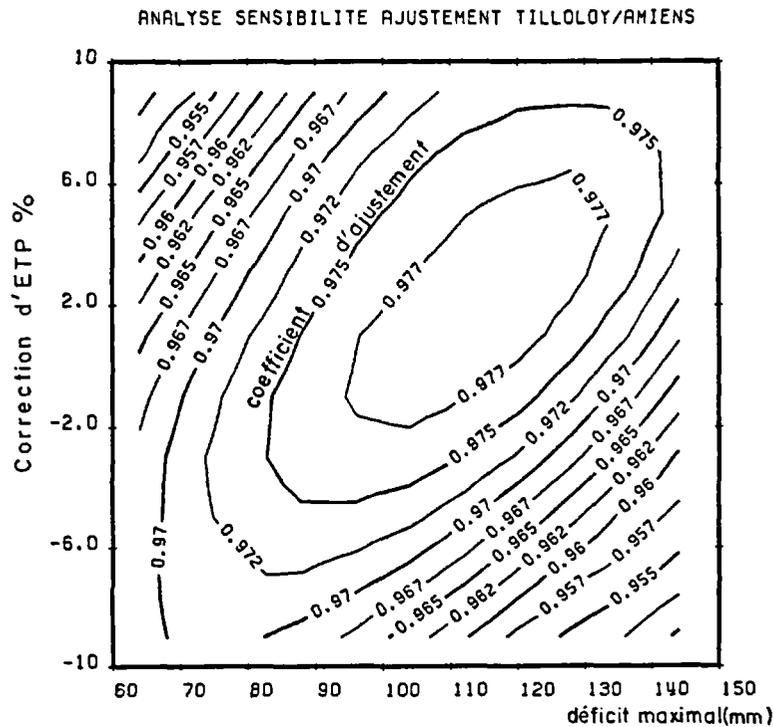


Figure 5.2 - Variation du coefficient de corrélation en fonction des paramètres RSUP et CETP

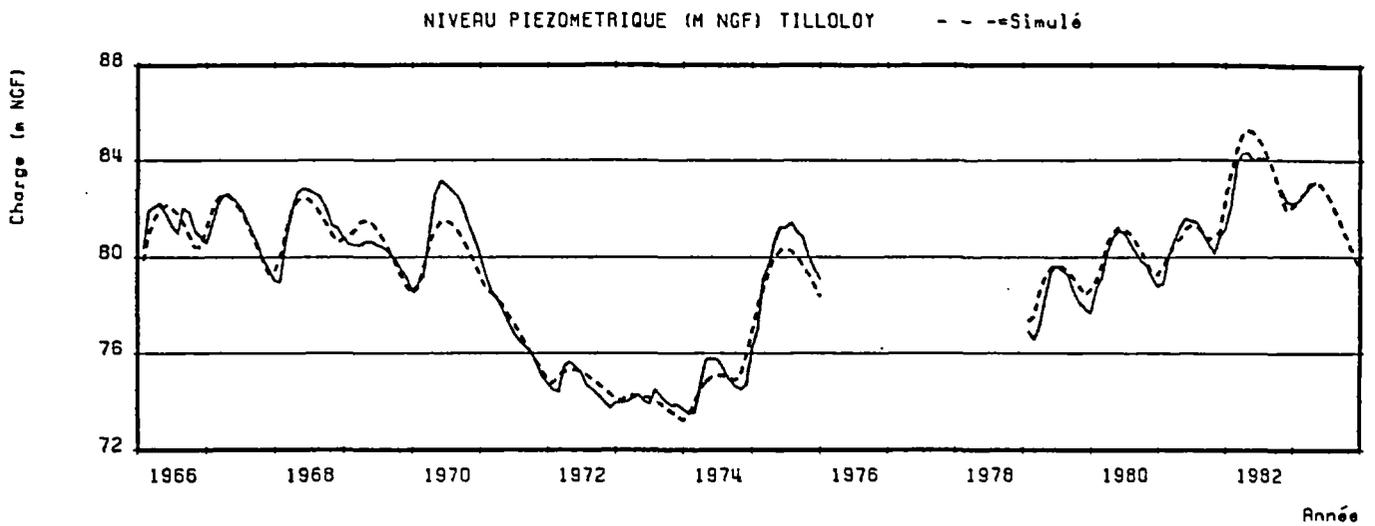


Figure 5.3 - Piézomètre Tilloloy : niveaux observés et simulés

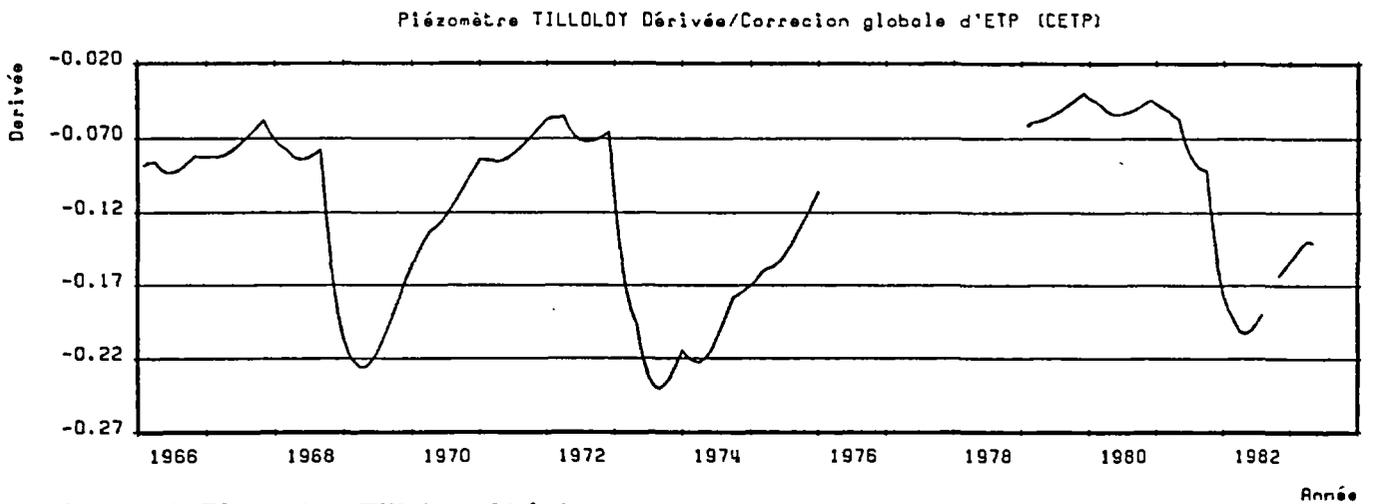
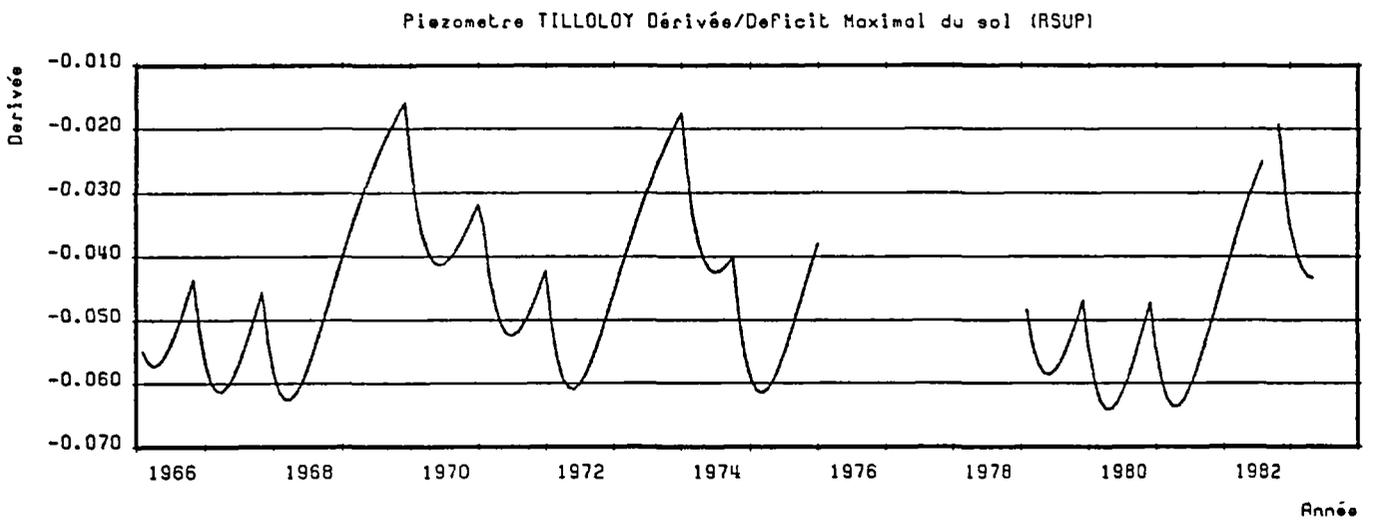
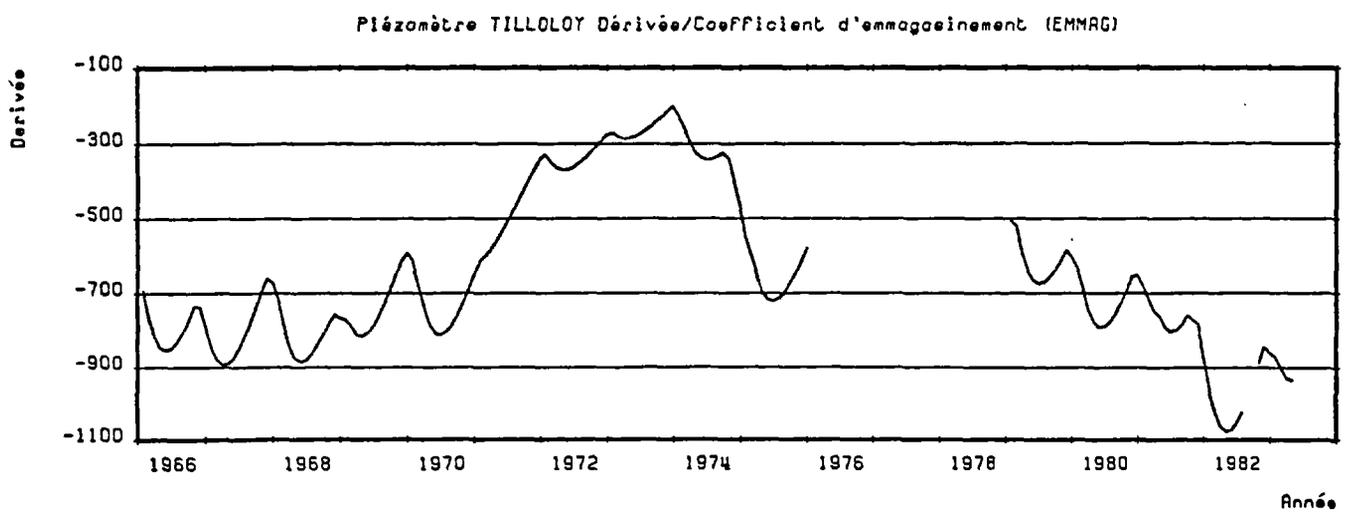
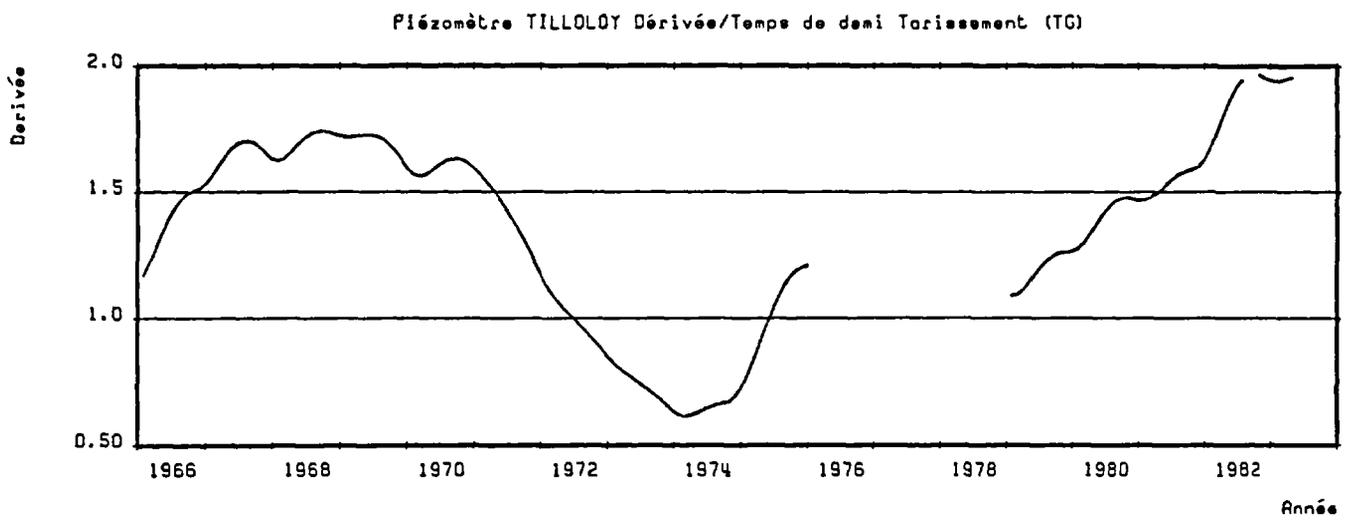
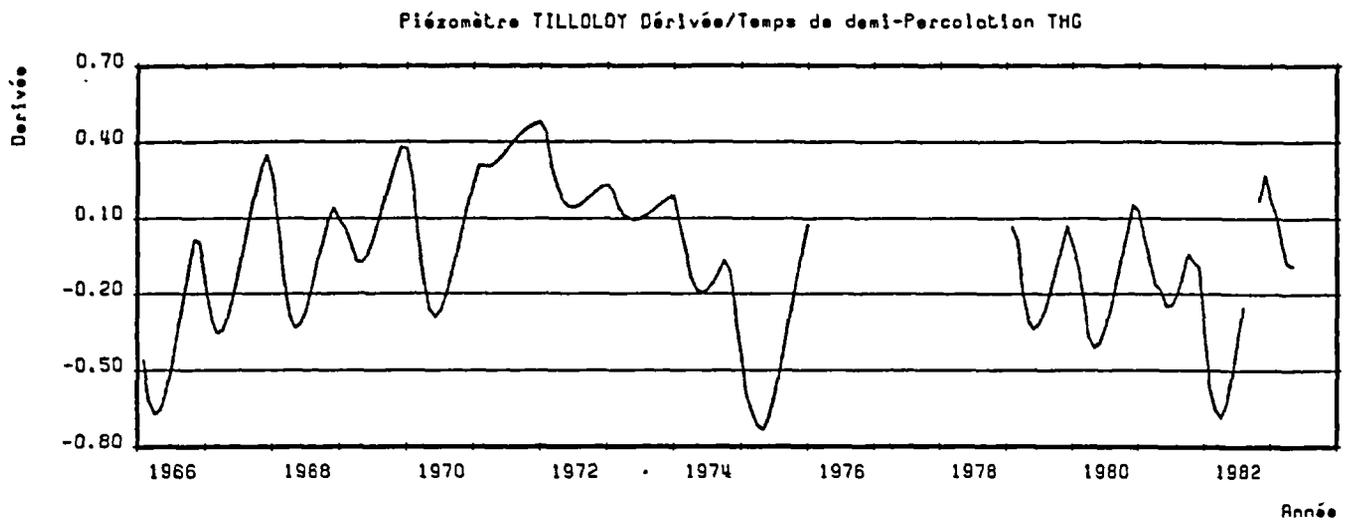


Figure 5.4 - Piézomètre Tilloloy : dérivées



**Figure 5.5 - Piézomètre Tilloloy : dérivées (suites)**

On obtient les écarts-types et coefficients de student suivants :

Paramètre	Moyenne	écart-type	t de student
R.SUP (mm)	105	16	6.4
C.ETP (%)	0.7	3.5	0.2
THG (mois)	4.1	2.0	2.1
TG (mois)	6.6	2.6	2.6
EMMAG (%)	1.3	0.5	2.5
N.BASE (m)	70.37	1.3	53.6

Compte tenu des dérivées de la recharge par rapport aux paramètres, on en déduit l'intervalle de confiance à 95 %.

$$110 < \text{recharge} < 181 \text{ mm/an}$$

Rappelons qu'une variable a un effet significativement différent de zéro (au seuil de confiance de 95 %) quand le coefficient de student est au moins égal (en valeur absolue) à 2. On remarque ainsi que la correction globale d'ETP (CETP) n'a pas une influence significative, c'est-à-dire qu'elle pourrait être fixée à zéro sans dégradation sensible du calage.

## 5.5 - VALIDATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL

### 5.5.1 - Principe de la validation

Pour vérifier la méthode de calcul, on utilise la méthode suivante :

On a considéré que la série des 170 observations était en fait affectée par un effet externe : erreurs de mesures, incertitudes sur les dates de mesures, effets de capacité dans le forage, incertitude sur la pluie au site même, incertitude sur l'évapotranspiration potentielle. Cet effet externe ne peut pas être pris en compte par le modèle (dans sa structure actuelle) ; il a été assimilé à une erreur aléatoire d'écart-type 0,617 m et de coefficient d'auto-corrélation d'ordre 1 égal à 0.775 d'après les résultats du paragraphe 5.1.

On a ainsi généré 30 séries "d'observations" en affectant la série observée d'une telle erreur  $e$  déterminée par :

$$e = r.e_p + \sqrt{1-r^2}.z.s_e \text{ (processus autorégressif d'ordre 1)}$$

avec :

$e$  = erreur

$e_p$  = erreur du pas précédent

$s_e$  = écart-type de l'erreur

$r$  = coefficient d'auto-corrélation

$z$  = nombre aléatoire gaussien (moyenne = 0 ; écart type = 1).

### 5.5.2 - Contrôle des écarts-types des paramètres

On a ensuite ajusté successivement le modèle hydrologique sur ces 30 séries. On a ainsi obtenu 30 jeux de paramètres (et 30 coefficients de corrélation). On peut ainsi calculer - sur cet échantillon de 30 jeux - l'écart-type des paramètres ainsi que la matrice de corrélation.

Les écarts-types sont les suivants :

Paramètre	Moyenne	Écart-type
R.SUP (mm)	122	14
C.ETP (%)	3.5	3.2
THG (mois)	4.0	0.7
TG (mois)	6.2	1.4
EMMAG (%)	1.23	0.2
N.BASE (m)	71.64	1.1

Le coefficient de corrélation moyen est de 0.964 avec un écart-type de 0.0073. La pluie efficace PEFF moyenne, assimilable ici à la recharge, a l'intervalle de confiance à 95 % suivant :

$$96 < \text{PEFF} < 152 \text{ mm/an}$$

La comparaison avec les écarts-types des paramètres obtenus par la méthode automatique montre une très bonne cohérence puisque les valeurs sont très semblables. Les petites différences peuvent s'expliquer pour les raisons suivantes :

- \* les 30 séries ne constituent qu'un faible échantillon
- \* les relations ne sont pas linéaires et l'écart est d'autant plus important qu'un paramètre a un fort écart-type.

La figure 5.6 présente dans un ordre séquentiel les 15 coefficients de corrélation entre 2 paramètres. Elle montre que ces coefficients de corrélation entre les paramètres sont bien identifiés.

La figure 5.7 montre à titre d'illustration les 30 couples [R.SUP, C.ETP] obtenus.

### 5.5.3 - Contrôle des écarts-types de simulation

A partir des écarts-types des paramètres obtenus par la méthode automatique, on a calculé l'intervalle de confiance des niveaux calculés. La figure 5.8 reproduit l'écart-type de simulation obtenu qui est dû à l'incertitude sur les paramètres. On remarque que cet écart-type est maximal pendant la période 1976-1978 pendant laquelle les niveaux ne sont pas observés. La figure 5.9 présente les 30 simulations obtenues à partir des 30 jeux de données et la figure 5.10 présente la série observée ainsi que l'intervalle de confiance théorique à 95 % déterminé par la méthode automatique. Il apparaît que la série des niveaux observés est bien comprise dans l'enveloppe à 95 % et que cette enveloppe correspond bien à l'enveloppe des 30 simulations (en théorie, seule une simulation sur 20 doit sortir de cette enveloppe).

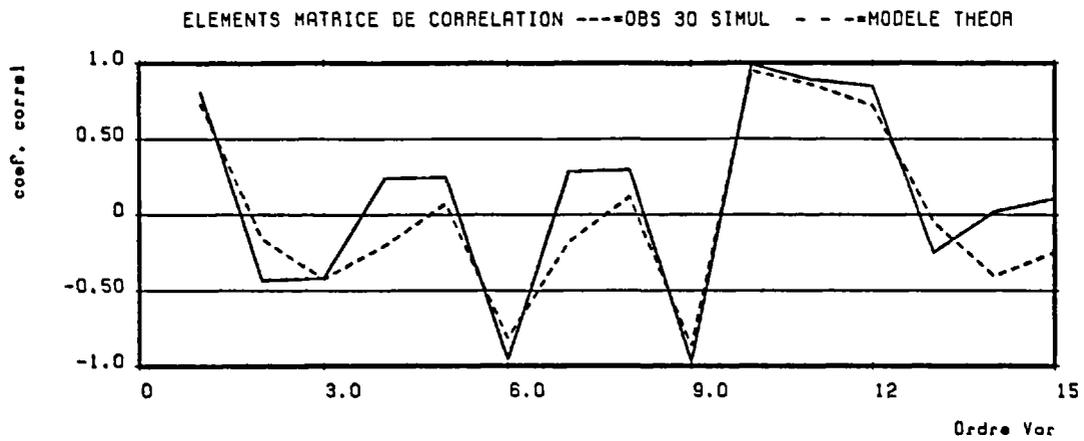


Figure 5.6 - Comparaison entre les valeurs prévues et observées pour les 15 coefficients de corrélation entre paramètres

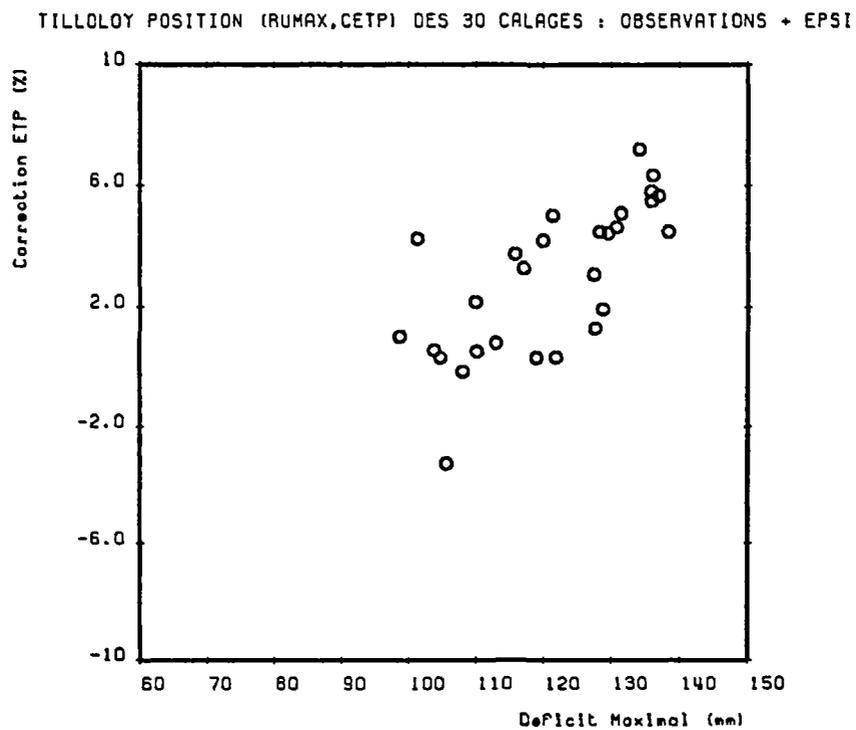


Figure 5.7 - Couples de paramètres RSUP, CETP obtenues pour les 30 calages

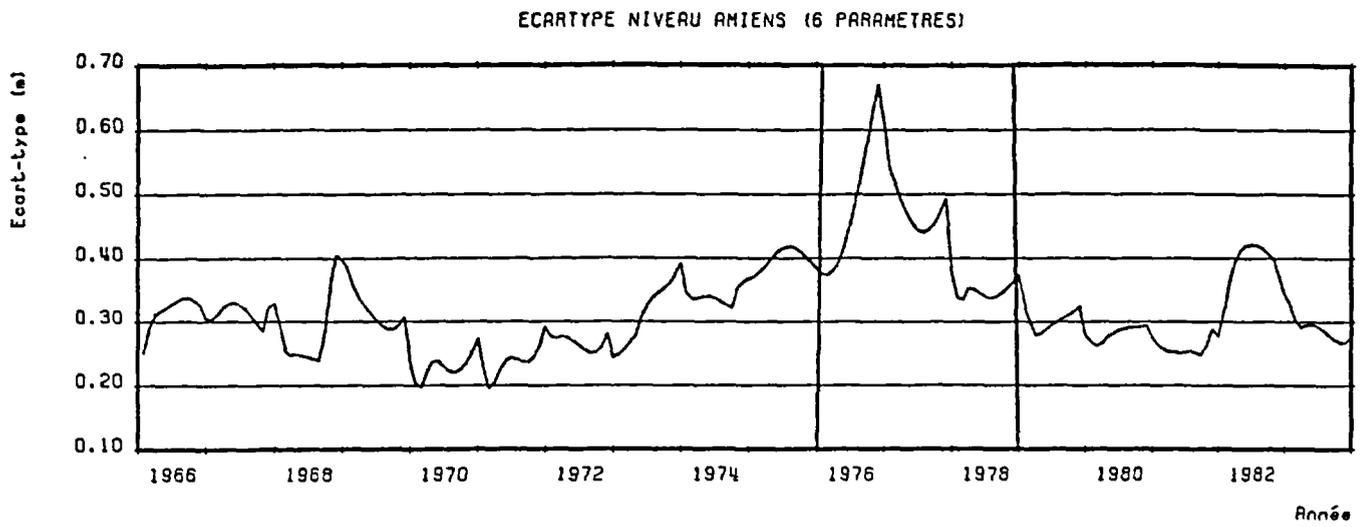


Figure 5.8 - Tilloloy : écart type de simulation

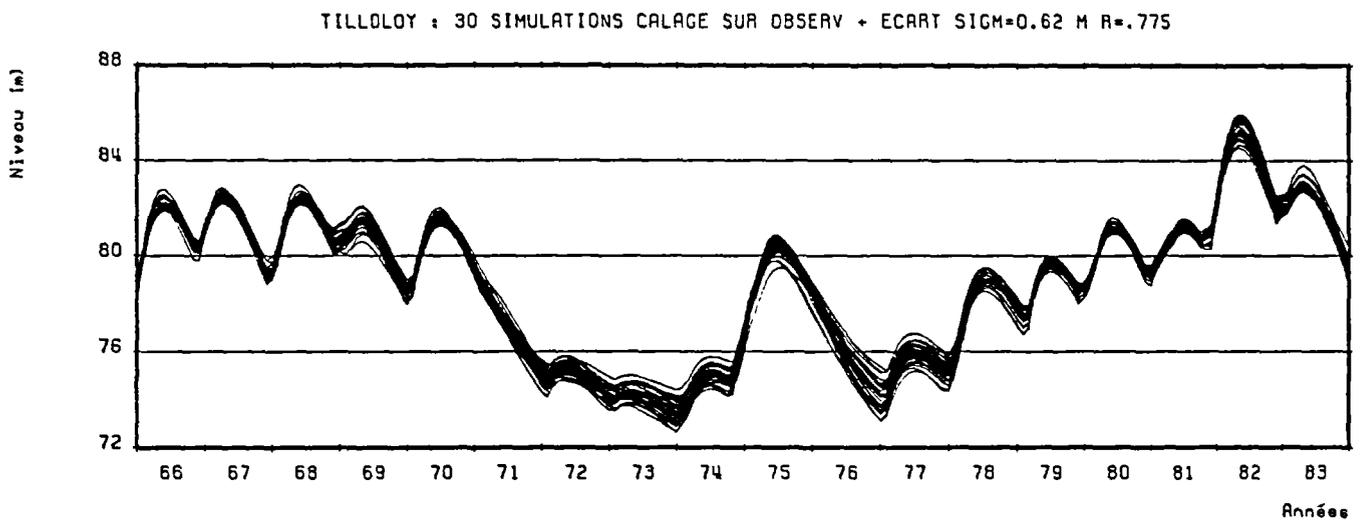


Figure 5.9 - Niveaux résultants des 30 calages sur le piézomètre Tilloloy

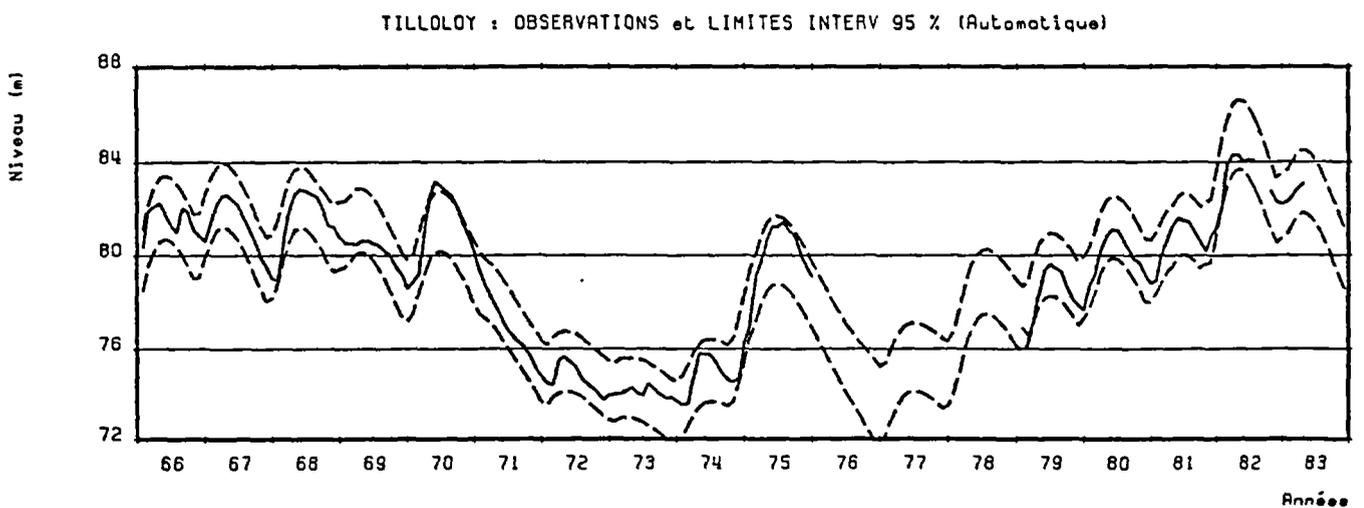


Figure 5.10 - Tilloloy : intervalle de confiance à 95 % des niveaux simulés

## 5.6 - INFLUENCE DU NOMBRE DE PARAMÈTRES DU MODÈLE

Il est apparu que le paramètre C.ETP n'avait pas une influence significative. On a donc effectué un nouveau calcul en fixant C.ETP à zéro (en fait à 0.7 % pour être conservatif) et en postulant que ce paramètre était parfaitement connu. On obtient alors par la méthode automatique les valeurs suivantes (les valeurs entre parenthèses sont celles obtenues précédemment).

Paramètre	Écart-type		t student	
R.SUP (mm)	9.7	(16)	10.8	(6.4)
C.ETP (%)	-	(2.9)	-	(0.2)
THG (mois)	1.8	(2.0)	2.3	(2.1)
TG (mois)	2.5	(2.6)	2.6	(2.6)
EMMAG (%)	0.5	(0.5)	2.6	(2.5)
N.BASE (m)	0.70	(1.3)	100.2	(53.6)
PEFF (mm/an)	7	(18)	-	-

On note que les incertitudes sur le déficit maximal et sur le niveau de base sont presque divisées par 2. L'incertitude sur la pluie efficace (recharge) est divisée par 2.5.

L'influence du déficit maximal R.SUP et de la correction globale d'ETP (C.ETP) sur la pluie efficace P.EFF annuelle moyenne a été établie par régression linéaire.

$$PEFF = - 0.72 R.SUP - 1.72 C.ETP + 218 \text{ mm/an}$$

0.997                      0.991  
 - 70                      - 39      200

R = 0.999  
 = corrélation partielle  
 = t de Student

On note une très bonne relation linéaire avec chacune des deux variables très significatives (t de Student de 70 et 40).

Les coefficients de régression s'interprètent ainsi :

- \* La réserve superficielle R.SUP s'assèche et se sature en moyenne 0.72 fois par an
- \* C.ETP : une augmentation de 1 % de l'ETP induit une diminution moyenne de PEFF de 1.722 mm/an.

## 5.7 - ESSAI D'INTERPRÉTATION DES RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES

Paramètres	Corrélation	Interprétation
R.SUP, C.ETP	0.7	Une augmentation simultanée de R.SUP et C.ETP dans le même rapport provoque une pluie efficace dans le même rapport (qui sera compensée par EMMAG)
R.SUP, N.BASE	0.8	Grande R.SUP → moins de recharge donc niveau plus bas compensé par un niveau de base plus haut
C.ETP, N.BASE	0.7	Même raison
THG, TG1	- 0.7	Ces paramètres peuvent s'échanger
TG1, EMMAG	+ 0.9	Une grande inertie provoque une plus forte augmentation de niveau à de longues périodes de recharge. Une augmentation de l'emmagasinement diminue donc l'amplitude
THG, EMMAG	- 0.8	Même raison puisque TG1 et THG sont corrélés négativement. Un temps de transfert THG grand étale les recharges ; un faible emmagasinement augmente la nervosité des réactions.

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

Les sources de la VOULZIE constituent un exutoire de la nappe des calcaires de CHAMPIGNY. Il y a, en fait, 3 groupes de sources : VOULZIE, DURTEINT et DRAGON (figure 6.1), appelés groupe des sources de la VOULZIE (ou sources de PROVINS). Ces sources, dont le débit moyen est de l'ordre de 1 m<sup>3</sup>/s, sont captées pour l'alimentation en eau de la ville de Paris. Les teneurs en nitrates sont mesurées à leur point de jonction ; leur évolution a été simulée jusqu'en 1983 au pas de temps mensuel à l'aide du modèle BICHE (THIERY et SEGUIN, 1985c).

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

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

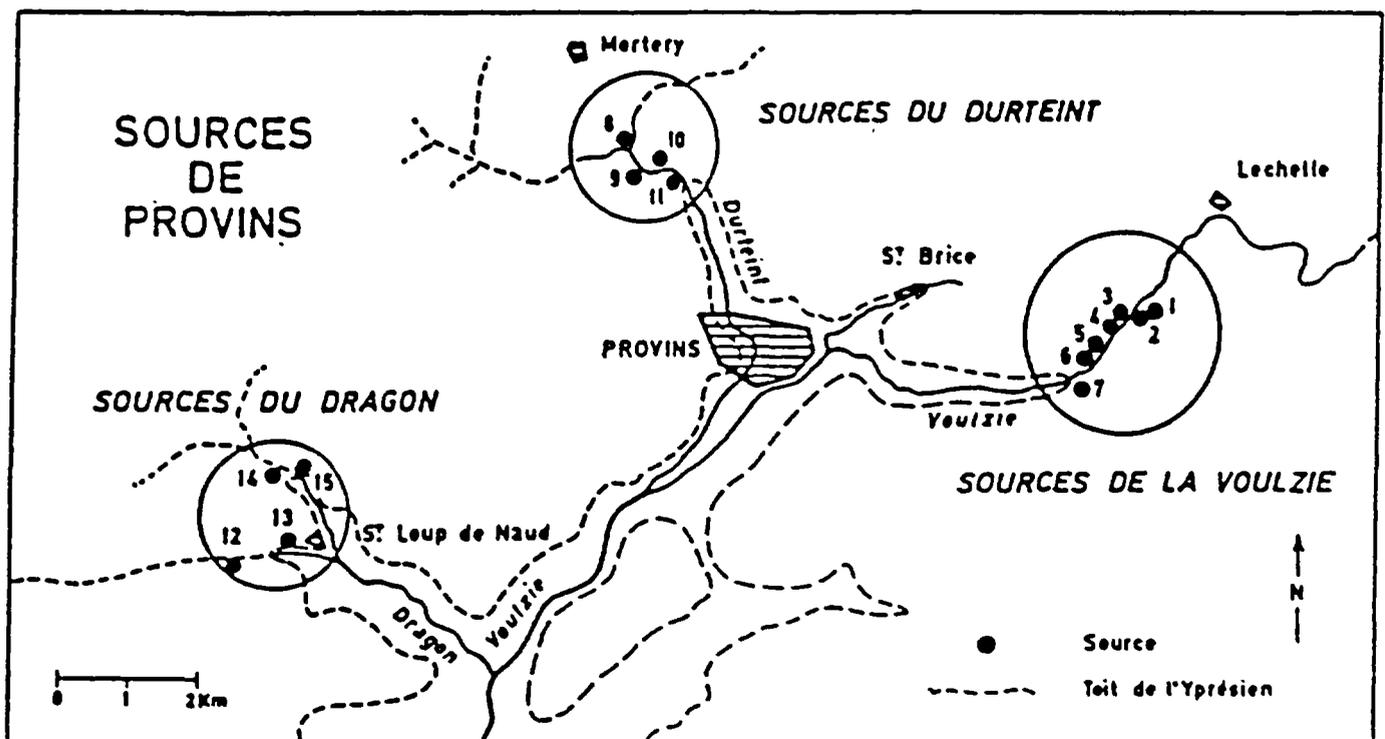


Figure 6.1 - Situation des trois principaux groupes de sources du Bassin de Provins : Dragon, Durteint et Voulzie

## Les données :

### - Données hydrologiques :

- \* pluies mensuelles
  - . à VOULZIE (à 1 km de l'ensemble des captages de la VOULZIE) de 1947 à 1986
  - . à Paris, de 1907 à 1979 fournies par la Météorologie Nationale
  - . à Orléans, de 1908 à 1979
- \* évapotranspiration potentielle mensuelle
  - . calculée par la formule mensuelle de TURC (TURC, 1961), à partir des données de la Météorologie Nationale : à Paris, de 1947 à 1986
- \* débits moyens mensuels
  - . de 1947 à 1986, à l'exutoire de l'ensemble des sources de la VOULZIE. Ils sont mesurés par les services de la Ville de Paris

### - Données chimiques :

- \* concentrations en nitrates au point de jonction des 3 groupes de sources (mesures effectuées par la Ville de Paris de 1947 à 1986)

### - Données agricoles :

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

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

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

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

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

## 6.1 - MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

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

Le calage au pas de temps mensuel a été réalisé en essayant de simuler au mieux les débits mensuels observés. Il est satisfaisant (coefficient de corrélation égal à 0.80) avec, cependant, une sous-estimation pendant la période de 1966 à 1970 (voir figure 6.2).

Les paramètres identifiés par le calage sont donnés dans le tableau 6.1.

**Tableau 6.1- Paramètres hydrologiques**

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

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

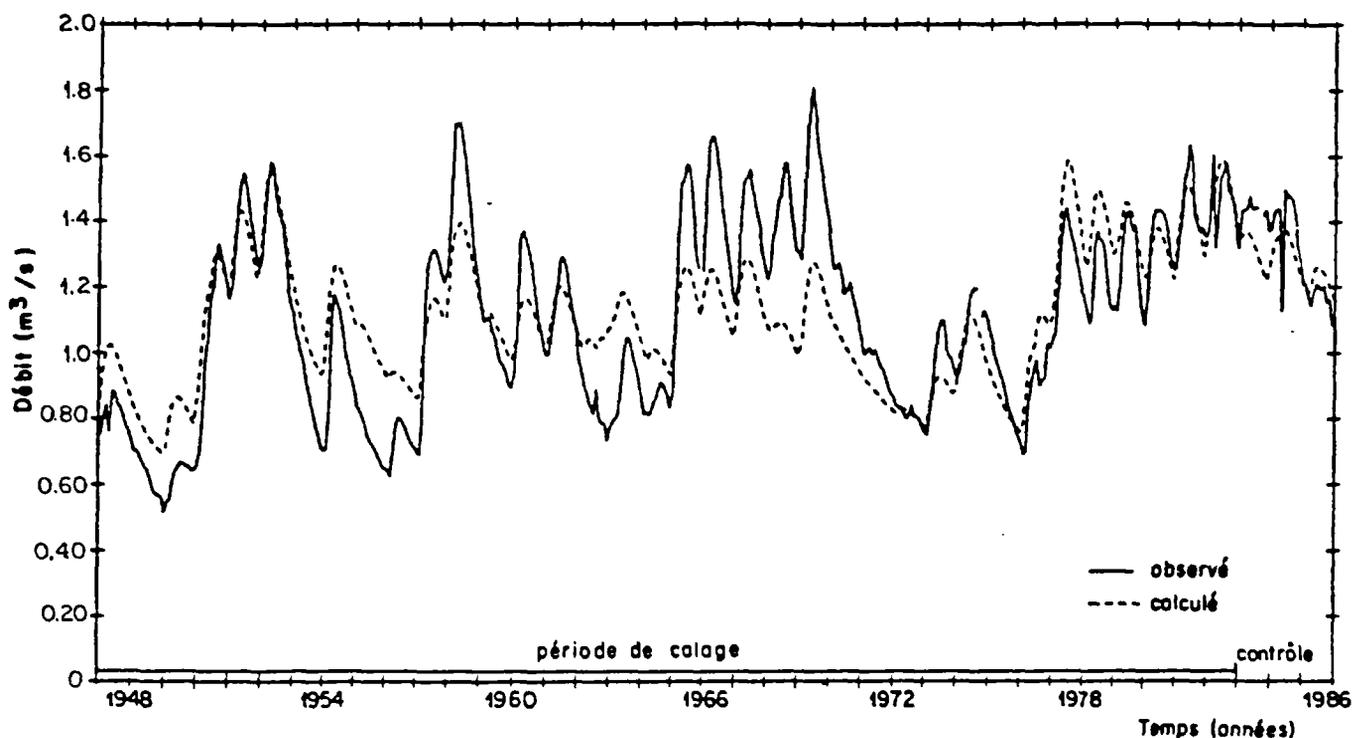


Figure 6.2 - Sources de Provins : simulation des débits  
(extrapolation = 1984, 1985 et 1986)

## 6.2 - MODÉLISATION CHIMIQUE

La modélisation a été réalisée avec le modèle BICHE. Pour caler le modèle sur la période 1947-1983, on a ajusté les paramètres de transfert de nitrates, de façon à obtenir la meilleure simulation possible des concentrations mensuelles observées (on n'a pas cherché à reproduire le flux de nitrates observé, car 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. Les paramètres identifiés sont rassemblés dans les tableaux 6.1 à 6.3.

Tableau 6.1 Coefficient de correction sur les apports et les consommations

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

**Tableau 6.2 Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange**

Réservoirs	Volume d'eau retenue (mm)	Temps de demi-échange (mois)
Superficiel	2 250	3.7
Intermédiaire	1 536	0.80
Souterrain rapide	1 481	instantané
Souterrain lent	1 114	instantané

**Tableau 6.3 Paramètres chimiques divers**

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

L'ajustement est très bon comme le montrent les caractéristiques suivantes :

. Coefficient d'ajustement	=	0.953
. Ecart-type de simulation	=	2.88 mg/l
. Auto-corrélation des écarts	=	0.75
. Nombre d'observations	=	432 mois
. Nombre d'observations "indépendantes"	=	63

C'est ce calage, appelé plus loin "calage de référence" qui servira de référence aux calculs. En fait, en cours d'analyse de sensibilité, on a fixé la correction des besoins à 0 % et on a même obtenu après optimisation un calage légèrement meilleur, appelé par la suite "calage optimal" qui présente un coefficient de corrélation égal à 0.960. Les paramètres identifiés sont donnés dans les tableaux 6.4 à 6.6.

**Tableau 6.4 Coefficient de correction sur les apports et les consommations calage optimal**

Correction globale sur les épandages	+ 10 %
Correction globale sur la minéralisation du sol	+ 10 %
Correction globale sur les besoins des plantes	0 %

**Tableau 6.5 Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange - Calage optimal**

Réservoirs	Volume d'eau retenue (mm)	Temps de demi-échange (mois)
Superficiel	5 422	1.7
Intermédiaire	1 000	instantané
Souterrain rapide	1 000	instantané
Souterrain lent	1 000	instantané

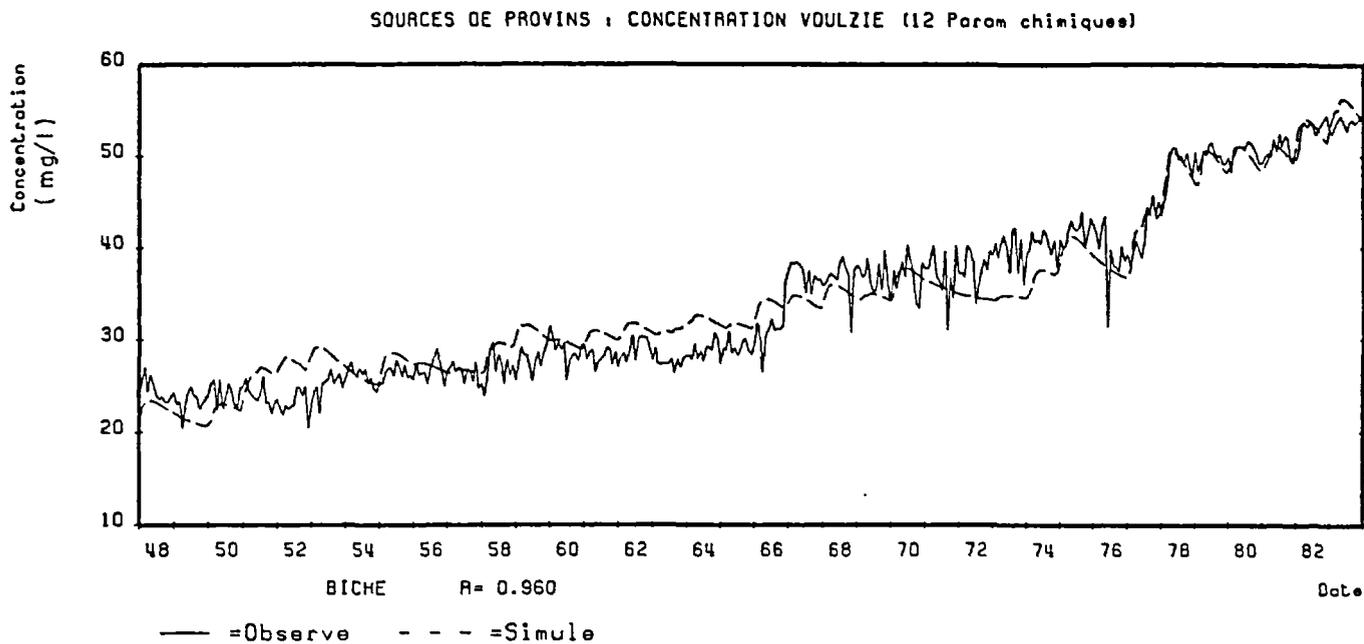
**Tableau 6.6 Paramètres chimiques divers - Calage optimal**

Concentration maximale pour la pluie	74 mg/l
Temps de demi-libération par les racines	instantané (non optimisé)

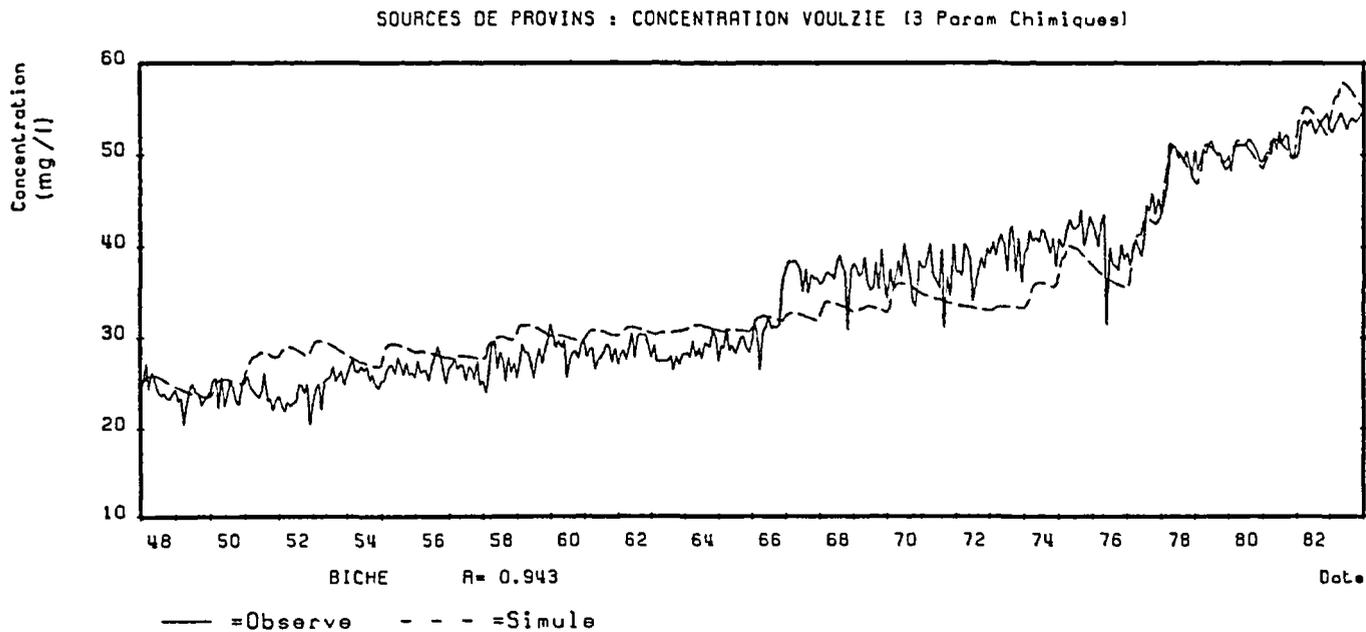
La figure 6.3 montre que le calage obtenu est très bon. Dans un but d'accroissement de la robustesse du modèle, on a également réalisé un autre calage en n'optimisant que 3 paramètres chimiques et en fixant les autres ; en particulier il n'y a aucune correction sur les données agricoles. Le coefficient de corrélation obtenu est alors égal à 0.943 au lieu de 0.960 et la figure 6.4 montre que l'ajustement est pratiquement aussi bon. Les paramètres de ce calage, appelé par la suite "calage 3 paramètres", sont donnés dans les tableaux 6.7 à 6.9. Les seuls paramètres optimisés sont la capacité en eau liée dans le réservoir superficiel FIXRU, le temps de demi-échange dans ce réservoir MELRU et la capacité de dilution SATPL.

**Tableau 6.7 Coefficient de correction sur les apports et les consommations "Calage 3 paramètres"**

Correction globale sur les épandages	0 %
Correction globale sur la minéralisation du sol	0 %
Correction globale sur les besoins des plantes	0 %



**Figure 6.3 - Sources de la Voulzie - simulation des concentrations en nitrates : calage 12 paramètres chimiques**



**Figure 6.4 - Sources de la Voulzie - simulation des concentrations en nitrates : calage 3 paramètres chimiques**

**Tableau 6.8 Volumes d'eau retenue et temps de demi-échange - Calage 3 paramètres**

Réservoirs	Volume d'eau retenue (mm)	Temps de demi-échange (mois)
Superficiel	6 000	7.6
Intermédiaire	1 000	instantané
Souterrain rapide	1 000	instantané
Souterrain lent	1 000	instantané

**Tableau 6.9 Paramètres chimiques divers - Calage 3 paramètres**

Concentration maximale pour la pluie	71 mg/l
Temps de demi-libération par les racines	instantané

Les caractéristiques de l'ajustement sont les suivantes :

- . Coefficient d'ajustement 0.943
- . Ecart-type de simulation 3.16 mg/l
- . Auto-corrélation des écarts 0.80
- . Nombre d'observations "équivalentes" 48

### 6.3 - ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU MODÈLE

Le calage est réalisé globalement à partir d'un bilan entre les apports et les consommations de nitrates sur le bassin suivi d'un schéma de transferts vers les exutoires. Cependant, tout en étant global, le modèle n'est pas une simple boîte noire et on peut analyser son comportement et les différents termes du bilan. Les figures 6.5 et 6.6 permettent de visualiser, en somme annuelle, sur la période 1948-1983 les éléments suivants du bilan :

- \* Pluie et pluie efficace
- \* Apport en nitrates et consommation
- \* Excédents en nitrates et flux sortant

- \* Flux en nitrates total et flux de la première composante souterraine
- \* Stock en nitrates : immobilisé dans le réservoir superficiel et dans le réservoir intermédiaire
- \* Stock en nitrates immobilisé dans les réservoirs souterrains et au total dans les réservoirs souterrains et intermédiaires.

Ces figures montrent en particulier qu'une augmentation des excédents à partir de 1976 n'induit une augmentation des concentrations à l'exutoire qu'à partir de 1977 et surtout de 1978. Les variations de concentration à court terme (6 mois) sont dues uniquement aux variations climatiques.

#### **6.4- CALCUL DES DÉRIVÉES ET ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES**

Dans un but de compréhension et en préliminaire aux déterminations des écarts-types, on a calculé les dérivées des concentrations par rapport aux paramètres suivants :

- \* capacité fixe dans le réservoir superficiel
- \* capacité fixe dans le réservoir intermédiaire
- \* capacité fixe dans le réservoir souterrain
- \* concentration initiale en phase libre
- \* concentration initiale en phase fixe
- \* concentration maximale pour la pluie
- \* correction d'épandage
- \* correction de minéralisation
- \* correction de besoins.

Ces dérivées ont été calculées tout simplement en réalisant 2 calculs de la concentration  $C$  pour 2 valeurs très proches de la valeur de référence d'un paramètre  $p$ . On obtient alors la dérivée par le rapport  $dc/dp$  de l'écart de concentration  $dc$  à l'écart du paramètre  $dp$ .

Les figures 6.7 à 6.9 présentent les dérivées sur la période 1947 à 1983. Elles mettent en évidence l'influence relative de chaque paramètre et les relations entre les effets de ces paramètres.

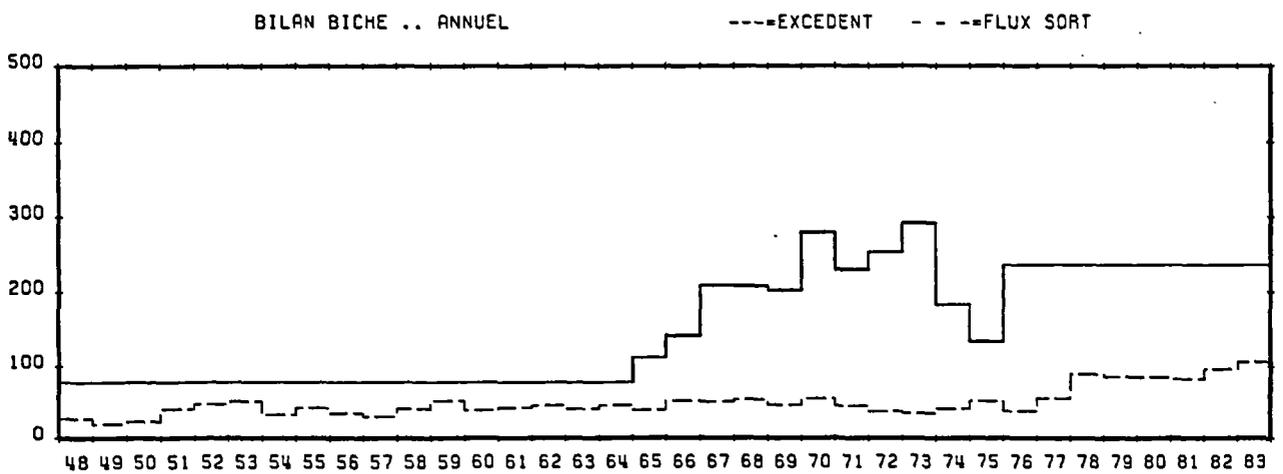
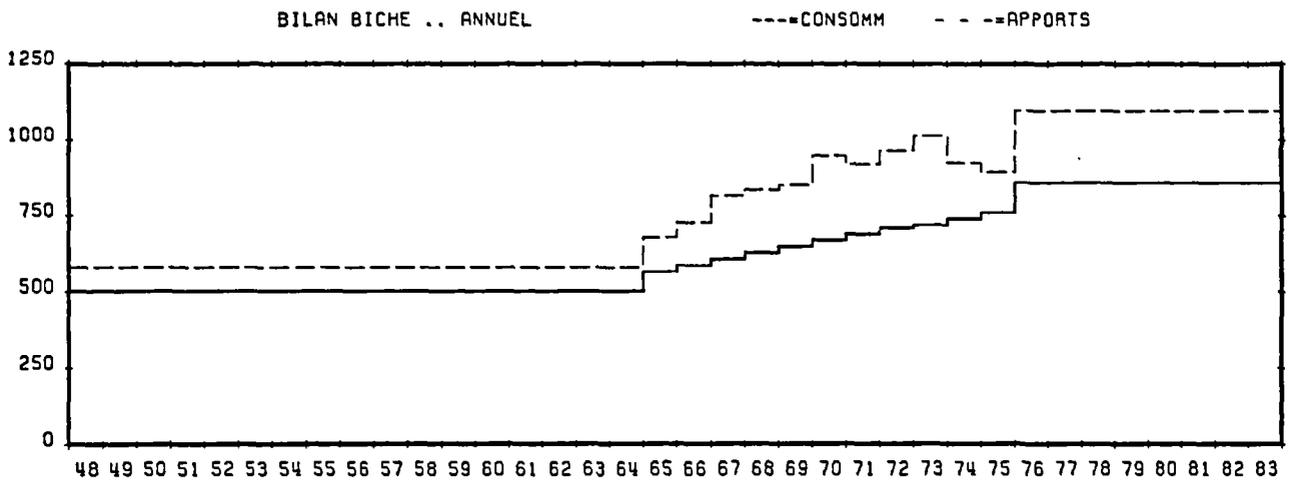
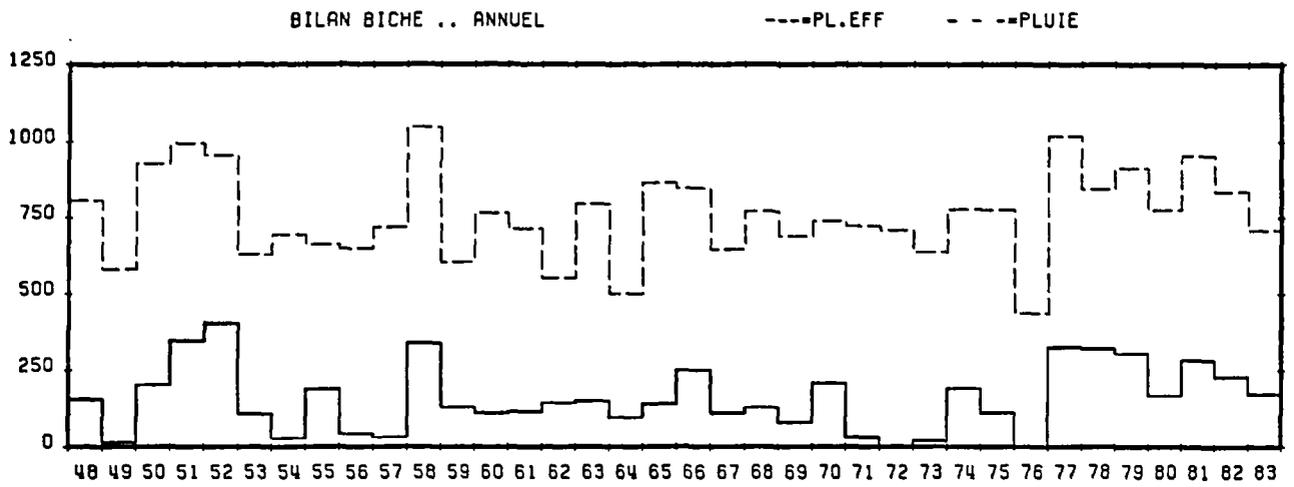


Figure 6.5 - Sources de la Voulzie : Décomposition du bilan annuel

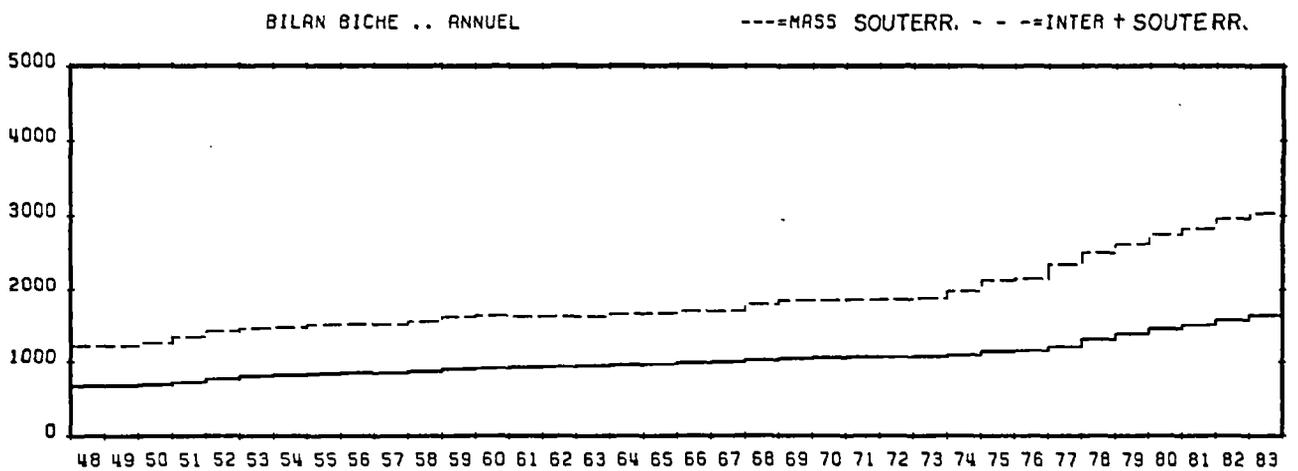
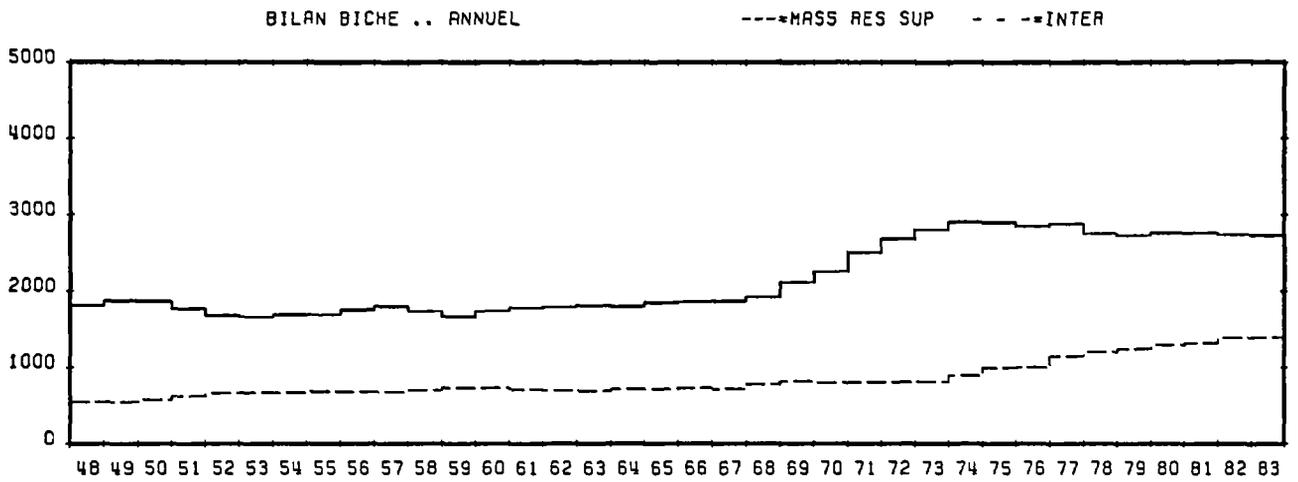
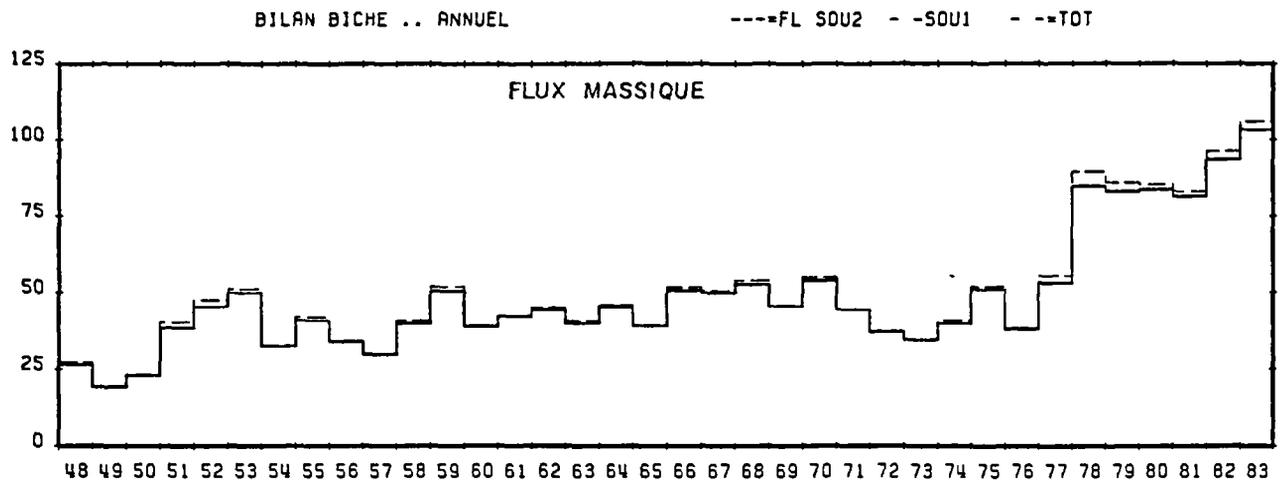
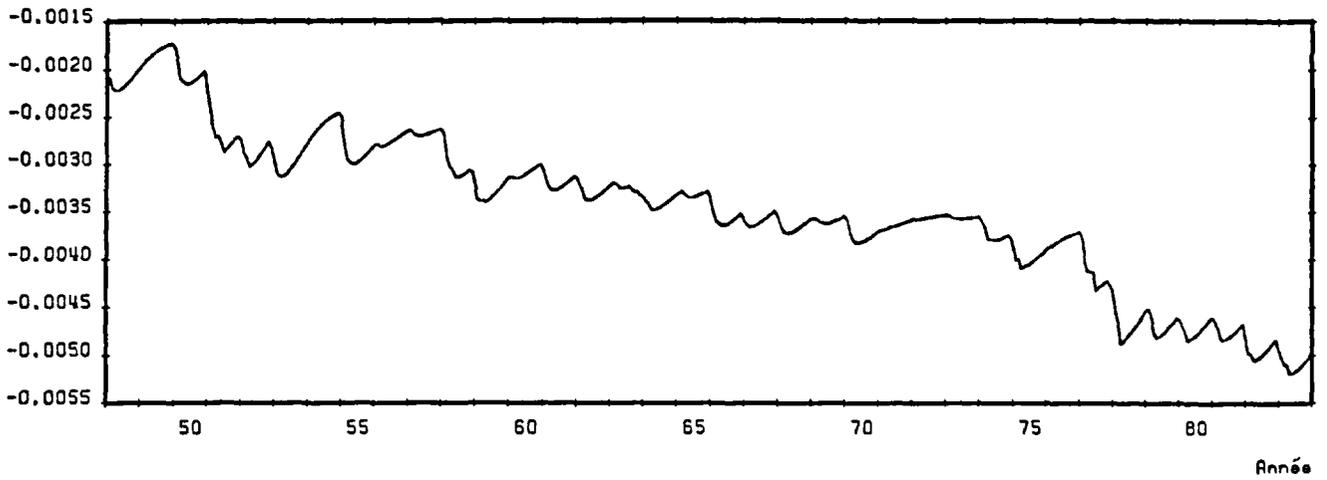
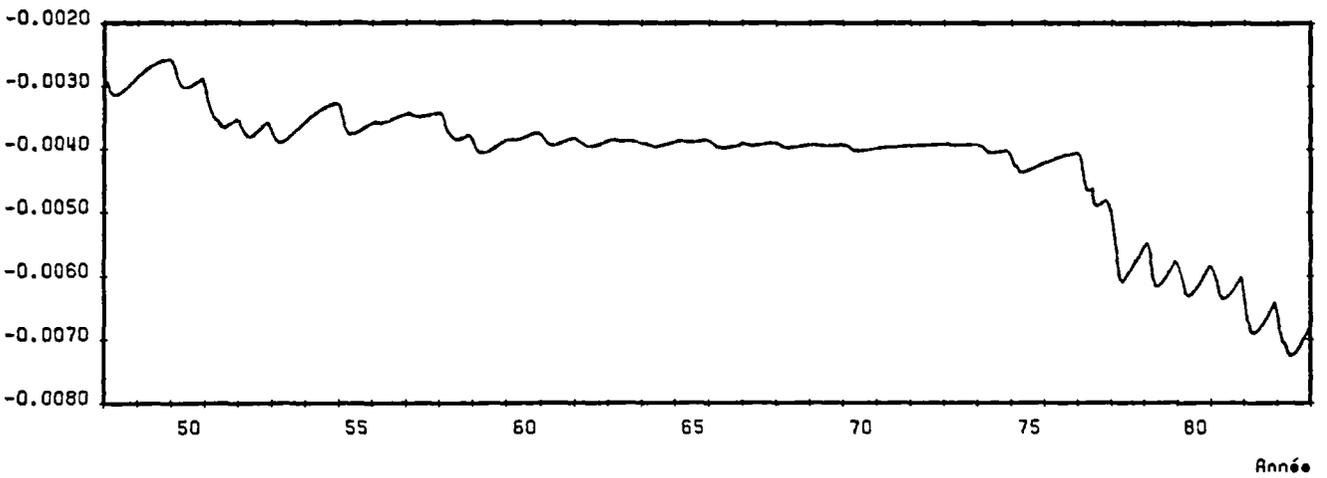


Figure 6.6 - Sources de la Voulzie : Décomposition du bilan annuel (suite)

INFLUENCE DE LA CAPACITE FIXE DANS LA R.U. VOULZIE



INFLUENCE DE LA CAPACITE FIXE DANS LE RESERVOIR : H VOULZIE



INFLUENCE DE LA CAPACITE FIXE DANS LE RESERVOIR : G1 VOULZIE

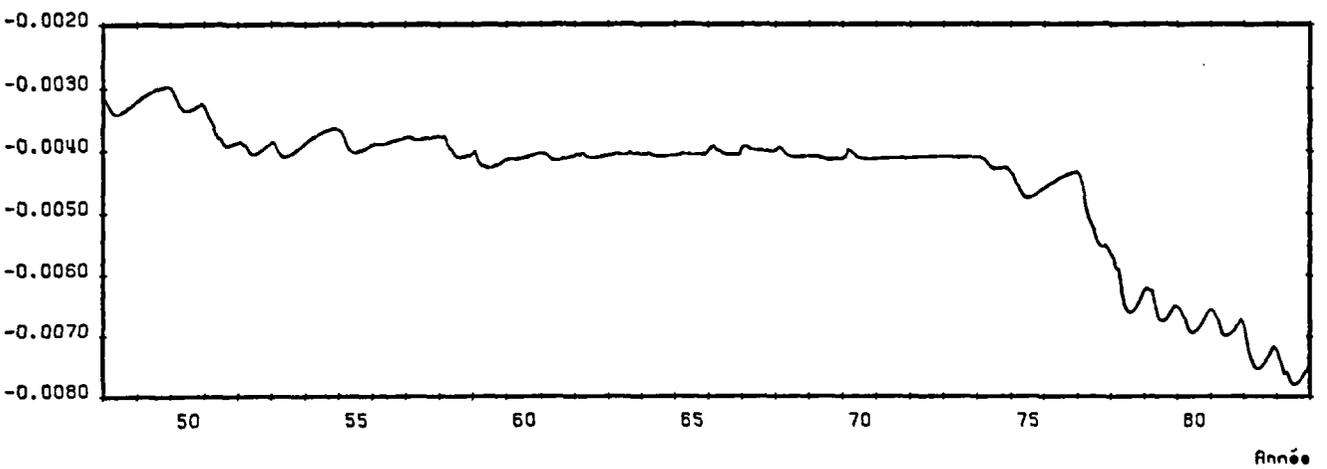
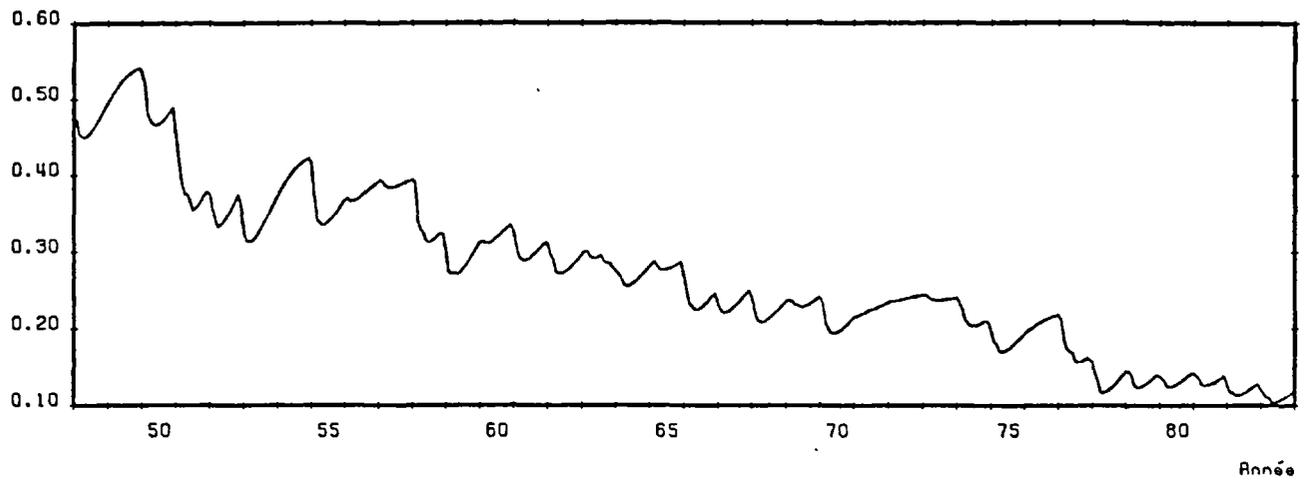
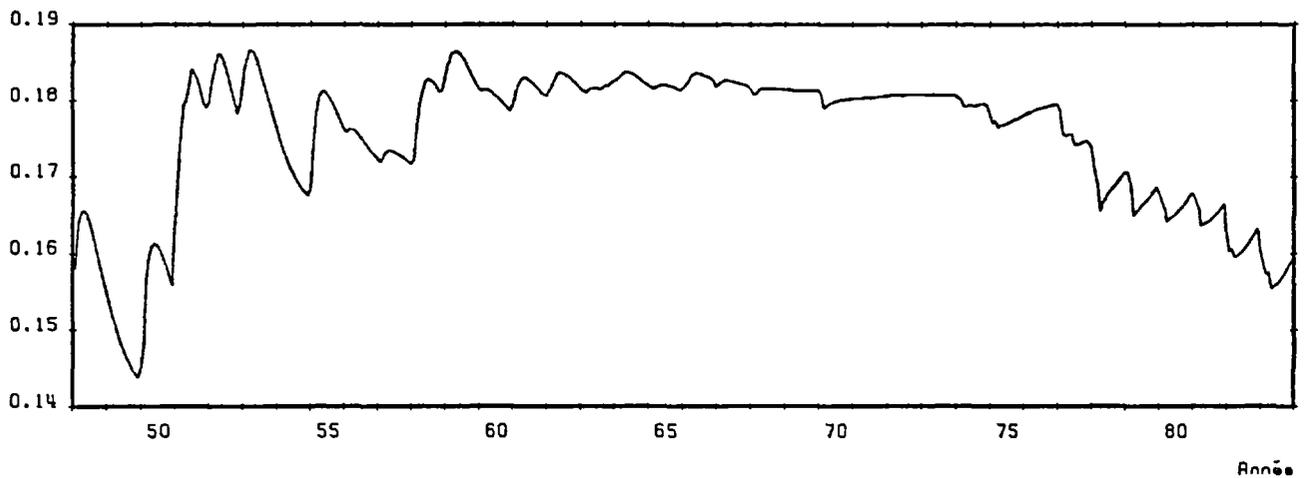


Figure 6.7 - Sources de la Vouzie : Dérivées par rapport aux paramètres

VOULZIE : INFLUENCE CONCENTRATION LIBRE INITIALE



INFLUENCE CONCENTRATION FIXE INITIALE VOULZIE



INFLUENCE CONCENTRATION A SATURATION DE LA PLUIE VOULZIE

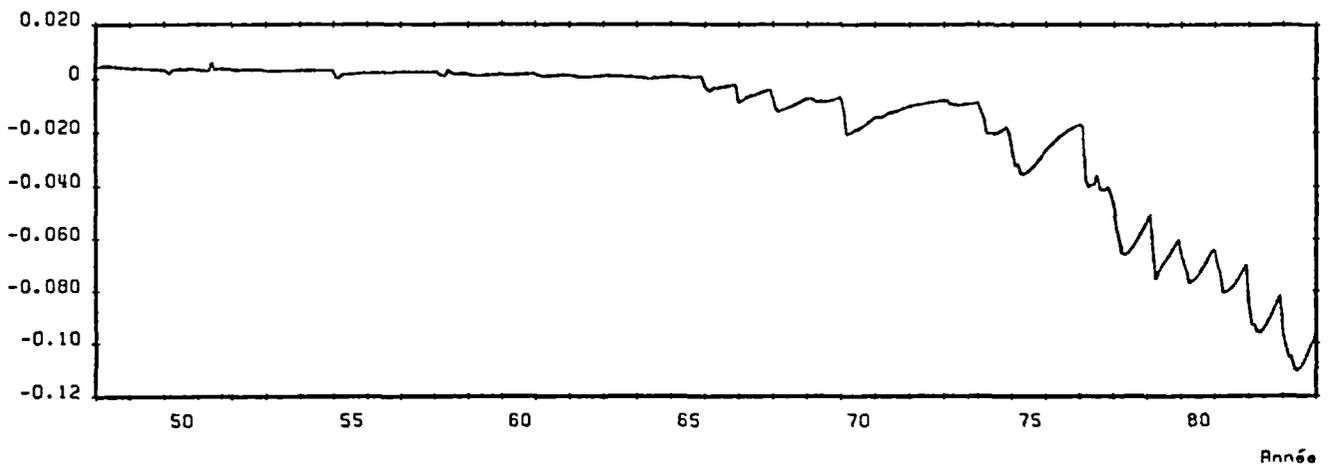
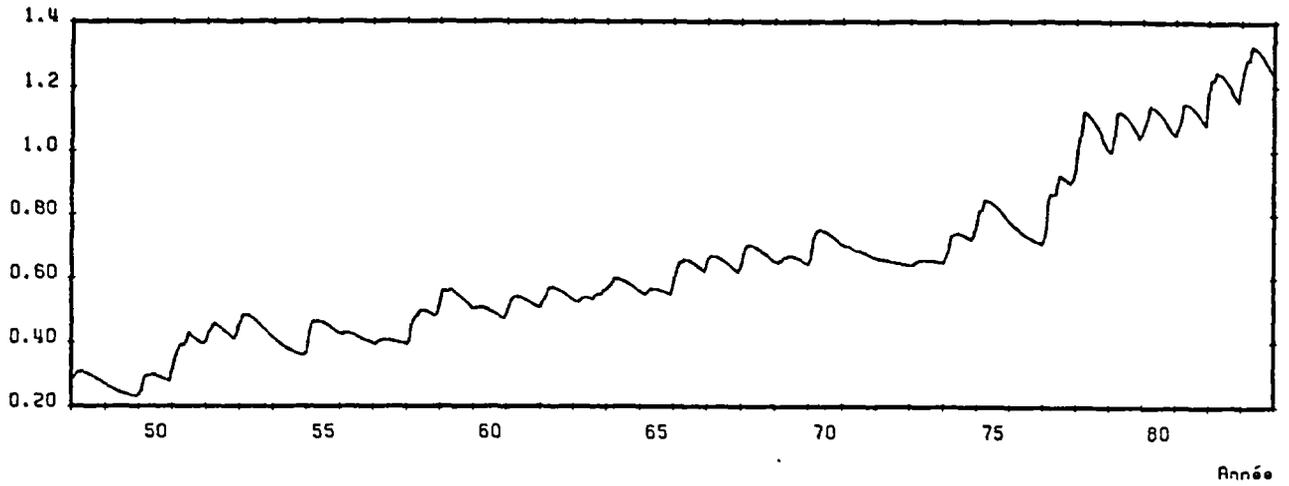
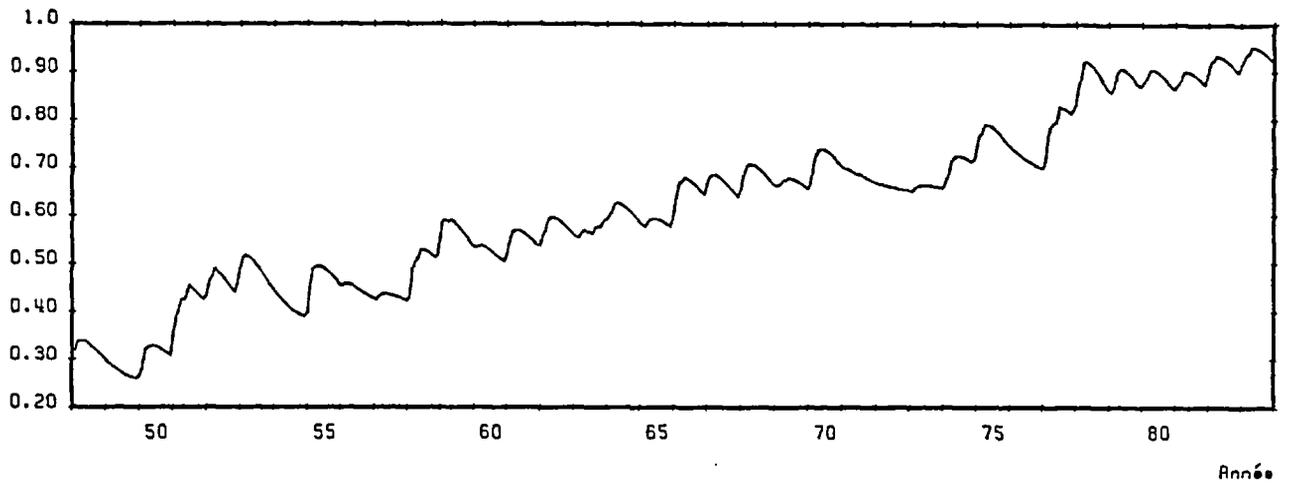


Figure 6.8 - Sources de la Voultz : Dérivées (suite)

INFLUENCE DE LA CORRECTION D'EPANDAGE : VOULZIE



INFLUENCE DE LA CORRECTION DE MINERALISATION : VOULZIE



INFLUENCE DE LA CORRECTION DES BESOINS : VOULZIE

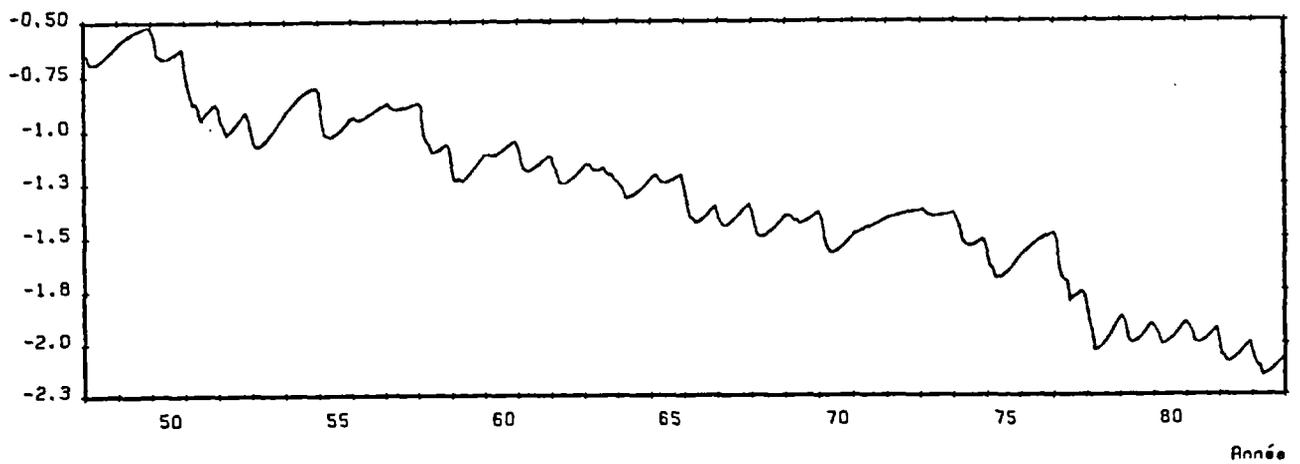
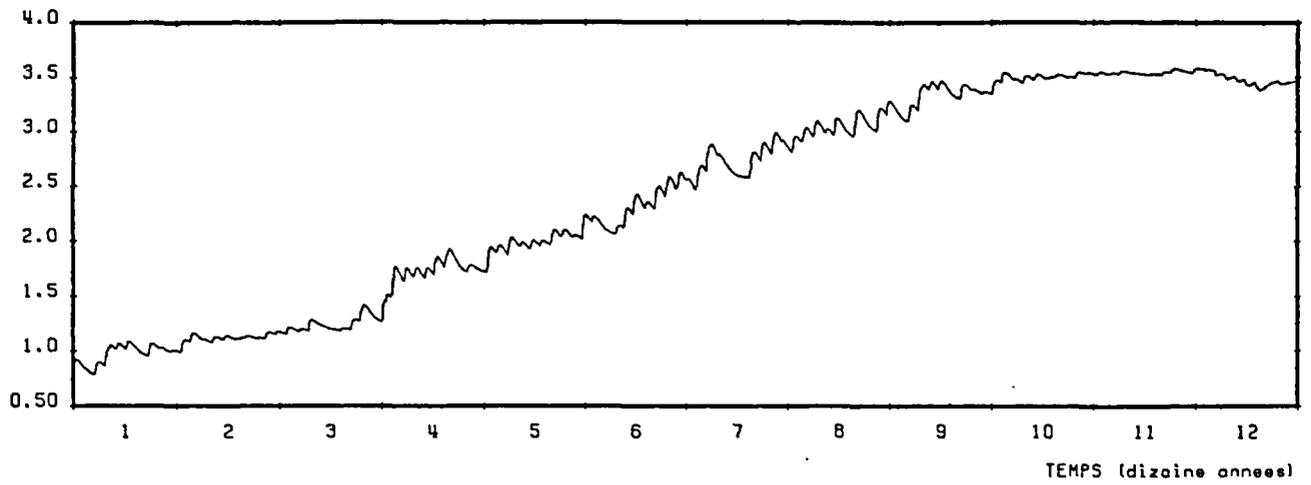
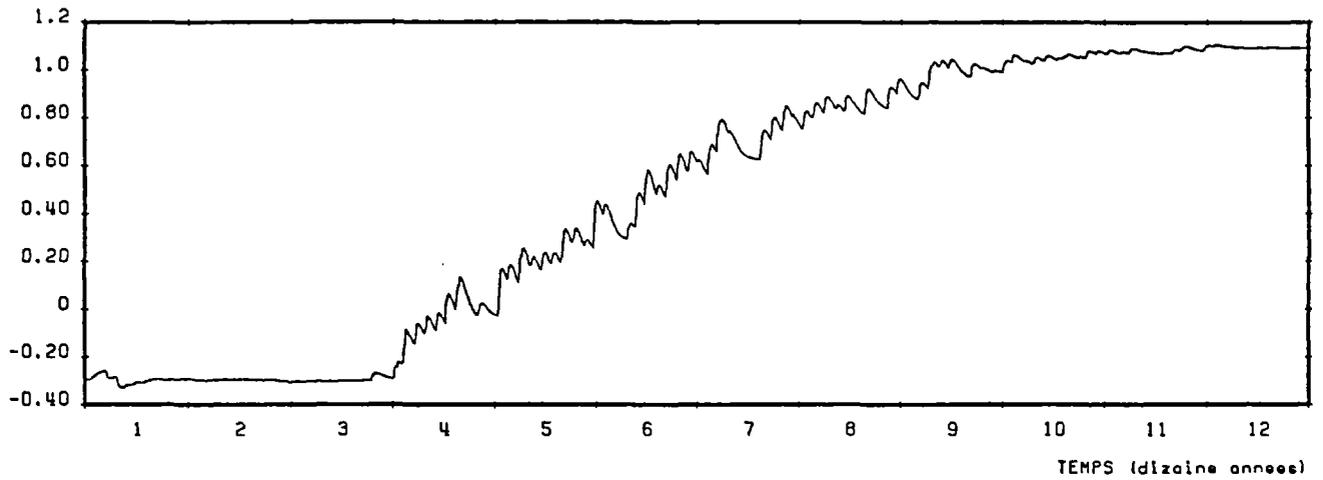


Figure 6.9 - Sources de la Voulzie : Dérivées (suite)

VOULZIE : INFLUENCE TEMPS DE MELANGE SUPERFICIEL



VOULZIE : INFLUENCE COEFFICIENT SATURATION PLUIE



VOULZIE : INFLUENCE VOLUME EAU LIEE RESERVOIR SUPERFICIEL

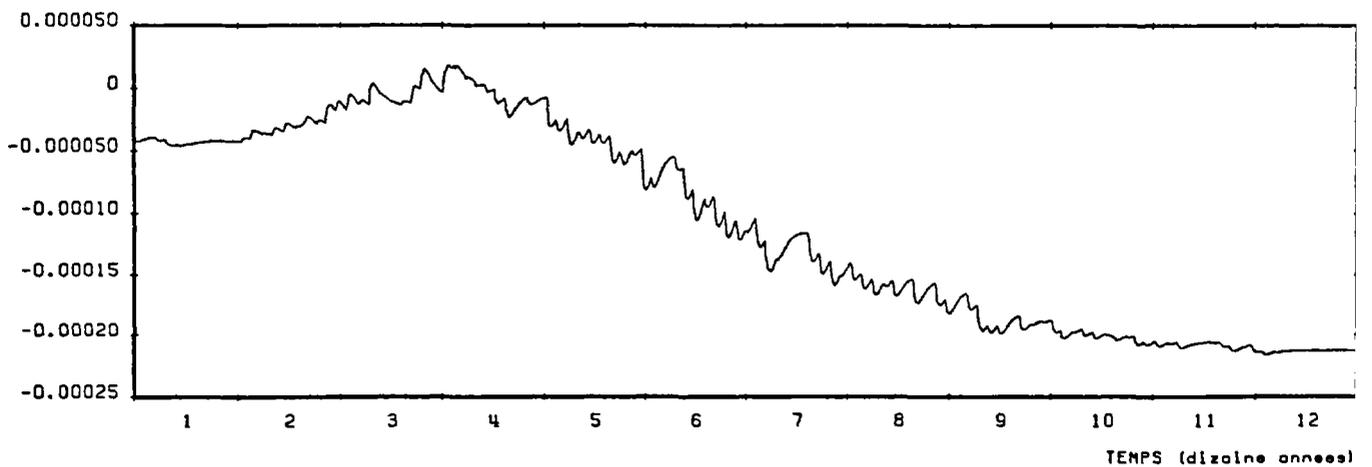
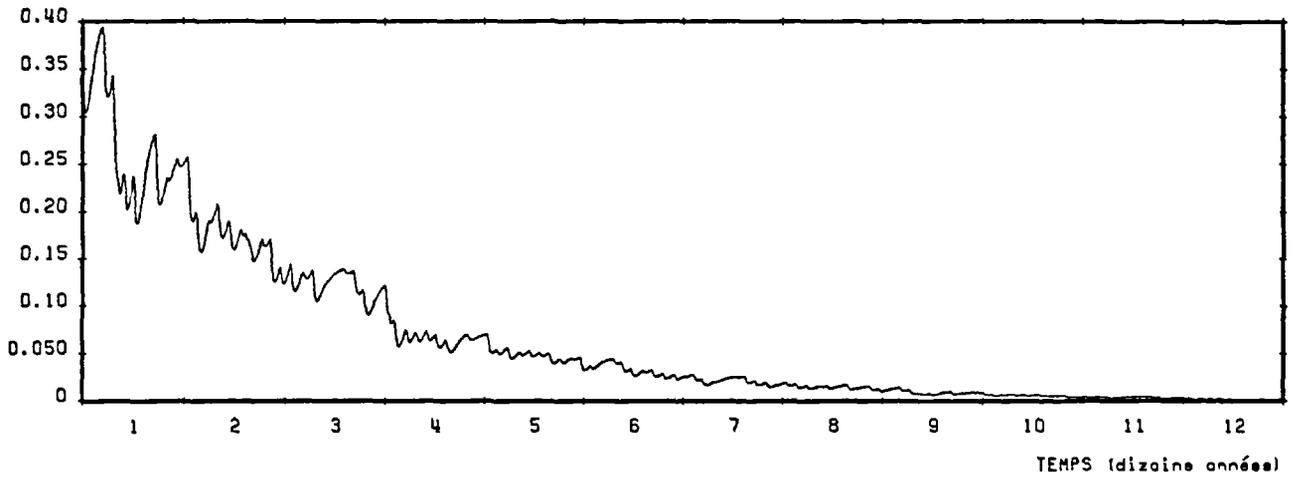


Figure 6.10 - Sources de la Voulzie : Dérivées (suite)

VOULZIE : INFLUENCE CONCENTRATION LIBRE INITIALE



VOULZIE : INFLUENCE CONCENTRATION FIXE INITIALE

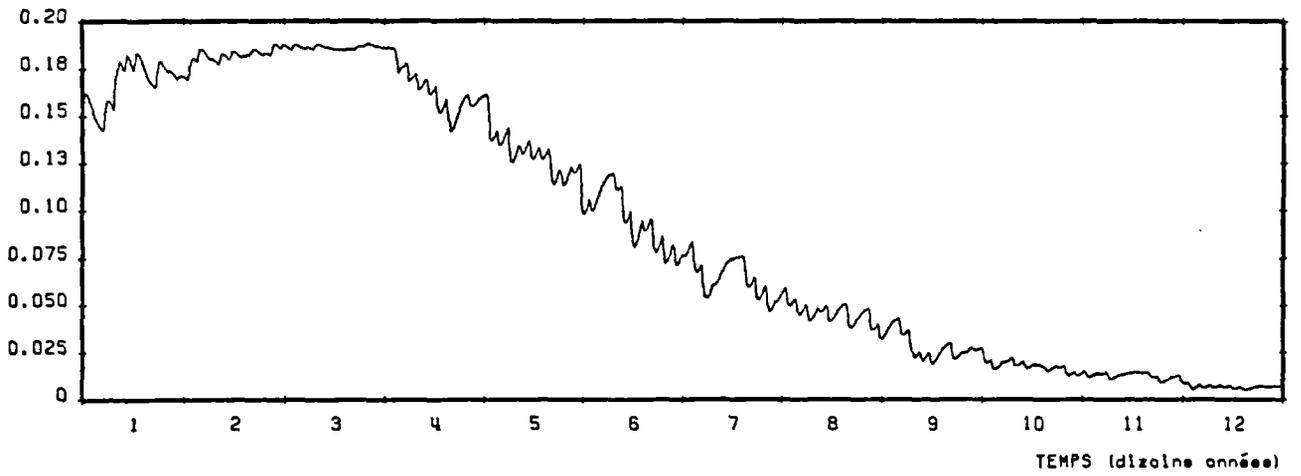


Figure 6.11 - Sources de la Voulzie : Dérivées (suite)

Par exemple, on voit nettement que les capacités fixes des 3 réservoirs ont des effets très similaires (surtout pour les réservoirs intermédiaires et souterrains). On voit aussi l'influence de la capacité de dilution de la pluie qui se fait surtout sentir à partir de 1977.

Les relations entre les 3 corrections sont également bien mises en évidence : les corrections globales d'épandage ou de minéralisation ont des effets quasi-semblables alors que, bien entendu, la correction globale des besoins a un effet inverse. **On pressent dès à présent que les paramètres étant très liés, les incertitudes de calages seront considérables.** Pour mieux identifier les influences à long terme, on a également représenté sur les figures 6.10 et 6.11 les influences des paramètres pendant 120 ans, c'est-à-dire en prolongeant la période observée par 80 années ayant des épandages identiques à la période 1976-1983 et des pluies identiques à la séquence des pluies 1907-1983. Les paramètres analysés sont :

- \* temps de demi-échange dans le réservoir superficiel
- \* concentration maximale pour la pluie
- \* capacité fixe dans le réservoir superficiel
- \* concentration initiale en eau libre
- \* concentration initiale en eau fixe.

On voit ainsi nettement l'influence du temps de mélange et de la capacité de dilution de la pluie qui produisent des augmentations de concentrations aux exutoires pendant plus de 80 ans alors que la capacité en eau liée provoque une diminution pendant la même période avant d'arriver à un équilibre. Les concentrations initiales ont également des effets pendant des durées très longues surtout pour la concentration initiale en eau liée.

## 6.5 - CALCUL DES ÉCARTS-TYPES DES PARAMÈTRES AVEC 12 VARIABLES

Un premier calcul a été réalisé à partir de la simulation de référence en prenant en compte l'influence des 12 variables suivantes :

MEL RU	
MEL H	Temps de demi-mélange dans les réservoirs Supérieur, Intermédiaire,
MEL G1	Souterrain 1, Souterrain 2
MEL G2	
SATPL	Concentration maximale dans la pluie
% BESO	Correction globale des besoins
FIX RU	
FIX H	Capacité en eau liée (fixée) dans les réservoirs
FIX G1	Supérieur, Intermédiaire, Souterrain 1, Souterrain 2
FIX G2	

C LIBO Concentration initiale en phase mobile (libre) et liée (fixée)  
 C FIXO

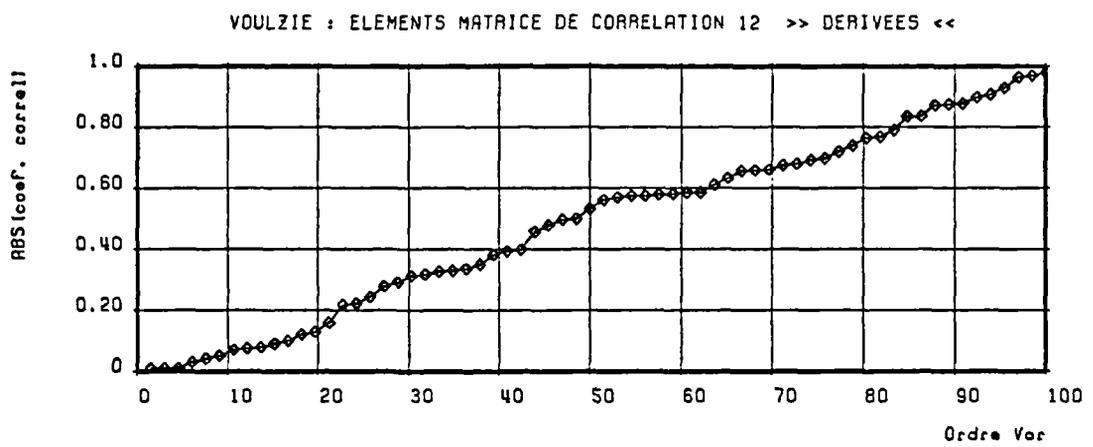
Les moyennes et écarts-types des influences de ces paramètres (dérivées) sont les suivants :

Dérivées	Moyenne	Ecarts-types	Diagnostic
MEL RU	- 0.18	0.13	Meilleure consommation
MEL H	0.46	0.44	Moins d'amortissement des variations des excédents
MEL G1	0.28	0.57	
MEL G2	0.02	0.02	
SAT PL	- 0.02	0.03	-
% BESO	- 1.3	0.41	Plus de consommation
FIX RU	- 0.003	0.0008	Plus d'amortissement
FIX H	- 0.004	0.0010	
FIX G1	- 0.004	0.0010	
FIX G2	- 0.003	0.0008	
C LIBO	0.27	0.11	Départ plus haut
C FIXO	0.17	0.009	

Ces 12 dérivées sont fortement corrélées puisque, comme le montre la figure 6.12, 40 % des 66 coefficients de corrélation entre variables ont des valeurs absolues supérieures à 0.6 et même 16 % supérieures à 0.80. Ceci est confirmé par l'analyse en composantes principales de ces dérivées qui montre que la seule première composante explique 60 % de la variance et les 3 premières composantes 90 % de la variance. La figure 6.13 présente les projections de ces dérivées sur les composantes 1 et 2 puis 1 et 3. On voit nettement que la première composante regroupe d'une part, toutes les capacités en eau liée (positivement) et d'autre part, tous les temps de mélange (négativement).

La résolution des calculs d'écarts-types donne les résultats suivants pour les paramètres :

Paramètre	Valeur centrale	Ecart-type	t de Student
MEL RU	3.7	26	0.1
MEL H	0.8	3.3	0.2
MEL G1	0.15	1.2	0.1
MEL G2	0.15	34	0.0
SAT PL	152	117	1.3
% BESO	3	54	0.1
FIX RU	2 550	41 000	0.1
FIX H	1 536	13 000	0.1
FIX G1	1 481	5 000	0.3
FIX G2	1 114	783	1.4
C LIBO	10	32	0.3
C FIXO	10	265	0.0



**Figure 6.12 - Sources de la Voulzie : Coefficients de corrélation entre les influences des dérivées par rapport aux 12 paramètres**

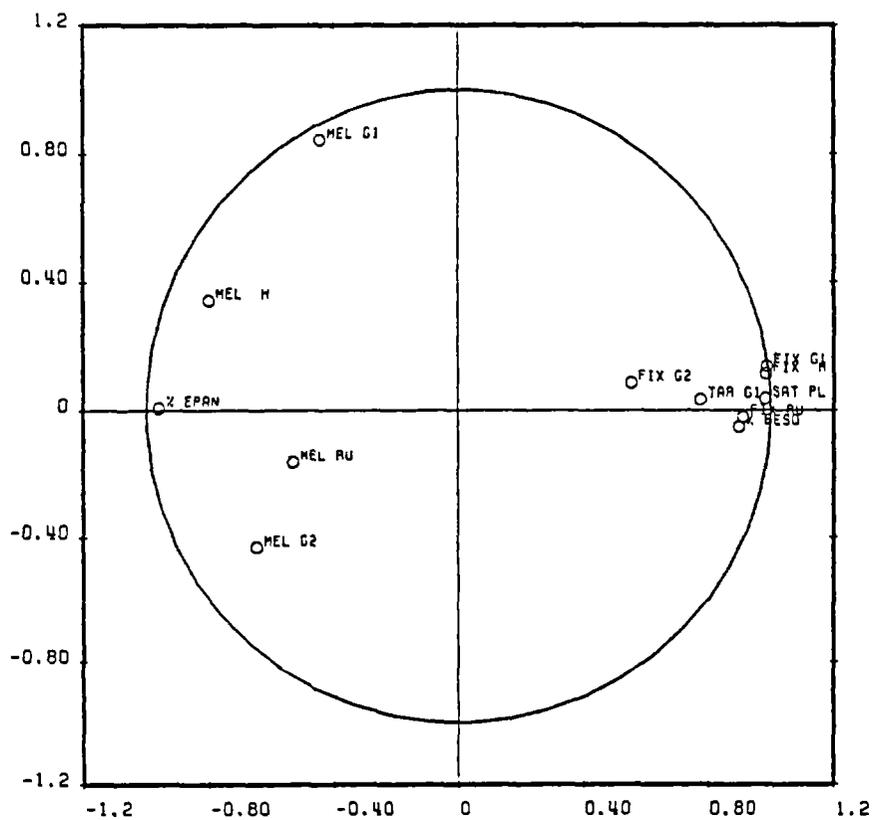
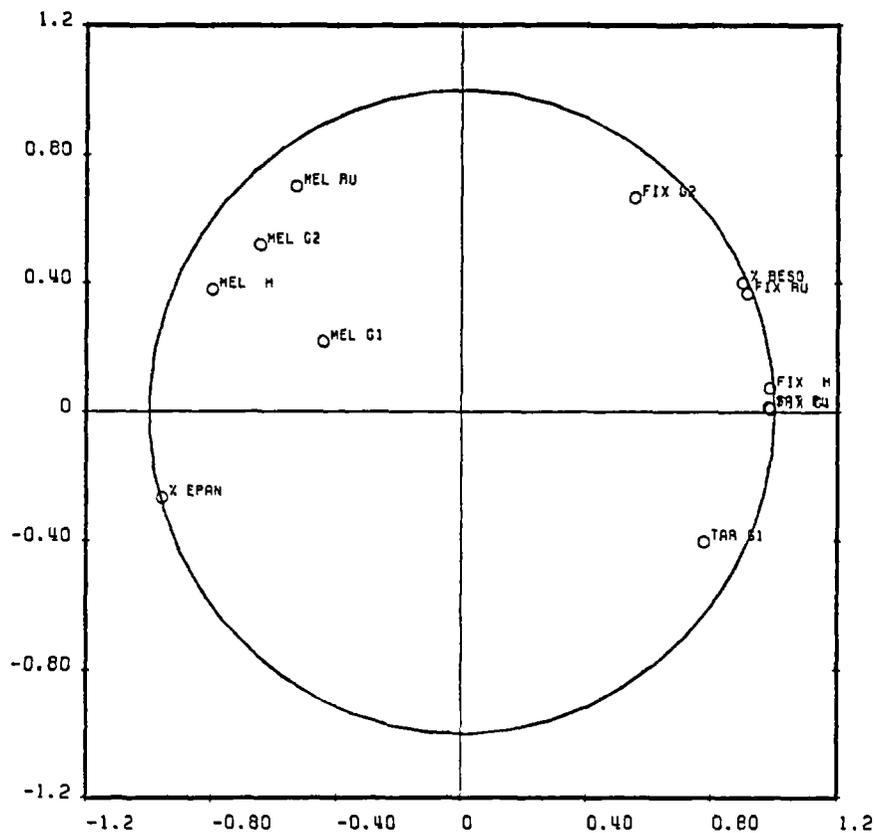
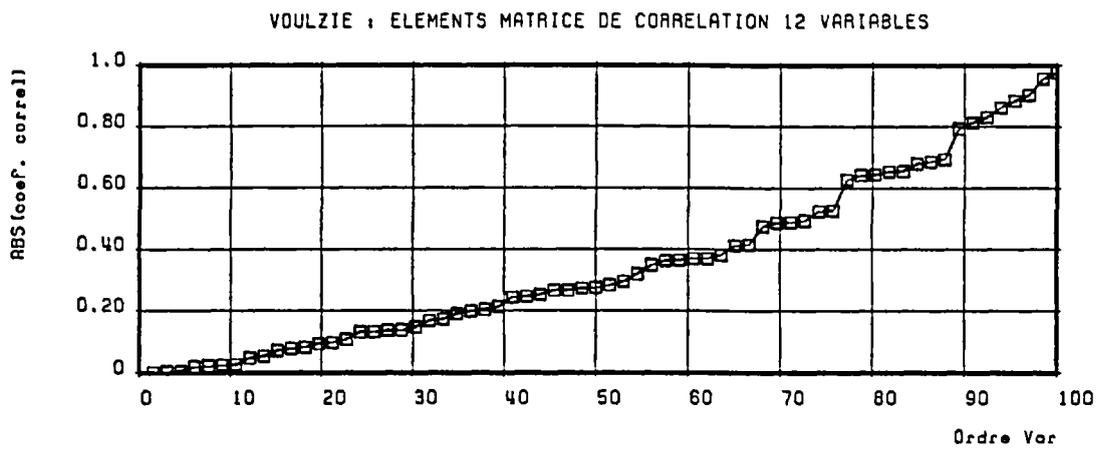
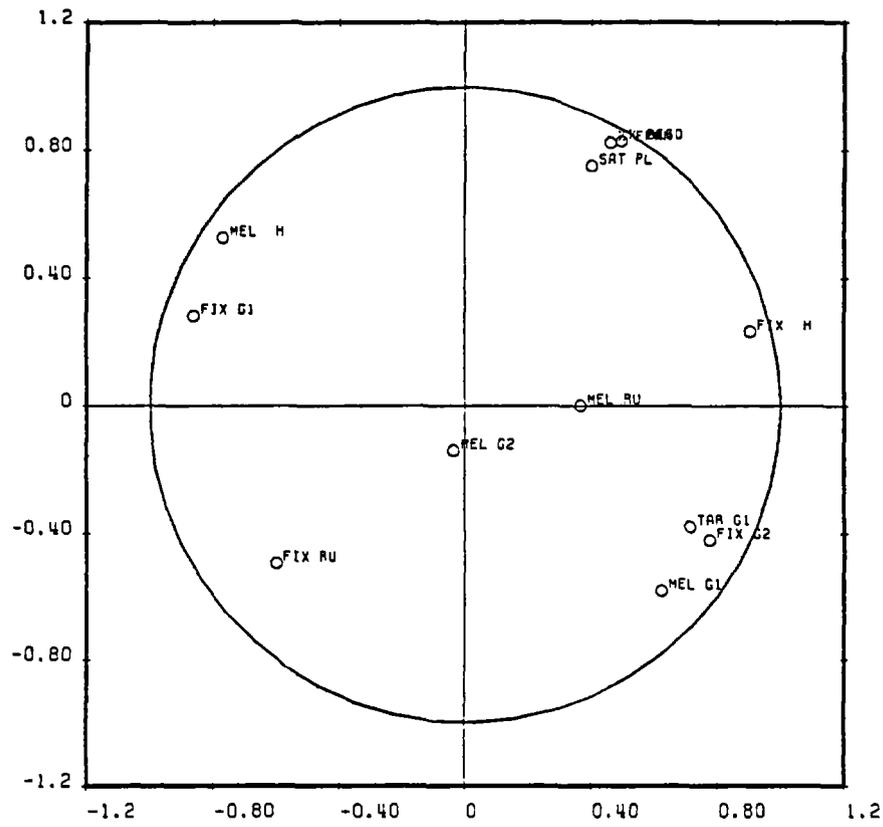


Figure 6.13 - Sources de la Voulzie : Analyse en composantes principales de l'influence des dérivées



**Figure 6.14 - Sources de la Voulzie : matrice de corrélation des paramètres (12 variables)**

SOURCES DE PROVINS CONCENTRATION VOULZIE ANALYSE PARAMETRES COMPOS 1 ET 2



SOURCES DE PROVINS CONCENTRATION VOULZIE ANALYSE PARAMETRES COMPOS 1 ET 3

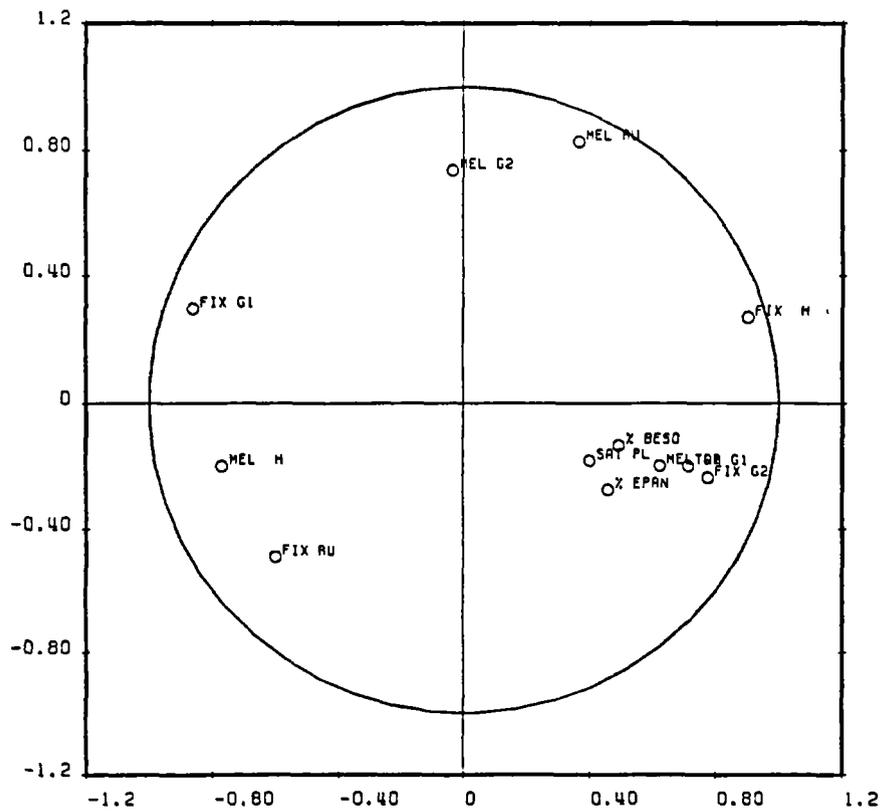


Figure 6.15 - Analyse en composantes principales de la matrice de corrélation des paramètres

Il apparaît ainsi très nettement que les écarts-types sont tous extrêmement grands ce qui conduit à des valeurs du test de Student très faible. Aucun paramètre n'a une influence significativement différente de zéro en présence d'autres paramètres (rappelons qu'un paramètre en pratique a une influence significativement différente de zéro au seuil de confiance de 95 % si la valeur du t de Student est supérieure à 2 en valeur absolue). **Cette non significativité est due au fait que les paramètres ont des influences fortement auto-corrélées** comme on vient de le montrer et sont donc trop nombreux (compte tenu également du nombre d'observations indépendantes équivalentes). La matrice d'auto-corrélation entre paramètres a également été calculée et la figure 6.14 montre que 23 % des 66 coefficients de corrélation entre paramètres ont une valeur absolue supérieure à 0.6 et 10 % ont une valeur supérieure à 0.80.

La figure 6.15 montre les projections des 12 paramètres sur les 3 premières composantes principales.

### 6.6 - CALCUL DES ÉCARTS-TYPES AVEC 3 VARIABLES

Compte tenu des résultats précédents et au vu de la matrice de corrélation des dérivées, on a fortement diminué le nombre des paramètres chimiques puisqu'on n'a admis en particulier aucune correction globale sur les entrées et des temps de mélanges quasi-instantanés dans tous les réservoirs sauf le réservoir superficiel. On a montré précédemment que le calage obtenu était pratiquement aussi bon. Le calcul automatique des écarts-types donne alors les résultats suivants :

Paramètre	Valeur centrale	Ecart-type	t de Student
MEL RU	7.6	0.6	13.4
SAT PL	71	4.2	17.0
FIX RU	6 000	27 800	0.2

Les 2 premiers paramètres ont alors une influence nettement significative (t de Student de 13 et 17 respectivement) alors que le 3ème n'a pas une influence nette. En fait, ce paramètre n'a pas d'influence nette aux alentours de sa valeur centrale 6000, ce qui donne un écart-type (théorique) de 27 800. En fait, son effet serait très peu différent s'il était augmenté considérablement, mais il ne devrait pas être diminué en dessous de 2 000 comme le montre la figure 6.16 qui présente les isovaleurs du coefficient de corrélation quand on fait varier les paramètres MEL RU et FIX RU d'une part et MEL RU et SAT PL d'autre part. On voit ainsi nettement apparaître la corrélation entre les paramètres MEL RU et SAT PL (coefficient de corrélation = 0.72).

### 6.7 - CALCUL DES ÉCARTS-TYPES DE SIMULATION

Les intervalles de confiance à 95 % ont été calculés successivement pour les 2 calages, y compris en extrapolant la période observée et en la prolongeant pendant 80 années en reproduisant périodiquement la séquence des pluies de 1907 à 1983 et en supposant les mêmes épandages et besoins en nitrates que pendant la période 1976-1983. La figure 6.17 montre les intervalles de confiance à 95 % obtenus pour les 2 calages : 3 paramètres ou 12 paramètres. Il apparaît nettement que les intervalles de confiance sont comparables pendant la période d'observation (1947-1983),

mais qu'ils sont extrêmement différents pendant la période d'extrapolation de 80 années. Avec le calage à 3 paramètres, la fourchette d'incertitude est de 30 mg/l environ après 30 ans alors qu'avec le calage à 12 paramètres elle atteint déjà 200 mg et continue à s'accroître énormément. **On voit ainsi très nettement le manque de robustesse en extrapolation d'un modèle présentant des paramètres fortement corrélés.** Par contre, pendant la période d'observation, les risques sont nettement moins importants. La figure 6.18 montre cependant que les 2 extrapolations obtenues avec les 2 jeux de paramètres divergent après 30 ans d'extrapolation puisque dans un cas les concentrations tendent vers 100 mg/l et dans l'autre vers 150 mg/l. On ne peut pas affirmer que le calage avec 3 paramètres donne forcément de meilleurs résultats en extrapolation mais on peut affirmer qu'il est moins dangereux. En termes simples : ne ne sait pas si les épandages et besoins sont connus à 10 % près ; mais puisqu'on peut caler aussi bien le modèle il vaut mieux n'introduire aucune correction plutôt que de laisser le modèle déterminer une correction arbitraire qui n'améliorerait le calage que de manière non significative mais serait dangereux en extrapolation. Dans ce dernier cas, on risquerait par exemple, pour des besoins très semblables, d'obtenir des extrapolations très différentes et inexplicables, ce qui ne se produirait pas dans le premier.



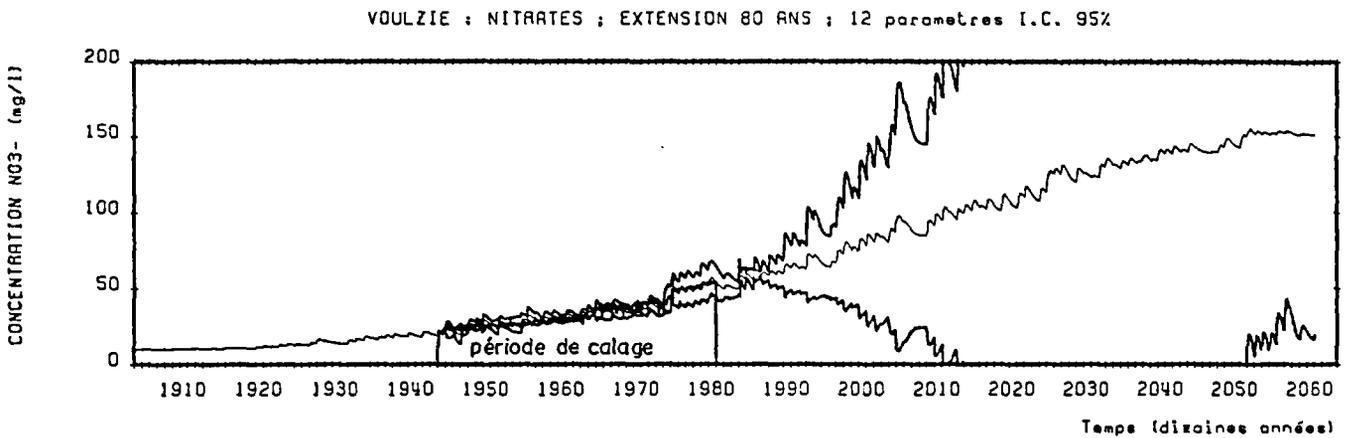
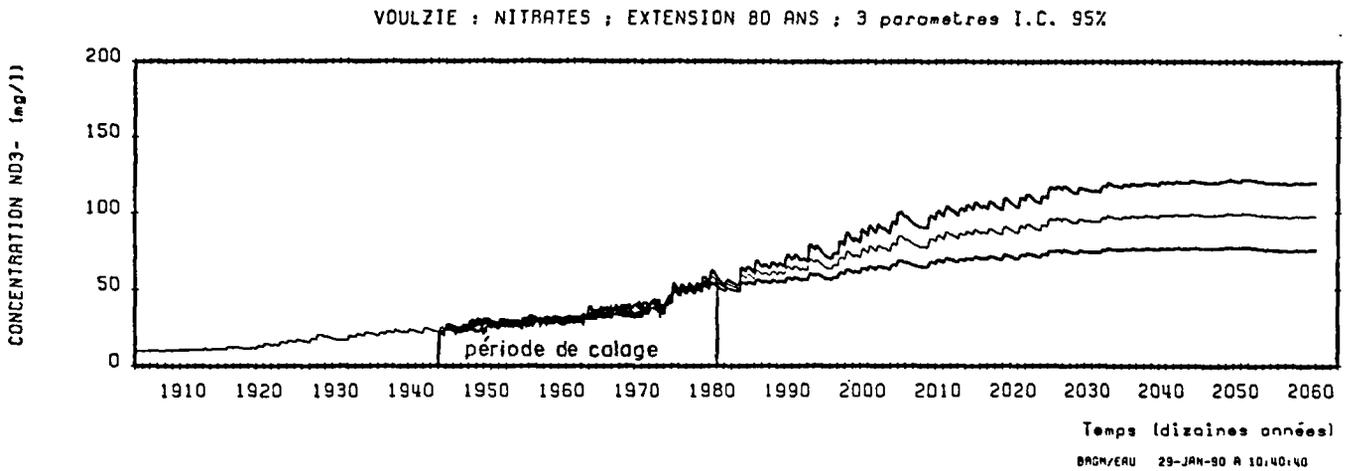


Figure 6.17- Sources de la Vouizie : Calcul des intervalles de confiance de simulation avec 12 et avec 3 paramètres chimiques

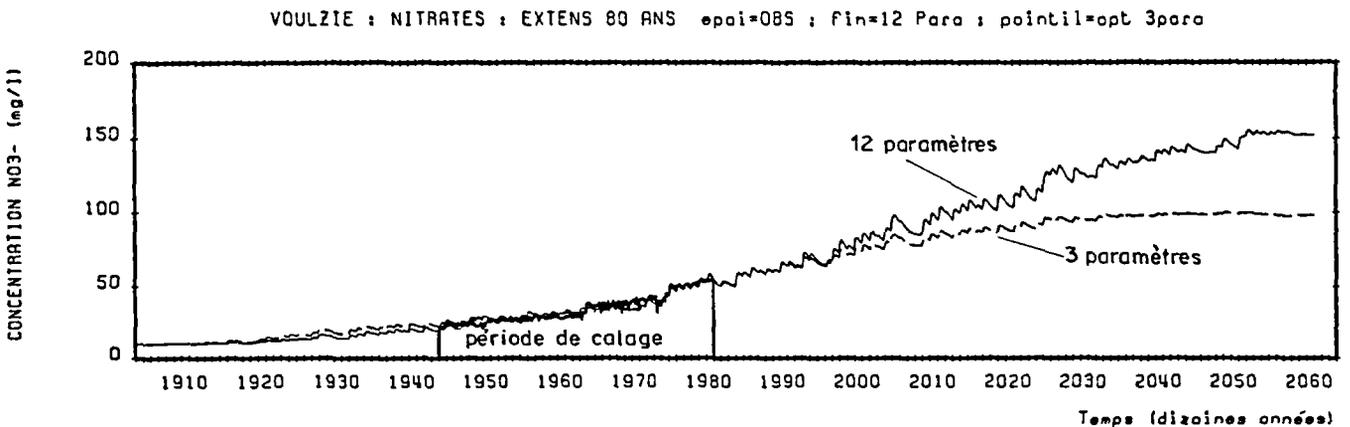


Figure 6.18- Sources de la Vouizie : comparaison des simulations et des extensions obtenues avec 12 et avec 3 paramètres chimiques

## 7 - APPLICATION AU BASSIN DU GARBSEN

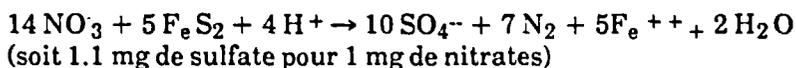
Le bassin du GARBSEN est situé en ALLEMAGNE FÉDÉRALE dans la région de HANOVRE. Les données relatives à ce bassin nous ont été fournies par les Dr RICHTER et Rüdiger ANLAUF de l'Institut für Bodenkunde de l'Université de HANOVRE que nous remercions vivement.

La modélisation a été réalisée en collaboration avec le Dr ANLAUF à ORLEANS à l'occasion d'une coopération scientifique. La description du bassin et des données sera détaillée dans une publication commune à paraître.

Les données disponibles au pas de temps mensuel sont les suivantes :

- \* Précipitations : de 1966 à 1987
- \* Evapotranspiration : de 1966 à 1987
- \* Niveaux piézométriques en deux points du bassin : de 1968 à 1987
- \* Concentration en sulfates : 1966 à 1987
- \* Besoins des plantes, épandages et minéralisation.

Sur ce bassin, la concentration en nitrates est très faible car les nitrates sont dénitrifiés - en présence de pyrite - produisant de fortes concentrations en sulfates de 150 à 300 mg/l. Il est possible de calculer l'équivalent théorique en nitrates des sulfates (ou réciproquement).



### 7.1 - PÉRIODE D'OBSERVATION

Les données mensuelles sont disponibles pendant les 20 années de la période 1968-1987 mais les données piézométriques et de concentration en sulfates ne sont disponibles que pendant les 9 années de la période 1979-1987.

Les concentrations en sulfates sont disponibles en un captage (pompé régulièrement) et les niveaux piézométriques sont disponibles en 2 piézomètres non influencés du bassin (nommés PIEZ01 et PIEZ02), le premier étant situé à proximité du captage et le deuxième nettement plus loin.

### 7.2 - CALAGE HYDROLOGIQUE

Les paramètres hydrologiques du modèle BICHE ont été ajustés -séparément- sur chacun des piézomètres à partir des données mensuelles. Les 11 années de la période 1968-1978 n'étaient utilisées que pour l'initialisation des calculs.

Un premier calage a été obtenu en admettant un coefficient de correction global sur l'évapotranspiration potentielle pour tenir compte du pas de temps mensuel qui tend à sous-estimer nettement l'influence des pluies survenant par épisodes isolés. Ce calage qui donne des résultats conservatifs avec une pluie efficace de l'ordre de 200 mm/an sera utilisé pour le calage chimique des transferts de sulfates. Dans un but d'analyse de sensibilité, un deuxième calage hydrologique a été réalisé sans aucune correction d'ETP. Ce deuxième calage est probablement moins réaliste mais on verra qu'il donne des résultats plus robustes.

Les résultats de ces 2 calages sont donnés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 7.1 - Paramètres du calage hydrologique du bassin du GARBSEN**

	(1) Simulations de référence		(2) Simulations sans correction d'ETP	
	PIEZ01	PIEZ02	PIEZ01	PIEZ02
<b>PARAMETRES</b>				
R.SUP mm	131	70	253	0.0
CETP %	- 25	- 18.6	-	-
TH.G mois	3.6	1.4	1.2	2.1
TG1 mois	18.1	1.4	23.0	2.1
EMMAG %	10.3	6.9	12.1	6.9
N.BASE m NGF	- 3.06	1.38	0.00	1.07
<b>AJUSTEMENT</b>				
corrélation	0.931	0.783	0.921	0.795
écart-type de l'erreur (m)	0.206	0.170	0.221	0.166
autocorrélation de l'erreur	0.492	0.556	0.600	0.471
nbre équivalent d'observations indépendantes	37	31	27	39
debit souterrain (mm/an)	206	214	52	243

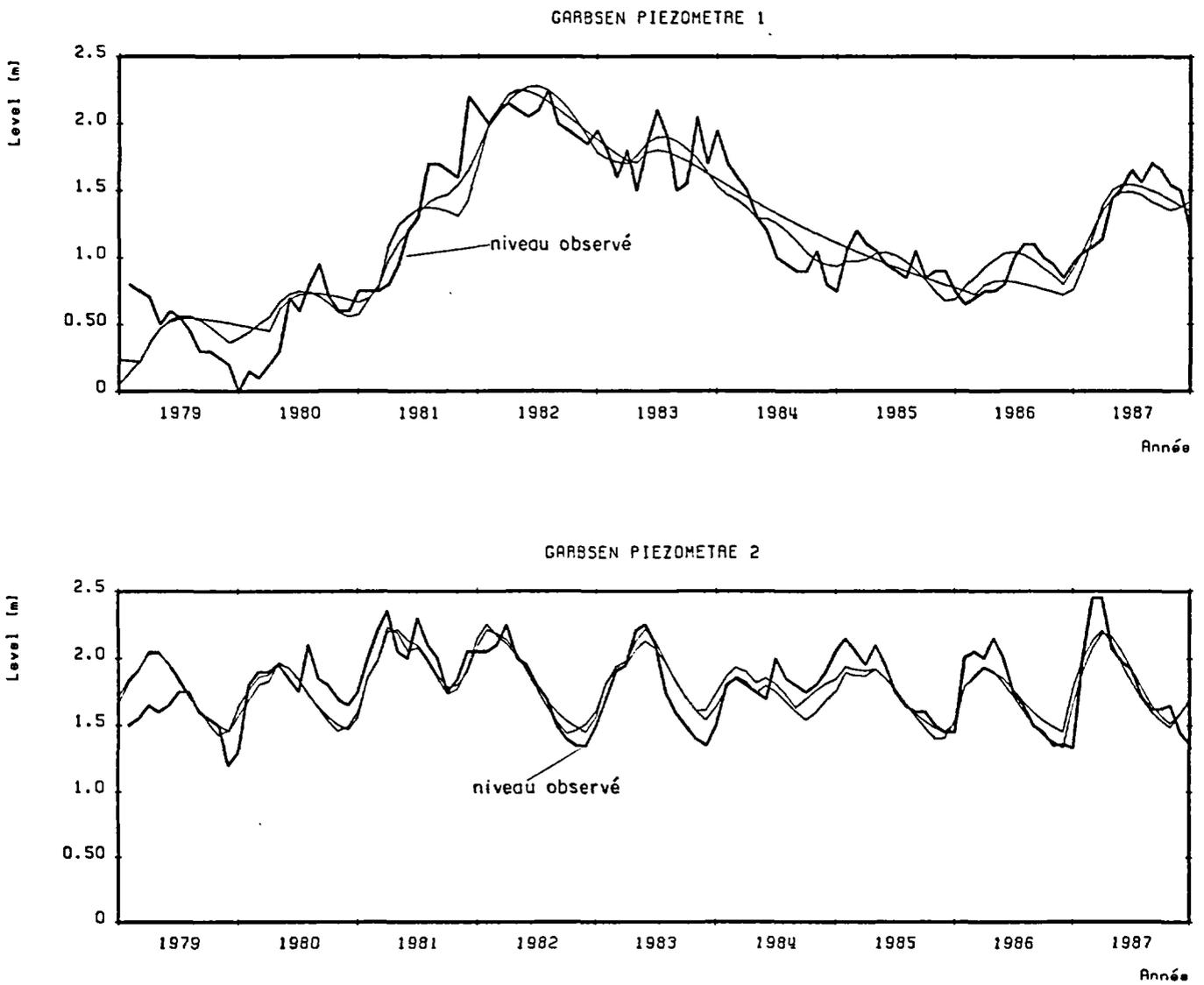


Figure 7.1 - Bassin du GARBSSEN : simulation hydrologique sur les 2 piézomètres

La figure 7.1 montre que dans les 2 cas, les calages sont satisfaisants et différent peu suivant l'hypothèse choisie.

### 7.3 - ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES DÉRIVÉES

Les figures 7.2 et 7.3 présentent les dérivées des niveaux calculés par rapport aux 5 paramètres du premier calage pour le piézomètre 1. On note une forte corrélation entre l'effet de la correction d'ETP (CETP) et du déficit maximal du sol (RSUP) (corrélation = - 0.94). On remarque également de forts coefficients de corrélation entre les effets des variables suivantes :

$$r(\text{THG}, \text{RSUP}) = - 0.71 ; r(\text{THG}, \text{CETP}) = + 0.83$$

$$r(\text{TG1}, \text{RSUP}) = - 0.78 ; r(\text{TG1}, \text{CETP}) = + 0.76$$

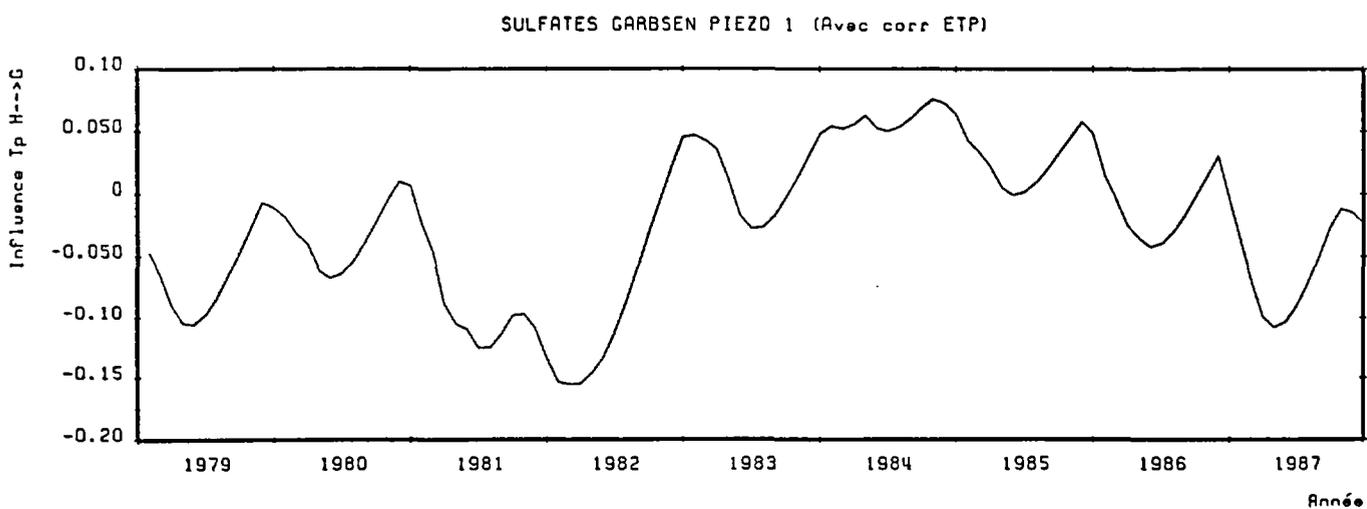
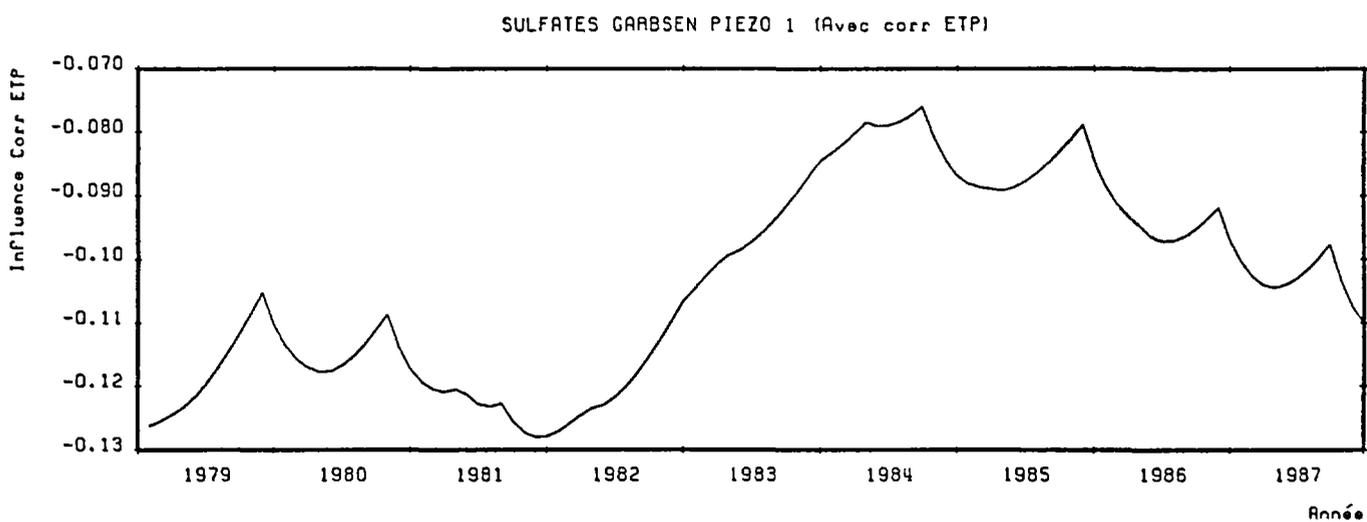
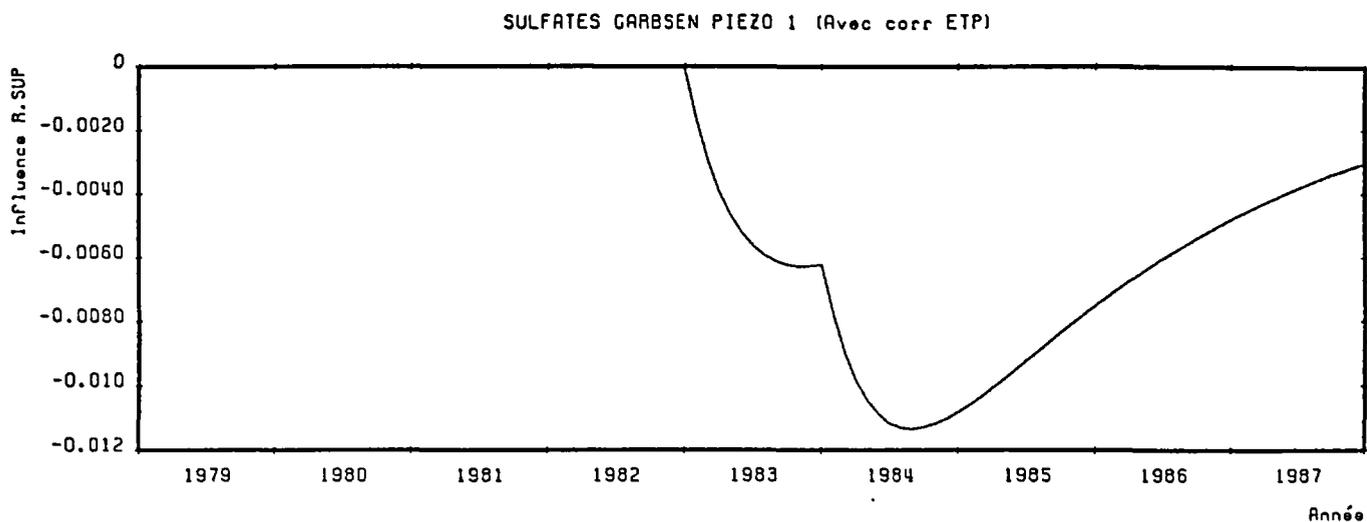
Ces 2 derniers coefficients de corrélation sont cependant conjoncturels... et non fonctionnels.

### 7.4 - CALCUL DES ÉCARTS-TYPES DES PARAMÈTRES

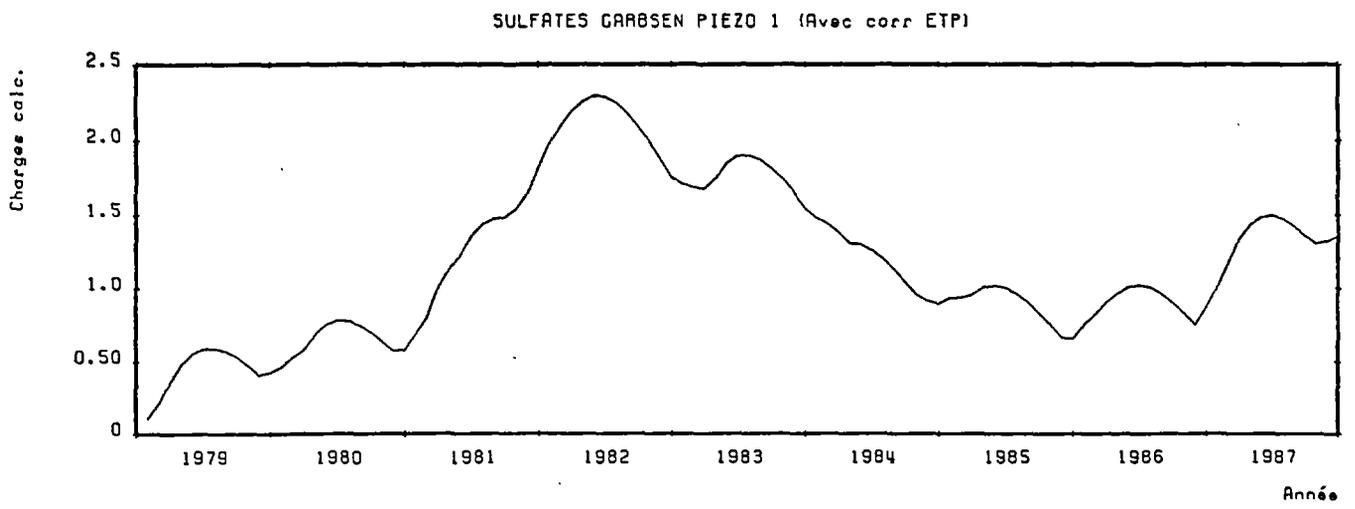
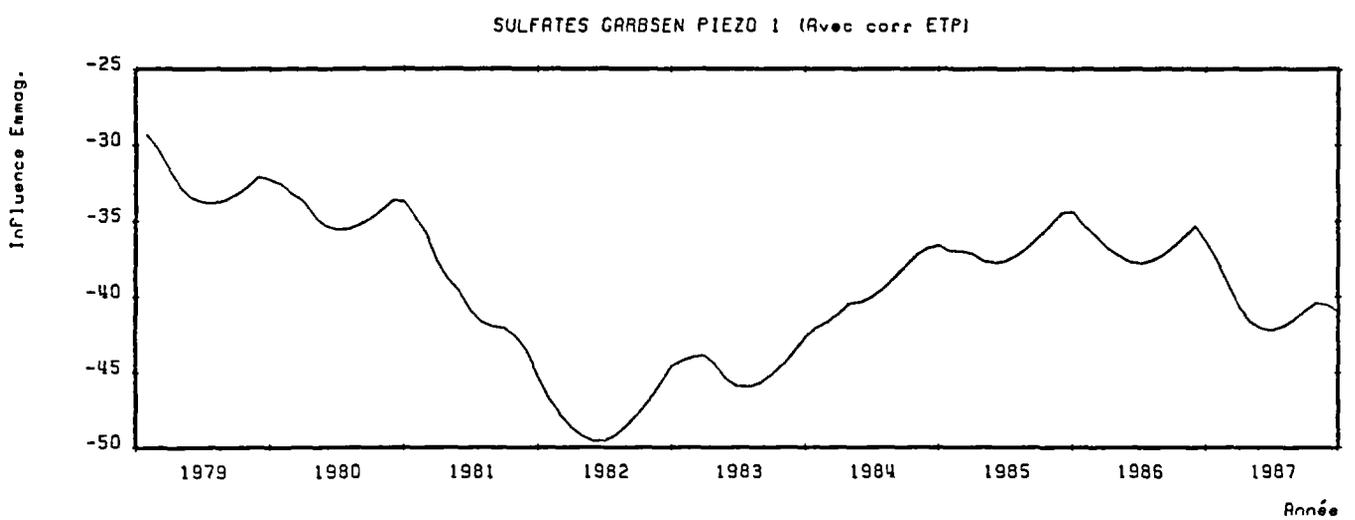
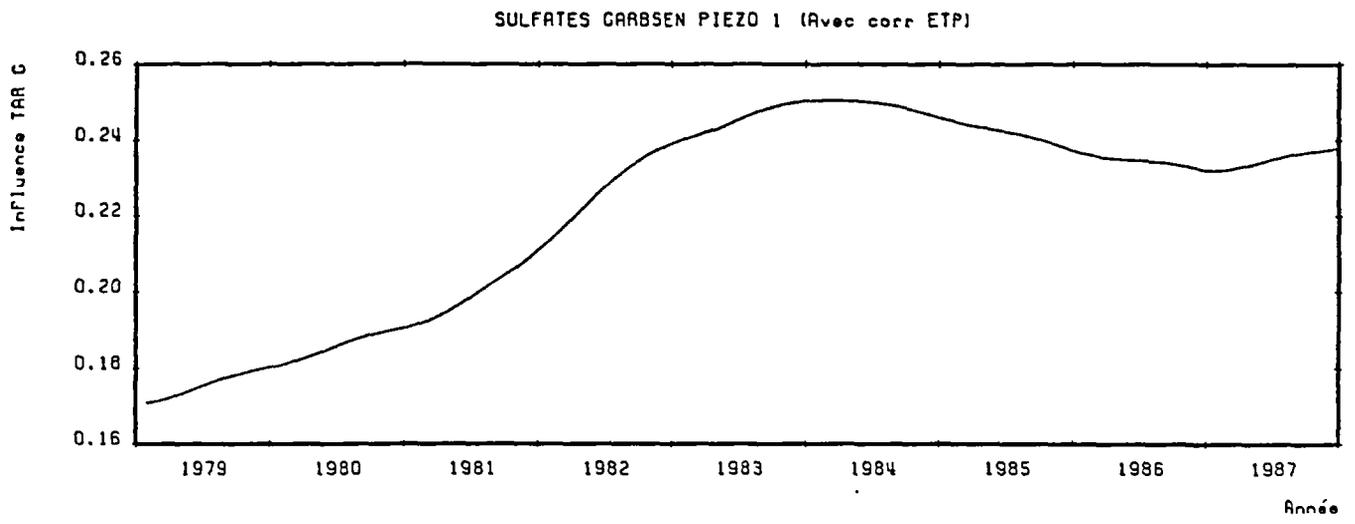
Les écarts-types des paramètres sont donnés dans les tableaux 7.4 et 7.5. On voit que tous les paramètres relatifs au piézomètre n° 1 sont nettement significatifs. Par contre, on voit que pour le piézomètre n° 2 les constantes de temps et le coefficient d'emménagement sont extrêmement mal définis car leurs écarts-types sont considérables .

**Tableau 7.4 - Ecart-types des paramètres des piézomètres du bassin du BARBSEN (avec correction d'ETP)**

PARAMETRES		PIEZ01			PIEZ02		
		VALEUR OPTIMALE	ECART TYPE	T d <sub>e</sub> STUDENT	VALEUR OPTIMALE	ECART TYPE	T d <sub>e</sub> STUDENT
RSUP	(mm)	131	2.7	4.8	70	23	3.1
CETP	(%)	- 25	8.1	- 3.1	- 19	6.1	- 3.0
THG	(mois)	3.6	1.0	3.5	1.4	37	0.0
TG1	(mois)	18.1	4.9	3.7	1.4	35	0.0
EMMAG	(%)	10.1	1.7	6.1	6.9	224	0.0
NBASE	(m)	- 3.06	1.17	- 2.6	1.38	0.11	12.6



**Figure 7.2 - Bassin du GARBSEN : dérivées des niveaux par rapport aux paramètres**



**Figure 7.3 - Bassin du GARBSEN : dérivées des niveaux par rapport aux paramètres**

**Tableau 7.5 - Ecart-types des paramètres des piézomètres du bassin du GARBSEN (sans correction d'ETP)**

PARAMETRES	PIEZ01			PIEZ02		
	VALEUR OPTIMALE	ECART TYPE	T de STUDENT	VALEUR OPTIMALE	ECART TYPE	T de STUDENT
R.SUP (mm)	253	21	12.1	0	10	0
THG (mois)	1.23	0.6	2.2	2.1	35	0.1
TG1 (mois)	23.1	7.0	3.3	2.0	31	0.1
EMMAG (%)	12.1	1.5	8.2	6.9	132	0
NBASE (m)	0.001	0.2	0.0	1.07	0.33	3.3

Ceci est dû au fait qu'on n'observe pas de tarissement prolongé. L'examen de la matrice de corrélation de paramètres montre que les 3 coefficients de corrélation entre THG, TG1 et EMMAG sont quasiment égaux à - 1 ou + 1, ce qui montre une indétermination quasi totale.

Un autre calcul a été réalisé en supposant que le temps de demi-percolation THG était connu. Les résultats sont dans le tableau 7.6.

**Tableau 7.6 - Ecart types des paramètres du piézomètre n° 2 du bassin de GARBSEN (sans correction d'ETP)**

PARAMETRES	VALEUR OPTIMALE	ECART TYPE	T de STUDENT
R.SUP (mm)	0	10	0
TG1 (mois)	2.0	0.5	4.3
EMMAG (%)	6.9	1.2	5.9
NBASE (m)	1.07	0.17	6.3

Les paramètres sont alors tous significatifs (la valeur du t de Student affecté au déficit maximal RSUP est égale à zéro tout simplement puisque ce paramètre est égal à zéro).

## 7.5 - CALCUL DE L'INTERVALLE DE CONFIANCE À 95 % SUR LA RECHARGE

L'utilisation des écarts-types calculés permet d'estimer l'intervalle de confiance à 95 % sur la recharge moyenne annuelle.

On obtient les résultats suivants en mm/an (tableau 7.7)

Tableau 7.7	PIEZO 1	PIEZO 2
Avec calage de correction globale d'ETP	121 < R < 289	156 < R < 268
Sans correction d'ETP	42 < R < 62	170 < R < 317
En fixant en plus le temps de demi-percolation	43 < R < 60	190 < R < 290

On voit nettement que le fait de n'imposer aucune correction d'ETP, d'une part divise l'intervalle de confiance par 8.5 mais divise également la recharge par 4 pour le piézomètre n° 1. L'influence du temps de demi-percolation n'est pas importante sur la recharge ce qui est logique.

### 7.6 - CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE DES NIVEAUX

Le calcul de l'intervalle de confiance des niveaux est représenté sur la figure 7.4 pour les 2 hypothèses de calculs : 6 paramètres et 4 paramètres (c'est-à-dire sans correction d'ETP ni calage du temps de demi-percolation). On voit d'une part que les intervalles de confiance calculés pour ces 2 hypothèses sont quasiment identiques. Ils encadrent bien les séries observées ce qui montre que les hypothèses de calcul (linéarité locale) sont correctes. On remarque en particulier que les plus grandes incertitudes sur les paramètres ne se traduisent pas sur les intervalles de confiance qui prennent aussi en compte les intercorrélations entre paramètres.

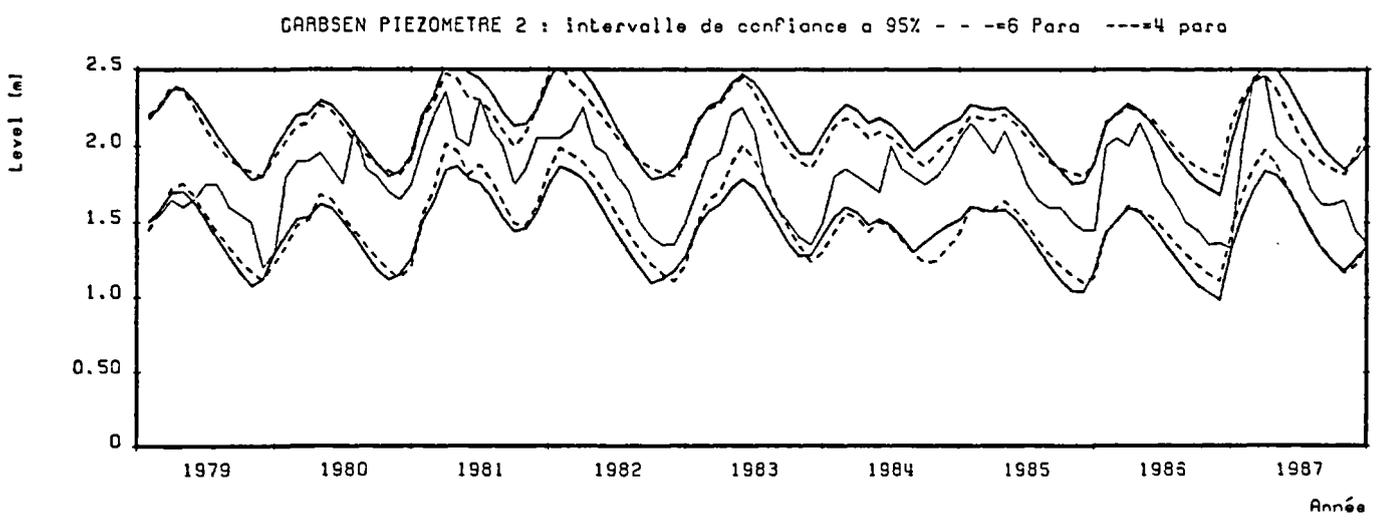
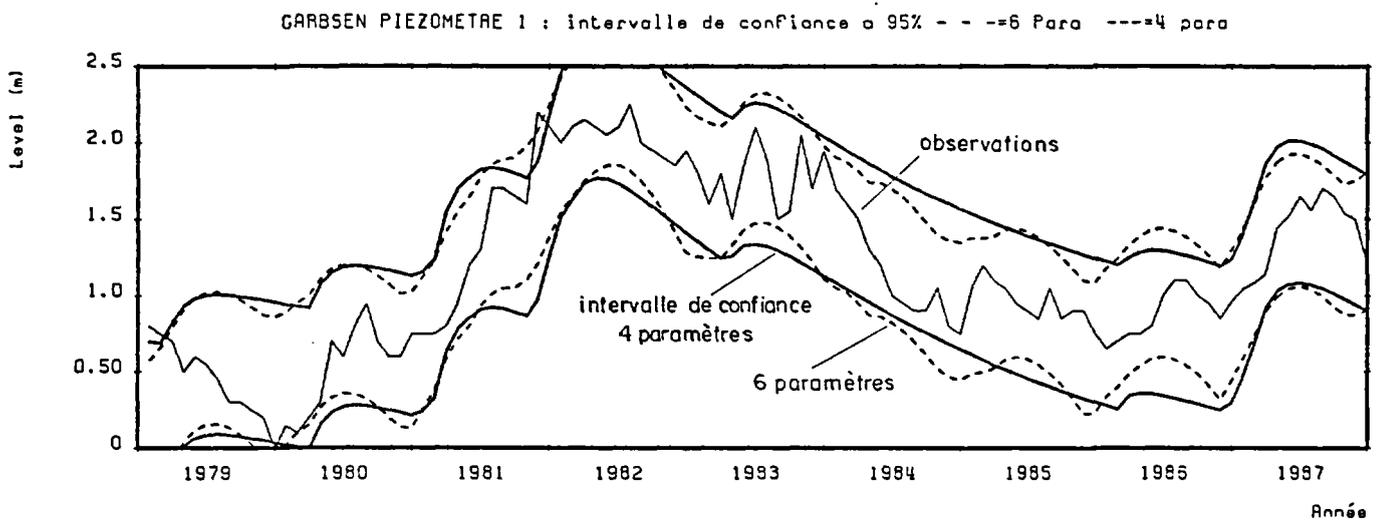


Figure 7.4 - Bassin du GARBSEN : Intervalles de confiance des niveaux piézométriques calculés

## 7.7 - CALAGE DES PARAMÈTRES CHIMIQUES (AVEC CORRECTION D'ETP)

En ajustant le modèle BICHE sur les concentrations en nitrates, on obtient de très bons ajustements, aussi bien avec les paramètres hydrologiques du piézomètre 1 que du piézomètre 2. Les coefficients d'ajustement (comparables à des coefficients de corrélation) sont tous égaux à 0.94. La figure 7.5 permet d'apprécier visuellement la qualité de l'ajustement. Les paramètres chimiques du modèle sont rassemblés dans le tableau 7.8.

Tableau 7.8 - Paramètres chimiques pour le bassin du GARBSEN

	Calage sur le piézo 1	Calage sur le piézo 2
COR BESOINS (%)	- 7 %	- 20 %
COR EPAND (%)	+ 20 %	+ 12
COR MINER (%)	+ 11 %	+ 7
SATUR PLUIE (mg/l)	250 = 2.5 kg/mm/ha	290 = 2.9 kg/mm/ha
EAU LIEE (mm)		
R.SUP (mm)	500	323
R.INT (mm)	300	300
R.SOUT (mm)	300	300
TEMPS MELANGE (mois)		
R. SUP	4.5	4.1
R. INT	2.4	Instantané
R. SOUT	2.4	0.5
LIBERATION PAR LES RACINES	Instantané	Instantané
CONSTANTE	41 mg/l SO <sub>4</sub>	- 17
AMPLITUDE	1.1	1.1
COEF. AJUST	0.944	0.940

Le coefficient d'amplitude et la constante correspondent à la transformation des nitrates NO<sub>3</sub> calculés en sulfates SO<sub>4</sub> observés ; on obtient par le modèle :

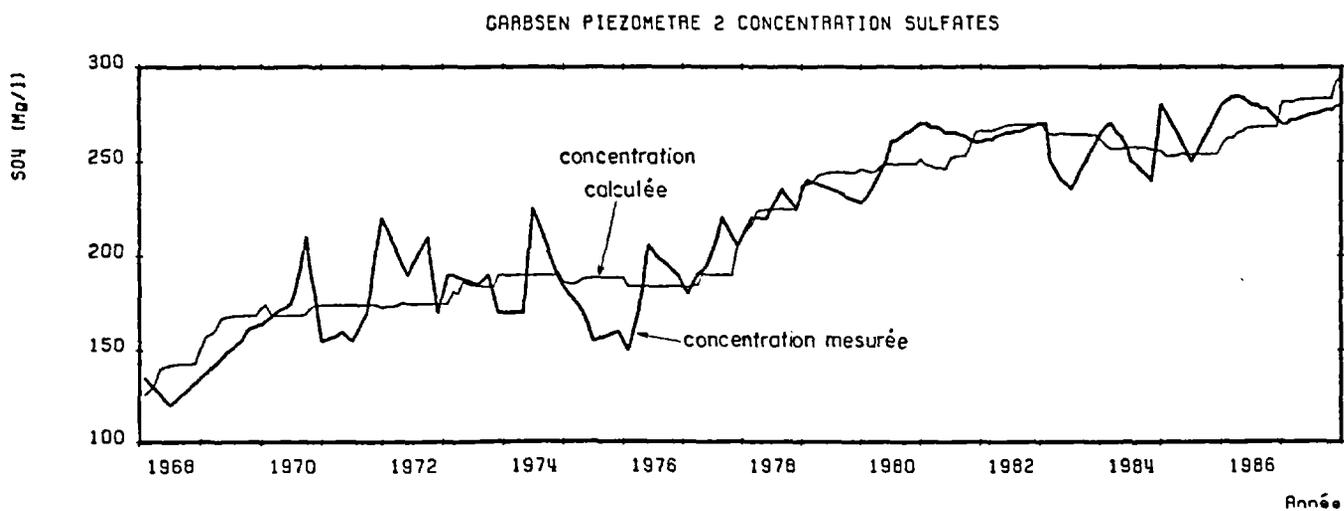
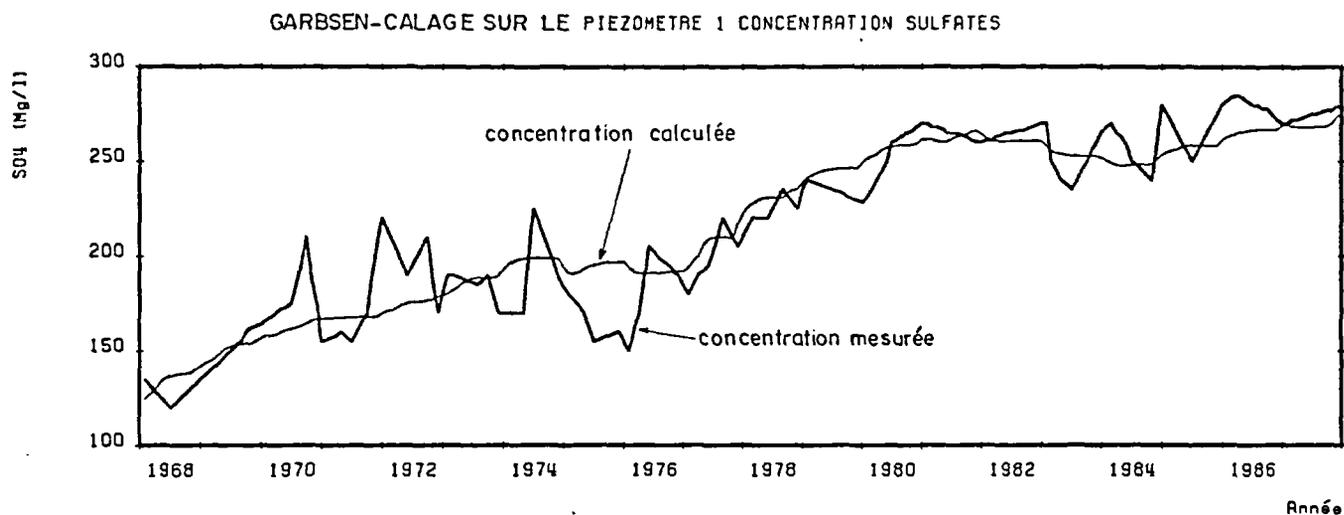
$$SO_4 = 1.1 NO_3 + 41 \text{ mg/l pour le piézomètre 1}$$

$$SO_4 = 1.1 NO_3 - 17 \text{ mg/l pour le piézomètre 2}$$

Il est spécialement intéressant de noter qu'on retrouve exactement le ratio théorique de 1.1 mg de SO<sub>4</sub> pour 1 mg de NO<sub>3</sub>.

Le bilan global moyen annuel est détaillé dans le tableau 7.9

<b>Tableau 7.9</b>	<b>Calage sur le piézo 1</b>	<b>Calage sur le piézo 2</b>
<b>CONCENTRATION INITIALE en 1963 (mg/l)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>PLUIE EFFICACE (mm/an)</b>	<b>220</b>	<b>184</b>
<b>EPANDAGE (kg/ha/an)</b>	<b>692</b>	<b>646</b>
<b>MINERALISATION (kg/ha/an)</b>	<b>571</b>	<b>554</b>
<b>CONSOMMATION (kg/ha/an)</b>	<b>838</b>	<b>719</b>
<b>FLUX LIQUIDE SORTANT (kg/ha/an)</b>	<b>314</b>	<b>396</b>
<b>STOCKAGE ANNUEL (kg/ha/an)</b>	<b>111</b>	<b>85</b>



**Figure 7.5 - Bassin du GARBSEN : Simulation des concentrations en nitrates**

## 8 - CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette recherche a montré la généralité du modèle BICHE pour la simulation des transferts de nitrates dans un bassin versant. Quatre nouveaux sites ont été modélisés avec succès (les résultats du 4ème site- le bassin de NOVA BES- ne sont cependant pas décrits dans ce rapport). Le modèle permet de reproduire correctement les concentrations de nitrates observées dans les eaux, à partir des données hydroclimatologiques et des pratiques agricoles. Il permet en outre de proposer un bilan des différents termes (fertilisation, minéralisation, consommation, percolation et stockage) et une extrapolation dans le futur.

La méthode de calcul des intervalles de confiance mise au point en 1989 a été adaptée au modèle BICHE et contrôlée sur les données du piézomètre Tilloloy (Picardie). On a mis en évidence qu'elle est opérationnelle et que l'hypothèse de linéarité locale de l'influence des paramètres et l'hypothèse de dépendance d'ordre 1 des écarts de simulation étaient réalistes. L'application de la méthode à 3 cas a montré qu'il était possible de calculer les intervalles de confiance sur les niveaux piézométriques, les concentrations en nitrates et la recharge de la nappe. L'influence du nombre des paramètres à déterminer par calage a été mise très nettement en évidence, en particulier sur l'intervalle de confiance, sur la recharge et sur les extrapolations. Le chapitre 6.7 montre qu'un calage faisant intervenir 12 paramètres n'est pas robuste puisque ces paramètres sont fortement autocorrélés. Une simplification du modèle en n'optimisant que 3 paramètres permet d'obtenir un calage robuste donnant une faible fourchette d'incertitude en extrapolation. Le chapitre 7.5 présente des résultats similaires sur l'estimation de la recharge de la nappe.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAYLEY E., HAMMERSLEY, J.M. (1946) - The effective number of independent observations in an autocorrelated time series. *J. Roy Statist. Soc.* 8, (1B), pp. 184-197.

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

LEIJNSE A. (1982) - Evaluation of pumping tests : identification of parameter values and their reliability. Improvements of methods of Long Term Prediction of Variations in Groundwater Resources and Regimes due to Human activity (Proceedings of the Exeter Symposium July 1982) IAHS Publ. n°136.

MARTIN J., THIERY D. (1988) - Application du modèle BICHE à la simulation de transferts de nitrates à la station hydromatique de HOEGILD MILL (Danemark) - Rapport BRGM 88 SGN 954 EEE -

PARANTHOINE Loïc (1988) - Bilan de l'azote et estimation du temps de réponse sur 2 bassins versants en région de socle (PLOUVORN, MASSIF ARMORICAIN) - Thèse à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc - Spécialité hydrogéologie Montpellier Novembre 1988.

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 Novembre 1983.

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

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

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

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

THIERY D., SEGUIN J.J. (1986) - Un modèle hydrogéologique global de transfert des nitrates dans un bassin versant. Application aux sources de Provins et à la nappe de la Beauce à Pithiviers - *Revue hydrogéologie* n° 1, 1986 pp. 87-99.

THIERY D., SEGUIN J.J. (1988). Forecasting the evolution of nitrate contents in spring water using a lumped hydrologic model. Quatrième Symposium International sur l'Analyse des systèmes appliquée à la Gestion des Ressources en Eau. Rabat MAROC 11-13 Octobre 1988.

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

THIERY D. (1989). Ajustement automatique d'un modèle n'ayant pas d'expression analytique - Calcul de l'intervalle de confiance des paramètres et des prévisions - Rapport BRGM R30092 EAU 4S89.

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

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100