



**UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG**

**INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES**

**ECOLE NATIONALE DES INGENIEURS DES TRAVAUX RURAUX  
ET DES TECHNIQUES SANITAIRES DE STRASBOURG**

**THESE**

**DOCTORAT SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'EAU**

**MISE AU POINT  
D'UN MODELE ELEMENTAIRE  
PLUIE - DEBIT  
AU PAS DE TEMPS JOURNALIER**

par

**EDIJATNO**

Soutenue le 22 Janvier 1991

Devant le jury composé de :

<b>MM. J-J. FRIED</b>	Président
<b>P-A. ROCHE</b>	Rapporteur
<b>Ch. OBLED</b>	Rapporteur
<b>J-B. POULET</b>	Examineur
<b>C. MICHEL</b>	Examineur
<b>D. LOUDIERE</b>	Invité

CENTRE NATIONAL DU MACHINISME AGRICOLE, DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORETS

Groupement d'Antony

Division: HYDROLOGIE

BP 121, 92185 Antony Cedex ; Tél.: (1) 40 96 61 21 ; Télèx: 632 672 F ; Télécopie: (1) 40 96 60 36

**UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG**

**INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES**

**ECOLE NATIONALE DES INGENIEURS DES TRAVAUX RURAUX  
ET DES TECHNIQUES SANITAIRES DE STRASBOURG**

# **THESE**

**DOCTORAT SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'EAU**

## **MISE AU POINT D'UN MODELE ELEMENTAIRE PLUIE - DEBIT AU PAS DE TEMPS JOURNALIER**

par

**EDIJATNO**

**Soutenu le 22 Janvier 1991**

Devant le jury composé de :

<b>MM. J-J. FRIED</b>	<b>Président</b>
<b>P-A. ROCHE</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Ch. OBLED</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>J-B. POULET</b>	<b>Examineur</b>
<b>C. MICHEL</b>	<b>Examineur</b>
<b>D. LOUDIERE</b>	<b>Invité</b>

**CENTRE NATIONAL DU MACHINISME AGRICOLE, DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORETS**  
Groupement d'Antony  
Division: HYDROLOGIE

BP 121, 92185 Antony Cedex ; Tél.: (1) 40 96 61 21 ; Télex: 632 672 F ; Télécopie: (1) 40 96 60 36



*hommage à maman*



*à papa,*

*mas Ari et mbak Pipi,*

*dik Indri, dik Sam et Ninis,*

*tante Harti et pak Tot.*



## REMERCIEMENTS

Au terme de cette recherche qui a demandé plus de trois années de travail au sein de la Division Hydrologie du Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CEMAGREF) à Antony, je tiens à assurer de mon infinie gratitude tous ceux qui m'ont assisté directement ou indirectement :

- Monsieur T. LEVIANDIER, chef de la Division Hydrologie du CEMAGREF à Antony, qui m'a accueilli dans son équipe;
- Monsieur J-J. FRIED, professeur à l'Institut de Mécanique des Fluides - Université Louis Pasteur de Strasbourg, directeur de l'Institut Européen de l'Eau, mon responsable de thèse, qui a bien voulu assurer la présidence du jury;
- Monsieur P-A. ROCHE, professeur d'hydrologie à l'Ecole des Ponts et Chaussées de Paris, Directeur Départemental Adjoint de l'Equipement de la Gironde, qui, très tôt, a témoigné de son intérêt pour cette recherche et a accepté de rapporter ce mémoire. Ses remarques et ses critiques ont permis d'améliorer considérablement la démarche adoptée dans ce mémoire. C'est aussi grâce à son appui que le CEMAGREF a pu bénéficier d'une subvention du Ministère de l'Environnement où il a été chef de la Sous-Direction de l'Aménagement des Eaux;
- Monsieur Ch. OBLED, professeur d'hydrologie à l'Institut de Mécanique de Grenoble, qui a effectué une lecture approfondie de mon rapport;
- Monsieur J-B. POULET, professeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et des Industries de Strasbourg, qui a bien voulu faire partie de mon jury de thèse.



Je dois exprimer ma reconnaissance particulière à Monsieur C. MICHEL, Ingénieur en Chef du GREF, instigateur de cette recherche, qui m'a accordé sa confiance en me proposant cette étude. Ses suggestions, ses nombreux efforts qu'il a dû consentir tout au long de ce travail, et son soutien moral de tout instant, ont joué un rôle capital à l'aboutissement de cette recherche. Sans sa main tendue, le travail rapporté ici n'aurait pu être exécuté. Je n'oublie ni sa patience, ni sa gentillesse, ni ses encouragements.

J'adresse également tous mes remerciements à :

- Monsieur P. DESMARTIN, Ingénieur en Chef du GREF, directeur de l'Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires (ENITRTS) de Strasbourg;
- Messieurs M. GUINAUDEAU et D. LOUDIERE, Directeurs de la Recherche à l'ENITRTS de Strasbourg.

Mes remerciements vont également à :

- Madame A. DAO de la Bibliothèque du CEMAGREF d'Antony pour son efficacité lors de la recherche des données auprès de la Météorologie Nationale;
- Les SRAE (Service Régional d'Aménagement des Eaux) qui nous ont envoyé des données à une époque où la banque HYDRO était défailante.

Ma reconnaissance s'adresse aussi à toutes les personnes de la Division Hydrologie du CEMAGREF d'Antony pour l'aide de tous les instants qu'ils m'ont prodigués sans compter, et pour leur chaleureuse amitié :

Messieurs J-M. PANETIER, M. NORMAND, M. POIRSON, M. FERRY, M. TANGARA, Monsieur et Madame ROSIQUE, Monsieur et Madame PALAGOS, Mesdames E. MARSHALL et C. LOUMAGNE, Melle S. GALLE;

et tous les autres stagiaires :

Ali, Marcio, Ma, Messaouda, Farook, Marcel, François, Marius, Mounira, Raoudha, Najiba, Gabriella, Fouzia, Khadija, et Zoubir.

Merci à :

Guy, Christophe, Bernard, Hélène, Franck, Isabelle, Gérard, Dominique, Frédéric, Christel, Pierre, .....

Bagyo, Rini, Herman, Pussy, Indarto, Sri, Boy, Wied, Putra et son groupe de "Bhinneka Tunggal Ika", .....

Enfin, je remercie le CNOUS, le CROUS, le CEFI - CEGESTRAM, le Service Pédagogique et Culturel de l'Ambassade d'Indonésie en France, et l'Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) de Surabaya (Indonésie).



**RESUME**  
**ABSTRACT**



## RESUME

La transformation pluie-débit effectuée par un bassin versant résulte d'un ensemble très complexe de processus théoriquement connus mais dont il est difficile, voire impossible, de décrire les conditions aux limites. Pourtant, une certaine logique existe que l'on peut représenter à l'échelle d'un bassin versant par un mécanisme assez simple. Le problème que l'on a cherché à résoudre a été d'essayer d'identifier le mécanisme le plus simple qui puisse rendre compte de façon acceptable de cette transformation. Pour cela une recherche systématique a été entreprise pour bâtir un tel mécanisme à partir d'opérateurs simples également à construire. A partir des données de 114 bassins versants en France, on a pu valider un tel modèle en se limitant à trois paramètres à caler sur chaque bassin. Une étude de sensibilité des paramètres a été entreprise sous la forme de l'établissement d'une matrice approchée des variances et covariances des paramètres. Une analyse statistique sommaire a été entreprise pour essayer de mettre en évidence l'influence des caractéristiques climatiques et morphologiques usuelles sur ces 3 paramètres. Les relations obtenues permettent la transposition d'un bassin jaugé à un bassin voisin.

### MOTS CLEFS :

HYDROLOGIE - MODELISATION - CONCEPTUEL - PLUIE-DEBIT - PAS DE TEMPS JOURNALIER - MODELE A RESERVOIRS - HYDROGRAMME UNITAIRE - BASSINS NON JAUGES

## ABSTRACT

The rainfall - runoff transformation achieved by a catchment is the outcome of a very complex set of theoretical known processes but whose boundary conditions are difficult if not impossible to describe. However some logic does exist that can be depicted at the basin scale by a rather simple mechanism. The problem we tried to solve has been to identify the simplest mechanism allowing satisfactorily for this transformation. Therefore a systematic research has been carried out in order to build up such a mechanism from single operators to be conceived as well. Such a model depending on only three free parameters could be validated from records relative to 114 catchments in France. All model specifications have been checked against alternatives. A variance - covariance matrix relative to each catchment parameter set has been estimated. A brief statistical analysis has been performed to show the influence of climatical and geomorphological characteristics upon these three parameters. The resulting relationships allow for basin transposition.

### KEY WORDS :

HYDROLOGY - WATERSHED MODEL - CONCEPTUAL - RAINFALL-RUNOFF - DAILY TIME INCREMENT - UNIT HYDROGRAPH - UNGAUGED BASINS



# **SOMMAIRE**





## SOMMAIRE

- INTRODUCTION GENERALE .....	11
- PREMIERE PARTIE : MODELISATION DU TRANSFERT PLUIE - DEBIT .....	15
1.1 La modélisation en hydrologie .....	17
1.2 Le modèle CREC .....	19
1.3 Peut-on construire un modèle simple et général ? .....	22
- DEUXIEME PARTIE : RECHERCHE D'UN MODELE ELEMENTAIRE .....	25
2.1 Le point de départ de la recherche : le modèle GR2 .....	27
2.2 L'objectif de la recherche .....	29
2.3 Déroulement de la première année de recherche .....	29
2.4 Le problème du troisième paramètre .....	30
2.4.1 Une nouvelle fonction à inclure dans GR2 .....	30
2.4.2 L'hydrogramme unitaire pour simuler un temps d'accès au réservoir eau-gravitaire .....	31
2.4.3 Une formulation continue de l'hydrogramme unitaire .....	33
2.4.4 Une remise en cause de la place de l'hydrogramme unitaire ? .....	34
2.5 Une autre fonction de rendement de l'évaporation .....	35
2.6 Sensibilité à la qualité des entrées .....	38
2.6.1 Sensibilité aux erreurs sur les entrées .....	38
2.6.2 Correction des entrées ? .....	39
2.6.3 Problème de l'évaporation potentielle .....	40
2.6.4 Problème de la neige .....	43
2.6.5 Lacunes dans les données pluviométriques .....	43
2.7 Conception à pas de temps variable .....	44
2.7.1 Objectif .....	44
2.7.2 Alimentation du réservoir-sol .....	45
2.7.3 Soutirage dans le réservoir-sol .....	45
2.8 Problèmes de calage .....	46
2.8.1 Initialisation du réservoir-sol .....	46
2.8.2 Méthode de recherche de l'optimum .....	47
2.8.3 Existence d'optimums secondaires ? .....	47
2.9 Conclusion : Modèle GR3 de base .....	48

- TROISIEME PARTIE : ANALYSE DE DIFFERENTS PROBLEMES RENCONTRES DANS L'APPLICATION DU MODELE .....	49
3.1 Problème des bassins versants avec écoulement intermittent .....	53
3.2 Problème de la non-restitution des débits de pointe dans certains bassins versants .....	60
3.2.1 Correction des entrées .....	63
3.2.2 Proposition d'un critère plus sensible au pointes de crues .....	63
3.2.3 Essai de couplage de 2 modules GR3 .....	64
3.2.4 Introduction d'une diversité dans le réservoir-sol .....	67
3.2.5 Introduction d'une diversité dans le réservoir eau-gravitaire .....	69
3.2.5.1 Utilisation de 2 réservoirs eau-gravitaire avec 2 paramètres supplémentaires .....	69
3.2.5.2 Utilisation de 2 réservoirs eau-gravitaire avec un seul paramètre supplémentaire .....	72
3.2.5.3 Equirepartition du bassin versant entre 3 réservoirs eau-gravitaire .....	73
3.2.5.4 Repartition statistique de réservoirs eau-gravitaire .....	77
3.2.5.5 Et si les réservoirs eau-gravitaire étaient linéaires ? .....	87
3.2.5.6 Conclusion .....	89
3.2.6 Introduction d'un écoulement pseudo-direct .....	90
3.2.6.1 Modèle GR3 de base avec introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit .....	90
3.2.6.2 Peut-on fixer le pourcentage de la fraction de pluie participant directement au débit sortant ? .....	97
3.2.6.3 Repartition en deux réservoirs eau-gravitaire avec introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit .....	100
3.2.7 Conclusion sur le problème de la mauvaise restitution des débits de pointe sur certains bassins .....	103
- QUATRIEME PARTIE : EVALUATION DU MODELE GR3 ET APPLICABILITE AUX BASSINS NON JAUGES .....	107
4.1 Comparaison avec le modèle CREC .....	109
4.1.1 Bassin versant de la Seine à Bar-sur-Seine .....	110
4.1.2 Bassin versant de l'Orgeval au Theil .....	118
4.1.3 Bassin versant du Réal Collobrier au Pont de Fer .....	123
4.1.4 Conclusion .....	126
4.2 Autres études comparatives et applications sur des bassins de pays étrangers .....	126

4.3	Application du modèle GR3 aux 110 bassins versants étudiés .....	128
4.3.1	Remarques sur les résultats de certains bassins .....	131
4.3.2	Analyse statistique des résultats .....	133
4.3.2.1	Statistique sur les paramètres .....	133
4.3.2.2	Statistique sur les critères de NASH .....	136
4.4	Utilisation sur les bassins non jaugés .....	137
4.4.1	Y a-t-il des relations entre les paramètres A, B et C ? .....	137
4.4.1.1	Paramètre A .....	137
4.4.1.2	Paramètre B .....	139
4.4.1.3	Paramètre C .....	140
4.4.1.4	Conclusion .....	142
4.4.2	Tentative de régionalisation des paramètres du modèle GR3 .....	142
4.4.2.1	Paramètre A .....	142
4.4.2.2	Paramètre B .....	143
4.4.2.3	Paramètre C .....	143
4.4.2.4	Conclusion .....	148
4.4.3	Essai d'explication des paramètres du modèle en fonction des variables morphoclimatiques ? .....	148
4.4.3.1	Paramètre A .....	149
4.4.3.2	Paramètre B .....	152
4.4.3.3	Paramètre C .....	154
4.4.3.4	Utilisation des formules pour le transfert des paramètres d'un bassin jaugé à un bassin non jaugé très voisin .....	156
4.4.3.5	Conclusion .....	157
4.4.4	Y a-t-il des relations entre les paramètres et la géologie ? .....	157
4.4.5	Conclusion .....	163
- CINQUIEME PARTIE : CRITIQUE GLOBALE DE L'ARCHITECTURE DU MODELE .....		
		165
5.1	Loi de vidange du réservoir eau-gravitaire .....	169
5.2	Rendements de la pluie et de l'ETP .....	172
5.3	Hydrogramme unitaire .....	174
5.4	Taux d'écoulement pseudo-direct .....	178
5.5	Prise en compte des données pluviométriques .....	178
5.6	Etude de sensibilité des paramètres .....	180
5.7	Conclusion : le modèle GR3J .....	181
5.8	Statistiques diverses sur le fonctionnement du GR3J .....	184
5.9	Liaison paramètres - variables morphoclimatiques .....	193

- SIXIEME PARTIE : PRESENTATION DU MODELE GR3J .....	197
6.1 Le programme principal .....	200
6.3 Les sous-programmes .....	202
6.2.1 Les sous-programmes de lecture et de traitement des données : LECE, LECP, LECQ, TRAIT, HIER et DEMAIN .....	202
6.2.2 Le sous-programme OPTIONS .....	203
6.2.3 Les sous-programmes d'optimisation : FOND et PILOT .....	204
6.2.4 Les sous-programmes de simulation : FONC, INITIAL, HU et GR3 .....	204
6.2.5 Les sous-programmes d'évaluation : MARCHE, ANALYZE et CLASD.....	205
6.2.6 Le sous-programme de sortie graphique : SORBEN.....	206
6.2.7 Les sous-programmes de régression multiple : MLG et COR2 .....	207
- CONCLUSION GENERALE .....	209
- RESUME ETENDU .....	213
- BIBLIOGRAPHIE .....	221
- LISTE DES FIGURES .....	233
- LISTE DES TABLEAUX .....	239
- ANNEXES .....	243

# INTRODUCTION GENERALE



## INTRODUCTION GENERALE

La modélisation en hydrologie, et particulièrement la transformation des précipitations en débits, est un sujet qui n'est jamais démodé, car situé au coeur de l'hydrologie. On peut lire dans l'abondante littérature existante que les recherches menées dans ce domaine se continuent, non seulement pour développer ou améliorer les modèles existants, mais aussi pour créer des modèles nouveaux.

En général, la plupart des modèles existants s'appliquent à décrire quantitativement une série de processus physiques plus ou moins bien définis. Les modèles tiennent compte d'un certain nombre de variables d'état du bassin qui affectent directement les sorties. On distingue les modèles globaux pour lesquels l'hétérogénéité spatiale de l'état du bassin et des impulsions reçues est ignorée, et les modèles matriciels conçus pour prendre en compte explicitement la distribution spatiale de ces paramètres.

Les développements de ce dernier type du modèle concernent un approfondissement de la description de tous les phénomènes se produisant dans un bassin versant. En conséquence, un tel modèle a tendance à se complexifier et à exiger un accroissement de données descriptives des bassins.

Contrairement à cette façon de penser, notre recherche essaie de déterminer le niveau de complexité minimal, en recherchant un modèle dépendant d'un très petit nombre de paramètres. Ces derniers ne correspondent probablement pas à des variables ou des processus physiques aisément identifiables.

La recherche a commencé en 1983 avec **GR1** (MICHEL C. ), un modèle très simple de transformation pluie - débit ayant un unique paramètre. Ce modèle, conceptuel global, est de la classe des modèles à réservoirs. Il a été conçu pour fonctionner au pas de temps journalier et a été testé en utilisant les données du bassin versant expérimental de l'Orgeval. Les résultats positifs



obtenus avec ce modèle, qui a été calé exclusivement pour produire des débits les plus proches possibles de ceux observés, a ouvert une autre perspective dans le domaine de la modélisation.

Bien sûr, ce modèle GR1 était très sommaire voire inexact mais il témoignait de la possibilité d'obtenir des résultats encourageants avec un procédé extrêmement économe. La recherche a été poursuivie en proposant une autre version plus "complète", c'est le modèle GR2, tout en gardant à la simplicité de l'architecture du modèle GR1.

Dans cette thèse, nous allons essayer, à partir du modèle GR2, d'aboutir à un modèle encore rudimentaire mais général, en espérant qu'il servira de base, soit pour donner naissance à des modèles adaptés à un problème spécifique ou à un bassin versant particulier, soit pour servir de terme de comparaison pour des modèles entièrement différents.

# **PREMIERE PARTIE**



## MODELISATION DU TRANSFERT PLUIE - DEBIT

### 1.1 LA MODELISATION EN HYDROLOGIE

Un des plus grands problèmes dans de nombreuses applications hydrologiques est la détermination de l'écoulement d'un cours d'eau à partir de données physiques comme : la pluie, la température, le vent et des caractéristiques du bassin. Cet écoulement est non seulement requis pour la prévision des crues, mais aussi pour la prédiction d'un effet d'un changement d'un bassin, et en général pour l'aménagement des ressources en eau (RAUDKIVI, 1979).

La détermination des débits par transformation des pluies peut être défini à l'aide d'une modélisation mathématique.

Il est essentiel de noter ici, qu'un modèle hydrologique n'a pas pour but de serrer au plus près la réalité physique des phénomènes qui se déroulent dans un bassin versant, mais de constituer un outil efficace pour résoudre des problèmes pratiques sur les ressources en eau. Il s'agit d'une représentation volontairement simplifiée, pour être commode d'emploi, d'un phénomène ou d'un ensemble de phénomènes ( JACQUET, 1971 ).

Ceci étant, un modèle doit satisfaire du mieux possible certains critères de qualité, entre autres :

- **précision** : qualité fondamentale d'un modèle
- **robustesse** : capacité à garder une précision acceptable même dans des conditions extrêmes
- **universalité** : possibilité d'utiliser le modèle pour des bassins très différents

- **richesse** : intégration d'un grand nombre de caractéristiques permettant une grande différenciation des comportements d'un bassin à l'autre
- **adaptabilité** : possibilité de corriger le modèle pour tenir compte de nouvelles données sur le bassin modélisé
- **mesurabilité** : possibilité de mesurer des paramètres, permettant d'utiliser le modèle sans calage ( cas extrême )
- **intelligibilité** : capacité d'être compris et analysé pour permettre notamment d'élucider les cas de défaillance du modèle
- **simplicité** : facilité d'utilisation
- ..... etc.

( LINSLEY, 1982 ; WOOLHISER et BRAKENSIEK, 1982 ; EDF - CEMAGREF, 1983 ; MICHEL, 1989 ).

Il existe déjà, dans la littérature hydrologique, de nombreux modèles pour déterminer la réponse d'un bassin versant à la précipitation. Beaucoup de qualificatifs sont disponibles pour les caractériser : déterministe, physique, stochastique, statistique, probabiliste, conceptuel, empirique, linéaire, non-linéaire, global, distribué, continu, événementiel, ..... etc. ( JACQUET, 1971 ; ROCHE, 1971 ; CLARK, 1973 ; VAN DE GRIEND, 1979 ; RAUDKIVI, 1979 ; LINSLEY, 1982 ; LARSON et al., 1982 ; WOOLHISER et al., 1982, MICHEL, 1989 ; .....).

Parmi les modèles existants, on peut citer les noms de modèles connus : le modèle à réservoirs en cascades de NASH, le modèle STANFORD, O'DONNELL, SSARR, USDAHL, MONASH, GIRARD, BILIK, CREC, ..... etc. Chacun à son interprétation des cheminements de l'eau et de leur représentation plus ou moins compliquée. Ils demandent en général une certaine expérience de la part de l'utilisateur pour les comprendre et les appliquer.

Les recherches sur la modélisation pluie - débit continuent encore, et ont tendance à approfondir la description physique des processus réels tels qu'ils se produisent sur le terrain.

Pour fixer les idées nous allons présenter le modèle conceptuel le plus simple utilisé actuellement en France : **le modèle CREC**

## 1.2 LE MODELE CREC

Le modèle CREC a été élaboré vers 1970 par l'équipe de Mr. CORMARY du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc à Montpellier.

Le modèle schématise le bassin par 3 réservoirs, permettant d'identifier une fonction de production par le réservoir S, et une fonction de transport par les réservoirs H et G ( **figure 1** ).

Suivant que la pluie est inférieure ou supérieure au seuil d'absorption, on aura soit alimentation du réservoir S, soit ruissellement direct.

- **Le réservoir S** est un réservoir superficiel non limité en capacité, diminué par l'ETP.
- **Le réservoir H** est alimenté par la pluie non absorbée par S. Il se vidange directement dans la rivière et percole dans le réservoir G.
- **Le réservoir G** veut représenter une réserve souterraine profonde. Il est alimenté par percolation de H et se vidange directement dans la rivière.

Le modèle CREC convient pour des bassins dont le temps de concentration est égal ou inférieure à 24 heures, c'est-à-dire que son application est limitée par la dimension du bassin versant.

La version originale du modèle comporte 10 paramètres. Dans le cas d'un bassin particulier ( bassin de grande taille ..... etc ), le nombre des paramètres peut être changé, variant de 5 à 12 à optimiser ( CORMARY et GUILBOT, 1970 ; CORMARY et GALEA, 1972 ; GUILBOT, 1972 ; GUILBOT et RUIZ, 1976 ;

MAILHOL, 1983 ; COMBES, 1985 ; BEISSON, 1985 ; EDF - CEMAGREF, 1986 ; SERVAT et al., 1989 ).

Les rapports cités ci-dessus ont montré que le modèle CREC est un modèle ayant une grande robustesse dans ses applications et adaptations aux bassins versants étudiés. Il suffit d'avoir un peu d'expérience dans la domaine de la modélisation, pour choisir et déterminer la version à utiliser, en s'inspirant des caractéristiques du bassin étudié.

Vu le nombre important de paramètres à optimiser, il est certain qu'on peut toujours être préoccupé par le risque de tomber sur un optimum secondaire, c'est-à-dire un jeu de paramètres moins performant que le jeu idéal. Une étude de comparaison du modèle CREC rapportée dans le paragraphe 4.1 de ce rapport traite de ce problème. Plutôt que d'analyser les insuffisances de ce modèle, nous avons choisi de voir s'il était possible de faire aussi bien ( ou presque aussi bien ) avec une architecture encore plus sommaire.

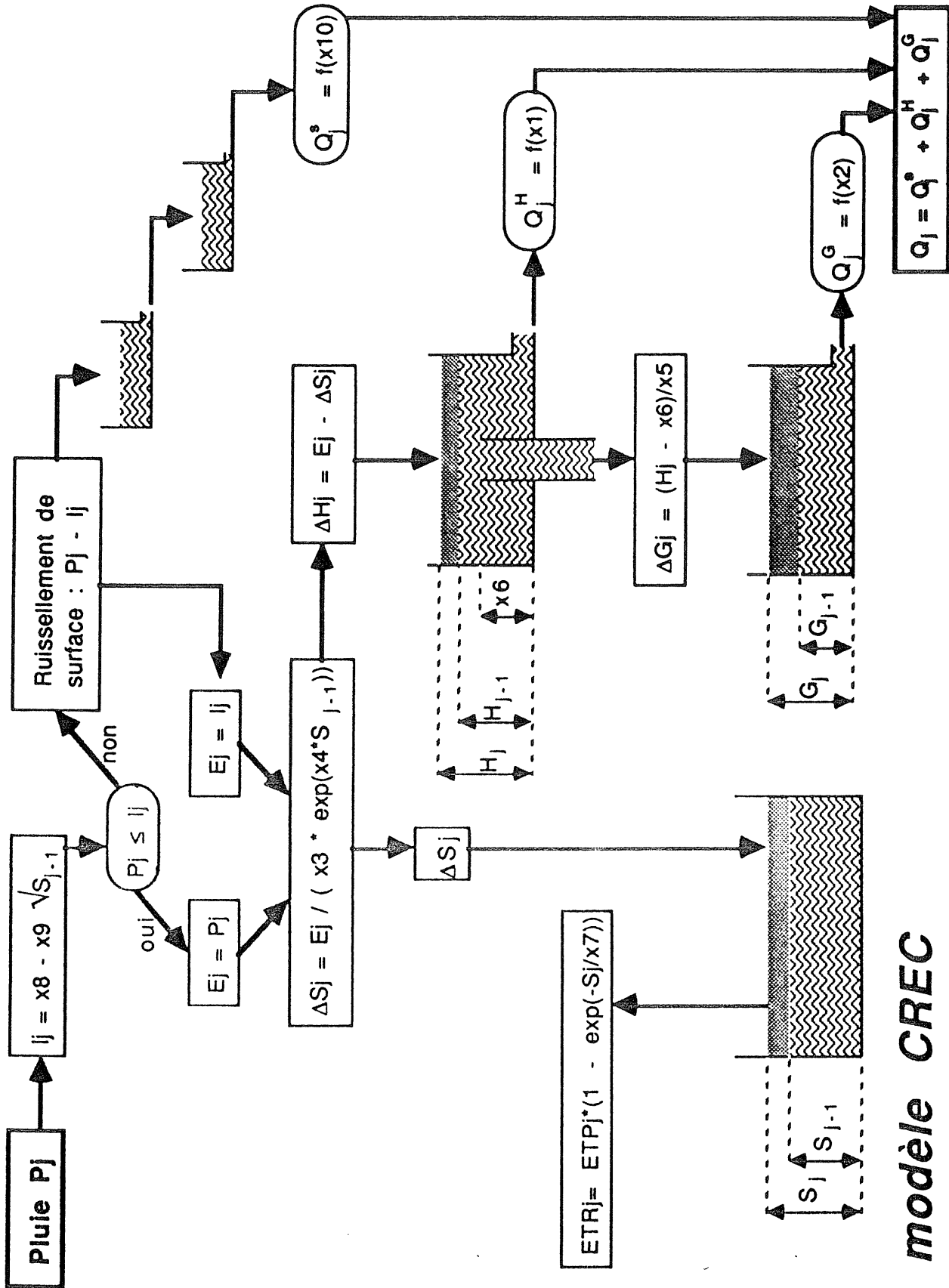


Figure 1 : Modèle CREC - Schéma conceptuel (d'après SERVAT et al, 1989).



### 1.3 PEUT - ON CONSTRUIRE UN MODELE SIMPLE ET GENERAL ?

Les paragraphes précédents ont rappelé qu'il existe de nombreuses façons de modéliser les cheminements d'une goutte d'eau depuis sa précipitation jusqu'à son passage, en un point d'une rivière: depuis un modèle assez simple comme le modèle conceptuel global CREC jusqu'aux modèles plus compliqués comme les modèles de GIRARD, de STANFORD ....etc ( ROCHE, 1971). Le nombre de paramètres est très variable : la version la plus simple de CREC à 5 paramètres ( COMBES, 1985 ), le modèle anglais DISPRIN à 21 paramètres ( Elizabeth M. SHAW, 1983 ), et STANFORD IV à 34 paramètres, dont la plupart sont obtenus par des mesures physiques sur le bassin, et les autres sont des conditions initiales ou des caractéristiques du bassin ( E.M. SHAW, 1983 ).

Vu la complexité des modèles ( même pour CREC à 5 paramètres ), on peut toujours se demander : **peut - on construire un modèle plus simple ?**. S'il y a vraiment " **un chemin plus court et plus simple** ", pourquoi doit - on passer par " **des chemins plus compliqués** " pour arriver à un but unique : " **avoir des débits les plus proches possibles de ceux réellement ou potentiellement observables sur un bassin versant** " ? ( MICHEL, 1989 ). Pour atteindre ce but, il n'est pas nécessaire de s'attacher à décrire tous les phénomènes physiques qui ont lieu dans un bassin, et il est même très souhaitable d'éviter une telle conformité exhaustive et fidèle.

La plupart des modèles existants s'attachent plus ou moins à l'analyse des phénomènes physiques se produisant dans un bassin versant, par exemple : les lois de l'infiltration, de l'évapotranspiration, de la percolation, des transferts latéraux, .....

Lorsque l'on désire améliorer un modèle du type ci-dessus, qui peut être classé parmi les modèles physiques, on est logiquement poussé à le rendre plus complexe pour de plus en plus de fidélité à la réalité, en tenant compte de la **morphologie** (forme, relief, réseau de drainage, .....), de la **nature des sols** (conductivité, hétérogénéité, épaisseurs, .....), et de la **couverture végétale** (savane, savane boisée, pseudo - steppe saharienne, forêt primaire, .....) (ROCHE, 1963).

Cette façon de procéder nous apparaît comme une impasse.

L'approche qui détaille tous ces phénomènes conduira à des calculs inextricables et à la quasi - impossibilité d'acquérir les caractéristiques physiques à introduire dans les équations représentant les mouvements de l'eau. On aboutit ainsi à un modèle lourd et extraordinairement coûteux pour l'acquisition de la description physique.

*En fait, on peut imaginer une approche beaucoup plus empirique en recherchant un modèle conceptuel très simple, global, libéré des préjugés issus de déductions physiques injustifiées du fait de la méconnaissance inévitable du système.*

Il est nécessaire qu'un modèle conceptuel soit aussi simple que possible. Toute complication ne doit lui être apportée qu'en cas de nécessité (amélioration évidente de la reproduction) (GUILBOT, 1972).

La simplicité d'un modèle permet d'éviter la difficulté de caler des paramètres conduisant à des résultats similaires. C'est cette même redondance qui entraîne la difficulté de déterminer laquelle de deux variables indépendantes fortement corrélées a produit tel ou tel effet dans une régression linéaire.

Seul un modèle simple est susceptible de donner lieu à l'établissement de relations entre ses paramètres et les caractéristiques physiques du bassin. Cela est nécessaire pour une application du modèle aux bassins versants non jaugés (GUILBOT, 1972).

C'est dans cet esprit que nous chercherons à établir un nouveau modèle conceptuel global de transformation pluie - débit, dont le pas de temps est journalier.

Nous conduirons notre recherche en respectant certaines contraintes qui donneront son caractère particulier à notre modèle :

- l'utilisation de trop nombreux paramètres provoque souvent des difficultés dans le calage. Il est donc nécessaire d'être le plus parcimonieux possible.
- l'applicabilité au plus grand nombre possible de bassins pousse à la création d'un modèle à caractère général et robuste.

- le fonctionnement doit être clair et facile à comprendre, ce qui ne peut être atteint qu'avec un modèle très simple.
- la simplicité dans l'acquisition des données suppose un modèle global.
- la possibilité d'appliquer le modèle à des bassins non jaugés nécessite des estimations a priori des paramètres d'un modèle. On n'y parviendra guère s'ils sont plus de 4.

Le modèle CREC présenté au paragraphe 1.2 nous a donné la base de départ pour créer un autre modèle plus simple. Au lieu de suivre la tendance naturelle qui consiste à modifier ce modèle en le compliquant pour augmenter ses chances de mieux représenter la réalité, nous chercherons au contraire à le simplifier à outrance en rejetant tout ce qui ne semble pas présenter un intérêt primordial.

## **DEUXIEME PARTIE**



## RECHERCHE D'UN MODELE ELEMENTAIRE

### 2.1 LE POINT DE DEPART DE LA RECHERCHE : LE MODELE GR2

Le mémoire de DEA ("**Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants**", EDIJATNO, juin 1987) avait permis, à l'issue d'un grand nombre d'essais, d'isoler un modèle très simple ne présentant que deux paramètres : le modèle GR2. L'annexe 1 donne le contenu de ce rapport pour montrer la grande diversité des conceptions que l'on peut imaginer même en se limitant à un modèle extrêmement simpliste.

Le modèle GR2 qui se révélait le plus prometteur est un modèle global à 2 réservoirs, chacun "décrit" par un paramètre. Sa structure est présentée en **figure 2** .

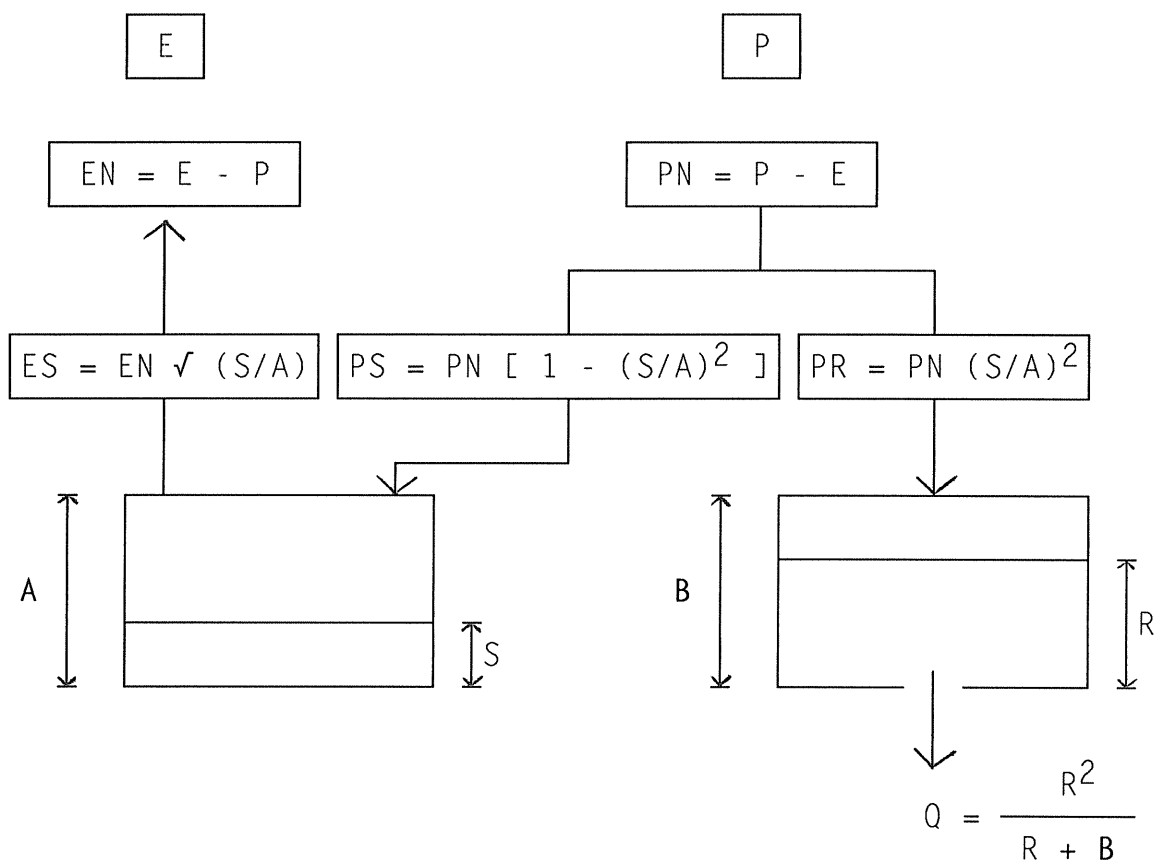
Le modèle GR2 est très simple, cependant il comporte un décalage d'un nombre de jours à préciser, entre la constatation d'un certain niveau R et le débit Q qui en résulte; on doit écrire :

$$Q_{j+d} = \frac{R_j^2}{R_j + B}$$

Ce décalage d'un jour peut disparaître pour des bassins petits ou rapides, et alors ( d = 0 ):

$$Q_j = \frac{R_j^2}{R_j + B}$$

Figure 2 : Le modèle GR2 : conclusion du mémoire de DEA



$A$  = capacité maximale du réservoir sol (premier paramètre du modèle à caler).

$B$  = rétention maximale à 1 jour du réservoir eau-gravitaire (deuxième paramètre du modèle à caler).

$E$  = évapotranspiration potentielle.

$EN$  = évapotranspiration neutralisée par la pluie brute.

$ES$  = évapotranspiration réelle (delivrée par le réservoir sol).

$P$  = pluie brute.

$PN$  = pluie neutralisée par l'évapotranspiration potentielle.

$PS$  = fraction de  $PN$  qui entre dans le réservoir sol.

$PR$  = fraction de  $PN$  qui entre dans le réservoir eau-gravitaire.

$Q$  = débit calculé.

$R$  = niveau du réservoir eau-gravitaire.

$S$  = niveau du réservoir sol.

## 2.2 L'OBJECTIF DE LA RECHERCHE

La robustesse du modèle GR2, révélée par son bon comportement sur les bassins de L'ORGEVAL et du REAL COLLOBRIER, poussait à son utilisation généralisée sur d'autres bassins versants. Le très faible nombre de ses paramètres laissait espérer une possibilité d'explication par des caractéristiques physiques et climatiques des bassins versants. Cet objectif, très souvent poursuivi, n'a guère donné de résultats convaincants à l'heure actuelle et l'on peut penser que la raison essentielle de cet échec est du aux trop grand nombre de paramètres qui subsistent même dans les modèles qui prétendent à une grande simplicité. Le modèle CREC par exemple, comporte 5 paramètres dans sa version la plus simple ( COMBES, 1985 ) et 12 paramètres dans sa version opérationnelle. Il est apparu clairement que la recherche d'une explication d'un tel nombre de paramètres est vouée à l'échec.

La seule solution possible est donc une forte réduction du nombre des paramètres. GR2, avec seulement deux paramètres, réunit d'excellentes conditions pour entreprendre cette recherche avec quelques chances de succès. Si une telle opération réussit, elle peut rendre de grands services en hydrologie appliquée. On pourra générer de longues séries des débits pour augmenter la fiabilité d'une gestion des ressources en eau, améliorer l'appréciation des divers risques, de faiblesse des ressources comme d'occurrence de crues catastrophiques. On pourra même tester l'impact sur les paramètres du modèle de certaines actions anthropiques supposées avoir une influence du modèle sur le cycle hydrologique. Une étude de sensibilité des paramètres du modèle permettrait d'apprécier la consistance de ces influences supposées. Bien sûr, au fur et à mesure que le nombre de bassins utilisés pour tester GR2 augmentera, des lacunes du modèle pourront apparaître et conduire à proposer une modification de son architecture.

## 2.3 DEROULEMENT DE LA PREMIERE ANNEE DE RECHERCHE

La première année de recherche a été handicapée par le non fonctionnement de la banque ARHMA devenue depuis HYDRO. Nous nous sommes donc tournés vers les SRAE pour obtenir directement les données de pluies et de débits sur quelques bassins. Ces données étaient très rarement disponibles sur support magnétique et l'on a dû, la plupart du temps, saisir des



données à partir de documents écrits. Il n'est pas rare qu'il y ait qu'une seule station pluviométrique sur un bassin versant. Dans le cas contraire, nous avons utilisé une moyenne de THIESSEN ou une moyenne simple.

Les données d'évaporation potentielle ont été acquises auprès de la météorologie nationale. Il s'agit de données d'ETP PENMAN décennales sur la période de 1951-1980. Les données ont été demandées au fur et à mesure des besoins, c'est-à-dire des données de débits disponibles. D'après la météorologie nationale, il n'existe que 96 stations pour l'ETP en France, dont 2 ont été fermées en 1984. Pour cette raison, nous avons choisi la station correspondant au bassin versant étudié à l'aide de la carte d'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne publiée dans l'Atlas Climatique de la France ( **annexes 2.0.1 , 2.0.2 et 2.0.3** ).

Au cours de cette première année de recherche une trentaine de bassins versants ont pu être utilisés pour tester le modèle GR2 ( **annexe 2.1** ). Comme on pouvait s'y attendre, des modifications ont dû être apportées au modèle pour l'adapter aux nouvelles situations hydrologiques introduites par des bassins dispersés dans tout le territoire métropolitain.

De même que l'architecture du modèle a dû être modifiée, de même les logiciels ont évolué pour un meilleur calage et une meilleure restitution des résultats. C'est l'ensemble de ces différents points et de leurs problèmes annexes qui forment le contenu du présent rapport et qui seront évoqués dans l'ordre où ils se sont posés.

## 2.4 LE PROBLEME DU TROISIEME PARAMETRE

### 2.4.1 *UNE NOUVELLE FONCTION A INCLURE DANS GR2*

Très rapidement, c'est-à-dire en étudiant un faible nombre de bassins, on s'est aperçu que le repérage dans le temps des flux et des stocks, généralement implicite dans la modélisation globale conceptuelle, conduisait à la prise en compte d'un troisième paramètre aussi important que les paramètres caractérisant les deux réservoirs de GR2. Un seul "décalage" posait problème

dans ce modèle : celui séparant l'entrée d'une pluie nette dans le réservoir eau gravitaire et la sortie du débit de la rivière consécutif à cette entrée.

Ainsi le modèle GR2 comprend en fait 3 paramètres, le troisième prenant des valeurs entières positives ou nulles. Le troisième paramètre dépasse rarement 2 jours pour les petits bassins versants. Néanmoins le programme d'optimisation a été enrichi pour pouvoir tester des décalages allant de 0 à 4 jours.

Il est certain que ce paramètre à valeurs discrètes s'est révélé peu satisfaisant du fait du manque de souplesse dans le fonctionnement du modèle et de l'ambiguïté des situations intermédiaires. Il était donc nécessaire de lui donner une version continue par une translation d'un réel appartenant à  $(0,4)$ .

En fait, une telle solution est encore trop brutale car, pour un décalage important, absolument aucune réaction du bassin n'est prévue avant que cette durée de décalage ne se soit écoulée, et inversement, l'impact d'une pluie nette importante garde toute sa force même après un décalage de 2 ou 3 jours.

Il fallait donc construire un troisième opérateur pour traiter de façon convenable cette fonction spécifique, partie intégrante de la fonction de transfert du modèle.

#### *2.4.2 L'HYDROGRAMME UNITAIRE POUR SIMULER UN TEMPS D'ACCES AU RESERVOIR EAU GRAVITAIRE*

La fonction de transfert du modèle GR2 avait donc précédemment 2 composantes :

- une translation, pour simuler un temps d'accès au réservoir eau gravitaire ;
- une vidange du réservoir eau gravitaire, pour simuler une décrue progressive.

Il est bien connu que la simple translation, qui s'apparente à un routage cinématique, est une solution assez sommaire, même en hydrologie. Un routage dans la lignée des modèles diffusants peut être simplement effectué par la

technique de l'hydrogramme unitaire. C'est par exemple la solution adoptée par HAYAMI dans son modèle d'onde diffusante à coefficients constants.

Ici nous devons nous limiter absolument à une fonction dépendant d'un seul paramètre.

Le report de la pluie proportionnellement à une puissance du délai de ce report est une solution simple et qui peut assurer de façon heureuse une transition avec la méthode antérieure.

Une pluie nette PR produite à l'instant 0 donnerait ainsi lieu à une succession d'entrées dans le réservoir R donnée par :

$$\begin{aligned} PR_0 &= C (1/2)^\alpha PR \\ PR_1 &= C (1+1/2)^\alpha PR \\ &\vdots \\ PR_k &= C (k+1/2)^\alpha PR \end{aligned}$$

jusqu'à une date N telle que :

$$PR_0 + PR_1 + \dots + PR_N \leq PR < PR_0 + PR_1 + \dots + PR_{N+1}$$

Le pas de temps N+1 correspondrait alors au reliquat pour atteindre la valeur PR.

**Le véritable troisième paramètre est le coefficient multiplicateur C.** Le paramètre  $\alpha$  est d'une importance secondaire et quelques tests rapides ont pu déterminer s'il valait mieux prendre  $\alpha = 2$  ou  $\alpha = 3$  qui paraissent les plus appropriées.

Les essais effectués montrent une faible influence de l'exposant avec une légère supériorité pour  $\alpha = 2$ . Nous avons donc retenu cette dernière valeur.

### 2.4.3 UNE FORMULATION CONTINUE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE

La formulation précédente peut prendre une forme tout à fait continue en posant comme hydrogramme unitaire  $q(t)$  :

$$q(t) = \frac{3 t^2}{C^3}$$

où le paramètre  $C$  est le temps de base de l'hydrogramme unitaire. En effet on a bien :

$$\int_0^C q(t) dt = 1$$

Avec cette nouvelle notation on aura comme coefficients multiplicateurs successifs de la pluie nette :

$$\frac{PR_0}{PR} = \int_0^t q(t) dt$$

$$\frac{PR_1}{PR} = \int_t^{2t} q(t) dt$$

⋮

$$\frac{PR_N}{PR} = \int_{Nt}^{(N+1)t} q(t) dt$$

et

$$\frac{PR_{N+1}}{PR} = \int_{(N+1)t}^C q(t) dt$$

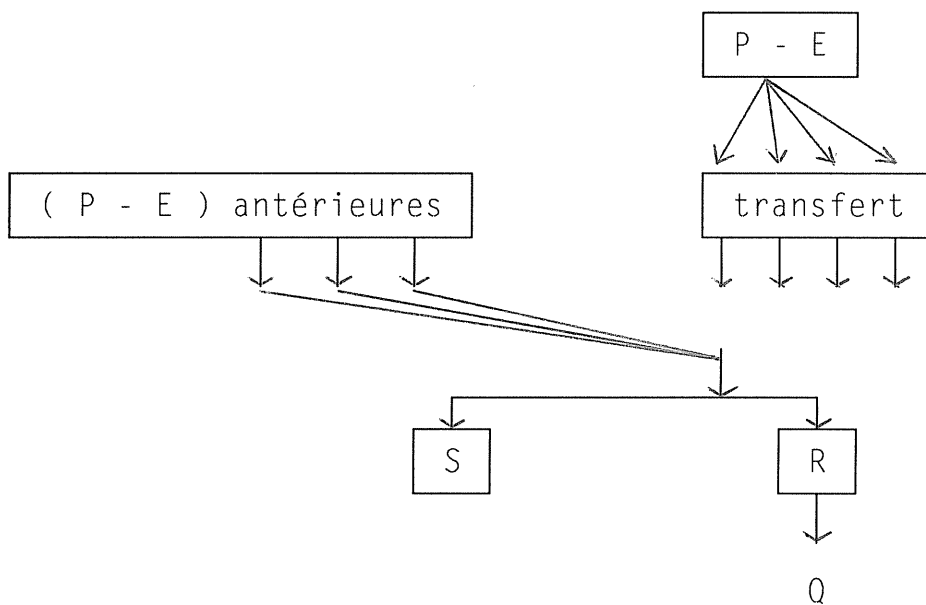
avec  $N$  tel que  $N+1 = \text{INT}(C)$

On obtient, à partir de là, un modèle à 3 paramètres que l'on dénommera : **le modèle GR3** ou plus exactement **GR3J** ( Génie Rural à 3 paramètres, au pas de temps Journalier ).

#### 2.4.4 UNE REMISE EN CAUSE DE LA PLACE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE ?

Précédemment on vient de voir la nécessité d'introduire un hydrogramme unitaire pour traduire la part de la fonction de transfert qui ne peut pas être prise en compte par la vidange du réservoir eau gravitaire. Cependant on peut se poser la question de la place dans l'architecture du modèle GR3 de cet opérateur de transfert.

Il a toujours été admis de placer la fonction de transfert à l'aval de la fonction de rendement, mais il peut s'agir là d'une de ces habitudes que l'on ne remet jamais en cause et qui le méritent pourtant. On a donc essayé de placer ce transfert à la suite immédiate de l'apparition de la pluie brute.



**Figure 3** : Modèle GR3 avec un transfert avant rendement

Cela permet un lissage des entrées soumises à la fonction de rendement et peut améliorer la modélisation comme c'est le cas à pas de temps très fin en matière de prévision de crue.

Une comparaison des deux approches a été faite sur les 30 premiers bassins versants disponibles et a montré que le gain sur la fonction critère est très

faible quand on passe de l'une à l'autre. Il est nettement plus souvent en faveur de l'hydrogramme unitaire à l'amont de la fonction de rendement, comme l'indique le **tableau 1** .

N° de BV	Gain en %	N° de BV	Gain en %	N° de BV	Gain en %
0	- 0.2	10	0.1	20	0.1
1	0.1	11	0.0	21	0.1
2	0.0	12	0.0	22	0.0
3	0.0	13	- 0.3	23	0.0
4	0.1	14	0.0	28	- 0.6
5	0.2	15	0.1	30	- 0.2
6	0.0	16	0.1	31	0.5
7	0.0	17	0.1		
8	0.0	18	- 0.9		
9	0.0	19	0.1		

**Tableau 1 :**

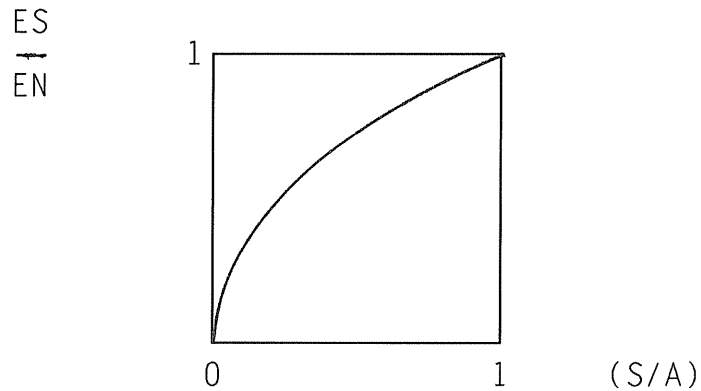
Gain obtenu sur le critère quadratique relatif aux pluies en plaçant le transfert sur les pluies brutes.

En fait l'intérêt est assez faible et ce procédé alourdit quelque peu la compréhension du modèle. En effet cela revient à scinder le module transfert en 2 parties séparées par la fonction de rendement placée en son milieu. On a jugé que le gain apporté par ce changement ne compensait pas la diminution de clarté du modèle, et on y a renoncé.

## 2.5 UNE AUTRE FONCTION DE RENDEMENT DE L'EVAPORATION

Le modèle GR2 tel qu'il avait été élaboré au cours de la recherche en DEA avait conduit à une fonction de réduction de l'évaporation potentielle en évaporation réelle exprimée par le coefficient suivant :

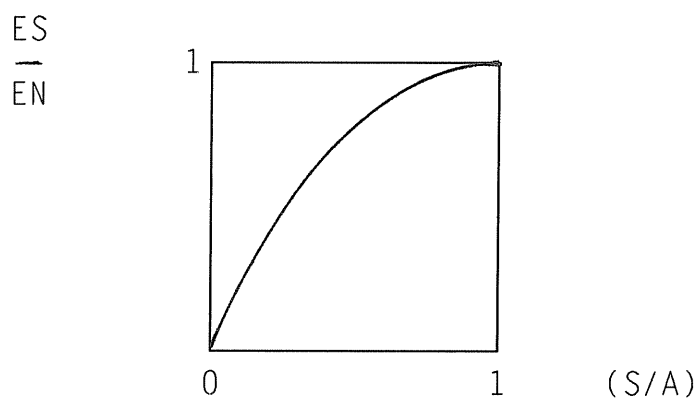
$$\frac{ES}{EN} = \sqrt{S/A}$$



**Figure 4** : La fonction de réduction de l'ETP dans le modèle GR2

Une telle formulation a l'avantage de bien traduire la brutalité de la réduction  $EN \longrightarrow ES$  lorsque l'on s'approche de l'épuisement du réservoir-sol. Cependant, à l'autre bout, elle ne paraît pas très convaincante en ce qui concerne le comportement à la saturation. En effet  $ES$  s'écarte sensiblement de  $EN$  dès que  $S$  décroche du niveau maximum  $A$ .

Dans la réalité il semble qu'il faille plutôt retarder le moment où l'ETP n'est plus satisfaite à 100%. Cela peut être réalisé par un point de tangence horizontale pour  $(S/A)$  égal à 1 comme l'indique la **figure 5** .



**Figure 5** : La fonction de réduction de l'ETP dans le modèle GR3

Cette caractéristique peut être traduite très simplement par un arc de parabole :

$$\frac{ES}{EN} = (S/A) [ 2 - (S/A) ]$$

On peut remarquer que cette fonction est symétrique de la fonction rendement pluie brute neutralisée ----> pluie nette qui s'écrit :

$$\frac{PR}{PN} = (S/A)^2$$

En effet, les graphes des 2 fonctions sont symétriques par rapport au point  $(1/2, 1/2)$  ( **annexe 6** ).

La comparaison entre les deux formulations qui a été entreprise sur une trentaine de bassins a montré un très faible avantage à cette nouvelle version de réduction de l'évaporation potentielle comme l'indique le **tableau 2** ci-après :

N° du BV	gain en %	N° du BV	gain en %	N° du BV	gain en %
0	0.0	10	0.0	20	- 0.1
1	0.3	11	0.2	21	0.2
2	0.8	12	0.5	22	0.1
3	0.7	13	0.0	23	0.0
4	0.7	14	0.1	28	- 1.6
5	0.0	15	0.1	30	- 0.1
6	0.0	16	- 0.1	31	0.1
7	0.0	17	0.5		
8	- 0.1	18	0.1		
9	0.0	19	- 0.1		

**Tableau 2 :**

Gain du à l'introduction de la nouvelle fonction de rendement sur l'évaporation potentielle

En moyenne l'amélioration existe malgré l'existence de quelques contre-performances. La nouvelle formulation a été retenue du fait d'une simplicité analytique exploitée ultérieurement.



## 2.6 SENSIBILITE A LA QUALITE DES ENTREES

Les Anglo Saxons disent "garbage in, garbage out", que l'on peut traduire par "mauvaises entrées, mauvaises sorties". En fait, il s'agit d'un problème à double face qu'il convient d'analyser prudemment. Le postulat qu'il convient de faire est que les données sont inévitablement entachées de nombreuses erreurs mais qu'elles sont indispensables à toute activité relevant de l'ingénierie et tout spécialement en hydrologie. L'écueil à éviter est la tentation de reporter sur la mauvaise qualité des données, la responsabilité de l'échec d'une modélisation a priori respectable. Il est important cependant de tester le comportement du modèle et en particulier de son calage à l'imprécision des données d'entrée. Répétons que cette imprécision est un fait et qu'il faut "faire avec".

### 2.6.1 SENSIBILITE AUX ERREURS SUR LES ENTREES

On peut aborder le problème de différentes façons :

- a) tester une modification stochastique en introduisant un processus d'erreur modélisé
- b) tester une correction d'échelle : correction systématique due à un effet orographique par exemple
- c) utiliser d'autres données réelles mais jugées moins représentatives que celles concernant réellement le bassin.

Les solutions b) et c) ont été examinées pour le modèle GR3. Pour la méthode b) une modification de 20% de la pluie ou de l'évaporation prise en compte a été étudiée. La détérioration des performances du modèle peut être assez importante comme l'indique le **tableau 3** :

N° du BV	Variable modifiée la plus sensible	Dégradation du critère%	N° du BV	Variable modifiée la plus sensible	Dégradation du critère%
0	P	6.4	10	P	6.8
1	P	7.9	11	P	7.8
2	P	10.5	12	P	9.7
4	P	9.4	13	P, E	8.8
5	P	4.5	14	P	4.9
6	P	7.6	15	P	3.9
7	P	7.9	16	P	6.4
8	P	7.8	17	P	8.3
9	P	5.5	18	P	9.9
			19	P	7.9
			20	P	6.5

**Tableau 3 :**

Dégradation des performances du modèle suite à la modification de 20% de la variable d'entrée la plus sensible.

On constate que c'est essentiellement la modification de la pluie P qui conduit à la plus forte détérioration des sorties du modèle.

La même modification de E conduit à une variation du critère quadratique de deux à cinq fois plus faible. Parfois cette modification de P peut conduire à un fonctionnement et un jeu de paramètres très différents.

La solution c) a été envisagée sur quelques bassins où existaient plusieurs stations pluviométriques. Par exemple, les bassins du REAL COLLOBRIER où la pluie est assez variable spatialement et mesurée en de nombreux points. Les performances du modèle se maintiennent de façon correcte.

### 2.6.2 CORRECTION DES ENTREES ?

Etant donné l'importance des données d'entrée et la nécessité de recourir parfois à un capteur assez éloigné du bassin versant, on peut être inquiet du calage du modèle avec des données assez systématiquement biaisées.

On a donc essayé d'optimiser une correction de la pluie et de l'évaporation potentielle. Il est évident qu'une telle procédure conduit à une amélioration des résultats. Les paramètres varient également mais pas toujours dans des proportions très importantes.

Cependant, de manière générale, on ne peut pas conclure grand chose de ces essais. Et surtout la démarche paraît dangereuse dans la mesure où elle brouille les cartes en paraissant atténuer parfois de mauvaises performances quant elles existent.

Il nous a paru plus instructif de nous en tenir très rigoureusement aux données disponibles avec, certes, leurs imperfections, mais des imperfections réelles et neutres vis-à-vis du modèle employé.

### 2.6.3 PROBLEME DE L'EVAPORATION POTENTIELLE

La détermination de l'évaporation potentielle est l'objet de tout un modèle placé en amont de la transformation pluie-débit. Il était hors de propos de s'intéresser à cet aspect malgré son importance. Notre seul souci a été de tester des données diverses pour proposer un bon compromis entre pertinence et accessibilité.

L'ETP retenue est celle donnée par la formule de PENMAN. Malheureusement sa détermination est effectuée en un faible nombre de stations car il est nécessaire d'avoir de nombreuses mesures climatiques concomitantes.

La solution adoptée au début de la recherche a été de prendre la température journalière (moyenne de la température maximale et de la température minimale) et de la transformer pour obtenir une valeur dont la sommation sur un pas de temps décadaire ou mensuel s'approche le plus possible de l'ETP PENMAN. Une simple transformation en fonction puissance est apparue comme suffisante. Au niveau journalier on peut admettre :

$$E = \left[ \frac{t}{m} \right]^{1.4} \quad \begin{array}{l} t \text{ en } 0.1 \text{ } ^\circ\text{C} \\ E \text{ en mm / jour} \end{array}$$

Le coefficient  $m$  variant selon la région. L'exposant 1.4 semble assez systématiquement correct. C'est ce phénomène qui avait conduit à intégrer l'estimation de l'ETP dans le modèle en calant le coefficient  $m$  de façon similaire aux trois autres paramètres du modèle.

Cependant pour éviter d'introduire un arbitraire on a renoncé à cette solution comme expliqué précédemment. En fait les fichiers de températures journalières ne sont pas beaucoup plus accessibles que les fichiers d'ETP et il nous a semblé plus sage de revenir à cette dernière variable.

Compte tenu de l'importance relativement réduite de cette variable ETP et de son inévitable incertitude du fait de la nécessité de recourir à un poste parfois assez éloigné du bassin étudié, on s'est demandé si l'on ne pourrait pas introduire seulement des valeurs moyennes sur plusieurs années, pour chaque décade concernée. Cela simplifie grandement l'acquisition des données qui se trouve résumée en un tableau de 36 valeurs pour une station synoptique donnée.

Pour apprécier l'influence de cette décision sur le calage de GR3 on a comparé pour quelques bassins versants les performances du modèle en utilisant soit les données décadales de l'année considérée soit des données décadales issues d'une moyenne sur plusieurs années.

Cette comparaison a été menée sur 10 bassins versants et les résultats sur le critère d'évaluation du modèle sont rassemblés dans le **tableau 4** .

N° BV	1	2	3	4	5	6	7	8	10	13
E	14.6	5.6	7.0	6.5	15.0	8.1	6.8	3.7	15.4	9.4
$\bar{E}$	15.1	5.5	7.1	6.8	15.1	7.9	6.8	4.0	15.1	9.6

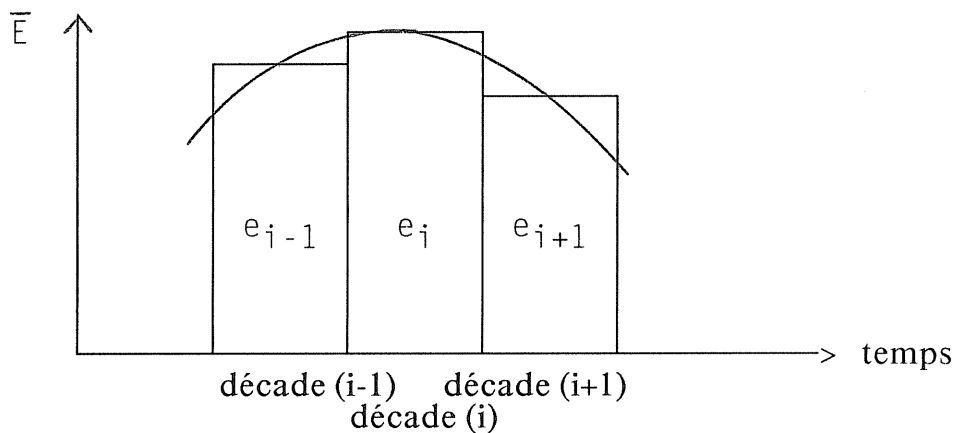
**Tableau 4 :**

Valeurs du critère pour l'évaporation potentielle datée et moyenne (critère à minimiser)

Il est assez surprenant de constater que la supériorité du recours aux données datées, en principe plus pertinentes, n'est pas systématique (six fois sur

dix seulement). Le gain est très souvent assez faible. Il est donc assez facile d'opter pour la solution des évaporations décadaires moyennes ce qui simplifie grandement le problème de l'acquisition des données.

Le modèle fonctionnant au pas de temps journalier, il a été nécessaire de désagréger les données décadaires. Pour cela on a choisi de représenter les variations temporelles à l'intérieur d'une décade par un arc de parabole calé à l'aide des deux décades adjacentes comme l'indique la **figure 6** ( voir l'**annexe 16.1** ).



**Figure 6** : La désagrégation de l'ETP

$$E_t = \alpha t^2 + \beta t + \gamma \quad \text{valable pour la décade } i.$$

On cale  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  de façon que :

$$\sum_{t \in (i-1)} E_t = e_{i-1}$$

$$\sum_{t \in (i)} E_t = e_i$$

et 
$$\sum_{t \in (i+1)} E_t = e_{i+1}$$

$e_{i-1}$ ,  $e_i$ ,  $e_{i+1}$  étant les évaporations décadaires.

On retient ensuite l'expression de  $E_t$  uniquement pour la décade centrale  $i$ .

**On répète de façon glissante (et cyclique) ce processus.**

#### *2.6.4 PROBLEME DE LA NEIGE*

Le modèle GR3 est prévu pour exprimer la transformation pluie-débit exclusivement. Le problème du devenir de la neige n'est pas pris en compte dans le modèle ; ou plus précisément, les précipitations neigeuses sont traitées comme si elles étaient de la pluie. Il est bien évident que le modèle ne peut pas fonctionner correctement dans ces conditions.

Cependant, si le phénomène neigeux est assez rare, son existence n'interdit pas le calage du modèle et un fonctionnement satisfaisant de ce dernier en dehors des périodes neigeuses.

L'observation de quelques bassins relevant de ce type a montré que le problème ne se posait pratiquement pas pour moins de 10 jours par an de neige ou de traces de neige. Par contre, le modèle est très fortement perturbé au delà de 25 jours par an de neige ou de trace de neige.

#### *2.6.5 LACUNES DANS LES DONNEES PLUVIOMETRIQUES*

Bien évidemment, l'absence de données pluviométriques ne peut pas être acceptée, en calage comme en validation. Il faut donc, dans toute la mesure du possible, combler ces lacunes avec des données de postes pluviométriques de remplacement, en les choisissant le moins éloignés possible de la zone concernée.

Il existe un type de lacunes très fréquent qui, par contre, peut être accepté sans trop de difficulté : c'est l'existence d'un cumul de pluie sur plusieurs jours. Dans ce cas, la lacune ne porte que sur la répartition dans le temps d'une quantité globale connue.

Une répartition sommaire de la quantité globale entre les différents jours figurant en lacune est tout à fait supportable par le modèle GR3 autant dans la phase du calage que celle de contrôle ou de validation. Il suffit, lors de l'opération de calage, de mettre en lacune la période de débits correspondante ainsi que les quelques jours qui suivent.

## 2.7 CONCEPTION A PAS DE TEMPS VARIABLE

### 2.7.1 OBJECTIF

Il peut être intéressant d'exprimer le modèle sous une forme intrinsèque ou plus exactement instantanée, donc indépendante du pas de temps. De cette formulation on pourrait dériver une forme discrétisée où les données sont connues et introduites dans le modèle a pas de temps fixe. Outre l'intérêt d'avoir un modèle directement adaptable à des bassins divers (simulation, prévision, crues, étiages, ..... ) qui font généralement référence à des pas de temps différents, on établit des équations mieux conçues que si on les exprimait directement sous forme discrétisée.

C'est ainsi qu'écrire la vidange d'un réservoir quadratique sous la forme :

$$Q_j = k R_j^2$$

conduit à des incohérences de comportement comme par exemple l'obtention d'effets supérieurs aux causes.

La même relation écrite sous forme instantanée :

$$q = k R^2$$

et intégrée sur le pas de temps  $\Delta t$  donne :

$$Q_j = \frac{R_j^2}{R_j + (1/k\Delta t)}$$

qui ne présente pas les inconvénients de la loi précédente.

### 2.7.2 ALIMENTATION DU RESERVOIR SOL

Lorsque la pluie dépasse l'évaporation, on a en fonctionnement instantané :

$$dS = [ 1 - (S/A)^2 ] dPS$$

ce qui donne après intégration sur un pas de temps où l'on reçoit la quantité PS :

$$\frac{1 + (S'/A)}{1 - (S'/A)} * \frac{1 - (S/A)}{1 + (S/A)} = e^{2(PS/A)}$$

où S est l'état du réservoir au début du pas de temps et S' l'état en fin de ce pas de temps.

Ce qui après quelques arrangements donne : ( voir l'annexe 3.1 )

$$(S'/A) = \frac{(S/A) + \tanh (PS/A)}{1 + (S/A) \tanh (PS/A)}$$

### 2.7.3 SOUTIRAGE DANS LE RESERVOIR S

Lorsque, contrairement au cas précédent, l'évaporation est supérieure à la pluie on a l'équation suivante :

$$dS = - (S/A) [ 2 - (S/A) ] dES$$

Au cours d'un pas de temps où le réservoir est soumis à l'évaporation ES le réservoir sol passe de l'état S à l'état S' et l'on a :

$$\frac{(S'/A) - 2}{(S/A) - 2} * \frac{(S/A)}{(S'/A)} = e^{2(ES/A)}$$



ce qui donne après quelques calculs : ( voir l'annexe 3.2 )

$$(S'/A) = \frac{(2 S/A)}{(S/A) + [2 - (S/A)] e^{2(ES/A)}}$$

## 2.8 PROBLEMES DE CALAGE

### 2.8.1 INITIALISATION DU RESERVOIR SOL

Un des problèmes de la modélisation conceptuelle est l'initialisation du système. Ce problème est assez grave pour rendre pratiquement illusoire le fonctionnement par événement d'un tel modèle.

En ce qui concerne GR3, le problème de l'initialisation est réduit au minimum puisque seule l'initialisation du réservoir sol est à définir. Le niveau du réservoir R est en effet directement lié au débit initial de la série.

Face au problème de l'initialisation du réservoir sol, on peut adopter deux solutions :

- a) considérer le niveau initial comme un quatrième paramètre à caler ;
- b) ne pas tenir compte d'une période plus ou moins longue suivant l'initialisation, dans le critère d'appréciation des résultats fournis par le modèle.

Les deux solutions conviennent tout à fait dans le cas de GR3. En particulier, pour la solution a), le quatrième paramètre étant tout à fait d'une autre nature que A, B et C, son introduction dans le jeu des paramètres à caler n'entraîne pas l'apparition d'optimums secondaires. Cependant, cette solution a) peut localement apporter un surcalage dont il serait dangereux de tenir compte dans la fonction critère. On ne peut donc pas trop réduire la période de mise en route nécessitée par l'application de la démarche b). L'avantage de cette

méthode a) devient alors assez mince et il nous est apparu préférable de nous en tenir à la méthode traditionnelle (b).

Une étude de la durée de la période de mise en route a montré qu'il est préférable, par mesure de sécurité, de garder une année complète à cet effet, bien que dans de nombreux cas, quelques mois suffiraient à éponger l'influence de l'initialisation du système.

### *2.8.2 METHODE DE RECHERCHE DE L'OPTIMUM*

La méthode utilisée initialement pour GR2 était le balayage systématique de tout le domaine de variation des deux paramètres du modèle. Ce balayage permettait, outre la détermination du jeu de paramètres optimal, de représenter la fonction critère et donc d'obtenir d'emblée une étude de sensibilité des paramètres. Cette méthode, acceptable pour deux paramètres devient prohibitive pour trois paramètres. On a donc eu recours à une méthode de gradient, classique en la matière : la méthode ROSENBROCK.

Cependant, compte tenu de quelques déboires rencontrés dans son utilisation, on a préféré recourir à une méthode plus rudimentaire de recherche systématique pas à pas ( MICHEL, 1989 )( **annexe 3.3** ). La méthode tire sa rusticité d'une transformation préalable de l'espace des paramètres par la fonction logarithmique. Le sous-programme FOND présenté parmi différents sous-programmes en **annexe 15** permet de se représenter de façon précise la procédure de recherche de l'optimum.

### *2.8.3 EXISTENCE D'OPTIMUM SECONDAIRES ?*

L'analyse des résultats des quelques trente premiers bassins a permis de déterminer le domaine de GR3 correspondant aux paramètres A, B et C calés pour chaque bassin. On a pu ainsi baliser ce domaine par quelques sommets types. On a ensuite utilisé systématiquement chaque sommet comme point de départ d'une recherche de l'optimum pour chaque bassin versant étudié. On a pu vérifier que quel que soit le point de départ de la recherche, cette dernière convergeait toujours vers le même optimum. Cela montre la rusticité du modèle et la facilité de calage qui en résulte.

## 2.9 - CONCLUSION : MODELE GR3 DE BASE

A partir du modèle GR2 largement ébauché au cours du DEA, nous avons pu mettre au point un modèle plus général à trois paramètres, GR3, qui pourrait prétendre décrire la transformation pluie-débit, au pas de temps journalier, sur la plupart des bassins versants de taille petite à moyenne. Sur quelque trente bassins versants, on a pu identifier une mauvaise adéquation dans 10 à 20% des cas. Ce taux d'échec est relativement réduit compte tenu de la simplicité du modèle ( annexes 4 et 5 ).

Au cours de l'étude successive des bassins versants dont les données ont été mises à notre disposition, nous avons introduit des améliorations ou résolu des problèmes qui permettent de mieux comprendre comment fonctionne le modèle. On peut considérer la recherche déjà entreprise comme très encourageante et prometteuse pour les deux années de recherche qu'il reste à consacrer à la mise au point du modèle et à l'étude de ses paramètres.

Cependant, la présentation générale du fonctionnement du modèle GR3 dit "de base" a déjà été publiée dans une revue internationale de l'eau : "LA HOUILLE BLANCHE" ,No. 2, 1989, pp 113 - 121, sous le titre: "UN MODELE PLUIE-DEBIT JOURNALIER A TROIS PARAMETRES" ( annexe 6 ).

# **TROISIEME PARTIE**



## ANALYSE DE DIFFERENTS PROBLEMES RENCONTRES DANS L'APPLICATION DU MODELE.

Précédemment dans la deuxième partie, nous avons exposé des modifications du modèle GR3 en vue d'améliorer son comportement face à diverses difficultés. Ces modifications nous ont permis également de mieux comprendre le fonctionnement du modèle.

Cette étude menée sur une trentaine de bassins versants nous a conduit à mettre au point un modèle plus général que nous espérons voir fonctionner correctement pour les applications ultérieures.

En utilisant les données d'environ soixante-dix bassins versants nouveaux (les 110 ensembles de bassins étudiés sont présentés dans l'annexe 2.2 et la figure 7 ), nous avons découvert à nouveau des problèmes qui nous ont poussé à réexaminer l'architecture du modèle GR3. Parallèlement le fonctionnement du programme de calage a aussi été amélioré.

Cependant, nous avons abandonné notre critère utilisant  $\Sigma P^2$  (annexe 6) et nous utiliserons une modification du critère de NASH (NASH et SUTCLIFFE, 1970) :

$$T = 1 - \sqrt{\left[ \frac{\Sigma (Q_c - Q_o)^2}{\Sigma (Q_o - Q_m)^2} \right]}$$

avec :

$Q_c$  = débit calculé

$Q_o$  = débit observé

$Q_m$  = moyenne de débits observés.

Nous allons examiner ci-après, ces différents points successivement.

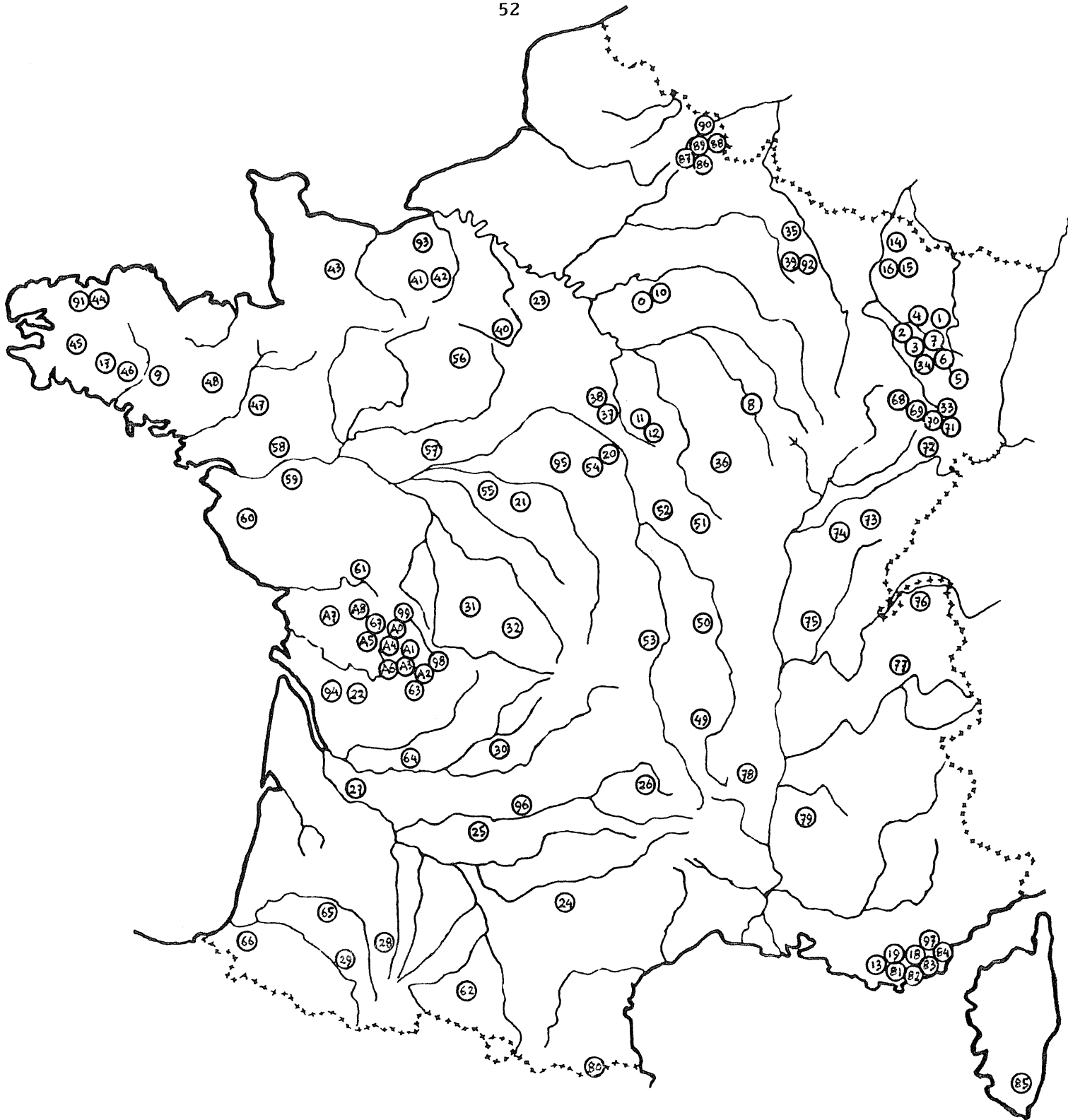


Figure 7 : Répartition spatiale des bassins versants étudiés.

### 3.1 PROBLEME DES BASSINS VERSANTS AVEC ECOULEMENT INTERMITTENT

Un bassin versant ayant son écoulement intermittent est caractérisé par la non pérennité de son cours d'eau. Le débit est nul en dehors des périodes pluvieuses et pas seulement pendant l'été . Un écoulement n'a lieu que s'il y a une forte pluie ou bien une pluie de longue durée. Il n'y a donc pas de débit de base.

Parmi les 110 bassins versants étudiés, nous avons observé deux bassins de caractère non pérenne, ce sont :

1. GRANCHAIN à GRANCHAIN (11.6 km<sup>2</sup>) - Haute Normandie
2. COINON à MAINVILLIER (45.3 km<sup>2</sup>) - Centre.

La caractéristique non pérenne de ces bassins semble à l'origine d'un problème à la modélisation se traduisant par des critères égaux à 0% et - 60% (tableaux 5 et 6).

Les résultats graphiques montrent bien que le modèle ne réussit pas à simuler les absences de débits. Les débits calculés sont presque constants pour le bassin de GRANCHAIN ( **figure 8** ). Tandis que la simulation du bassin de COINON a donné des pointes de crues écrêtées ( **figure 9** ).

Il n'est pas facile d'identifier la cause de ces défauts. Dans un premier temps on peut étudier l'effet d'un traitement préalable de la pluie. Pour cela, nous essayons de traiter les données de pluie de 2 façons différentes :

- (1) une correction multiplicative globale de la pluie
- (2) un traitement soustractif sur la pluie.

Avec ces deux traitements, la simulation donne des résultats surprenants. Le traitement soustractif surtout apporte de l'amélioration. Les **tableaux 5 et 6** montrent qu'il y a une augmentation remarquable sur les critères de 33% pour le bassin de GRANCHAIN et de 113% pour COINON. Le modèle simule bien la chronique des débits du bassin de COINON, tant pendant les crues que pendant les périodes sèches ( **figure 11** ). Cependant, la simulation du bassin de



GRANCHAIN donne un résultat un peu moins bon : les fortes crues sont sous-estimées, et les faibles crues sont sur-estimées ( **figure 10** )

Avec ce traitement soustractif, les seules pluies prises en compte sont celles qui sont supérieures à un certain seuil (4.9 mm pour le bassin de GRANCHAIN et 3.3 mm pour COINON).

Nous remarquons de plus que le paramètre B, c'est-à-dire la rétention maximale à 1 jour du réservoir eau-gravitaire des deux bassins est très faible (**tableaux 5 et 6**), ce qui signifie que le réservoir eau-gravitaire se remplit et relâche le débit rapidement. C'est pour cela que le bassin n'a pas de débit de base.

Pour résoudre correctement le cas des bassins avec écoulement intermittent, il faudrait faire une étude particulière, pour bien prendre en compte leur spécificité. En effet, avec seulement 2 exemples de bassins, nous ne pouvons pas garantir que le traitement soustractif de la pluie est la meilleure solution. C'est pourquoi nous arrêterons là l'étude des bassins intermittents.

**Tableau 5** : Résultat de simulation pour le bassin du GRANCHAIN

Bassin versant	GRANCHAIN à GRANCHAIN		
Superficie (km <sup>2</sup> )	11.6		
Période de simulation	1984 - 1987		
Durée de mise en route (jour)	365		
Donnée de pluie	sans traite.	correction multiplicative	traitement soustractif
Critère de NASH (%)	0.00	28.6	32.9
Paramètre : ln (A)	7.74	5.10	5.24
ln (B)	16.64	0.54	0.96
ln (C)	- 9.74	0.00	- 0.23
Correction sur la pluie	-	- 0.76	1.59

**Tableau 6 : Résultat de simulation pour le bassin du COINON**

Bassin versant	COINON à MAINVILLIERS		
Superficie (km <sup>2</sup> )	45.3		
Période de simulation	1980 - 1984		
Durée de mise en route (jour)	365		
Donnée de pluie	sans traite.	correction multiplicative	traitement soustractif
Critère de NASH (%)	- 59.8	50.2	52.8
Paramètre : ln (A)	6.63	5.16	5.59
ln (B)	7.64	1.10	1.85
ln (C)	- 16.78	- 0.22	- 0.54
Correction sur la pluie	-	- 0.64	1.19

Figure 8 : Simulation du bassin versant de GRANCHAIN.

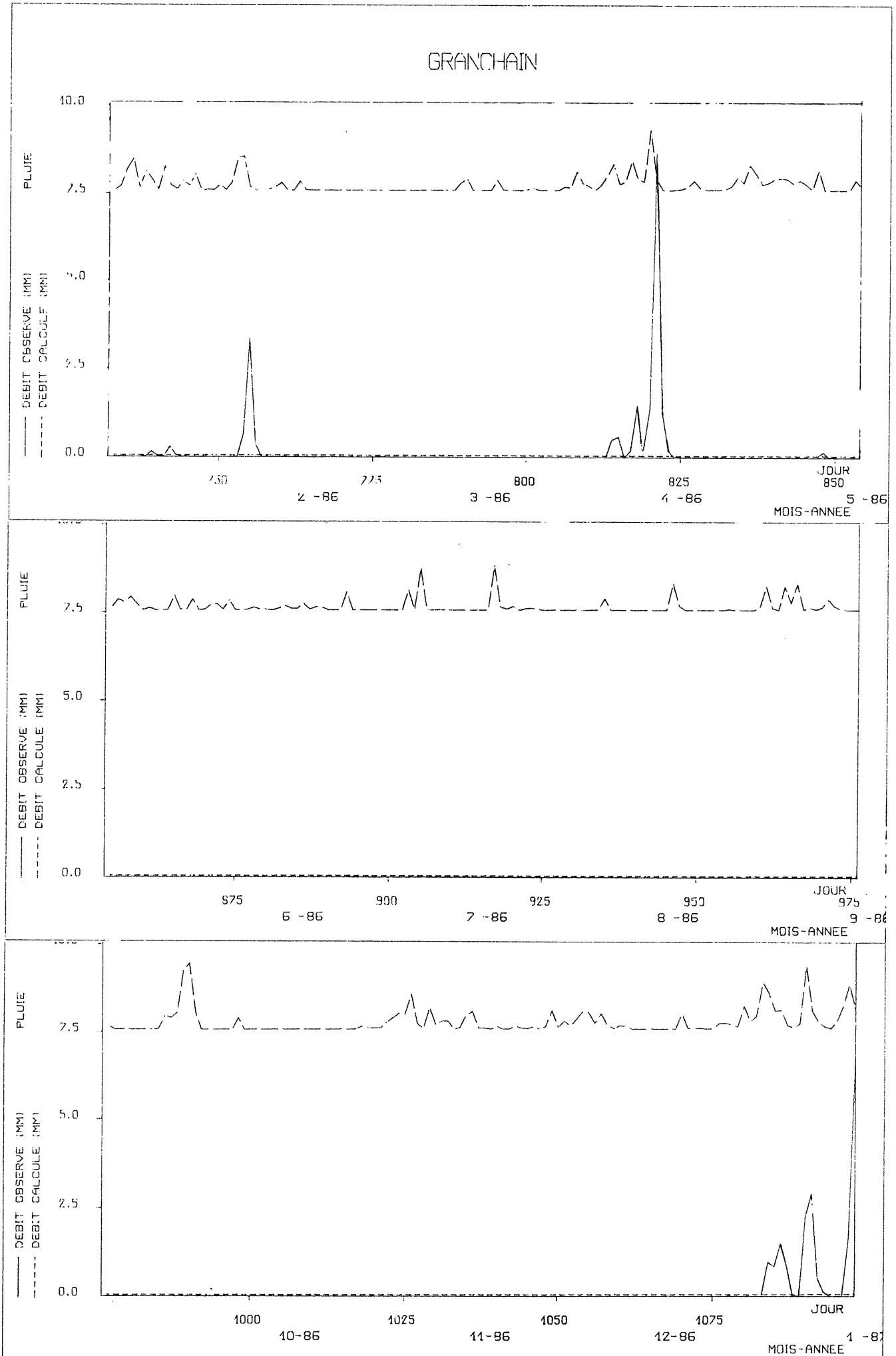


Figure 9 : Simulation du bassin versant de COINON.

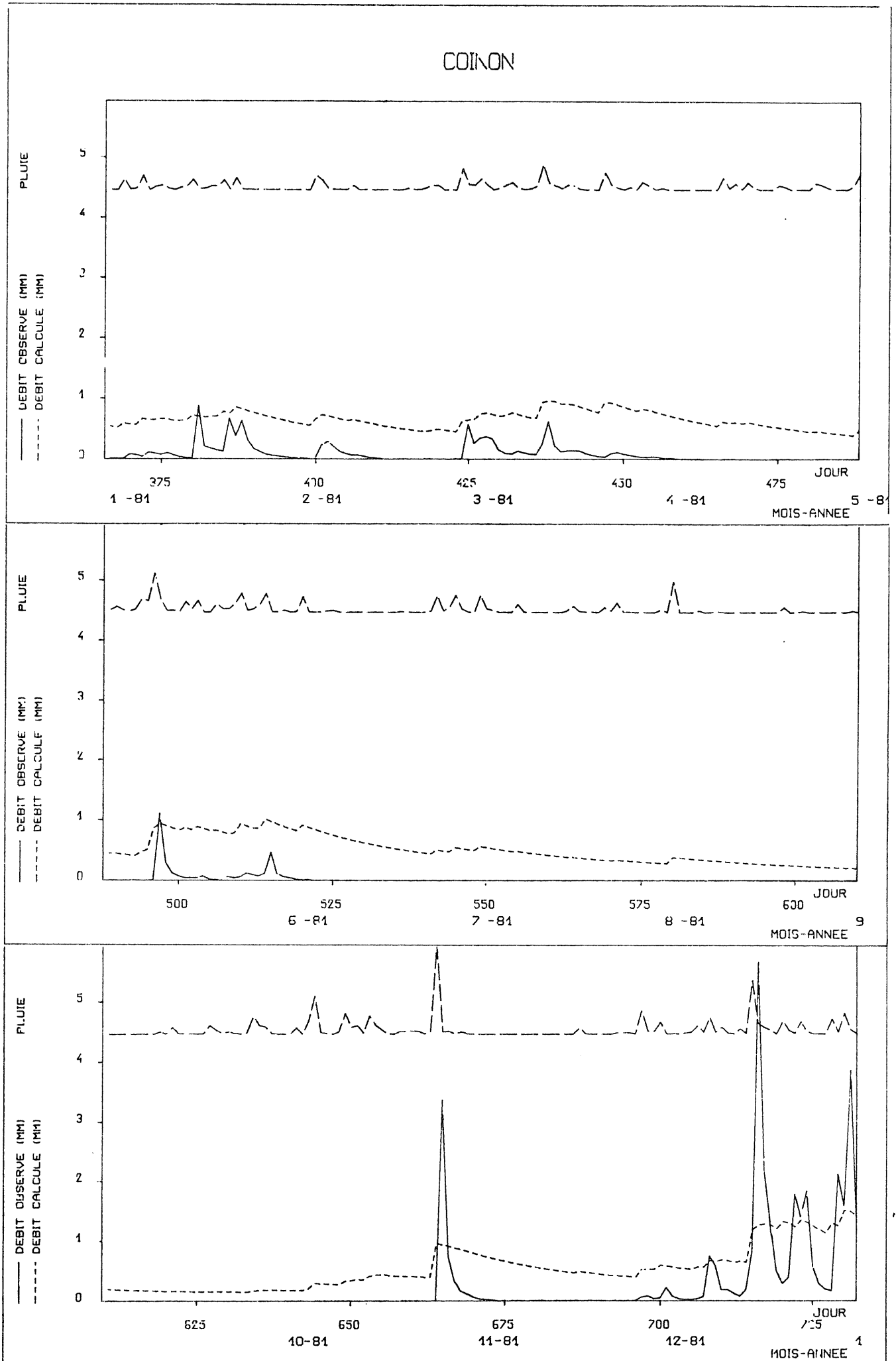


Figure 10 : Simulation avec traitement soustractif sur la pluie (GRANCHAIN).

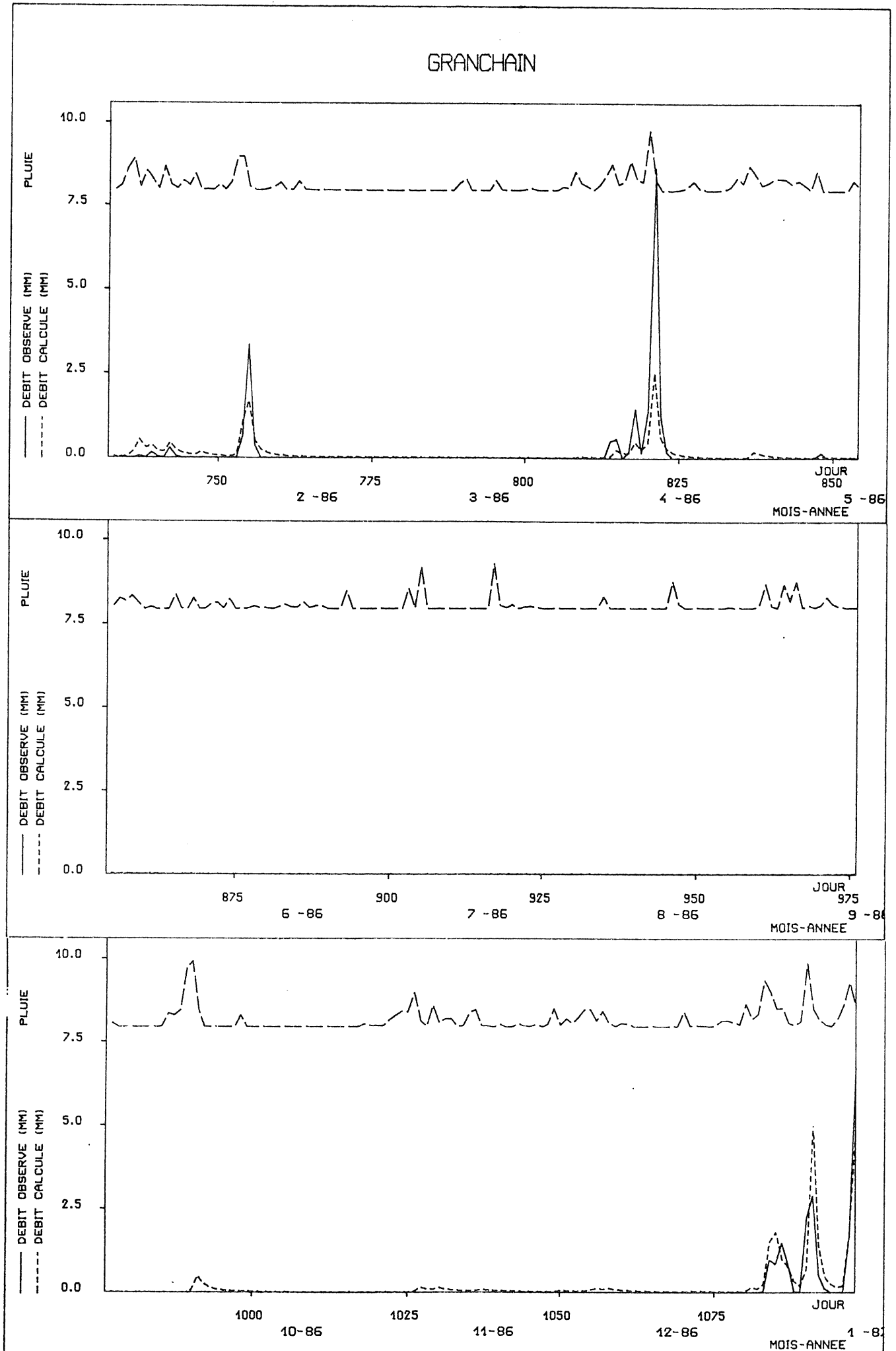
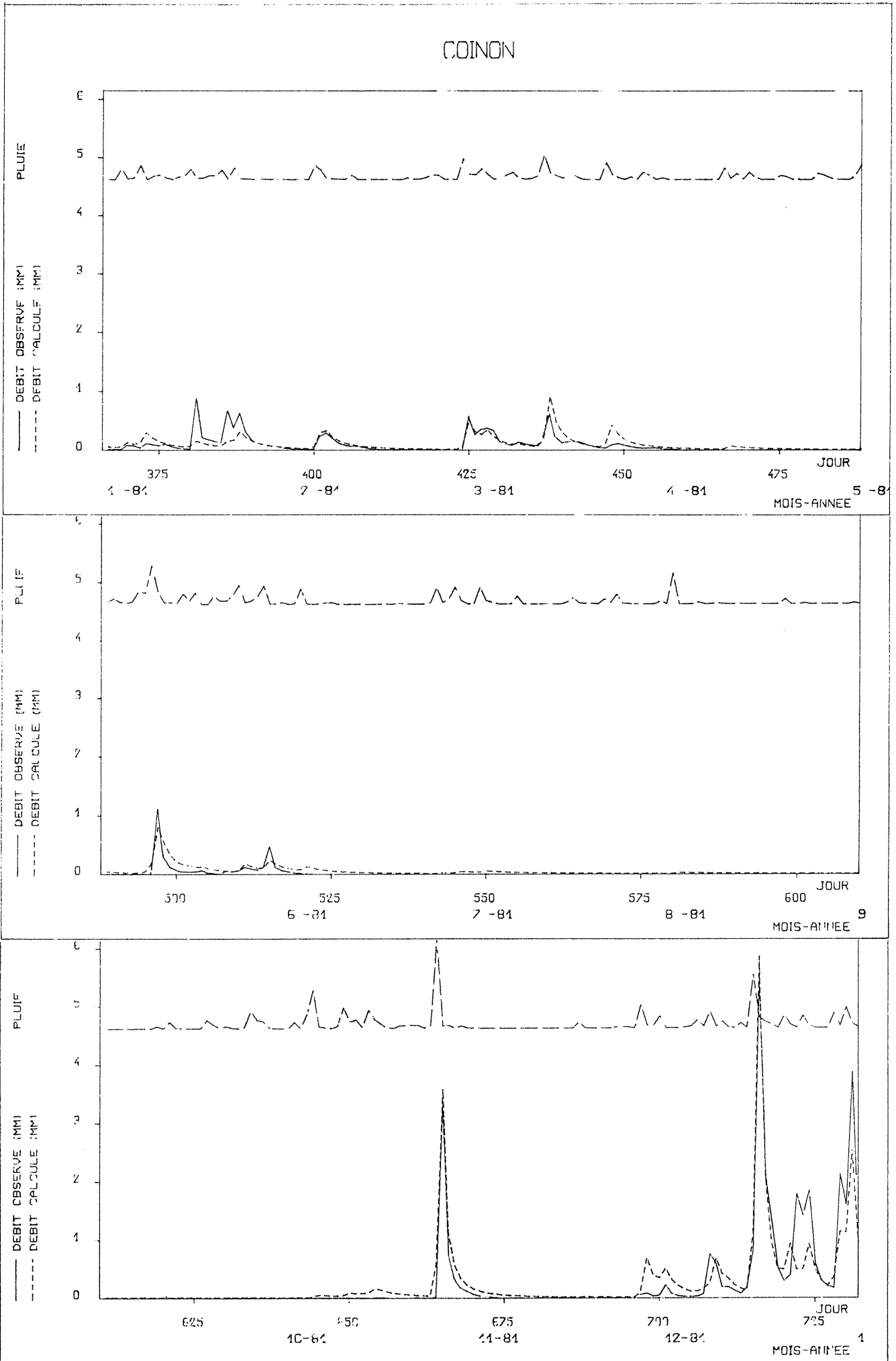


Figure 11 : Simulation avec traitement soustractif sur la pluie (COINON).



### 3.2. PROBLEME DE LA NON-RESTITUTION DES DEBITS DE POINTE DANS CERTAINS BASSINS VERSANTS

En analysant les résultats notamment sous forme graphique, nous avons remarqué qu'en général le modèle fonctionne bien en ce qui concerne le régime général des écoulements y compris pendant la période d'étiage. Il n'est pas impossible que dans certains bassins le modèle donne des résultats peu satisfaisants. Par exemple, le modèle sous-estime les basses eaux du bassin de l'Orgeval au Theil. Si un tel comportement défectueux se produisait pour de nombreux bassins versants, il est clair qu'il serait nécessaire de remettre en cause le modèle.

Un tel phénomène s'est produit dans certains bassins versants, notamment ceux qui se trouvent à l'ouest de la région Bretagne, non pour les étiages mais pour les crues. Ces dernières sont écrêtées, bien que l'allure générale des écoulements soit correcte.

La relative fréquence de ce problème nous a contraint à rechercher une solution acceptable. Les idées d'amélioration ont été testées sur les données du bassin versant de COET-ORGAN à KERDEC-EN-QUISTINIC dont les résultats de simulation illustrent tout à fait le problème précédent. (cf **tableau 7** et **figure 12** ).

On s'est donc efforcé de rechercher des dispositions qui permettent une meilleure restitution des débits de pointe, sans nuire aux bons résultats obtenus jusqu'à présent sur la majeure partie des bassins versants. De plus on s'est restreint à conserver le même nombre de paramètres à caler (c'est-à-dire 3) car nous étions et restons convaincus qu'il serait de plus en plus difficile d'expliquer les différents paramètres d'un modèle au fur et à mesure que le nombre de ces paramètres augmente.

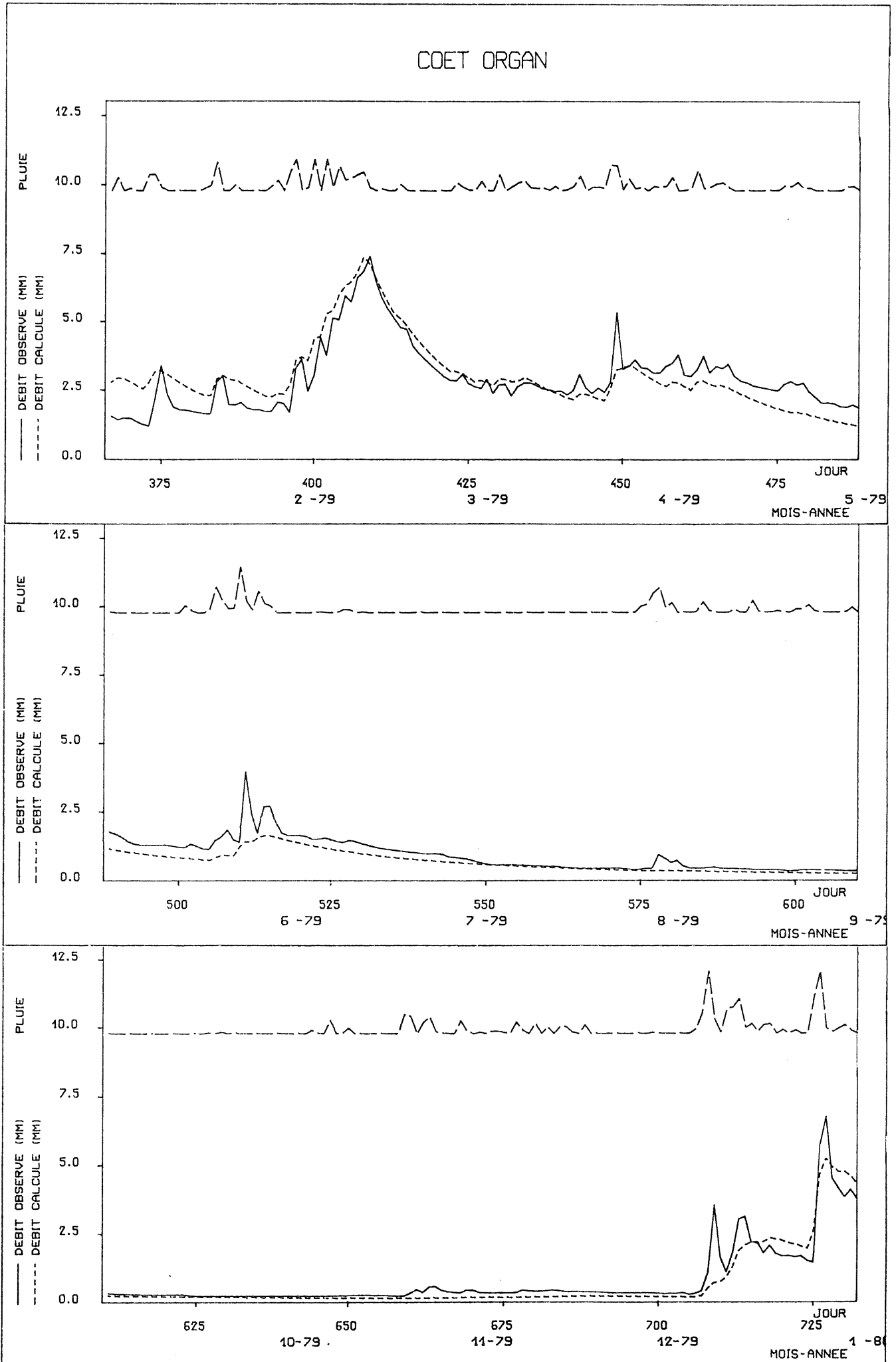
Parmi les dispositions que l'on peut prendre, une critique des données d'entrée est probablement celle qui vient le premier à l'esprit.

Nom du bassin versant	: COET-ORGAN
Station de jaugeage	: KERDEC-EN-QUISTINIC
Superficie	: 47.7 km <sup>2</sup>
Période de simulation	: 1978-1982
Durée de mise en route	: 365 jours
Critère de NASH	: 64.1 %
Valeurs optimales de	
ln (A)	: 5.96
ln (B)	: 8.35
ln (C)	: -2.24

**Tableau 7 : Résultat de simulation**



Figure 12 : Simulation sur le bassin du COET-ORGAN.



### *3.2.1 CORRECTION DES ENTREES*

L'étude de sensibilité des paramètres à la qualité des entrées a montré que la modification des données et surtout de la pluie conduit à une forte détérioration des résultats du modèle ( **paragraphe 2.6.1** ).

Cela explique que la première étape de la résolution du problème des crues peut être de tester la validité des entrées en introduisant un coefficient de correction global optimisé de façon automatique. Cela pourrait permettre de savoir si le défaut du modèle est lié à des données douteuses .

Dans le cas du bassin versant de COET-ORGAN ce test de pertinence des données de pluie a montré qu'il n'y avait la possibilité que d'une faible valeur de correction et de plus négative (-5%) avec une très légère amélioration du critère de l'ordre de 0.5%.

De plus aucun effet positif ne s'est produit dans l'effort de renforcer les débits de pointe comme on peut le voir sur les graphiques, c'est-à-dire que malgré la possibilité de corriger les pluies, le modèle ne parvient pas à simuler les fluctuations rapides de crues.

Des résultats semblables sont obtenus pour certains bassins versants ayant le même problème de réduction des pointes de crue, malgré l'amélioration de la valeur critère due au paramètre supplémentaire correspondant à la correction globale de la pluie.

On peut donc conclure qu'une éventuelle sous-estimation des pluies pour ce bassin de COET-ORGAN n'est pas à l'origine de la représentation des pointes de crue.

### *3.2.2 PROPOSITION D'UN CRITERE PLUS SENSIBLE AU POINTES DE CRUES*

Après avoir suspecté les données de pluie on peut se demander s'il ne suffirait pas de modifier le critère de jugement du modèle pour le rendre plus sensible aux erreurs des débits de pointe.

Le critère d'appréciation du modèle consiste à juger de la proximité des deux séries chronologiques, celles des débits  $\hat{Q}_j$  calculés et celles des débits  $Q_j$  observés ( **annexe 6** ).

Jusqu'à présent, nous utilisons le critère des moindres carrés:

$$\text{Critère} \quad : \quad \sum_{j=1}^n (Q_j - \hat{Q}_j)^2$$

où  $n$  : nombre de jours de la série chronologique.

En principe, un critère portant sur des puissances de  $|Q_j - \hat{Q}_j|$  supérieures à 2 devrait être plus sensible aux grandes valeurs de l'erreur du modèle.

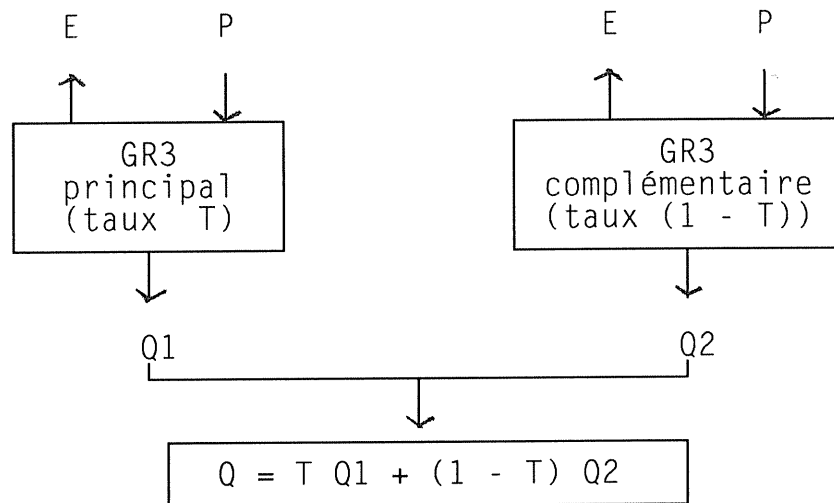
Nous avons donc essayé un critère portant sur la puissance quatrième des erreurs  $(Q_j - \hat{Q}_j)$ .

L'examen des sorties graphiques, montre cependant qu'il n'y a pas d'amélioration dans la simulation des pointes de crue. On peut donc conclure que le défaut de simulation du modèle ne peut pas être résolu en utilisant un critère mettant l'accent sur les grandes valeurs de débit. Il est donc nécessaire de modifier la structure même du modèle.

### 3.2.3 ESSAI DE COUPLAGE DE 2 MODULES GR3

On peut se demander s'il n'y aurait pas une sorte d'hétérogénéité dans la réponse du bassin avec 2 types très différents et difficiles à représenter par une architecture unique surtout lorsqu'elle est aussi simple que celle adoptée jusqu'à présent.

L'idée serait donc d'accepter le modèle GR3 tel qu'il a été calé jusqu'à présent et en considérant qu'il serait représentatif de la plus grande partie du bassin et que la partie complémentaire serait à représenter par un autre module GR3 de paramètres différents ( cf **figure 13** ).



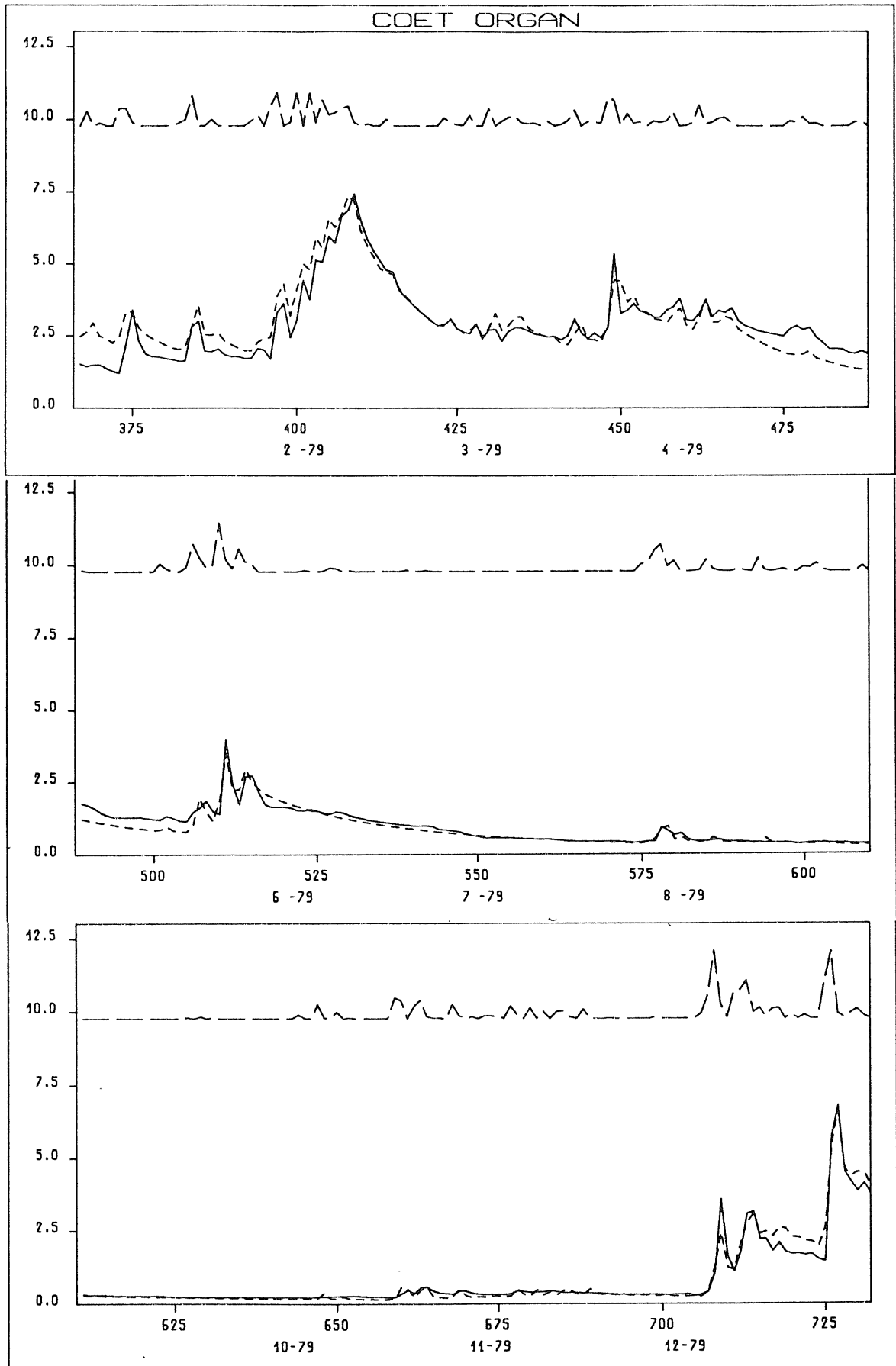
**Figure 13** : Couplage de deux modules GR3

Un tel schéma qui ne remettrait pas en cause l'architecture du module tel qu'il a été conçu jusqu'à présent a, par contre, le désavantage de conduire à un nombre excessif de paramètres puisqu'il y aurait les 3 paramètres du module principal, les 3 paramètres du module complémentaire et le taux  $T$  de représentativité du module principal.

Un tel calage serait très probablement difficile à réaliser et une façon simple de le prouver est de réaliser l'opération en 2 étapes. On cale le modèle GR3 sur la totalité du bassin comme précédemment ce qui conduit aux paramètres  $A1$ ,  $B1$ ,  $C1$  du module principal. Ensuite on impose ces 3 valeurs et on optimise un modèle complet à 4 paramètres qui comprendrait les trois paramètres  $A2$ ,  $B2$ ,  $C2$  du module complémentaire et le taux de représentativité  $T$  du module principal.

L'essai correspondant sur le bassin de COET-ORGAN nous a donné un résultat satisfaisant qui est confirmé par l'amélioration de la valeur critère de 63.0% à 65.2% et par des dessins corrects en ce qui concerne les débits de pointe ( cf **figure 14** ). Cependant, les valeurs inhabituelles des paramètres du module complémentaire (7.4, -4, 0) d'une part, et la non certitude de la convergence d'un processus alterné d'itération sur les 2 modules d'autre part, nous ont conduit à abandonner ce type de solution qui n'aurait été viable que dans l'hypothèse d'une réduction du nombre de paramètres de chaque module.

Figure 14 : Simulation d'un couplage de deux modules GR3.



### 3.2.4 INTRODUCTION D'UNE DIVERSITE DANS LES RESERVOIRS-SOL

Après l'échec d'un assemblage de différents modules GR3, nous en arrivons à une modification de l'architecture du module.

Il est évident que le réservoir-sol joue un rôle important dans la production des débits de pointe, car c'est lui qui définit la fraction de pluie qui accédera au réservoir-eau-gravitaire et engendrera les écoulements. Il paraît alors possible d'imaginer un autre réservoir-sol qui permet une réaction plus brutale à l'impulsion pluie.

Nous essayons de répartir la pluie à égalité entre trois réservoirs-sol et avec un seul réservoir-eau-gravitaire comme présenté par la **figure 15** . On a donc besoin de 2 paramètres supplémentaires, c'est-à-dire 5 paramètres en tout, ce qui va alourdir l'optimisation.

Il est possible de réduire le nombre de paramètres à 4, en considérant une progression géométrique pour les valeurs des paramètres des 3 réservoirs :

$$A_1 = A$$

$$A_2 = A * D$$

$$A_3 = A / D$$

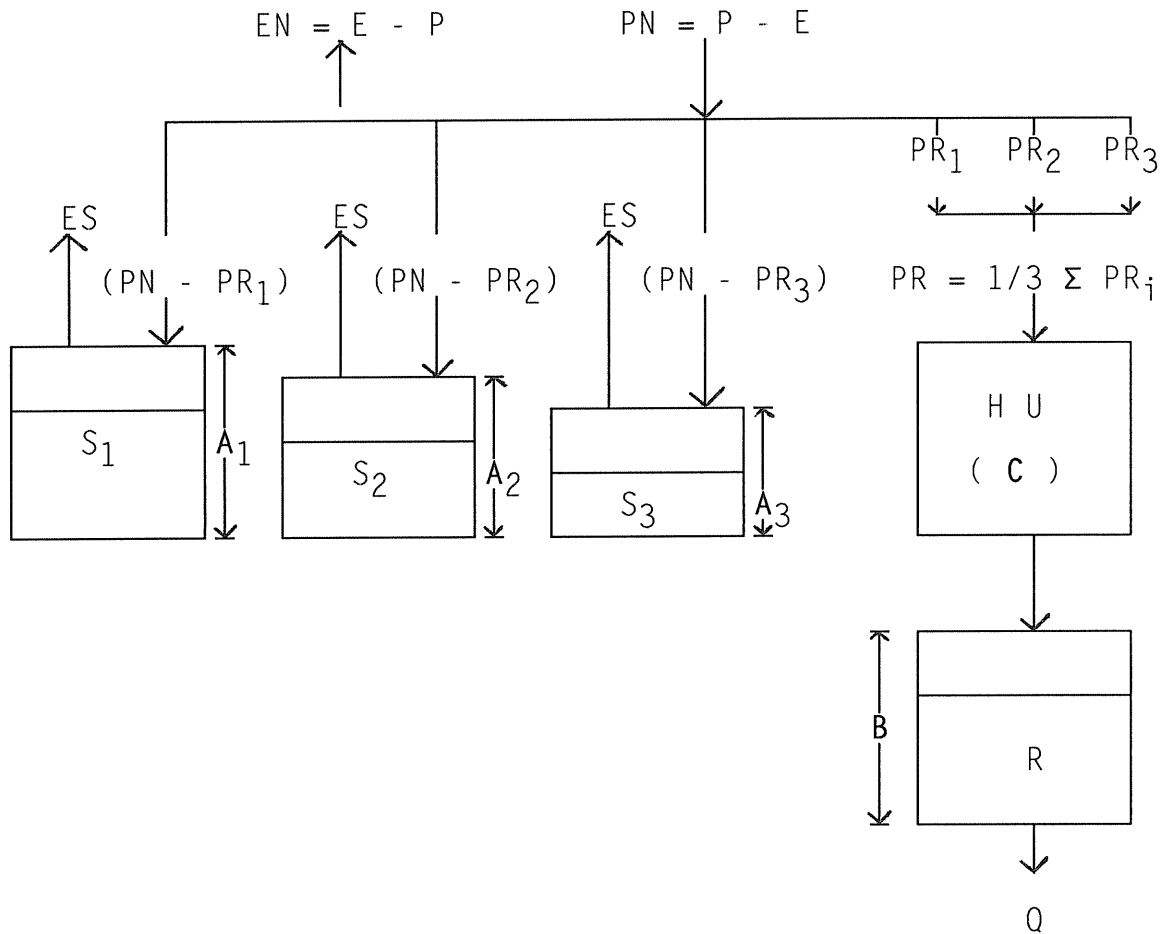
où  $A_i$  = paramètre du réservoir  $i$

$A$  = premier paramètre du modèle à optimiser

$D$  = quatrième paramètre du modèle à optimiser

En prenant un tiers de la somme de trois fractions de pluie nettes induites par les 3 réservoirs-sol, nous avons une pluie nette globale qui, après routage par l'hydrogramme unitaire, va accéder au réservoir-eau-gravitaire et engendrer le débit du bassin.

L'initialisation des réservoirs sols en début de simulation a été réalisée en adoptant un taux de remplissage identique pour les 3 réservoirs. Cette disposition n'a pas beaucoup d'importance puisque la période de mise en route est assez confortable pour atténuer les effets d'une mauvaise initialisation.



**Figure 15** : Répartition du modèle en 3 réservoirs-sol

L'analyse des résultats graphiques montre que cette tentative d'amélioration du module GR3 n'est pas convaincante en ce qui concerne les pointes de crue. On va donc essayer de modifier un autre composant du module global.

### 3.2.5 INTRODUCTION D'UNE DIVERSITE DANS LES RESERVOIRS EAU-GRAVITAIRE

Après avoir examiné les possibilités d'amélioration du modèle en affinant la fonction de production, nous examinons maintenant le réservoir-eau-gravitaire qui nous semble plus susceptible d'influer sur les pointes de crue, du fait de l'importance de la fonction de transfert.

Nous allons présenter successivement les différentes modifications que nous avons apportées à cette partie essentielle de la fonction de transfert du modèle afin d'améliorer le rendu des crues pour les bassins versants dont nous avons parlé précédemment et qui sont illustrés par le bassin breton du COET-ORGAN.

#### 3.2.5.1 Utilisation de 2 réservoirs eau-gravitaire avec 2 paramètres supplémentaires

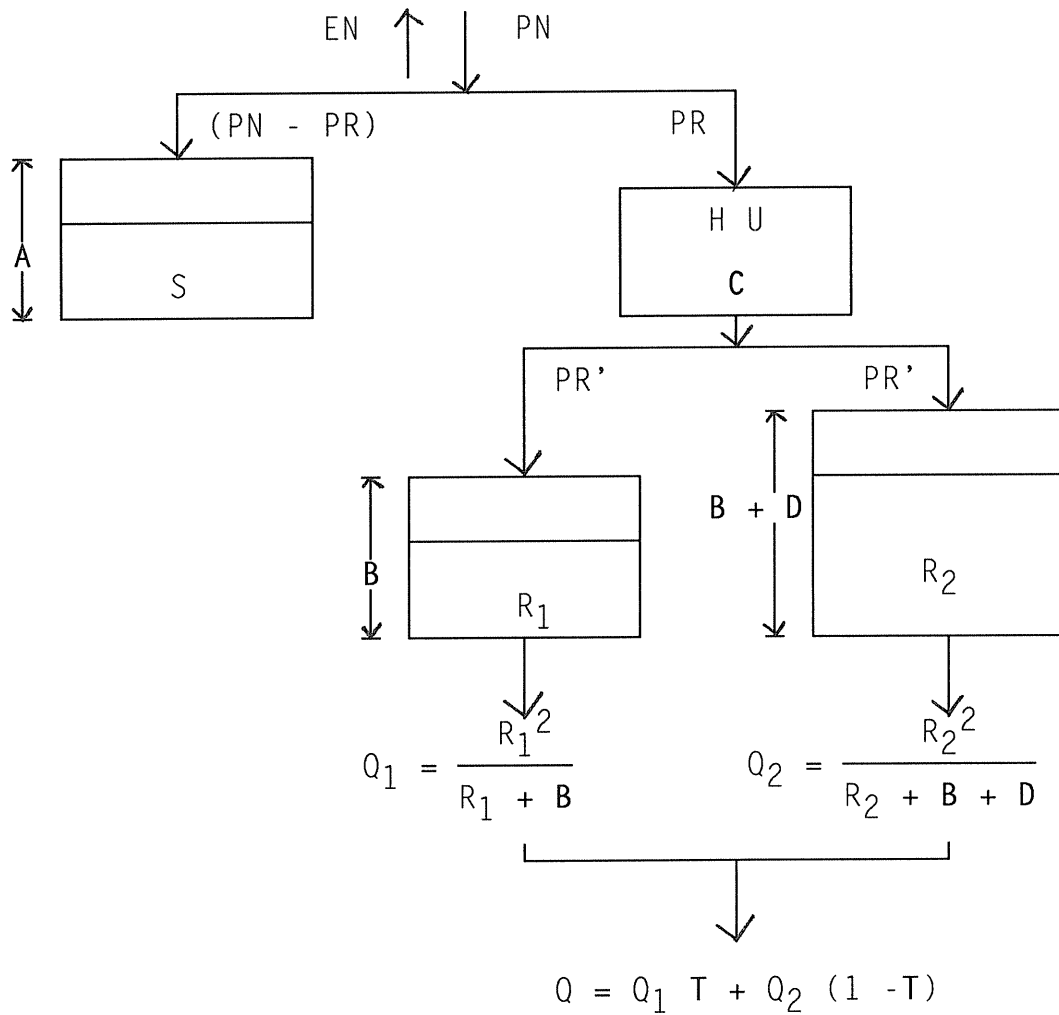
Nous présentons ici un modèle à 3 réservoirs, obtenu à partir du modèle GR3, par création d'un deuxième réservoir eau-gravitaire en parallèle avec le réservoir existant. La capacité du deuxième réservoir est différenciée de celle du premier, par augmentation de son montant dont la valeur est un nouveau paramètre D ( figure 16 ).

Chaque réservoir R est représentatif d'une partie du bassin versant : soit T le taux de représentativité du réservoir R1. Ce taux T est également optimisé et est donc le cinquième paramètre du modèle.

Avec 5 paramètres à optimiser, il est certain que ce modèle donne largement possibilité à l'amélioration des débits de pointe, comme on peut le voir sur la figure 17 . Mais l'optimisation globale de 5 paramètres est une tâche délicate. Il est possible que pour certaines données on bute sur des optimums secondaires. D'autre part, notre but est d'obtenir un modèle dont les paramètres soient explicables. Cela ne sera éventuellement possible qu'avec un très faible nombre de paramètres. C'est pour cela que ce modèle a été abandonné.

Néanmoins, son étude a montré que le réservoir eau-gravitaire joue un rôle important dans l'apparition de débits de pointe.

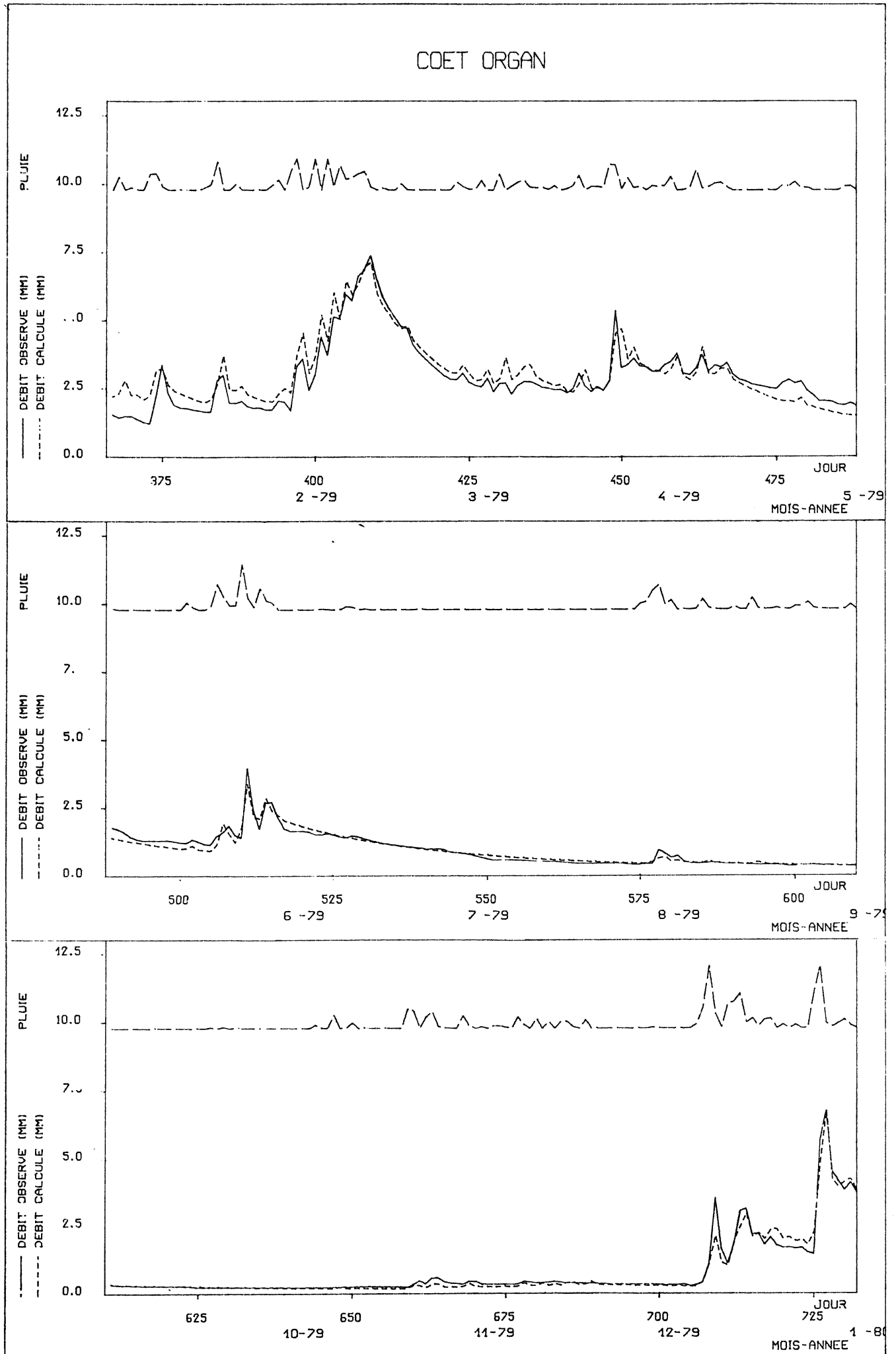




**Figure 16** : 2 réservoirs eau-gravitaire en parallèle

Nous allons donc poursuivre cette réflexion concernant l'introduction de plus de souplesse dans la fonction de transfert du modèle, mais en cherchant à économiser le plus possible le nombre des paramètres.

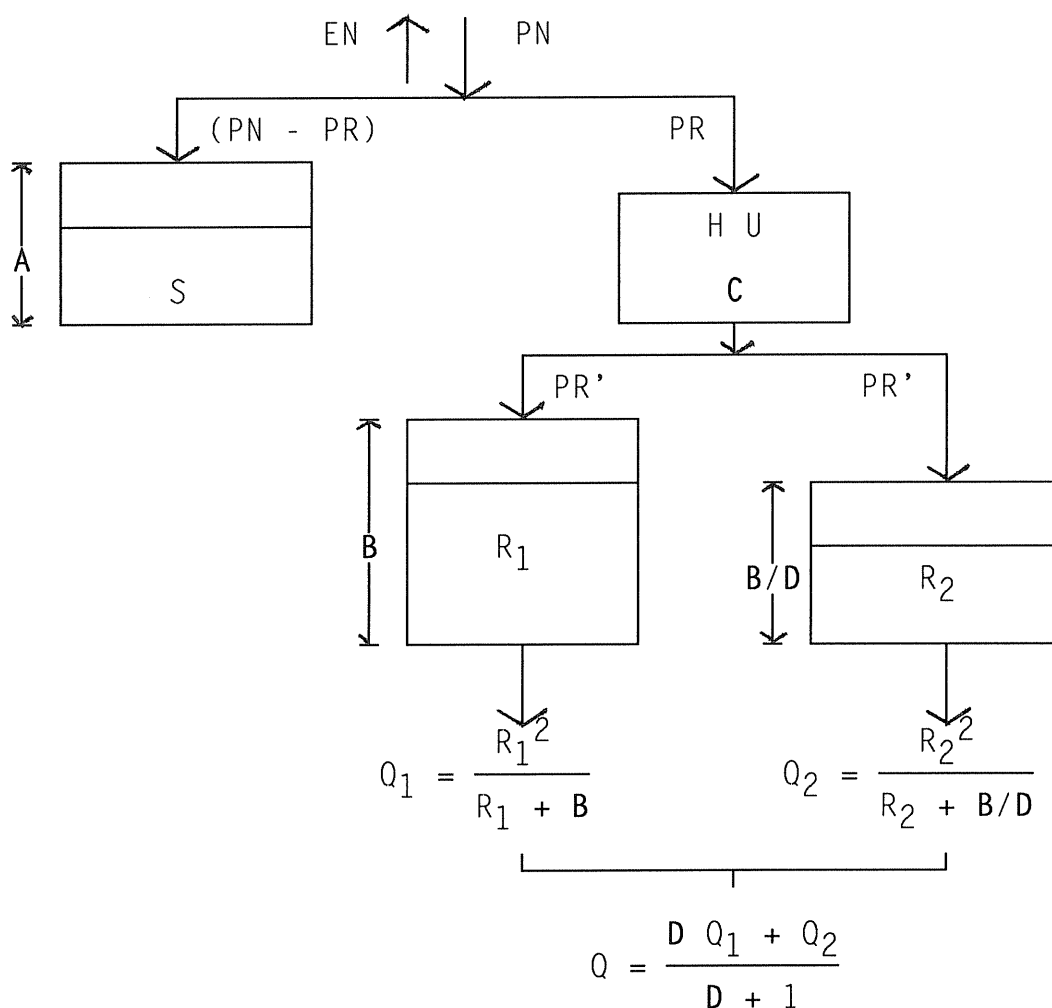
Figure 17 : La version du modèle à 2 réservoirs R en parallèle.



### 3.2.5.2 Utilisation de 2 réservoirs eau-gravitaire avec un seul paramètre supplémentaire

Nous conservons un modèle à 3 réservoirs dont l'architecture ressemble à celui du paragraphe précédent (3.1.5.1) en réduisant le nombre du paramètre.

Imaginons que le deuxième réservoir eau-gravitaire soit une fraction de la totalité de surface du bassin qui est plus particulièrement responsable des pointes de crue. Si  $B$  est la capacité maximale à un jour du premier réservoir eau-gravitaire, alors une même fraction de  $B$  limite la capacité du deuxième réservoir. Cette fraction introduit le quatrième paramètre du modèle D ( figure 18 ).



**Figure 18 :**

2 réservoirs eau-gravitaire avec une représentativité spatiale proportionnelle à leur capacité

Ainsi, il peut sembler naturel d'exprimer la fraction (T) de la surface (S<sub>1</sub>) correspondant au premier réservoir en fonction de D comme suit :

$$T = \frac{B}{B + B/D}$$

ou

$$T = \frac{D}{D + 1}$$

Le complément à 1 correspond au deuxième réservoir.

Au début de la simulation, les débits qui sortent des deux réservoirs sont initialisées à la même valeur Q<sub>0</sub> :

$$Q_1 = Q_0$$

$$Q_2 = Q_0$$

Le débit sortant du bassin s'obtient par pondération des vidanges des 2 réservoirs :

$$Q = Q_1 T + Q_2 (1 - T)$$

Les résultats de la simulation montrent que l'on obtient qu'une légère amélioration du critère, sans amélioration graphique au niveau des pointes de crue. Nous allons donc essayer une autre modalité de cette différenciation de la fonction de transfert.

### 3.2.5.3 Equirépartition du bassin versant entre 3 réservoirs eau-gravitaire

Dans le paragraphe 3.1.4, nous avons réparti la pluie à égalité entre 3 réservoirs-sol. Nous allons opérer de même avec le réservoir eau-gravitaire (**figure 19** ci-dessous).

Nous choisissons les paramètres des 3 réservoirs eau-gravitaire comme suite :

$$B_1 = B$$

$$B_2 = B * D$$

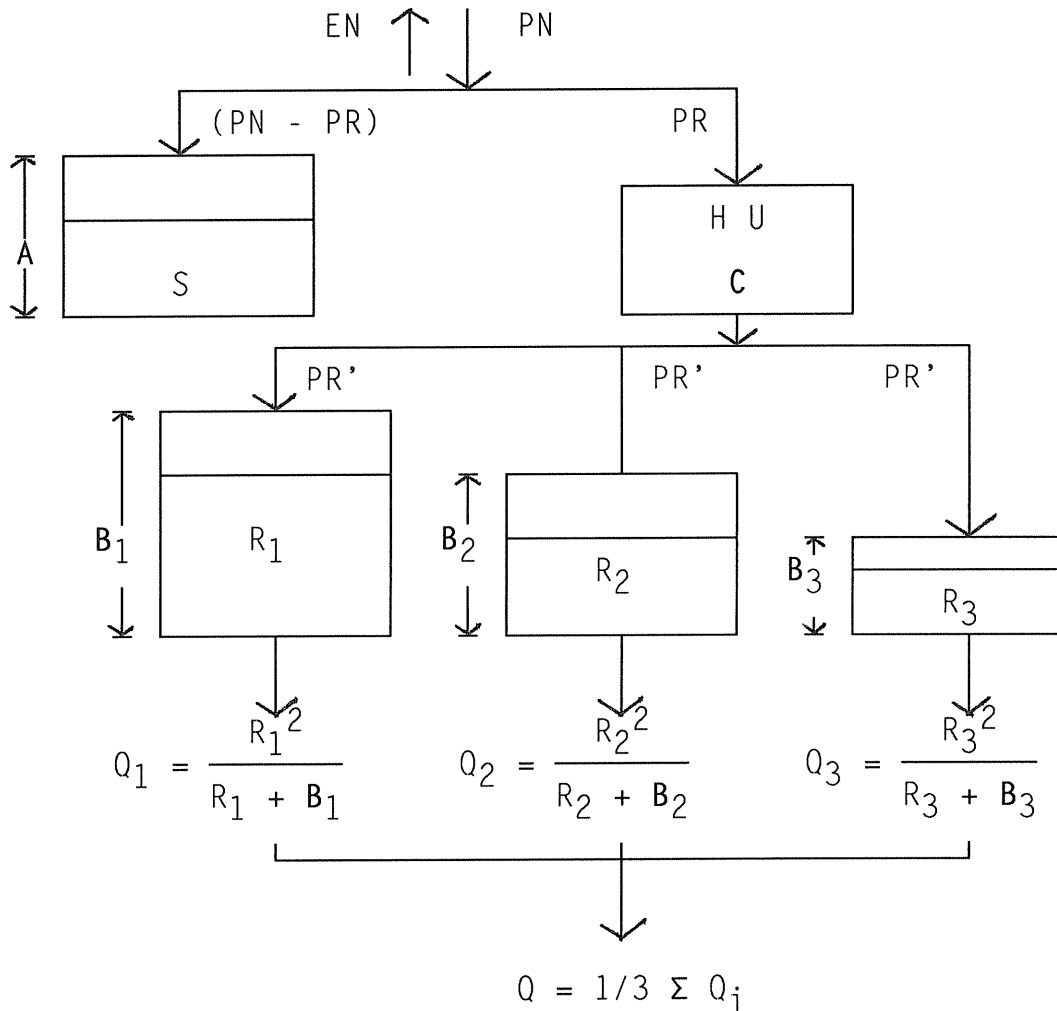
$$B_3 = B/D$$

avec :

$B_i$  = paramètre du réservoir  $i$

$B$  = deuxième paramètre du modèle

$D$  = quatrième paramètre du modèle



**Figure 19 :**

Répartition de la pluie nette propagée entre 3 réservoirs eau-gravitaire

En ce qui concerne l'initialisation du modèle, en début de simulation, le débit  $Q_i$  relâché par chaque réservoir est égal au débit observé  $Q_0$  modulé par le paramètre  $B_i$ . Ne sachant pas comment faire cette modulation, nous avons comparé 7 versions différentes d'initialisation :

$$1. \quad Q_i = Q_0$$

$$2. \quad Q_i = \frac{Q_0}{B_i \cdot 1/3 \sum (1/B_i)}$$

$$3. \quad Q_i = \frac{Q_0}{(B_i)^2 \cdot 1/3 \sum (1/B_i)^2}$$

$$4. \quad Q_i = \frac{Q_0}{(\sqrt{B_i}) \cdot 1/3 \sum (\sqrt{1/B_i})}$$

$$5. \quad Q_i = \frac{Q_0 \cdot B_i}{1/3 \sum (B_i)}$$

$$6. \quad Q_i = \frac{Q_0 \cdot (B_i)^2}{1/3 \sum (B_i)^2}$$

$$7. \quad Q_i = \frac{Q_0 \cdot (\sqrt{B_i})}{1/3 \sum (\sqrt{B_i})}$$

Si l'on tient compte de la simplicité du procédé, il est apparu que la 5ème version donne un résultat assez correct par rapport aux autres. Bien que ce ne soit pas la meilleure formule nous la retenons du fait de son bon rapport qualité/complexité.

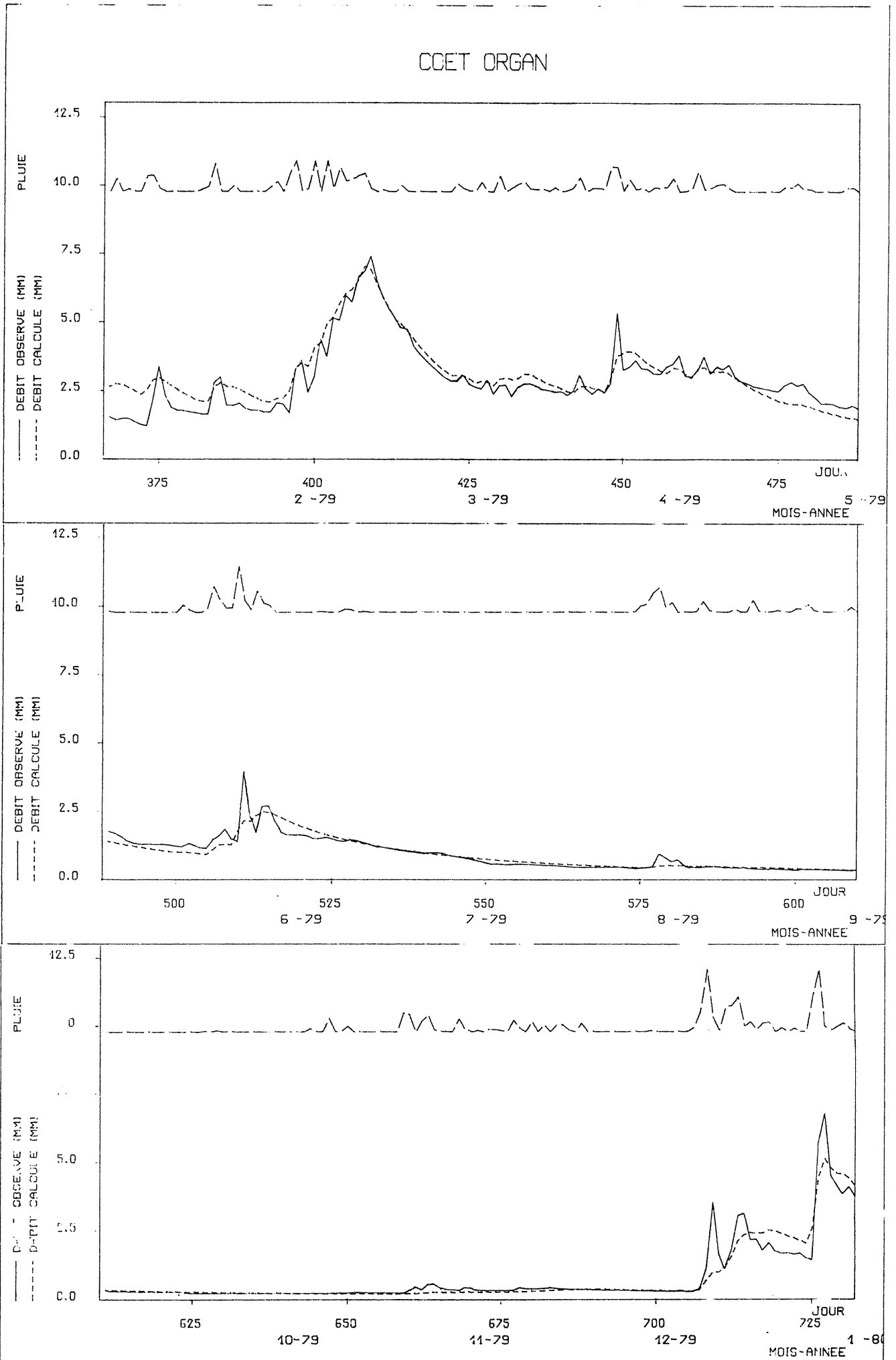
Le débit  $Q$ , en sortie du modèle, est la moyenne des trois débits fournis par les 3 réservoirs :

$$Q = 1/3 \sum Q_i$$

$Q_i$  = débit relâché par le réservoir eau- gravitaire N°  $i$

L'analyse des résultats montre qu'il n'y a pas d'amélioration, ni sur la valeur du critère, ni sur les graphiques (cf **figure 20** ). Nous abandonnons donc cette variante, malgré une petite amélioration sur quelques autres bassins ayant le même problème de simulation des pointes de crue.

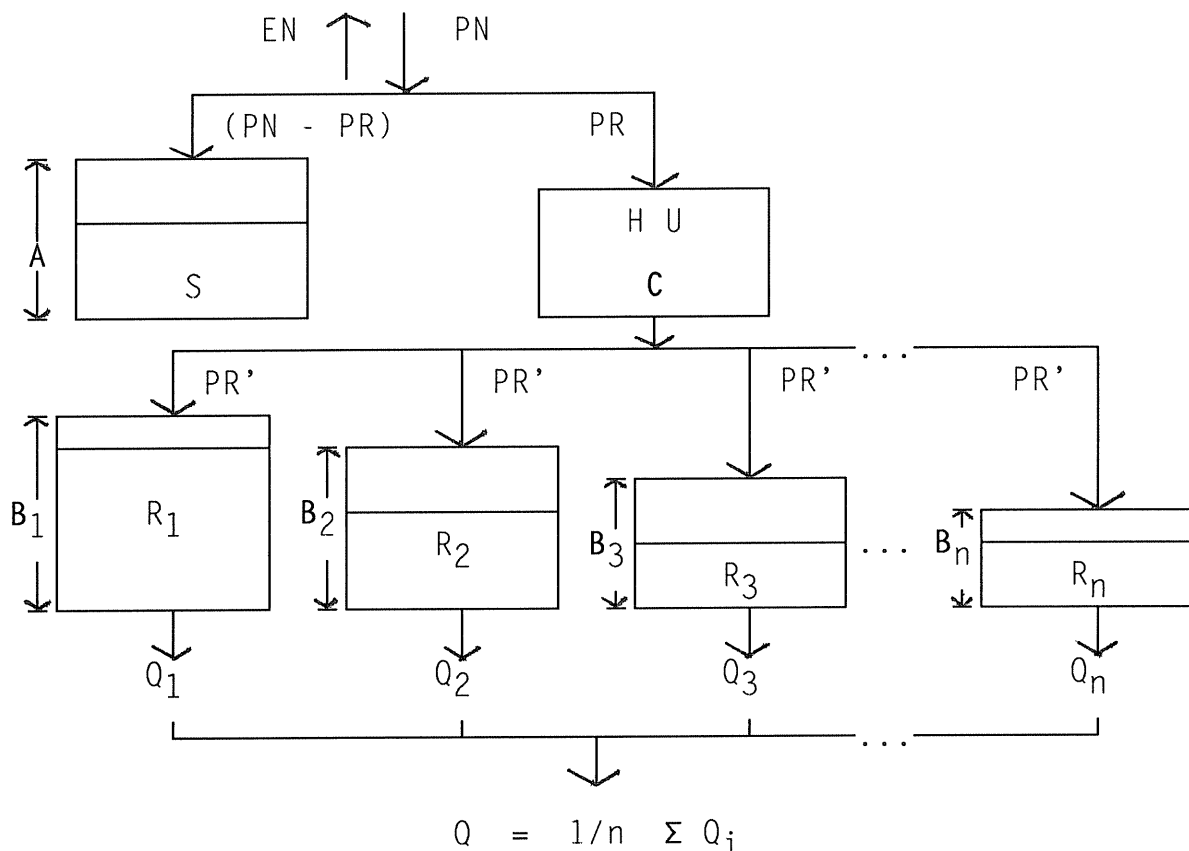
Figure 20 : La version du modèle à 3 réservoirs R.



### 3.2.5.4. Répartition statistique de réservoirs eau-gravitaire

L'utilisation de 2 ou 3 réservoirs eau-gravitaire nous a conduit à une multiplication des paramètres contraire à notre objectif impérieux de parcimonie. *Peut-on simuler une diversité de réservoirs en évitant l'introduction de trop nombreux paramètres ?*

Dans les étapes suivantes, nous allons essayer de concevoir des réservoirs dont les capacités sont réparties suivant une loi statistique, en vue de limiter le nombre des paramètres supplémentaires. Le réservoir eau-gravitaire est remplacé par une répartition à  $n$  réservoirs eau-gravitaire, chacun relâchant un débit en fonction de sa capacité ( **figure 21** ). En fait, nous pouvons imaginer que la répartition en  $n$  réservoirs eau-gravitaire correspond à l'hétérogénéité du bassin versant (MICHEL 1983) . (Dans notre étude, nous prenons  $n = 10$  pour limiter le temps de calcul).

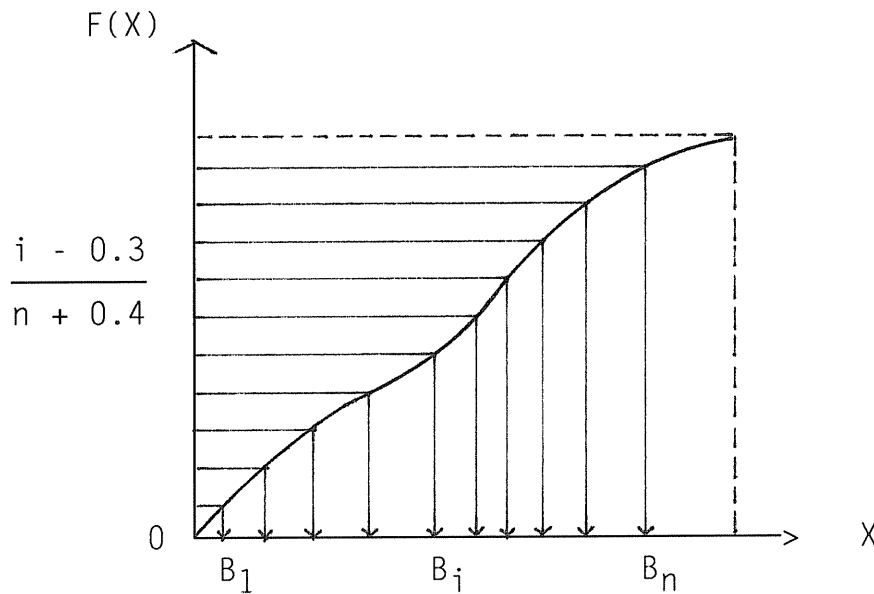


**Figure 21** : L'architecture du modèle avec une répartition statistique de réservoirs eau-gravitaire.



Si on a une densité de probabilité  $f(x)$ , son intégration donnera une fonction de répartition  $F(X)$ , correspondant aux paramètres des réservoirs (figure 22).

$$F(X) = \int_0^x f(x) dx$$



**Figure 22** : La fonction de répartition du paramètre du modèle : B

Nous prenons :

$$F_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

avec :

- $i$  = rang du réservoir
- $n$  = nombre de réservoirs
- $F_i$  = fréquence expérimentale correspondant au paramètre  $B_i$

Si B est le paramètre du modèle relatif aux réservoirs eau-gravitaire, le paramètre du i-ième réservoir sera :

$$B_i = B * f(F_i).$$

Nous aurons donc le débit correspondant relâché soit :

$$Q_i = \frac{R_i^2}{R_i + B_i}$$

où  $R_i$  = le niveau du remplissage du i-ième réservoir eau-gravitaire.

La moyenne des débits est le débit :

$$Q = 1/n \sum Q_i$$

Nous avons testé différentes solutions sur le bassin breton déjà étudié et qui donne avec GR3 une mauvaise restitution de pointes de crue.

Pour ce bassin, nous avons essayé 7 lois statistiques différentes, en limitant le nombre de paramètres à 3. Sauf pour la répartition selon la loi normale, nous n'avons pas pu éviter l'introduction d'un paramètre supplémentaire : c'est la limite supérieure du domaine de définition de la fonction  $f(x)$  ( tableaux 8 , 9 , 10 et 11 ).

### *RESULTATS :*

La comparaison des résultats est orientée particulièrement sur les pointes de crue observables sur les graphiques de l'année 1979, pour la période de calage de 1978 à 1982 ( annexes 7.1 , 7.2 , 7.3 , 7.4 , 7.5 , 7.6 et 7.7 ). Nous pouvons remarquer qu'il n'y a pas d'amélioration en utilisant les lois :

- normale
- triangle isocèle
- uniforme
- et triangle rectangulaire,

malgré l'augmentation des critères d'appréciation de l'ordre de 0.1 à 0.2%. Il est évident que nous devons abandonner ces solutions.

La seule amélioration est obtenue par répartition des réservoirs eau-gravitaire selon **une loi hyperbolique à une puissance  $\geq 1/2$**  :

$$(1) \quad f(x) = \frac{1}{2B} \left(\frac{B}{x}\right)^{1/2}$$

$$(2) \quad f(x) = \frac{1}{3B} \left(\frac{B}{x}\right)^{2/3}$$

$$(3) \quad f(x) = \frac{1}{4B} \left(\frac{B}{x}\right)^{3/4}$$

En comparant les 3 résultats, le meilleur critère est donné par (1), avec une augmentation de 0.3%. Par contre, avec (2) et (3), le critère se détériore de 0.8% et de 3.5%.

Certaines crues sont bien simulées par (1) ou par (2). Mais certaines autres sont sous-estimées par (1) et sont sur-estimées par (2). Cependant, la simulation par (3) montre que les pointes de crues sont sur-estimées.

L'échec de ces versions nous a conduits à mieux diversifier le comportement de la distribution en adoptant une expression du type WAKEBY.

Nous avons essayé successivement les expressions suivantes:

$$(a) \quad B_i = B * F_i * (2 - F_i)^m \quad \text{avec } m = 1, 1/2, 1/3$$

$$(b) \quad B_i = B * (F_i)^n * (2-F_i) \quad \text{avec } n = 1, 2, 3$$

Les résultats de ces six versions montrent qu'elles échouent également à restituer les pointes de crues, malgré une augmentation des critères de 0.2 à 0.5% ( **tableau 12** ). Cependant pour la version (b) avec la puissance 3, il y a une amélioration sensible des débits de pointes ( **annexes 7.8 , 7.9 , 7.10 , 7.11 , 7.12 , 7.13** ), mais insuffisante pour être prise en compte.

Nous pouvons donc considérer que la distribution "hyperbolique" avec la racine carrée (1) est la meilleure loi applicable à la répartition des réservoirs eau-gravitaire pour résoudre le problème des débits de pointes insuffisants.

Pour tester le bien fondé de la distribution statistique, nous avons étendu la comparaison à 7 bassins non particulièrement concernés par le problème de la mauvaise restitution de crues. En comparant les versions (1), (2) et (b) avec l'exposant 3, la moitié des bassins donnent la version de base de GR3 comme préférable ( tableau 13 ).

Ce complément d'analyse nous pousse à rejeter la solution d'une distribution statistique des réservoirs eau-gravitaire. En outre cette solution présente les inconvénients suivants :

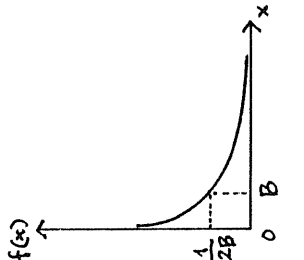
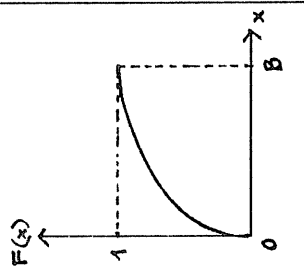
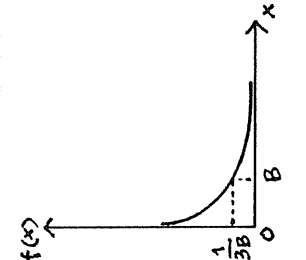
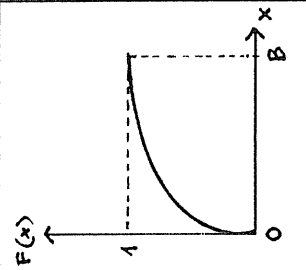
- Complexité de l'architecture du modèle
- Difficulté de la justification de la répartition des réservoirs eau-gravitaire vis-à-vis de l'hétérogénéité du bassin versant comme dit précédemment.

Cependant, il se pourrait que le rejet de cette solution soit dû au caractère quadratique des réservoirs eau-gravitaire. Donc avant de renoncer à cette solution, nous allons tester dans le paragraphe suivant la même idée mais avec des réservoirs eau-gravitaire linéaires.

**Tableau 8 : REPARTITION STATISTIQUE DE RESERVOIRS EAU-GRAVITAIRE**

LOI	DENSITE	FONCTION DE REPARTITION	CAPACITE DE Iéme RESERVOIR	RESULTAT				CRITERE
				PARAMETRES	Ln A	Ln B	Ln C	
NORMALE				Ln A	Ln B	Ln C	Ln D	T (%)
	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$F(x) = \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$		5.96	8.35	- 2.24	- 8.36	64.1
TRIANGLE ISOCELLE				5.94	8.45	- 2.10	-	64.2
	$0 < x < B : f(x) = \frac{x}{B^2}$ $B < x < 2B : f(x) = \frac{1}{B^2} (2B-x)$	$F(x) = \frac{x^2}{2B^2}$ $F(x) = \frac{1}{2B^2} (ABx - x^2) + C$ $x = 2B \rightarrow F(x) = 1$ $C = -1$	$B \pm D \left( \frac{\pi}{2} \operatorname{Ln} \left( \frac{1}{4F_i(1-F_i)} \right) \right)^{0.5}$ $B_i \simeq e$	Remarque : - il n'y a pas d'amélioration sur les graphiques				
			$B_i = B (2F_i)^{0.5}$ $B_i = B (2 - (2 - 2F_i)^{0.5})$	Remarque : - il n'y a pas d'amélioration sur les graphiques				

**Tableau 9 : REPARTITION STATISTIQUE DE RESERVOIRS EAU-GRAVITAIRE**

LOI	DENSITE	FONCTION DE REPARTITION	CAPACITE DE I <sup>ème</sup> RESERVOIR	RESULTAT				
				PARAMETRES			CRITERE	
HYPERBOLIQUE	 $f(x) = \frac{1}{2B} \left(\frac{B}{x}\right)^2$	 $F(x) = \left(\frac{x}{B}\right)^{0.5}$		Ln A	Ln B	Ln C	Ln D	T (%)
				5.80	10.25	- 1.07	-	
			$B_i = B (F_i)^2$	Remarque : - amélioration du critère - certaines crues sont bien simulées				
HYPERBOLIQUE	 $f(x) = \frac{1}{3B} \left(\frac{B}{x}\right)^{2/3}$	 $F(x) = \left(\frac{x}{B}\right)^{1/3}$		Ln A	Ln B	Ln C	Ln D	63.4
				5.71	11.18	- 0.71	-	
			$B_i = B (F_i)^3$	Remarque : - détérioration du critère - certaines crues sont bien simulées - les autres sont sur-estimées				

**Tableau 10 : REPARTITION STATISTIQUE DE RESERVOIRS EAU-GRAVITAIRE**

LOI	DENSITE	FONCTION DE REPARTITION	CAPACITE DE Iéme RESERVOIR	RESULTAT					
				PARAMETRES					CRITERE
				Ln A	Ln B	Ln C	Ln D	T (%)	
HYPERBOLIQUE	$f(x) = \frac{1}{4B} \left( \frac{B}{x} \right)^{3/4}$	$F(x) = \left( \frac{x}{B} \right)^{0.25}$		Ln A	Ln B	Ln C	Ln D	T (%)	
				5.66	12.12	- 0.66	-	59.7	
				Remarque : - critère très faible - les pointes sont trop fortes					

**Tableau 11 : REPARTITION STATISTIQUE DE RESERVOIRS EAU-GRAVITAIRE**

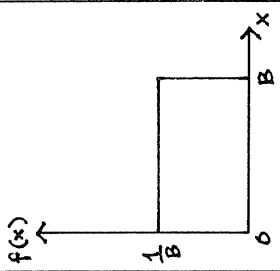
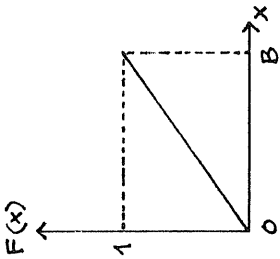
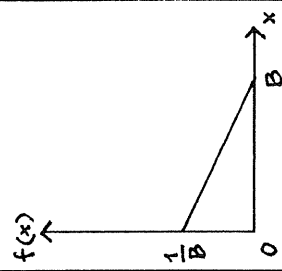
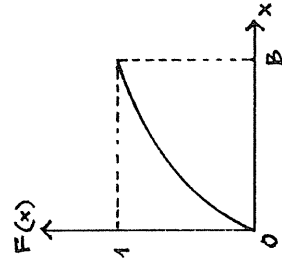
LOI	DENSITE	FONCTION DE REPARTITION	CAPACITE DE Iéme RESERVOIR	RESULTAT				CRITERE
				PARAMETRES				
				Ln A	Ln B	Ln C	Ln D	T (%)
UNIFORME	$f(x) = \frac{1}{B}$	$F(x) = \frac{x}{B}$	$B_i = B \cdot F_i$	5.90	9.32	- 1.80	-	64.3
				Remarque : - il n'y a pas d'amélioration sur les graphiques				
TRIANGLE RECTANGULAIRE				5.88	9.84	- 1.71	-	64.3
	$f(x) = \frac{2}{B^2} (B-x)$	$F(x) = \frac{1}{B^2} (2Bx - x^2)$	$B_i = B(1 - (1 - F_i)^{0.5})$	Remarque : - il n'y a pas d'amélioration sur les graphiques				



Tableau 12 : Résultat de simulation du à la répartition "hyperbolique" de réservoirs eau-gravitaire.

SOLUTION	CAPACITE DE ième RESERVOIR	m	PARAMETRES			CRITERE DE NASH	GRAPHIQUE	
			A	B	C			
(a)	$B_i = B F_i (2 - F_i)^m$	1	5.92	8.92	- 1.95	64.3	il n'y a pas d'amélioration	
		0.5	5.92	9.11	- 1.87	64.3		idem
		0.3	5.92	9.18	- 1.83	64.3		idem
(b)	$B_i = B (F_i)^n (2 - F_i)$	1	5.92	8.92	- 1.95	64.3	idem	
		2	5.83	9.83	- 1.17	64.6		idem
		3	5.73	10.75	- 0.74	64.1		les pointes de crues sont assez bien simulées

**Tableau 13 :**

Gain obtenu sur le critère de NASH du à la répartition de réservoirs eau-gravitaire selon une distribution hyperbolique des solutions (1), (2), et (b)<sup>3</sup> vis à vis à la version de base de GR3

N° de B V	CRITERE DE NASH				GAIN		
	GR3 de base	(1)	(2)	(b) <sup>3</sup>	(1)	(2)	(b) <sup>3</sup>
0	56.6	58.4	58.8	58.6	1.8	2.2	2.0
8	75.3	72.1	69.6	70.3	- 3.2	- 5.7	- 5.0
9	52.0	54.2	54.6	54.7	2.2	2.6	2.7
12	45.1	45.0	44.4	44.6	- 0.1	- 0.7	- 0.5
13	62.5	60.5	59.2	59.6	- 2.0	- 3.3	- 2.9
21	37.9	37.8	37.6	37.7	- 0.1	- 0.3	- 0.2
33	51.7	51.8	51.7	51.7	0.1	0.0	0.0
46	64.1	64.5	63.4	64.1	0.4	- 0.7	0.0
TOTAL					- 0.9	- 5.9	- 3.9

**Remarques :**

- N° 46 : bassin versant de COET-ORGAN
- Solution (1) :  $B_i = B (F_i)^2$
- Solution (2) :  $B_i = B (F_i)^3$
- Solution (b)<sup>3</sup> :  $B_i = B (F_i)^3 (2 - F_i)$

**3.2.5.5. Et si les réservoirs eau-gravitaire étaient linéaires ?**

Dans cette étude, nous allons voir l'intérêt d'une utilisation de réservoirs linéaires pour le routage des débits, en comparant avec l'utilisation de réservoirs quadratiques. Nous utilisons les 3 meilleures versions de répartition de réservoirs eau-gravitaire obtenues dans le paragraphe précédent. Les i-ième capacités de ces réservoirs sont ( avec  $B < 1$  ):

- (1)  $B_i = B (F_i)^2$   
 (2)  $B_i = B (F_i)^3$   
 (3)  $B_i = B (F_i)^3 (2 - F_i)$

Le débit correspondant relâché est :

$$Q_i = R_i * B_i$$

Si on a n réservoirs eau-gravitaire, la moyenne des débits est le débit :

$$Q = 1/n \sum Q_i$$

Nous avons testé ces 3 versions en utilisant les données de 8 bassins versants, y compris celui de COET-ORGAN, dont ses résultats sont présentés dans le **tableau 14** ci-dessous :

**Tableau 14 :**

Comparaison des critères de NASH obtenus par un modèle à réservoirs quadratiques et à réservoirs linéaires.

N° de B V	CRITERE DE NASH					
	RESERVOIR QUADRATIQUE			RESERVOIR LINEAIRE		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
0	58.4	58.8	58.6	56.8	55.0	55.7
8	72.1	69.6	70.3	68.7	66.7	67.8
9	54.2	54.6	54.7	51.5	49.0	49.7
12	45.0	44.4	44.6	40.2	41.2	41.0
13	60.5	59.2	59.6	51.4	51.8	51.9
21	37.8	37.6	37.7	33.6	33.2	33.7
33	51.8	51.7	48.9	46.7	46.7	47.5
46	64.5	63.4	64.1	59.4	56.7	57.8

Visiblement, la linéarité des réservoirs détériore beaucoup les critères de tous les bassins. Ce résultat est tout à fait en accord avec celui de l'étude sur le modèle GR2 ( EDIJATNO, 1987 ), où il avait été démontré que le réservoir quadratique est préférable au réservoir linéaire. Les représentations graphiques montrent clairement que les pointes de crues sont écrêtées.

Nous avons donc abandonné cette idée de distribution statistique de réservoirs eau-gravitaire.

### *3.2.5.6. Conclusion*

L'étude de la répartition de réservoirs eau-gravitaire en vue de restituer correctement les débits de pointe nous a conduit aux affirmations suivantes :

- réussite de certains modèles à simuler la fluctuation rapide des débits concernant les pointes de crues
- rôle important du réservoir eau-gravitaire dans la détermination des pointes de crues.
- possibilité de maintenir le nombre des paramètres à 3, malgré la tentation d'introduire des paramètres supplémentaires pour certains modèles
- démonstration de la plus grande efficacité d'un réservoir eau-gravitaire quadratique par rapport à un réservoir linéaire
- difficulté à justifier le fonctionnement de plusieurs réservoirs eau-gravitaire en parallèle
- alourdissement de l'optimisation à cause d'un début de surparamétrisation et d'une difficulté d'initialisation d'un système devenu complexe.

Ces différents points sont importants, notamment les 4 premiers qui conduisent à rechercher une solution plus radicale. C'est l'objet du paragraphe suivant.

### 3.2.6. INTRODUCTION D'UN ECOULEMENT PSEUDO-DIRECT

L'une des conclusions importantes du paragraphe précédent est le rôle important du réservoir eau-gravitaire dans la restitution correcte des pointes de crues.

Jusqu'à présent, dans tous nos essais, nous avons supposé que la totalité de la pluie nette routée par l'hydrogramme unitaire entrainé dans un ou plusieurs réservoirs eau-gravitaire. Le débit du cours d'eau est alors la somme pondérée des débits sortant des réservoirs. La bonne restitution des pointes de crues semble être garantie par la présence de réservoirs ayant une capacité faible.

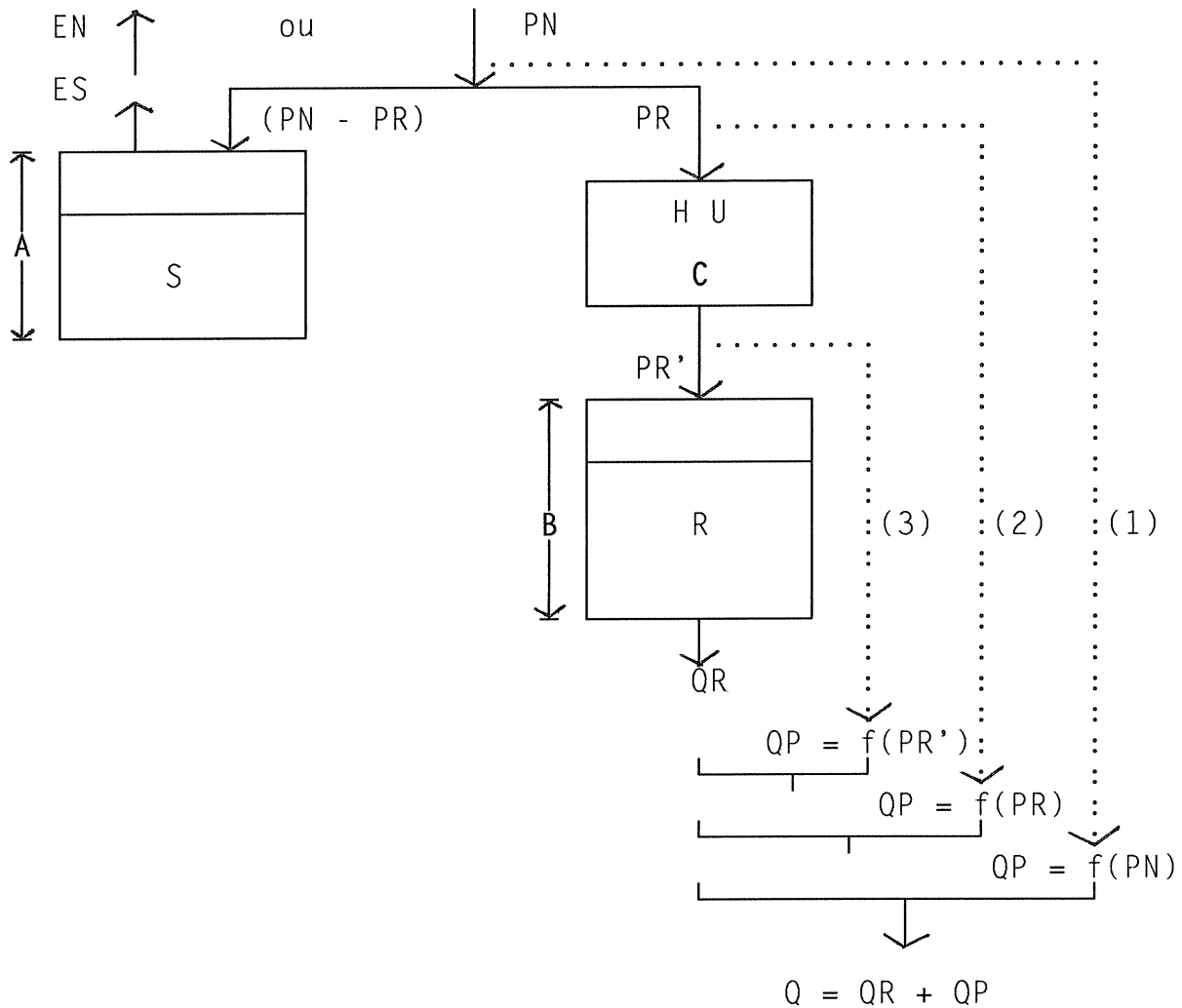
A partir de cette remarque, nous pouvons penser à un autre schéma plus radical. A la place d'une répartition en plusieurs réservoirs eau-gravitaire, nous introduirons directement une fraction de la pluie dans le débit sortant sans passage par un réservoir eau-gravitaire. Cela n'est pas trop surprenant car dans la réalité il y a toujours un certain pourcentage de la pluie qui se transforme directement en écoulement.

#### 3.2.6.1. Modèle GR3 de base avec introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit

Tout en gardant la version de base du modèle GR3, nous prenons un certain pourcentage de pluie et l'introduisons directement comme partie du débit sortant.

Le problème, que nous avons à résoudre, c'est de définir à quel moment nous pouvons "dériver" cette fraction de pluie. Selon le schéma de GR3, il y a trois possibilités de "prélèvement" ( **figure 23** ) :

1. avant rendement par le réservoir-sol
2. avant routage par l'hydrogramme unitaire
3. avant vidange par le réservoir eau-gravitaire



**Figure 23** : Les 3 possibilités dérivation d'une fraction de la pluie

*(1) DERIVATION AVANT RENDEMENT PAR LE RESERVOIR-SOL*

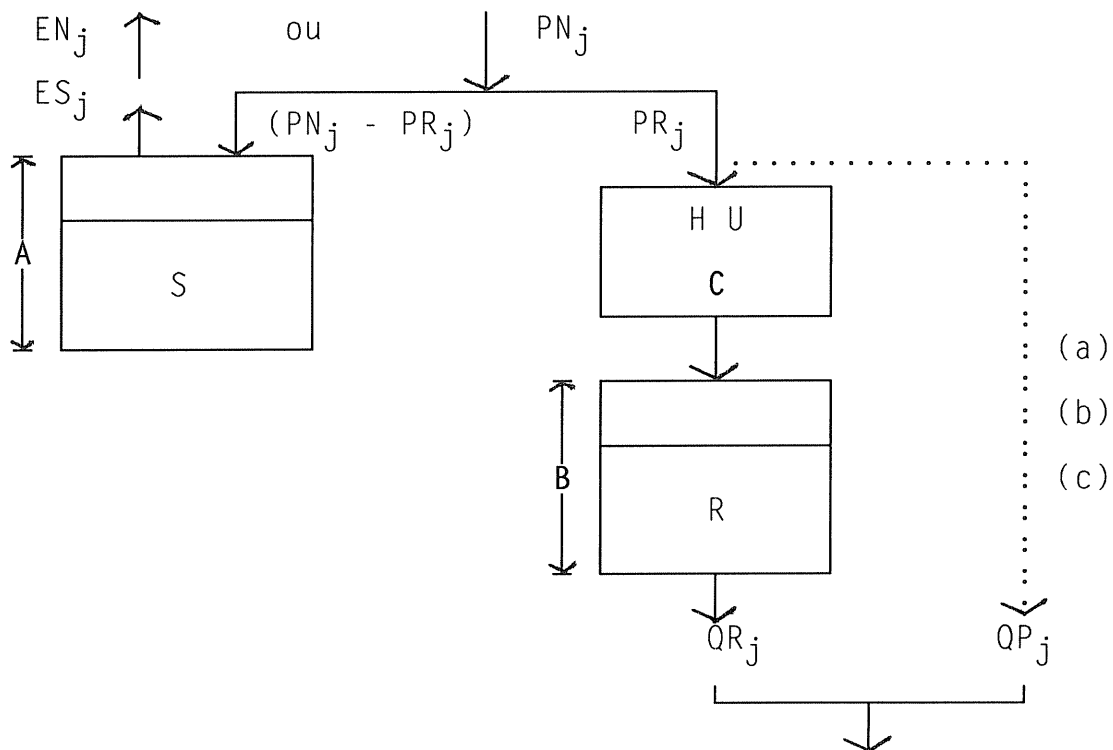
Pour ce premier cas, la "dérivation" a lieu après la neutralisation de la pluie par l'évaporation. Nous pouvons imaginer que cette **partie de la pluie participant au débit est la fraction qui tombe directement dans le cours d'eau**. Quelle que soit la dimension (longueur et largeur) du cours d'eau, cette fraction est sans doute très faible. Un essai, a montré que la fraction optimale est négligeable et qu'en conséquence, ce schéma ne répond pas à notre problème.

(2) DERIVATION AVANT ROUTAGE PAR L'HYDROGRAMME UNITAIRE

Dans cette deuxième possibilité, la partie de pluie participant directement au débit est une fraction de la pluie nette définie par le réservoir-sol. Dans ce cas, l'introduction d'un 4ème paramètre D à optimiser est inévitable pour obtenir la valeur de cette fraction.

En l'absence d'un routage par l'hydrogramme unitaire ou par le réservoir eau-gravitaire, on peut se poser la question de décalage dans le temps de cette fraction dérivée vers la sortie. Nous avons essayé 3 hypothèses (cf. figure 24 ci-dessous) :

- a) décalage d'un jour
- b) sans décalage
- c) décalage d'une fraction de jour



- (a)  $QP_j = D * PR_{j-1}$
- (b)  $QP_j = D * PR_j$
- (c)  $QP_j = D [ G * PR_{j-1} + (1 - G) PR_j ]$

$$Q_j = (1 - D) QR_j + QP_j$$

Figure 24 :

Trois hypothèses pour le routage de la fraction de pluie dérivée vers l'exutoire.

**(a) Décalage d'un jour :**

L'introduction de la fraction de pluie directement au débit se passe le lendemain de son apparition. Avec ce jour de décalage, nous aurons une fraction de débit :

$$QP_j = D * PR_{j-1}$$

et le débit total à l'exutoire sera :

$$Q_j = (1 - D) QR_j + QP_j$$

avec : QR = débit routé par le réservoir eau-gravitaire

D = 4ème paramètre = pourcentage de pluie participant directement au débit

Le résultat de la simulation est tout à fait encourageant. Avec un taux D = 7%, il y a une augmentation de 3% sur critère par rapport à celui du modèle GR3 de base ( **tableau 15** ). De plus, le modèle conduit à une amélioration remarquable sur la représentation graphique, avec des crues consécutives rapides très bien simulées ( **annexe 7.14** ).

Malgré tout, le décalage d'un jour reste encore à justifier. Pour cela, nous allons comparer avec les deux autres hypothèse de décalage.

**(b) Sans décalage**

Dans cette version, nous enlevons la fraction de pluie et l'introduisons directement et sans délai dans le débit. Nous aurons donc une fraction de débit :

$$QP_j = D * PR_j$$

Le débit total est :

$$Q_j = (1-D) * QR_j + QP_j$$



Contrairement au résultat précédent (avec un jour de décalage), la représentation graphique est moins bonne, malgré une légère amélioration du critère de 0,2 % avec  $D = 4\%$  ( **tableau 15** et **annexe 7.15** ).

Etudions la troisième possibilité envisagée.

### (c) Décalage d'une fraction de jour

Précédemment, nous avons utilisé 4 paramètres à optimiser, (le 4ème paramètre  $D$  étant le pourcentage de la fraction pluie). Dans cette variante, nous ne pouvons pas éviter l'introduction d'un 5ème paramètre  $G$  qui détermine avec plus de précision le décalage à introduire.

La fraction de débit sera :

$$QP_j = D (G * PR_{j-1} + (1-G) PR_j)$$

On a donc pour débit total :

$$Q_j = (1-D) QR_j + QP_j$$

avec :  $G = 5$ ème paramètre = facteur de décalage

Il est évident qu'avec cette variante plus précise nous avons le meilleur résultat ( **tableau 15** ). Avec un facteur de décalage  $G = 0.71$  et le pourcentage de pluie participant directement au débit  $D = 9\%$ , le critère s'améliore de 3,7 %. Le graphique est bien meilleur que celui observé avec un jour de décalage (**annexe 7.16**).

DECALAGE DE LA FRACTION DE PLUIE DERIVEE	PARAMETRES					CRITERE DE NASH
	ln A (mm)	ln B (mm)	ln C (jour)	D %	G	
- 1 jour	5.57	8.57	- 0.01	7	-	67.1
- 0 jour	5.64	8.29	- 0.01	4	-	64.3
- fraction de jour	5.58	8.57	- 0.01	9	0.71	67.8
GR3 de base	5.96	8.35	- 2.24	-	-	64.1

**Tableau 15 :**

Résultat de l'étude sur le décalage entre la dérivation d'une fraction de pluie avant routage par l'hydrogramme unitaire et son introduction directe dans le débit sortant.

Nous pouvons conclure que l'introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit est une des meilleures solutions pour résoudre le problème de la non restitution des pointes de crues. Mais le problème de l'endroit de sa dérivation (avant le routage par l'hydrogramme unitaire) pose un autre problème qui a nécessité l'introduction d'un paramètre supplémentaire. Cela peut conduire à un modèle difficile à caler et cette version est donc abandonnée.

Nous allons étudier l'intérêt d'effectuer la dérivation après routage par l'hydrogramme unitaire pour espérer faire l'économie d'une fonction de routage propre.

### *(3) DERIVATION AVANT PASSAGE PAR LE RESERVOIR EAU- GRAVITAIRE.*

Avec une dérivation intervenant après routage par l'hydrogramme unitaire, nous aurons une **fraction de pluie déjà décalée**, sans avoir besoin de l'introduction d'un 5ème paramètre ( **figure 25** )

Son introduction directe sans passage par le réservoir eau-gravitaire produit une fraction de débit :

$$QP_j = D * PR'(1)$$

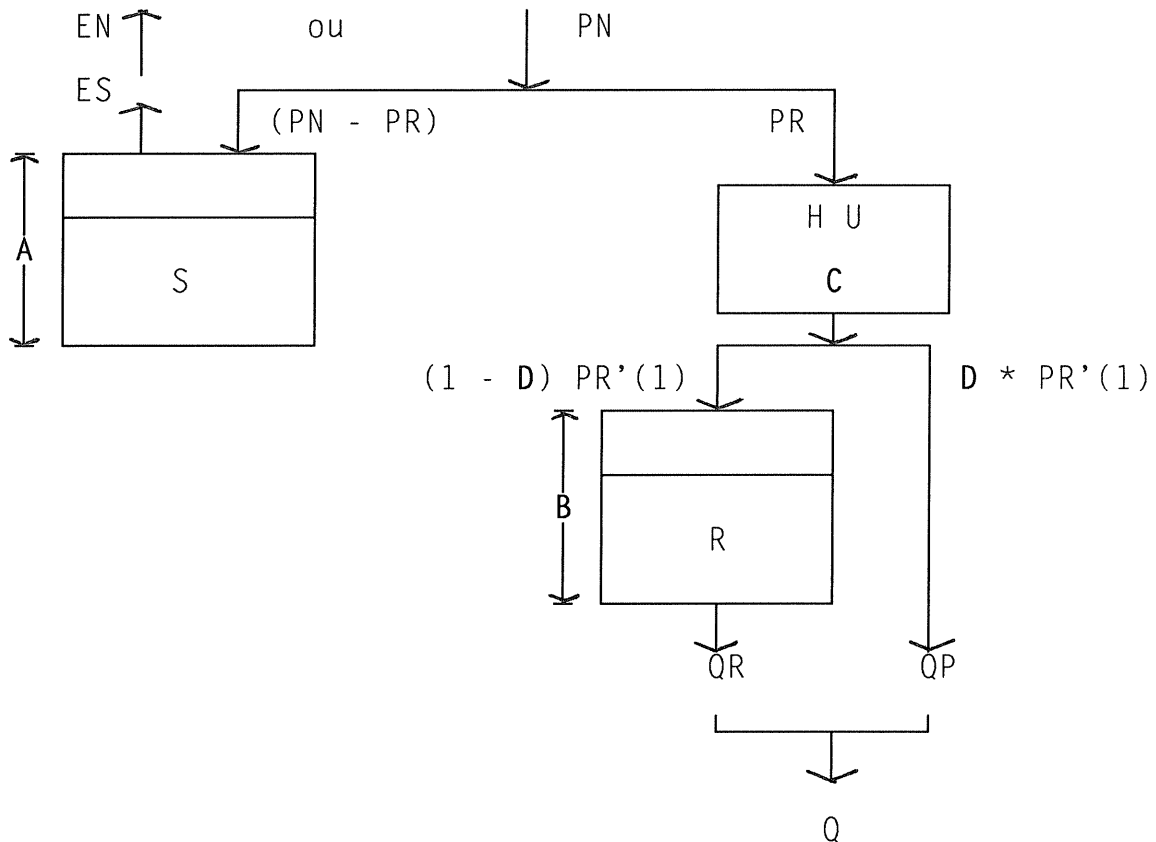
Dans ce cas, le résidu de la pluie nette :  $(1-D) * PR'(1)$  entre dans le réservoir eau-gravitaire qui relâche le débit  $QR$ .

On a donc le débit total :

$$Q_j = QR_j + QP_j$$

avec :  $D$  = pourcentage de la fraction de pluie (4ème paramètre)

$PR'(1)$  = pluie nette après convolution par l'hydrogramme unitaire.



**Figure 25** : Dérivation de pluie avant passage par le réservoir eau-gravitaire

Cette version donne un bon résultat avec des pointes de crues aussi bien simulées que celles de la version avec 5 paramètres.

On a :       $\ln A = 5.90$  (mm)  
                $\ln B = 8.51$  (mm)  
                $\ln C = -0.43$  (jour)  
                $D = 8\%$

Critère de NASH = 67.7 %

Il n'y a qu'une très légère détérioration du critère de 0.1% par rapport à celui de la version avec 5 paramètres. Donc, il y a une amélioration de 3.6% par rapport au modèle de base.

En comparant avec tous les modèles différents proposés pour résoudre le problème d'écrêtement des pointes des crues à fluctuation rapide, cette version semble le mieux respecter la simplicité du modèle.

Mais, on peut encore regretter l'introduction d'un 4ème paramètre qui correspond au pourcentage optimum de la fraction de pluie à dériver. Nous allons essayer d'éviter ce supplément de calage.

### *3.2.6.2. Peut-on fixer le pourcentage de la fraction de pluie participant directement au débit sortant ?*

La façon la plus simple d'éviter l'introduction du 4ème paramètre déterminant le pourcentage de la fraction de pluie est de lui donner une valeur fixe.

Pour garder au modèle sa généralité, il faudra que cette valeur fixe soit valable non seulement pour le bassin de COET-ORGAN, mais aussi pour les autres bassins qui ne souffrent pas du problème des pointes de crues insuffisantes. Cela risque de poser problème pour les grands bassins, où en général "le sommet" des crues est assez "arrondi".

Prenons le pourcentage initial de la fraction de pluie obtenue pour le bassin de COET-ORGAN comme une valeur fixe (8%), et testons le sur les autres bassins. Pour simplifier, cinq autres bassins ont été choisis, dont les superficies varient de 100 à 3750 km<sup>2</sup>. Deux taux de 5% et de 2% sont également proposés à titre de comparaison ( **tableau 16** ).

**RESULTAT :**

N°	NOM DU BASSIN VERSANT	SUPERFICIE (Km <sup>2</sup> )	CRITERE DE NASH (%)			GAIN OBTENU PAR RAPPORT A GR3 DE BASE			
			GR3 DE BASE	FRACT.DE PLUIE			8%	5%	2%
				8%	5%	2%			
00	Orgeval au Theil	104	56.6	57.1	57.0	56.7	0.5	0.4	0.1
08	Seine à Bar/Sein	2340	75.3	73.5	74.5	75.1	-1.8	-0.8	-0.2
46	Coet-Organ à Kerdec en Quistinic	48	64.1	67.7	67.0	65.2	3.6	2.9	1.1
95	Sauldre à Salbr.	1200	66.8	67.8	67.4	67.0	1.0	0.6	0.2
A6	Charente à Châtillonnes	3750	76.0	75.5	75.6	75.8	-0.5	-0.4	-0.2
A8	Boutonne au Vert	523	76.3	75.2	76.0	76.3	-1.1	-0.3	0.0
TOTAL							1.7	2.4	1.0

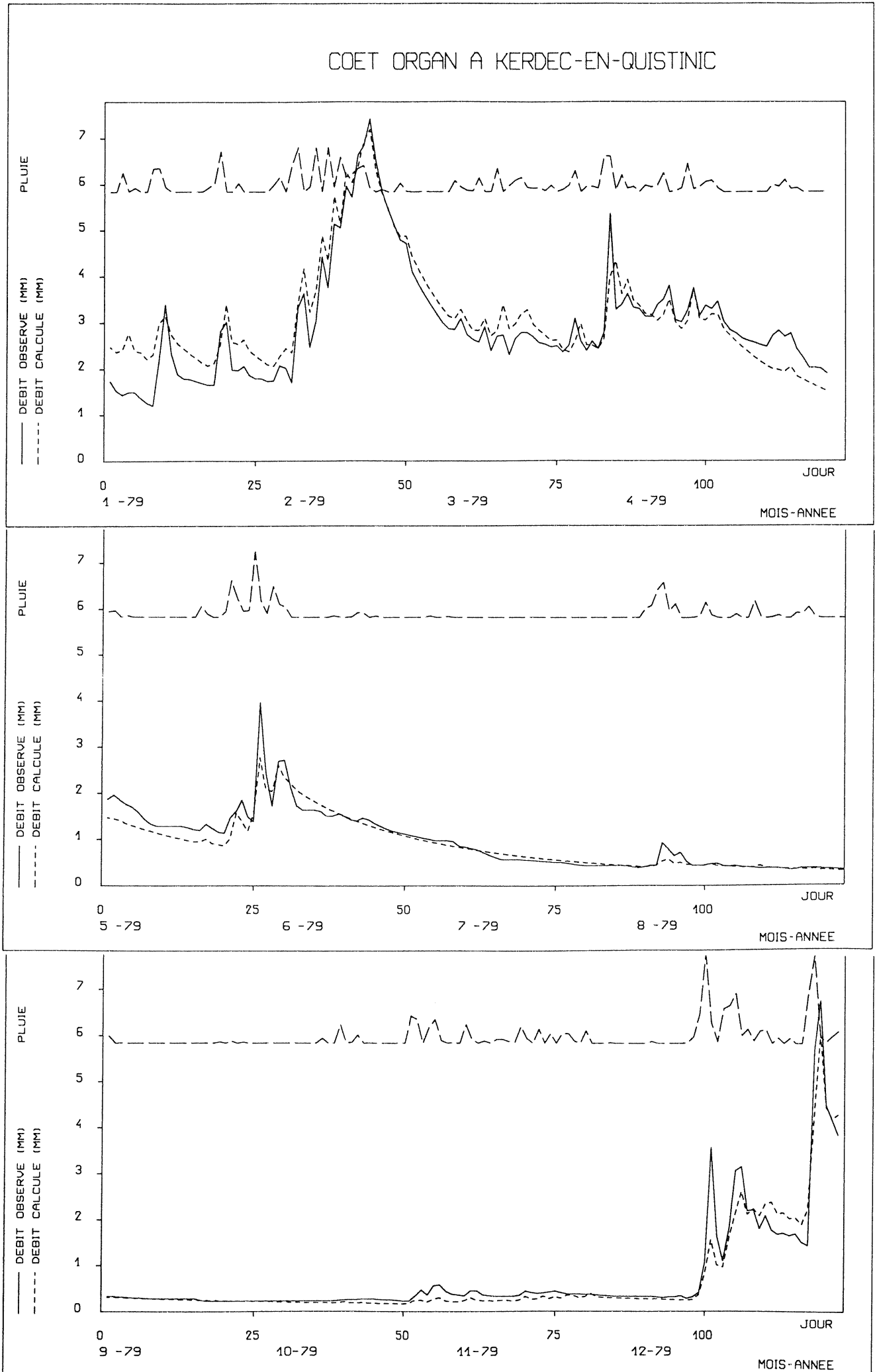
**Tableau 16 :**

Résultat de la simulation avec introduction de différents taux fixes de la fraction de pluie nette participant directement au débit.

Avec le taux fixe de 8%, il y a une détérioration importante de la valeur critère pour les grands bassins. En particulier pour le bassin de la SEINE à BAR-SUR-SEINE ( 2340 km<sup>2</sup> ), pour lequel le modèle donne des hydrogrammes de crues trop pointus. Cependant, une amélioration existe pour des bassins plus petits. Par contre, le taux de 2%, malgré une légère détérioration du critère pour les grands bassins, n'améliore pas la restitution des pointes de crues par rapport à la version de base de GR3. En particulier, pour le bassin de COET-ORGAN, ce pourcentage ne suffit pas à améliorer la représentation des pointes de crues.

Il nous semble que le taux fixe de 5% est le meilleur compromis. Dans le cas du bassin de COET-ORGAN, il permet de représenter assez bien les pointes de crues ( **figure 26** ). Et pour les grands bassins il n'y a pas d'effet sensible sur les hydrogrammes.

99  
 Figure 26 : Simulation du bassin de COËT-ORGAN avec introduction de 5% de la fraction de pluie nette participant directement au débit.



Avant de rejeter définitivement la répartition de plusieurs réservoirs eau-gravitaire ( paragraphe 3.2.5 ), nous allons voir si une solution correspondant à un mélange des 2 phénomènes précédents apporte un mieux dans la reproduction des débits.

### 3.2.6.3. Répartition en deux réservoirs eau-gravitaire avec introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit.

Ce modèle est une combinaison des modèles proposés dans les paragraphes précédents, dont la composition est présentée dans la figure 27 . Nous considérons deux réservoirs eau-gravitaire en parallèle, et nous noterons B la rétention maximale à 1 jour du plus grand réservoir. Le paramètre du deuxième réservoir est  $B_2$  :

$$B_2 = B * T$$

avec B = deuxième paramètre à caler = rétention maximale 1 jour du premier réservoir eau-gravitaire  
T = pourcentage à caler

Après routage par l'hydrogramme unitaire, la pluie nette PR' est fractionnée en trois parties, dont :

- (1) 1ère fraction entre dans le 1er réservoir eau-gravitaire
- (2) 2ème fraction entre dans le 2ème réservoir eau-gravitaire
- (3) 3ème fraction participe directement au débit

Si (1) détermine le débit en général, nous pouvons penser que (2) et (3) concourent à renforcer les débits de pointe. La somme des deux dernières fractions devrait être assez faible par rapport à (1).

En utilisant la même inconnue que précédemment (T,  $0 < T < 1$ ) nous proposons comme expressions des trois fractions précédentes :

- |     |                    |                         |
|-----|--------------------|-------------------------|
| (1) | $(1-T) * PR'(1)$   | donnera le débit $QR_1$ |
| (2) | $(1-T) T * PR'(1)$ | donnera le débit $QR_2$ |
| (3) | $T^2 * PR'(1)$     | donnera le débit QP     |

La somme des ces trois fractions de débits est le débit total :

$$Q = QR_1 + QR_2 + QP$$

Si l'on fixe la fraction T, on n'aura que 3 paramètres à caler.

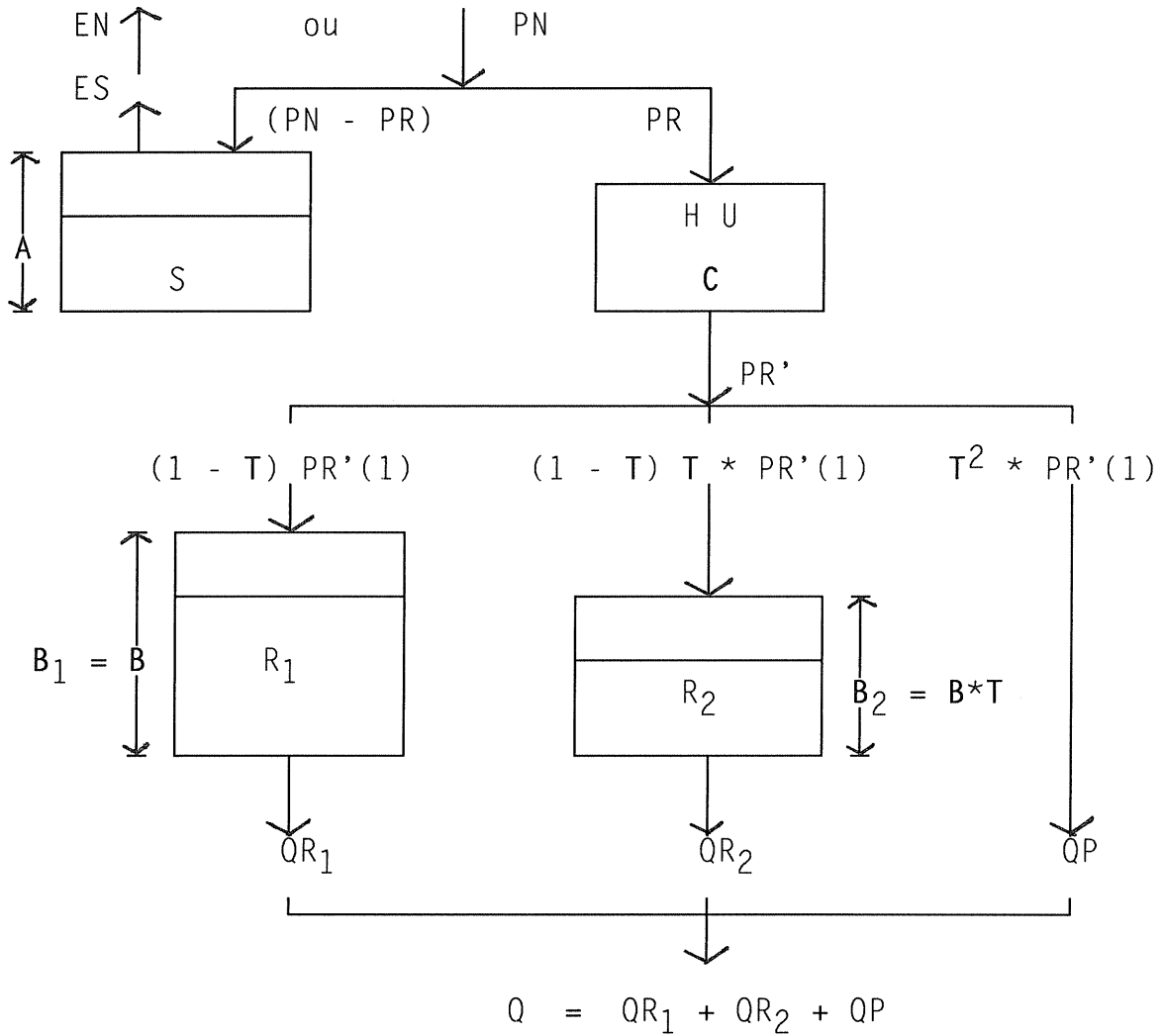


Figure 27 :

L'architecture d'un modèle à 2 réservoirs eau-gravitaire avec une fraction de la pluie nette participant directement au débit.



En premier essai, nous estimons qu'il y a 90% de la pluie nette qui entre dans le premier réservoir eau-gravitaire ( correspondant à  $T = 10\%$  ). Le reste (10%) va renforcer les débits de pointe. On va le répartir en deux fractions :

9% entre dans le deuxième réservoir eau-gravitaire,  
1% vient directement s'ajouter au débit.

Avec pourcentage  $T$  qui est supérieur à celui du modèle précédent (paragraphe 3.2.6.2), nous espérons qu'il donnera un bon résultat, notamment pour la présentation graphique.

En fait, pour le bassin de COET-ORGAN, cette disposition n'a conduit qu'à une légère amélioration de la valeur du critère de 0.7% par rapport au modèle de base ( tableau 17 ). De plus le modèle ne peut pas restituer correctement les pointes de crues.

Nous pouvons imputer ce résultat à l'insuffisance de la fraction de pluie participant directement au débit (= 1%).

Donc, dans l'essai suivant, le taux  $T$  est mutiplié par 2, soit  $T = 20\%$ , ce qui donne les fractions suivantes :

80% et 16% entrant dans le premier et le deuxième réservoir eau-gravitaire,  
4% participant directement au débit.

Pour accroître la différence avec l'essai précédent ( 3.2.6.2. ) nous arrondirons ces nombres respectivement à :

80%, 15% et 5% pour les fractions (1), (2) et (3).

Au point de vue du critère numérique, cette version correspond à un accroissement de 0,2% ( tableau 17 ). Mais, il n'y a pas de grande différence dans la présentation graphique, et les crues ne sont pas sensiblement mieux restituées.

L'avantage de la version précédente est la simplicité de son architecture, car il n'y a qu'un seul réservoir eau-gravitaire.

D'après le résultat de cet essai, il nous semble que l'introduction de la fraction de pluie participant directement au débit joue le rôle le plus important dans l'effort de mieux restituer les pointes de crues. La répartition en deux réservoirs ne donne une amélioration suffisante, ni pour le critère numérique, ni pour la qualité graphique, en compensation de la complication du modèle.

Nous rejetons donc définitivement la version du modèle fondé sur l'usage de plusieurs réservoirs eau-gravitaire.

VERSION DU MODELE	REPARTITION DE LA PLUIE NETTE	PARAMETRES			CRITERE DE NASH
		A	B	C	
1 réservoir eau-grav. (3.2.6.2)	95 % , 5 %	5.92	8.45	-0.43	67.0
2 réservoirs eau-grav.	90 % , 9 % , 1 %	5.92	8.22	-1.37	64.8
	80 % , 15 % , 5 %	5.84	8.51	-0.44	67.2
GR3 de base		5.96	8.35	-2.24	64.1

**Tableau 17 :**

Résultat de la simulation en comparant les versions du ( 3.2.6.2. ) et le modèle GR3 de base.

### ***3.2.7. CONCLUSION SUR LE PROBLEME DE LA MAUVAISE RESTITUTION DES DEBITS DE POINTE SUR CERTAINS BASSINS.***

Les études précédentes montrent bien la difficulté de trouver une solution simple pour résoudre le problème de la sous-estimation des débits de pointe dans certains bassins.

Rappelons les principales tentatives, depuis le couplage de 2 modules GR3, le recours à plusieurs réservoirs-sol ou bien plusieurs réservoirs eau-gravitaire, jusqu'à l'introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit. Ces tentatives ont conduit à des modèles d'une architecture plus ou moins compliquée avec souvent l'introduction de paramètres supplémentaires.

Certaines tentatives ont été sans succès, d'autres nécessitaient trop de paramètres pour qu'on les retienne.

La seule solution qui satisfait notre impérieuse contrainte de ne pas dépasser les 3 paramètres, est la version de base du modèle GR3 où une fraction de la pluie nette après routage par l'hydrogramme unitaire, participe directement au débit sortant. En fixant le taux de cette fraction à 5%, le modèle simule assez bien les pointes de crues qui sans cela étaient écrêtées dans la plupart des bassins de la Bretagne. Bien sur, nous avons vérifié que cette dernière version ne pose pas de problème pour les autres bassins en particulier pour certains grands bassins.

Dans la suite, nous appellerons " **écoulement pseudo-direct** " la fraction de la pluie nette participant directement au débit, car il n'est pas dérivé à partir de la pluie brute, mais à partir de la pluie nette propagée par l'hydrogramme unitaire. Un schéma de GR3 est présenté dans la **figure 28** .

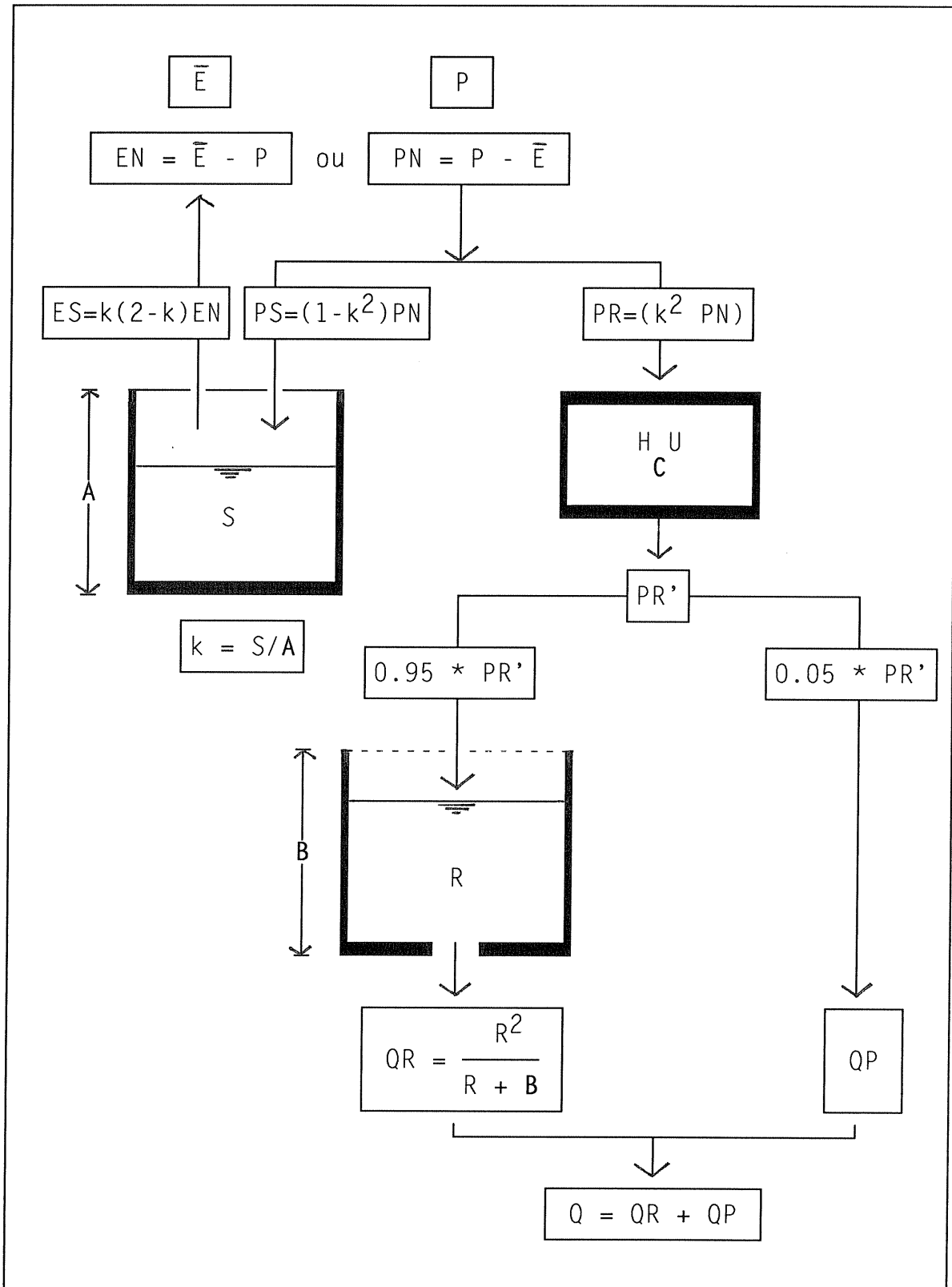


Figure 28 : ARCHITECTURE DU MODELE GR3



# QUATRIEME PARTIE



## EVALUATION DU MODELE GR3 ET APPLICABILITE AUX BASSINS NON JAUGES

Le modèle GR3 auquel nous sommes arrivés résulte de tentatives en vue de résoudre certains problèmes rencontrés dans un ou plusieurs bassins particuliers. Il faut maintenant s'assurer que l'architecture ainsi créée est acceptable pour l'ensemble des bassins.

Dans cette quatrième partie du rapport, GR3 va être testé sur l'ensemble de ces 110 bassins simulations, et nous essayerons ensuite d'expliquer les paramètres du modèle, dans le but de pouvoir utiliser le modèle dans des bassins versants non jaugés.

Pour juger de la performance du modèle GR3 nous le comparerons au modèle CREC très utilisé en France et dont GR3 s'inspire du moins en ce qui concerne la procédure de suivi de l'humidité du bassin.

### 4.1 COMPARAISON AVEC LE MODELE CREC

Depuis sa création au cours des années 60, le modèle CREC est beaucoup utilisé pour simuler la transformation pluie-débit, avec des objectifs très variés. On peut citer, entre autres :

- étude du bassin de la Seine à Bar-sur-Seine dans un but de prévision ( GUILBOT et RUIZ, 1976 )
- étude du bassin de l'Orgeval et comparaison avec les modèles GR1 et CEQUEAU ( MAILHOL, 1983 )
- étude du bassin du Réal Collobrier, et comparaison avec les modèles GR2 et CEQUEAU ( BEISSON, 1985 )



Au terme de notre recherche il est judicieux de comparer GR3 avec le modèle CREC sur les 3 bassins précités.

#### 4.1.1. BASSIN VERSANT DE LA SEINE A BAR-SUR-SEINE

Compte-tenu de la superficie (2340 km<sup>2</sup>) et de la spécificité du bassin, GUILBOT et RUIZ ont utilisé une version du modèle CREC à 12 paramètres, dont 3 n'ont pas été optimisés ( **figure 29** ).

Nous avons utilisé une même méthode d'optimisation pour que l'on puisse comparer les résultats de ces deux modélisations. Avec une durée de mise en route de 365 jours, les modèles ont été calés sur la période : 1960-1963. Les résultats sont représentés dans le **tableau 18** et les **graphiques 30** et **31** .

C R E C			G R 3		
PARA-METRES	VALEURS INITIALES (LOG)	VALEURS OPTIMALES (LOG)	PARA-METRES	VALEURS INITIALES (LOG)	VALEURS OPTIMALES (LOG)
X1	-2.3	-2.78			
X2	-2.9	-7.75			
X3	-3.5	-5.62			
X4	-3.5	-3.74	A	5.0	5.86
X5	3.0	3.73			
X6	0.7	-9.10	B	4.0	6.22
X7	3.0	4.69			
X8	4.8	non optim	C	0.5	1.43
X9	0.0	non optim			
X10	0.7	non optim			
X11	-0.9	-0.18			
X12	0.0	0.93			
CRITERE DE NASH		73.4 %	CRITERE DE NASH		71.5 %
ERREUR DE BILAN		-0.3 %	ERREUR DE BILAN		-2.6 %
RAPPORT DES CRUES ANNUELLES MOYENNES		82.35 %	RAPPORT DES CRUES ANNUELLES MOYENNES		98.04 %

**Tableau 18 :**

Calage des modèles CREC et GR3 sur la période 1960 - 1963

Comme contrôle des modèles nous étudions leur fonctionnement sur deux autres périodes. En utilisant le jeu de paramètres retenus, les débits de la période 1952-1955 et 1974-1977 ont été reconstitués. La première période présente une hydraulique normale et la deuxième contient la sécheresse de 1976. Leurs résultats sont comparés avec ceux de la période de calage ( tableau 19 ). Les débits en 1976 sont représentés dans les figures 32 et 33 .

	C R E C			G R 3		
	CALAGE	CONTROLE		CALAGE	CONTROLE	
	60-63	52-55	74-77	60-63	52-55	74-77
CRITERE DE NASH	73.4	74.5	72.7	71.5	70.9	72.6
ERREUR DE BILAN	-0.3	4.4	5.6	-2.6	4.8	2.6
RAPPORT DES CRUES ANNUELLES MOYENNES	82.35	87.50	91.38	98.04	91.35	100.0

**Tableau 19 :**

Résultats sur les périodes de contrôle 1952 - 1955 et 1974 - 1977, avec le jeu de paramètres calé sur 1960 - 1963.

## *RESULTAT*

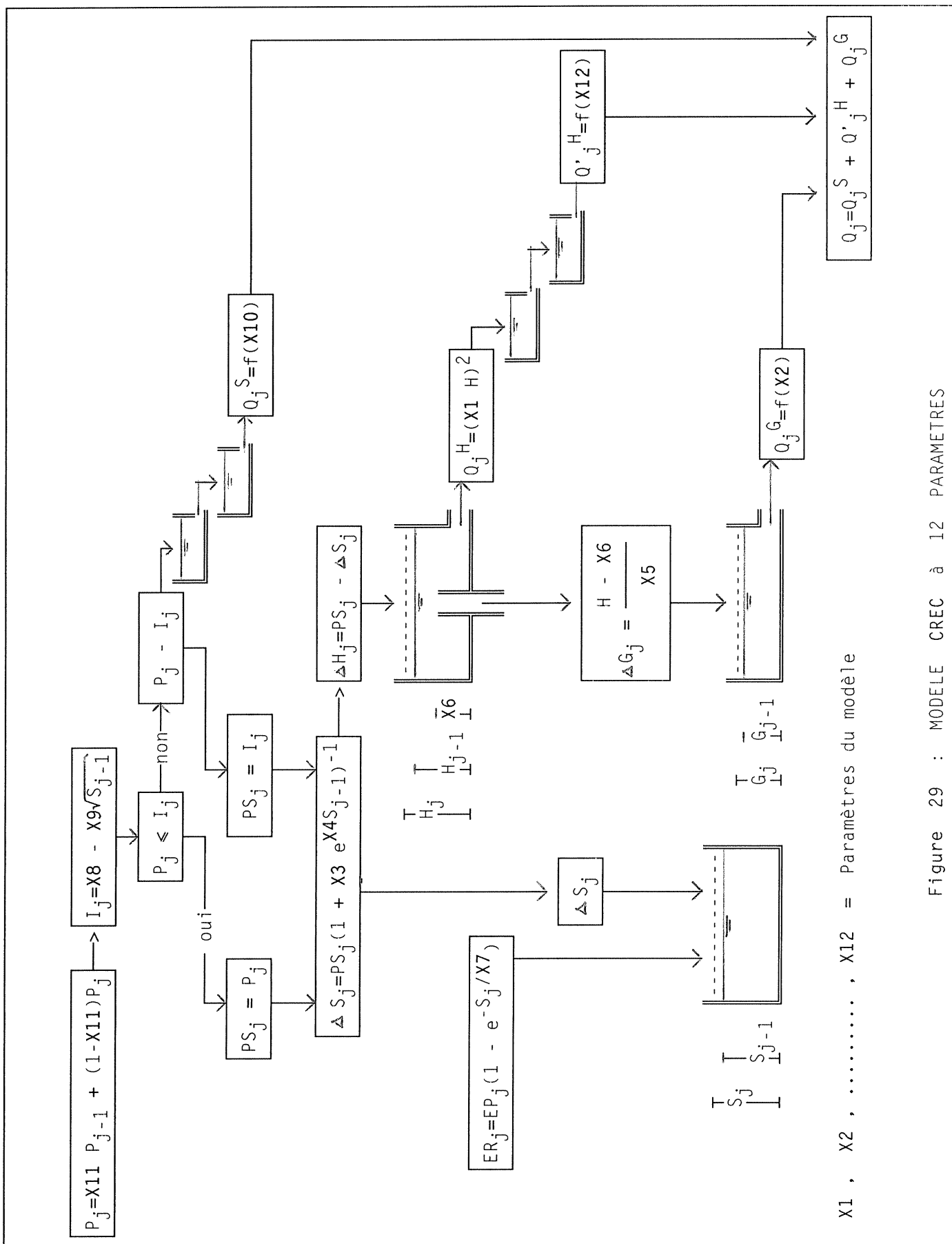
Le calage des deux modèles conduit à une légère différence en faveur du modèle CREC. Vu la différence d'architecture et de nombre de paramètres à optimiser, on peut considérer que GR3 soutient la comparaison.

Cependant, d'après les graphiques, les crues simulées par le modèle GR3 sont plus pointues, ce qui provient probablement de l'écoulement pseudo-direct.

Quant à l'application du modèle obtenu sur les périodes de contrôles 1952-1955 et 1974-1977, on peut remarquer que les modèles conservent leur performance ce qui montre que le risque de surcalage du modèle CREC ne semble pas à redouter.

A titre de curiosité on a calé les deux modèles sur les deux périodes de contrôle.

On constate que moyennant une variation de leurs paramètres, les deux modèles rendent bien compte des débits de ces périodes et en particulier s'adaptent bien à la sécheresse exceptionnelle de 1976.



$X_1, X_2, \dots, X_{12}$  = Paramètres du modèle

Figure 29 : MODELE CREC à 12 PARAMETRES

Figure 30 : Simulation de l'année 1962 par le modèle CREC.

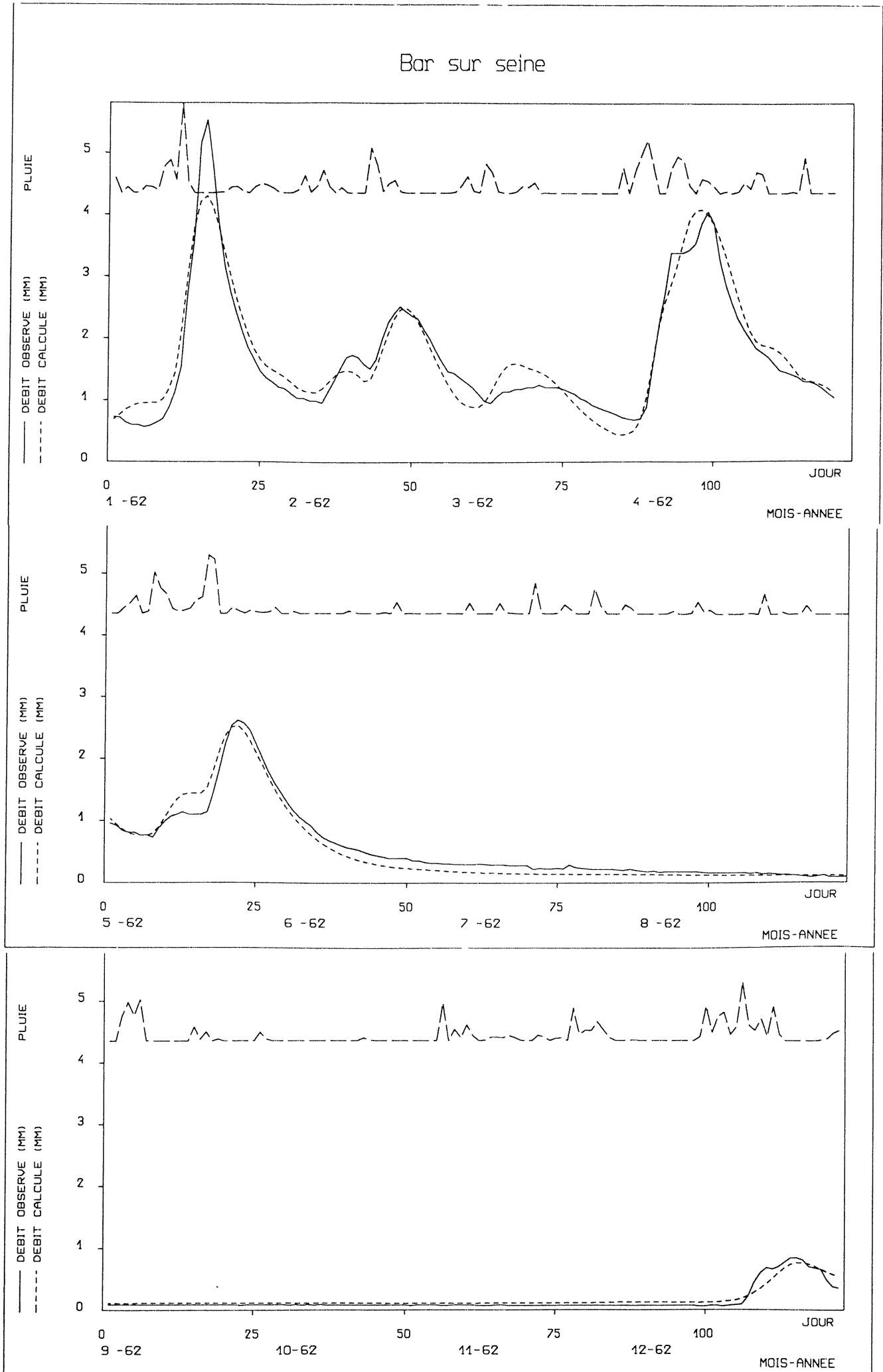


Figure 31 : Simulation de l'année 1962 par le modèle GR3.

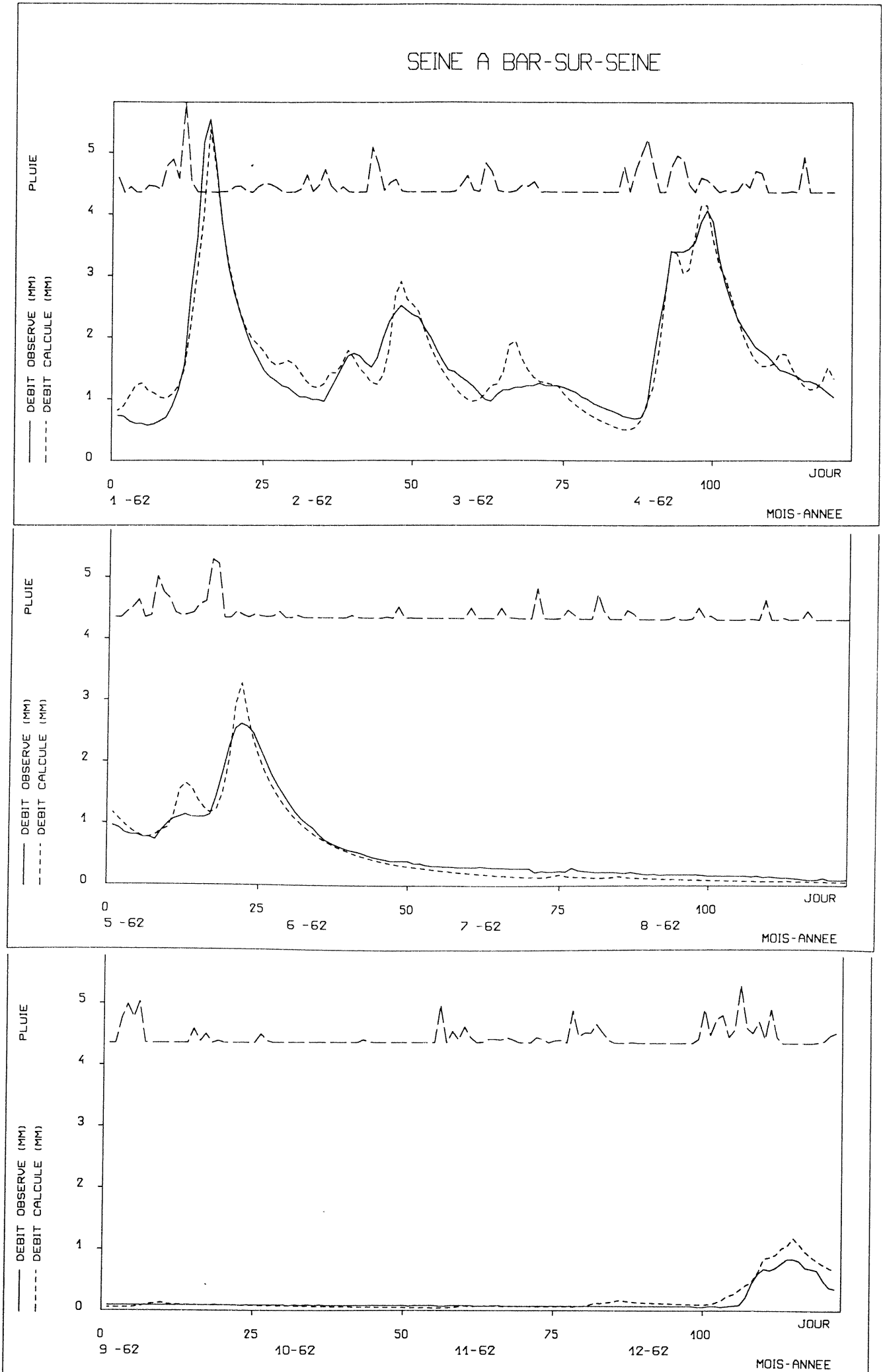


Figure 32 : Simulation de l'année 1976 par le modèle CREC.

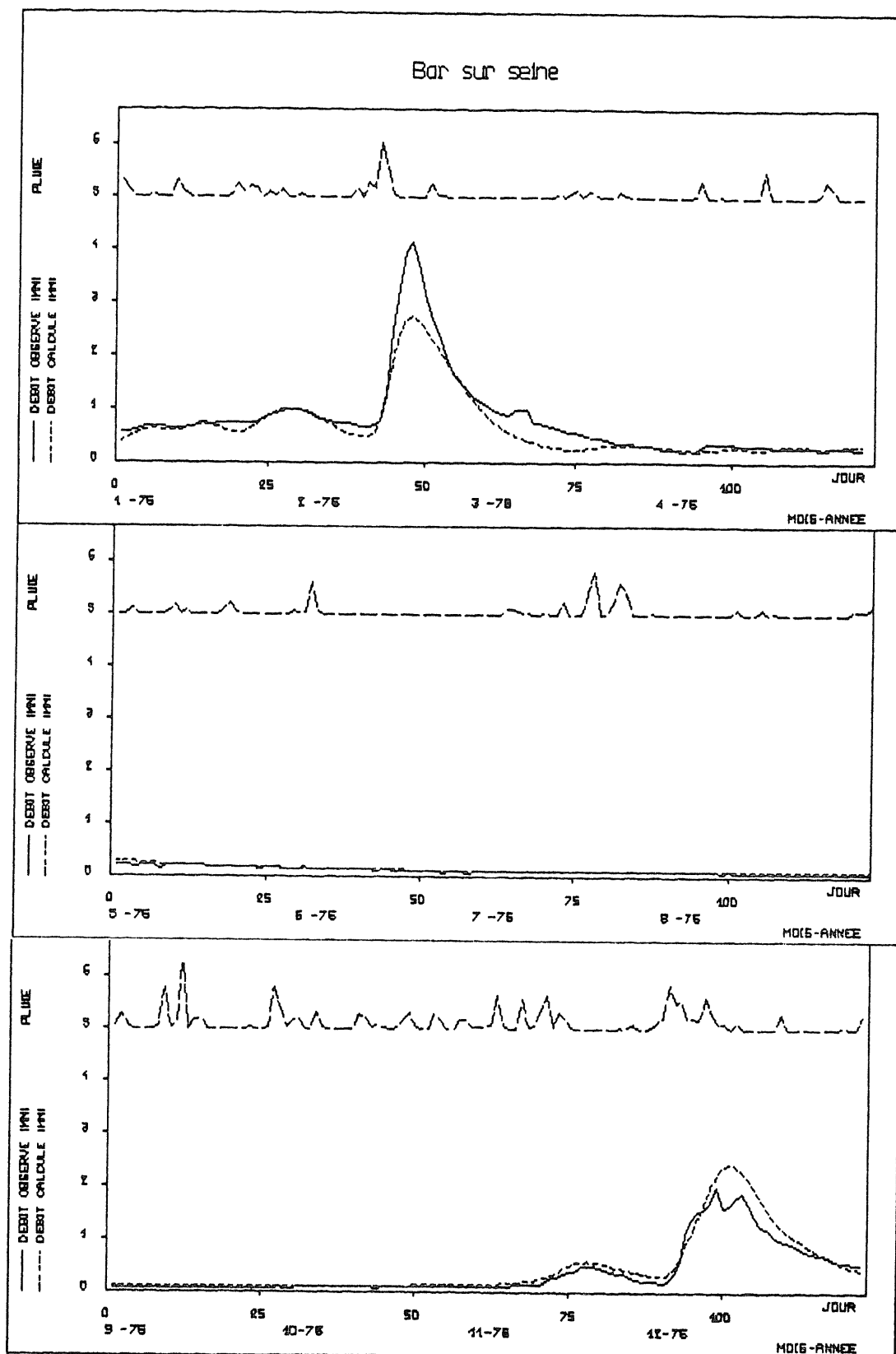
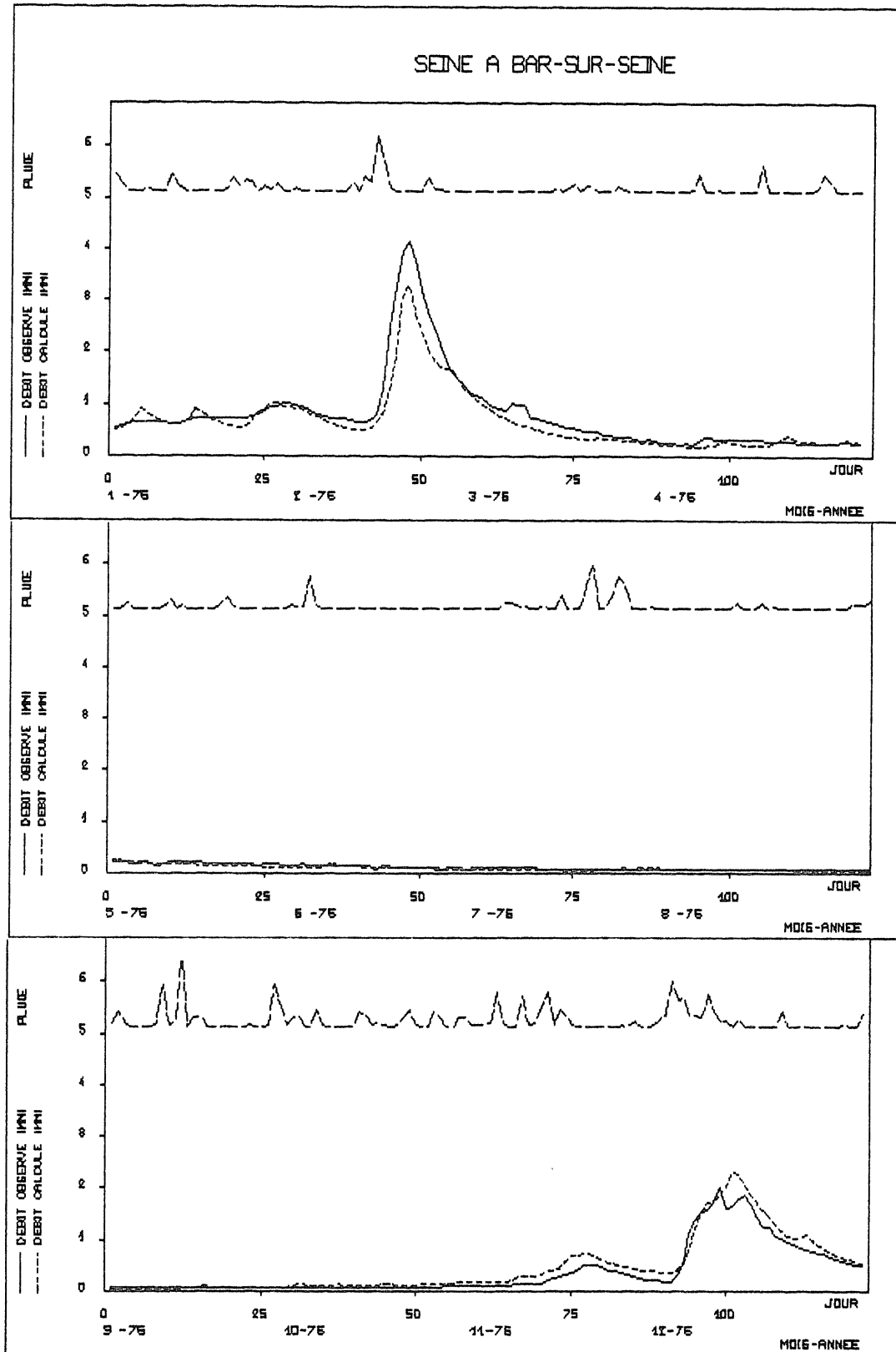


Figure 33 : Simulation de l'année 1976 par le modèle GR3.





#### 4.1.2. BASSIN VERSANT DE L'ORGEVAL AU THEIL

Le bassin de l'Orgeval étant très différent de celui de la Seine, il faut utiliser une version de CREC sans routage supplémentaire par des cascades de NASH. L'étude de comparaison des modèles CREC, GR1 et CEQUEAU sur les bassins de l'Orgeval a utilisé la version CREC à 8 paramètres (MAILHOL, 1983);(figure 34 ).

Nous avons comparé les deux modèles CREC et GR3 utilisant les données du Theil, sur la période de calage de 1981 à 1983, et obtenus les résultats rassemblés dans le **tableau 20** .

C R E C			G R 3		
PARA-METRES	VALEURS INITIALES (LOG)	VALEURS OPTIMALES (LOG)	PARA-METRES	VALEURS INITIALES (LOG)	VALEURS OPTIMALES (LOG)
X1	1.8	5.49	A	5.0	5.43
X2	-4.6	-4.33			
X3	0.5	2.10			
X4	1.2	2.96	B	4.0	4.09
X5	1.6	3.71			
X6	1.1	1.02	C	0.5	-0.63
X7	-0.7	4.45			
X8	1.7	3.94			
CRITERE DE NASH		46.0 %	CRITERE DE NASH		56.9 %
ERREUR DE BILAN		-3.6 %	ERREUR DE BILAN		13.5 %
RAPPORT DES CRUES ANNUELLES MOYENNES		76.83 %	RAPPORT DES CRUES ANNUELLES MOYENNES		90.24 %

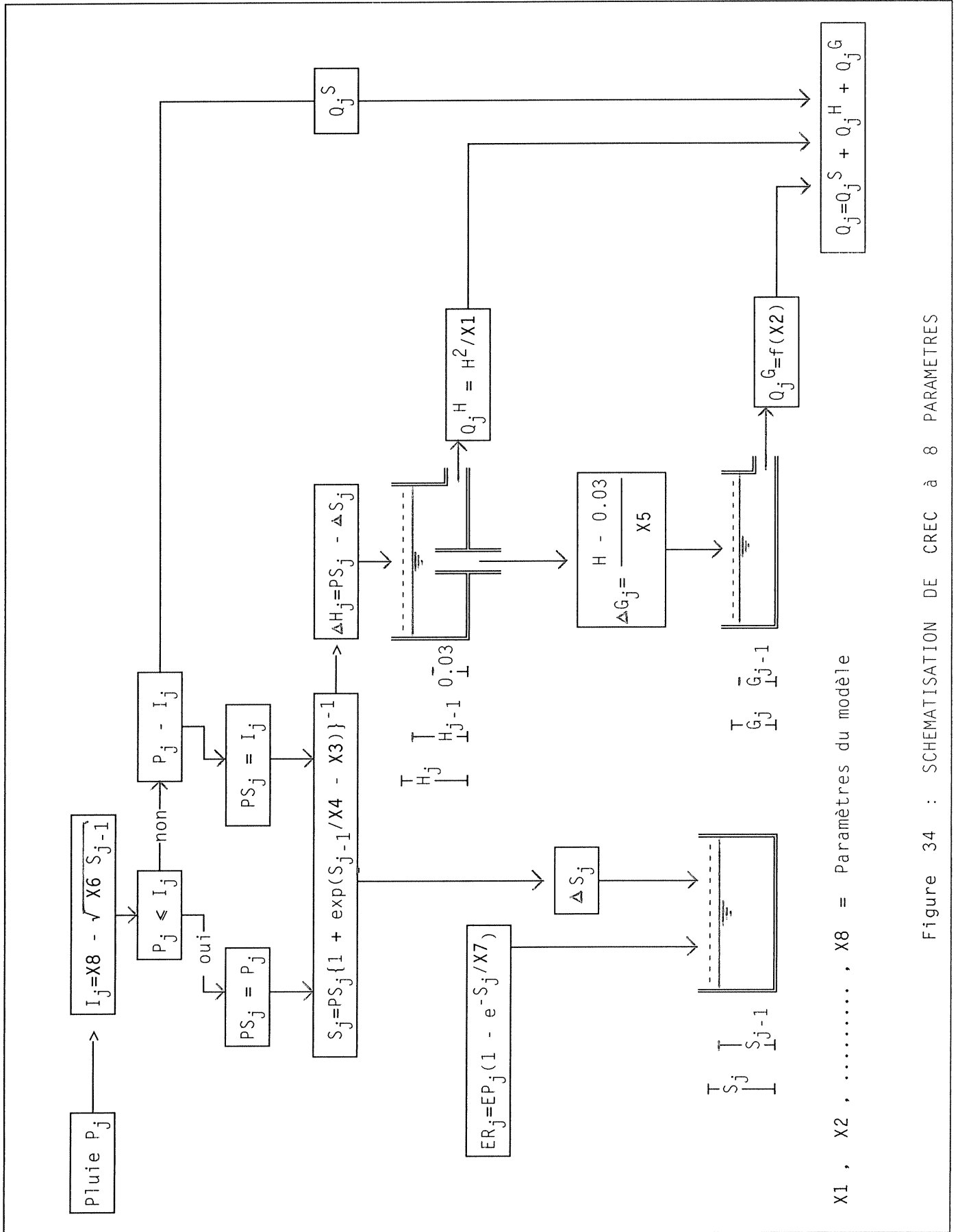
**Tableau 20 :**

Comparaison des modèles CREC et GR3 sur la période de calage 1981 - 1983

Dans le cas du Theil le modèle GR3 est sensiblement meilleur que CREC. En analysant les hydrogrammes fournis par le modèle CREC (figure 35), on peut remarquer qu'il y a un décalage dans la montée des crues simulées qui se

produit un peu en avance. Ce mauvais calage dans le temps est certainement responsable des sous-estimations des crues.

Pour certains étiages, le modèle GR3 donne un tarissement trop énergétique, provoquant des sous-estimations sur les débits de base qui suivent (figure 36).



X1 , X2 , ..... , X8 = Paramètres du modèle

Figure 34 : SCHEMATISATION DE CREC à 8 PARAMETRES

Figure 35 : Simulation de l'année 1982 par le modèle CREC.

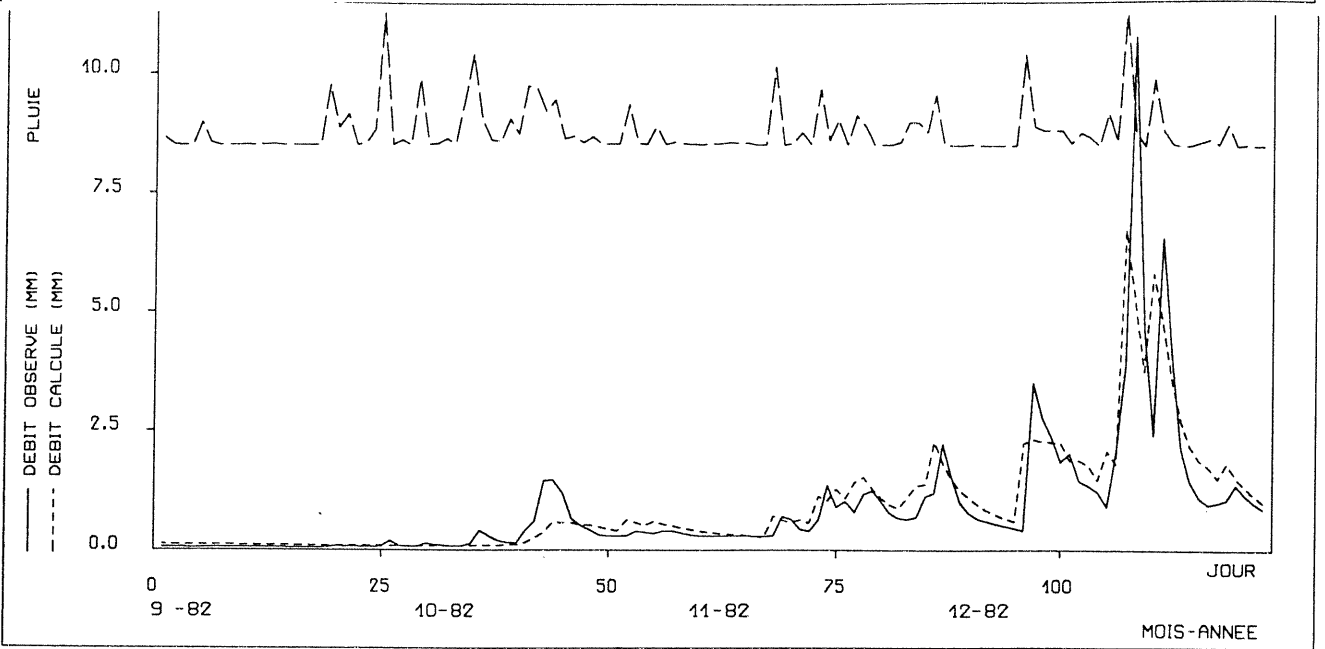
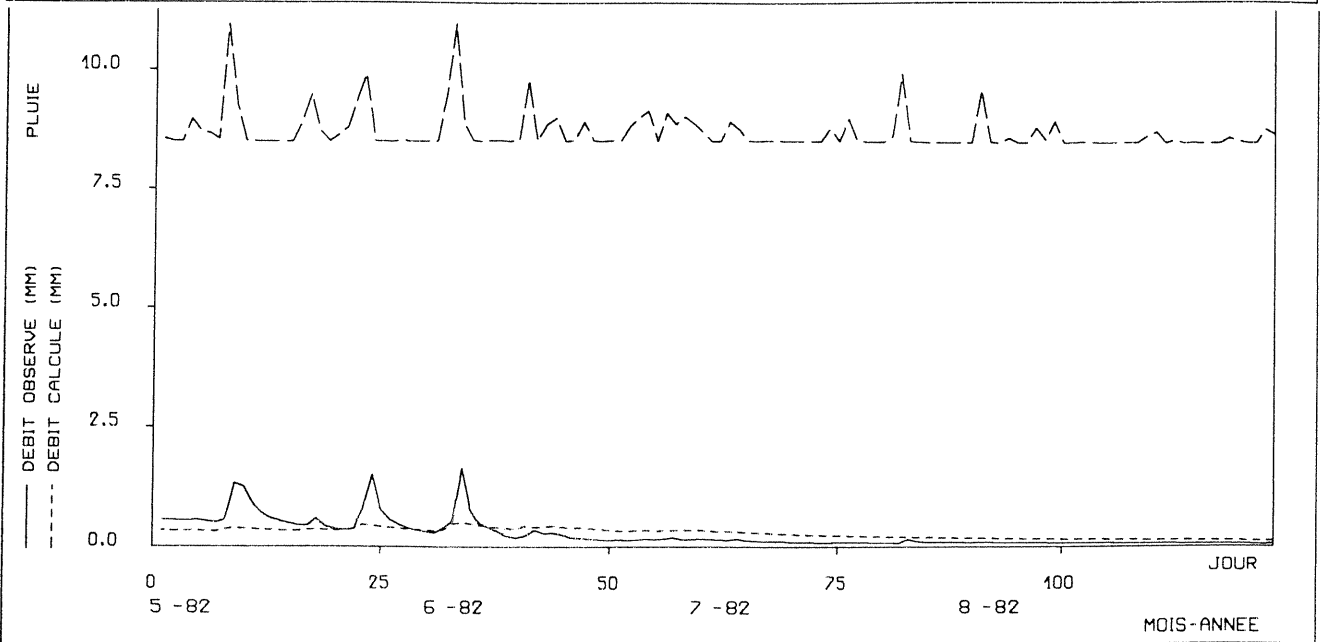
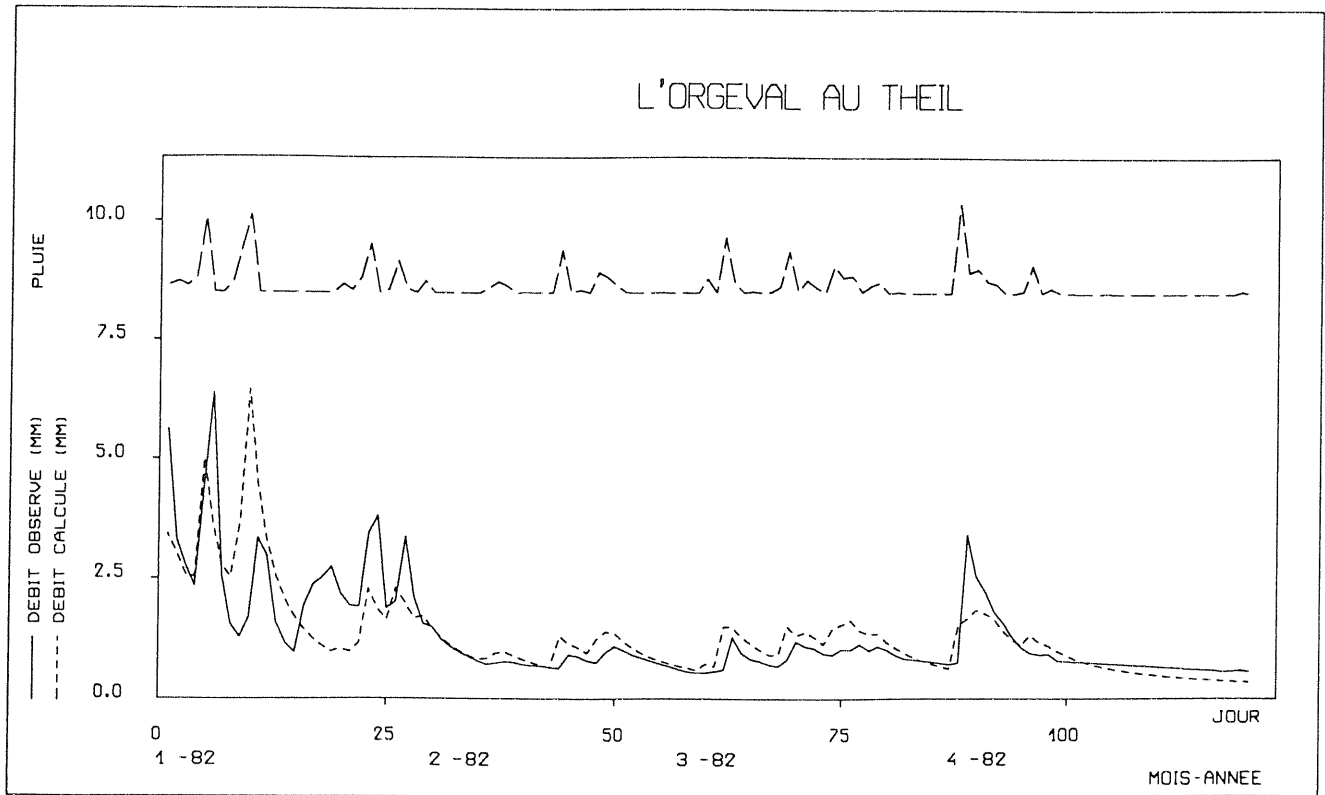
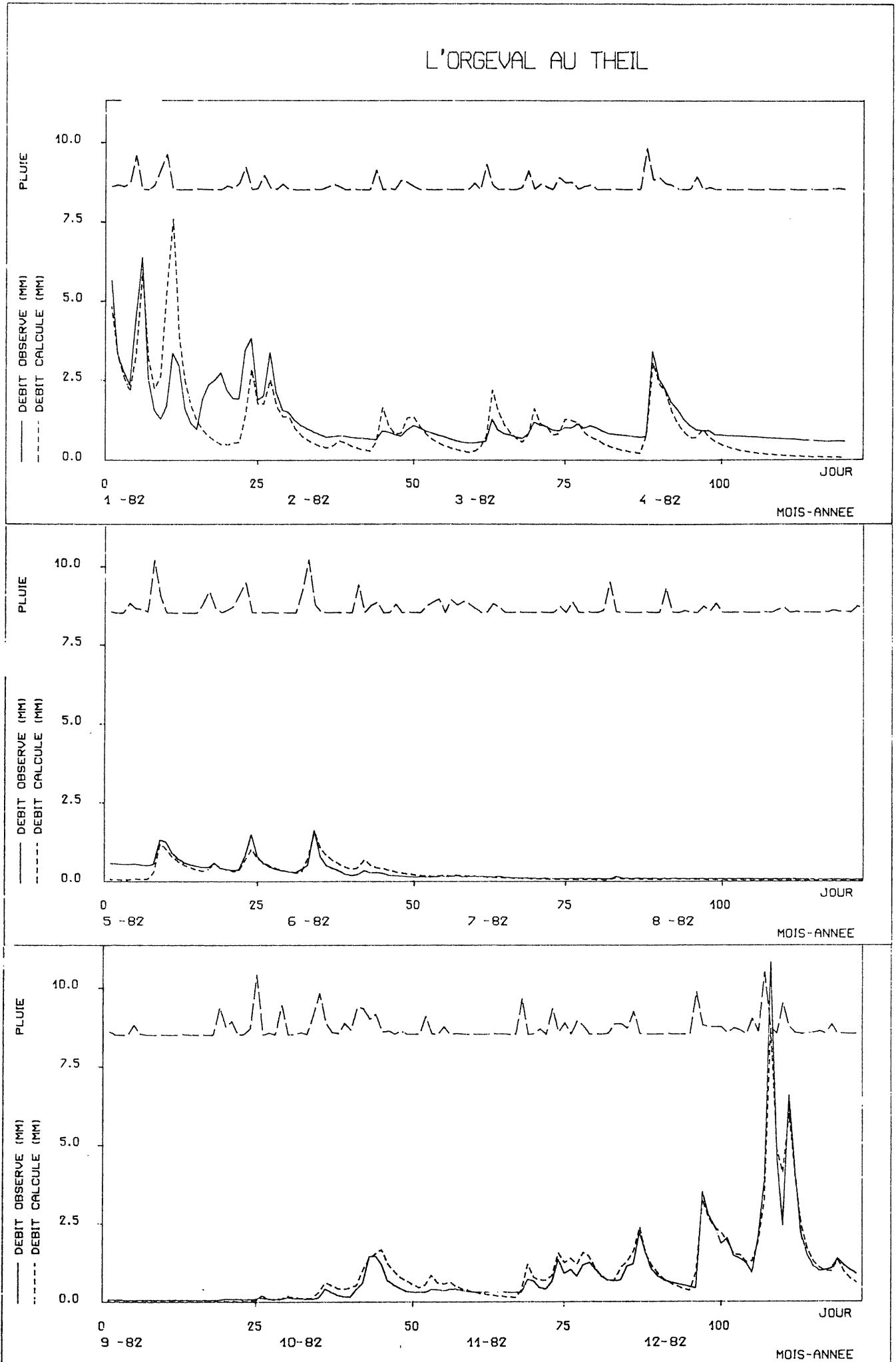


Figure 36 : Simulation de l'année 1982 par le modèle GR3.



#### 4.1.3. BASSIN VERSANT DU REAL COLLOBRIER AU PONT DE FER

C'était également la version à 8 paramètres qui a été appliquée pour comparer le modèle CREC avec les modèles GR2 et CEQUEAU dans l'étude des écoulements sur le bassin du Réal Collobrier ( BEISSON, 1985 ). Nous avons pris les paramètres obtenus dans l'étude précédente comme valeurs initiales, et nous avons calé les modèles sur la période 1977-1980. On peut voir les résultats sur le **tableau 21** .

C R E C			G R 3		
PARA-METRES	VALEURS INITIALES (LOG)	VALEURS OPTIMALES (LOG)	PARA-METRES	VALEURS INITIALES (LOG)	VALEURS OPTIMALES (LOG)
X1	2.5	5.87	A	5.0	5.62
X2	-3.2	-8.21			
X3	0.6	1.91			
X4	1.7	3.62	B	4.0	4.51
X5	1.6	2.71	C	0.5	-2.13
X6	1.3	0.62			
X7	1.7	4.64	D(*)	0.0	1.57
X8	2.1	4.95			
CRITERE DE NASH		68.9 %	CRITERE DE NASH		70.7 %
ERREUR DE BILAN		-0.5 %	ERREUR DE BILAN		11.0 %
RAPPORT DES CRUES ANNUELLES MOYENNES		92.25 %	RAPPORT DES CRUES ANNUELLES MOYENNES		94.50 %

(\*) correction soustractive des pluies.

**Tableau 21 :**

Résultats des simulations des modèles CREC et GR3 sur la période de calage 1977-1980.

Malgré une très légère différence dans les critères, les graphiques présentés par les deux modèles sont presque identiques ( **figure 37 et 38** ). On peut noter que le modèle GR3 a introduit, de façon automatique, une correction soustractive sur les pluies (sous-programme PILOT du module de calage).

Figure 37 : Simulation de l'année 1978 par le modèle CREC.

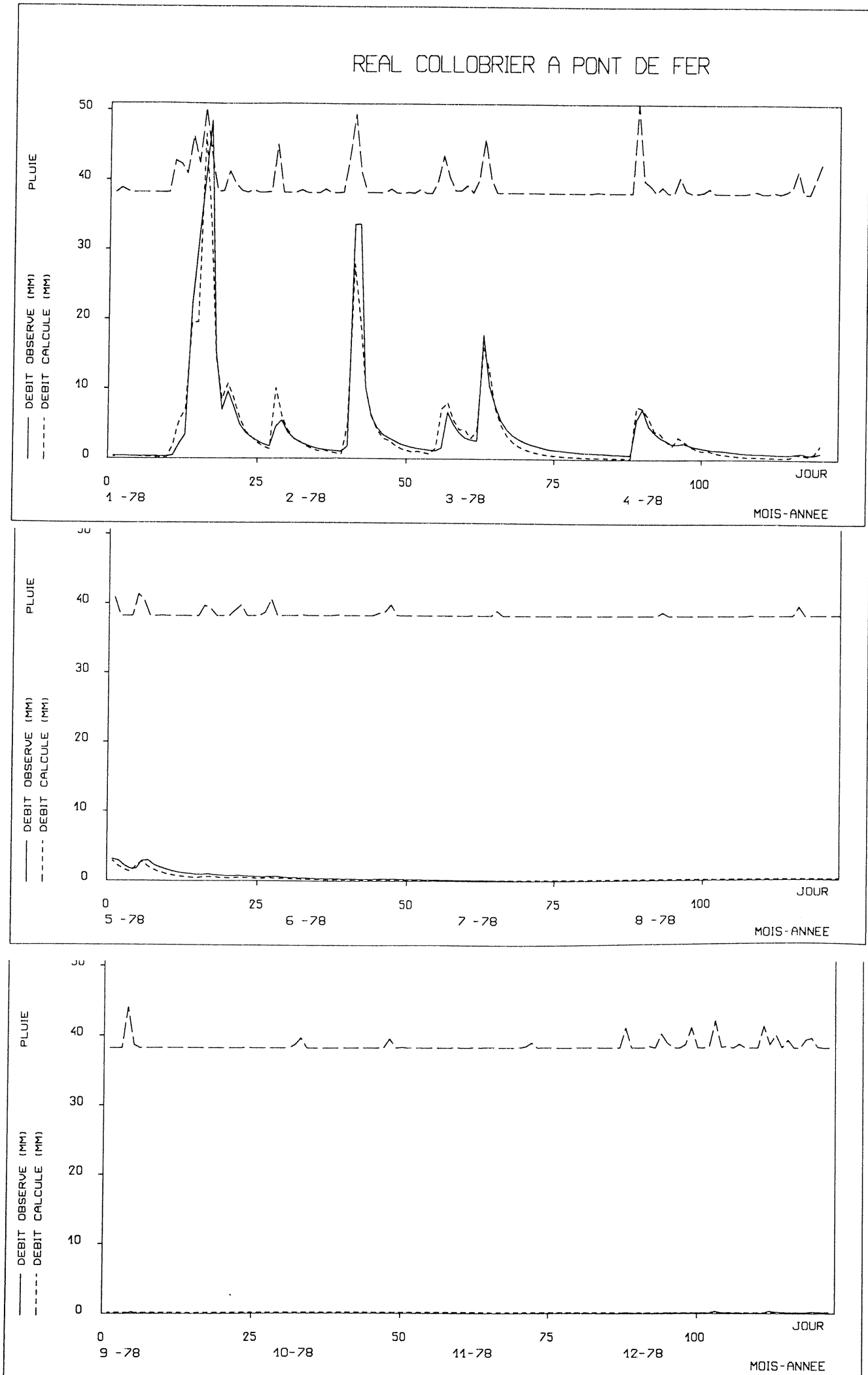
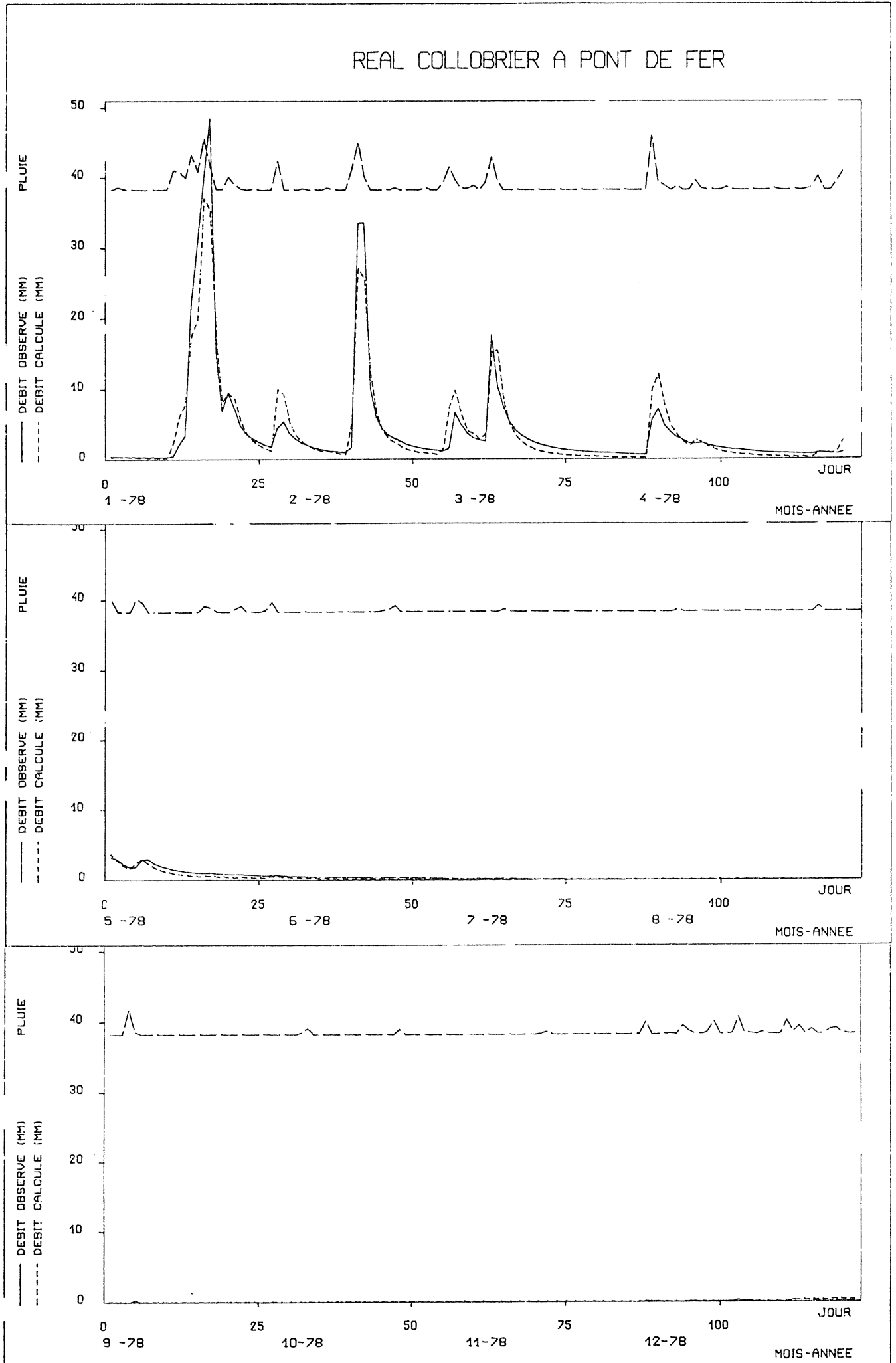


Figure 38 : Simulation de l'année 1978 par le modèle GR3.





#### 4.1.4. CONCLUSION

Le modèle GR3 s'est révélé donner des résultats aussi convenables que ceux du modèle CREC, lequel a 3 ou 4 fois plus de paramètres.

Cette étude laisse supposer que le modèle GR3 peut entrer en concurrence avec d'autres modèles plus sophistiqués. Avec sa simplicité, le modèle GR3 est paradoxalement plus général que le modèle CREC qu'il convient d'adapter au bassin que l'on étudie.

Par contre, le modèle CREC ne paraît pas donner lieu au risque de surcalage que l'on pouvait craindre a priori.

#### 4.2. AUTRES ETUDES COMPARATIVES ET APPLICATIONS SUR DES BASSINS DE PAYS ETRANGERS.

Au cours de la recherche, le modèle GR3 a aussi été comparé à d'autres modèles en utilisant des données françaises ou étrangères. Les utilisateurs ou les chercheurs qui ont procédé à ces comparaisons ont utilisé chacun une version différente de GR3, car ils ont retenu la version qui avait cours au moment de leurs travaux.

Afin d'apporter des points de vues différents sur GR3 nous citerons brièvement certaines de ces études, en particulier :

- comparaison avec le modèle OTTHYMO, utilisant les données de bassins suisses ( Dominique BEROD, 1988 )
- comparaison avec le modèle SIDRA, avec des données au niveau d'une parcelle drainée ( Marcel FAVIER, 1988 )
- comparaison avec les modèles CREC et MODGLO, dans le cadre d'une étude de sélection des critères de calage, utilisant des données de la Côte d'Ivoire ( E.SERVAT, A.DEZETTER, J.M. LAPETITE, 1989 ).
- applications sur les données de pays étrangers :

- Ile Maurice (1988)
- Algérie (1989)
- Canada (1990)
- Hollande (1990)
- Mali (1990)

- applications sur des données françaises dans le cadre d'une étude particulière :

- étude du bassin de la Sambre ( Daniel DREVED, 1989 )
- introduction de l'humidité du sol dans le modèle GR3, avec les données du bassin de l'Orgeval ( François LANDWERLIN, 1990 )
- couplage avec une modélisation de la qualité des eaux sur les bassins de la Charente ( Zhong Cai MA, 1990 )

Nous citons ici les résultats d'une de ces études :

En appliquant une version antérieure du modèle GR3 sur le bassin de l'Arbogne (Suisse), BEROD (1988) a constaté que :

- les débits simulés tendent vers zéro en période non pluvieuse au lieu de présenter un débit de base quasi-permanent
- les décrues sont mal reproduites : les décrues observées connaissent une chute rapide, alors que les décrues simulées ont un tarissement plus lent
- les débits de pointes simulés ne parviennent pas à atteindre le niveau de pointes observées.

Pour résoudre ces problèmes, BEROD a proposé l'introduction d'un débit de base fixe, et un changement de la loi de vidange.

Il est certain que la dernière version du modèle GR3 présente moins d'inconvénients. Mais, en étudiant la version proposée par BEROD, nous

pouvons constater qu'il suffit d'introduire ou de modifier un peu le modèle GR3 pour obtenir un modèle adapté à la situation hydrologique d'un bassin particulier.

#### 4.3 APPLICATION DU MODELE GR3 AUX 110 BASSINS VERSANTS ETUDIES

GR3 est calé sur chaque bassin, sur une durée de 4 ou 5 années avec une période de mise en route de une année. Dans certains cas particuliers, (RU DU FOUR à RONCHERES, période d'avant drainage et LANGELIN à BRIEC DE L'ODET, données disponibles sur moins de trois ans), nous prenons une durée de mise en route sensiblement plus courte. Le calage a été lancé de façon identique pour tous les bassins.

Pour certains bassins, il est possible que l'introduction d'un traitement de la pluie soit introduit de façon automatique par le programme (sous-programme PILOT). Dans ce cas, 2 façon de traiter la donnée pluie sont comparées, l'une étant une correction multiplicative et l'autre une diminution par soustraction d'une constante.

Les résultats des simulations sont présentées dans le **tableau 22** . Les présentations graphiques pour les 110 bassins versants figurent dans l'**annexe 8**.

Tableau 22 :

## RESULTATS DES SIMULATIONS SUR LES 110 BASSINS VERSANTS ETUDIES

N°	COD B V	COURS D'EAU	STATION DE JAUGEAGE	PERIODE	SUPER- FICIE Km <sup>2</sup>	Ln A	Ln B	Ln C	Ln D	CRIT DE NASH
1	0	L'ORGEVAL	LE THEIL	81-83	104.00	5.34	4.09	-0.63	0.00	56.9
2	1	LE VACON	BARBAS	73-77	35.00	6.18	3.60	0.59	0.00	42.2
3	2	LA MEURTH	DAMELEVI	73-77	2404.00	6.41	6.39	0.91	0.00	64.0
4	3	LA MORTAG	GERBEVIL	73-77	439.00	6.89	5.56	0.43	-0.22 m	49.1
5	4	LA VEZOUC	LUNEVILL	73-77	559.00	5.71	4.56	1.06	0.00 s	63.8
6	5	LA MEURTH	FRAIZE	73-77	69.00	5.84	8.74	0.57	0.26 m	44.3
7	6	LE RABODE	MOYENMOU	73-77	153.00	5.88	7.06	0.63	0.00	68.0
8	7	LA MEURTH	RAON L'E	74-77	727.00	5.66	6.86	0.69	0.00	66.7
9	8	LA SEINE	BAR / SE	73-77	2340.00	5.80	6.31	1.26	0.00	74.3
10	9	LE COET D	NAIZIN	83-86	11.93	5.37	7.02	-2.93	0.00	52.9
11	10	L'ORGEVAL	MELARCHE	78-82	7.00	4.76	2.36	-0.83	0.00	54.2
12	A11	RU DU FOU	RONCHERE	81-83	6.00	5.42	2.97	0.69	0.32 s	66.3
13	B11	RU DU FOU	RONCHERE	84-86	6.00	5.49	3.49	0.49	-0.05 m	38.4
14	12	RU DU FOU	PERRIAUX	82-85	2.50	5.55	3.01	-0.34	-0.15 m	54.0
15	13	R.COLLOBR	PONT DE	77-80	70.60	5.62	4.51	-2.13	1.57 s	70.7
16	14	CANNER	NEUDELAN	81-85	32.80	5.32	3.93	-1.52	0.00 m	30.3
17	15	ELVON	LEMUD	81-85	16.00	4.78	3.70	-1.71	-0.10 m	41.5
18	16	CHERISEY	VERNY	83-85	17.00	5.22	4.85	-1.05	0.18 m	49.7
19	17	ELLE	PNT-TY-N	70-74	580.00	6.83	6.88	0.00	0.00	65.1
20	18	V.VALESCU	LES BOUR	77-79	9.40	5.94	5.37	-2.74	0.00	73.2
21	19	R.D.MAURE	LES BOUR	77-79	8.60	6.08	5.36	-2.37	0.00	71.6
22	20	L'ETHELIN	CHATI./L	81-85	27.00	5.51	3.18	-0.52	0.00	58.4
23	21	LE POULAI	POULAINE	81-84	22.30	5.16	1.67	-0.89	0.40 s	45.9
24	22	LE NE	ST.FORT/	75-79	529.00	6.09	6.53	-0.84	0.00	66.5
25	23	LE LIEUTE	VICQ	83-85	71.40	6.71	5.01	-1.50	-0.13 m	27.8
26	24	LEZERT	LA BANCA	73-77	26.50	6.21	5.35	-0.30	0.00	56.4
27	25	L.P.BARGU	MONTCUQ	77-81	62.00	4.97	5.36	-0.66	0.00	63.5
28	26	CHAPOUILL	CHASSIGN	78-82	67.00	5.81	6.31	-1.14	0.14 m	37.1
29	27	LE COURME	BOISSONN	69-73	16.20	5.64	2.53	-0.57	-0.50 s	34.2
30	28	L'OSSE	MIELAN-C	71-75	10.20	5.46	3.35	-1.07	0.00	41.8
31	29	LE LAGOIN	ARESSY	73-77	76.00	6.78	4.81	-0.28	0.00	55.8
32	30	LA COUZE	LE SOULI	82-86	64.00	5.40	4.62	-0.67	0.00	55.9
33	31	LA BRAME	LA PERRI	84-86	235.00	5.46	5.58	-0.85	0.00	41.4
34	32	L'ARDOUR	FORGEVER	83-86	131.00	6.09	6.66	-0.42	0.00	61.4
35	33	MICHELBAH	MICHELBA	78-82	3.05	4.92	3.72	-1.28	0.00	51.8
36	34	MORTAGNE	STE. HEL	77-81	100.00	5.87	7.23	-0.13	0.00	51.4
37	35	ANDON	CLERY-GR	79-81	61.00	4.11	5.91	-0.29	0.00	46.7
38	36	BORSIN	SAVIGNY	79-81	7.00	5.26	4.36	-0.68	0.00	51.8
39	37	VERNISSON	NOGENT/V	80-84	67.50	5.90	4.62	0.28	-0.24 m	67.2
40	38	PUISEAUX	ST. HILA	81-85	94.00	6.19	5.83	0.20	0.00	61.4
41	39	BIESME	LE CLAON	81-83	71.20	6.15	4.98	-0.58	0.00	65.0
42	40	COINON	MAINVILL	80-84	45.30	5.58	1.92	-0.50	1.16 s	53.0
43	41	CHARENTON	FERRIER.	78-82	257.00	6.58	6.93	-0.07	0.06 m	36.7
44	42	GRANCHAIN	GRANCHAI	84-87	11.60	5.27	0.98	-0.21	1.55 s	32.6
45	43	SOULEUVRE	CARVILLE	83-87	115.00	5.62	5.45	0.16	0.00	60.8
46	44	JARLOT	L'HERMIT	81-85	44.00	5.73	8.16	-0.48	0.00	67.9
47	45	LANGELIN	BRIEC DE	82-84	6.00	4.97	7.84	-1.34	0.00	59.2
48	46	COET-ORGA	KERDEC E	78-82	47.70	5.87	8.32	-0.45	0.00	65.7
49	47	ARON	BERNADAI	84-88	118.80	5.32	3.90	0.18	-0.27 m	71.1
50	48	AFF SUPER	PAIMPONT	77-81	30.20	5.88	5.19	-0.06	0.00	65.0
51	49	ARZON	CHOMELIX	81-84	75.80	6.36	6.82	0.14	0.22 m	37.8
52	50	TEYSSONNE	LA NOAIL	81-85	23.00	5.57	5.71	0.26	0.00	47.5

53	51	DRAGNE	VANDENES	79-83	115.00	5.27	4.96	0.00	0.00		68.8
54	52	IXEURE	LA FERME	80-84	115.00	5.72	4.84	-0.16	0.00		64.3
55	53	ANDOUX	MARINGUE	80-84	60.00	5.40	4.96	-0.27	-0.68	s	63.9
56	54	NERE	AUBIGNY/	80-84	79.00	6.11	5.52	-0.22	0.00		60.1
57	55	OLIVET	BEAUMONT	77-81	75.50	5.92	2.78	0.00	0.00		53.1
58	56	RHONE	NOGENT L	83-87	79.00	6.62	8.39	0.00	0.01	m	29.3
59	57	ESCOTAIS	ST.PATER	81-83	67.00	5.98	3.70	-0.27	0.00		61.1
60	58	DONNEAU	MESANGER	83-87	79.00	5.32	2.77	0.00	-0.15	s	46.3
61	59	DIVATTE	LANDEMON	93-87	60.00	5.26	3.36	-0.43	0.00		41.3
62	60	FALLERON	FALLLERO	80-84	31.00	5.74	3.16	-2.42	0.00		53.6
63	61	CHAMBON	DONIA	83-87	61.10	6.12	4.74	-0.86	0.00		53.5
64	62	VOLP	STE. CRO	83-87	91.00	6.31	3.46	-0.80	0.05	m	42.5
65	63	BANDIAT	FEUILLAD	78-82	333.00	6.86	7.12	-0.29	0.00		58.0
66	64	EYRAUD ?	BITAREL	78-80	73.50	5.76	4.44	-0.30	0.00		69.3
67	65	BAHUS	EUGENIE	82-86	48.60	5.36	3.68	-0.76	0.32	s	69.4
68	66	MENDIALCU	HASPAREN	77-81	17.90	6.42	3.64	-1.25	0.00		52.7
69	67	AUME	LONGRE	75-77	90.00	6.36	5.58	-0.77	0.00		64.0
70	68	BREUCHIN	PROISELI	77-80	123.00	5.71	5.91	0.00	0.00		54.0
71	69	OGNON	FOURGUEN	81-84	73.50	4.86	4.99	-0.58	0.00		55.9
72	70	RAHIN	PLANCHER	81-83	33.00	4.77	5.00	-0.93	0.00		54.3
73	71	ROSEMONT	ROSEMONT	77-80	7.48	5.83	6.10	-0.63	0.00		57.9
74	72	RUPT	DUNG	77-81	42.20	5.29	5.10	-0.44	0.00		50.7
75	73	FURIEUSE	SALINS-L	82-86	43.00	5.13	4.60	-1.11	0.00		52.1
76	74	BRENNE	SELLIERE	77-81	37.00	5.50	3.58	-1.07	0.00		50.3
77	75	VEYLE	LENT	80-84	34.00	6.16	5.40	-0.65	0.00		61.4
78	76	REDON	MARGENCE	77-81	30.50	6.43	6.02	-0.77	-0.20	m	47.5
79	77	IRE	DOUSSARD	81-85	27.10	6.98	5.73	-2.00	0.08	m	18.8
80	78	GLUEYRE	TISONECH	85-87	71.00	5.66	6.01	-0.65	0.00		54.5
81	79	JABRON	SOUSPIER	78-82	85.00	6.95	6.38	-0.52	0.12	m	52.0
82	80	MONDONY	AMELIE-L	82-86	32.30	5.68	4.77	-1.77	0.17	m	33.4
83	81	BATAILLER	LA VERRE	81-83	9.40	6.94	1.78	-1.48	0.10	m	31.6
84	82	MOLE	LE DESTRE	83-87	44.40	4.75	5.07	-1.29	0.19	m	26.2
85	83	VERNE	LES CABR	77-79	38.00	4.80	6.57	-15.18	0.00	s	46.8
86	84	GARDE	GRIMAUD	83-87	18.00	7.04	5.16	-0.75	0.28	m	47.4
87	85	PETROSO	PONT DE	79-83	53.30	5.42	4.44	-1.26	-0.16	s	34.6
88	86	HELPE MIN	ETROEUNG	81-84	175.00	5.61	4.68	-0.09	0.00		35.2
89	87	HELPE MIN	MAROILLE	81-85	275.00	5.42	4.12	0.28	0.00		41.3
90	88	HELPE MAJ	LIESSIES	81-85	187.00	5.36	5.05	0.81	0.00		44.9
91	89	HELPE MAJ	TAISNIER	81-85	320.00	5.27	5.30	0.84	0.00		51.4
92	90	SAMBRE	MAUBEUGE	84-87	1075.00	5.47	5.37	0.28	0.00		42.7
93	91	QUEFFLEUT	LESQUIPO	81-85	87.60	6.22	7.48	-0.64	-0.19	m	56.6
94	92	LA COUSAN	AUBREVIL	81-83	166.00	5.15	6.06	-0.62	0.00		67.4
95	93	CHAUSSEY	MANNEVIL	83-87	52.00	8.14	10.18	-0.29	-0.04	m	30.8
96	94	SEUGNE	PONS	79-83	881.60	6.47	6.48	0.50	0.00		66.2
97	95	SAULDRE	SALBRIS	82-86	1200.00	5.88	5.39	0.90	0.00		67.0
98	96	CELE	LES AMIS	79-83	1190.00	5.20	4.88	0.32	0.00		67.1
99	97	ARGENS	LES ARCS	83-87	1730.00	6.18	6.89	0.17	0.00		46.7
100	98	CHARENTE	SURIS	80-83	110.00	5.28	4.10	-0.58	0.00		64.9
101	99	CHARENTE	ST SAVIO	75-79	492.00	5.92	4.31	0.34	0.00		65.9
102	A0	CHARENTE	CHENON	79-83	1071.00	6.06	6.05	0.51	0.00		71.2
103	A1	BONNIEURE	VILLEBET	76-80	203.20	6.34	6.18	0.59	0.00		67.2
104	A2	TARDOIRE	MONTBRON	78-82	389.00	6.05	5.78	0.00	0.00		59.3
105	A3	TARDOIRE	COULGENS	78-82	1200.00	5.91	5.06	0.69	-0.45	m	66.4
106	A4	CHARENTE	LUXE	77-79	3000.00	6.70	6.86	0.87	0.00		62.9
107	A5	AUME	LES MARA	79-83	452.00	5.59	6.46	0.73	-0.15	m	80.8
108	A6	CHARENTE	CHALONNE	78-82	3750.00	6.29	6.40	1.16	0.00		76.6
109	A7	TREZENCE	TOURNAY	76-79	75.00	5.68	6.58	-0.36	0.00		60.5
110	A8	BOUTONNE	LE VERT	80-83	523.00	5.30	6.70	0.48	0.00		75.3

A, B et C : paramètres du modèle optimisés

D : traitement de la pluie de façon automatique :  
m : correction multiplicative  
s : traitement soustractif

#### 4.3.1. REMARQUES SUR LES RESULTATS DE CERTAINS BASSINS

D'après l'ensemble des résultats, nous pouvons faire les commentaires suivants sur certains bassins :

a) Il y a 35 bassins ( soit 32% ) pour lesquels les pluies sont corrigées de façon automatique, parmi lesquels 25 font l'objet d'une correction multiplicative et 10 exigent une correction par soustraction.

En vérifiant les critères correspondant à ces 35 bassins, nous nous sommes aperçus qu'il y a 14 bassins ayant un critère de NASH inférieur à 40%. Il est vraisemblable que cela provienne de données douteuses ou de caractéristiques très particulières (karst, neige...). Car en examinant les graphiques il ne semble pas y avoir de relation logique entre les pluies et les écoulements. Par exemple, dans le cas du bassin de l'ARZON à CHOMELIX : malgré la correction multiplicative de pluies de 1.25, la valeur critère n'atteint que 37.8%. D'après la **figure 39** , il est clair que les débits ne correspondent pas aux pluies.

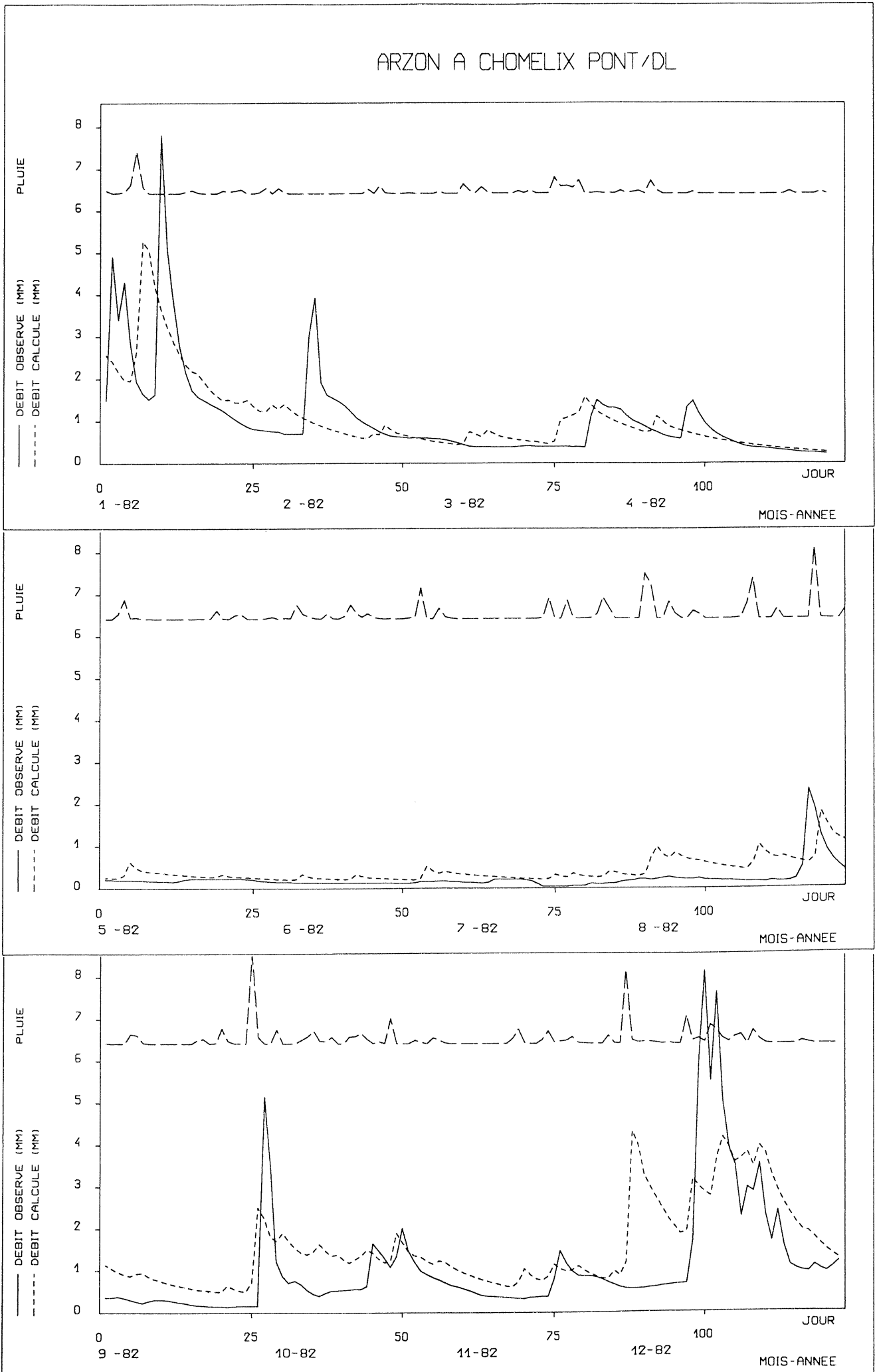
b) Pour les bassins avec écoulement intermittent, il y a une amélioration de la valeur critère de 0.2% pour COINON, et une détérioration de 0.3% pour GRANCHAIN. Ces valeurs sont assez faibles et ne modifient pas la qualité graphique des simulations.

c) Un changement des valeurs de paramètres se produit à la suite de l'installation d'un réseau de drainage dans un des bassins. C'est le cas du bassin RU DU FOUR à RONCHERES, où B augmente de 20 à 33 (mm), et C diminue de 2 à 1.6 jours après drainage. Le paramètre A n'est pas affecté par l'aménagement.

d) La simulation du modèle sur certains bassins donne des paramètres très forts ou très faibles. On constate un paramètre A > 3000 mm, certains paramètres B < 10 mm, et d'autres > 4000 mm.

Il est possible que ces valeurs extrêmes correspondent à une mauvaise adéquation du modèle aux bassins correspondants ou encore, à un biais trop important dans les données.

Figure 39 : Simulation du bassin de l'ARZON à CHOMELIX.



#### 4.3.2. ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS

Lors du calage du modèle, si l'on part d'une valeur initiale d'un paramètre très éloignée de la réalité cela peut conduire à un optimum secondaire. Dans notre étude, nous avons introduit une valeur a priori la même pour tous les bassins.

Avec les résultats obtenus, nous pouvons améliorer l'estimation de ces valeurs initiales des paramètres en utilisant les valeurs médianes des paramètres obtenus.

Il est aussi intéressant de savoir les caractéristiques statistiques des performances du modèle sous la forme de la distribution des critères de NASH observés sur les bassins étudiés.

##### 4.3.2.1. Statistiques sur les paramètres

Un programme statistique permet de calculer les statistiques habituelles, comme : moyenne, médiane, mode...etc.

Le tableau 23 représente les résultats pour les paramètres A, B, C.

On pourrait utiliser les valeurs médianes pour initialiser les paramètres du modèle. Les transformées logarithmiques sont :

$$\ln A = 5.7$$

$$\ln B = 5.2$$

$$\ln C = -0.3$$

Les figures 40 , 41 et 42 confirment que l'histogramme des fréquences des paramètres suit la loi normale.



**Tableau 23 : STATISTIQUES DES PARAMETRES**

VARIABLE	Ln A	Ln B	Ln C
Taille de l'échantillon	110	110	110
Moyenne	5.78	5.20	- 0.51
Mediane	5.72	5.18	- 0.35
Mode	5.27	4.96	0
Moyenne géométrique	5.75	4.91	
Variance	0.38	2.54	2.69
Ecart - type	0.62	1.59	1.64
Erreur standard	0.06	0.15	0.16
Minimum	4.11	0.98	- 15.18
Maximum	8.14	10.18	1.26
Ecart maximum	4.03	9.2	16.44
Premier quartile	5.36	4.12	- 0.83
Troisième quartile	6.16	6.31	0.2
Intervalle interquartile	0.8	2.19	1.03

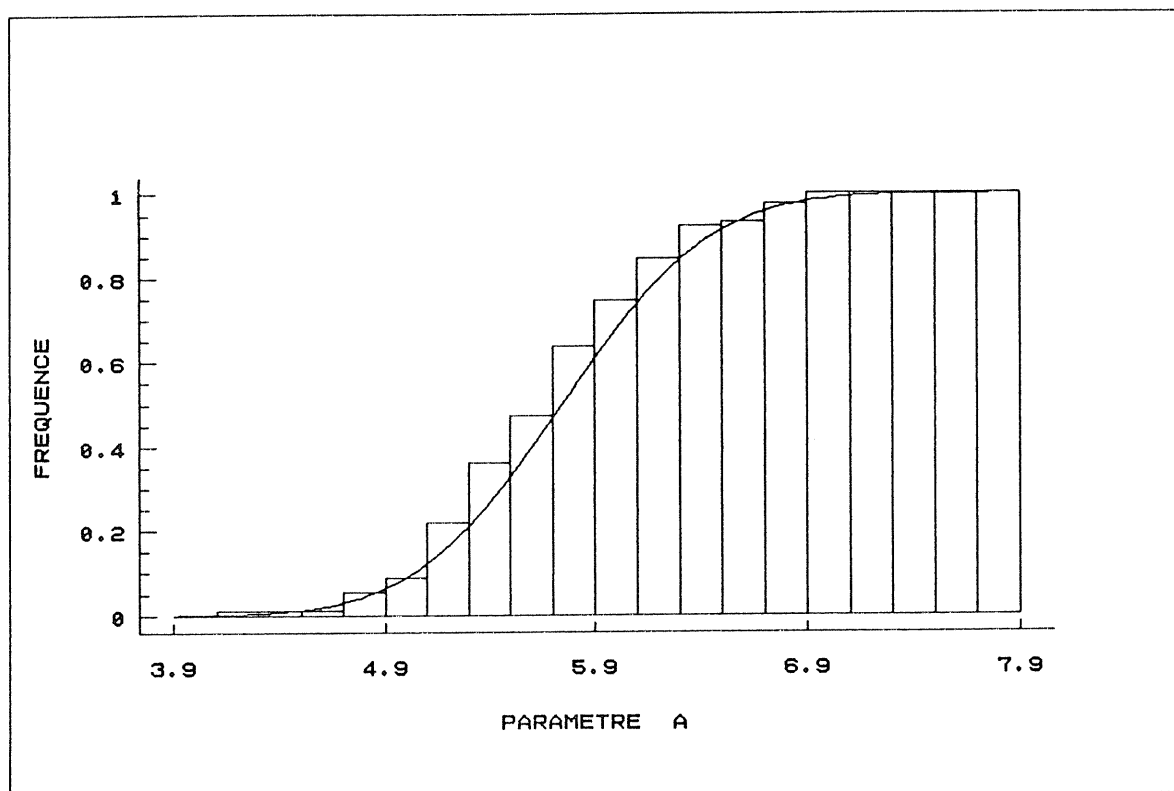
**Figure 40 : Histogramme de fréquence des paramètres A.**

Figure 41 : Histogramme de fréquence des paramètres B.

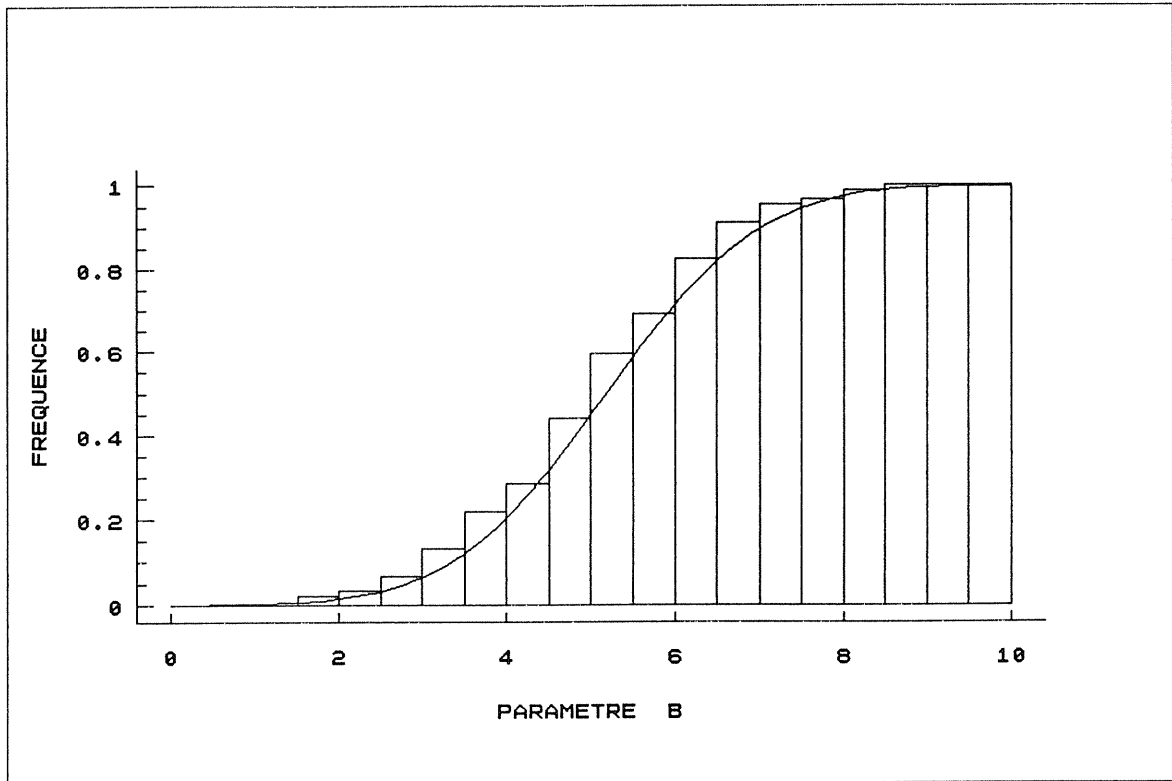
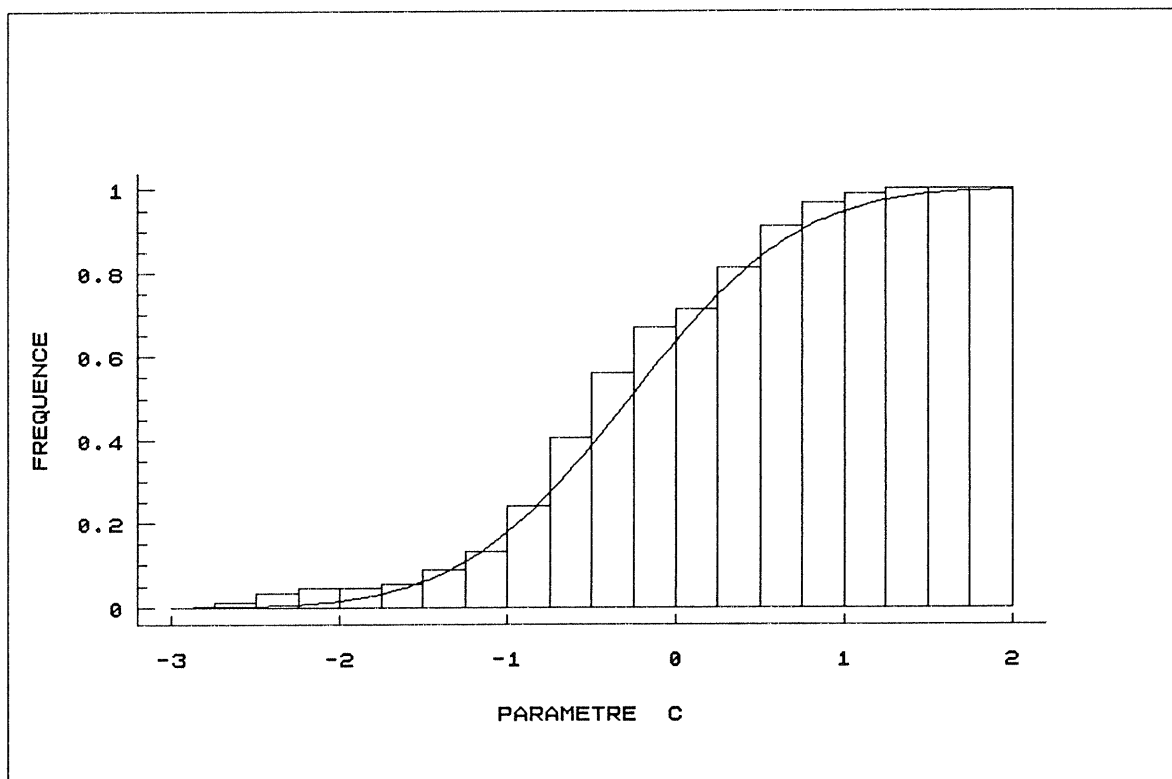


Figure 42 : Histogramme de fréquence des paramètres C.

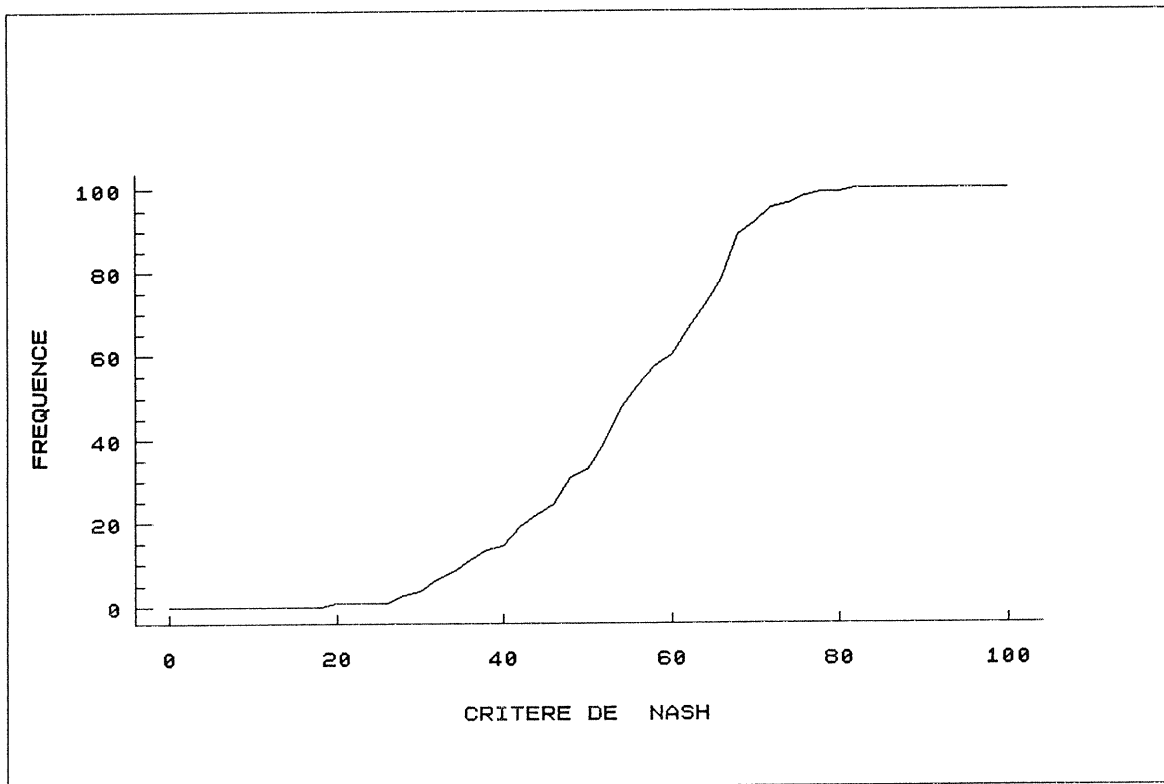


#### 4.3.2.2. Statistique sur les critères de NASH

La figure 43 montrent la distribution du critère de NASH sur les 110 bassins versants. Nous avons pour moyenne des critères 54% avec une erreur standard de 13% . Il y a 17% des bassins qui ont des critères <40% et 8% des bassins ayant des critères >70% .

Eu égard à la simplicité du modèle, ces résultats sont assez satisfaisants. Avec une petite adaptation du modèle GR3 à tel bassin particulier on peut assez facilement obtenir un modèle encore très simple donnant d'excellents résultats.

Figure 43 : Distribution des critères de NASH.



Taille de l'échantillon	: 110
Médiane	: 55.15
Moyenne	: 54.41
Ecart type	: 12.90

#### 4.4. UTILISATION SUR LES BASSINS NON JAUGES

Nous avons prévu de donner dans notre recherche une place importante à l'analyse des possibilités de transposer le modèle GR3 à des bassins versants non jaugés. Pour ce faire, il faut pouvoir expliquer les paramètres A, B et C soit au moyen de relations entre eux-mêmes, ou de corrélations avec d'autres variables classiques.

Si de telles relations pouvaient être mises en évidence, on pourrait reconstituer une série de débits en transformant une série de pluies sans calage préalable et donc sans disposer d'une série de débits observés. Si une relation précise apparaissait entre les paramètres cela permettrait de plus une réduction du nombre de ces paramètres. C'est ce que nous allons examiner ci-après.

##### 4.4.1. YA-T-IL DES RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES A, B, ET C ?

Nous allons utiliser la méthode des régressions linéaire ou multiple. Rappelons que le rapport de Student de chaque coefficient doit être supérieur à 2.7 pour qu'une variable ait un effet significatif au seuil de 1%, lorsque le nombre de degrés de liberté est supérieur à 50 ( MICHEL, 1989 ). Pour établir ces relations, il est préférable de ne conserver que les bassins où le modèle semble être très correct. En plus des deux bassins ayant des paramètres douteux, nous allons en éliminer en raison du faible niveau de la fonction critère (<40%). Le nombre de degrés de liberté sera 91 si on a deux variables explicatives.

##### 4.4.1.1. Paramètre A

Nous cherchons à expliquer le paramètres A en fonction de B ou/et de C. Nous utilisons les logarithmes des paramètres. Avec deux variables explicatives, nous obtenons :

$$\ln A = a_1 + a_2 + \ln B + a_3 \ln C + e_A$$

avec :  $e_A$  = erreur du modèle  
 $a_i$  = coefficient de régression

Cette régression donne les résultats suivants :

- coefficient de détermination = 0.12
- erreur standard = 0.52

	coefficient de régression	rapport de Student
a1	5.20	24.4
a2	0.11	2.83
a3	0.09	1.37

Le paramètre C n'a pas d'influence significative sur A ( rapport de Student = 1.37 ). Par contre, on peut expliquer peut-être le paramètre A en fonction uniquement de B, selon la relation :

$$\ln A = a_1 + a_2 \ln B + e_A$$

On obtient :

- coefficient de détermination = 0.10
- erreur standard = 0.53

	coefficient de régression	rapport de Student
a1	5.12	24.9
a2	0.12	3.16

Il est certain qu'il y a une liaison entre paramètre A et B, ( rapport de Student >2.7 ). Mais, cette liaison est très faible, puisqu'on explique à peine 10% de la variance de A; ( voir aussi **figure 44** ).

Il est clair que la liaison entre A, B, et C, est faible. Néanmoins nous allons passer en revue les deux autres régressions.

## 4.4.1.2. Paramètre B

Nous posons :

$$\ln B = a_1 + a_2 \ln A + a_3 \ln C + e_B$$

et nous obtenons les résultats suivants :

- coefficient de détermination = 0.12
- erreur standard = 1.37

	coefficient de régression	rapport de Student
a1	0.99	0.65
a2	0.75	2.83
a3	0.26	1.46

Comme dans l'étude du paramètre A, le coefficient du paramètre C à un rapport de Student très faible (<1.5) .

Eliminons C du modèle :

$$\ln B = a_1 + a_2 \ln A + e_B$$

et on obtient :

- coefficient de détermination = 0.10
- erreur standard = 1.37

	coefficient de régression	rapport de Student
a1	0.48	0.32
a2	0.82	3.16

La liaison (A,B), a donc été établie dans les deux sens. Mais sa faiblesse exclut toute utilisation à des fins de réduction du nombre des paramètres.

( voir figure 45 ).

## 4.4.1.3. Paramètre C

D'après les deux études précédentes, il est prévisible qu'aucune expression satisfaisante ne sera obtenue pour C. En effet, avec :

$$\ln C = a_1 + a_2 \ln A + a_3 \ln B + e_C$$

on obtient :

	coefficient de régression	rapport de Student
a1	- 2.06	2.31
a2	0.22	1.37
a3	0.09	1.46

avec :

- coefficient de détermination = 0.06
- erreur standard = 0.81

( voir figure 46 ).

Figure 44 : Paramètre A en fonction de B.

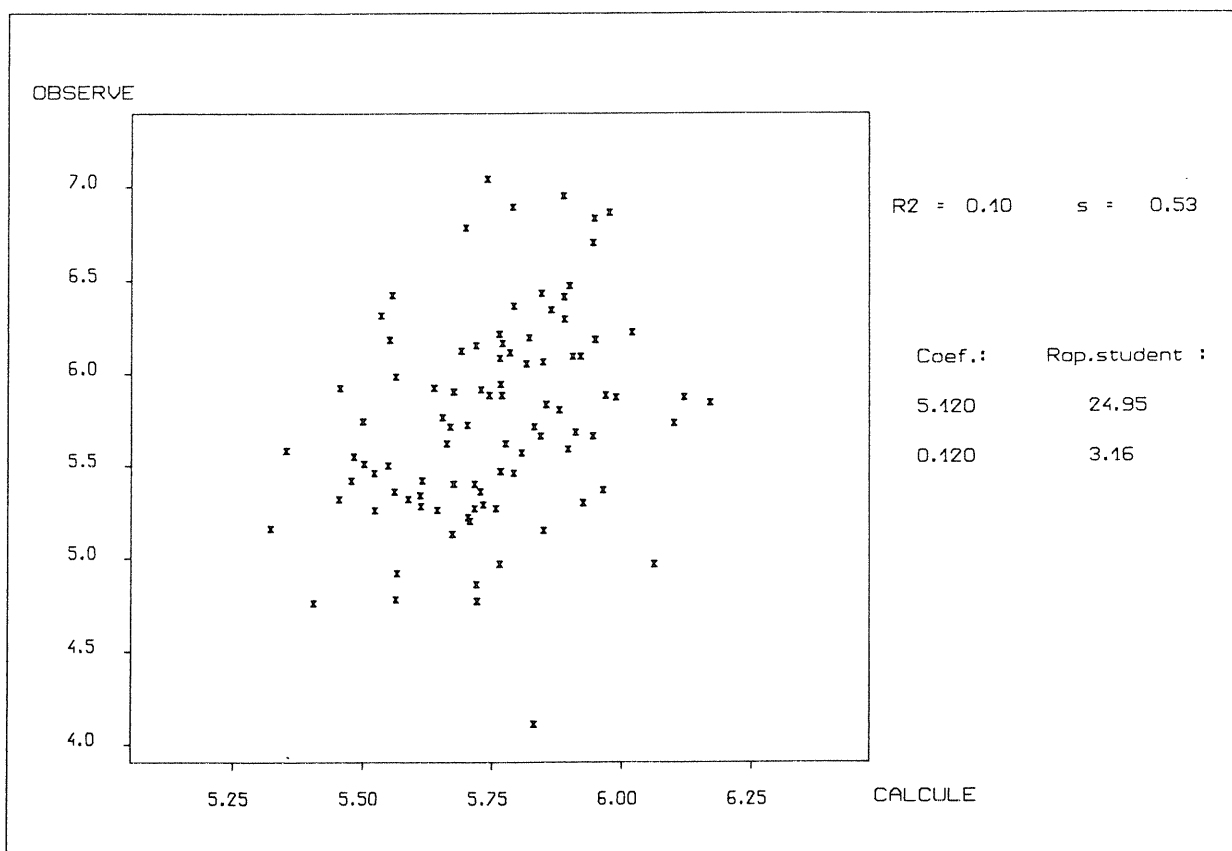


Figure 45 : Paramètre B en fonction de A.

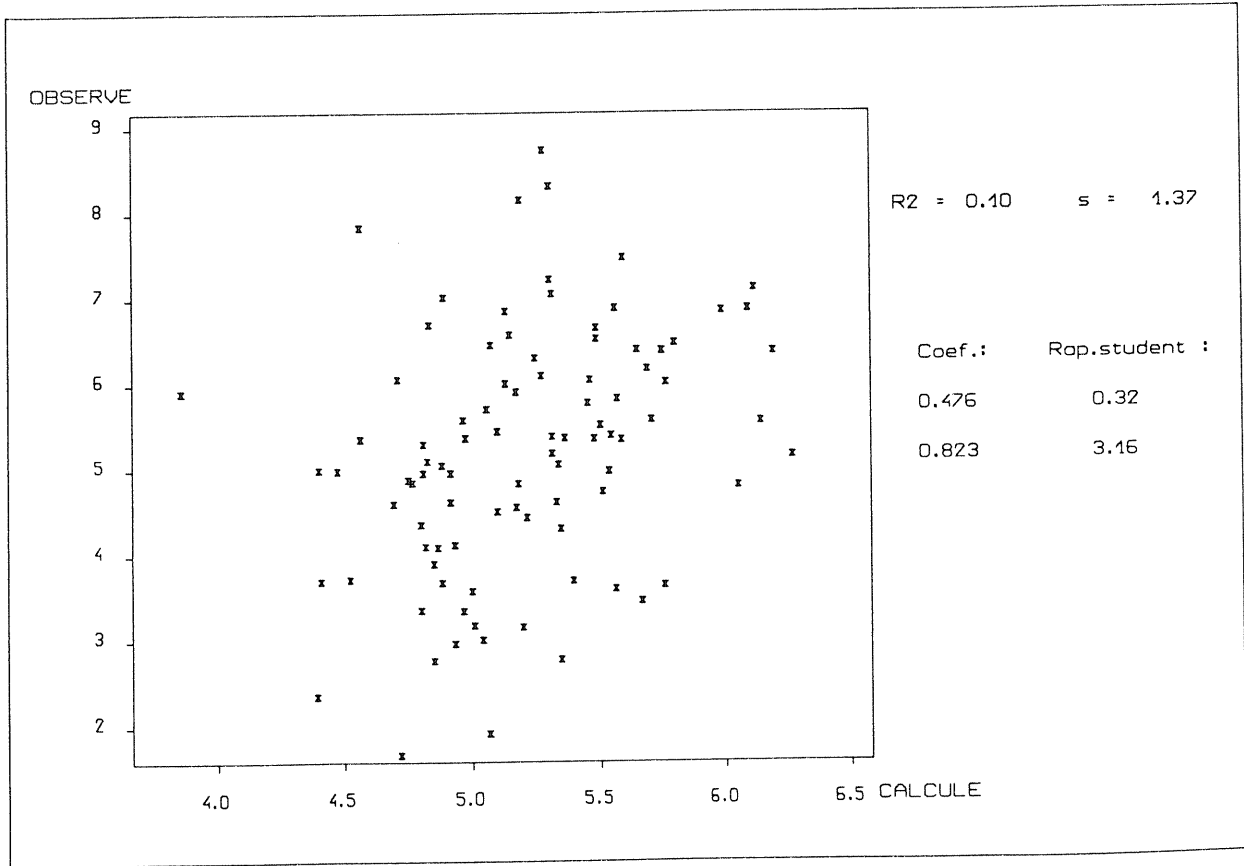
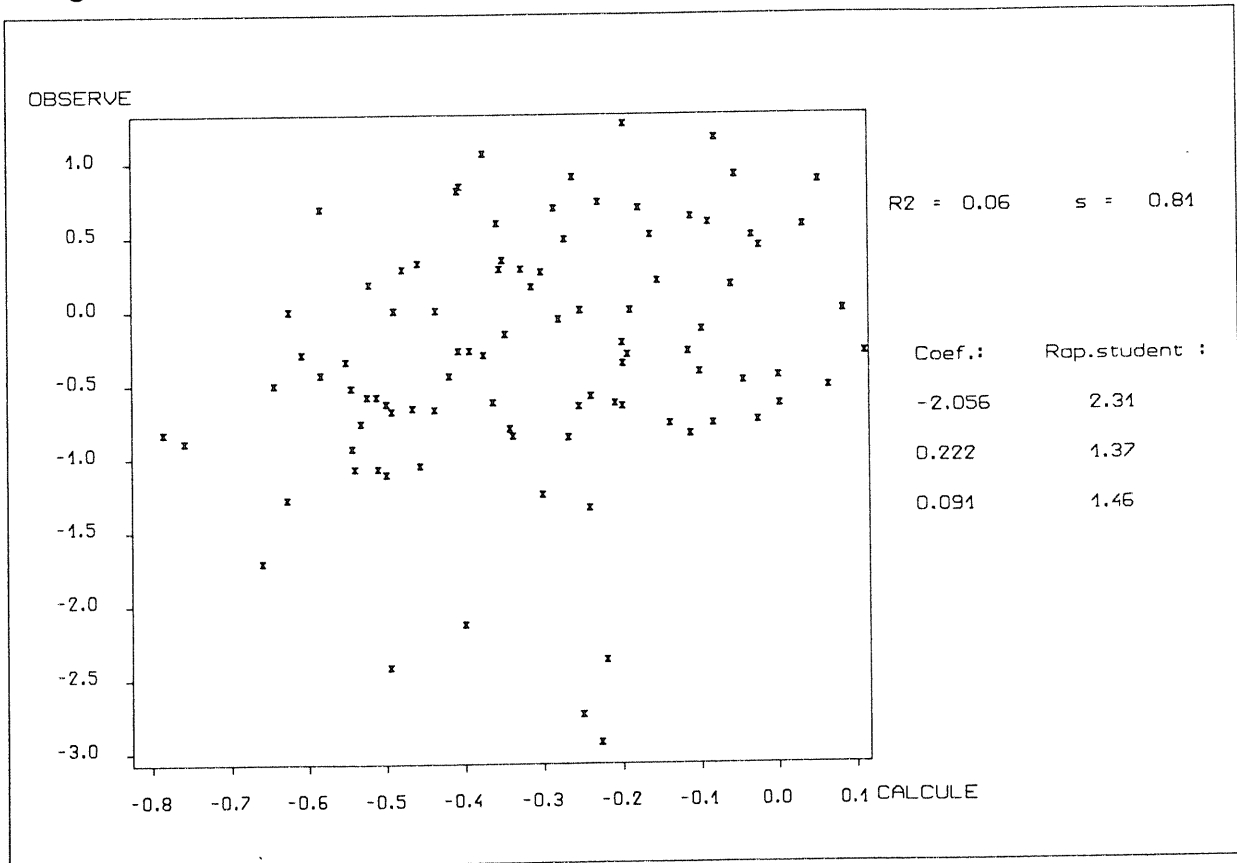


Figure 46 : Paramètre C en fonction de A et B.





#### 4.4.1.4. Conclusion

L'essai d'explication d'un paramètre en fonction des deux autres, nous a montré que :

- il y a une très légère liaison entre les paramètres A et B. Mais, la faiblesse de cette liaison interdit toute exploitation
- le paramètre C n'est absolument pas lié à A ou à B.

Le modèle GR3 n'est donc pas réductible à un modèle encore plus simple. Nous continuons donc notre étude en essayant d'expliquer les paramètres A, B, et C en fonction des caractéristiques physiques disponibles sur les bassins versants étudiés et au préalable en observant d'éventuels regroupements géographiques.

#### 4.4.2. TENTATIVES DE REGIONALISATION DES PARAMETRES DU MODELE GR3.

Une première démarche dans l'analyse des paramètres A, B, C est de porter les valeurs de ces paramètres sur une carte où figure l'ensemble des bassins versants étudiés. Grâce à cette carte, on pourra déceler d'éventuelles régions homogènes.

Il est commode de simplifier la présentation de cette carte, en regroupant les valeurs dans 5 classes.

##### 4.4.2.1. Paramètre A

Par l'aide d'un graphique de fréquences ( **figure 47** ), les paramètres A variant de 60 à 1150 (mm) ont été répartis dans les 5 classes suivantes :

- |    |               |      |
|----|---------------|------|
| 1) | $\leq 200$    | (mm) |
| 2) | ) 200 , 250 ) |      |
| 3) | ) 250 , 350 ) |      |
| 4) | ) 350 , 500 ) |      |
| 5) | > 500         |      |

La figure 48 relative au paramètre A, montre l'absence de regroupement géographique de bassins d'une même classe. Il n'y a que très peu de bassins voisins ayant des paramètres de la même classe. On ne voit pas apparaître de partition du territoire qui permettrait d'étendre à toute une région les valeurs de A constatées en quelques points de la région.

#### 4.4.2.2. Paramètre B

Les paramètres B qui varient de 2.50 à 6250 (mm), ont été répartis dans les cinq classes suivantes :

- 1)  $\leq 40$  (mm)
- 2) ) 40 , 125 )
- 3) ) 125 , 250 )
- 4) ) 250 , 650 )
- 5)  $> 650$

D'après la figure 49 , la répartition des différents paramètres B semble très aléatoire. Notons cependant une appartenance préférentielle à la classe la plus élevée pour ceux qui se trouvent dans l'Ouest de la région Bretagne. Malgré tout il est aussi difficile de délimiter des régions un peu homogènes relativement au paramètre B.

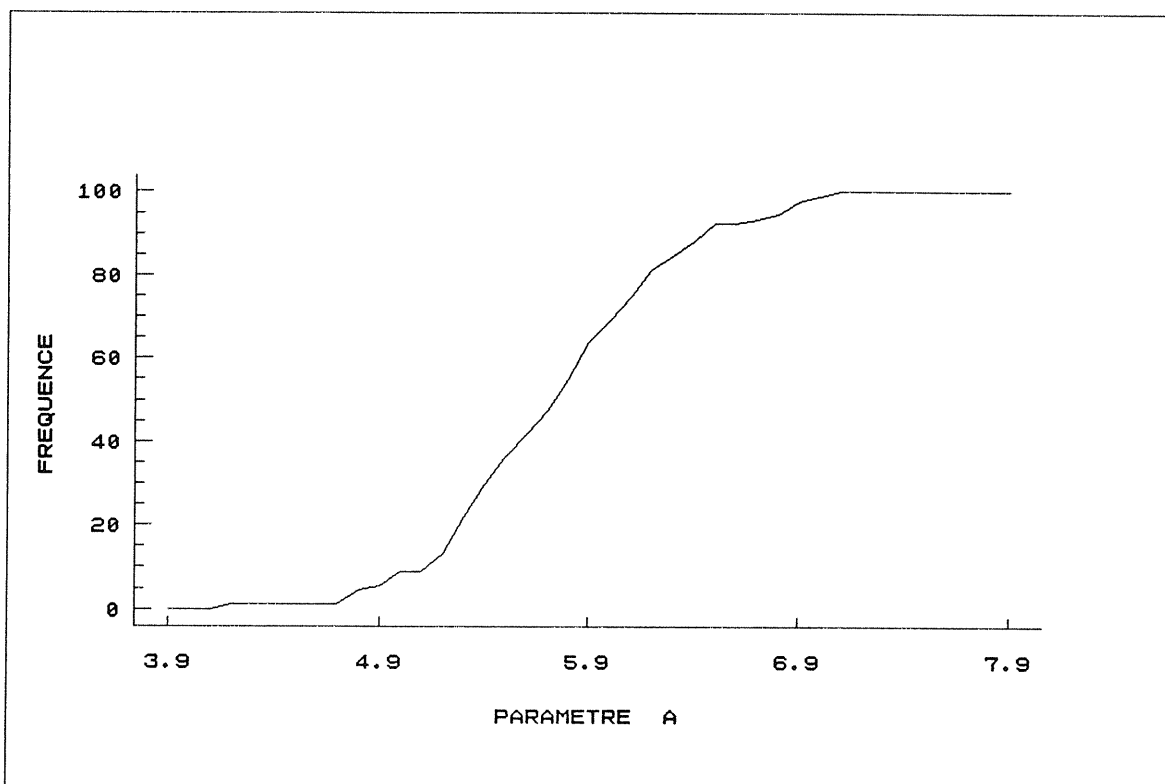
#### 4.4.2.3. Paramètre C

Les paramètres C qui varient de 0.05 à 3.50 (jours) ont été répartis dans les classes suivantes :

- 1)  $\leq 0.40$  (jours)
- 2) ) 0.40 , 0.55 )
- 3) ) 0.55 , 0.85 )
- 4) ) 0.85 , 1.40 )
- 5)  $> 1.40$

La présentation de la **figure 50** montre comme pour les paramètres précédents la diversité régionale, sauf peut-être dans certaines régions comme la Charente, les Vosges et le Var. Mais une telle régionalisation est beaucoup trop partielle pour être exploitée opérationnellement.

Figure 47 : Distribution des paramètres A.



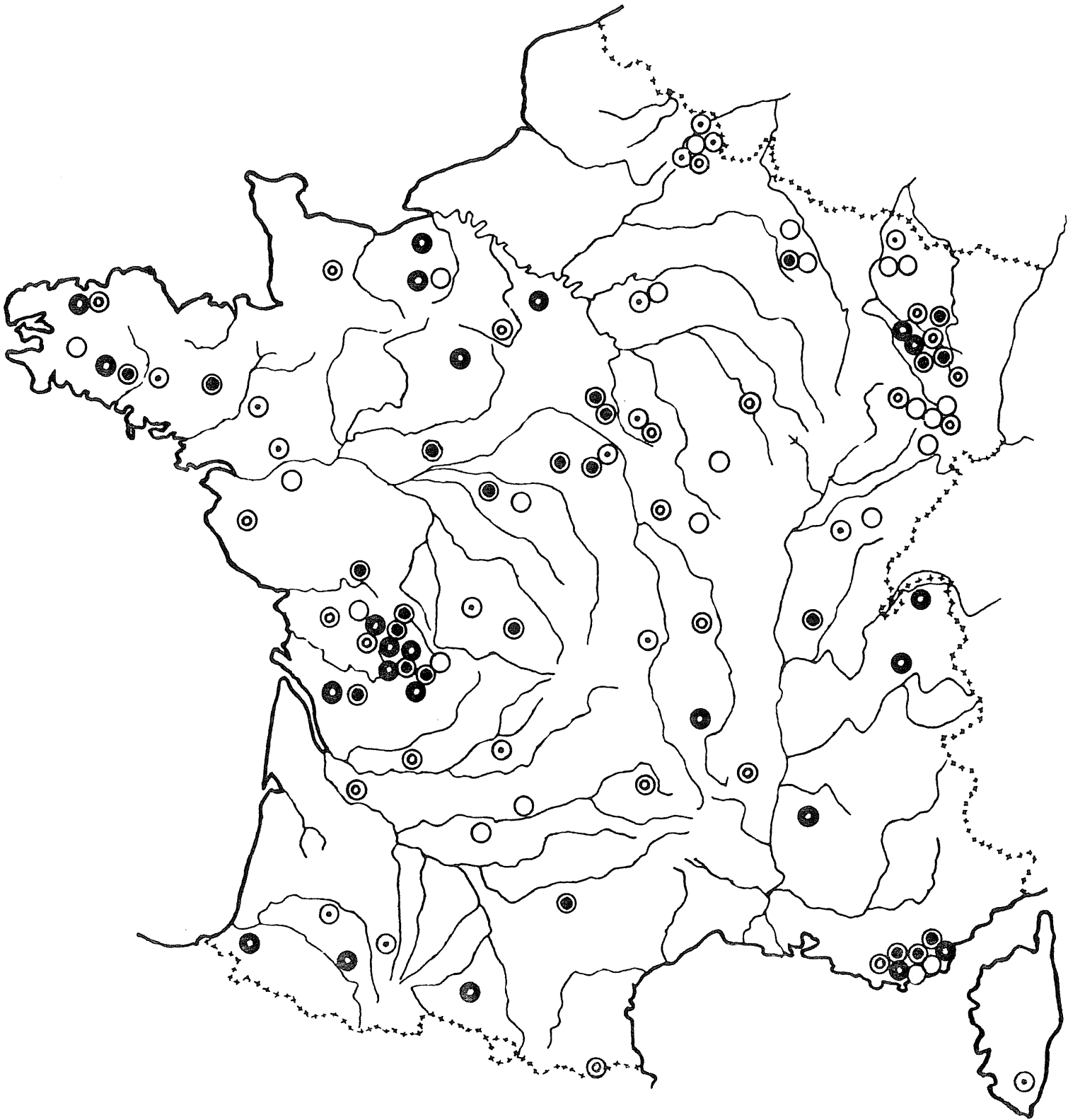


Figure 48 : Paramètre A. (mm)

○	< 200
◉	) 200 , 250 )
⊙	) 250 , 350 )
●	) 350 , 500 )
●	> 500

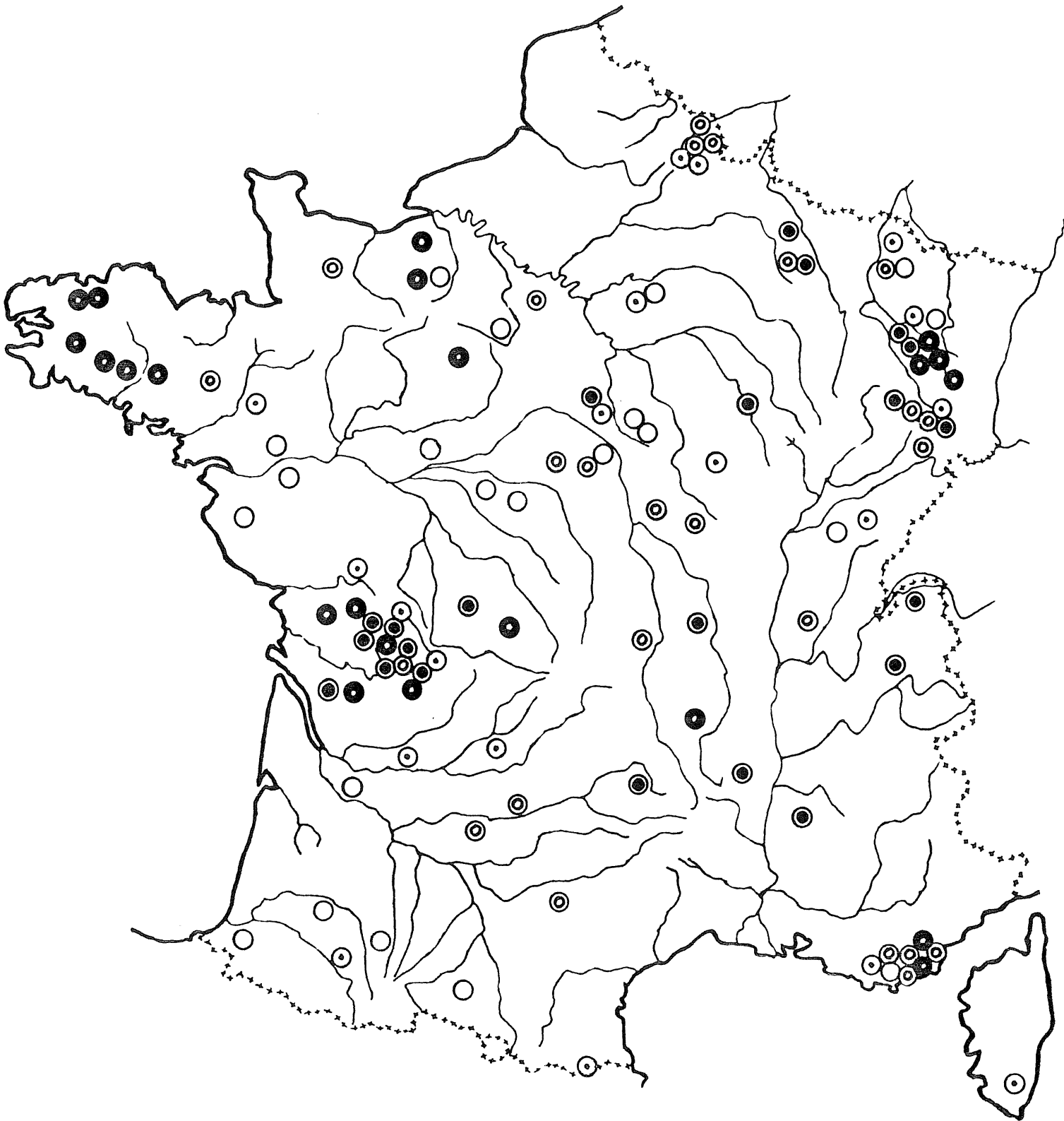


Figure 49 : Paramètre B. (mm)

○	< 40
◉	) 40 , 125 )
⊙	) 125 , 250 )
●	) 250 , 650 )
●	> 650

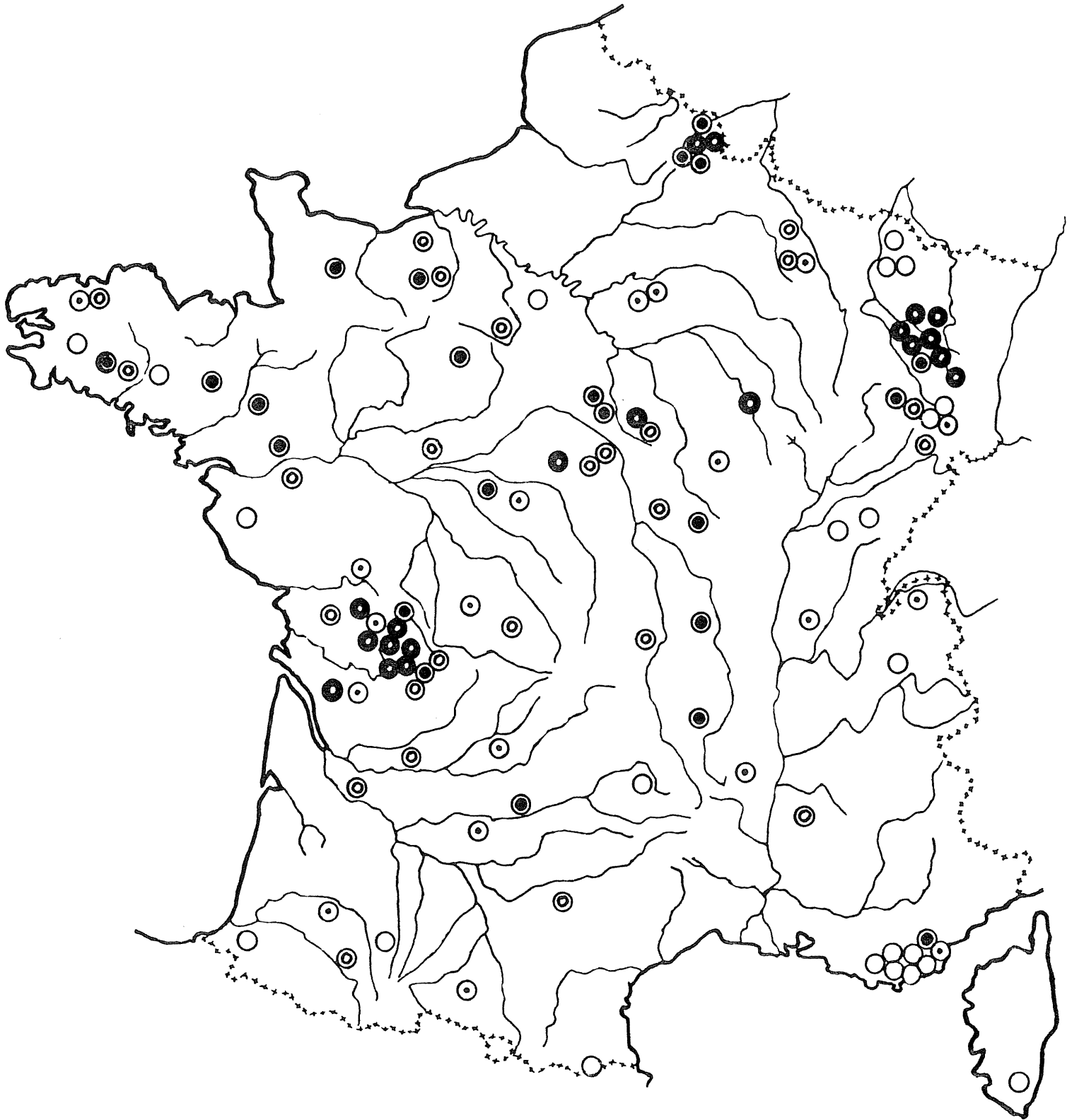


Figure 50 : Paramètre C. (jour)

○	< 0.40
◉	) 0.40 , 0.55 )
⊙	) 0.55 , 0.85 )
●	) 0.85 , 1.40 )
●	> 1.40

#### 4.4.2.4. Conclusion

Les trois cartes précédentes montrent la grande variabilité spatiale des paramètres du modèle GR3. Aucune région n'a de bassin ayant des paramètres proches l'un de l'autre, sauf peut-être l'Ouest de la Bretagne qui apparaît assez homogène relativement au paramètre B.

Il reste à voir les possibilités d'explications des paramètres A, B, C, avec des caractéristiques physiques des bassins versants.

#### 4.4.3. *ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE EN FONCTION DES VARIABLES MORPHOCLIMATIQUES.*

Le modèle GR3, comme dit dans le **chapitre 1.3** , est un modèle conceptuel et donc essentiellement "empirique" ( MICHEL, 1989 ). Si le modèle physique analyse et quantifie les phénomènes physiques se produisant dans un bassin versant, le modèle empirique propose un schéma sans lien direct avec les processus mesurables. Cependant, on peut très bien rechercher a posteriori des liaisons entre les paramètres du modèle conceptuel et certaines caractéristiques physiques.

Dans les lignes qui suivent, nous allons essayer de répondre à cette question. En raison de différences dans la disponibilité de données morphoclimatiques ( **annexe 9** ), nous procéderons en 2 étapes :

1) Etude sur 93 bassins versants ( **chap. 4.4.1** ) des liaisons avec les caractéristiques suivantes :

- a) SF = superficie du bassin (Km<sup>2</sup>)
- b) PJ = pluie journalière de fréquence décennale (mm)
- c) PA = pluie annuelle moyenne (mm)
- d) TA = température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C)

2) Etude sur 39 bassins des liaisons avec, outre les 4 variables précédentes, les caractéristiques suivantes :

- e) IG = indice global de pente
- f) LS = longueur totale de thalwegs inscrits dans le paysage
- g) NS =  $N1/SF$  = indice torrentialité  
( N1 = nombre de cours d'eau ordre 1 )
- h) SB = pourcentage de surface boisée.

Ces données lorsqu'elles ont été disponibles ont été extraites des documents suivants :

- Synthèse Nationale sur les crues des petits bassins versants  
Fascicule 2 : La Méthode SOCOSE (janvier, 1980)  
Fascicule 3 : La Méthode CRUPEDIX (juillet, 1980)
- Crues et Assainissement  
Analyse des pluies de 1 à 10 jours, sur 300 postes métropolitains  
(juillet 1979)
- Monographie n°91 de la Météorologie Nationale.  
Valeur moyenne des hauteurs de précipitations en France, période  
1951-1970 (janvier 1974).
- Atlas climatique de France.

Nous établirons une régression d'un paramètre du modèle en fonction d'autres variables : SF, PJ, PA et TA, ainsi que IG, LS, NS et SB.

Nous éliminerons chaque fois les variables explicatives ayant des rapports de Student faibles, pour arriver à une régression ne comportant que des rapports de Student  $> 2.7$ .

#### 4.4.3.1. Paramètre A

Les résultats concernant les 93 bassins versants sont présentés dans le **tableau 24** . Le **tableau 25** représente les résultats sur les 39 bassins.



Avec 93 bassins étudiés, la régression de A en fonction de l'ensemble de variables explicatives SF, PJ, PA et TA montre de faibles rapports de Student pour PJ et PA. La meilleure régression pour A est obtenue avec SF et TA.

L'étude sur 39 bassins, exploitant jusqu'à 8 variables explicatives, nous a conduit à une régression de A en fonction uniquement de TA donnant le meilleur rapport de Student.

En comparant les deux résultats, nous décidons finalement de retenir la première régression, c'est-à-dire A en fonction de SF et TA (voir figure 51).

On obtient :

$$A = 0.55 (SF)^{0.1} (TA)^{2.3}$$

avec : - erreur standard = \* : 1.6  
- coefficient de détermination = 0.25

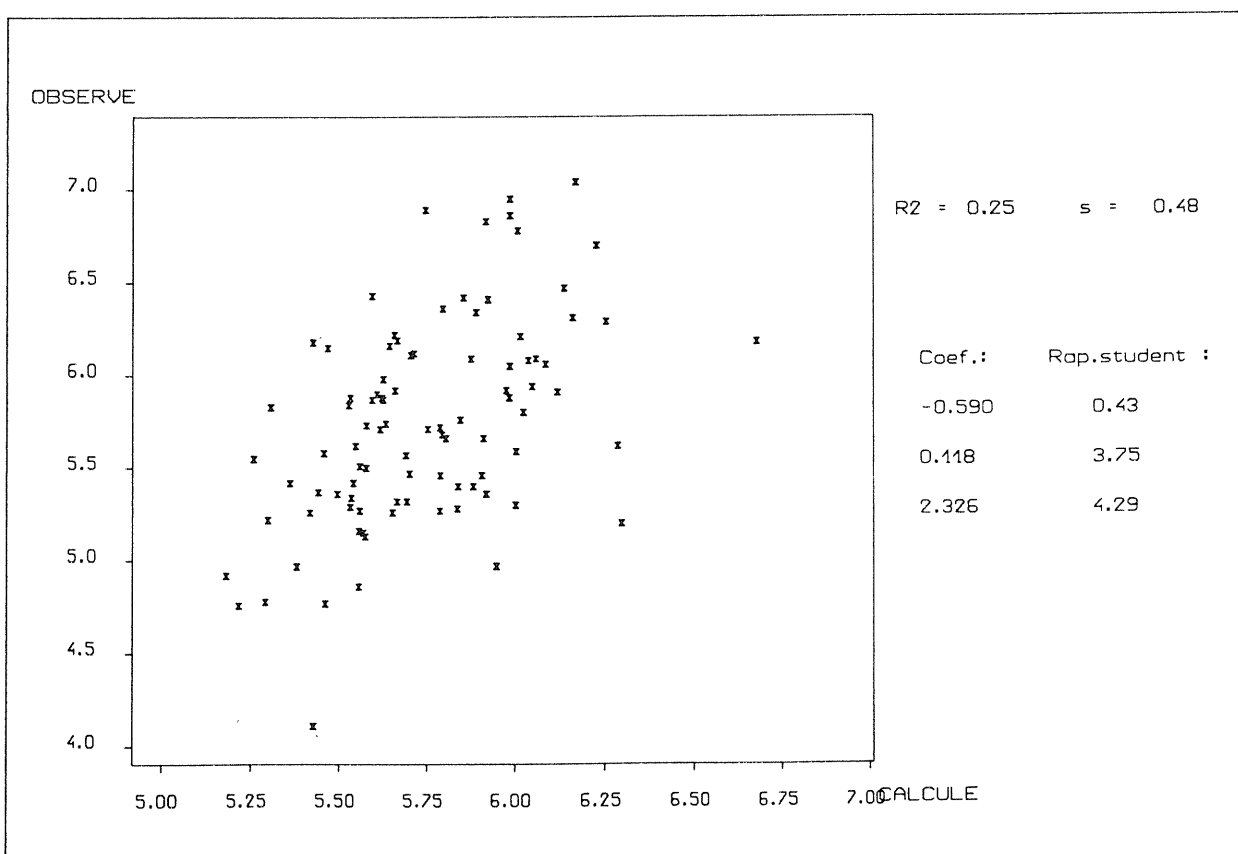
Formule de Régression	Coeff. de Détermin.	Erreur Standard	Coeff. de Régression	Rapport de Student
$\ln A = a_1 + a_2 \ln SF + a_3 \ln PJ + a_4 \ln PA + a_5 \ln TA$	0.26	0.49	- 0.86 0.12 0.04 0.06 2.20	0.40 3.59 0.15 0.24 2.78
$\ln A = a_1 + a_2 \ln SF + a_3 \ln PA + a_4 \ln TA$	0.26	0.48	- 1.06 0.12 0.08 2.28	0.62 3.73 0.47 4.14
$\ln A = a_1 + a_2 \ln SF + a_3 \ln TA$	0.25	0.48	- 0.59 0.12 2.33	0.43 3.75 4.29
$\ln A = a_1 + a_2 \ln SF$	0.10	0.53	5.25 0.11	32.20 3.19
$\ln A = a_1 + a_2 \ln TA$	0.14	0.51	0.26 2.20	0.18 3.80

**Tableau 24** : Résultats d'étude du paramètre A sur 93 bassins versants.

Formule de Régression	Coeff. de Détermin.	Erreur Standard	Coeff. de Régression	Rapport de Student
$\ln A = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PJ +$ $a_4 \ln PA +$ $a_5 \ln TA +$ $a_6 \ln IG +$ $a_7 \ln LS +$ $a_8 \ln NS +$ $a_9 \ln SB$	0.31	0.57	- 0.32 0.14 0.15 - 0.17 2.33 - 0.03 0.01 0.09 0.07	0.07 0.19 0.27 0.32 1.76 0.15 0.01 0.21 0.48
$\ln A = a_1 +$ $a_2 \ln PA +$ $a_3 \ln TA +$ $a_4 \ln SB$	0.25	0.55	0.92 - 0.25 2.45 0.11	0.35 0.90 2.99 1.06
$\ln A = a_1 +$ $a_2 \ln TA +$ $a_3 \ln SB$	0.23	0.55	- 0.59 2.41 0.09	0.29 2.95 0.86
$\ln A = a_1 +$ $a_2 \ln TA$	0.22	0.54	- 0.69 2.56	0.34 3.21
$\ln A = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln TA$	0.29	0.53	- 2.10 0.17 2.87	0.99 1.75 3.61

**Tableau 25** : Résultats d'étude du paramètre A sur 39 bassins versants.

**Figure 51** : Régression de A en fonction de SF et TA.



#### 4.4.3.2. Paramètre B

Les résultats pour le paramètre B sont présentés dans le **tableau 26** ( 93 bassins ) et le **tableau 27** ( 39 bassins ).

Il y a une très grande différence de résultats entre les deux échantillons. Aucune relation significative n'est obtenue avec l'échantillon de 39 bassins. Toutes les régressions donnent des rapports de Student inférieurs à 2.

L'échantillon des 93 bassins nous permet d'établir une régression sur SF et PA ( voir **figure 52** ) :

$$B = \frac{(SF)^{0.3} (PA)^{1.6}}{1800}$$

avec : - erreur standard = \* : 3.5  
 - coefficient de détermination = 0,25

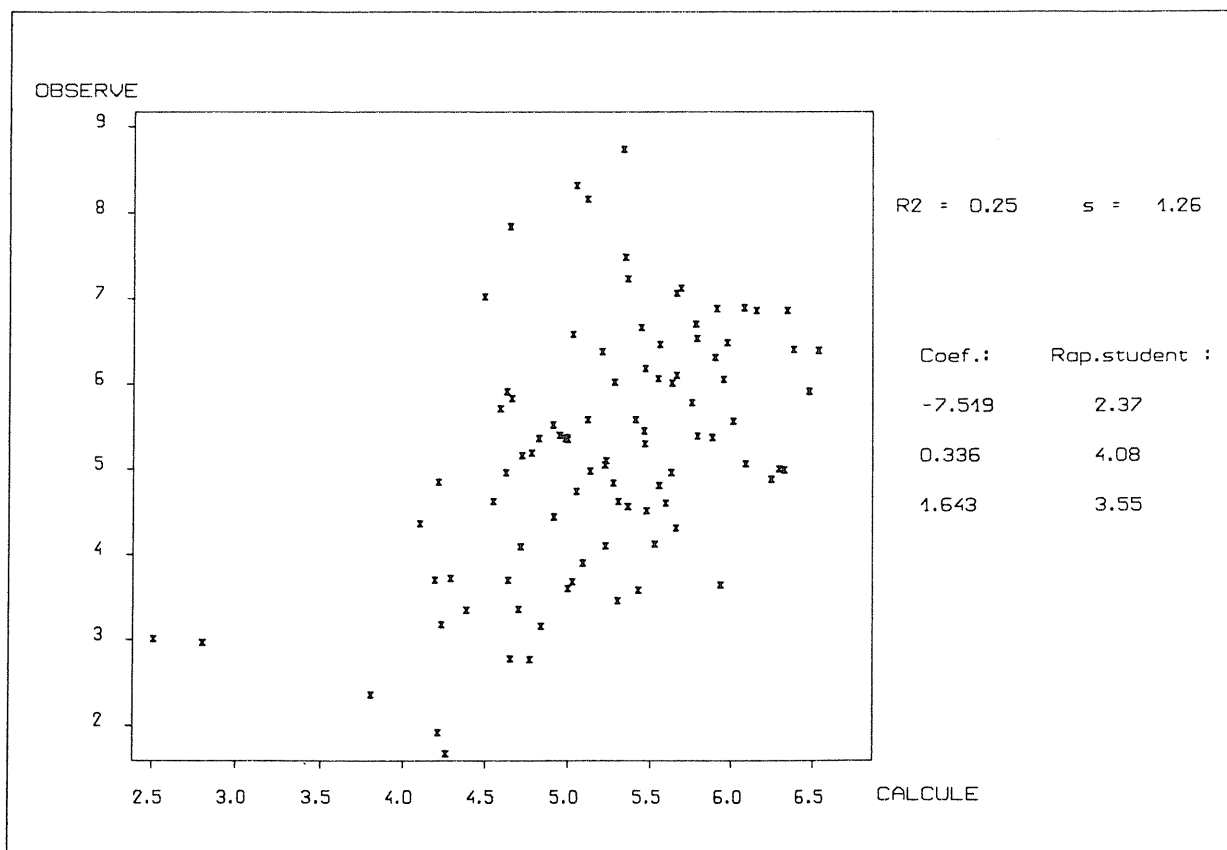
Formule de Régression	Coeff. de Détermin.	Erreur Standard	Coeff. de Régression	Rapport de Student
$\ln B = a_1 + a_2 \ln SF + a_3 \ln PJ + a_4 \ln PA + a_5 \ln TA$	0.25	1.28	- 8.01 0.33 - 0.16 1.74 0.20	1.40 3.79 0.20 2.64 0.09
$\ln B = a_1 + a_2 \ln SF + a_3 \ln PJ + a_4 \ln PA$	0.25	1.27	- 7.56 0.33 - 0.11 1.72	2.36 3.88 0.19 2.87
$\ln B = a_1 + a_2 \ln SF + a_3 \ln PA$	0.25	1.26	- 7.52 0.34 1.64	2.37 4.08 3.55
$\ln B = a_1 + a_2 \ln SF$	0.14	1.34	3.68 0.34	8.83 3.87
$\ln B = a_1 + a_2 \ln PA$	0.11	1.37	- 6.11 1.66	1.79 3.31

**Tableau 26** : Résultats d'étude du paramètre B sur 93 bassins versants.

Formule de Régression	Coeff. de Détermin.	Erreur Standard	Coeff. de Régression	Rapport de Student
$\ln B = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PJ +$ $a_4 \ln PA +$ $a_5 \ln TA +$ $a_6 \ln IG +$ $a_7 \ln LS +$ $a_8 \ln NS +$ $a_9 \ln SB$	0.14	1.35	3.97 0.05 0.52 0.12 - 1.38 0.38 0.21 - 0.43 - 0.13	0.37 0.03 0.39 0.09 0.44 0.94 0.11 0.41 0.38
$\ln B = a_1 +$ $a_2 \ln TA +$ $a_3 \ln IG +$ $a_4 \ln NS$	0.11	1.27	6.22 - 0.79 0.35 - 0.31	1.25 0.39 1.82 1.02
$\ln B = a_1 +$ $a_2 \ln IG +$ $a_3 \ln NS$	0.10	1.26	4.29 0.33 - 0.34	8.19 1.80 1.18
$\ln B = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PA$	0.08	1.27	- 3.23 0.10 1.14	0.69 0.38 1.79

**Tableau 27** : Résultats d'étude du paramètre B sur 39 bassins versants.

**Figure 52** : Régression de B en fonction de SF et PA.



#### 4.4.3.3. Paramètre C

Les tableaux 28 et 29 représentent les résultats pour le paramètre C respectivement sur 93 et 39 bassins.

Nous avons retenu la régression avec comme variables explicatives SF, PA et TA (voir figure 53) :

$$C = \frac{3500 (SF)^{0.3}}{(PA)^{0.6} (TA)^{2.4}}$$

avec : - erreur standard = \* : 1.7  
- coefficient de détermination = 0,58

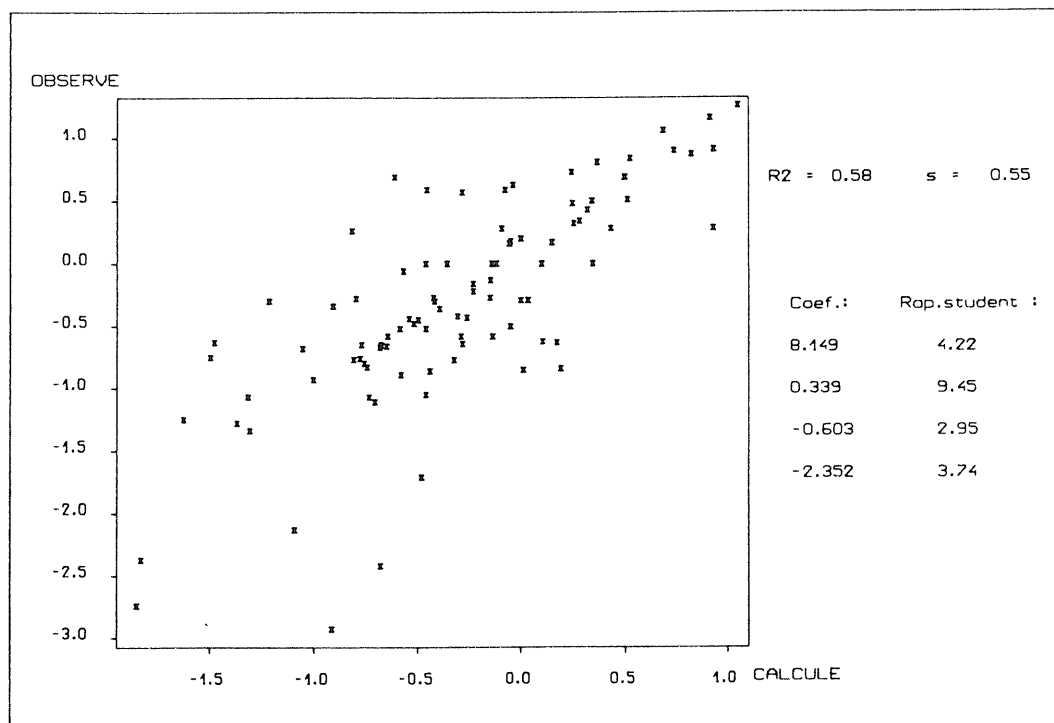
Formule de Régression	Coeff. de Détermin.	Erreur Standard	Coeff. de Régression	Rapport de Student
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PJ +$ $a_4 \ln PA +$ $a_5 \ln TA$	0.59	0.55	10.50 0.36 0.52 - 0.91 - 3.34	4.31 9.57 1.56 3.22 3.75
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PA +$ $a_4 \ln TA$	0.58	0.55	8.15 0.34 - 0.60 - 2.35	4.22 9.45 2.95 3.74
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PA$	0.51	0.59	3.10 0.35 - 0.73	2.10 9.08 3.39
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln TA$	0.53	0.57	4.81 0.34 - 2.66	2.95 9.02 4.12

**Tableau 28** : Résultats d'étude du paramètre C sur 93 bassins versants.

Formule de Régression	Coeff. de Détermin.	Erreur Standard	Coeff. de Régression	Rapport de Student
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PJ +$ $a_4 \ln PA +$ $a_5 \ln TA +$ $a_6 \ln IG +$ $a_7 \ln LS +$ $a_8 \ln NS +$ $a_9 \ln SB$	0.60	0.46	9.41 1.23 0.31 - 0.64 - 2.89 - 0.06 - 1.03 0.33 0.03	2.53 2.00 0.67 1.44 2.68 0.45 1.55 0.93 0.26
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PA +$ $a_4 \ln TA +$ $a_5 \ln LS$	0.59	0.45	7.20 0.64 - 0.43 - 2.26 - 0.37	3.07 3.23 1.89 3.27 1.93
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln TA +$ $a_4 \ln LS$	0.54	0.46	4.36 0.63 - 2.37 - 0.26	2.34 3.11 3.32 1.65
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln TA$	0.51	0.47	4.78 0.33 - 2.64	2.53 3.83 3.71
$\ln C = a_1 +$ $a_2 \ln SF +$ $a_3 \ln PA +$ $a_4 \ln TA$	0.54	0.46	7.32 0.29 - 0.37 - 2.57	3.01 3.38 1.61 3.69

**Tableau 29** : Résultats d'étude du paramètre C sur 39 bassins versants.

**Figure 53** : Régression de C en fonction de SF, PA et TA.



4.4.3.4. *Utilisation des formules pour le transfert des paramètres d'un bassin jaugé à un bassin non jaugé très voisin.*

**- Bassin de référence :**

Les paramètres A, B, et C sont connus, ainsi que SF, PA et TA.

Les formules de A, B et C selon les régressions :

$$A = 0.55 (SF)^{0.1} (TA)^{2.3}$$

$$B = \frac{(SF)^{0.3} (PA)^{1.6}}{1800}$$

$$C = \frac{3500 (SF)^{0.3}}{(PA)^{0.6} (TA)^{2.4}}$$

**- Bassin non jaugé à simuler :**

Si les deux bassins sont très proches comme dans une situation amont - aval, ou bien si les deux bassins sont très semblables du point lithologie, géologie, occupation des sols, ....., on peut tenir de différences substantielles en superficie ou en climatologie en utilisant les relations établies précédemment.

On obtient les paramètres A', B' et C' selon :

$$A' = A \left[ \frac{SF'}{SF} \right]^{0.1} \left[ \frac{TA'}{TA} \right]^{2.3}$$

$$B' = B \left[ \frac{SF'}{SF} \right]^{0.3} \left[ \frac{PA'}{PA} \right]^{1.6}$$

$$C' = \frac{C \left[ \frac{SF'}{SF} \right]^{0.3}}{\left[ \frac{PA'}{PA} \right]^{0.6} \left[ \frac{TA'}{TA} \right]^{2.4}}$$

SF', PA' et TA' sont connus, et en général TA'  $\leq$  TA.

#### 4.4.3.5. Conclusion

Les possibilités d'explication des paramètres A,B,C du modèle GR3 sont assez modestes.

Sur l'ensemble des variables morphoclimatiques disponibles, il n'y a que 3 (trois) variables significatives :

- la superficie du bassin (SF)
- la pluie annuelle moyenne (PA)
- la température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (TA)

Le paramètre A est expliqué pour 1/4 de sa variance par les variables SF et TA. De même pour le paramètre B à partir des variables SF et PA. C'est le paramètre C qui est le mieux identifiable à partir des variables morphoclimatiques, qui sont SF, PA et TA.

Les trois relations obtenues restent d'une efficacité trop limitée pour être utilisées en vue de déterminer les paramètres A,B, et C d'un bassin versant non jaugé. En particulier pour les paramètres A et B, le problème de la recherche de variables explicatives reste entier. Pour avancer dans ce domaine il faudrait disposer d'un plus grand nombre de bassins et d'une meilleure description géographique de chacun d'eux. Cependant, on peut utiliser les formules en comparaison pour deux bassins très semblables du point de vue lithologique ou très voisins comme des bassins emboîtés.

A titre exploratoire une analyse en fonction de la géologie est tentée dans le paragraphe qui suit.

#### 4.4.4. Y A-T-IL DES RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES ET LA GEOLOGIE ?

Une étude complémentaire cherchant à exploiter les connaissances géologiques des bassins versants a été entreprise parallèlement à la thèse, en vue d'améliorer l'explication des paramètres A, B, et C du modèle GR3 ( JM. PANETIER, 1990 ). La note correspondante figure dans l'**annexe 10**



Dans un premier temps, PANETIER a examiné le cas des calcaires jurassiques de Charente, dans lesquels il y a 13 bassins plus ou moins emboîtés. Cette étude montre que les paramètres de GR3 et notamment le paramètre B ont des valeurs relativement étalées. Les fortes valeurs sont reliées éventuellement avec le caractère plus ou moins perméable des calcaires karstiques.

D'autres bassins comportent des schistes peu perméables; les paramètres correspondant ont des valeurs relativement peu élevées. Dans certains cas enfin, on est amené à incriminer le rôle des formations superficielles ( sol + altérites ).

Sur les mêmes bassins, l'étape suivante a été de rechercher l'influence de la géologie non plus sur C mais sur les valeurs des résidus de C ( $R_C$ ) déterminé par la régression sur les variables physiques ( chap. 4.4.3.3 )

$$R_C = C_{obs} - \frac{3500 (SF)^{0.3}}{(PA)^{0.6} (TA)^{2.4}}$$

avec :

SF = superficie du bassin (Km<sup>2</sup>)

PA = pluie annuelle moyenne (mm)

TA = température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C)

( voir figure 54 ).

Comme dans l'essai précédent, PANETIER a noté que les valeurs basses de résidus de C sont liées à l'existence de schistes lesquels sont peu perméables ou imperméables. Et les valeurs élevées pourraient éventuellement correspondre au caractère karstique des bassins calcaires.

Les résultats ci-dessus nous ont encouragés à faire une étude plus générale sur l'ensemble des bassins étudiés. Dans cette dernière tentative, PANETIER a essayé de classer les 110 bassins essentiellement en 2 groupes :

- perméable : 40 bassins
- peu perméable : 33 bassins

Il n'a pas pu classer 32 bassins trop hétérogènes pour les placer dans une ou dans l'autre catégorie et il a également exclu 2 bassins très perméables et 2 autres plutôt imperméables. On s'est donc limité à étudier les 2 classes clairement identifiées les bassins "perméables" et les bassins "peu perméables".

Comme pour l'étude des régressions ( chap.4.4.1 ), les bassins ayant des paramètres douteux ou des valeurs critères inférieures à 40% ont été éliminés. Il reste alors :

- 26 bassins "peu perméables"
- 33 bassins "perméables"

L'analyse statistique de ces deux classes de bassins a donné des résultats présentés dans les tableaux 30 et 31 .

D'après ces résultats, on peut remarquer que les paramètres des bassins "perméables" sont plus élevés. Nous pourrions en conclure que la perméabilité joue un rôle important sur les paramètres du modèle. Pour vérifier cette hypothèse nous avons introduit le facteur "perméabilité" parmi les variables explicatives obtenues précédemment ( chap. 4.4.3 ). On obtient :

$$\ln A = a_0 + a_1 \ln SF + a_2 \ln TA + a_3 \ln PM$$

$$\ln B = b_0 + b_1 \ln SF + b_2 \ln PA + b_3 \ln PM$$

$$\ln C = c_0 + c_1 \ln SF + c_2 \ln PA + c_3 \ln TA + c_4 \ln PM$$

avec :

SF = superficie du bassin (Km<sup>2</sup>)

PA = pluie annuelle moyenne (mm)

TA = température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C)

PM = 2 si le bassin est "perméable"

1 si le bassin est "peu perméable"

Le tableau 32 montre les résultats du calage.

**Tableau 30 :**  
**ANALYSE STATISTIQUE DE 26 BASSINS**  
**"PEU PERMEABLES"**

VARIABLE	Ln A	Ln B	Ln C
Taille de l'échantillon	26	26	26
Moyenne	5.63	4.49	- 0.52
Mediane	5.47	4.67	- 0.58
Mode	5.42	5.36	0
Moyenne géométrique	5.61	4.32	
Variance	0.27	1.56	0.69
Ecart - type	0.52	1.25	0.83
Erreur standard	0.10	0.25	0.16
Minimum	4.76	2.36	- 2.74
Maximum	6.83	7.48	1.06
Ecart maximum	2.07	5.12	3.8
Premier quartile	5.26	3.36	- 0.83
Troisième quartile	6.12	5.35	0
Intervalle interquartile	0.86	1.99	0.83

**Tableau 31 :**  
**ANALYSE STATISTIQUE DE 33 BASSINS**  
**"PERMEABLES"**

VARIABLE	Ln A	Ln B	Ln C
Taille de l'échantillon	33	33	33
Moyenne	5.92	5.77	- 0.07
Mediane	5.88	6.01	- 0.27
Mode	5.46	5.58	- 0.77
Moyenne géométrique	5.89	5.57	
Variance	0.35	1.78	0.43
Ecart - type	0.59	1.33	0.66
Erreur standard	0.10	0.23	0.11
Minimum	4.11	1.67	- 1.07
Maximum	7.04	8.74	1.26
Ecart maximum	2.93	7.07	2.33
Premier quartile	5.66	5.16	- 0.62
Troisième quartile	6.29	6.48	0.5
Intervalle interquartile	0.63	1.32	1.12

	A		B		C	
COEFF. DE DETERMINATION	0.33		0.39		0.67	
ERREUR STANDARD	0.48		1.15		0.46	
	COEFF. REGRES	RAPPORT STUDENT	COEFF. REGRES	RAPPORT STUDENT	COEFF. REGRES	RAPPORT STUDENT
0	-2.90	1.51	-8.37	2.26	9.05	4.43
1	0.13	2.99	0.25	2.45	0.31	7.11
2	3.23	4.32	1.77	3.22	-0.99	4.24
3	0.07	0.33	1.22	2.55	-1.64	2.19
4	-	-	-	-	0.18	0.92

**Tableau 32 :**

Régressions des paramètres en fonction des variables morphoclimatiques et de l'appartenance à une classe de perméabilité.

Avec un rapport de Student faible ( $< 1.00$ ), il est certain qu'aucune corrélation significative n'apparaît entre la perméabilité et le paramètre A. De même pour C.

Cependant, pour le paramètre B, il semble y avoir une influence modeste de la perméabilité appréciée sur une base géologique. Cependant, le rapport de Student étant à la limite de la significativité ( $< 2.7$ ), nous n'avons pas retenu cette dernière amélioration.

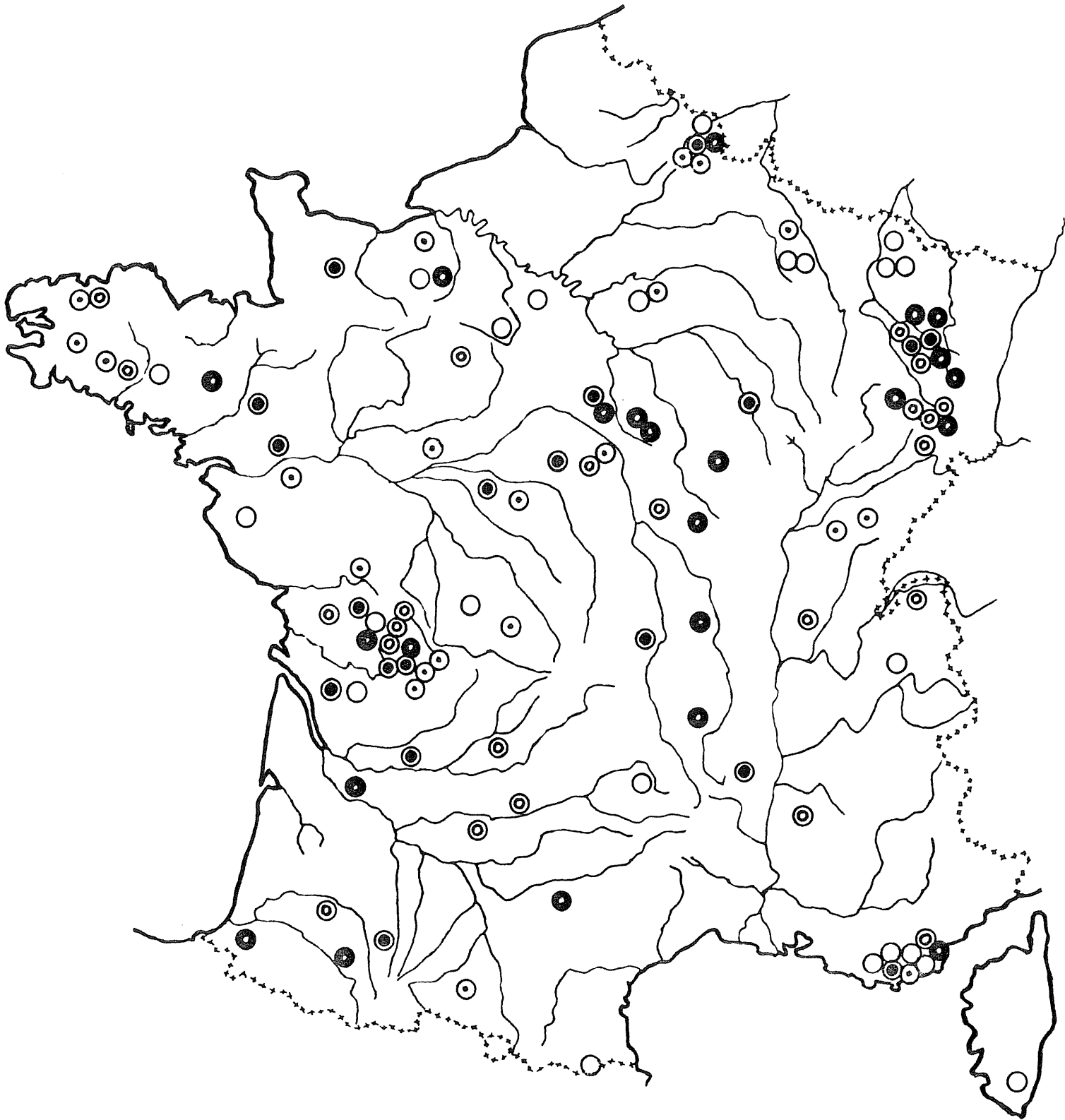


Figure 54 : Résidu de C.

○	0.655
⊙	) 0.655 , 0.970 )
⊗	) 0.970 , 1.115 )
●	) 1.115 , 1.420 )
●	1.420

#### 4.4.5. CONCLUSION

La recherche d'une explication aux paramètres, qui a pour objectif la possibilité d'appliquer le modèle sur des bassins non jaugés, nous a conduit aux remarques suivantes :

- Il existe une liaison très faible entre A et B, mais insuffisante pour tenter de l'exploiter. Le paramètre C est indépendant des 2 autres paramètres.

Ces constatations d'indépendance laissent à penser que l'on ne peut pas avoir un modèle dépendant de moins de 3 paramètres.

- Il est impossible de régionaliser les paramètres, en raison de leur grande variabilité spatiale. A part quelques bassins se trouvant dans l'Ouest de la région Bretagne, parmi lesquels le paramètre B semble peu variable. Chaque bassin a son jeu de paramètres A, B et C.

- Parmi des nombreuses variables morphoclimatiques, il n'y en a que trois qui apparaissent influencer les paramètres :

- la superficie du bassin (SF)
- la pluie annuelle moyenne (PA)
- la température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (TA)

Les trois formulations représentant la liaison entre chaque paramètre avec les deux ou trois variables ci-dessus, restent d'une efficacité trop limitée pour résoudre le problème des bassins non jaugés.

- L'introduction d'un facteur de perméabilité générale du bassin, n'améliore pas la significativité de ces trois formules.

En conclusion, nous avons obtenu trois expressions permettant de préciser quelque peu les valeurs des paramètres A, B, et C pour des bassins non jaugés. L'estimation de C peut être considérée comme satisfaisante car

comparable en qualité aux estimations classiques d'un temps de concentration. Les estimations de A et B apparaissent, en revanche, nettement insuffisantes pour rendre compte valablement des écoulements journaliers sur un bassin sans données débimétriques.

Il est probable qu'un progrès sensible dans l'estimation des paramètres exige un nombre plus important de bassins versants et une description plus riche que celle dont nous disposons. Cette étude aura permis de clarifier le sujet et d'en apprécier la difficulté.

# **CINQUIEME PARTIE**





## CRITIQUE GLOBALE DE L'ARCHITECTURE DU MODELE

Le modèle GR3J comprend des équations dépendant de constantes dont les valeurs n'ont pas été remises en cause face à l'ensemble des données disponibles dans cette recherche. Il s'agit notamment de :

- la correction de la pluie tenant compte du défaut de captation des pluviomètres : + 10% ;
- le taux d'écoulement pseudo-direct : 5% ;
- l'équation du rendement de la pluie faisant intervenir le taux de remplissage du réservoir sol (S/A) à la puissance 2 ;
- l'équation du rendement de l'ETP faisant intervenir S/A à la puissance 2 ;
- l'équation de l'hydrogramme unitaire dépendant du temps de la puissance 3 ;
- la loi de vidange du réservoir eau-gravitaire faisant dépendre le débit de la puissance 2 du taux de remplissage.

Ces valeurs, exposants et taux, ont été déterminées pour obtenir le meilleur critère d'adéquation parmi plusieurs valeurs proposées, en utilisant les données de certains bassins versants.

Dans cette dernière étape, nous allons vérifier ces valeurs, en les testant sur l'ensemble des bassins étudiés jusqu'à présent en y ajoutant 4 nouveaux bassins dont les données ont été obtenues récemment.

N°	CD BV	COURS D'EAU	STATION DE JAUGEAGE	SUP. (km <sup>2</sup> )	STA. PLUVIO	STATION ETP
111	Bo	Hérault	Moulin de Bertrand	1090	....	Milau 0.5 Montpellier 0.5
112	B3	Ognon	Villeneuve les Sorinières	147	Nantes	Nantes
113	B4	Boulogne	La Vacherie	193	Nantes	Nantes
114	B5	Logne	La Roussière	130	Nantes	Nantes

Le bassin d'Hérault se trouve dans la région 'Languedoc Roussillon', et les autres bassins se trouvent dans la région 'Pays-de-Loire'.

Au début, les bassins intermittents ont été exclus (COINON et GRANCHAIN), en raison de leurs caractéristiques particulières (correction de pluie de façon soustractive) (**paragraphe 3.1**). Pour d'autres bassins, l'introduction d'une correction de pluie, uniquement multiplicative, se fait dans les conditions suivantes contrôlées par le sous-programme PILOT :

- si l'erreur de bilan est supérieure à 0.2 ou bien
- si le critère de NASH est inférieur à 50%.

Nous jugeons la performance d'une nouvelle version du modèle essentiellement par la valeur moyenne du critère de NASH obtenue sur l'ensemble des bassins. Dans ce qui précède, (**chapitre 3**) nous avons utilisé un critère de NASH modifié en prenant la racine carrée de la somme des carrés des erreurs du modèle et de la variance des débits observés. Pour cette dernière phase nous utiliserons le critère de NASH proprement dit :

$$T = 100 \left[ 1 - \frac{\sum (Q - \hat{Q})^2}{\sum (Q - \bar{Q})^2} \right]$$

avec :

- Q = débits observés
- $\hat{Q}$  = débits calculés par le modèle
- $\bar{Q}$  = moyenne des débits observés

Entre le critère du **chapitre 3**, noté  $T'$ , et le présent critère de NASH ( $T$ ), on a la relation suivante :

$$1 - \frac{T}{100} = \left[ 1 - \frac{T'}{100} \right]^2$$

Les valeurs prises par  $T'$  sont très sensiblement inférieures aux valeurs prises par  $T$  (si  $T' = 50$ ,  $T = 75$  et si  $T' = 30$ ,  $T = 51$ ).

Chaque version est testée sur l'ensemble des bassins versants étudiés. Ces résultats correspondants à la version la plus efficace seront analysés statistiquement, et des "explications" des paramètres seront proposées à partir de caractéristiques morphoclimatiques. Pour diminuer le nombre des essais, la remise en cause de différents paramètres fixes du modèle sera faite séquentiellement sauf exception justifiée par une possible dépendance entre certains de ces paramètres.

## 5.1 LOI DE VIDANGE DU RESERVOIR EAU-GRAVITAIRE

Dans le modèle GR3, la loi de vidange du réservoir eau-gravitaire est du type quadratique dépendant d'un seul paramètre  $B$ . Cette loi a été choisie d'après l'étude faite dans le mémoire de DEA (EDIJATNO, 1987, **annexe 1**).

Pour résoudre le problème de la non-restitution des débits de pointe dans certains bassins versants de Bretagne, une comparaison des lois de vidange quadratique et linéaire a été effectuée (**paragraphe 3.2.5.5**). Le résultat a renforcé le choix de la relation quadratique. Cette loi n'avait été comparée que sur un très petit nombre de bassins versants à une loi cubique et comme la différence n'était pas apparue très sensible nous en étions restés avec la loi quadratique. Ici nous avons comparé systématiquement cette exposant avec d'autres exposants ( $> 2$ ) sur un ensemble de 112 bassins (les bassins intermittents n'ayant pas encore été introduits pour ce test).

Reprenons la loi de vidange quadratique du modèle GR3, pour laquelle le réservoir eau-gravitaire relâche le débit :

$$Q = \frac{R^2}{R + B}$$

Cette équation est obtenue par intégration sur le pas de temps  $\Delta t$  d'une relation :

$$- \frac{dR}{R^\alpha} = k dt \quad \text{en prenant } \alpha = 2 \text{ et } B = 1/(k \Delta t).$$

Avec  $\alpha \neq 1$  l'intégration de cette dernière équation donnera :

$$\frac{1}{R_2^{\alpha-1}} = \frac{1}{R_1^{\alpha-1}} + \frac{1}{B^{\alpha-1}} \quad \text{où} \quad \frac{1}{B^{\alpha-1}} = k(\alpha-1) \Delta t$$

Le débit correspondant est :

$$Q = R_1 - R_2$$

où  $R_1$  et  $R_2$  sont les niveaux initial et final du réservoir eau-gravitaire au même pas de temps.

Pour comparer avec la loi quadratique ( $\alpha = 2$ ), nous prenons successivement  $\alpha = 3, 4, 5$ , et  $6$  ce qui donne les résultats présentés dans le **tableau 33**.

On peut remarquer que le critère augmente avec  $\alpha$ , jusqu'à  $\alpha = 5$ , et puis décroît à partir de  $\alpha = 6$ . Il est clair que l'utilisation d'une loi de vidange avec l'exposant  $5$  donne un meilleur résultat qu'avec  $\alpha = 2$ . Cela conduit à des décrues mieux reconstituées, dont les formes sont liées directement à  $\alpha / (\alpha - 1)$ ; ( $Q(t)$  inversement proportionnel à :  $k_0 + k_1 t^{\alpha/(\alpha-1)}$ ). C'est cette valeur de  $\alpha = 5$  que nous utiliserons dorénavant pour la vidange du réservoir eau-gravitaire.

**Tableau 33 :** Résultats liés à différentes valeurs de  $\alpha$  concernant la loi de vidange du réservoir eau - gravitaire ( 112 bassins versants ).

CARACTERISTIQUE	$\alpha = 2$		$\alpha = 3$		$\alpha = 4$		$\alpha = 5$		$\alpha = 6$	
	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S
Critère de NASH (modifié)	54.91	12.89	55.81	13.20	56.06	13.22	56.12	13.21	55.99	13.46
Bilan global	0.32	10.44	-0.45	10.79	-1.05	11.28	-1.29	11.37	-0.59	12.05
Rapport des crues	75.94	20.07	79.95	21.06	81.78	21.27	82.97	21.37	83.86	21.72
Ratio durées des crues	0.97	0.34	0.95	0.31	0.93	0.30	0.92	0.30	0.91	0.30
Ratio durées des étiages	0.05	0.42	-0.07	0.44	-0.13	0.46	-0.17	0.47	-0.16	0.47
ln A	5.83	0.78	5.84	0.81	5.87	0.86	5.88	0.87	5.85	0.86
ln B	5.24	1.53	4.43	1.14	4.37	1.02	4.43	0.96	4.49	0.94
ln C	-0.41	0.90	-0.46	1.22	-0.45	1.22	-0.41	0.93	-0.42	1.21
Nombre de bassin à 4 paramètres	38		37		37		37		38	

M = moyenne

S = écart-type

## 5.2 RENDEMENTS DE LA PLUIE ET DE L'ETP

Dans le **paragraphe 2.5** et l'**annexe 6**, nous avons des relations de rendement de la pluie et de l'ETP dont ces formulations sont exprimées en fonction du carré de  $S/A$ , taux de remplissage du réservoir-sol.

Le choix de la puissance 2 dans ces équations est confirmé grâce à la comparaison avec d'autres puissances (0.5, 1, 3 et 4, cf **tableaux 34 et 35**).

Tant pour le rendement de la pluie que pour l'ETP, l'exposant 2 donne finalement le critère le plus élevé. Cette disposition du modèle GR3J restera donc inchangée.

**Tableau 34** : Résultats liés à différents exposants  $\beta$  du rendement de pluie

CARACTERISTIQUE	$\beta = 0.5$		$\beta = 1$		$\beta = 2$		$\beta = 3$		$\beta = 4$	
	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S
		49.34	12.91	54.16	13.22	56.12	13.15	55.05	12.90	53.71
Critère de NASH (modifié)	-6.23	9.73	-3.70	10.77	-1.04	11.31	1.44	11.40	2.89	10.93
Bilan global	71.38	22.40	77.26	20.95	82.99	21.33	85.26	21.75	84.84	21.43
Rapport des crues	0.80	0.34	0.87	0.31	0.92	0.30	0.92	0.31	0.91	0.30
Ratio durées des crues	-0.47	0.47	-0.31	0.39	-0.15	0.47	-0.05	0.48	-0.01	0.49
Ratio durées des étiages	5.32	0.77	5.58	0.76	5.88	0.89	6.04	1.09	6.04	1.16
ln A	4.62	1.12	4.48	0.98	4.42	0.96	4.37	1.02	4.41	1.15
ln B	-0.40	1.21	-0.42	1.20	-0.41	0.93	-0.42	0.91	-0.40	0.86
ln C										
Nombre de bassin à 4 paramètres	73		52		38		39		42	

M = moyenne  
S = écart-type

**Tableau 35** : Résultats liés à différents exposants  $\beta$  du rendement d'ETP

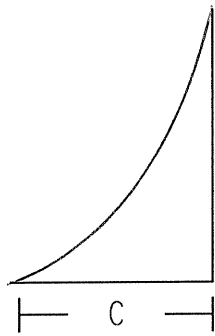
CARACTERISTIQUE	$\beta = 1$		$\beta = 2$		$\beta = 3$		$\beta = 4$	
	M	S	M	S	M	S	M	S
		55.70	13.38	56.12	13.15	55.52	13.05	55.17
Critère de NASH (modifié)	-2.90	9.88	-1.04	11.31	1.42	11.60	2.36	10.73
Bilan global	80.44	20.74	82.99	21.33	84.25	21.87	85.02	21.94
Rapport des crues	0.90	0.30	0.92	0.30	0.93	0.31	0.93	0.31
Ratio durées des crues	-0.26	0.40	-0.15	0.47	-0.04	0.47	0.01	0.46
Ratio durées des étiages	5.82	0.86	5.88	0.89	5.82	0.96	5.78	1.01
ln A	4.46	0.97	4.42	0.96	4.37	0.99	4.37	1.01
ln B	-0.41	0.94	-0.41	0.93	-0.45	1.22	-0.44	1.20
ln C								
Nombre de bassin à 4 paramètres	56		38		36		43	

M = moyenne  
S = écart-type



### 5.3 HYDROGRAMME UNITAIRE

Pour simuler le transfert au réservoir eau-gravitaire le modèle GR3J utilisait un hydrogramme unitaire de caractère "incomplet". Il s'agissait d'une fonction de type parabolique dépendant d'un paramètre de durée C :



$$q(t) = \frac{3t^2}{C^3} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{t}{C} \right]^3$$

Après être routée par l'hydrogramme unitaire, la pluie instantanée est fractionnée en deux parties :

- une première partie de 95% est ensuite introduite dans le réservoir eau-gravitaire R ;
- la partie complémentaire (5%) participe directement au débit comme écoulement pseudo-direct (EPD).

Pour la présente étape de critique générale de l'architecture du modèle GR3J, on peut remettre en question l'exposant  $\alpha = 3$  de l'expression de l'hydrogramme unitaire (l'exposant 3 sera comparé avec d'autres valeurs, sur les 112 bassins versants).

On a également remis en question le fait d'utiliser le même hydrogramme unitaire pour l'accès au réservoir eau-gravitaire et pour l'écoulement pseudo-direct.

La forme "incomplète" de l'hydrogramme unitaire nous semble inadaptée pour simuler l'écoulement pseudo-direct. L'absence de décrue de l'hydrogramme provoque une chute brusque au débit simulé. Cela peut être évité si l'on utilise un hydrogramme unitaire non tronqué. Cela conduit à définir deux hydrogrammes unitaires:

- le premier transfère la fraction de la pluie qui va entrer dans le réservoir eau-gravitaire, c'est *l'hydrogramme unitaire de R* : HU (R);
- le deuxième transfère le reste de la pluie nette directement en débit, c'est *l'hydrogramme unitaire de l'écoulement pseudo-direct* : HU (EPD).

Cette amélioration conceptuelle ne doit pas conduire à l'introduction d'un nouveau paramètre. Pour cela nous utilisons les mêmes équations pour les deux HU. L'HU (EPD) s'obtient en complétant le premier par symétrie autour de  $t = C$  et en divisant par 2 les ordonnées de façon à conserver un volume unité à l'hydrogramme.

En fait, un nombre non négligeable de dispositions peuvent être prises et sont présentées dans le **tableau 36** .

Les hypothèses concernent une description instantanée des hydrogrammes unitaires. Il faut ensuite intégrer et discrétiser pour obtenir l'hydrogramme unitaire du modèle GR3J. Pour cela on a supposé jusqu'à présent une pluie journalière instantanée. Ici, nous avons aussi comparé cette version de l'HU (EPD) avec celle obtenue en supposant la pluie journalière uniformément répartie sur le jour.

La comparaison des sept sous-modèles d'hydrogrammes unitaire est délicate pour plusieurs raisons :

- les bassins versants à temps de concentration long qui permettent seuls d'arbitrer entre les différentes solutions sont peu nombreux
- les données de pluies et de débits ne se réfèrent pas au même découpage temporel (0h-24h pour les débits, 7h-7h pour les pluies)
- le choix des sous-modèles interfère avec celui du taux d'écoulement pseudo-direct et également celui de l'exposant de  $(t/C)$  dans l'expression analytique à la base de toutes les formulations.

Ces différentes difficultés empêcheront probablement l'émergence d'une solution nettement supérieure aux autres.

Un grand nombre de simulations ont été faites et les résultats ont été rassemblés dans les annexes 11.1 à 11.10 .

Il aurait fallu procéder à la comparaison sur l'ensemble des 114 bassins, à  $7 \times 4 \times 5 = 140$  sous-modèles :

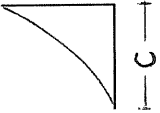
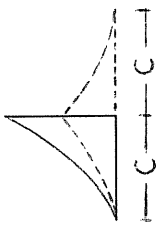
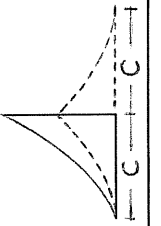
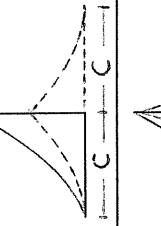
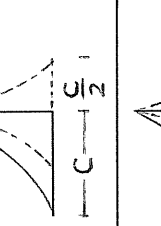
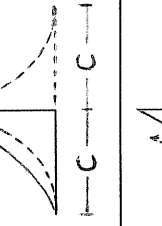
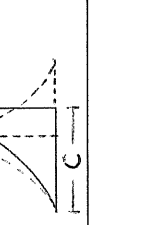
- 7 versions de couples d'hydrogrammes unitaires ;
- 4 valeurs-types pour l'exposant  $\alpha$  de  $(t/C)$  ;
- 5 valeurs-types du taux d'écoulement pseudo-direct.

En fait, seulement 39 sous-modèles ont été testés et on a pris des décisions au fur et à mesure des comparaisons en espérant qu'il n'y ait pas trop de dépendance entre les différentes spécifications.

L'examen des différents résultats explique que nous ayons éprouvé un certain embarras pour choisir la meilleure disposition. En fait, nous avons écarté la solution V qui ne prévoyait pas d'écoulement juste après la pluie et qui pouvait de plus être remplacée par la solution VI poursuivant le même objectif à savoir de conserver la même ordonnée maximale aux 2 hydrogrammes unitaires. De même la solution I a été écartée pour les raisons explicitées précédemment. Le choix de la solution II avec un exposant  $\alpha = 3$  et un taux d'écoulement pseudo-direct égal à 0.1 a été fait sur la base du critère de NASH et du critère de rapport des crues annuelles moyennes.

La comparaison est cependant assez confuse et il est certain qu'il faudrait des données plus nombreuses et plus pertinentes pour espérer voir se dessiner une solution surclassant nettement les solutions alternatives.

Tableau 36 : Différents types d'hydrogrammes unitaires proposés.

TYPE	SCHEMA	DESCRIPTIONS
I		Un seul hydrogramme pour transférer la pluie, dont une fraction va entrer dans le réservoir eau-gravitaire, et le reste se transformer directement en débit. Ce HU était utilisé dans l'étude antérieure. La forme est donnée par $(t/C)^\alpha$
II		Deux hydrogrammes : HU(R) et HU(EPD) (voir l'annexe 14.1 ) L'ordonnée de HU(EPD) = $1/2$ HU(R) La pluie est supposée instantanée. Les deux HU ont les mêmes exposants ( $\alpha$ ) dans $(t/C)^\alpha$
III		Semblable au type II, mais avec la pluie uniformément répartie sur le pas de temps. (Voir l'annexe 14.2 ).
IV		Semblable au type II, mais avec un exposant $\alpha'$ pour HU(EPD) différent de $\alpha$ pour HU(R). La pluie est supposée instantanée.
V		Les mêmes ordonnées maximales pour les deux HU, mais le démarrage de l'HU (EPD) a lieu à $C/2$ . Par conséquent, il n'y a pas de pluie transformée directement en débit quand $0 < t < C/2$ . On prend les mêmes exposants ( $\alpha$ ). La pluie est supposée instantanée. (Voir l'annexe 14.3 ).
VI		Pour éviter l'inconvénient du type V quand $0 < t < C/2$ , ce schéma utilise un exposant $\alpha' = 2\alpha$ pour HU (EPD). Les deux HU ont la même ordonnée maximale. La pluie est supposée instantanée.
VII		HU (EPD) a sa pointe qui se produit plus tôt que dans les versions précédentes afin que les maximums sur $\Delta t$ des deux HU soient concomitants.

## 5.4 TAUX D'ÉCOULEMENT PSEUDO-DIRECT

Au cours de l'étude précédente sur l'hydrogramme unitaire, différentes valeurs du taux d'écoulement pseudo-direct (EPD) ont déjà été testées. Nous avons retenu un taux de 10%.

Nous présentons ici une étude du taux d'EPD avec la dernière version du modèle GR3J, en optimisant ce taux comme un paramètre libre supplémentaire. Dans ce cas, il est possible que pour certains bassins, nous aurons à optimiser 5 paramètres, le 4ème étant la correction de pluie introduite de façon automatique et le 5ème étant le taux d'EPD.

Avec les données de 112 bassins versants, ce traitement permet de préciser quels bassins ont besoin de l'introduction de l'EPD. On trouve 24 bassins ayant un taux optimal d'EPD nul, et les autres ont des taux variant de 1 à 33%, avec une moyenne de 10%.

Comme un des buts poursuivis lors de la création de ce modèle est d'avoir un modèle général, nous ne pouvons pas éviter de prendre en compte l'EPD. Pour limiter à 3 le nombre des paramètres, la valeur moyenne de 10% obtenue précédemment doit être introduite comme taux fixe d'écoulement pseudo-direct.

## 5.5 PRISE EN COMPTE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Pour simuler les débits à partir des données de pluie et d'ETP, le modèle GR3J utilise un certain coefficient fixe corrigeant les pluies. Quel que soit le bassin étudié, nous rajoutons un taux de 10% de chaque valeur des données.

Une étude entreprise au CEMAGREF avait, en effet, montré que les pluies réelles étaient supérieures aux pluies mesurées conventionnellement par les pluviomètres du fait d'un défaut systématique de captation des appareils. Cette correction peut maintenant être remise en cause grâce aux nombreuses données disponibles. Nous avons comparé les résultats obtenus avec l'introduction de taux différents : 0, 5, 7 et 10%.

Le **tableau 37** montre que la correction de 10% semble un peu trop élevée et que l'on peut se contenter d'une correction moitié soit 5%. C'est ce taux qui sera systématiquement appliqué aux données brutes de pluies.

**Tableau 37 :**

Résultats liés à différents taux de correction des données de pluies.

CARACTERISTIQUE	CP = 0 %		CP = 5 %		CP = 7 %		CP = 10 %	
	M	S	M	S	M	S	M	S
Critère de NASH	79.14	12.24	79.47	12.11	79.32	12.12	79.05	12.51
Bilan global	2.58	9.83	0.52	10.70	-0.31	11.66	-1.02	11.45
Rapport des crues	81.21	20.96	81.86	21.02	81.84	21.34	81.32	21.70
Ratio durées des crues	0.87	0.29	0.90	0.31	0.91	0.31	0.91	0.32
Ratio durées des étiages	-0.07	0.48	-0.11	0.47	-0.14	0.48	-0.17	0.46
Nombre des bassins à 4 paramètres	41		38		32		33	

M = moyenne

S = écart - type

CP = correction de pluie

Vidange :  $\alpha = 5$

Rendement de P :  $\beta = 2$

Rendement d'ETP :  $\beta = 2$

Taux d'EPD = 0.10

HU (R) :  $\alpha = 3$

HU (EPD) :  $\alpha = 3$

## 5.6 ETUDE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES

Une étude de sensibilité des paramètres a été réalisée en utilisant une approche simplifiée, soient :

$\{ Q_i , i = 1, n \}$  = les débits observés;  
 $\{ \hat{Q}_i , i = 1, n \}$  = les débits calculés par le modèle pour le jeu de paramètres optimal  $\{ a, b, c \}$  où les lettres minuscules représentent les logarithmes des paramètres réels A, B et C.

Considérons une modification de  $\varepsilon$  ( nous prendrons  $\varepsilon = 0.05$  ) d'un des paramètres a ou b ou c. On obtient:

$\{ Q_{a_i} , i = 1, n \}$  = les débits calculés avec le jeu  $\{ a+\varepsilon , b, c \}$   
 $\{ Q_{b_i} , i = 1, n \}$  = les débits calculés avec le jeu  $\{ a, b+\varepsilon , c \}$   
 $\{ Q_{c_i} , i = 1, n \}$  = les débits calculés avec le jeu  $\{ a, b, c+\varepsilon \}$

Nous allons utiliser le modèle linéaire général pour relier l'erreur du modèle GR3J avec les variations de débits ainsi obtenues:

$$Q = \hat{Q} + \alpha \frac{Q_a - \hat{Q}}{\varepsilon} + \beta \frac{Q_b - \hat{Q}}{\varepsilon} + \gamma \frac{Q_c - \hat{Q}}{\varepsilon} + \mu$$

avec :

$\alpha, \beta, \gamma$  = les variations optimales respectivement pour a , b , c  
 $\mu$  = l'erreur de ce modèle linéaire.

Pour que ce modèle puisse être traité simplement, il faut que  $\mu$  soit homoscédastique et non autocorrélé. Si l'on peut supposer l'homoscédasticité approximativement réalisée, il n'en est pas de même de l'absence d'autocorrélation. Pour contourner cette difficulté, on a tout simplement choisi de retenir une valeur de débits tous les 5 jours, ce qui diminue fortement, voire supprime, l'autocorrélation des erreurs.

L'intérêt du modèle linéaire n'est pas d'obtenir des corrections  $\alpha, \beta, \gamma$ , mais la matrice des variances - covariances de ces coefficients qui est approximativement celle des coefficients a , b et c . Cette démarche donne des renseignements très précieux sur les précisions des paramètres ainsi que sur les " liaisons " entre eux.

L'étude de sensibilité des paramètres a été faite sur l'ensemble des bassins versants étudiés. Un exemple de résultat est présenté sur le bassin de BAR - SUR - SEINE:

Matrice des corrélations des paramètres :

1	- 0.75	0.35
- 0.75	1	- 0.27
0.35	- 0.27	1

Ecart - type :

ln A = 0.04
ln B = 0.07
ln C = 0.03

Les résultats obtenus pour les différents bassins figurent en **annexe 12**. On constate que les paramètres ont des écart - types très raisonnables et cela confirme la qualité acceptable de l'architecture du modèle GR3J.

## 5.7 CONCLUSION : LE MODELE GR3J

La critique des paramètres fixes du modèle sur les données de l'ensemble des bassins versants étudiés, nous a conduit à un changement sensible dans l'architecture du modèle GR3J. Ce changement provoque cependant une détérioration de la performance du modèle sur certains bassins, mais en moyenne l'amélioration est très sensible par rapport à la version utilisée dans la **chapitre 3**.

Nous pouvons remarquer qu'il n'y a pas de changement des équations définissant les rendements de la pluie et de l'ETP. L'utilisation d'équations quadratiques est le meilleur choix.

Nous avons donc :

- rendement de la pluie proportionnel à:  $(S/A)^2$
- rendement de l'ETP proportionnel à:  $\{1 - (1 - S/A)^2\}$



Les changements concernent les spécifications suivantes :

- la loi de vidange quadratique du réservoir eau-gravitaire est remplacée par l'expression :

$$Q(t) = k \left[ R(T) \right]^5$$

- un hydrogramme unitaire a été spécialement introduit pour l'écoulement pseudo-direct. Alors que l'hydrogramme unitaire traitant de l'accès au réservoir eau-gravitaire a une forme "incomplète", le deuxième hydrogramme unitaire est symétrique. Les deux hydrogrammes dérivent d'une expression parabolique ( $3t^2/C^3$ ).

- le taux d'écoulement pseudo-direct est augmenté de 5% à 10%. Ce doublement est partiellement dû à la division par 2 de l'ordonnée maximale de l'hydrogramme unitaire.

Avec ces changements, nous avons une nouvelle architecture pour le modèle GR3J représentée dans la **figure 55**.

Notons enfin que nous avons réduit la correction des données pluviométriques faite pour compenser le défaut de captation des pluviomètres. Après comparaison, nous avons opté pour une majoration de 5% au lieu des 10% adoptés initialement.

Cette nouvelle version ayant conduit à des modifications de paramètres, nous avons critiqué les régressions des paramètres A, B et C effectuées en fonction de quelques variables morphoclimatiques.

Cela nous a conduit à une amélioration des régressions des paramètres B et C. Par contre, le paramètre A a sa variance presque entièrement inexplicée par les variables très simples utilisées.

Un projet d'article intitulée : "**DAILY LUMPED RAINFALL-RUNOFF MODEL WITH THREE FREE PARAMETERS**" (**annexe 13**) synthétise la démarche suivie pour l'établissement du modèle GR3J et peut servir de résumé au présent rapport de thèse.

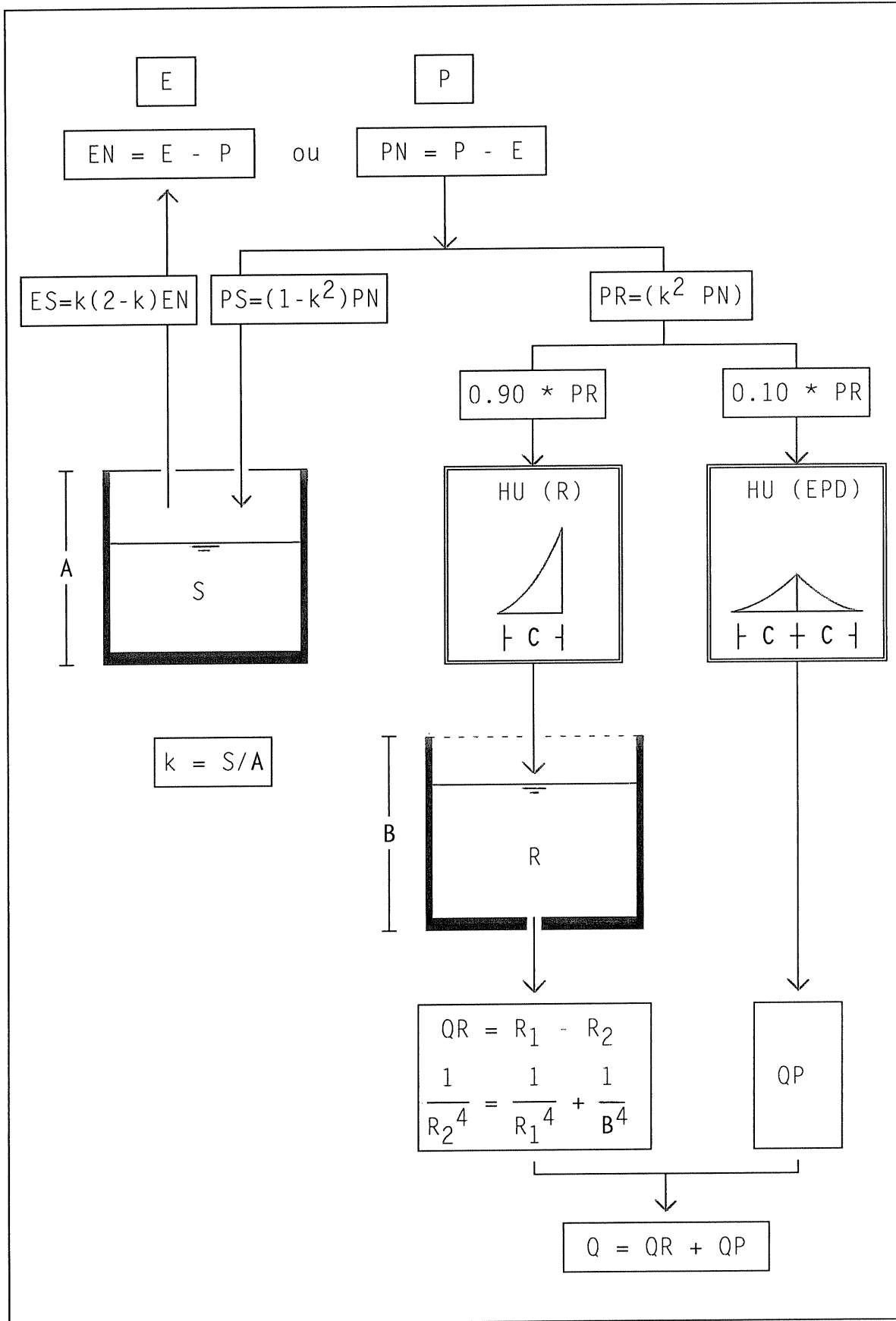


Figure 55 : SCHEMA DU MODELE GR3J

## 5.8 STATISTIQUES DIVERSES SUR LE FONCTIONNEMENT DU GR3J

L'étude suivante est de vérifier les analyses effectuées dans le **quatrième chapitre** en utilisant les nouveaux résultats de GR3J (cf **tableaux 38 , 39** et **annexe 12** ).

Dans cette étape, nous vérifions les lois de distributions proposées précédemment pour les paramètres A, B et C ( **paragraphe 4.3.2.1** ). Pour diverses raisons (modèle peu adapté, données inadéquates...) les paramètres peuvent prendre des valeurs assez éloignées de la majeure partie de l'échantillon obtenu. C'est ce que l'on observe sur les **figures 56 à 59** . Nous avons repris les distributions des paramètres en excluant les "outliers" qui s'observent pour les paramètres a et b (la totalité de la distribution de c est acceptable). Nous avons retenu les valeurs des paramètres appartenant aux fourchettes suivantes :

$$\begin{aligned} a & : 3.5 \text{ à } 8.0 \\ b & : 2.0 \text{ à } 7.0 \\ c & : -0.8 \text{ à } 1.6 \\ r_c & : -0.7 \text{ à } 0.8 \quad (\text{résidu de } c) \end{aligned}$$

Cette sélection conduit à des échantillons de 102 valeurs. Nous pouvons voir que les 3 paramètres suivent une loi normale (**figures 60 à 62** ). Notons que les moyennes observées pour a, b, et c (**tableau 38** ) peuvent être utilisées comme valeurs initiales des paramètres lors du calage du modèle sur un bassin jaugé.

$$\begin{aligned} a_0 & : 5.7 \quad \text{soit } A_0 : 300 \text{ mm} \\ b_0 & : 4.4 \quad \text{soit } B_0 : 81 \text{ mm} \\ c_0 & : 0.19 \quad \text{soit } C_0 : 1.7 \text{ jour} \end{aligned}$$

La **figure 63** montre la distribution des critères de NASH. Nous pouvons voir que ces critères varient de 46 % à 96 % , avec une moyenne de 79 % et une médiane de 82 % . Il y a moins de 23 % des bassins qui ont un critère inférieure à 70 % , et 20 % des bassins ont un critère supérieure à 90 % .

Fig. 56 : DISTRIBUTION DES PARAMETRES A

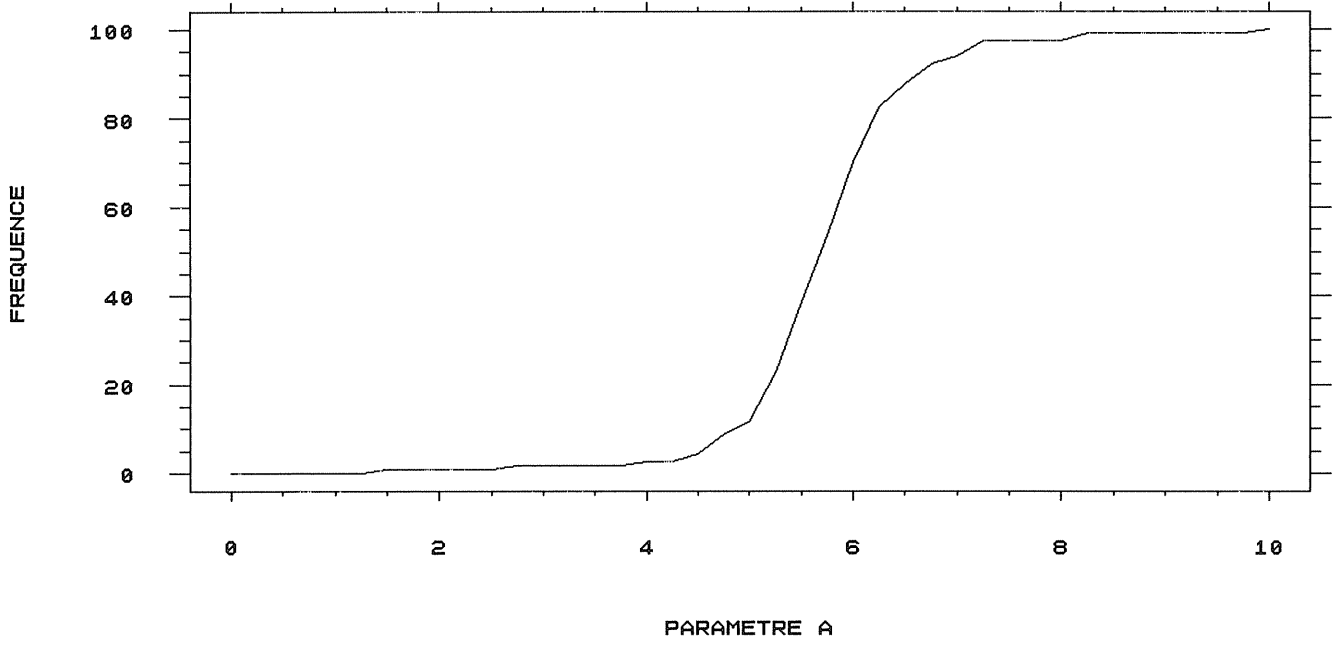


Fig. 57 : DISTRIBUTION DES PARAMETRES B

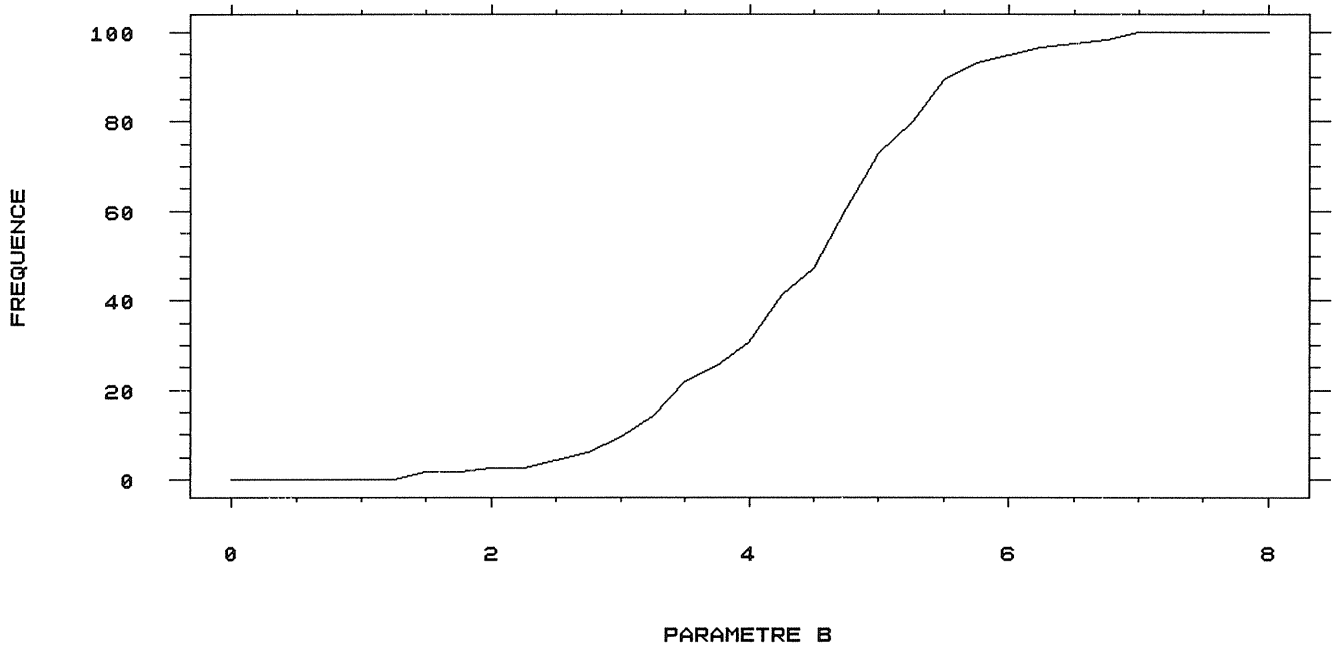


Fig. 58 : DISTRIBUTION DES PARAMETRES C

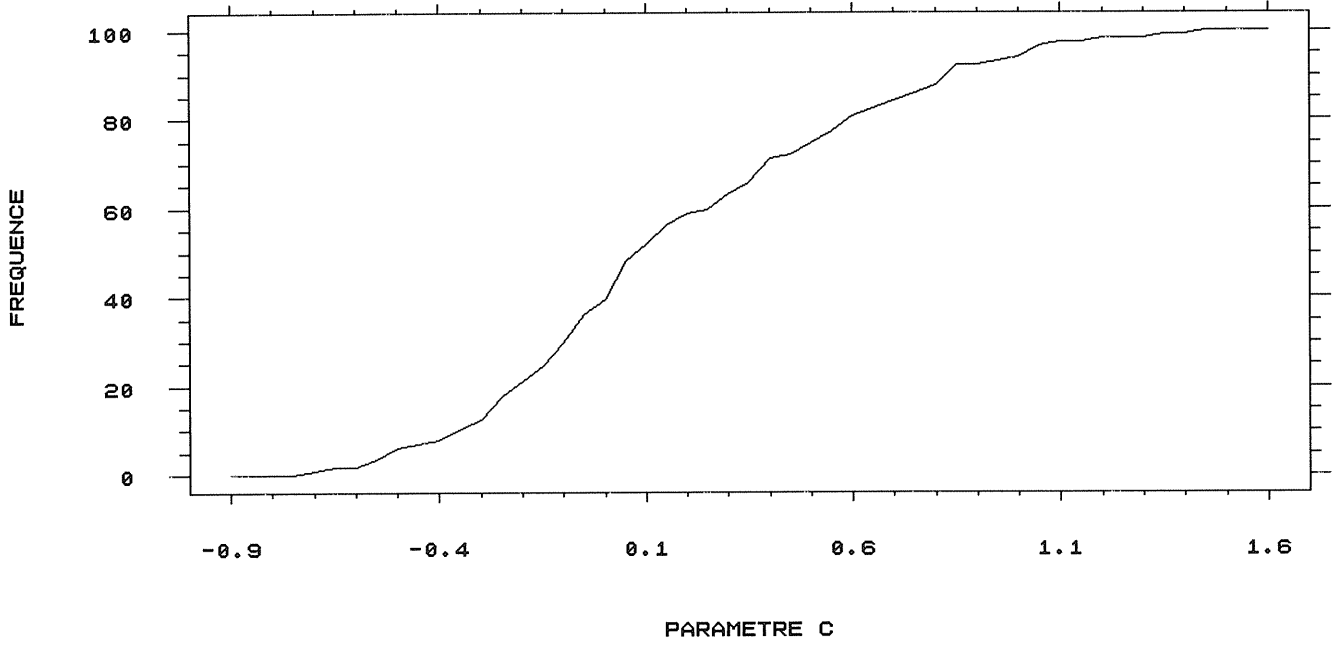


Fig. 59 : DISTRIBUTION DES RESIDUS

DE PARAMETRES C

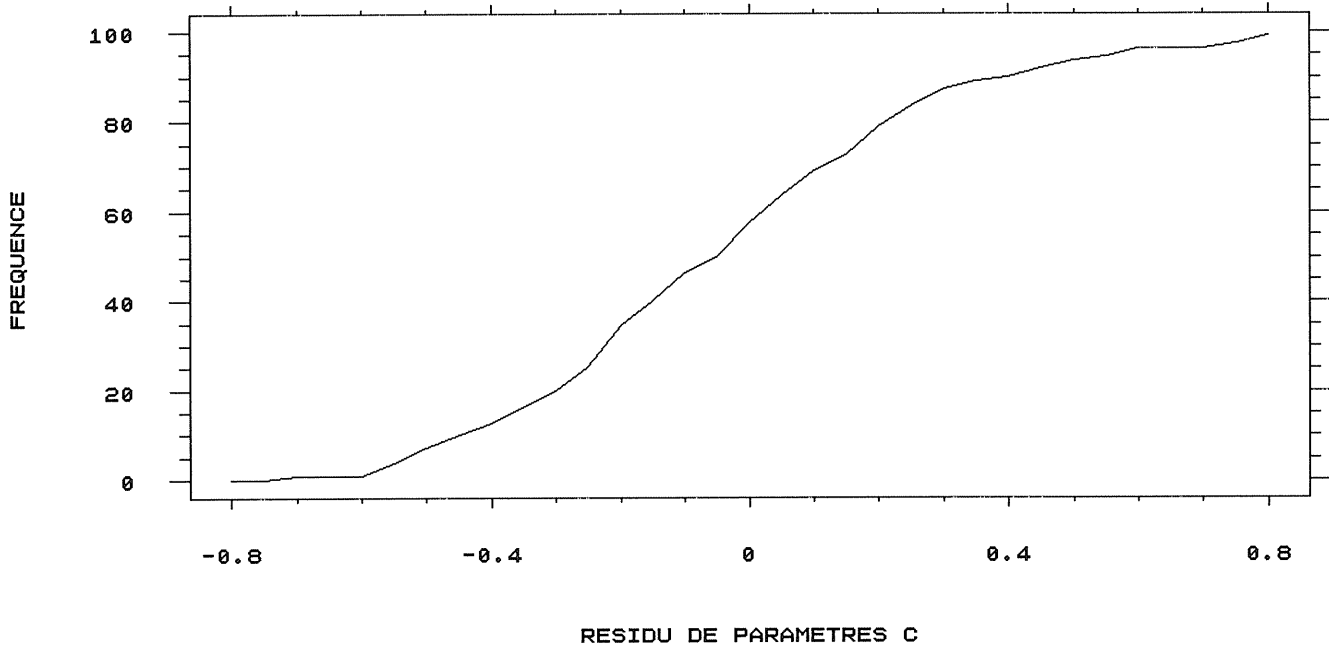


Fig. 60 : DISTRIBUTION DES PARAMETRES A

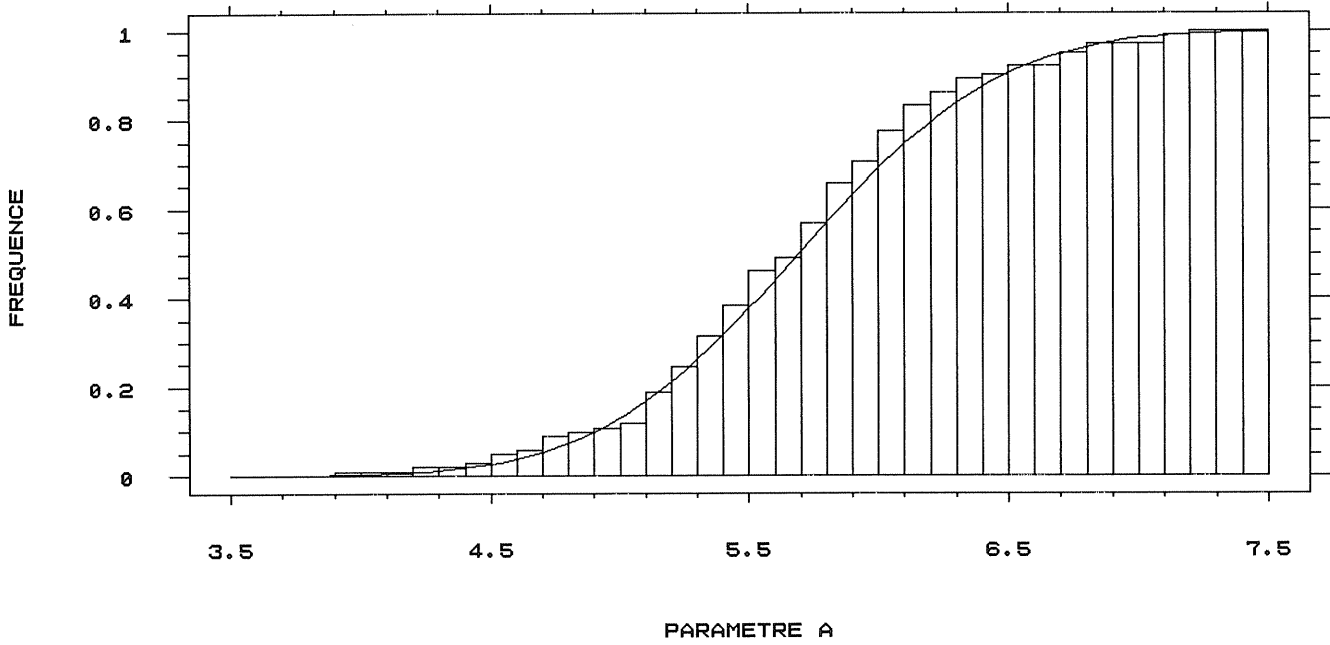


Fig. 61 : DISTRIBUTION DES PARAMETRES B

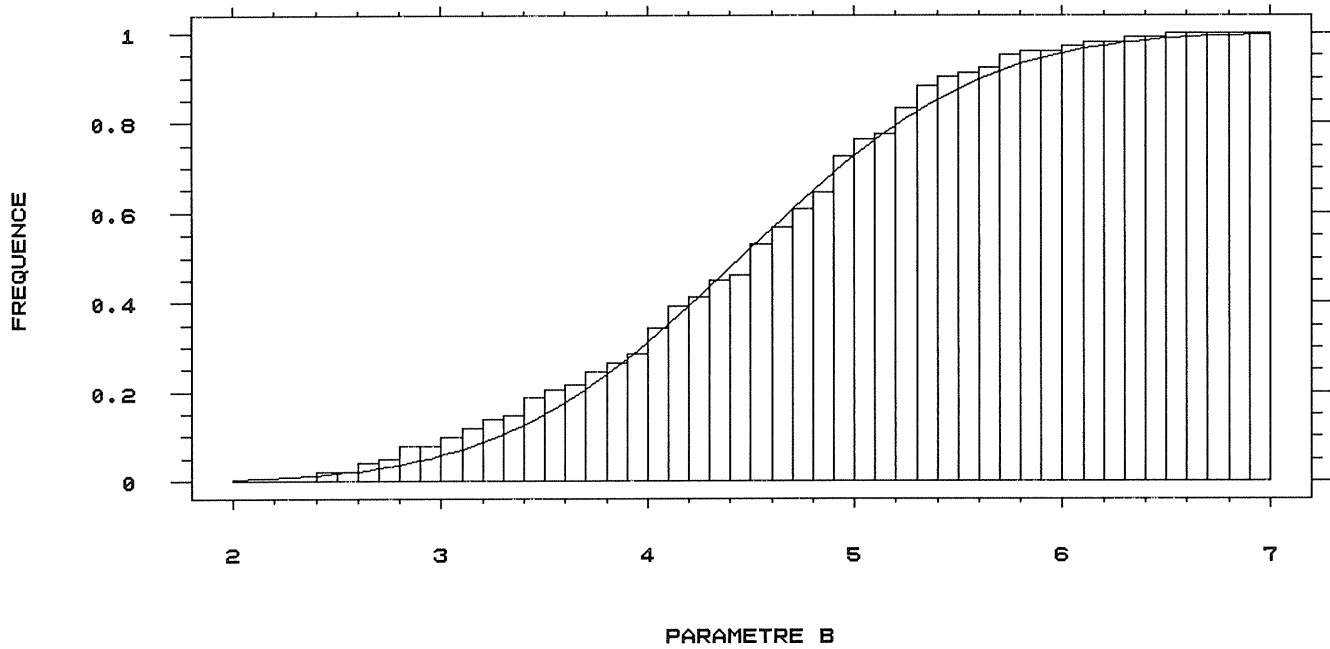


Fig. 62 : DISTRIBUTION DES PARAMETRES C

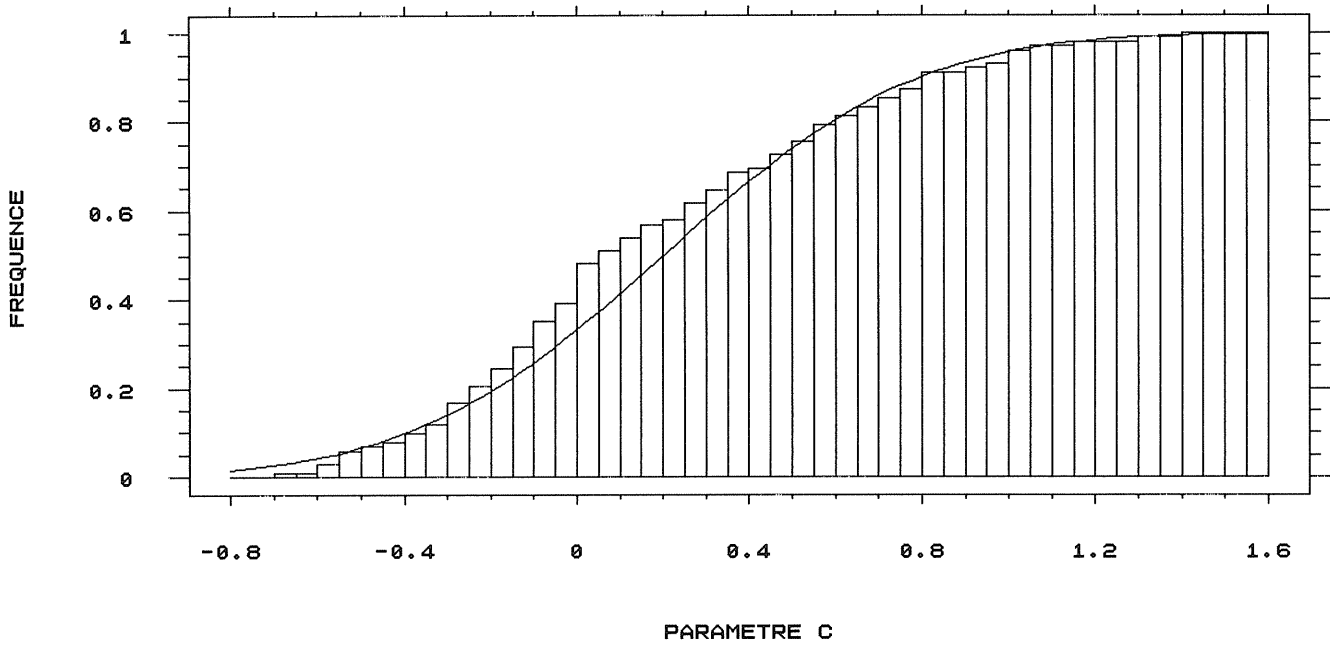
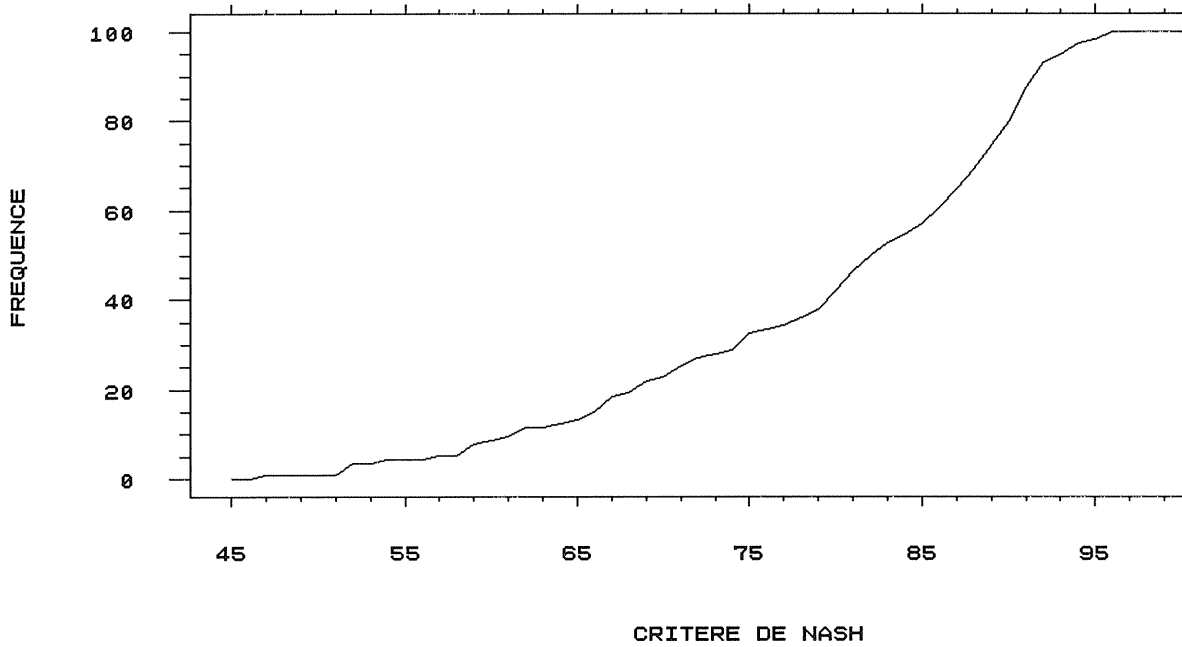


Fig. 63 : DISTRIBUTION DES CRITERES



Il est aussi intéressant de connaître les valeurs extrêmes du remplissage des réservoirs sol ( S/A ) et eau-gravitaire ( R/B ) de chaque bassin versant étudié. Dans le **tableau 38** ; nous pouvons voir la moyenne et l'écart-type ( 114 BV ) de ces niveaux extrême pour les deux réservoirs, et le **tableau 39** et l'**annexe 12** explicitent ces valeurs pour chaque bassin versant.

**Tableau 38 :**

Résultat des moyennes et écarts-types de traitement sur les 114 bassins versants.

CARACTERISTIQUE	MOYENNE	ECART-TYPE
Critère de NASH	79.40	11.78
Bilan global	- 0.59	16.35
Rapport des crues	81.36	20.44
Ratio durées des crues	0.92	0.37
Ratio durées des étiagas	- 0.14	0.51
ln (A)	5.71	0.92
ln (B)	4.40	1.06
ln (C)	0.19	0.46
Remplissage min. de S	0.20	0.16
Remplissage max. de S	0.92	0.09
Remplissage min. de R	0.32	0.03
Remplissage max. de R	0.82	0.14
Fraction max. du débit en provenance de l'EPD	0.60	0.09
Sa	0.12	0.10
Sb	0.13	0.07
Sc	0.08	0.06
Correction de P (multip.)	0.05	0.22
Nombre de bassins à 4 paramètres	39	
Moyennes mensuelles de 100 * S/A :		
81 84 81 74 64 53 41 34 36 49 60 71		

Sa , Sb , Sc = moyenne des écarts - types des paramètres A , B , C (114 BV)



**Table 39 :**  
**RESULTATS DE SIMULATION SUR 114 BASSINS VERSANTS**

CD = code du bassin étudié

P = nombre de paramètre

LNA = paramètre A (Ln)

ECA = écart-type du paramètre A

LNB = paramètre B (Ln)

ECB = écart-type du paramètre B

LNC = paramètre C (Ln)

ECC = écart-type du paramètre C

NASH = critère d'adéquation de NASH

BILN = erreur de bilan (/module M)

CRU = rapport des crues annuelles moyennes

DRCR = rapport des durées ou  $Q > 4 * M$

DRET = différence (en année) des durées ou  $Q > M/4$

SMI = remplissage minimum du réservoir S

SMA = remplissage maximum du réservoir S

RMI = remplissage minimum du réservoir R

RMA = remplissage maximum du réservoir R

TMA = fraction maximale du débit n'ayant pas passé par R

X4 = correction multiplicative de pluie

Nombre de bassins utilisant 3 paramètres : 75

Nombre de bassins utilisant 4 paramètres : 39

CD	P	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	NASH	BILN	CRU	DRCR	DRET	SMI	SMA	RMI	RMA	TMA	X4
0	3	5.23	.10	3.52	.18	-.03	.12	80.4	19.8	97.6	.71	-.03	.07	.94	.32	.89	.66	.00
1	3	6.07	.10	3.03	.16	.81	.06	69.5	-10.9	76.9	1.07	-.75	.29	.92	.40	.97	.38	.00
2	3	6.30	.04	4.88	.04	1.05	.03	91.6	-8.7	94.1	1.13	-.35	.35	.92	.34	.74	.45	.00
3	4	7.12	.15	4.71	.16	.65	.07	74.4	.8	79.2	.39	-.32	.45	.78	.33	.80	.57	-.16
4	3	6.15	.05	4.10	.06	1.18	.04	85.3	-14.0	84.1	1.13	-.26	.29	.91	.36	.81	.42	.00
5	3	1.48	.51	6.99	.12	.85	.10	56.5	10.2	.0	.00	-.10	.00	1.00	.29	.45	.63	.00
6	3	5.42	.07	5.72	.07	.79	.05	88.0	10.3	106.6	1.32	.73	.18	.99	.29	.64	.56	.00
7	3	5.16	.09	5.69	.09	.85	.07	86.8	11.0	107.3	1.00	.26	.15	.99	.29	.65	.54	.00
8	3	5.60	.04	4.86	.07	1.42	.03	91.0	7.2	106.4	1.19	-.02	.10	.94	.28	.71	.44	.00
9	3	5.12	.12	5.44	.20	-.66	.12	77.5	5.9	72.9	.60	-.32	.06	.97	.27	.57	.69	.00
10	3	4.58	.10	2.50	.13	-.11	.04	79.3	7.0	87.0	.95	-.06	.02	.98	.33	.99	.66	.00
11A	4	5.53	.09	2.84	.21	.91	.03	86.9	-18.0	70.4	1.12	-.33	.10	.91	.34	.95	.42	-.11
11B	3	5.48	.14	3.10	.29	.70	.08	63.8	-13.9	63.4	.87	-.22	.13	.90	.32	.88	.52	.00
12	4	5.57	.11	2.79	.15	.13	.11	79.3	-17.7	85.6	.94	-.99	.13	.91	.32	.96	.59	-.10
13	4	5.65	.06	4.39	.08	-.51	.02	92.4	-9.1	92.6	1.66	.08	.01	.96	.27	.95	.73	-.10
14	3	5.16	.09	3.50	.15	-.40	.05	51.1	17.9	56.3	.81	.52	.07	.98	.29	.94	.71	.00
15	3	4.79	.09	3.74	.15	-.46	.05	66.1	2.7	78.8	1.35	.61	.02	.99	.28	.91	.74	.00
16	4	5.22	.16	4.19	.17	-.25	.11	76.5	8.4	85.5	.91	-.21	.17	.97	.30	.78	.70	.24
17	3	6.75	.05	5.28	.04	.37	.04	91.0	6.6	89.2	1.17	-.26	.44	.86	.31	.74	.49	.00
18	3	5.78	.03	4.90	.06	-.56	.02	95.1	-10.4	101.9	1.09	-.05	.01	.97	.27	.92	.73	.00
19	3	5.84	.03	5.00	.07	-.54	.03	93.0	-8.8	92.1	.94	-.02	.01	.96	.27	.89	.73	.00
20	3	5.37	.05	2.86	.10	.05	.07	83.2	19.4	73.6	.79	.58	.06	.93	.31	.96	.74	.00
21	4	5.15	.13	2.44	.27	-.13	.10	70.7	-20.4	64.0	1.67	.01	.02	.92	.31	.99	.65	-.13
22	3	5.94	.04	4.98	.08	.53	.03	89.9	-12.3	101.7	.90	-.55	.12	.94	.28	.70	.65	.00
23	3	6.53	.13	5.23	.18	-.18	.28	51.4	-11.6	33.3	.09	-.01	.34	.67	.30	.47	.55	.00
24	3	6.17	.07	4.40	.06	.19	.08	80.2	2.7	97.5	.80	-.53	.24	.92	.33	.88	.50	.00
25	3	4.74	.05	4.57	.05	.03	.07	88.0	10.4	94.2	.88	.18	.03	.99	.27	.87	.74	.00
26	4	5.76	.16	5.32	.26	-.30	.13	61.8	.6	68.6	.60	-.61	.28	.95	.33	.65	.67	.20
27	4	5.73	.21	2.68	.27	-.04	.15	58.1	-29.9	52.5	1.51	-.56	.11	.89	.34	.94	.59	.00
28	3	5.23	.07	3.31	.10	-.21	.04	68.1	-.5	68.4	.89	-.41	.13	.96	.35	.97	.54	.00
29	3	6.71	.11	4.09	.04	.16	.07	86.8	2.8	84.8	1.23	.55	.53	.86	.36	.93	.58	.00
30	4	5.78	.08	4.52	.09	-.15	.05	85.4	4.2	90.5	.90	.05	.18	.94	.30	.83	.67	.18
31	3	5.27	.10	4.62	.15	-.07	.15	66.9	8.3	78.5	.56	-.09	.07	.95	.29	.76	.67	.00
32	3	6.04	.08	5.25	.07	.04	.09	87.0	15.0	86.5	.86	.34	.27	.92	.29	.65	.58	.00
33	3	4.73	.09	3.50	.13	-.28	.04	84.8	13.9	78.9	1.11	.58	.05	1.00	.35	.98	.60	.00
34	4	6.21	.10	5.86	.13	.01	.10	81.2	1.9	89.1	.91	.00	.53	.94	.34	.61	.52	.14
35	3	2.72	.49	5.24	.18	-.10	.40	73.4	14.8	65.3	.25	.18	.00	1.00	.33	.66	.61	.00
36	3	5.08	.19	3.85	.18	-.08	.16	80.6	-6.6	78.5	1.17	-.08	.19	.98	.34	.91	.52	.00
37	4	6.01	.04	3.80	.08	.57	.03	90.1	-8.2	89.2	.88	-.40	.15	.81	.31	.80	.58	-.17
38	3	5.98	.05	4.63	.08	.50	.04	87.5	5.8	87.0	.94	.08	.17	.89	.29	.71	.55	.00
39	3	5.96	.10	4.33	.07	.09	.15	89.9	-7.0	96.9	.97	-.43	.32	.96	.36	.89	.50	.00
40	4	5.43	.11	1.76	.16	-.09	.10	68.7	-58.9	75.0	1.55	-1.97	.04	.70	.32	.98	.72	1.39
41	3	6.72	.10	5.32	.09	.32	.09	67.6	5.3	29.1	.23	.08	.46	.80	.32	.58	.59	.00
42	4	5.22	.18	1.27	.38	.40	.05	60.8	-114.	64.3	3.09	-1.90	.05	.70	.33	.99	.59	1.57
43	3	5.46	.05	4.48	.07	.50	.02	88.4	-11.0	110.8	.79	-.72	.15	.98	.32	.82	.55	.00
44	3	5.27	.08	6.37	.08	-.20	.06	91.9	5.4	50.5	.57	.21	.13	.99	.27	.54	.64	.00
45	3	4.58	.19	6.12	.10	-.37	.12	86.4	-4.9	69.5	.92	-.23	.02	1.00	.29	.59	.69	.00
46	3	5.47	.07	6.60	.07	-.13	.08	90.2	-1.3	85.0	1.19	-.40	.14	.99	.27	.53	.77	.00
47	4	5.32	.06	3.48	.08	.52	.01	93.2	-1.3	86.4	.89	-.20	.07	.98	.30	.91	.64	-.21
48	3	5.74	.04	4.16	.06	.16	.08	91.7	-2.7	83.5	.98	-.33	.15	.91	.30	.83	.64	.00
49	4	6.04	.39	5.36	.26	.40	.16	65.6	-4.0	48.5	.83	-.53	.21	.88	.32	.72	.53	.28
50	4	6.01	.14	5.06	.19	.55	.05	77.2	-5.7	100.0	.52	-.63	.31	.94	.32	.77	.58	.18
51	3	5.19	.07	4.19	.04	.14	.07	90.3	10.8	84.4	.93	-.04	.21	.99	.35	.88	.59	.00
52	3	5.60	.06	3.95	.07	.28	.09	89.4	-7.3	103.2	.82	-.41	.21	.96	.35	.90	.53	.00
53	4	5.55	.08	4.04	.14	.44	.03	85.9	-20.4	93.4	.76	-1.38	.19	.85	.36	.85	.48	-.02
54	3	5.84	.05	4.54	.09	.05	.10	81.5	15.0	96.6	1.00	.52	.16	.90	.31	.76	.67	.00
55	3	5.83	.04	2.69	.15	.40	.02	84.4	-9.8	80.8	1.12	.38	.17	.87	.32	.99	.52	.00

56	3	6.32	.05	6.05	.06	.02	.07	71.1	10.7	.0	.00	.00	.32	.82	.29	.44	.64	.00
57	3	5.82	.06	3.50	.14	.34	.19	84.4	6.5	68.8	1.26	.38	.17	.82	.34	.92	.56	.00
58	4	5.38	.07	2.84	.11	.30	.09	78.2	-22.8	71.1	1.66	-.36	.08	.92	.33	.97	.59	-.07
59	3	5.12	.08	3.20	.16	.09	.10	66.3	12.0	75.5	1.03	.12	.07	.97	.32	.98	.69	.00
60	3	5.50	.06	3.18	.12	-.55	.03	81.4	-5.5	87.3	1.17	.28	.13	.98	.34	.99	.57	.00
61	3	5.86	.04	4.05	.05	-.16	.04	82.1	-6.6	74.7	1.25	-.27	.17	.95	.31	.88	.69	.00
62	3	5.80	.09	3.22	.14	-.06	.07	58.4	15.4	75.7	.66	.16	.10	.87	.33	.95	.59	.00
63	3	6.82	.07	5.30	.06	.37	.06	82.2	13.9	80.3	1.25	.02	.45	.82	.33	.67	.49	.00
64	3	5.60	.05	3.68	.10	.22	.12	89.4	15.3	94.9	.74	.24	.14	.86	.34	.84	.58	.00
65	4	5.38	.06	3.51	.07	-.04	.04	90.4	-9.5	94.2	.96	-.40	.07	.95	.31	.94	.68	-.11
66	4	6.84	.16	3.98	.12	-.26	.04	80.7	12.9	86.6	.91	.96	.59	.93	.39	.95	.50	.09
67	3	6.18	.08	4.55	.13	-.06	.13	90.2	-.7	88.3	1.13	-.15	.16	.94	.29	.80	.57	.00
68	3	5.50	.26	4.99	.08	.35	.23	80.3	12.8	85.0	.69	.13	.44	.99	.40	.88	.37	.00
69	4	5.13	.32	5.12	.17	-.13	.10	79.6	7.3	73.8	1.00	.01	.27	1.00	.37	.90	.50	.19
70	4	6.04	.27	5.30	.22	-.25	.09	88.1	-2.9	92.1	.86	-.19	.54	1.00	.38	.89	.42	.31
71	3	5.40	.20	5.32	.10	.11	.13	82.0	12.9	100.8	.64	-.39	.37	1.00	.38	.90	.53	.00
72	3	4.47	.14	4.52	.11	.02	.14	71.8	6.2	84.0	.84	-.13	.02	1.00	.34	.87	.56	.00
73	3	4.85	.18	4.24	.11	-.22	.05	74.6	19.8	101.2	.67	.21	.13	1.00	.37	.97	.57	.00
74	3	5.41	.09	3.26	.08	-.22	.04	79.6	-7.9	84.7	.97	-.24	.26	.98	.41	.97	.50	.00
75	3	6.02	.09	4.57	.05	-.05	.05	90.7	-8.2	89.7	.91	-.04	.28	.95	.34	.86	.54	.00
76	4	6.28	.17	4.91	.25	.04	.14	71.0	1.5	88.9	.75	-.49	.46	.90	.35	.76	.51	-.13
77	4	6.32	.56	5.03	.25	-.50	.10	51.5	13.6	74.5	.55	-.28	.71	.99	.37	.88	.44	.26
78	3	4.29	.32	5.74	.14	-.29	.08	83.4	15.0	93.4	.77	-.04	.00	1.00	.30	.80	.74	.00
79	4	7.12	.06	5.01	.14	.04	.09	79.5	7.3	85.9	.85	.00	.30	.71	.32	.69	.66	.18
80	4	8.15	.42	4.50	.35	-.26	.16	65.1	-19.2	67.1	.89	-1.35	.55	.79	.34	.92	.63	.39
81	4	7.01	.11	1.43	.37	-.37	.05	53.1	-3.8	60.5	1.19	-.14	.14	.41	.30	.96	.75	.14
82	4	3.94	.20	4.72	.23	-.36	.11	46.5	-9.3	48.5	.89	-1.01	.00	.99	.27	.84	.82	.21
83	4	9.99	.51	4.80	.13	-.70	.07	85.9	-9.5	92.7	.97	-.24	.46	.79	.29	.89	.68	-.17
84	4	7.23	.17	4.74	.17	-.10	.11	72.9	-8.1	79.7	1.05	-.50	.32	.82	.30	.86	.77	.36
85	3	5.38	.05	4.20	.07	-.32	.05	61.9	7.9	57.7	1.15	.13	.01	.93	.28	.89	.78	.00
86	3	5.71	.13	4.01	.16	.27	.23	58.5	13.8	94.2	.51	.06	.27	.93	.36	.87	.55	.00
87	4	5.53	.14	3.87	.20	.57	.05	66.3	10.4	95.6	.58	-.22	.25	.97	.36	.91	.53	.08
88	3	5.22	.09	4.30	.14	.70	.08	64.6	18.7	101.3	.46	-.38	.13	.97	.31	.79	.64	.00
89	4	5.61	.08	4.67	.14	1.01	.03	78.5	-1.0	102.7	.78	-.48	.26	.97	.33	.75	.54	.16
90	4	5.82	.15	4.74	.20	.57	.05	68.8	3.5	114.3	.47	-.24	.35	.90	.34	.73	.53	.14
91	4	6.47	.10	5.80	.13	-.18	.11	82.9	.4	64.6	.84	-.30	.44	.93	.31	.61	.61	-.12
92	3	4.64	.13	5.10	.09	.10	.17	89.0	-2.2	105.0	.83	-.10	.06	1.00	.32	.75	.60	.00
93	3	8.10	.19	6.93	.04	.14	.07	59.3	1.7	.0	.00	.00	.63	.78	.28	.37	.63	.00
94	3	6.34	.03	4.97	.04	.81	.04	93.5	-12.8	85.7	1.14	-.51	.30	.87	.32	.76	.59	.00
95	3	5.61	.04	4.32	.06	1.07	.03	89.1	15.9	106.8	.86	.78	.12	.92	.29	.80	.53	.00
96	4	5.84	.07	4.58	.07	.57	.03	89.8	1.2	89.7	.92	-.23	.34	.96	.37	.85	.50	.14
97	3	5.89	.08	5.45	.13	.47	.06	74.3	9.1	69.6	.76	.85	.04	.81	.26	.56	.75	.00
98	4	5.53	.08	4.11	.11	-.06	.04	90.4	6.7	87.3	.98	.03	.18	.98	.34	.93	.57	.14
99	3	5.72	.05	3.78	.07	.62	.03	88.7	18.0	89.7	.85	.98	.11	.97	.30	.90	.59	.00
A0	3	5.86	.03	4.94	.04	.75	.03	91.9	18.2	100.0	.97	.67	.19	.93	.30	.79	.61	.00
A1	3	6.20	.04	4.70	.06	.76	.04	91.3	-6.2	86.6	.89	-.66	.29	.92	.30	.73	.54	.00
A2	4	6.15	.07	5.00	.08	.28	.07	87.6	11.4	82.0	1.17	1.01	.31	.92	.33	.79	.53	.08
A3	4	5.97	.08	4.09	.11	.82	.07	89.0	-17.1	84.8	1.15	-1.00	.15	.78	.30	.75	.58	-.38
A4	3	6.58	.06	5.00	.05	1.01	.03	94.3	-11.2	85.5	1.17	-.17	.39	.82	.31	.63	.48	.00
A5	3	6.00	.03	5.27	.04	.96	.01	94.0	-17.1	101.1	1.10	-1.13	.17	.92	.28	.76	.58	.00
A6	3	6.18	.03	4.88	.04	1.32	.02	95.8	2.1	97.4	.85	-.36	.26	.88	.30	.79	.52	.00
A7	3	5.37	.07	5.32	.10	-.03	.08	87.6	-13.6	90.5	1.00	-.33	.06	.99	.26	.71	.70	.00
A8	3	5.00	.06	5.52	.05	.74	.05	91.4	13.1	94.2	.77	.29	.05	.99	.28	.73	.61	.00
B0	4	5.94	.11	4.99	.11	.11	.10	88.2	5.8	101.0	.81	.42	.12	.97	.28	.93	.66	.15
B3	3	5.62	.10	3.34	.29	.40	.05	74.7	4.0	68.7	.96	-.05	.10	.93	.32	.95	.59	.00
B4	3	5.57	.11	3.44	.19	.03	.11	70.5	-5.6	73.6	.95	-.45	.09	.93	.32	.93	.69	.00
B5	3	5.44	.10	3.34	.17	.10	.12	75.4	-7.0	77.6	1.08	-.41	.07	.95	.31	.95	.69	.00
CD	P	LNA	ECA	LNB	ECB	LNC	ECC	NASH	BILN	CRU	DRCR	DRET	SMI	SMA	RMI	RMA	TMA	X4

## 5.9 LIAISON PARAMETRES - VARIABLES MORPHOCLIMATIQUES

Ce paragraphe concerne une tentative "d'explication" des paramètres en fonction des caractéristiques morphoclimatiques sélectionnées dans la **quatrième partie** de cette thèse:

SF = superficie du bassin (km<sup>2</sup>)

PJ = pluie journalière de fréquence décennale (mm)

PA = pluie annuelle moyenne (mm)

TA = température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C)

Pour éviter d'introduire des valeurs peu sûres, nous avons choisi d'exclure les bassins ayant des critères de NASH inférieurs à 70%. De plus, comme on manque de données climatiques pour les 4 nouveaux bassins, les régressions seront établies sur un échantillon ne comportant que 82 bassins selon la procédure présentée au **paragraphe 4.4.3**.

Il existe une très faible liaison entre le paramètre A et les variables morphoclimatiques disponibles. La "meilleure" régression est présentée par l'équation suivante (voir **tableau 40**):

$$A = \frac{(SF)^{0.12} (TA)^{2.07}}{1.03}$$

avec :

- erreur standard (\* ÷) = 1.75

- coefficient de détermination = 0.19

A = capacité maximale du réservoir sol (mm)

SF = superficie (km<sup>2</sup>)

TA = température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C)

Formule de régression de ln (A)	Coeff. de détermin.	Erreur standard	Coeff. de régression	Rapport de Student
a1 +			- 0.03	0.0
a2 ln SF +	0.19	0.56	0.12	3.3
a3 ln TA			2.07	3.0

**Tableau 40 :**

Résultat de la régression du paramètre A en fonction de certaines variables morphoclimatiques

Pour le paramètre B, nous avons trouvé une régression sensiblement plus nette que celle obtenue pour A.

D'après le **tableau 41**, la liaison entre le paramètre B et les variables morphoclimatiques peut s'écrire :

$$B = \frac{(SF) 0.16 \quad (PA) 1.39}{300}$$

avec :

- erreur standard (\* ÷) = 2.18
- coefficient de détermination = 0.28

B = capacité maximale à un jour du réservoir eau- gravitaire (mm)

SF = superficie du bassin (km<sup>2</sup>)

PA = pluie annuelle moyenne (mm)

Cette régression est plus significative que celle obtenue antérieurement (**paragraphe 4.4.3.2**).

Formule de régression de ln (B)	Coeff. de détermin.	Erreur standard	Coeff. de régression	Rapport de Student
a1 +			- 5.72	2.8
a2 ln SF +	0.28	0.78	0.16	3.0
a3 ln PA			1.39	4.7

**Tableau 41 :**

Résultat de la régression du paramètre B en fonction de certaines variables morphoclimatiques

Parmi les 3 paramètres c'est le paramètre C qui conduit à la meilleure liaison avec les variables morphoclimatique :

$$C = 0.5 + \frac{15 (SF) 0.21}{(PA) 0.50}$$

avec : - erreur standard (\* ÷) = 1.33

- coefficient de détermination = 0.64

C = temps de montée des hydrogrammes unitaires (jour)

SF et PA = superficie et pluie annuelle moyenne (km<sup>2</sup>, mm)

Formule de régression de ln (C)	Coeff. de détermin.	Erreur standard	Coeff. de régression	Rapport de Student
a1 +			2.67	3.6
a2 ln SF +	0.64	0.28	0.21	11.0
a3 ln PA			- 0.50	4.6

**Tableau 42 :**

Résultat de la régression du paramètre C en fonction de certains variables morphoclimatiques.

La conclusion du paragraphe 4.4.3.4 reste valable: les trois liaisons, notamment celles concernant les paramètres A et B, restent encore d'une efficacité très limitée pour estimer la transformation pluie - débit sur un bassin versant non jaugé. Chercher une meilleure explication des paramètres ( A et B en particulier ) devrait conduire à une somme de recherches beaucoup plus importante que ne le permet le cadre restreint d'une thèse. Il s'agirait également d'un travail pluridisciplinaire devant faire intervenir de nombreuses équipes ayant une connaissance approfondie du terrain.

# **SIXIEME PARTIE**





## PRESENTATION DU MODELE GR3J

Pour être mises en oeuvre, l'architecture et la philosophie du modèle GR3J sont traduites informatiquement sous langage FORTRAN ( annexe 15 ). Le fonctionnement du modèle est décrit dans un code formé d'un programme principal et de 19 sous-programmes présentés dans l'organigramme de la figure 64 .

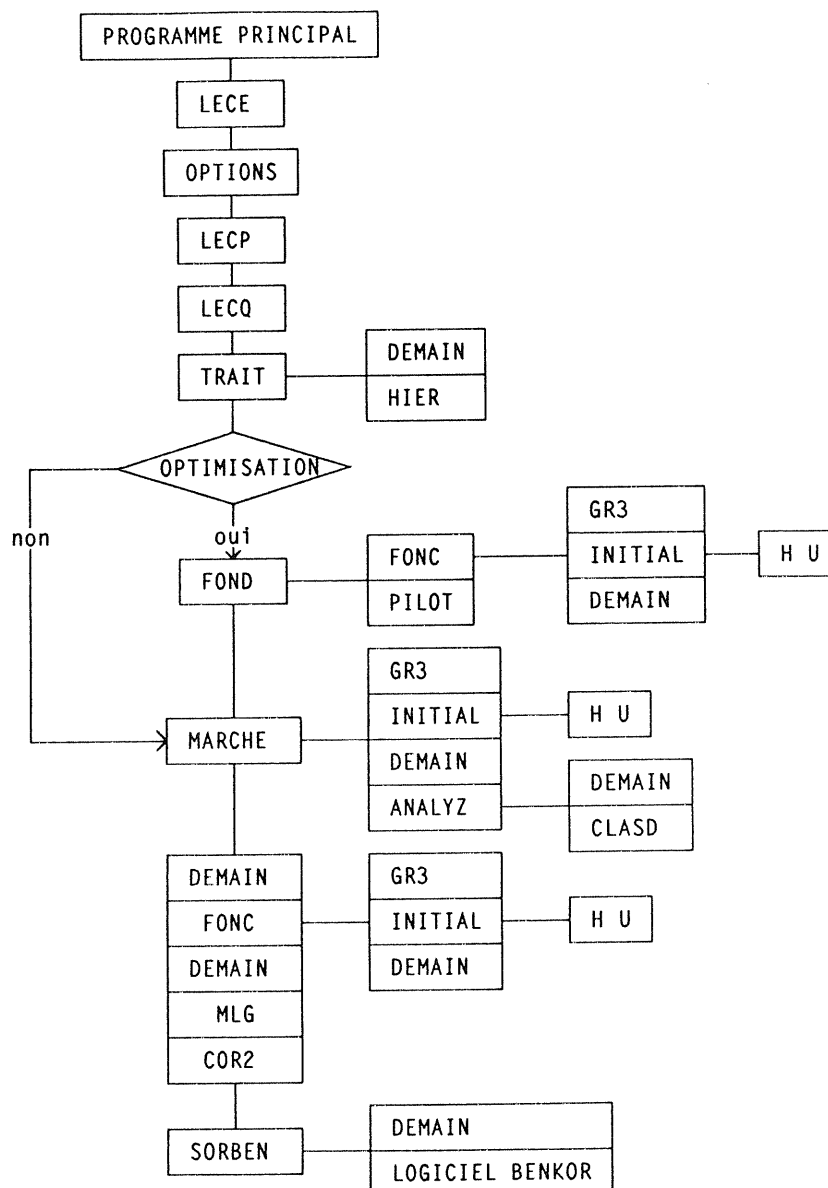


Figure 64 : Organigramme du modèle GR3J

## 6.1 LE PROGRAMME PRINCIPAL

Le programme principal commandant le fonctionnement de la simulation demande d'abord à l'utilisateur d'introduire le nom des fichiers où se trouvent des indications sur les bassins versants étudiés. Sur ce fichier on doit trouver :

colonnes	1 - 7	: nom du fichier des données d'ETP.
	21 - 27	: nom du fichier des données de pluie.
	41 - 47	: nom du fichier des données de débit.
	62 - 63	: année de début de la simulation.
	65 - 66	: année de fin de la simulation.
	69	: 0 si l'on optimise les paramètres. 1 si l'on n'optimise pas les paramètres.
	72	: 0 si l'on ne veut pas corriger l'ETP. 1 si l'on veut corriger l'ETP.

Exemple : le nom du fichier : TEST.DAT

E00	P00	Q00	81 83 0 0
E08	P08	Q08	73 77 0 0

E00, P00, Q00 : les noms de fichiers de données du bassin de l'Orgeval au Theil.  
E08, P08, Q08 : les noms de fichiers de données du bassin de Bar - sur - Seine.

La longueur de la chronique des données à simuler est délimitée par l'année de début et l'année de fin de la simulation, avec une limite, aisée à modifier, de 5 ans.

Il est recommandé d'utiliser une année entière pour la période de mise en route, pour y inclure en totalité une saison sèche et une saison humide. Dans le cas particulier où la chronique des données est très courte (< 2 ans), il est possible de supprimer cette période de mise en route, et d'optimiser (ou de fixer) le niveau initial du réservoir S, qui est le paramètre X(6).

Le programme fonctionne pour la simulation ou en calage. Dans le cas d'un bassin jaugé, deux façons de simuler peuvent être réalisées : avec ou sans optimisation des paramètres. Pour la première façon, les paramètres initiaux proposés par le programme (ou introduits par l'opérateur, sur sa demande) vont

être optimisés. En simulation, le programme utilise seulement les valeurs introduites par l'opérateur. C'est ainsi que l'on procède pour les bassins versants non jaugés.

Bien que le programme corrige les données de pluies de façon automatique (voir le sous-programme PILOT) dans certaines conditions, on peut toujours imposer un certain facteur global de correction systématique des entrées.

Le programme principal ouvre ensuite le fichier de l'ETP, dans lequel est écrit le nom du bassin correspondant.

Il appelle à la suite les sous-programmes :

- OPTIONS
- LECP
- LECQ
- TRAIT
- FOND ; s'il y a l'optimisation des paramètres,  
sinon il passe aux appels suivants :
- MARCHE
- DEMAIN
- FONC
- DEMAIN
- MLG
- COR2 ; s'il n'y a qu'un seul bassin à traiter.
- SORBEN ; s'il n'y a qu'un seul bassin à traiter.

Le programme principal affiche les résultats sommaires de la simulation à l'écran, et des résultats plus complets dans un fichier GR3J.LST qui comprend entre autres :

- paramètres optimaux
- statistiques des paramètres :
  - écart - type
  - matrice des variances - covariances
- critère d'appréciation de NASH
- autres résultats complémentaires.

Un autre fichier, GR3J.RES, décrit les résultats sous forme compacte et, s'il y a plusieurs bassins à traiter, contient les valeurs moyennes et écarts - types pour certains résultats sur l'ensemble des bassins étudiés ( paramètres optimaux, critère de NASH, ..... ).

Le fonctionnement des sous-programmes est décrit dans les paragraphes qui suivent.

## 6.2 LES SOUS-PROGRAMMES

### 6.2.1 *LES SOUS-PROGRAMMES DE LECTURE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES : LECE, LECP, LECQ, TRAIT, HIER ET DEMAIN*

Le sous-programme LECE est chargé de lire le fichier de données de l'ETP contenant des valeurs décadaires moyennes interannuelles. Le programme permet de désagréger les 36 valeurs, qui sont en dixième de mm, pour obtenir des valeurs journalières en mm. Le modèle GR3 utilise ces valeurs de façon répétitive chaque année.

C'est dans le fichier de l'ETP que l'on écrit le nom du bassin correspondant. Ce fichier est ouvert par le programme principal. L'annexe 16.2 présente un exemple de fichier de l'ETP.

Le sous-programme LECP lit le fichier de données des pluies qui sont formatées en décade. Chaque ligne de fichier contient une décade (dix à onze valeurs), avec en début de chaque ligne l'indication de l'année, du mois et du rang de la décade. Chaque valeur est suivie d'un indice de validité codé selon les normes de la Météorologie Nationale. Par exemple :

8 : cumul des pluies non répartis  
 9 : neige  
 blanc : observation manquante.

LECP majore automatiquement les données de pluies de 5% pour tenir compte du défaut systématique de captation des pluviomètres. Le fonctionnement du programme s'arrêtera si la durée des données est inférieure à deux fois celle de la période de mise en route. Voir l'annexe 16.2 représentant un exemple de fichier de pluie.

LECQ est le programme de lecture du fichier des débits. Les données, en 1/100 mm de l'âme d'eau, sont à raison d'une quinzaine par ligne, avec indication de l'année, du mois et du rang de la quinzaine. Le programme s'arrêtera, si la chronique des débits est plus courte que deux fois la période de mise en route. Un exemple du fichier de données de débits est présenté dans l'annexe 16.2 .

TRAIT traite le problème des données de pluies cumulées et des périodes de précipitation neigeuse. Selon la description d'enregistrement de la Météorologie Nationale, les cumuls des pluies non répartis sont codés 8, et correspondent à la somme des pluies manquantes codées 0. Le programme répartit le cumul de façon globale et uniforme et la période de débits correspondant est mise en lacune, ainsi que les 10 jours qui suivent. Les débits faisant suite à une période de neige sont également mis en lacune.

Les deux derniers sous-programmes HIER et DEMAIN permettent de donner les jour, mois et année, respectivement du jour précédent et du jour suivant. Lorsque le numéro du jour ne change pas dans cette opération, cela signifie que l'on a atteint une limite du fichier.

### 6.2.2 LE SOUS-PROGRAMME OPTIONS

Dans une version antérieure, OPTIONS mènait le dialogue avec l'utilisateur, auquel il est demandé d'introduire certains chiffres ou de répondre aux choix proposés par le programme qui concernent le fonctionnement et l'initialisation du modèle. Dans la version la plus récente, le sous - programme fixe les valeurs initiales des paramètres.

### 6.2.3. *LES SOUS-PROGRAMMES D'OPTIMISATION : FOND ET PILOT*

Le programme FOND est chargé de l'optimisation des paramètres. Il est appelé par le programme principal lorsque les paramètres doivent être optimisés.

FOND appelle le sous-programme FONC qui calcule la somme des carrés des erreurs, et le sous-programme PILOT qui modifie éventuellement l'optimisation.

Dans notre recherche, nous utilisons une méthode d'optimisation dite "**pas-à-pas**", dont une description est présentée dans l'**annexe 3.3** . Il s'agit d'une progression le long de la ligne de plus grande pente de la fonction critère.

Au cours de l'optimisation, le sous-programme FOND appelle PILOT qui modifie l'optimisation sous certaines conditions. Lorsque l'optimisation arrive à un pas de recherche inférieur à 0.04 , et que :  $\sum | Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}} | / \sum Q_{\text{obs}} \geq 20\%$  , ou que critère de NASH < 50 % , le sous-programme PILOT introduit une correction multiplicative, à optimiser, des données de pluies.

On considère que, dans la grande majorité des cas, les gros écarts sur le bilan et sur la fonction critère peuvent être corrigés par cette simple mesure de correction des pluies. A l'utilisateur de décider s'il doit interpréter cette démarche comme l'introduction d'un quatrième paramètre ou simplement la correction d'une entrée entachée d'une erreur systématique.

### 6.2.4 *LES SOUS-PROGRAMMES DE SIMULATION : FONC, INITIAL, HU, ET GR3*

FONC génère des débits sur la période prescrite pour un jeu de paramètres données. Il calcule en outre **l'erreur quadratique pour l'optimisation** et le bilan global. En début de simulation, il appelle INITIAL pour initialiser le système, puis il appelle le sous-programme GR3 à chaque pas de temps.

**Lorsque le programme rencontre des lacunes dans les pluies, le système est réinitialisé et une nouvelle période de mise en route est introduite.**

C'est dans le sous-programme INITIAL que les trois opérateurs (réservoir-sol (S), hydrogramme unitaire et réservoir eau-gravitaire (R)) sont initialisés :

- Le réservoir-sol (S) est initialisé selon le mois du démarrage de la simulation, conformément à des résultats statistiques obtenus lors des premiers calages réalisés ( **annexe 6** ).
- Le réservoir eau-gravitaire (R) est initialisé en inversant la loi de vidange du réservoir quadratique et en tenant compte du premier débit observé.
- L'hydrogramme unitaire est calculé par le sous - programme HU en fonction du paramètre C. Les pluies nettes antérieures issues de l'hydrogramme unitaire sont initialisées à 0.

Le sous-programme GR3 calcule le débit journalier au jour j recevant la pluie P(j) selon le modèle GR3.

#### 6.2.5 LES SOUS-PROGRAMMES D'EVALUATION : MARCHE, ANALYZ ET CLASD

En principe, le sous-programme MARCHE a la même fonction que FONC; il fait fonctionner GR3 sur une chronique des données de pluie et calcule le critère et le bilan.

En plus, MARCHE fournit les éléments suivants :

- distribution statistique des valeurs de (S/A) ( il est intéressant de connaître la façon donc " respire" ce réservoir )
- niveaux maximum et minimum de remplissage des réservoirs S et R
- moyennes et écarts-types mensuels de (S/A)
- bilan hydrique (somme des erreurs sur la somme des débits observés)
- critère d'appréciation de NASH.
- le taux maximal d'écoulement pseudo - direct

Pour cette simulation, MARCHE appelle GR3 avec les trois paramètres A, B et C, déterminés par FOND s'ils sont optimisés, ou fixés lors de l'initialisation.



Enfin, MARCHE appelle ANALYZ qui complète l'analyse des résultats et calcule pour la série observée et pour la série simulée :

- la crue annuelle moyenne
- la durée où le débit > quatre fois le module observé
- la durée où le débit < quart du module observé

ANALYZ utilise le sous-programme CLASD de classement dans l'ordre décroissant d'une suite finie de nombres.

**Remarque :**

*Le rapport des crues :*

C'est le rapport des valeurs calculée et observée de la moyenne inter-annuelle des plus fortes crues annuelles.

*Les rapports de durées :*

L'expérience acquise au CEMAGREF montre qu'il est commode de définir la crue et l'étiage par rapport au module inter-annuel de l'écoulement. On définit arbitrairement la crue comme un écoulement dont le débit est supérieur à quatre fois le module inter-annuel, et l'étiage comme une période où le débit est inférieur au quart du module inter-annuel. De ces définitions on peut définir le rapport des valeurs calculées et observées de :

- la durée de crue  $Q > 4 * M$
  - la durée d'étiage  $Q < M / 4$
- où M est la moyenne des débits observés sur la chronique testée.

#### 6.2.6 LE SOUS-PROGRAMME DE SORTIE GRAPHIQUE : SORBEN

SORBEN commande l'utilisation du logiciel de dessin BENKOR et prépare la série continue des graphiques de données observées et simulées sur une période de 4 mois.

### 6.2.7 *LES SOUS-PROGRAMMES DE REGRESSION MULTIPLE : MLG ET COR2*

MLG établit une régression linéaire multi variable et COR2 trace le graphique de corrélation totale.

Ces deux sous - programmes sont appelés pour calculer la matrice des variances - covariances des paramètres et permettent donc d'analyser leur sensibilité.



# CONCLUSION GENERALE



## CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail de trois ans concernant la mise au point d'un modèle de base pour décrire la transformation pluie - débit d'un bassin versant, on peut proposer un outil extrêmement simple, utilisable par tous, et ne nécessitant aucun des longs travaux préliminaires souvent requis pour faire fonctionner les modèles actuellement opérationnels. Il est vraisemblable que d'autres solutions existent pour approcher grossièrement le problème de la transformation pluie - débit sous des climats tempérés comme c'est le cas de la France. Il serait souhaitable que de telles alternatives soient recherchées et que l'on puisse les comparer et continuer sur des bases encore plus solides. Toutefois, le modèle GR3J présente déjà des caractéristiques intéressantes de simplicité et d'efficacité. On a présenté la distribution de ses performances sur environ 114 bassins versants appartenant au territoire métropolitain, ce qui permet à l'utilisateur de mieux apprécier la valeur exacte de l'outil proposé.

La thèse développée dans ce rapport a consisté à affirmer que les modèles conceptuels globaux ne pouvaient pas tirer leur justification d'une référence explicite aux processus élémentaires de la mécanique des fluides, qui prennent place dans le milieu traditionnel complexe que constitue un bassin versant. La part de raisonnement physique est donc excessivement réduite pour ne pas dire inexistante. L'architecture de tels modèles est seulement beaucoup plus libre que celle des modèles linéaires, dont le fondement mathématique a assuré le succès que nous leur connaissons. C'est cette liberté de conception dont il faut profiter pour imaginer un mécanisme imitant le mieux possible par ses sorties les écoulements que l'on observe à l'aval des bassins versants naturels. L'envers de cette liberté de manoeuvre est l'absence de lignes directrices qui auraient permis de baliser le chemin à parcourir et d'avancer avec certitude vers l'objectif que nous nous sommes fixés. Bien au contraire, il a fallu défricher un très grand nombre de pistes possibles en remettant en cause chacune des spécifications considérées chaque fois qu'une composante du modèle était modifiée. Cela a entraîné un nombre énorme d'essais parfois proches les uns des autres et dont la présentation peut paraître un peu laborieuse. C'est cependant le prix à payer

pour garantir une certaine consistance aux dispositions prises pour construire le modèle GR3J. Cette tâche est d'autant plus laborieuse qu'elle a du être répétée pour un nombre suffisant de bassins versants. La difficulté à réunir les données (la thèse a débuté avant la mise en fonctionnement opérationnel des banques PLUVIO et HYDRO ) n'a pas permis de tester systématiquement toutes les variantes sur les 114 bassins effectivement étudiés. Néanmoins, on s'est attaché à valider chaque décision sur un nombre suffisant de bassins, ce qui nous permet de garantir une certaine adéquation du modèle aux conditions qui prévalent en France.

La dernière partie de la thèse permet de supposer que l'explication des paramètres en fonction des caractéristiques des bassins, tout juste ébauchée, sera une tâche difficile et exigeant une recherche patiente parmi les nombreux descripteurs potentiels.

En définitive, on peut penser que les deux objectifs qui ont permis de clore l'introduction ont été atteints par la proposition du modèle élémentaire GR3J :

- *il peut constituer une bonne base de départ pour construire un modèle plus adéquat pour une utilisation ou un bassin versant particulier.*
- *il peut servir de référence pour apprécier les progrès apportés par d'autres approches de la modélisation pluie - débit.*

# **RESUME ETENDU**





## RESUME ETENDU

L'étude de la transformation des pluies en débits à l'exutoire d'un bassin versant et la modélisation de ce processus est une des préoccupations majeures des hydrologues. De nombreuses recherches ont été réalisées et sont encore réalisées dans ce domaine. Nous nous limiterons dans ce qui suit à la modélisation au pas de temps journalier.

La plupart des modèles pluies-débits utilisent de nombreux paramètres pour décrire cette transformation. Certains de ces paramètres sont parfois présentés comme pouvant être estimés à partir des caractéristiques du bassin, mais la majorité d'entre eux, doivent être estimés indirectement en utilisant les données des séries hydrologiques observées. En général, ces recherches ont porté sur des modèles empiriques bien que leurs auteurs aient considéré qu'ils y introduisaient un grand nombre de notions issues de l'hydraulique à surface libre ou des milieux poreux. Les modèles proposés sont à classer parmi les modèles conceptuels avec éventuellement la prise en compte de l'irrégularité spatiale des entrées et/ou des processus. En cherchant à incorporer dans ces modèles des notions a priori sur les dynamiques de l'eau, on a obtenu des structures dépendant d'un grand nombre de paramètres ( en général plus de dix ) et l'on a trop facilement accepté d'emblée certaines dispositions qui étaient justifiées par leur conformité à nos schémas mécanistes.

La thèse principale de notre recherche est d'affirmer que ce type de modèle ne sera jamais mieux qu'empirique car la justification physique de certaines de ses parties est de peu de poids devant l'organisation spatiale des différents éléments constitutifs d'un bassin versant, représentant un système complexe dont une très faible partie seulement est accessible à un coût raisonnable. Dans ces conditions, aucune disposition d'un modèle ne peut se prévaloir d'une garantie physique quelconque et chacune doit chercher sa justification dans une plus grande efficacité à reproduire les séries des débits observés. L'utilisation d'un modèle ayant de nombreux paramètres présente

l'inconvénient d'une grande difficulté d'emploi pour les praticiens et cela généralement sans la compensation d'une plus grande précision.

Nous avons entrepris de rechercher un modèle pluies-débits ayant les propriétés suivantes :

- commodité de calage d'où la nécessité d'un modèle parcimonieux
- généralité d'emploi impliquant un modèle robuste
- clarté de fonctionnement exigeant un modèle très simple
- simplicité dans l'acquisition des données ce qui suppose un modèle global
- applicabilité à des bassins non jaugés ce qui interdit un nombre de paramètres trop important (seulement 3 ou 4).

En 1983, en s'inspirant du modèle CREC ( CORMARY et GUILBOT, 1969 ), C.MICHEL ( CEMAGREF ) a esquissé un modèle conceptuel très simple à deux paramètres, utilisant des données de pluies et des données d'évaporations liées uniquement à la température. Pour satisfaire aux objectifs poursuivis, ce modèle a été amélioré en 1987 ( EDIJATNO, 1987 , mémoire de DEA ). Ce travail, constituant une réflexion préliminaire aux travaux ultérieurs, a porté essentiellement sur le bassin versant de l'Orgeval ( Seine et Marne ) géré par le CEMAGREF. Ce modèle, dénommé GR2, repose sur deux fonctions matérialisées par deux réservoirs :

- **Une fonction de rendement**, dépendant d'un seul paramètre qui est la capacité d'un réservoir dit réservoir-sol (S).
- **Une fonction de transfert**, dépendant d'un deuxième paramètre qui caractérise le fonctionnement d'un deuxième réservoir dit réservoir eau-gravitaire (R).

A la suite de ce travail, il apparaissait qu'une recherche de plus grande envergure devait être menée pour juger de la valeur d'un modèle global aussi simple face à la grande variété des situations hydrologiques.

Au cours d'une première année de recherche, commencée en octobre 1987, une trentaine de bassins versants ont pu être utilisés pour tester le modèle GR2. Des modifications ont dû être apportées au modèle et aux logiciels, en vue

de les améliorer pour résoudre les problèmes rencontrés. Le modèle GR2 comprenait en fait 3 paramètres, dont le troisième déterminait une sorte de temps de réponse et prenait des valeurs entières positives ou nulles. Ce temps de réponse correspondait à un décalage dans le temps pour l'introduction de la pluie nette dans le réservoir R. En étudiant ces premiers bassins disponibles, on s'est aperçu que la fonction de transfert, traduite par le réservoir R et par des décalages dans le temps, était trop sommaire et manquait de souplesse. Il était donc nécessaire d'afficher clairement ce troisième paramètre et de lui faire jouer un rôle à part entière. Après réflexion, il est apparu que l'opérateur hydrogramme unitaire permettait de simuler le temps de montée des réactions sous la forme d'un temps d'accès au réservoir eau-gravitaire.

A partir de ce moment, comportant explicitement trois paramètres, le modèle a été dénommé **GR3**. L'architecture du modèle se compose donc de deux réservoirs et d'un hydrogramme unitaire :

- **le réservoir-sol**, ayant comme seule sortie le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage ;
- **un hydrogramme unitaire**, décrivant la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir qui est :
- **le réservoir eau-gravitaire**. Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie les débits de la rivière et sa loi de vidange est de type quadratique.

Cette première version du modèle GR3 est apparue assez souple et commode pour mériter une analyse plus approfondie. Cette analyse a conduit tout d'abord à modifier la fonction de rendement de l'évaporation afin de mieux représenter la faiblesse de la réduction de l'évaporation potentielle en évaporation réelle lorsque l'on est proche de la saturation du réservoir-sol. L'étude de la sensibilité du modèle aux erreurs sur les entrées a montré l'importance d'une juste détermination de la pluie sur le bassin. On a également remis en cause le calcul de l'évapotranspiration potentielle à partir des températures journalières. Cette estimation de l'ETP est assez grossière et la

formule varie selon la région. Compte-tenu de l'extrême simplicité du modèle, on a choisi d'utiliser des valeurs moyennes interannuelles, et retenu les estimations de l'ETP par la formule de PENMAN données en certains postes. Les valeurs décennales moyennes sur la période 1951-1980, ont été obtenues auprès de la météorologie nationale et désagrégées pour déterminer des valeurs journalières. Cette modification n'a pas diminué l'efficacité du modèle tout en simplifiant considérablement l'obtention des données. Le modèle GR3 est prévu pour exprimer la transformation pluie-débit exclusivement. La présence de neige peut poser problème : le modèle est très fortement perturbé au delà de 25 jours par an de chute de neige. Le modèle accepte sans trop de difficulté dans la période de calage la présence accidentelle de données de pluies cumulées sur plusieurs jours. Le programme permet de combler les lacunes en répartissant le cumul et en mettant en lacune la période de débits correspondante ainsi que les quelques jours qui suivent. La simplicité du modèle GR3 a permis de réduire les difficultés de calage. Ainsi l'initialisation du système se réduit à l'initialisation du réservoir-sol, de même le faible nombre de paramètres évite la présence d'optimums secondaires.

Au cours de la deuxième et troisième année de recherche, le nombre de bassins versants étudiés a atteint 114, et l'on a pu mieux apprécier la généralité du modèle et son aptitude à faire face à des situations très variées. Parmi les 114 bassins, 2 bassins présentaient un écoulement intermittent et GR3 s'est révélé inadapté sous sa forme standard. Bien que ce problème ait été résolu, il faudrait faire une étude particulière pour vérifier la robustesse de l'expédient proposé sur un plus grand nombre de bassins. Un autre problème rencontré grâce à cet échantillon étendu a été celui de la mauvaise représentation des débits de pointe dans certains bassins versants en particulier dans l'ouest de la Bretagne. Après de nombreux essais on a proposé une solution très simple sans augmentation du nombre de paramètres à caler. Un pourcentage fixe de 10% du flux entrant dans le réservoir eau-gravitaire a été affecté directement à la formation du débit à l'exutoire du bassin. On a appelé cet écoulement "**pseudo-direct**" car il évitait le laminage consécutif au passage dans le réservoir eau-gravitaire. Diverses considérations secondaires ont été testées sur l'échantillon complet dont nous disposions mais n'ont pas donné lieu à une nouvelle version du modèle GR3. Parallèlement la méthode de calage mise au point à l'occasion de cette recherche a été peaufinée et rendue plus efficace. L'étude du modèle sur un nombre appréciable de bassins versants a permis de dégager des informations intéressantes pour une utilisation pratique du modèle comme : des données

statistiques sur les valeurs des paramètres, sur l'évolution saisonnière du taux de remplissage du réservoir-sol et sur les valeurs du critère de NASH auxquelles on peut s'attendre.

Une recherche très utile a été effectuée sur la précision des paramètres du modèle en utilisant l'approche statistique du modèle linéaire général. Cela a permis de déterminer la matrice des variances - covariances des paramètres du modèle relatifs à chaque bassin versant. Enfin, chaque spécification du modèle a été remise en cause sur la totalité des bassins versants disponibles. C'est ainsi que l'hydrogramme unitaire a été dédoublé pour s'adapter aux deux sorties qui sont le réservoir eau-gravitaire et l'écoulement pseudo-direct. C'est également au cours de cet examen final que la loi de vidange quadratique du réservoir eau-gravitaire a été modifiée pour aboutir à une loi en puissance cinq.

La dernière étape a été une tentative d'explication des valeurs des paramètres en fonction des caractéristiques morphoclimatiques des bassins versants. Une recherche d'explication en fonction de la géologie s'est révélée à la limite de la significativité et n'a pas été retenue. Des expressions simples en fonction de la superficie, de la pluviométrie et de la température annuelle moyenne ont permis une légère diminution de la variance des paramètres en particulier pour le paramètre temps de base de l'hydrogramme unitaire où le gain en variance est du même ordre de grandeur que celui des formules d'estimation du temps de concentration d'un bassin versant.

En définitive nous sommes arrivés à bâtir un modèle extrêmement simple et robuste, ne comprenant que trois paramètres à caler et donnant des résultats tout à fait respectables sur la majorité des bassins versants. Nous avons tenu à limiter dans des proportions drastiques le nombre de paramètres car il est clair que ce qui manque le plus parmi les nombreux outils de modélisation figurant dans la littérature hydrologique c'est justement une structure minimale de base, simple et rustique, permettant de dégrossir le problème de la transformation pluie-débit. Il est ensuite aisé pour un modélisateur un peu expérimenté de compléter ce modèle de base pour faire face à une situation spécifique donnée, soit du fait d'une caractéristique particulière du bassin versant étudié, soit du fait de la focalisation sur un aspect plus pointu des écoulements comme l'estimation des crues ou, à l'opposé, des étiages. Par exemple, avec un quatrième paramètre on a pu traiter de façon satisfaisante les bassins intermittents ou mieux rendre compte des étiages pour un bassin aux débits très réguliers. Enfin, la simplicité

du modèle s'est révélée également un atout appréciable à en juger par un début d'utilisation dans des tâches opérationnelles de l'hydrologie comme la prévision des crues ou la gestion des barrages.

# **BIBLIOGRAPHIE**





## BIBLIOGRAPHIE

**AMBROISE B. (1980)**

Principaux types de modèles mathématiques de bassin versant.  
Bull. Assoc. Géogr. Franç. N°468, pp 199-124.

**BEROD D. (1988)**

Etude d'un modèle en simulation continue, le GR3 et comparaison avec d'autres méthodes de détermination de débits.  
Travail pratique de diplôme.  
Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE.  
Institut du Génie Rural, Hydrologie et Aménagements.

**BESSON T. (1985)**

Etude des écoulements sur le bassin versant du Réal Collobrier.  
Modélisation pluie-débit.  
Mémoire de 3<sup>ème</sup> année.  
ENITRTS, STRASBOURG.  
CEMAGREF, AIX-EN-PROVENCE.

**BEVEN K. (1989)**

Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models.  
Journal of Hydrology, 105, pp 157 - 172.

**BOIS Ph. (1980)**

Hydrologie générale.  
Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de GRENOBLE.  
Institut National Polytechnique de GRENOBLE.

**CEMAGREF (1985)**

Tableaux résumés sur les données hydrologiques des stations de jaugeage.  
Division Hydrologie-Hydraulique, ANTONY.

**CHIEW F.H.S., Mc MAHON T.A. (1990)**

Estimating groundwater recharge using a surface watershed model : sensitivity analyses.  
Journal of Hydrology, 114, pp 305 - 325.

**CLARKE R.T. (1973)**

Mathematical models in hydrology.  
Irrigation and drainage paper N°19  
Food and Agriculture Organization of the United Nations, ROME.

**COMBES V. (1985)**

Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant.  
 Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant.  
 Application au modèle CREC.  
 Rapport provisoire de thèse.  
 Université des Sciences et Techniques du Languedoc, MONTPELLIER.

**CORMARY Y. (1968)**

Modèles déterministes.  
 Électricité de France.  
 Direction des Etudes et Recherches.  
 Département Laboratoire National d'Hydraulique.  
 Groupe Hydrologie, MONTPELLIER.

**CORMARY Y., GUILBOT A. (1969)**

Modèles déterministes des relations pluies-débits sur la Sioule.  
 Electricité de France - Service Technologie Générale.  
 Applications de l'Electricité et Hydraulique.  
 Laboratoire National d'Hydraulique.  
 Groupe hydrologie - Faculté des Sciences, MONTPELLIER.

**CORMARY Y., GALEA G. (1972)**

Modèles déterministes des relations pluies-débits sur le bassin versant de l'Orgeval.  
 Université des Sciences et Techniques du Languedoc.  
 Laboratoire d'Hydrologie, MONTPELLIER.

**CRAWFORD N.H., LINSLEY R.K. (1964)**

A conceptual model of the hydrologic cycle.  
 IASH Publ. No 63, pp 573 - 587.

**DEVRED D. (1989)**

Etude pluviométrique du bassin de la Sambre  
 Etude hydrologique du sous-bassin de la Solre.  
 Thèse.  
 L'Université des Sciences et Technologie de Lille - Flandres - Artois.

**EDF, CEMAGREF (1983)**

Critères d'applications opérationnelles de modèles hydrologiques.  
 Compte-rendu de la 1ère phase : Généralités.  
 Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre Chargé de l'Environnement et de la Qualité de la Vie.  
 Mission des Etudes de la Recherche.  
 Electricité de France - Laboratoire National d'Hydraulique.  
 CEMAGREF - Département Ressources en Eau.

**EDF , CEMAGREF (1986)**

Critères d'applications opérationnelles des modèles hydrologiques.  
 Compte-rendu des phases 2, 3, 4 : 1er rapport.  
 Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre Chargé de l'Environnement  
 et de la Qualité de la Vie.  
 Mission des Etudes de la Recherche.  
 Electricité de France - Laboratoire National d'Hydraulique.  
 CEMAGREF - Département Ressources en Eau.

**EDIJATNO (1987)**

Amélioration des modèles simples de transformaiion pluie - débit au pas de  
 temps journalier sur de petits bassins versants.  
 Mémoire de DEA.  
 Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques  
 Sanitaires, STRASBOURG.  
 Institut de Mécanique des Fluides, Université Louis Pasteur,  
 STRASBOURG.  
 CEMAGREF, ANTONY.

**EDIJATNO , MICHEL C. (1988)**

Réflexion su la mise au point d'un modèle pluie-débit simplifié sur  
 plusieurs BVRE.  
 Journée Scientifique sur les bassins versants représentatifs et  
 expérimentaux.  
 25ème anniversaire du bassin de l'ORGEVAL.  
 CEMAGREF, ANTONY.

**EDIJATNO , MICHEL C. (1989a)**

Un modèle pluie - débit journalier à trois paramètres.  
 La Houille Blanche, n° 2, pp 113 - 121.

**EDIJATNO , MICHEL C. (1989b)**

Recherche sur la mise au point d'un modèle journalier pluie - débit pour  
 les petits bassins non jaugés.  
 Rapport au Ministère Chargé de l'Environnement.  
 D.P.P. Service de l'Eau, NEUILLY - SUR - SEINE.  
 CEMAGREF, ANTONY.

**FAVIER M. (1989)**

Calibration of drainage model SIDRA.  
 Parameter sensitivity analysis and comparison with conceptual rainfall -  
 runoff model GR3.  
 Wageningen Agricultural University, THE NETHERLANDS.  
 CEMAGREF, ANTONY.

**FILIPPI C., MILVILLE F., THIERY D. (1990)**

Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat Soudano -  
 Sahélien par modélisation hydrologique globale :  
 Application a dix sites au Burkina Faso.  
 Hydrological Sciences, 35, 1, 2 / 1990, pp 29 - 47.

**FLEMING G. (1979)**

Deterministic models in hydrology.  
 FAO irrigation and drainage paper No.32  
 Food and Agricultural Organization of the United Nations, ROME.

**GALEA G. (1972)**

Modèles déterministes des relations pluies-débits sur le bassin versant de l'ORGEVAL.  
 (Bassin Hydrographique de la Seine, sous-bassin de la Marne).  
 Thèse.  
 Académie de MONTPELLIER.  
 Université des Sciences et Techniques du Languedoc.

**GARNIE M. (1974)**

Valeur moyenne des hauteurs de précipitations en France.  
 Période 1951 - 1970.  
 Monographie N° 91 de la Météorologie Nationale.

**GAZULL L. (1987)**

Analyse de l'influence du drainage sur les crues d'un petit bassin versant - Roncheres (Yonne).  
 Mémoire de DEA - Hydraulique et Climatologie Agricole.  
 CEMAGREF, LYON.  
 ENSAR (chair de génie rural).

**GUILBOT A. (1972)**

Application d'un modèle conceptuel de liaison pluie-débit aux données du bassin du Gapeau.  
 A. Le bassin de Ste-Anne.  
 Université des Sciences et Techniques du Languedoc, MONTPELLIER.

**GUILBOT A., RUIZ L. (1976)**

Simulation des débits moyens journaliers de la Seine à Bar - sur - Seine dans un but de prévision.  
 Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.  
 Agence Financière de Bassin Seine - Normandie.

**HOFER G. (1968)**

Relation pluie-débit.  
 Résumé et remarques sur les travaux de Linsley et Crawford.  
 Stanford Watershed Model VI.  
 Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, Pierre-Bénite.

**JACQUET J. (1971)**

Aspects généraux de la représentation mathématique des phénomènes en hydrologie de surface.  
 La Houille Blanche, n°2, pp.105-110.

**JATON J.F. (1982)**

Contribution à l'étude des relations pluie-débit dans les petits bassins versants ruraux.

Thèse.

Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE.

**KUCZERA G. (1990)**

Assessing hydrologic model non linearity using response surface plots.  
Journal of Hydrology, 118, pp 143 - 161.

**LABORDE JP.**

Eléments d'hydrologie de surface.

Tome 1 : Le milieu hydrologique, l'acquisition des données (1982).

Tome 2 : Critique et analyse statistique des données hydrologiques (1982).

Tome 3 : Problèmes hydrologiques spécifiques (1983).

Tome 4 : Exercices d'application et corrigés (1983).

Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires, STRASBOURG.

**LANDWERLIN F. (1990)**

Etat hydrique du sol et modélisation pluie - débit.

Acquisition et traitement des données. Développement d'un nouveau modèle.

Mémoire de fin d'études - Mémoire de DEA Ressources en eau.

Université Paris Sud.

Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique, ORSAY.

Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires, STRASBOURG.

**LANG M., BRIQUET B. (1988)**

Etude hydrologique du bassin de la Sambre.

Ministère de l'Environnement - Délégation aux Risques Majeurs -  
Préfecture du Nord.

Service Interministeriel Régional des Affaires Civiles et Economiques de  
Défense et de la Protection Civile du Nord - Pas de Calais.

Services Hydrologique Centralisateur.

**LARSON C.L., ONSTAD C.A, RICHARDSON H.H., BROOKS K.N, (1982)**

Some particular watershed models.

In Hydrologic modeling of small watersheds.

Edited by : HAAN C.T., JOHNSON H.P., BRAKENSIEK D.L.

American Society of Agricultural Engineers, pp. 410-428.

**LINSLEY R.K. (1982)**

Rainfall-Runoff models.

An Overview.

In Rainfall-runoff relationship par SINGH V.P

Water Resources Publications, pp. 3-22.

**LOUMAGNE C. (1988)**

Prise en compte d'un indice de l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie - débit.

Thèse.

Université de Paris Sud - Centre d'ORSAY.  
CEMAGREF, ANTONY.

**MAILHOL J.C. (1983)**

Comparaison des modèles CREC, GR1 et CEQUEAU sur les bassins de l'ORGEVAL (Seine et Marne) et de l'EURON (Meurthe et Moselle).

CEMAGREF, ANTONY.

Division Hydrologie-Hydraulique.

**MEIN R.G., BROWN B.M. (1978)**

Sensitivity of optimized parameters in watershed models.

Water Resources Research, 14(2), pp 299 - 303.

**MICHEL C. (1983)**

Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ?.

La Houille Blanche, N° 1, pp 39 - 43.

**MICHEL C. (1989)**

Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux.

CEMAGREF, ANTONY

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE (1979)**

Analyse des pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes métropolitains.

CTGREF, Division Hydrologie-Hydraulique Fluviale.

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE (1980)**

Synthèse Nationale sur les crues des petits bassins versants.

Fascicule 2 - La Méthode SOCOSE.

Fascicule 3 - La Méthode CRUPEDIX.

CTGREF, Division Hydrologie-Hydraulique Fluviale.

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE (1985)**

Tableaux résumés sur les données hydrologiques des stations de jaugeage.

CEMAGREF, Division Hydrologie-Hydraulique.

**NALBANTIS I. (1987)**

Identification de modèles pluie-débit du type hydrogramme unitaire : développements de la méthode DPFT et validation sur données générées avec et sans erreur.

Thèse.

Institut de Mécanique de GRENOBLE.

- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. (1970)**  
 River flow forecasting through conceptual models.  
 Part I - A discussion of principles.  
 Journal of Hydrology, vol X, n°3, pp.282-290.
- OBERLIN G. (1973)**  
 Modèles pluies-débits.  
 CTGREF - Division Hydrologie.  
 ENGREF - Département Hydraulique - Enseignement d'Hydrologie.
- PORTER J.W., Mc MAHON T.A. (1971)**  
 A model for the simulation of streamflow data from climatic records.  
 Journal of Hydrology, 13, pp.297-324
- RAUDKIVI A.J. (1979)**  
 Hydrology.  
 An advanced introduction to Hydrological Processes and Modelling.  
 Université of Auckland, NEW ZEALAND.  
 Pergamon Press. OXFORD - NEW YORK - TORONTO - SYDNEY -  
 PARIS - FRANKFURT.
- ROCHE M. (1963)**  
 Hydrologie de surface.  
 ORSTOM - GAUTHIER - VILLAR-S, PARIS.
- ROCHE M. (1971)**  
 Les divers types de modèles déterministes.  
 La Houille Blanche - N°2, pp.111-129.
- ROCHE M. (1973)**  
 Hydrologie et aménagement des eaux (méthodes structurales).  
 Cahiers ORSTOM, série Hydrologie.  
 Vol X, n°1, 1973.
- SERVAT E., DEZETTER A. (1988)**  
 Modélisation globale de la relation pluie-débit : des outils au service de  
 l'évaluation des ressources en eau.  
 Hydrologie Continentale, vol 3, n°2, pp.117-129.  
 ORSTOM.
- SERVAT E., DEZETTER A., LAPETITE J.M. (1989)**  
 Modélisation pluie-débit.  
 Etude et sélection des critères de calage des modèles pluie-débit.  
 Programme ERREAU, note 2.  
 ORSTOM - IIRSDA.



- SHAW Elizabeth M. (1983)**  
Hydrology in Practice.  
Department of Civil Engineering.  
Imperial College of Science and Technology, ENGLAND.
- SPIEGEL M.R. (1972)**  
Théorie et applications de la statistique.  
Série Schaum.  
Edition française par : ERGAS A. et MARCOTORCHINO J.F.
- SOEMARTO C.D. (1987)**  
Hidrologi Teknik.  
Usaha Nasional, SURABAYA, INDONESIA.
- SOROOSHIAN S., GUPTA V.K. (1983)**  
Automatic calibration of conceptual rainfall - runoff models : the question  
of parameter observability and uniqueness.  
Water Resources Research, 19(1), pp 260 - 268.
- THIERY D. (1986)**  
Un modèle hydrologique semi-global pluie-zone non saturée - nappe.  
Le modèle GARDENSOL.  
Trois exemples d'application.  
Note Technique n°86/22.  
BRGM.
- THIERY D. (1988)**  
Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model.  
Journal of Hydrology, 97, pp. 129-148.
- THIRRIOT C., GOUZE J.C. (1989)**  
Application d'une modélisation de la relation pluie brute-pluie efficace à la  
prévision des crues sur le Haut-Aveyron.  
Hydrologie Continentale, vol 4, n°2, pp.151-163.  
ORSTOM.
- TIERCELIN JR., LEVIANDIER Th. (1978)**  
Un modèle pour la simulation des débits journaliers : le modèle  
DEJOREG.  
La Technique de l'Eau et de l'Assainissement n°377.
- TODINI E., WALLIS J.R., (1977)**  
Using CLS for daily or longer periode rainfall - runoff modelling.  
In : Mathematical Models for Surface Water Hydrology. WILEY, NEW  
YORK, N.Y.

**VAN DE GRIEND A.A. (1979)**

Modelling catchment response and runoff analysis.

Chapter 3 : Precipitation.

Chapter 4 : Models for the description of catchment response.

Institute of Earth Sciences - Free University.

AMSTERDAM, THE NETHERLANDS.

**WOOLHISER D.A., BRAKENSIEK D.L. (1982)**

Hydrologic modeling of small watersheds.

In : Hydrologic modelling of small watersheds.

Edited by : HAAN, C.T., JOHNSON H.P., BRAKENSIEK D.L.

American Society of Agricultural Engineers, pp.3-15.

**YANDI HERMAWAN (1986)**

Hidrologi untuk insinyur.

Traduction de : Hydrology for Engineers par : LINSLEY R.K. Jr.,

KOHLER M.A., PAULHUS J.L.H.

Erlangga, JAKARTA, INDONESIA.



# **LISTE DES FIGURES**



## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Modèle CREC - Schéma conceptuel (d'après SERVAT et al, 1989).
- Figure 2 : Le modèle GR2 : conclusion du mémoire de DEA.
- Figure 3 : Modèle GR3 avec un transfert avant rendement.
- Figure 4 : La fonction de réduction de l'ETP dans le modèle GR2.
- Figure 5 : La fonction de réduction de l'ETP dans le modèle GR3.
- Figure 6 : La désagrégation de l'ETP.
- Figure 7 : Répartition spatiale des bassins versants étudiés.
- Figure 8 : Simulation du bassin versant de GRANCHAIN.
- Figure 9 : Simulation du bassin versant de COINON.
- Figure 10 : Simulation avec traitement soustractif sur la pluie (GRANCHAIN).
- Figure 11 : Simulation avec traitement soustractif sur la pluie (COINON).
- Figure 12 : Simulation sur le bassin du COET-ORGAN.
- Figure 13 : Couplage de deux modules GR3.
- Figure 14 : Simulation d'un couplage de deux modules GR3.
- Figure 15 : Répartition du modèle en 3 réservoirs-sol.
- Figure 16 : 2 réservoirs eau-gravitaire en parallèle.
- Figure 17 : La version du modèle à 2 réservoirs R en parallèle.
- Figure 18 : 2 réservoirs eau-gravitaire avec une représentativité spatiale proportionnelle à leur capacité.
- Figure 19 : Répartition de la pluie nette propagée entre 3 réservoirs eau-gravitaire.
- Figure 20 : La version du modèle à 3 réservoirs R.
- Figure 21 : L'architecture du modèle avec une répartition statistique de réservoirs eau-gravitaire.
- Figure 22 : La fonction de répartition du paramètre du modèle: B.

Figure 23 : Les 3 possibilités dérivation d'une fraction de la pluie.

Figure 24 : Trois hypothèses pour le routage de la fraction de pluie dérivée vers l'exutoire.

Figure 25 : Dérivation de pluie avant passage par le réservoir eau-gravitaire.

Figure 26 : Simulation du bassin de COET-ORGAN avec introduction de 5% de la fraction de pluie nette participant directement au débit.

Figure 27 : L'architecture d'un modèle à 2 réservoirs eau-gravitaire avec une fraction de la pluie nette participant directement au débit.

Figure 28 : Architecture du modèle GR3.

Figure 29 : Modèle CREC à 12 paramètres.

Figure 30 : Simulation de l'année 1962 par le modèle CREC.

Figure 31 : Simulation de l'année 1962 par le modèle GR3.

Figure 32 : Simulation de l'année 1976 par le modèle CREC.

Figure 33 : Simulation de l'année 1976 par le modèle GR3.

Figure 34 : Schématisation de CREC à 8 paramètres.

Figure 35 : Simulation de l'année 1982 par le modèle CREC.

Figure 36 : Simulation de l'année 1982 par le modèle GR3.

Figure 37 : Simulation de l'année 1978 par le modèle CREC.

Figure 38 : Simulation de l'année 1978 par le modèle GR3.

Figure 39 : Simulation du bassin de l'ARZON à CHOMELIX.

Figure 40 : Histogramme de fréquence des paramètres A.

Figure 41 : Histogramme de fréquence des paramètres B.

Figure 42 : Histogramme de fréquence des paramètres C.

Figure 43 : Distribution des critères de NASH.

Figure 44 : Paramètre A en fonction de B.

Figure 45 : Paramètre B en fonction de A.

Figure 46 : Paramètre C en fonction de A et B.

Figure 47 : Distribution des paramètres A.

Figure 48 : Paramètre A.

Figure 49 : Paramètre B.

Figure 50 : Paramètre C.

- Figure 51 : Régression de A en fonction de SF et TA.
- Figure 52 : Régression de B en fonction de SF et PA.
- Figure 53 : Régression de C en fonction de SF, PA et TA.
- Figure 54 : Résidu de C.
- Figure 55 : Schéma du modèle GR3J.
- Figure 56 : Distribution des paramètres A.
- Figure 57 : Distribution des paramètres B.
- Figure 58 : Distribution des paramètres C.
- Figure 59 : Distribution des résidus de paramètres C.
- Figure 60 : Distribution des paramètres A.
- Figure 61 : Distribution des paramètres B.
- Figure 62 : Distribution des paramètres C.
- Figure 63 : Distribution des critères de NASH.
- Figure 64 : Organigramme du modèle GR3J.





# **LISTE DES TABLEAUX**



## LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Gain obtenu sur le critère quadratique relatif aux pluies en plaçant le transfert sur les pluies brutes.
- Tableau 2 : Gain du à l'introduction de la nouvelle fonction de rendement sur l'évaporation potentielle.
- Tableau 3 : Dégradation des performances du modèle suite à la modification de 20% de la variable d'entrée la plus sensible.
- Tableau 4 : Valeurs du critère pour l'évaporation potentielle datée et moyenne (critère à minimiser).
- Tableau 5 : Résultat de simulation pour le bassin du GRANCHAIN.
- Tableau 6 : Résultat de simulation pour le bassin du COINON.
- Tableau 7 : Résultat de simulation (COET-ORGAN).
- Tableaux 8 : Répartition statistique de réservoirs eau-gravitaire.
- Tableaux 9 : Répartition statistique de réservoirs eau-gravitaire.
- Tableaux 10 : Répartition statistique de réservoirs eau-gravitaire.
- Tableaux 11 : Répartition statistique de réservoirs eau-gravitaire.
- Tableau 12 : Résultat de simulation du à la répartition "hyperbolique" de réservoirs eau-gravitaire.
- Tableau 13 : Gain obtenu sur le critère de NASH du à la répartition de réservoirs eau-gravitaire selon une distribution hyperbolique des solutions (1), (2) et (b)<sup>5</sup> vis-à-vis de la version de base de GR3.
- Tableau 14 : Comparaison des critères de NASH obtenus par un modèle à réservoirs quadratiques et à réservoirs linéaires.
- Tableau 15 : Résultat de l'étude sur le décalage entre la dérivation d'une fraction de pluie avant routage par l'hydrogramme unitaire et son introduction directe dans le débit sortant.
- Tableau 16 : Résultat de la simulation avec introduction de différents taux fixes de la fraction de pluie nette participant directement au débit.
- Tableau 17 : Résultat de la simulation en comparant les versions du (3.2.6.2) et le modèle GR3 de base.
- Tableau 18 : Calage des modèles CREC et GR3 sur la période 1960-1963.

Tableau 19 : Résultats sur les périodes de contrôle 1952-1955 et 1974-1977, avec le jeu de paramètres calé sur 1960-1963.

Tableau 20 : Comparaison des modèles CREC et GR3 sur la période de calage 1981-1983.

Tableau 21 : Résultats des simulations des modèles CREC et GR3 sur la période de calage 1977-1980.

Tableau 22 : Résultats des simulations sur les 110 bassins versants étudiés.

Tableau 23 : Statistiques des paramètres.

Tableau 24 : Résultats d'étude du paramètre A sur 93 bassins versants.

Tableau 25 : Résultats d'étude du paramètre A sur 39 bassins versants.

Tableau 26 : Résultats d'étude du paramètre B sur 93 bassins versants.

Tableau 27 : Résultats d'étude du paramètre B sur 39 bassins versants.

Tableau 28 : Résultats d'étude du paramètre C sur 93 bassins versants.

Tableau 29 : Résultats d'étude du paramètre C sur 39 bassins versants.

Tableau 30 : Analyse statistique de 26 bassins "peu perméables".

Tableau 31 : Analyse statistique de 33 bassins "perméables".

Tableau 32 : Régressions des paramètres en fonction des variables morphoclimatiques et de l'appartenance à une classe de perméabilité.

Tableau 33 : Résultats liés à différentes valeurs de  $\beta$  concernant la loi de vidange du réservoir eau - gravitaire (112 bassins versants).

Tableau 34 : Résultats liés à différents exposants de  $\beta$  du rendement de pluie.

Tableau 35 : Résultats liés à différents exposants de  $\beta$  du rendement d'ETP.

Tableau 36 : Différents types d'hydrogrammes unitaires proposés.

Tableau 37 : Résultats liés à différents taux de correction des données de pluies.

Tableau 38 : Résultats des moyennes et écarts-types de traitement sur 114 bassins versants.

Tableau 39 : Résultats de simulation sur 114 bassins versants.

Tableau 40 : Résultat de la régression du paramètre A en fonction de certaines variables morphoclimatiques.

Tableau 41 : Résultat de la régression du paramètre B en fonction de certaines variables morphoclimatiques.

Tableau 42 : Résultat de la régression du paramètre C en fonction de certaines variables morphoclimatiques.