

Département Gestion
des milieux aquatiques
Division Hydrologie

Thèse
présentée par
Zoubir MAKHLOUF
pour l'obtention du titre de Docteur
en Sciences de l'Université Paris XI Orsay

Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres

Soutenue le 29 novembre 1994 devant la commission d'examen :

M. STEINBERG	Président
G.-M. ZUPPI	Directeur de thèse
C. MICHEL	Directeur de thèse
P. BOIS	Rapporteur
M. DESBORDES	Rapporteur
P.-A. ROCHE	Examineur

THESE

Présentée

pour obtenir

le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES

DE L'UNIVERSITE PARIS XI ORSAY

PAR

Zoubir MAKHLOUF

Sujet:

COMPLEMENTS SUR LE MODELE PLUIE-DEBIT GR4J ET ESSAI D'ESTIMATION DE SES PARAMETRES

Soutenu le 29 Novembre 1994

Devant la commission d'examen

MM. M.	STEINBERG	Président
G-M.	ZUPPI	Directeur de thèse
C.	MICHEL	Directeur de thèse
P.	BOIS	Rapporteur
M.	DESBORDES	Rapporteur
P-A.	ROCHE	Examinateur

THESE

Présentée

pour obtenir

le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES

DE L'UNIVERSITE PARIS XI ORSAY

PAR

Zoubir MAKHLOUF

Sujet:

COMPLEMENTS SUR LE MODELE PLUIE-DEBIT GR4J ET ESSAI D'ESTIMATION DE SES PARAMETRES

Soutenue le 29 Novembre 1994

Devant la commission d'examen

MM. M.	STEINBERG	Président
G-M.	ZUPPI	Directeur de thèse
C.	MICHEL	Directeur de thèse
P.	BOIS	Rapporteur
M.	DESBORDES	Rapporteur
P-A.	ROCHE	Examineur

*" l'est plus facile d'étudier le mouvement
d'astres infiniment éloignés que celui
des rivières qui coulent à mes pieds ."*

Galilée (1564-1614)

A mes parents

A ma fille Sara

A la mémoire du professeur Jean-charles FONTES

REMERCIEMENTS

Au terme d'un premier contact avec la modélisation pluie débit au sein de la Division Hydrologie du Centre National du Machinisme agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CEMAGREF) à Antony, en 1991, un long chemin d'expériences enrichissantes s'est petit à petit déroulé jusqu'à la parution de ce document.

Je ne saurais trouver les mots justes pour exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont assisté de près ou de loin.

Je voudrais exprimer mes remerciements à Monsieur Thierry LEVIANDIER, chef de la Division Hydrologie d'Antony qui m'a accueilli dans son équipe.

Je suis tout particulièrement reconnaissant à celui qui a suivi quotidiennement le déroulement de cette recherche et qui m'a accordé sa confiance, Monsieur Claude MICHEL. J'ai trouvé auprès de lui, les conseils, l'aide et l'appui de tous les instants. Je n'oublie ni sa patience ni sa gentillesse et ses encouragements.

Je souhaite exprimer mes remerciements au Professeur Gian-Maria ZUPPI d'avoir accepté la direction de cette thèse après feu le Professeur Jean-Charles FONTES.

Je tiens également à assurer de ma gratitude et adresser mes remerciements:

- Monsieur le Professeur M. STEINBERG de l'Université de Paris-Sud d'avoir accepté la présidence du jury.

- Messieurs P. BOIS Professeur d'hydrologie à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble et M. DESBORDES Professeur d'hydrologie à l'Université des Sciences et Techniques Languedoc de Montpellier, rapporteurs, qui ont effectué une lecture approfondie de mon mémoire.

- Monsieur Pierre-Alain ROCHE Professeur d'hydrologie à l'Ecole des Ponts et Chaussées de Paris, Directeur départemental de l'équipement de l'Aube qui a bien voulu faire partie du jury de thèse.

Je n'oublierai pas non plus tous les chercheurs, ingénieurs et techniciens qui m'ont aidé par leurs conseils, leur soutien moral et par leur chaleureuse amitié. Qu'ils trouvent ici toute ma sympathie, je pense en particulier à M. NORMAND, J.M. PANETIER, M. POIRSON, J.L. ROSIQUE, M. FERRY, M. TANGARA, Mme LOUMAGNE, Mme PALAGOS, Gabriela, Raoudha, Anne-Laure, Christophe, Piter, Reda et Ahmed.

La liste ne saurait être complète sans un mot spécial pour Nacer, mon frère, pour l'appui qu'il m'a apporté à divers titres, Amar pour le temps qu'il a consacré à la lecture de mon manuscrit et Nadia, ma femme, pour sa compréhension.

PLAN

RESUME	3
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE I	11
GENERALITES SUR LA MODELISATION PLUIE-DEBIT	
CHAPITRE II	21
LES MODELES GR (GENIE RURAL)	
CHAPITRE III	43
ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES DU MODELE GR4J SUR LES VARIABLES HYDROLOGIQUES	
CHAPITRE IV	55
TENTATIVE D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J SUR LES BASSINS BRETONS	
CHAPITRE V	91
TENTATIVE D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J SUR LES BASSINS DE LA MOSELLE	
CHAPITRE VI	113
LE SOUS-MODELE NEIGE	
CHAPITRE VII	131
CONCEPTION D'UN MODELE MENSUEL A DEUX PARAMETRES (GR2M)	
CHAPITRE VIII	177
ESTIMATION DES DEUX PARAMETRES DU MODELE MENSUEL SUR LA REGION BRETAGNE	
CHAPITRE IX	195
ESSAI DE LIAISON ENTRE LES PARAMETRES DES MODELES GR4J ET GR2M ET LES CARACTERISTIQUES DU BASSIN	
CONCLUSION GENERALE	217
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	223
LISTE DES FIGURES	229
LISTE DES TABLEAUX	235
LISTE DES ANNEXES	239
TABLE DES MATIERES	243
ANNEXES	251

Résumé
Abstract

RESUME

L'explication des paramètres d'un modèle pluie-débit est un élément de la compréhension des écoulements et une nécessité pour une utilisation sur des bassins non-jaugés. Nous avons montré que la parcimonie des paramètres était conciliable avec cet objectif en utilisant un modèle à quatre paramètres GR4J. Nous avons exploré trois voies d'approche qui nous semblent prometteuses. D'abord nous avons exploité le lien qui pouvait exister entre paramètres du modèle GR4J et certaines variables classiques en hydrologie qui correspondent aux trois grands aspects de l'écoulement (crue, écoulement annuel et étiage). Ces variables ont, en effet, été l'objet de nombreuses tentatives d'explication à partir des variables physiques des bassins versants. Une autre approche consiste à aborder le problème sur un plan régional où des caractéristiques physiques des bassins sont plus faciles à trouver. On a pu montrer dans le cas de la région Bretagne et du bassin de la Moselle que cette voie permet d'aboutir, avec des explications partielles de certains paramètres du modèle, les autres étant fixés au niveau de leur moyenne régionale. Le phénomène neigeux pouvant gêner le calage du modèle sur les bassins de la Moselle, un traitement sommaire a été mis en oeuvre en utilisant uniquement l'information du code de validité accompagnant les données de précipitation. Une conclusion surprenante a été qu'il convenait d'effectuer une majoration (à optimiser) de la précipitation pour obtenir une amélioration. Une dernière voie a été est de procéder avec une étape intermédiaire, celle de résoudre le même problème d'explication des paramètres mais pour un modèle similaire plus simple (pas de temps mensuel). Après de nombreux essais, nous sommes parvenus à un modèle mensuel extrêmement simple (GR2M à deux paramètres). Ce modèle se comporte presque aussi bien que le meilleur modèle existant actuellement (modèle de Thomas à quatre paramètres). Deux paramètres du modèle journalier sont assez bien liés aux deux paramètres du modèle GR2M. On peut penser que le modèle GR2M, plus facile à régionaliser que le modèle GR4J comme son application à la Bretagne le laisse supposer, peut servir d'intermédiaire pour expliquer les paramètres de GR4J.

Mots clés:

- Hydrologie
- Modélisation pluie-débit
- Démarche empirique
- Estimation des paramètres
- Analyse régionale
- Neige

ABSTRACT

Parameter explanation for rainfall-runoff modelling is a very difficult task even with a four-parameter model (GR4J). We investigated three approaches which proved to be promising. First, we sought a solution exploiting relationships between model parameters and classical hydrological variables already benefiting from direct explanation with physical catchment characteristics (design flood, mean annual flow, minimum annual flow). Another approach consists of reducing the national scale to that of an homogeneous region where significant physical characteristics are easier to find out. With data from two regions (Moselle and Bretagne), we demonstrated that this avenue was sufficiently successful with only simple explanations for part of the parameters. Snowy precipitations could hamper the model calibration, especially in Moselle sub-catchments. Thus, a cursory processing based on the validity code of precipitation data has been worked out. Surprisingly, we found that a substantial increase of snowfall was necessary to achieve a sensitive improvement. The last approach was to solve the problem for similar but simpler model based on a monthly time step. After many trials, we conceived a monthly model (GR2M) using only two parameters. This model was approximately as successful as the best model existing up to now (Thomas' model, four parameters). Two parameters from the daily model correlated fairly well with the two parameters of the monthly model. We thought that a monthly model is easier to regionalize than a daily model since it is simpler. This assumption proved to be true for Bretagne, a western region of France. This approach may allow us to discover suitable physical catchment characteristics.

Key words:

- Hydrology
- Modelling rainfall-runoff
- Empirical approach
- Parameter assessment
- Regional analysis
- Snow

*Introduction
Générale*

INTRODUCTION

Les modèles en hydrologie qui transforment les précipitations en débits sont des outils de plus en plus utilisés. Ces modèles possèdent des paramètres qui doivent généralement être calés, même lorsqu'ils représentent a priori une grandeur physique auxquels nous nous intéressons particulièrement. A fortiori pour les modèles globaux avec peu de paramètres, une fois ces modèles mis au point, il est alors nécessaire de relier leurs paramètres à des grandeurs observables afin de pouvoir les appliquer à des bassins non jaugés. Cette condition sine qua non de toute opération de transfert interbassin va de pair avec une meilleure compréhension des ressorts intimes de la transformation pluie-débit. Bien sûr, la solution d'un tel problème est encore très loin d'être obtenue.

La question se pose alors de savoir si le problème est plus facilement soluble avec un modèle proche de la réalité physique, mais ayant nécessairement de nombreux paramètres, ce qui augmente les incertitudes de calage, ou avec un modèle globalisant les processus à paramètres robustes.

La première solution ayant été tentée beaucoup plus souvent dans la littérature hydrologique, mais sans succès notable, sur l'"explication" des paramètres de modèles de transformation pluie-débit en continu ou par événement (Mazenc et al. 1984, Hughes 1989, Vandewiele 1991, Braun et Renner 1992, Chiew et Mc Mahon 1994, ... etc.). Notre travail s'est orienté vers l'utilisation d'un modèle global très simple. En effet, si des relations ne sont obtenues que pour un faible nombre de paramètres, pourquoi ne pas les rechercher au sein d'un modèle dont la variance est portée par très peu de paramètres.

Le modèle de transformation pluie-débit très simple à pas de temps journalier (GR4J à 4 paramètres) utilisé dans cette recherche, a pu être construit presque entièrement à partir du seul objectif de bonne reproduction des débits réellement observés: les fonctions et les paramètres correspondants n'ont été introduits que pour obtenir une meilleure adéquation entre les sorties du modèle et les débits réels et non pour satisfaire un certain nombre de préconceptions sur le cycle hydrologique dans un bassin versant.

L'estimation a priori des paramètres de ce modèle journalier sert de fil conducteur à l'ensemble de la présente recherche. Plusieurs approches sont envisagées pour résoudre le problème qui nous occupe.

D'abord on peut penser exploiter les nombreuses synthèses qui ont tenté de relier les variables hydrologiques "classiques" correspondant aux trois grands aspects de l'écoulement (crues, écoulements sur une longue durée et étiages) aux caractéristiques physiques des bassins versants. Il suffit pour cela de voir si l'on peut déduire simplement les valeurs des paramètres du modèle de ces variables hydrologiques classiques.

On peut également rechercher pour le plus grand nombre possible de bassins versants des relations entre les paramètres et les principales caractéristiques physico-climatiques disponibles.

Une autre approche consiste à aborder le problème sur un plan régional assez homogène où des caractéristiques physico-climatiques discriminantes seraient plus faciles à trouver. Or, justement, la région Bretagne et le bassin de la Moselle ont déjà fait l'objet d'une telle recherche, mais sur des modèles à un plus grand nombre de paramètres. Nous testerons les mêmes données physico-climatiques sur le modèle simple qui nous sert de référence.

Une dernière voie est peut être de faire un détour par un modèle plus simple et donc reposant sur un pas de temps plus large. Dans cette optique, on essaiera de mettre au point un modèle mensuel, d'examiner la facilité avec laquelle on peut estimer ses paramètres et enfin d'établir les liaisons éventuelles entre les paramètres du modèle journalier et ceux du modèle mensuel.

L'objet de la présente recherche est donc d'étudier les quatre voies d'approche qui viennent d'être esquissées et de comparer leurs potentiels de succès.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA MODELISATION PLUIE-DEBIT

I.1 - INTRODUCTION

Du point de vue du "modéliste", parler de transformation pluie-débit c'est parler presque de toute l'hydrologie. L'idée de transformer les pluies (P) en débits (Q) par un modèle simulant la réalité d'un bassin est ancienne: Au dix septième siècle, les physiciens français Edmé Mariotte et Pierre Perreault ont mesuré le débit de la Seine à Paris et la pluie tombant sur le bassin versant et ont réalisé qu'une pluie fournit suffisamment d'eau pour alimenter les cours d'eau. Pour Paris l'écoulement est voisin du sixième de la pluie. Il a fallu attendre près de deux siècles, l'ère de la construction des barrages, pour obtenir le modèle dit rationnel ($Q = C.I.S$) et le début du vingtième siècle pour une analyse détaillée des fonctions (hydrogramme unitaire de Sherman, lois d'infiltration de Horton, formule d'évaporation de Thornthwaite). A partir des années soixante, on voit se développer davantage la recherche sur la science hydrologique visant à mieux cerner le mécanisme de la genèse des écoulements avec le développement des moyens de calcul.

I.2 - QU'EST CE QU'UN MODELE ?

Le dictionnaire français d'hydrologie de surface (Roche, 1986) définit le modèle comme une "représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, ou tout au moins son comportement, afin d'en tirer toute conséquence concernant l'estimation de ses paramètres, son évolution, les prévision de son exploitation etc.... En ce sens, par exemple, une loi de distribution statistique est un modèle". Pour le dictionnaire Robert (sens scientifique) "c'est une représentation simplifiée d'un processus ou d'un système". Au sens large, on définit un modèle par sa finalité comme tout moyen permettant de raisonner sur un (ou des) phénomène (s) en faisant appel à des entités ou à des processus élémentaires qui sont censés être à leur origine, ou qui permettent de les reconstituer par combinaisons ou assemblages (Jacquet, 1984 ; Delattre, 1979). Le modèle est donc nécessairement réductionniste de la complexité naturelle. Il est une image de la réalité, modélisée par oubli de nombreuses propriétés jugées non pertinentes pour les questions posées (Roche, 1988).

Un bassin versant, par exemple, peut être considéré comme un tout défini par un certain nombre de caractéristiques globales (par exemple. le débit à l'exutoire, la surface,...) dont les variations ou la constance peuvent être observées et décrites dans diverses conditions de l'environnement. Il peut aussi être vu comme constitué par l'air, la végétation, le sol, le sous-sol, la rivière, les lacs,..., liés entre eux par certaines relations ou fonctions.

Les modèles hydrologiques ont la particularité d'intégrer des facteurs complexes tout en ayant l'ambition de décrire, par une représentation voulue aussi simple que possible, le comportement d'un bassin versant.

I.3 - LES MODELES EN GENERAL

Ils existe dans la littérature d'innombrables essais de classification des modèles utilisés dans les sciences hydrologiques. Sans prétendre faire une typologie des modèles, nous présenterons brièvement quelques dichotomies particulièrement significatives. Bien qu'elles puissent paraître comme académiques, elles peuvent aider à se situer dans les différentes approches et terminologies de la modélisation, à mieux comprendre les choix effectués par le modélisateur, et enfin à orienter la collecte des données ainsi que l'interprétation des résultats (Hubert, 1984).

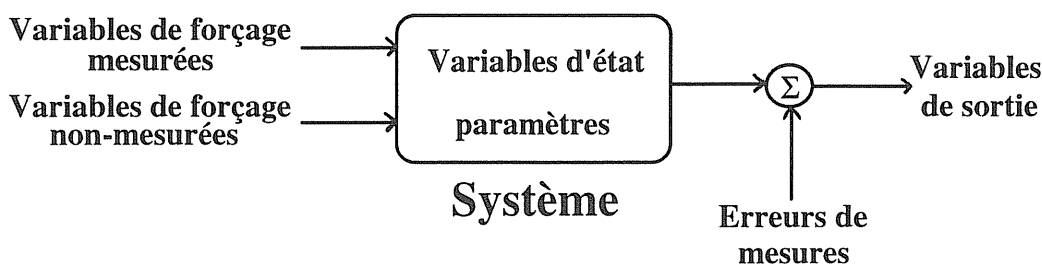


Figure (I.1): Définition du système et des variables.

Dans les paragraphes qui suivent, nous indiquerons entre parenthèses les termes voisins les plus couramment employés en hydrologie.

I.3.1 - Modèle de simulation et modèle de gestion

(modèle de simulation → modèle descriptif, modèle de connaissance, modèle de recherche)
 (modèle de gestion → modèle prescriptif, modèle d'optimisation, modèle de planification)

Les modèles de simulation cherchent à produire des phénomènes ou à prévoir le comportement d'un système soumis à des sollicitations données. On calcule les variables inconnues (les sorties) en fonction des variables connues (les entrées) et des paramètres du système. la simulation n'est pas liée directement aux objectifs de la gestion. Les modèles de gestion ont pour objet le choix entre diverses alternatives de gestion en indiquant l'influence de celles-ci sur le système et les coût des opérations. Le critère de performance devient explicitement un critère de choix (fonction objectif).

I.3.2 - Modèle distribué et modèle global

(modèle distribué → modèle maillé, modèle matriciel, modèle à discrétisation spatiale)
 (modèle global → modèle ponctuel, modèle d'ordre zéro)

Lorsqu'un certain cadre géographique doit être représenté dans un modèle, deux options sont possibles. On peut estimer que les variations spatiales des paramètres et les variables d'entrées ont un effet négligeable et qu'il n'y a pas lieu d'effectuer un découpage dans l'espace (*i.e.*, le modèle est d'ordre zéro dans l'espace), on dit que le modèle est global.

Au contraire, l'étendue ou l'hétérogénéité du cadre physique comme la concentration et la diversité spatiale des interventions anthropiques sur le système peuvent conduire à faire une discrétisation de l'espace des entrées et des paramètres. On construit alors un modèle distribué. La forme des unités élémentaires qui seront représentées par un modèle global peut être arbitraire, par exemple, des mailles carrées, ou fondée sur des divisions naturelles, par exemple, un découpage par sous-bassins.

Certains modèles globaux en hydrologie essaient de prendre en compte l'hétérogénéité de l'occupation du sol dans les bassins versants en les découpant en n parcelles fictives correspondant chacune à un type d'occupation, ces niveaux de découpage n'ayant pas un ordre hiérarchique les uns par rapport aux autres. Ces modèles sont appelés semi-distribués.

I.3.3 - Modèle stochastique et modèle déterministe

(modèle stochastique → modèle probabiliste)

Un modèle est dit stochastique si certaines des grandeurs impliquées (c'est-à-dire variables d'entrées, paramètres et erreurs) sont des variables aléatoires éventuellement autocorrélées. Il en résulte une fonction de distribution des probabilités pour les variables de sortie. Si aucune de ces grandeurs n'est considérée comme une grandeur aléatoire, le modèle sera dit déterministe. Cela revient à dire que, dans la **figure I.1**, les variables d'entrées non mesurées et les erreurs de mesure sont prises égales à zéro et que les paramètres sont connus exactement. La formulation d'un modèle stochastique se fait généralement sous la forme 'état-espace', c'est-à-dire avec une équation d'évolution du système et une équation de mesure, toutes les deux comprenant un terme d'erreur connu en distribution.

I.3.4 - Modèle dynamique et modèle statique

(modèle dynamique → modèle transitoire, modèle non-stationnaire)

(modèle statique → modèle permanent, modèle stationnaire)

Un modèle est dynamique si certaines variables évoluent au cours du temps. Par contre, lorsque toutes les variables et paramètres sont indépendants du temps, le modèle est dit statique.

I.3.5 - Modèle continu et modèle discontinu

(modèle continu → modèle de "long terme")

(modèle discontinu → modèle d'événement, modèle spécialisé)

Les modèles continus simulent l'évolution d'une variable d'état du système en continu pour un jeu continu de données d'entrées.

Les modèles discontinus fonctionnent événement par événement et les conditions initiales doivent être fournies comme données d'entrées. Ce type de modèle travaille généralement avec un pas de temps réduit et a pour objectif de décrire en détail la réponse du

système tout au long d'un événement particulier, alors que les modèles continus reproduisent le comportement du système à long terme.

I.3.6 - Modèle linéaire et modèle non-linéaire

Un modèle est linéaire, dans le sens de la théorie des systèmes, si le principe de la superposition est respecté. Le principe de superposition affirme que, si $y_1(t)$ et $y_2(t)$ sont les sorties correspondant aux entrées $x_1(t)$ et $x_2(t)$ respectivement, la réponse du système à une entrée $x_1(t) + \lambda \cdot x_2(t)$ sera $y_1(t) + \lambda \cdot y_2(t)$, λ étant un nombre réel.

Dans le sens statistique, un modèle est dit linéaire si une variable sortie, y , est liée à une variable d'entrée, x , par une équation du type $y = a + bx$. Le modèle est linéaire au sens statistique mais le principe de la superposition ne s'applique pas car $y_1 + y_2 \neq a + b(x_1 + x_2)$. Cette non-linéarité est due à un effet de seuil (caractéristique considérée comme usuelle pour les processus hydrologiques) qui empêche la linéarité "systémique" des modèles hydrologiques.

I.3.7 - Modèle mécaniste, modèle conceptuel et modèle empirique

(modèle mécaniste	→	modèle basé physiquement, modèle de connaissance, modèle théorique, modèle descriptif, modèle boîte-blanche)
(modèle conceptuel	→	modèle systémique, modèle paramétrique, modèle boîte-grise, modèle synthétique)
(modèle empirique	→	modèle de comportement, modèle boîte-noire, modèle entrées-sorties, modèle analytique)

Les modèles mécanistes décrivent (ou essaient de décrire ?) les mécanismes internes du système, se basant sur les lois de la physique et sur une parfaite connaissance de la structure physique du système. En théorie, ce type de modèle ne nécessite pas de calage car tous les paramètres sont censés être mesurables. Dans les sciences de l'eau, on est encore loin d'une théorie causale adéquate des processus hydrologiques. Même dans les secteurs relativement réduits, où l'on dispose de modèles mécanistes qui représentent bien le comportement du système, certains paramètres ne sont pas directement mesurables sur le terrain (par exemple le coefficient de Strickler dans les équations de Saint-Venant).

Quand la structure du système et les lois qui le régissent sont inconnues ou quand la mise en oeuvre d'un modèle mécaniste devient très compliquée (en raison de l'incertitude et de la pauvreté des informations, et de la complexité des phénomènes lors de l'application en grandeur nature) on procède à une simplification du comportement du système. Les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le *concept* physique du comportement du système par une représentation plus simple. Il sont, de ce fait, réducteurs de la complexité naturelle, bien qu'ils aient l'avantage d'introduire une référence physique.

Les modèles empiriques ne font pas référence aux processus internes du système en se contentant d'établir des relations entre les variables de forçage et les variables de sortie. Cependant, comme dans le cas des modèles conceptuels, des interprétations physiques peuvent parfois être données aux paramètres de ces modèles.

Quand à la valeur cognitive d'un modèle, nous nous sommes permis de classer les modèles non dans une dichotomie mais en quatre groupes (Cf. **tableau I.1**). On fait remarquer que plus d'un terme se retrouve ici avec un sens légèrement différent de celui qui a pu lui être donné précédemment, mais plus correct à notre avis.

classe →	Modèles Linéaires.	Modèles Empiriques.	Modèles Conceptuels.	Modèles Fondés Physiquement.
attributs ↓				
références scientifiques.	Mathématiques.	Théorie des Systèmes et Hydrologie.	Physique Simplifiée Hydrologie.	Physique .
exemples →	ARMA	GR4J	SWM	SHE

Tableau (I.1): Les principales classes de modèles hydrologiques.

I.4 - GENERALITES SUR LA MISE EN OEUVRE DES MODELES

I.4.1 - Calage du modèle

En hydrologie les principaux modèles opérationnels sont des modèles globaux dont les paramètres ne peuvent pas être estimés directement par la mesure de grandeurs physiques sur le terrain. On ne peut les obtenir que par optimisation d'un critère de qualité des débits générés par le modèle.

Quelle que soit l'approche utilisée, le calage du modèle exige:

- 1 - Une série de données "représentatives" des différentes entrées dans le système.
- 2 - Une estimation initiale des paramètres et des variables d'état du système.
- 3 - Une méthode d'ajustement des paramètres.

4 - Une méthode ou un critère (ou un faisceau de critères) pour évaluer la qualité de la simulation des débits par le modèle.

I.4.2 - Optimisation des paramètres

L'optimisation des différents paramètres d'un modèle consiste à trouver un jeu de paramètres rendant minimale la fonction critère. Pour cela, différentes techniques d'optimisation sont disponibles. Nous nous limiterons à la méthode dite de la recherche systématique pas à pas utilisée par Michel (1989). Cette méthode tire sa rusticité d'une transformation préalable de l'espace des paramètres, en général par la fonction logarithmique. Son principe est de rechercher le minimum en suivant le chemin de la plus grande pente qui est exposé ci-après dans le cas d'un seul paramètre:

Nous disions que son principe repose sur la transformation du paramètre de façon à rendre équiprobable tout intervalle $[X, X + \Delta X]$ indépendamment de X . Cela se fait généralement en prenant le logarithme du paramètre, noté x ($x = \ln X$) ci-après. Soit F la fonction objectif. Soit x_0 la valeur initiale d'un paramètre à optimiser, notons $x^{(1)}, \dots, x^{(i)}, \dots, x^{(n)}$ les valeurs obtenus successivement et x^* la valeur optimale du paramètre.

Au pas d'optimisation $i+1$, on fait un essai de chaque côté de $x^{(i)}$ d'une valeur Δx :

$$\begin{cases} x_1^{(i+1)} = x^{(i)} - \Delta x & \text{conduisant au critère } F_1^{(i+1)} \\ x_2^{(i+1)} = x^{(i)} + \Delta x & \text{conduisant au critère } F_2^{(i+1)} \\ F^{(i+1)} = \text{Min}[F_1^{(i+1)}, F_2^{(i+1)}] \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

si $F^{(i+1)} < F^{(i)}$, on prend $x^{(i+1)} = x_j^{(i+1)}$; j correspondant à $\text{Min}(F_j, j = 1, 2)$, le pas d'auscultation peut également varier: Δx est doublé si l'on a obtenu deux succès consécutifs (un succès correspond à l'obtention d'une nouvelle valeur pour le paramètre au cours d'une exploration avec Δx). Si $F^{(i+1)} \geq F^{(i)}$ le prochain pas de recherche sera divisé par deux, la condition de convergence porte sur Δx et non sur la fonction objectif: soit $\Delta x \leq \varepsilon$ (ε = valeur minimale pour Δx ; soit l'obtention d'un nombre maximal d'essais pour l'optimisation).

Traditionnellement, la somme des carrés des erreurs de simulation est prise comme critère de calage

$$F = \sum_{i=1}^m [Q_o(i) - Q_c(i)]^2 \quad (\text{I.2})$$

où $Q_o(i)$ et $Q_c(i)$ sont respectivement le débit observé et le débit calculé par le modèle à pas de temps i , et m le nombre total de pas de temps des données utilisées.

Cette méthode est facile à étendre au cas de plusieurs paramètres. Soit NP le nombre de paramètres à optimiser. Au pas $i+1$ la recherche se fait successivement pour les NP paramètres. Si $F^{(i+1)} < F^{(i)}$ est satisfait au moins une fois pendant la recherche sur les NP paramètres, Δx n'est pas modifié. Si le succès est obtenu 2^{NP} fois de suite, on double Δx . Si au contraire on n'obtient aucune amélioration pour F , on divise Δx par 2. Si dans le processus Δx dépasse une valeur maximale choisie, on revient au plus faible Δx rencontré antérieurement. Toutes Les N itérations, on peut décider d'arrêter la méthode. En pratique, on utilise: $\Delta x_{(initial)} = 0.64$; $\varepsilon = \text{Min}(\Delta x) = 0.01$; $\text{Max}(\Delta x) = 1.28$ et $N = 20.NP$.

I.4.3 - Critères de qualité d'ajustement

Un modèle permet de produire une série chronologique de débits Q_c à partir des entrées de pluie (P) et d'évaporation potentielle (E). Le modèle sera d'autant plus satisfaisant que les débits Q_c seront proches des débits Q_o effectivement observés.

Apprécier la validité du modèle consiste à juger de la proximité des deux séries chronologiques Q_o et Q_c . Ceci peut être fait visuellement mais on ne peut éviter de définir un

critère numérique permettant de faire des comparaisons entre modèles ainsi que de caler le modèle c'est-à-dire de trouver les valeurs les plus adéquates à affecter aux paramètres.

Deux approches peuvent donc être utilisées pour évaluer la qualité d'un ajustement entre valeurs observées et valeurs simulées par le modèle.

Approche qualitative

C'est probablement la méthode la plus directe et la plus complète pour évaluer la performance d'un modèle. Elle consiste à représenter graphiquement les valeurs observées et les valeurs simulées et, le modélisateur émet son jugement sur la qualité de l'ajustement, à partir d'une inspection visuelle.

Approche quantitative

Il existe dans la littérature, un très grand nombre de critères indépendants du jugement de l'observateur [NASH (1969), FORTIN (1971), CREC, CREC.bi., et S.EXP.E.R.], le plus classique étant celui des moindres carrés. Il est parfois commode de rendre cette quantité adimensionnelle pour faciliter les comparaisons.

Une étude faite par l'ORSTOM (Servat, Dezetter et Lapetite, 1989) a montré la prédominance du critère de NASH (Nash et Sutcliffe, 1970) sur les autres formulations. Nous avons retenu ce critère d'optimisation de NASH. Le modèle est d'autant meilleur que NASH est proche de 100. Notons qu'avec ce critère le problème de minimisation exposé précédemment pour F devient un problème de maximisation.

$$NASH = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_o - Q_c)^2}{\sum (Q_o - Q_m)^2} \right] \quad (I.3)$$

avec Q_m moyenne des débits observés (Q_o).

I.4.4 - Initialisation et période de mise en route

Le modèle permet de restituer les débits calculés (Q_c) à condition de connaître l'état initial au début de la période simulée. Les choix portant sur les initialisations sont inévitablement assez grossiers et il s'ensuit qu'une erreur non négligeable peut être commise en faisant ces choix arbitraires. Cependant, au fur et mesure que le modèle fonctionne, il s'effectue un réajustement progressif des états du système. Compte tenu du caractère inéluctablement arbitraire de l'initialisation, les premières valeurs de Q_c ne seront pas fiables et par conséquent, on n'en tiendra pas compte dans le calcul de la fonction critère. On utilisera systématiquement une ou deux années pour cette période de mise en route, dont les résultats ne seront pas comptabilisés.

I.4.5 - Période de calage et contrôle

En général, il est essentiel de distinguer, parmi les données expérimentales disponibles, deux périodes d'égale importance, l'une servant au calage du modèle et l'autre à son contrôle. Très souvent, le critère de jugement d'un modèle se détériore très sensiblement lorsqu'on passe de la période de calage à la période de contrôle, et cela d'autant plus que le modèle est sophistiqué et contient un grand nombre de paramètres ajustables à une situation donnée: C'est le phénomène de "surcalage". La performance à retenir pour le modèle est celle obtenue sur la période de contrôle. On peut, ensuite, pour avoir une meilleure définition des paramètres, caler le modèle sur la période complète.

Chapitre II

CHAPITRE II

LES MODELES GR (GENIE RURAL)

II.1 - INTRODUCTION

Nous allons essayer de retracer brièvement dans ce chapitre le développement du modèle utilisé dans cette recherche depuis la version initiale jusqu'à la version finale dénommée GR4J.

Le modèle GR4J est un modèle empirique global qui permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données de pluie et d'évaporation moyenne. Il fonctionne au pas de temps journalier et n'utilise que des valeurs décennales moyennes interannuelles pour l'évapotranspiration potentielle, ce qui le rend facilement utilisable en réduisant les seules données datées aux données de pluie.

II.2 - POURQUOI "GR" EST NE ?

L'idée a été lancée par Michel en 1983 après l'essai d'un modèle conceptuel CREC (Galea, 1972) à 9 paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Michel a constaté des défauts dans ce modèle en estimant qu' "outre la difficulté de mise en œuvre, et la longueur des réglages, on ne maîtrise pas toujours le fonctionnement réel du modèle".

Le développement s'est fait en partant d'un modèle le plus élémentaire possible (1 réservoir, 1 paramètre) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à produire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique. L'essai sur le bassin de l'Orgeval a conduit à de mauvais résultats. "Il semble nécessaire de compliquer le modèle en prenant deux réservoirs avec le même paramètre (A) à caler: un réservoir (S) assurant le bilan de l'eau non gravitaire et un réservoir (R) assurant le routage des débits" (Michel, 1983).

Le réservoir S reçoit une fraction de la pluie (P) et est soumis à l'évaporation (E); ces deux fonctions dépendant de son niveau. La fraction complémentaire de la pluie va dans le réservoir de routage R à vidange quadratique. Michel (1983) a remarqué qu'il était inévitable de prendre 2 paramètres différents (A et B à caler) pour S et R , d'où l'esquisse du modèle à 2 paramètres.

II.3 - LE MODELE GR2J

Edijatno (1988), Edijatno et Michel (1989) ont essayé de justifier la meilleure architecture pour cette esquisse de modèle à 2 paramètres (Cf. **figure II.1**). Ils l'ont comparé à une cinquantaine de versions différentes. Les caractéristiques principales du modèle sont:

(1) - Au début une neutralisation intervient entre la pluie P et l'évaporation potentielle E selon la formule de Penman. On retient, $P_n = P - E$, avec $E_n = 0$, si $P \geq E$, et $E_n = E - P$, avec $P_n = 0$, si $P < E$;

(2) - le premier réservoir S détermine le coefficient de rendement à partir de P_n et de E_n . Le réservoir S a une capacité maximale égale à A , premier paramètre à caler (exprimé en millimètres). Le niveau S du réservoir sol permet de définir la pluie nette, si $P_n > 0$, la fraction est $P_r = P_n (S/A)^2$ et la part restante contribue au remplissage de ce réservoir. Si $E_n > 0$, l'évaporation réelle (E_r) est égale à $E_n (S/A)[2 - (S/A)]$.

(3) - Le deuxième réservoir R reçoit P_r et relâche progressivement son contenu pour donner le débit Q à la sortie du bassin selon une loi de vidange quadratique $Q = R^2 / (R + B)$, avec B deuxième paramètre à caler (exprimé en millimètres).

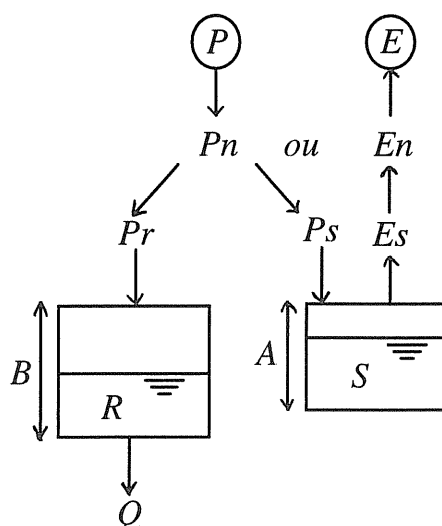


Figure (II.1): Schéma du modèle GR2, (Edijatno, 1988).

II.4 - LE MODELE GR3J

C'est un modèle à 3 paramètres, qui a été développé par Edijatno et Michel. L'architecture a été testée sur les données de 114 bassins versants avec des superficies variant de 1.5 km² à 3750 km². Tous les bassins disponibles au début de l'étude ont été pris en compte sans aucune exclusion. Les fonctions intégrées dans le modèle peuvent parfois aller à l'encontre de principes ou d'idées a priori sur le fonctionnement d'un bassin versant. Si ces fonctions ont été intégrées c'est pour la seule raison qu'elles ont permis, avec une grande économie de moyens, de rendre compte le mieux possible de la transformation qui a réellement lieu entre les pluies et les débits tels que l'on peut les mesurer.

L'architecture du modèle présenté (Cf. figure II.2) est simple; on distingue:

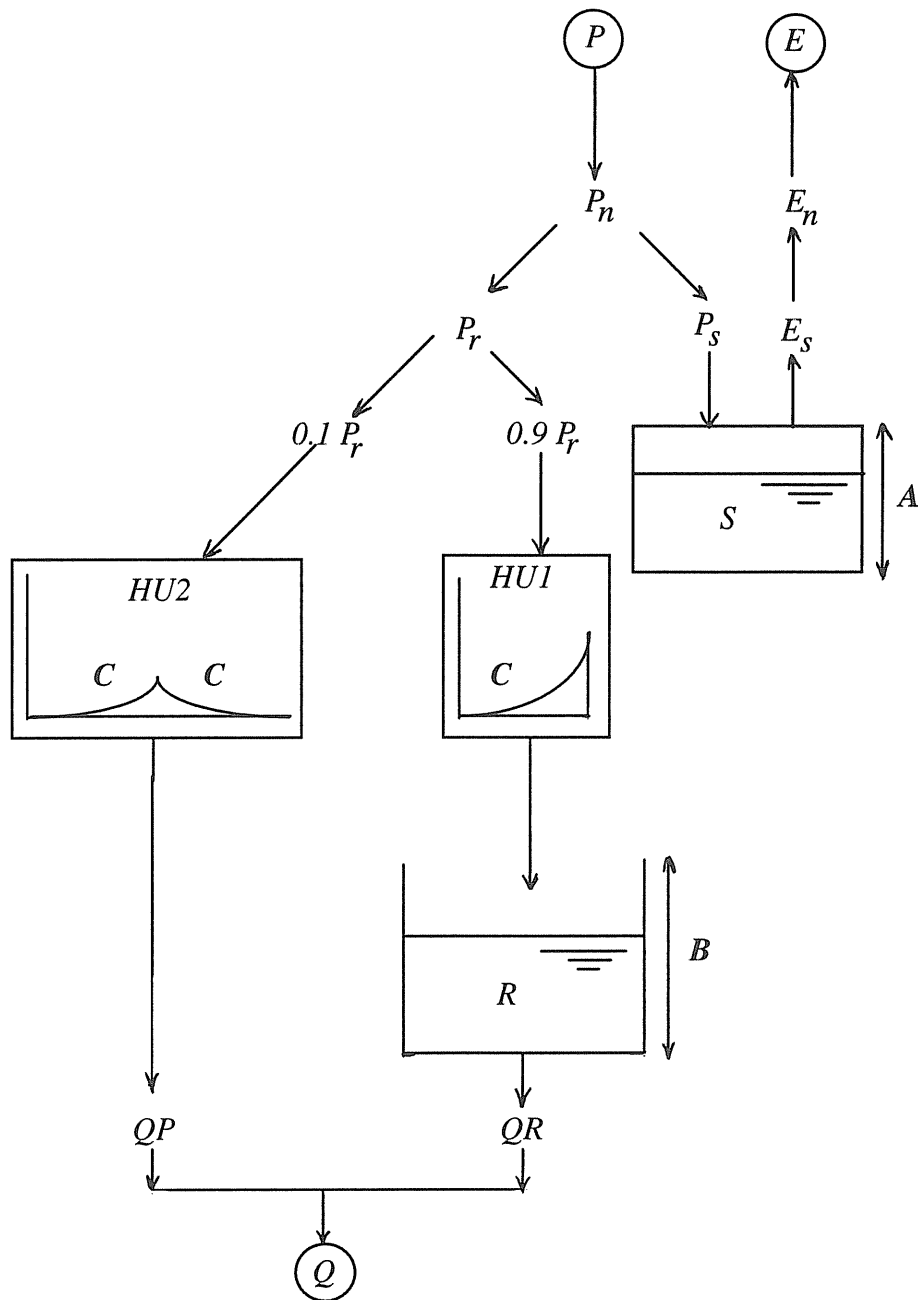


Figure (II.2): Schéma du modèle GR3J, (Edijatno, Michel, 1991).

II.4.1 - Interaction pluie-évaporation

En premier lieu, intervient une neutralisation pluie-évaporation. Si P est la pluie et E l'évapotranspiration moyenne du jour considéré, on prend en compte pour la suite une pluie $P_n = P - E$ avec $E_n = 0$ si $P \geq E$ et une évapotranspiration $E_n = E - P$ avec $P_n = 0$ si $E > P$.

II.4.2 - Réservoir-sol

La fonction de production s'organise autour d'un réservoir appelé réservoir-sol. Celui-ci est caractérisé par sa capacité A . Il est en outre alimenté par les pluies P_n et sa seule sortie est l'évapotranspiration. Le niveau S du réservoir-sol permet de définir la pluie nette comme expliqué ci-après.

Si à l'entrée du modèle une quantité de pluie élémentaire dP_n arrive, la pluie nette correspondante sera :

$$\left[(S/A)^2 \right] \cdot dP_n \quad (\text{II.1})$$

et la quantité:

$$\left[1 - (S/A)^2 \right] \cdot dP_n \quad (\text{II.2})$$

entre dans le réservoir-sol

Comme l'évaporation (E_n) de ce même jour est nulle, la pluie dP_n est seule responsable de l'augmentation de S :

$$dS = \left[1 - (S/A)^2 \right] \cdot dP_n \quad (\text{II.3})$$

La relation (II.3) peut être intégrée sur le pas de temps sans complication notoire. Cela permet de tenir compte de l'irrégularité temporelle de la pluie au cours d'un même jour. Soit S_1 la valeur de S au début du pas de temps considéré et soit S_2 la valeur de S à la fin du même pas de temps. Le calcul d'intégration montre que l'on obtient:

$$S_2 = \frac{S_1 + A \cdot \tanh(P_n/A)}{1 + (S_1/A) \cdot \tanh(P_n/A)} \quad (\text{II.4})$$

où $\tanh(x) = (e^{2x} - 1) / (e^{2x} + 1)$

Si, un jour donné, il se produit une évaporation élémentaire dE_n , elle donnera lieu à une évaporation réelle égale à:

$$(S/A) \cdot [2 - (S/A)] \cdot dE_n \quad (\text{II.5})$$

et comme au même moment $dP_n = 0$, cette évaporation réelle est égale en valeur absolue à la réduction du niveau du réservoir-sol: dS , d'où:

$$dS = -(S/A) \cdot [2 - (S/A)] dE_n \quad (\text{II.6})$$

ce qui donne après intégration:

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{1 - \tanh(E_n/A)}{1 + [1 + (S_1/A)] \cdot \tanh(E_n/A)} \quad (\text{II.7})$$

Les équations II.1 et II.5 gardent un rapport de symétrie (Cf. **figure II.3**)

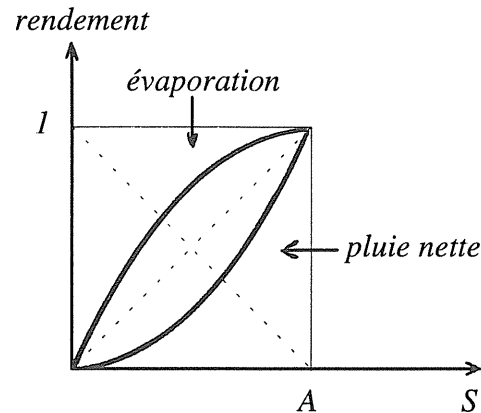


Figure (II.3): Rendement de la pluie et de l'évaporation, (Edijatno et Michel, 1989).

II.4.3 - L'hydrogramme unitaire

Le transfert de la pluie nette est, dans une première étape, assuré par deux hydrogrammes unitaires dépendant d'un seul et même paramètre C exprimé en jours.

La pluie nette est fractionnée en deux parties:

- une première partie de 90 % sera traitée par le premier hydrogramme unitaire ($HU1$) et sera ensuite introduite dans un réservoir de routage;

- la deuxième partie de 10 % sera traitée par le deuxième hydrogramme unitaire ($HU2$) et contribuera directement au débit à l'exutoire.

Soit $q(t)$ la fonction déterminant le premier hydrogramme unitaire, $HU1$:

Edijatno (1991) a montré qu'une expression satisfaisante est:

$$\begin{aligned} q(t) &= 3t^2/C^3 & \text{pour} & \quad 0 \leq t \leq C \\ q(t) &= 0 & \text{si} & \quad t > C \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

$HU1$ discrétisé a pour ordonnées q_1, q_2, \dots, q_{k+1} . Si $C < 1$, $q_1 = 1$ est l'unique ordonnée de $HU1$. Si $C > 1$ et avec $k = \text{int}(C)$:

$$\begin{aligned} q_j &= \int_{j-1}^j q(t) dt = \left(\frac{j}{C}\right)^3 - \left(\frac{j-1}{C}\right)^3 & \text{si} & \quad j \leq k \\ \text{et} & & & \\ q_j &= 1 - \left(\frac{j-1}{C}\right)^3 & \text{si} & \quad j = k + 1 \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

Le deuxième hydrogramme unitaire, $HU2$ s'obtient en complétant le premier par symétrie par rapport à la droite $t = C$ et en divisant par deux les ordonnées de façon à conserver un volume unitaire. Les lames d'eau réparties par ce deuxième hydrogramme unitaire donnent lieu, après sommation, aux flux QP .

Les équations de *HU2* sont les suivantes:

$$\begin{aligned} q(t) &= 3t^2/2C^3 && \text{pour } 0 \leq t \leq C \\ q(t) &= \frac{3(2C-t)^3}{2C^3} && \text{pour } C < t < 2C \\ q(t) &= 0 && \text{pour } t \geq 2C \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

HU2 discretisé pour un pas de temps $\Delta t = 1$:

$$q_1 = 1 - 0.5 \left(2 - \frac{1}{C}\right)^3 \quad \text{et} \quad q_2 = 0.5 \left(2 - \frac{1}{C}\right)^3 \quad \text{si } 0.5 \leq C \leq 1. \quad (\text{II.11})$$

Si $C > 1$ et avec $k = \text{INT}(C)$ et $i = \text{INT}(2C)$, on obtient:

$$\begin{aligned} q_j &= 0.5 \left\{ [j/C]^3 - [(j-1)/C]^3 \right\} && \text{si } 1 \leq j \leq k; \\ q_j &= 1 - 0.5 \left\{ [2 - (j/C)]^3 + [(j-1)/C]^3 \right\} && \text{si } j = k + 1; \\ q_j &= 0.5 \left\{ [2 - ((j-1)/C)]^3 - [2 - j/C]^3 \right\} && \text{si } (k+2) \leq j \leq i; \\ q_j &= 0.5(2 - j/C) && \text{si } j \geq k + 2 \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

Les lames d'eau réparties par le premier hydrogramme unitaire (*HU1*) sont introduites dans un réservoir appelé "eau-gravitaire" dont nous décrivons le fonctionnement au paragraphe suivant.

II.4.4 - Le réservoir eau-gravitaire

Ce réservoir reçoit de la pluie nette apportée par l'hydrogramme unitaire *HU1*. L'apport est instantané en début du pas de temps, puis le réservoir se vidange graduellement. Le niveau R du réservoir détermine le débit $Q_R(t)$ qu'il peut relâcher, selon la relation:

$$\begin{aligned} Q_R(t) &= \beta \cdot [R(t)]^\alpha \\ \text{avec } \alpha &\geq 1. \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

Selon Edijatno (1991) la meilleure valeur de α est voisine de 5.

Comme ce débit de vidange (débit Q_R) est la cause unique de la baisse de niveau du réservoir, R , on peut écrire en respectant le principe de la continuité:

$$Q_R(t) = -dR/dt \quad (\text{II.14})$$

En utilisant l'expression (II.14) et en intégrant l'équation obtenue sur un pas de temps de durée Δt , on a:

$$\frac{1}{R_2^4} - \frac{1}{R_1^4} = 4 \cdot \beta \cdot \Delta t \quad (\text{II.15})$$

où R_2 est le niveau du réservoir en fin de pas de temps et R_1 le niveau en début de pas de temps, après introduction de la première pluie nette calculée par l'hydrogramme unitaire *HU1*.

En posant: $4.\beta.\Delta t = 1/B^4$

il s'ensuit:

$$\frac{1}{R_2^4} = \frac{1}{R_1^4} + \frac{1}{B^4} \quad (\text{II.16})$$

La valeur de R_2 est au maximum égale à B quand R_1 est infini. Ainsi B peut être appelé "capacité maximale à un jour" du réservoir eau-gravitaire.

La lame d'eau libérée par le réservoir eau-gravitaire pendant ce pas de temps est donc égale à Q_R avec:

$$Q_R = R_1 - R_2 \quad (\text{II.17})$$

Le **tableau II.1** résume les statistiques des valeurs moyennes et des écarts-types sur 114 bassins versants.

	critères					paramètres		
	NASH	BIL	CRU	RDC	RDE	ln(A)	ln(B)	ln(C)
m	79.4	-0.59	81.36	0.92	-0.14	5.71	4.40	0.19
σ	11.78	16.35	20.4	0.37	0.51	0.92	1.06	0.46

m : Moyenne

σ : Ecart-type

Tableau (II.1): Résultats de calage du modèle GR3J, (Edijatno et Michel, 1991).

Le modèle GR3J donne des résultats très corrects mais il ne marche pas dans le cas, entre autres, des bassins intermittents. Une étude plus détaillée a montré la nécessité d'introduire une quatrième fonction (Nascimento, 1991).

II.5 - LE MODELE GR4J (Echanges souterrains)

Les équations du modèle GR4J sont les mêmes que celles du modèle GR3J décrites dans le paragraphe précédent, à l'exception de l'introduction du quatrième paramètre, D , qui concerne des échanges souterrains avec l'environnement extérieur du bassin versant.

Ce paramètre D peut être positif, négatif, ou nul. Il est exprimé en millimètres par jour. Le flux d'échange est égal à T donné par l'expression:

$$T = D \cdot \frac{S}{A} \quad D < 0. \quad (\text{perte pour le système}) \quad (\text{II.18})$$

et

$$T = D \cdot \frac{R}{B} \quad D \geq 0. \quad (\text{gain pour le système}) \quad (\text{II.19})$$

Ce flux T s'applique à la fois au niveau du réservoir eau-gravitaire et à l'écoulement pseudo-direct QP produit après l'application de l'hydrogramme unitaire $HU2$ (Cf. **figure II.4**).

La description de cette dernière fonction du modèle GR4J achève sa présentation. Nous devons préciser que cette architecture a été développée et testée par Nascimento (1994) sur 120 bassins versants repartis sur toute la France. Le **tableau II.3** résume les statistiques des valeurs moyennes et des écarts-types sur 121 bassins versants.

	critères (Cf. page 36)				
	NASH	BIL	CRU	RDC	RDE
m	80.2	0.17	84.3	0.91	0.92
σ	11.7	4.62	18.5	0.25	0.81

Tableau (II.2): Résultats de calage du modèle GR4J, (Nascimento, 1994).

II.6 - SCHEMA ACTUEL DU MODELE GR4J

Bien que le modèle GR4J ait été presque complètement décrit au cours de l'analyse précédente, il reste utile de résumer avec précision la procédure actuelle.

La **figure (II.4)** peut servir à illustrer ce qui suit.

Supposons que l'on se trouve au début du jour " i ". Toutes les variables devraient être indexées par " i ". Cependant, par souci de simplification dans les notations, cet index sera supprimé presque partout où sa présence n'est pas indispensable à la précision de l'exposé. Notons P la pluie et E l'évaporation pour le jour " i ".

Les calculs sont conduits comme suit:

(1) calculer P_n et E_n comme suit:

$$\begin{array}{ll} \text{si } P \geq E & \text{alors } P_n = P - E \quad \text{et} \quad E_n = 0 \\ & \text{sinon } P_n = 0 \quad \text{et} \quad E_n = E - P \end{array} \quad (\text{II.20})$$

(2) si $P_n > 0$, une pluie nette P_r apparaît donnée par:

$$P_r = P_n - A \cdot \frac{w_p \cdot (1 - s^2)}{1 + s \cdot w_p} \quad (\text{II.21})$$

où $w_p = \tanh(P_n/A)$; $s = S/A$ et A est un paramètre positif (exprimé en mm).

Le niveau du réservoir S est augmenté de $P_s = P_n - P_r$ et ne changera pas d'ici le nouveau pas de temps.

(2') si $E_n > 0$, une évapotranspiration réelle se produit E_s donnée par:

$$E_s = A \cdot \frac{s \cdot (2 - s) w_e}{1 + (1 - s) w_e} \quad (\text{II.22})$$

où

$$w_e = \tanh(E/A)$$

E_s est extraite du réservoir S dont le niveau restera inchangé jusqu'au prochain pas de temps. Les équations (II.21) et (II.22) ont été obtenues par intégration des deux équations différentielles ci-après:

$$dS = \left[1 - \left(\frac{S}{A} \right)^2 \right] . dP_n \quad (\text{II.23})$$

$$dS = - \frac{S}{A} \left(2 - \frac{S}{A} \right) . dE_n \quad (\text{II.24})$$

(2'') si $P_n = E_n = 0$, alors $P_r = 0$ et $E_s = 0$ et le réservoir S reste inchangé.

(3) P_r est divisée en deux parties, $P_1 = 0.1P_r$ et $P_9 = 0.9P_r$.

(4) P_9 est transformée par l'hydrogramme unitaire noté $HU1$, dont le temps de base est le paramètre C exprimé en jour.

Notons k la partie entière de C , et H_j avec $j=1, \dots, k+1$, les ordonnées de l'hydrogramme unitaire journalier. Ces ordonnées sont calculées comme suit:

si $C \leq 1$ alors $H_1 = 1$

si $C > 1$ alors $H_j = (j/C)^3 - [(j-1)/C]^3$ pour $j = 1, \dots, k$ et (II.25)

$$H_{k+1} = 1 - (k/C)^3$$

On peut vérifier que cet hydrogramme a été obtenu par intégration à partir de l'hydrogramme instantané donné par les équations (II.8).

H_1 correspond au jour courant i . Notons Q_H la sortie cumulée à travers l'hydrogramme unitaire $HU1$ en direction du réservoir R pour le jour i .

(5) P_1 est transformée par l'hydrogramme unitaire journalier noté $HU2$ et obtenue d'une façon similaire à partir des équations (II.10).

Rappelons que k est la partie entière de C , et notons h la partie entière de $2C$.

Si $C \leq 0.5$ alors $G_1 = 1$ et $G_2 = 0$ (II.26)

Si $0.5 < C < 1$ alors $G_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{1}{C} \right)^3$ et $G_2 = 1 - G_1$ (II.27)

Si $C > 1$ alors $G_j = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{j}{C} \right)^3 - \left(\frac{j-1}{C} \right)^3 \right]$ pour $j = 1, \dots, k$ (II.28)

$$G_{k+1} = 1 - \frac{1}{2} \left[\left(2 - \frac{k+1}{C} \right)^3 + \left(\frac{k}{C} \right)^3 \right]$$

$$G_j = \frac{1}{2} \left[\left(2 - \frac{j-1}{C} \right)^3 - \left(2 - \frac{j}{C} \right)^3 \right] \text{ pour } k+2 \leq j \leq h$$

si de telles valeurs existent, c'est-à-dire si $h \geq k+2$,

$$G_{h+1} = \frac{1}{2} \left(2 - \frac{h}{C} \right)^3$$

G_i correspond au jour courant i . Notons Q_p la sortie cumulée après passage par l'hydrogramme unitaire $HU2$ pour le jour i . Remarquons que C doit être supérieur à 0.5 pour avoir un effet sur l'hydrogramme unitaire.

(6) Q_H est dirigé sur le réservoir R dont le niveau devient:

$$R_1 = R + Q_H \quad (\text{II.29})$$

(7) Un flux échangé avec l'eau souterraine extérieure, T , est calculé en fonction du paramètre D exprimé en mm/jour et pouvant être positif, nul, ou négatif.

$$\text{si } D \geq 0 \quad \text{alors } T = D \cdot \frac{R}{B} \quad (\text{II.30})$$

$$\text{si } D < 0 \quad \text{alors } T = D \cdot \frac{S}{A} \quad (\text{II.31})$$

Cet échange avec l'espace souterrain extérieur T concerne à la fois le réservoir R et le flux Q_p .

Q_p devient Q_K donné par:

$$Q_K = \max(0, Q_p - T) \quad (\text{II.32})$$

R_1 devient R_2 donné par:

$$R_2 = \max(\varepsilon, R_1 - T) \quad (\text{II.33})$$

où ε est arbitrairement petit (par exemple, $\varepsilon = 0.001 \text{ mm}$)

(8) le réservoir R relâche un débit Q_R et par suite atteint le niveau R_3 donné par:

$$1/R_3^4 = 1/R_2^4 + 1/B^4 \quad (\text{II.34})$$

où B est un paramètre positif exprimé en mm comme R_2 et R_3 . R_3 sera le niveau du réservoir R en début du pas de temps suivant.

Le débit Q_R pour le jour i est par suite donné par:

$$Q_R = R_2 - R_3 \quad (\text{II.35})$$

(9) le débit total calculé selon le modèle GR4J est donc:

$$Q = Q_R + Q_K \quad (\text{II.36})$$

Le modèle GR4J fait intervenir quatre paramètres à caler. Le modèle GR3J (Edijatno et Michel, 1991) correspond au cas particulier du modèle GR4J où le quatrième paramètre est nul. Le modèle GR4J va maintenant être utilisé dans toute la suite de notre recherche.

II.6 - METHODE D'OPTIMISATION UTILISEE

La méthode décrite au chapitre précédent est simple. Pourtant, son utilisation dans le cas du modèle GR3J a montré son efficacité (Edijatno, 1991). C'est la raison pour laquelle elle est utilisée dans le modèle GR4J. On essaie de maximiser le critère de Nash.

Les paramètres A , B , C , et D sont optimisés dans l'espace des valeurs transformées, c'est-à-dire, pour:

$$\begin{aligned}
 a &= \ln(A) \\
 b &= \ln(B) \\
 c &= \ln(C - 0.5) \\
 d &= D
 \end{aligned}
 \tag{II.37}$$

où $\ln(\cdot)$ est le logarithme naturel.

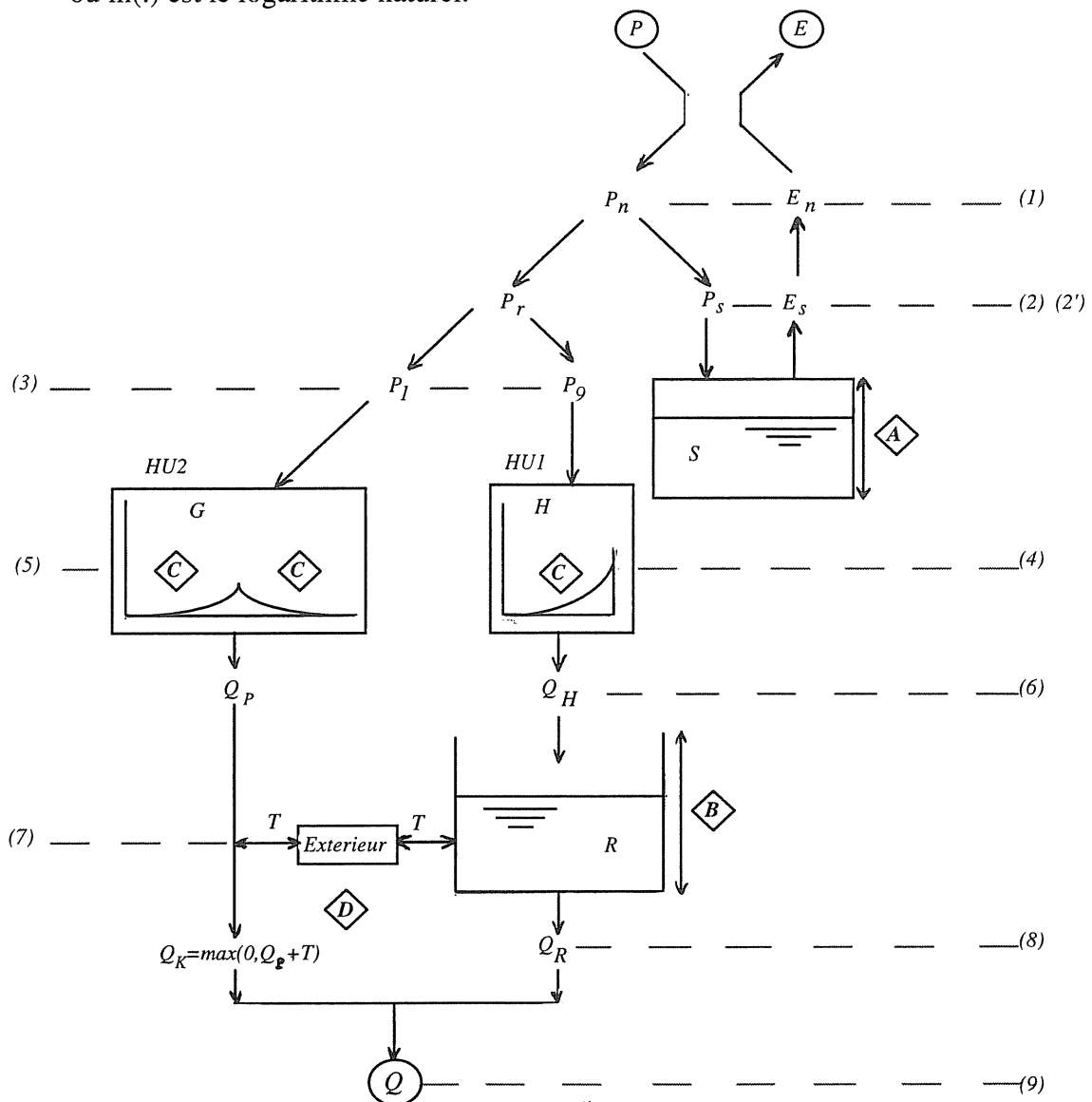


Figure (II.4): Schéma du modèle GR4J.
(les nombres entre parenthèses renvoient aux alinéas du texte).

Pour accélérer l'optimisation des paramètres il est utile de partir de valeurs estimées a priori de ces paramètres. Une analyse de régression très grossière analogue à celle établie par Edijatno (1991), a donné les relations suivantes:

$$\begin{aligned} a &= 0.12 \ln(SF) + 2.33 \ln(TA) - 0.59 \\ b &= 0.17 \ln(SF) + 1.34 \ln(PA) - 5.56 \\ c &= 0.33 \ln(SF) - 2.64 \ln(TA) + 4.78 \\ d &= 0. \end{aligned} \quad (\text{II.38})$$

où SF est la superficie du bassin (km²); PA est la pluie annuelle moyenne (mm) et TA est la température moyenne annuelle réduite au niveau de la mer.

Des limites extrêmes sont fixées dans l'espace des paramètres transformées pour s'assurer que la recherche ne s'immobilise dans des régions insensibles. Ces limites sont définies comme suit:

a et b sont limités à l'intervalle (0 , 9.99); quant à c , et d les intervalles correspondants sont respectivement (-0.69 , 9.99) et (-9.99 , 9.99).

Il peut arriver que l'optimisation du paramètre a conduise à des valeurs très élevées ($a = 9.99$). Cela signifie que S/A a plutôt une valeur fixe. Dans cette situation la valeur de a n'est pas importante en elle-même et le paramètre à optimiser est plutôt S_0/A , où S_0 est le niveau initial du réservoir S ce qui conduit à un coefficient d'écoulement fixe pour le calcul des pluies nettes. Cependant ce cas est extrêmement rare .

II.7 - INITIALISATION DU SYSTEME

Le problème majeur qu'on rencontre dans toute modélisation est l'établissement des conditions initiales du modèle. Pour le modèle GR4J l'initialisation se fait par le choix des niveaux des deux réservoirs plus les précipitations issues de la convolution par les deux hydrogrammes unitaires (HU).

Si on démarre par une période sèche on est amené à n'initialiser que les deux niveaux des réservoirs. Dans ce cas l'état du réservoir R peut être calculé à partir du débit observé initial Q_0 , si ce dernier est disponible. Si R_0 est le niveau du réservoir eau-gravitaire à la fin de l'intervalle de temps dont le débit observé est Q_0 , l'équation dynamique s'écrit:

$$1/R_0^4 = 1/(R_0 + Q_0)^4 + 1/B^4 \quad (\text{II.39})$$

Quand Q_0 est petit, la solution en R_0 de l'équation (II.39) par la méthode de Newton-Raphson peut être longue à converger, à cause de l'exposant 4.

On peut partir de la solution approximative R'_0 donnée par:

$$R'_0 = B \cdot \left[1 - \frac{1}{4(1+q_0)^4 - 3 + (4q_0)^{0.2} + (8q_0)^{0.4}} \right] \quad (\text{II.40})$$

où

$$q_0 = Q_0/B$$

Le réservoir sol peut être initialisé en fonction du mois de démarrage de la simulation, en utilisant le rapport S_o/A moyen déjà établi à partir d'études réalisées sur plusieurs bassins (Cf. **tableau II.3**). Pour compenser le caractère inévitablement arbitraire de cette initialisation, on devra utiliser une période de mise en route. Une autre option est de considérer S_o/A comme un paramètre supplémentaire.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
S_o/A	0.81	0.84	0.82	0.75	0.66	0.55	0.43	0.36	0.37	0.50	0.61	0.71

Tableau (II.3): Rapport S/A moyen sur 120 bassins versants, (Nascimento, 1994).

II.8 - EVOLUTION ET COMPORTEMENT DU SYSTEME

Afin d'avoir une meilleure compréhension du comportement du modèle il est utile de connaître comment évolue l'état du système modélisé. En général, S varie très lentement et prend des valeurs élevées en hiver (saison pendant laquelle l'évapotranspiration est beaucoup plus faible que la pluie, en France) et basses en été. R est au contraire beaucoup plus dépendant des pluies récentes et présente une variation saisonnière légèrement moins marquée. A titre d'exemple les niveaux moyens mensuels de S et de R , relatifs à un bassin de 2340 km², sont présentés dans le **tableau II.4**. On peut voir qu'au coeur de l'hiver, S peut être très près de A , créant la possibilité de produire un fort taux de pluie nette. La valeur minimale de S/A est en moyenne (120 bassins) égale à 0.19 avec un écart-type de 0.14. La valeur maximale de S/A est en moyenne égale à 0.92 avec un écart-type de 0.09. Ces valeurs de S/A se sont révélées être de bien meilleurs indices pour le coefficient d'écoulement que des expressions fondées sur les pluies antérieures ou même les débits antérieurs.

Les valeurs minimales de R/B rencontrées sont en moyenne égales à 0.28 avec un écart-type de 0.13. Les chiffres correspondants pour la valeur maximale sont 0.83 et 0.13. Ces valeurs de R/B renvoient à l'état du réservoir à la fin de chaque pas de temps, après que le débit courant ait quitté le réservoir, et ne peuvent donc dépasser 1, ce qui signifie que quelle que soit la hauteur de pluie nette cumulée introduite par l'hydrogramme unitaire dans le réservoir R , la quantité d'eau restant dans ce réservoir, après sa vidange pendant un pas de temps, ne peut en aucun cas dépasser B .

Il est également instructif de noter la valeur que peut atteindre la fraction d'écoulement qui court-circuite le réservoir R . Quand les pluies sont nulles pour plusieurs pas de temps successifs ces écoulements sont égaux à 0. Mais pendant les épisodes pluvieux, ils peuvent très largement dépasser la fraction 1/10 réglant les entrées dans le réservoir R parce que les débits sortant de ce réservoir sont très inférieurs aux entrées en période de fortes pluies, mais en revanche ils sont beaucoup plus réguliers. La fraction maximale de l'écoulement court-circuite le réservoir R et prend sur les 120 bassins une valeur moyenne de 0.63 avec un écart-type de 0.18.

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
moyenne de S/A	.82	.88	.90	.85	.78	.67	.53	.40	.41	.48	.57	.69
(écart-type)	.07	.05	.04	.05	.08	.09	.11	.09	.10	.14	.13	.13
moyenne de R/B	.48	.50	.49	.49	.49	.45	.41	.37	.35	.37	.38	.42
(écart-type)	.06	.07	.05	.05	.06	.04	.05	.04	.03	.05	.06	.07

Tableau II.4: Valeurs moyennes de *S/A* et de *R/B* au début d'un pas de temps.
(La Seine à Bar-Sur-Seine, 1981-1989).

II.9 - CRITERES D'EVALUATION ET DE QUALITE

Nous allons présenter les critères utilisés par le modèle GR4J, pour évaluer plus complètement la qualité du calage.

(1) - Critère de **Nash** (voir Chapitre 1, équation I.3).

(2) - Erreur relative de bilan (**BIL**):

$$\text{BIL} = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n Q_o(i) - \sum_{i=1}^n Q_c(i)}{\sum_{i=1}^n Q_o(i)} \quad (\text{II.41})$$

(3) - Rapport des crues annuelles moyennes (**CRU**):

$$\text{CRU} = 100 \cdot \frac{\overline{QX_c}}{\overline{QX_o}} \quad (\text{II.42})$$

où M est le module interannuel, $\overline{QX_c}$ est la moyenne des pointes de crues définies comme une succession ininterrompue de débits calculés, supérieurs à quatre fois le module. $\overline{QX_o}$ est la variable correspondante pour la série des débits observés.

(4) - Rapport des durées de crue (**RDC**):

$$\text{RDC} = NX_c / NX_o \quad (\text{II.43})$$

où NX_c : nombre de jours où Q_c dépasse 4 fois le module
 NX_o : nombre de jours où Q_o dépasse 4 fois le module.

(5) - Rapport des durées d'étiages (**RDE**):

$$\text{RDE} = (NN_c - NN_o) / n \quad (\text{II.44})$$

où NN_c : nombre de jours où Q_c le quart du module
 NN_o : nombre de jours où Q_o le quart du module
 n : nombre de jours total de simulation.

On rappelle que toutes les données disponibles ont été prises en compte sans aucun rejet et sans aucune correction. Le critère de Nash prend une valeur moyenne de 80% sur les 120 bassins utilisés pour la mise au point du modèle GR4J. Le bilan en eau (**BIL**) est généralement très bon pour la période de calage (Cf. **tableau II.2**) mais peut se détériorer quand on utilise le modèle en dehors de cette période.

Le critère (**CRU**) qui est défini comme le rapport entre la somme des pointes de débit calculée et la somme des pointes de débit observée, a obtenu la valeur moyenne de 84% avec un écart-type de 19%. On s'attend à ce que cette valeur soit inférieure à 100 % à cause de deux mécanismes de lissage. D'abord, une forte pluie peut se trouver divisée par deux par le découpage en jours, ensuite, quand C est approximativement entre deux entiers successifs la réponse du modèle est plus vive que lorsque C est voisin d'un nombre entier de jours (cela se constate sur l'hydrogramme unitaire $HU2$ qui est plus important en matière de pointe de crue que l'hydrogramme unitaire $HU1$). Les conséquences de ce phénomène de double lissage sont clairement mises en évidence sur la **figure II.5** (Makhlouf, 1991) qui présente les différentes valeurs de crue cinquantennale correspondant à différentes valeurs de C , pour des bassins hypothétiques ayant tous leurs paramètres fixés à une valeur moyenne - sauf le paramètre C - et supposés situés dans le contexte climatique parisien.

Un autre critère (**RDC**) consiste à comparer les durées cumulées des crues calculées et observées définies précédemment. De façon similaire une période de sécheresse a été définie comme une période pendant laquelle le débit se maintient en-dessous du dixième du module. Le critère (**RDE**) est le rapport des durées d'étiage calculées et observées. **RDC** a une valeur moyenne de 0.91 avec un écart-type de 0.25. **RDE** se comporte de façon plus irrégulière (le problème de la reproduction des bas débits est plus délicat que celui des crues, surtout si l'on optimise les paramètres sur la base des carrés des erreurs des débits sans transformation préalable). Ce critère prend la valeur moyenne de 0.92 avec un écart-type de 0.81.

Ces critères ne sont pas seulement utiles pour l'étape de validation du modèle mais se sont également révélés essentiels lors de la phase de son développement pour fournir des indications sur la qualité respective des innombrables versions concurrentes confrontées à cette occasion. A titre d'illustration des débits calculés par le modèle GR4J, la **figure II.6** montre les débits observés et calculés pour la Seine à Bar-Sur-Seine (2340 km²).

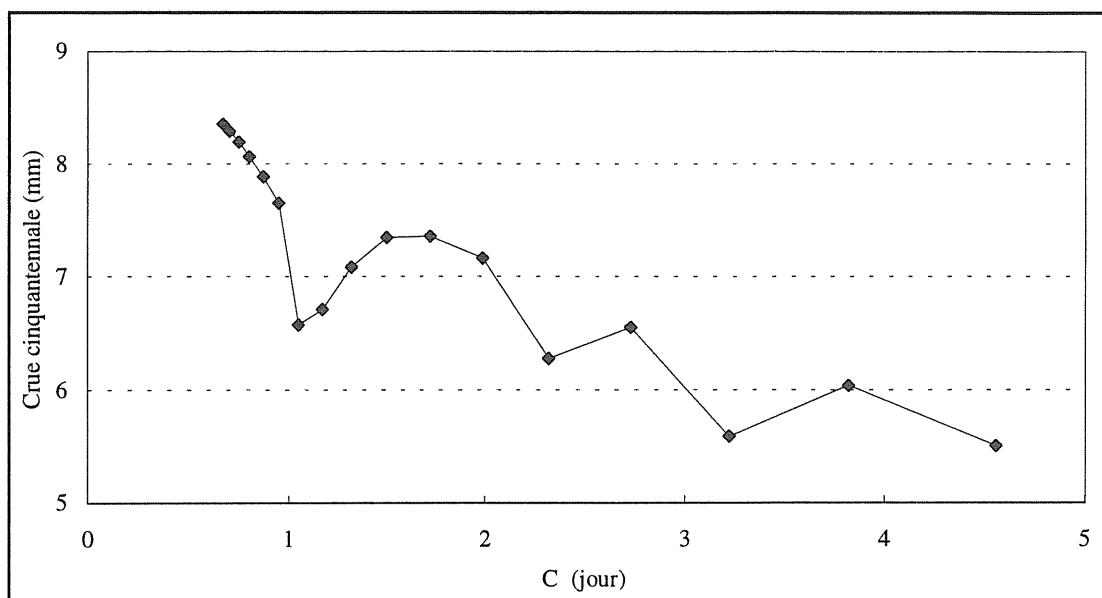
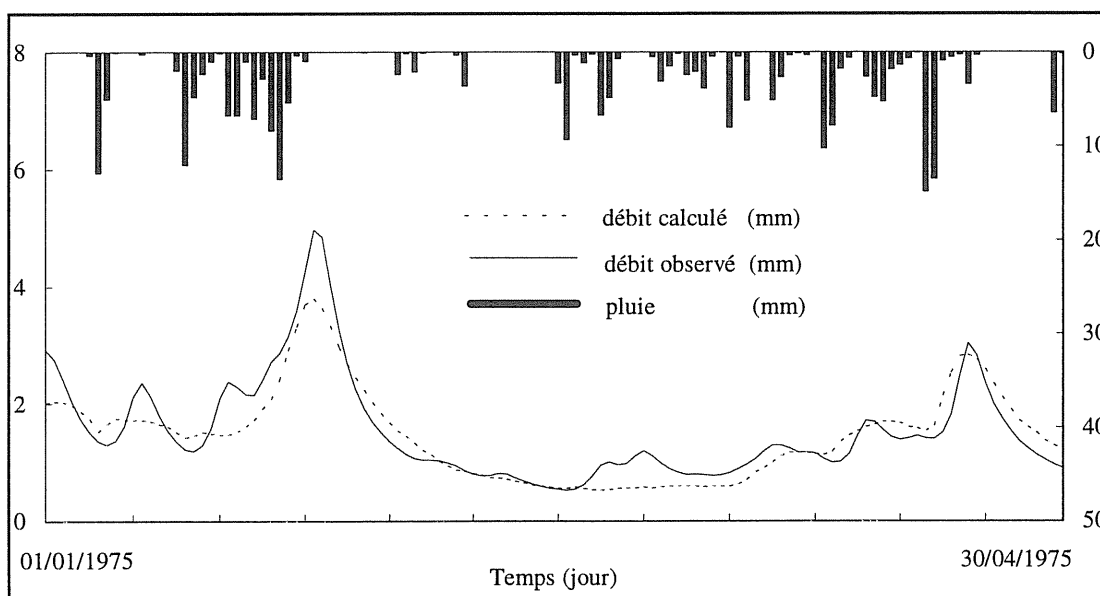


Figure (II.5): Variation de la crue cinquantennale en fonction du paramètre *C*. (bassins hypothétiques placés dans le contexte climatique parisien).



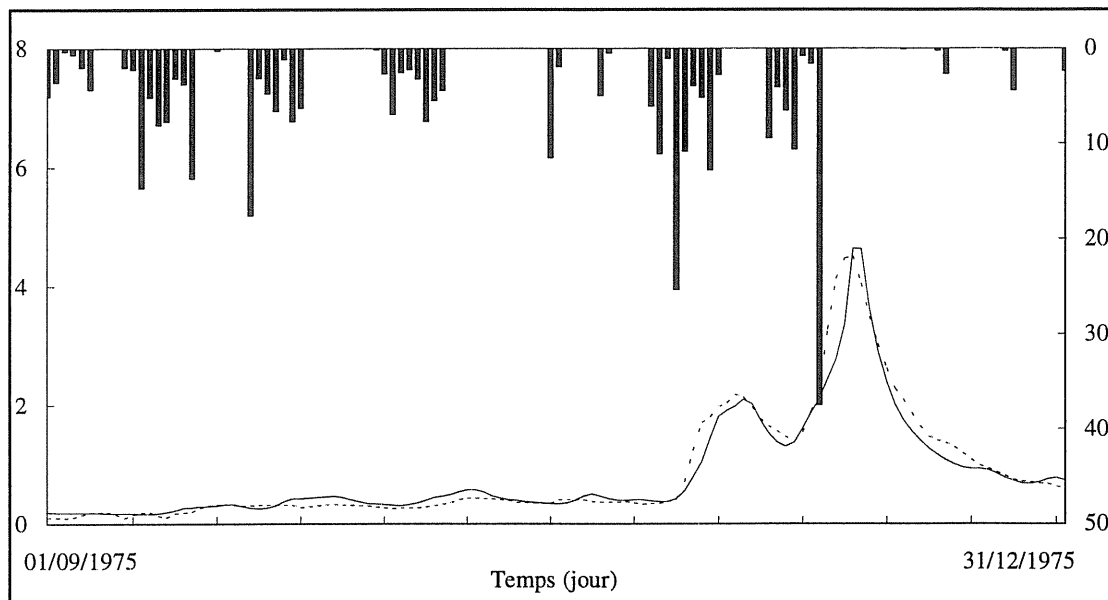
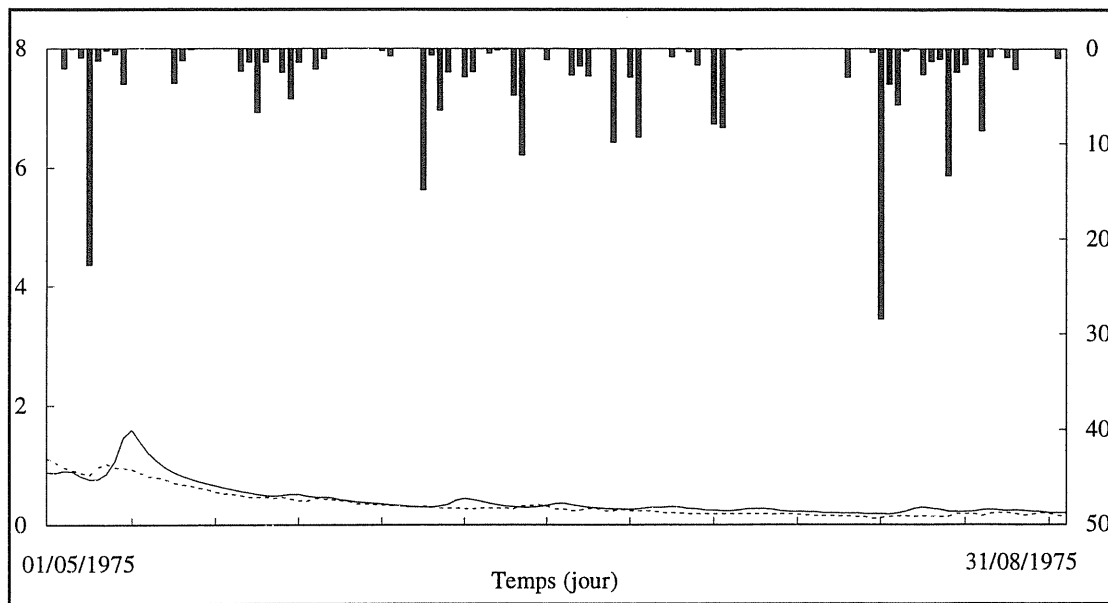


Figure (II.6): Débit généré par GR4J pour la Seine à Bar-Sur-Seine. (période de validation).

II.10 - INCERTITUDE DES PARAMETRES

Quand on développe un modèle, il est nécessaire d'avoir quelque idée sur l'incertitude des paramètres. Cela a été réalisé en calculant la matrice des variances-covariances des paramètres selon la méthode de l'approximation linéaire (Troutman, 1985 et Bates, 1992). Cette approche donne des écarts-types plus grands que ceux obtenus par la méthode du maximum de vraisemblance fondée sur la matrice d'information de Fischer. Pour le calcul des variances des paramètres on a considéré que le nombre de degrés de liberté était égal au nombre de valeurs de pluie strictement positives. Cela a conduit, in fine, à multiplier les écarts-types donnés par la méthode par le rapport du nombre total de jours sur le nombre de jours où la pluie est non nulle. Pour notre ensemble de 120 bassins les valeurs moyennes des incertitudes sur les paramètres apparaissent sur la dernière ligne du **tableau II.5**.

paramètre transformé	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
valeur moyenne (120 bassins)	5.67	4.28	0.16	0.02
écart-type (120 bassins)	0.66	1.03	0.45	0.37
incertitude moyenne (120 bassins)	0.15	0.18	0.13	0.12

Tableau (II.5): Statistiques sur les paramètres de GR4J.

Il est apparu que ces écarts-types obtenus par la méthode de l'approximation linéaire étaient très sensiblement inférieurs aux écarts-types obtenus par l'analyse statistique des différents jeux de paramètres issus du calage du modèle sur différentes périodes d'observation des débits (c'est-à-dire au delà des effets de l'incertitude d'échantillonnage comme la calculent Gupta et Sorooshian (1985)). La question de savoir si cela doit être imputé à la trop grande simplification introduite par le modèle ou à une réelle 'palpitation' du bassin versant ou encore à une adaptabilité trop grande du modèle à chaque type de conditions climatiques n'a pas été encore résolue bien que nous suspicions la troisième hypothèse d'avoir la part prépondérante dans cette explication. Une façon évidente de relativiser les valeurs des paramètres obtenus pour un bassin versant donné et de les restituer avec les statistiques obtenues sur l'échantillon global des 120 bassins. Pour cet échantillon les paramètres transformés (*a*, *b*, *c* et *d*) sont des variables approximativement normales dont les moyennes et les écarts-types figurent dans les deux premières lignes du **tableau II.5**.

II.11 - APPLICATIONS DU MODELE GR4J

Un modèle robuste tel que GR4J s'est révélé très utile dans la gestion des ressources en eau en fournissant des scénarios probables d'évolution des débits lorsqu'on associe le modèle à un processus stochastique de génération de pluies (Yang et al., 1991) ou pour des problèmes de prévision d'étiage.

GR4J a été utilisé pour générer des distributions de crues extrapolées bien au-delà de la durée des données utilisées pour le calage du modèle.

Une troisième application concerne la détection des modifications anthropiques du cycle hydrologique. L'approche des bassins témoins peut être effectuée en comparant les séries de débits générées par des jeux de paramètres obtenus sur différentes périodes avant et après changement (Nascimento, 1994). Dans l'avenir si l'on peut rassembler suffisamment de cas étudiés on pourra établir des statistiques sur la façon dont les paramètres évoluent suite aux activités de l'homme et peut-être en déduire des prévisions pour des bassins non encore affectés. Par là même on pourra obtenir une information précieuse sur la signification cachée des paramètres et éventuellement les variables physiques les plus pertinentes pour leur estimation a priori.

Enfin, a été mis au point par (Yang, 1993) un modèle simple est particulièrement précieux à la fois pour résoudre l'épineux problème de la prévision des crues en temps réel et une méthode générale applicable à des modèles tels que GR4J.

CHAPITRE III

ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES DU MODELE GR4J SUR LES VARIABLES HYDROLOGIQUES

III.1 - INTRODUCTION

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système réel complexe. En réalité, les paramètres d'un modèle conceptuel global trouvent une justification faible dans les idées physiques qui ont prévalu lors de sa conception: le qualificatif conceptuel indique que le modèle s'inspire de la réalité physique mais il en reste assez éloigné, et ses éléments (réservoirs par exemple), ne peuvent être identifiés à des éléments réels.

Les paramètres qui caractérisent le modèle GR4J appartiennent à des fonctions bien séparées et présentent aussi peu d'interdépendance qu'il est possible. Cependant cette transparence n'est pas telle que l'on puisse deviner l'effet de chaque paramètre sur les variables étudiées classiquement en hydrologie. Une première tentative à été effectuée sur le modèle GR3J (Makhlouf, 1991). Cette tentative tendait à trouver le lien qui pouvait exister entre les paramètres du modèle GR3J et les caractéristiques hydrologiques simulées par le modèle pour deux stations climatiques en France (Paris-Montsouris et Montpellier).

Nous généralisons ici le travail effectué avec le modèle GR3J, en utilisant le modèle GR4J et un plus grand nombre de stations climatiques en France, pour permettre de dissocier l'effet des paramètres descriptifs du bassin de l'effet climatique. Une vingtaine de stations climatiques en France ont été sélectionnées.

III.2 - DESCRIPTION DES DONNEES

III.2.1 - Les bassins modélisés

Les variables hydrologiques seront suivies sur des bassins hypothétiques, obtenus en simulant pour chacun d'eux un quadruplet de paramètres (*A*, *B*, *C* et *D*) et en se plaçant dans un type de climat déterminé. Les 20 stations climatiques apparaissent sur la **figure III.1** qui est un plan de situation. Ces stations sont réparties sur toute la France et sont sélectionnées dans un souci de représentativité de tous les types de climats.

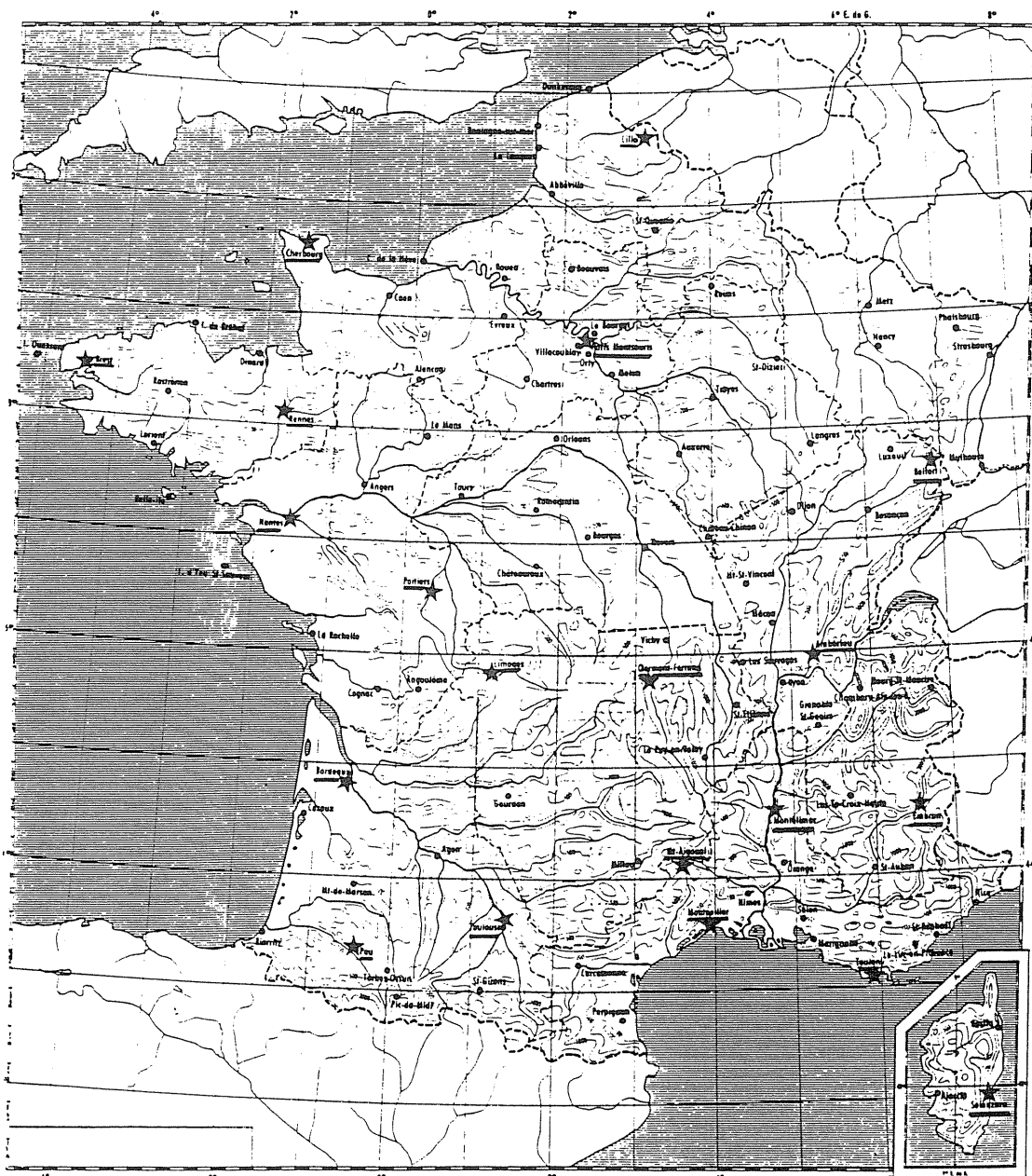
III.2.2 - Les données climatiques

Les données d'évaporation et de pluviométrie nous ont été communiquées par la Météorologie Nationale (METEO-FRANCE).

Les données d'évaporation correspondent aux valeurs décadaires d'évapotranspiration calculées par la Météorologie Nationale, selon la formule de Penman et moyennées sur une longue période (1951-1980).

Les périodes de fonctionnement des 20 stations pluviométriques sélectionnées sont mentionnées dans le **tableau III.1**.

Un contrôle simple de la qualité des données consiste en une vérification de l'inexistence d'interruptions dans la série des précipitations et un contrôle visuel des valeurs improbables. Cette pratique simple a été adoptée et considérée comme suffisante pour l'objectif que l'on s'est assigné.



★ : station pluviométrique

Figure (III.1): Plan de situation de 20 stations climatiques.

N°	Station Pluviométrique	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01	Brest									....	.....	.....	.....	.....
02	Cherbourg										....	.....	.....	.....
03	Rennes								.....	.....	.....	.....	.....	.....
04	Nantes									....	.....	.....	.....	.....
05	Bordeaux							.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
06	Lille									....	.....	.....	.....	.....
07	Paris-Montsouris	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
08	Belfort									....	.....	.....	.....	.....
09	Ambrieu								..	..	.....	.....	.....	.....
10	Embrun							..	..	.....	.....	.....	.....	.....
11	Clermont-Ferrand								.....	.....	.....	.....	.....	.....
12	Limoges		..		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
13	Poitiers									....	.....	.....	.....	.....
14	Pau									....	.....	.....	.....	.....
15	Toulouse									..	.....	.....	.....	.....
16	Montelimar									....	.....	.....	.....	.....
17	Montpellier									....	.....	.....	.....	.....
18	Toulon									....	.....	.....	.....	.....
19	Mont-Aigoual				..	..	..	..	..	....	.....	.....	.....	.....
20	Solenzara										.....	.....	.....	.....

Tableau (III.1): Période d'observation des 20 stations pluviométriques.

Pour trois stations pluviométriques, il a fallu utiliser les données d'évaporation des postes les plus proches; ces stations sont:

Station Pluviométrique	Station d'ETP
Belfort	Bâle-Mulhouse
Mont-Aigoual	Millau
Solenzara	Bastia

III.3 - VARIABLES HYDROLOGIQUES RETENUES

III.3.1 - Les variables aléatoires

Nous définissons avec précision les variables qui nous paraissent représentatives du comportement hydrologique d'un bassin versant, et ces variables seront suivies sur chaque station climatique. Si l'on reste dans le domaine de la simulation, on peut dire que ces variables sont relatives à trois caractéristiques du régime hydrologique et illustrent les trois grands domaines des écoulements à savoir:

- 1 - Les apports sur une longue durée;
- 2 - les crues;
- 3 - les étiages.

Nous définissons une variable X caractéristique de chacun de ces aspects. Afin d'éviter les difficultés de l'ajustement analytique d'une loi de distribution assez souple, nous avons préféré rester au niveau de la distribution empirique dont la précision est acceptable compte tenu de la durée des échantillons disponibles.

Cette distribution expérimentale utilisant la formule de Chedogayev est donnée par les couples (X_i, F_i) ; X_i correspondant à la $i^{\text{ème}}$ valeur de l'échantillon classé par ordre de grandeur croissant et F_i étant la fréquence au non-dépassement.

$$F_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (\text{III.1})$$

où n est la taille de l'échantillon

Un quantile X^* correspondant à une fréquence au non-dépassement F^* sera obtenu par interpolation linéaire entre deux couples successifs. F_i et F_{i+1} tels que:

$$F_i \leq F^* < F_{i+1} \quad (\text{III.2})$$

Afin de décrire les trois principaux aspects de la ressource en eau, on a retenu l'écoulement annuel Q_a pour les écoulements sur une longue durée, le débit journalier maximal de l'année Q_x pour les crues et le débit mensuel du mois de septembre Q_n pour les étiages. Nous avons retenu un seul quantile pour chacun des écoulements.

III.3.2 - Ecoulements annuels (moyenne)

Comme il a été expliqué précédemment, pour le choix des débits, nous avons opté pour l'écoulement sur une longue durée d'écoulement annuel qui intègre les variations saisonnières, et avons choisi la valeur moyenne qui est couramment appelée le module du cours d'eau.

III.3.3 - Ecoulements de crue ($F^* = 0.9$)

La crue est un événement comprenant une ou plusieurs augmentations rapides et fortes du débit du cours d'eau. Beaucoup d'ouvrages implantés en travers des cours d'eau doivent supporter la crue décennale. Ceci explique le choix du quantile décennal qui est souvent la cible des études de crues.

III.3.4 - Ecoulement d'étiage ($F^* = 0.5$)

Notre choix s'est porté sur le débit mensuel du mois de septembre pour caractériser les débits faibles, car le débit le plus faible de l'année ou la durée de passage en dessous d'un seuil donné, peuvent être trop influencés (pompages dans le lit du cours d'eau, mauvais tarage, etc...). Le quantile retenu est l'écoulement médian du mois de septembre.

III.4 - ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES

III.4.1 - Démarche suivie

Nous étudions l'effet, sur les variables hydrologiques précédemment définies, de la variation d'un paramètre du modèle GR4J entre deux bornes, les autres paramètres étant fixés à leurs moyennes établies par les études de Nascimento, 1991, Edijatno et al. 1994 sur plus d'une centaine de bassins versants en France. Pour cela nous faisons, successivement, varier le paramètre de part et d'autre de sa valeur moyenne en fixant les trois autres à leurs valeurs moyennes sur la France. Cette étude de l'influence des paramètres est partielle puisqu'on n'étudie pas toutes les configurations possibles. Cependant elle donne une idée centrale sur l'effet d'un paramètre isolé.

Les intervalles de distribution des paramètres observés:

$$\begin{aligned}
 A &\in [20, 1800] && mm \\
 B &\in [7, 1100] && mm \\
 C &\in [0.4, 7] && jour \\
 D &\in [-0.5, 0.25] && mm / jour
 \end{aligned}
 \tag{III.3}$$

les moyennes logarithmiques des paramètres observés sur 120 bassins versants en France:

$$\begin{aligned}
 \bar{A} &= 290 \text{ mm} \\
 \bar{B} &= 72 \text{ mm} \\
 \bar{C} &= 1.7 \text{ jours} \\
 \bar{D} &= 0.02 \text{ mm / jour}
 \end{aligned}
 \tag{III.4}$$

On applique à chaque bassin versant hypothétique (en prenant un quadruplet A , B , C et D) issu des distributions de ces quatre paramètres sur chaque station considérée les pluies de la série observée retenue et on génère ainsi, pour chaque bassin, une série d'égale durée (à l'année de mise en route près) de débits simulés.

On extrait chaque année trois valeurs qui sont: L'écoulement annuel, le débit journalier maximal et le débit du mois de septembre, les trois variables étant exprimées en mm . On étudie les distributions de ces trois variables et on tire le quantile expérimental correspondant à la fréquence au non-dépassement choisie plus haut.

Cette démarche est traduite en Fortran 77 dans un programme principal autour duquel se greffent dix sous-programmes.

Afin de mieux voir les variations de la variable, on a utilisé des graphiques arithmétiques pour les débits et les deux paramètres C et D variables, et logarithmiques pour les paramètres A et B c'est-à-dire arithmétiques pour a et b , ce qui facilite les comparaisons.

III.4.2 - Influence sur les écoulements annuels

A l'examen des graphiques (Cf. **figure III.2** et **annexe I.2**), on remarque immédiatement que pour les 20 stations, les paramètres A et D influent nettement sur les écoulements annuels, alors que B influe faiblement.

Si les paramètres A et D augmentent, les écoulements diminuent ainsi pour le paramètre B mais la décroissance est très faible. C n'a aucune influence sur les écoulements annuels. Ces résultats sont nullement surprenants, mais leur intérêt réside dans la quantification obtenue et dans la forme des relations mises en évidence.

III.4.3 - Influence sur les crues

Cette partie consiste à analyser l'influence du quadruplet caractéristique d'un bassin hypothétique sur les crues de fréquence décennale (une chance sur dix d'atteindre ou de dépasser ce débit chaque année).

Les quatre paramètres A , B , C et D ont tous une influence sur les débits de crues. Quand l'un des paramètres augmente le débit de la crue décennale diminue. Les graphiques (Cf. **figure III.3** et **annexe I.3**) montrent une forte décroissance des débits de crue décennale avec chaque variable à l'exception du paramètre C où cette décroissance est plus modérée et irrégulière avec des pointes locales au voisinage des valeurs à mi-distance entre deux entiers successifs. L'influence de A sur les crues est similaire à celle de B .

III.4.4 - Influence sur les étiages

Après avoir étudié les crues et les écoulements annuels, nous allons observer l'influence des paramètres sur les étiages (étiage moyen).

Les graphiques (Cf. **figure III.4** et **annexe I.4**) obtenus montrent que A , B , et D ont un effet sur les étiages alors que C n'a aucune influence.

Le paramètre B a un effet très net sur les étiages; quand il augmente, les débits augmentent aussi, alors que D fait diminuer les débits quand il augmente. Le paramètre A n'a pas un effet toujours dans le même sens: quand A est faible le débit d'étiage varie fortement dans le sens inverse à A , et quand A est fort, le débit d'étiage croît très légèrement avec A .

Au voisinage de la valeur moyenne, \bar{A} , l'effet d'une faible variation de A sur l'étiage du mois de septembre est quasiment nulle.

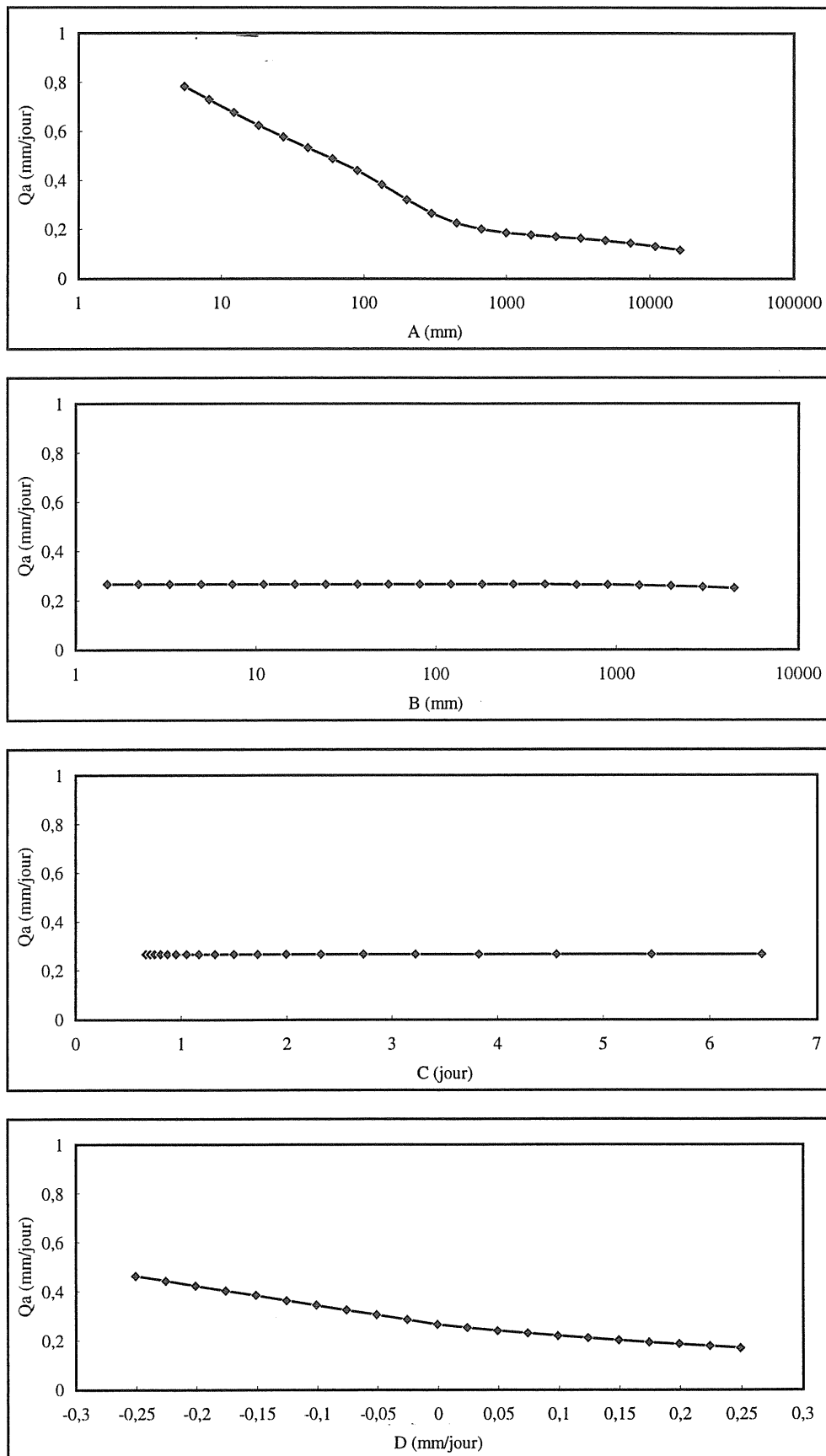


Figure (III.2): Influence des paramètres sur les écoulement annuels moyens. (Paris-Montsouris).

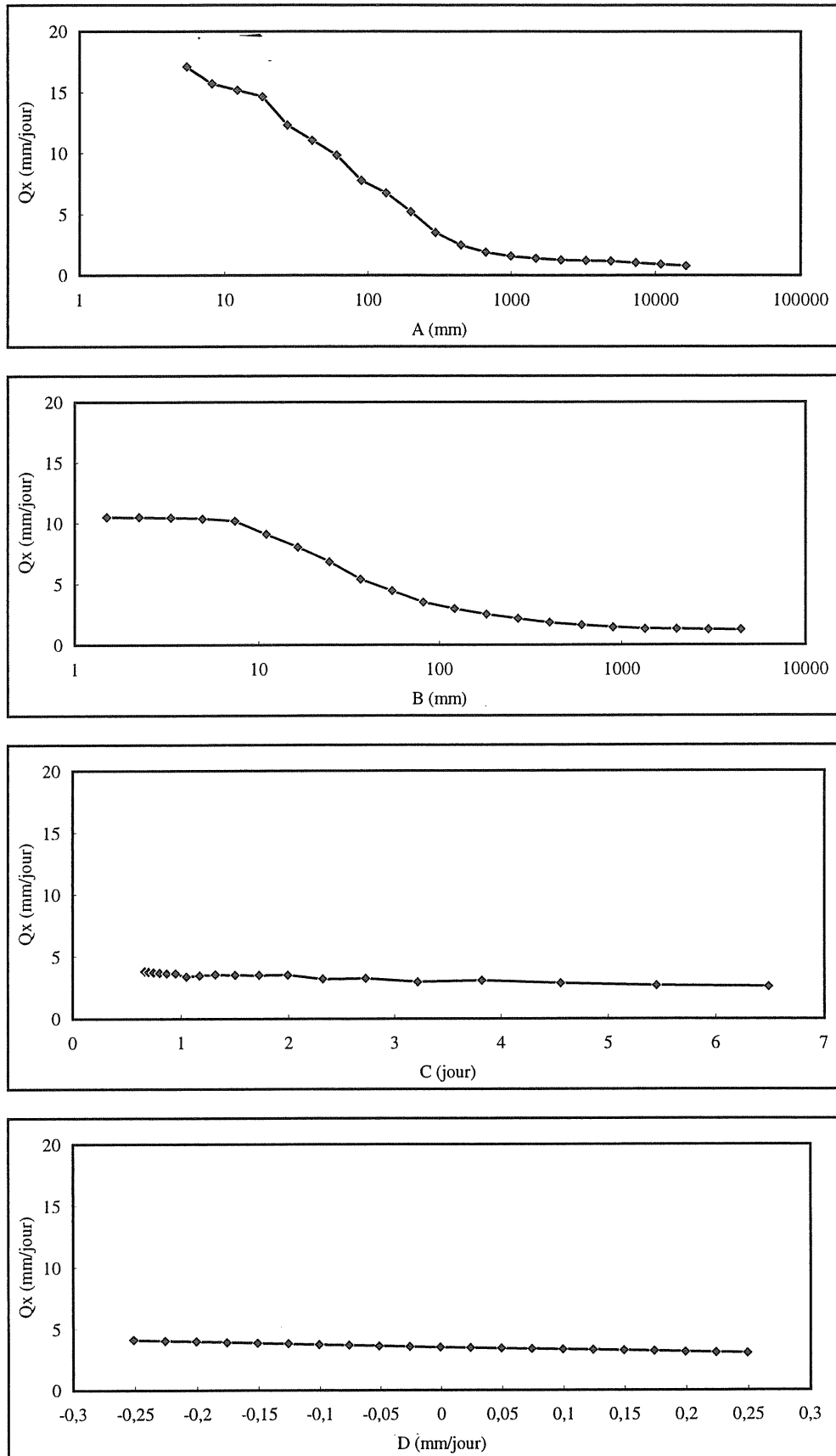


Figure (III.3): Influence des paramètres sur les crues.
($F^* = 0.9$) (Paris-Montsouris).

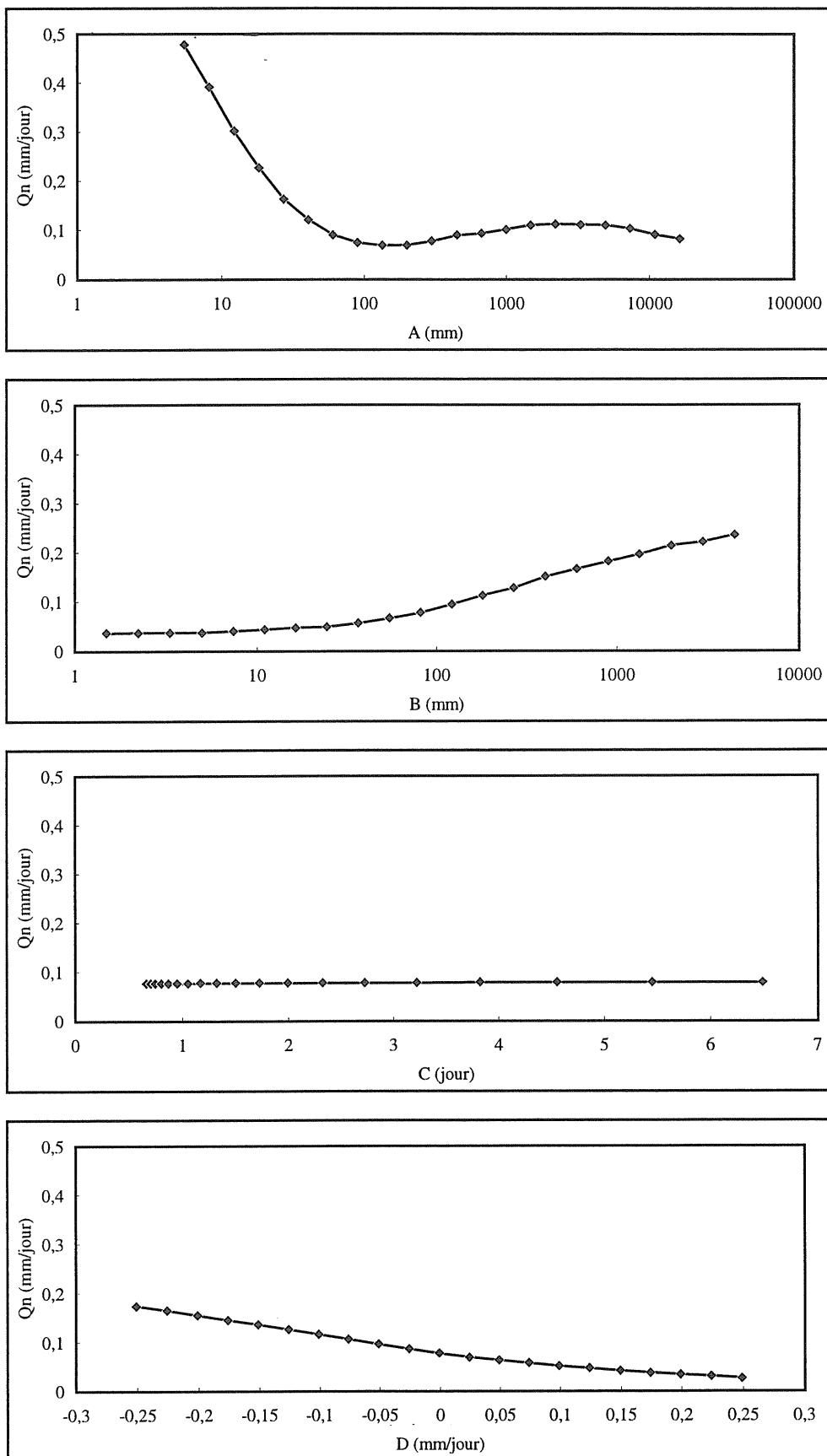


Figure (III.4): Influence des paramètres sur les étiages.
($F^* = 0.5$) (Paris-Montsouris).

III.5 - CONCLUSION

Cette étude a permis d'expliciter le lien qui pouvait exister entre les paramètres du modèle GR4J et certaines variables hydrologiques couramment utilisées. Parmi ces variables, on en a retenu trois qui illustrent les grands domaines que sont les écoulements sur une longue durée (l'écoulement annuel moyen), les crues (la crue journalière décennale) et les étiages (l'étiage de l'écoulement du mois de septembre).

A l'issue de ces essais, nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- L'influence des quatre paramètres caractéristiques d'un bassin versant est bien marquée pour la crue décennale. Quand l'un des paramètres augmente le débit de la crue décennale diminue. Certaines inversions existent pour le paramètre B .

- Les deux paramètres A et D ont une influence sur les écoulements annuels moyens. Si l'un des deux paramètres augmente l'écoulement annuel diminue. Le paramètre B a un effet faible et dans le même sens que les deux autres, alors que C n'a aucun effet sur les écoulements annuels.

- Le paramètre B a un effet parfois complexe sur les étiages; en général ces derniers augmentent quand B augmente mais il peut y avoir une inversion pour les faibles valeurs de B . D diminue les débits quand il augmente. C n'a aucun effet sur les étiages. On note aussi l'effet non monotone de A décroissant d'abord puis croissant.

Ces différents résultats sont synthétisés sur la **figure III.5**.

Il faut souligner enfin une certaine variété dans les réponses en fonction du climat considéré. Par exemple, certaines non-monotonies apparaissent pour certains climats, notamment pour les étiages mensuels.

	$\ln(A)$	$\ln(B)$	C	D
écoulement annuel moyen				
écoulement journalier de crue décennale				
écoulement médian du mois de septembre				

Figure (III.5): Effet comparé des différents paramètres sur trois aspects des écoulements d'un bassin versant.

CHAPITRE IV

TENTATIVE D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J SUR DES BASSINS VERSANTS BRETONS

IV.1- INTRODUCTION

Un modèle très simple, comme GR4J, a pu être construit presque entièrement à partir du seul objectif de bonne reproduction des débits réellement observés: Les fonctions et les paramètres correspondants n'ont été introduits que pour obtenir une meilleure adéquation entre les sorties du modèle et les débits réels et non pour satisfaire un certain nombre de préconceptions sur le cycle hydrologique dans un bassin versant. Ce mode de construction assez particulier et la parcimonie du modèle qui en est résultée laissent espérer une plus grande facilité d'explication des paramètres.

Cependant ce problème est trop complexe pour être abordé de front et donc plusieurs études convergentes doivent être menées conjointement pour faire avancer la solution. Le présent chapitre concerne une de ces études à savoir un essai de mise en relation des paramètres du modèle avec 13 caractéristiques physico-climatiques pour 23 bassins versants de la région Bretagne. Un autre essai concernant seulement 17 des 23 bassins permet d'effectuer une comparaison avec une étude similaire conduite par Mazenc, (1981).

IV.2 - DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES

Les différents bassins versants, au nombre de 23 sont situés sur quatre départements bretons (Côtes d'Armor , Finistère, Ile-et-Vilaine et Morbihan) (Cf. **figure IV.1**), il sont numérotés de 1 à 23 et leurs tailles varient de 14 à 820 km².

Les données hydrométriques journalières ont été extraites de la banque HYDRO du ministère de l'environnement; elles ont été utilisées sans être critiquées.

Les données pluviométriques et d'évaporation, ont été acquises auprès de METEO-FRANCE (banque PLUVIO).

Les données d'évaporation correspondent aux moyennes sur une longue période des valeurs décadaires d'évapotranspiration par poste, calculées par la météorologie, selon la formule de Penman.

Les données pluviométriques sont disponibles en 21 postes dont la liste figure sur le **tableau IV.4**. Les pluies journalières obtenues par poste sont "définitives". On a jugé qu'elles étaient d'une qualité suffisante pour être utilisées sans correction.

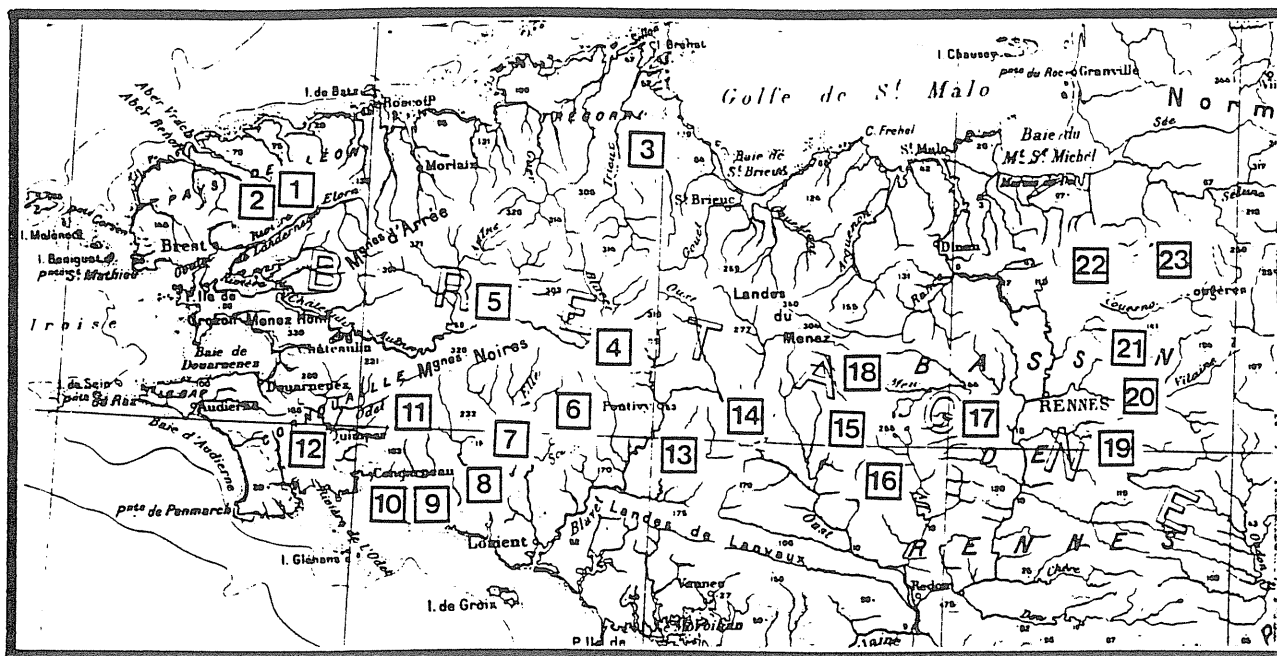


Figure (IV.1): Plan de situation des 23 bassins versants bretons.

IV.3 - DESCRIPTION DES CARACTERISTIQUES PYSICO-CLIMATIQUES

Le fichier des caractéristiques physiographiques et climatiques mis au point par le BRGM en 1981 (Département eau) apparaît sur le **tableau 1**. Chaque bassin est caractérisé par 13 variables qui sont les suivantes:

IV.3.1 - Caractéristiques morphologiques

1- **SURF** : Superficie du bassin versant en km², d'après une carte IGN au 1/100.000 et conforme à celle donnée dans les annuaires hydrométriques correspondants.

2- **IALL** : Indice d'allongement du plus long cours d'eau, égal au rapport du carré de la plus longue portion de droite mesurable (D) sur le bassin versant à la superficie de ce bassin (S) (sans unité). La longueur maximale est trouvée par tâtonnement en faisant en sorte de ne pas couper les contours du bassin.

$$I = D^2/S \quad (IV.1)$$

Cet indice est égale à : $4/\pi$ pour un cercle et 2.0 pour un carré.

3- **LONG** : Longueur du plus long thalweg en km.

4- **PENT** : Pente moyenne du plus long cours d'eau en ‰.

$$PENT = \frac{(H_{90} - H_{10})}{(0.8 LONG)} \quad (IV.2)$$

H_{90} et H_{10} : Altitudes à 90 % et 10 % de la longueur du plus long cours d'eau.

5- **ALTI** : Altitude moyenne estimée au milieu du plus long thalweg, et exprimée en mètres.

$$ALTI = (H_{90} - H_{10})/2 \quad (IV.3)$$

IV.3.2 - Géologie des bassins

A partir de cartes géologiques (1/80.000) couvrant la Bretagne, le BRGM a pu définir deux types de terrains:

- 1- Granite et roches plutoniques;
- 2- Schistes et schistes métamorphiques;

Sur ces cartes géologiques, le BRGM a calculé le pourcentage de superficie pour chaque bassin et pour chacun des types de terrain.

PGRA : Pourcentage de superficie à affleurement de granite (%);
PSCH : Pourcentage de superficie à affleurement de schiste (%).

IV.3.3 - Caractéristiques de la végétation

Les cartes de végétation ont permis de définir deux classes de végétation, ainsi que le pourcentage de superficie occupée par chacune de ces classes sur chaque bassin.

- 1- Forêts;
- 2- Prairies et cultures.

PFOR : Pourcentage de superficie de forêts (%);
PPRA : Pourcentage de superficie de prairies et de cultures (%).

IV.3.4 - Données climatiques calculées

Quatre grandeurs climatiques ont été calculées sur les bassins versants:

PPMA : Pluie annuelle moyenne (mm);
ETPA : Evapotranspiration potentielle annuelle moyenne, selon la formule de Turc (mm);
NJPA : Nombre moyen de jours de pluie par année (jours);
PJ10 : Pluie journalière de fréquence décennale (mm).

Résumé des variables du fichier physico-climatique

- (1) - SURF : Surface du bassin versant (km²).
- (2) - IALL : Indice d'allongement du plus long cours d'eau (Sans unité).
- (3) - PENT : Pente moyenne du plus long cours d'eau (⁰/₀₀).
- (4) - LONG : longueur du plus long cours d'eau (km).
- (5) - ALTM : Altitude moyenne du bassin versant (m).
- (6) - PGRA : Pourcentage de superficie à affleurement de granite (%).
- (7) - PSCH : Pourcentage de superficie à affleurement de schiste (%).
- (8) - PFOR : Pourcentage de superficie de forêts (%).
- (9) - PPRA : Pourcentage de superficie de prairies et de culture (%).
- (10) - PPMA : Pluie annuelle moyenne (mm).
- (11) - ETPA : Evapotranspiration potentielle annuelle moyenne (mm).
- (12) - NJPA : Nombre moyen de jours de pluie par année (jours).
- (13) - PJ10 : Pluie journalière de fréquence décennale (mm).

Il est clair que les variables forment deux groupes; le premier représente les caractéristiques physiques des bassins versants (morphologiques, géologiques et végétation), le deuxième groupe représente les données climatiques.

IV.4 - ANALYSE DU TABLEAU DES DONNEES PHYSICO-CLIMATIQUES

L'analyse des variables physico-climatiques effectuée ici repose sur plusieurs méthodes. Dans un premier temps, il était utile d'observer comment se répartissaient les caractéristiques à l'intérieur de notre échantillon de bassins versants: c'est le domaine de l'analyse factorielle et, dans notre cas, de l'analyse en composantes principales réalisée à l'aide du logiciel ADDAD (Association pour le Développement et la Diffusion de l'Analyse de Données). Cette approche a été ensuite prolongée par des régressions multiples, afin de tenter de relier quantitativement les paramètres du modèle aux différentes variables calculées ou mesurées.

N°	cours d'eau	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
01*	Aber est	38	2.79	5.5	9.0	70	100	0	10.0	30	965	643	193	46
02*	Aber ouest	24	3.15	5.5	9.0	65	100	0	5.0	35	965	643	193	46
03	Trieux	376	2.04	4.9	36.0	94	92	7	10.0	25	805	617	207	42
04	Blavet	104	3.25	5.9	22.0	216	88	4	5.0	30	917	617	194	59
05	Hyeres	526	2.52	3.7	39.0	90	12	87	5.0	30	982	617	220	55
06	Scorff	292	3.14	4.1	39.5	97	70	30	5.0	30	967	617	213	55
07	Elle	580	2.06	4.6	41.0	92	46	45	5.0	30	967	617	213	55
08	Isole	225	4.75	4.5	43.0	70	53	19	5.0	30	1055	743	188	58
09	Aven	184	3.38	6.3	30.0	103	66	30	5.0	30	1007	712	202	53
10*	Moros	20	3.61	10.9	11.0	72	87	13	5.0	35	819	669	188	48
11	Jet	107	3.20	5.8	24.0	52	62	37	5.0	30	974	743	195	62
12	Odet	195	4.43	3.2	35.0	78	37	57	5.0	30	1104	743	197	73
13	Evel	316	2.01	2.3	32.0	59	0	96	5.0	30	814	617	172	35
14	Lie	379	2.99	3.1	45.0	110	31	63	10.0	25	746	639	188	57
15*	Yvel	315	3.93	5.2	42.0	64	9	87	30.0	30	690	722	270	47
16	Aff sup.	30	2.08	7.4	8.5	103	0	0	30.0	40	768	718	153	50
17	Careil	14	2.02	6.4	6.5	82	0	89	5.2	26	764	718	153	50
18	Meu	468	3.36	2.4	51.0	63	0	93	10.0	25	666	639	177	45
19	Seiche	820	3.75	0.8	77.0	39	3	97	12.0	23	712	718	166	39
20*	Vilaine	604	2.72	2.6	50.0	70	11	88	3.0	22	606	734	227	39
21*	Chevré	153	3.49	3.1	25.0	70	0	69	10.0	30	647	734	247	28
22	Couesnon	510	2.84	2.7	47.0	58	26	74	15.0	15	729	712	190	42
23	Nancon	70	1.97	4.5	12.5	127	95	5	18.0	17	757	710	150	39

(*) : Bassin n'ayant pas servi pour la comparaison avec l'étude du BRGM.

Tableau (IV.1): Caractéristiques physico-climatiques des 23 bassins versants bretons étudiés.

IV.4.1 - Analyse de la matrice de corrélation

La première étape de l'analyse est constituée par l'étude de la matrice de corrélation des variables (Cf. tableau IV.2) qui permet d'apprécier le sens et l'intensité des liaisons deux à deux.

La variable Pente est bien corrélée négativement avec la longueur du cours d'eau principal (-0.736) ce qui est logique; elle est également corrélée négativement avec le pourcentage de schiste (-0.565), ce qui traduit le fait que plus un bassin est schisteux, moins il est pentu, plus sa surface est grande.

Il faut noter la forte corrélation entre la surface du bassin et sa longueur du cours d'eau (0.921).

La corrélation est positive entre le pourcentage de schiste et la longueur du cours d'eau (0.610): les bassins schisteux sont les bassins les plus longs. Notons aussi la corrélation entre le pourcentage de schiste et le pourcentage de granite (-0.873) ce qui est normal sur une même surface.

Pour les autres variables, il faut noter qu'il n'existe pas de liaison significative entre la géologie et le couvert végétal des bassins versants comme il n'en existe pas pour les variables climatiques entre elles ni avec les précédentes, sauf entre la pluie annuelle moyenne et la pluie journalière de fréquence décennale (0.733).

IV.4.2 - Valeurs propres

A partir du tableau de données, on compose une nouvelle représentation selon 13 axes. L'histogramme des valeurs propres de la matrice (Cf. **tableau IV.3**) montre que l'on explique 61 % de l'inertie totale du nuage de points par les quatre premiers axes et il faut six axes principaux pour atteindre 80 %. Cela nous montre une certaine variété dans la description des bassins versants telle que permise par les données. L'axe N°1 explique à lui seul 21.8 % de l'inertie totale, l'axe N°2 contribue pour 14.9 % à l'inertie totale et 13.5 % pour l'axe N°3.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
(1)	1000												
(2)	4	1000											
(3)	-712	-55	1000										
(4)	921	322	-736	1000									
(5)	-290	-194	260	-297	1000								
(6)	-456	14	473	-437	375	1000							
(7)	633	46	-625	610	453	-873	1000						
(8)	-59	-98	68	-44	-367	-254	-40	1000					
(9)	-480	159	-565	-451	-22	84	-375	12	1000				
(10)	-295	261	249	-223	57	509	-462	-443	420	1000			
(11)	-125	415	-6	30	165	-298	151	265	-138	-161	1000		
(12)	218	318	97	248	-342	-66	199	12	113	-30	2	1000	
(13)	-182	350	247	-53	-100	225	-234	-238	312	733	6	-36	1000

(Tous les coefficients sont multipliés par 1000)

Tableau (IV.2): Matrice des corrélations.

N°	Val. Pro.	Pourct.	Cumul.	Variat.	Histogram. Des Val. Propr.
01	2.83762	21.828	21.828		*****
02	1.94469	14.959	36.787	6.869	*****
03	1.76243	13.557	50.344	1.402	*****
04	1.44731	11.113	61.477	2.424	*****
05	1.25897	9.684	71.162	1.449	*****
06	1.17491	9.038	80.199	0.647	*****
07	0.83219	6.401	86.601	2.636	*****
08	0.57895	4.453	91.054	1.948	*****
09	0.37725	2.904	93.958	1.549	****
10	0.33991	2.615	96.573	0.289	****
11	0.22730	1.748	98.322	0.866	**
12	0.13957	1.074	99.395	0.675	*
13	0.07864	0.605	100.00	0.469	*

Tableau (IV.3): Les valeurs propres.

IV.4.3 - Définition des axes

- Le premier axe oppose des bassins versants à fort pourcentage en schiste à des bassins pentus.

- Le deuxième est caractérisé par des bassins de grande surface par opposition aux bassins à fort pourcentage de forêt.

Le troisième axe est surtout caractérisé par le nombre moyen de jours de pluie par an (NPJA) qui s'oppose à la surface du bassin et à son altitude.

La projection des 23 bassins définis par les trois premières composantes (Cf. **figure IV.2a, IV.2b et annexe II.1**) met en évidence certains regroupement des bassins versants. La confrontation des projections et le tableau de données a permis ces regroupements.

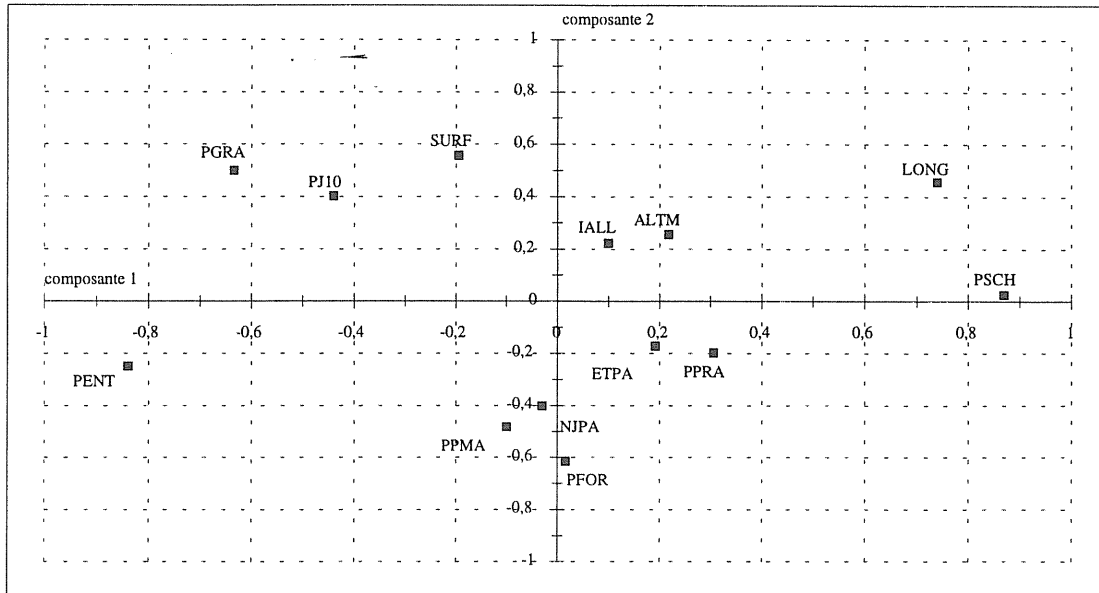


Figure (IV.2a): Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 1 et 2.

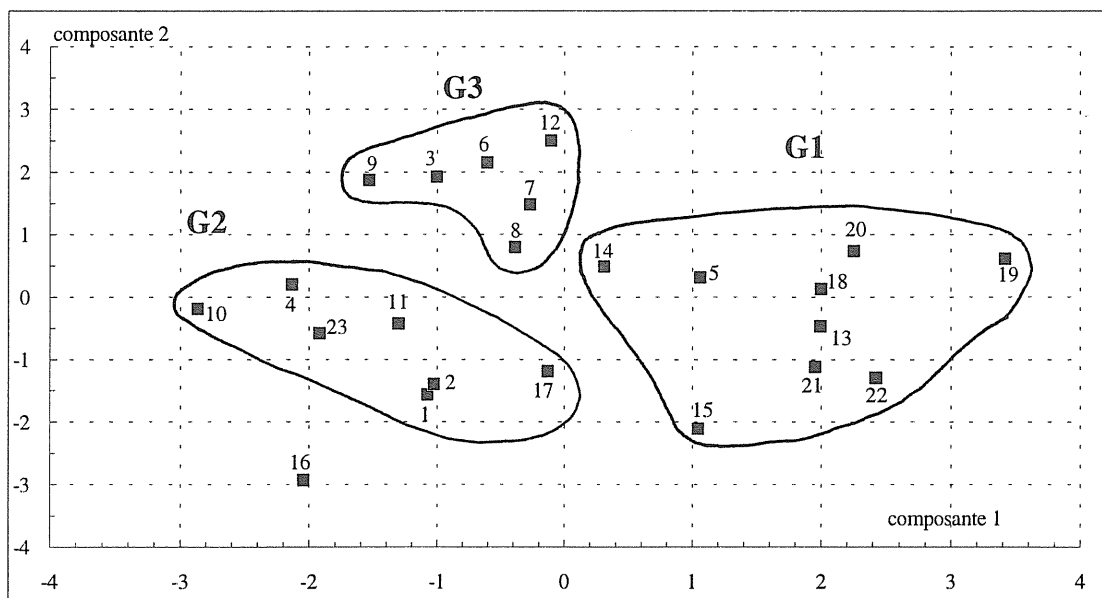


Figure (IV.2b): Projection des bassins dans le plan 1 et 2.

Groupe 1: Ce sont des bassins de grand taille, à forte prédominance schisteuse avec des pentes faibles ou relativement moyennes (Couesnon, Chevré, Evel, Seiche, Vilaine, Meu, Hyeres, Lié et Yvel).

Groupe 2: C'est un groupe de petits bassins avec une forte pente (Blavet, Moros, Nancon, Jet, Aber Est, Aber Ouest et Careil).

Groupe 3: Constitué de bassins de taille moyenne (Odet, Scorff, Trieux, Ellé, Aven et Isole).

Le seul bassin versant que l'on a pas pu rattacher à l'un des groupes précédents est le bassin de l'Aff supérieur (16). Il se rapprocherait du deuxième groupe sauf qu'il est de nature gréseuse.

L'analyse en composantes principales nous a permis donc de synthétiser un tableau de données en déterminant quels critères rendent les bassins semblables ou différents et dans quels sens les variables varient entre elles.

Au terme de cette analyse, il est nécessaire de quantifier les relations entre les paramètres du modèle et les variables à l'aide du modèle linéaire général.

IV.5 - CALAGE DU MODELE GR4J SUR LES BASSINS UTILISES

Les quatre paramètres qui caractérisent ce modèle global qu'est GR4J, ne peuvent pas être mesurés sur le bassin. Les valeurs optimales sont déterminées par un processus itératif à partir de valeurs initiales par la recherche d'un ajustement entre débits observés et débits calculés par le modèle (**voir chapitre II**). Les périodes et les postes pluviométriques avec leurs poids utilisés respectivement pour chaque bassin sont présentés dans le **tableau IV.4**. Les résultats obtenus lors du calage avec le modèle GR4J sont exposés dans le **tableau IV.5** et l'**annexe II.2**.

IV.5.1 - Qualité de l'ajustement

Afin d'apprécier sommairement la qualité de l'ajustement, le **tableau IV.5** expose les valeurs des critères. Pour les 23 bassins versants modélisés, le critère de Nash moyen est de 88.2 % avec un écart-type de 4.54 % et les valeurs minimale et maximale sont de 79.9 et 94.0; l'erreur de bilan moyenne est de -1.04 % avec un écart-type de 2.00 %. Le modèle GR4J permet d'obtenir de bonnes simulations des débits compte tenu des critères obtenus. Les valeurs moyennes des paramètres sont :

$$\bar{a} = 6.05$$

$$\bar{b} = 5.28$$

$$\bar{c} = 0.31$$

$$\bar{d} = -0.06$$

(IV4)

N	Cod. Sta. Jaugeage	Cours d'eau	Station de jaugeage	Station PLUVIO.	Poids	Station d'ETP	Périod Calag.	Surf (km ²)
01	J3204010	Aber Wrach Est	Plouarmel	Saint Servais	1.0	Brest	70-77	38
02	J3205710	Aber Wrach Ouest	Le Drennec	Brest guipavas	1.0	Brest	70-77	24
03	J1721710	Trieux	Pont Broc'Hen	Plouisy Lanrivain	0.5 0.5	Rostrenen	72-75	376
04	J5212110	Blavet	Plounevez Quintin	Lanrivain	1.0	Rostrenen	73-75	104
05	J3733090	Hyeres	Saint-Hernin	Carhaix Lanrivain	0.7 0.3	Rostrenen	73-75	526
06	J5102290	Scorff	Pont Kerlo	Moreac Faouet Quimperlé	0.4 0.4 0.2	Rostrenen	73-78	300
07	J4742090	Ellé	Pont-Ty-Nadan	Faouet Quimperlé Coray	0.4 0.3 0.3	Rostrenen	70-77	578
08	J4813090	Isole	Quimperlé	Coray Quimperlé	0.5 0.5	Lorient	70-77	224
09	J4623010	Aven	Pont d'Aven	Coray Quimperlé	0.5 0.5	Quimper	70-77	184
10	J4514010	Moros	Concarneau	Quimper Quimperlé	0.5 0.5	Lorient	71-78	20
11	J4224010	Jet	Ergué Gaberic	Coray Quimper	0.7 0.3	Quimper	70-78	107
12	J4211990	Odet	Téodet	Briec Coray	0.5 0.5	Quimper	72-77	195
13	J5613010	Evel	Pont Guénin	Moreac Ploermel	0.6 0.4	Rostrenen	70-77	316
14	J8143010	Lié	Pont de la Fosse Plumieux	Plaintel	1.0	Rostrenen	70-72	379
15	J8363110	Yvel	Loyet-sur-Yvel	Ploermel Blervais	0.5 0.5	Rostrenen	70-77	315
16	J8602410	Aff supérieur	Pont du Secret Paimpont	Paimpont Plean le Grand	0.5 0.5	Rennes	77-81	30
17	J7356010	Careil	Monterfil	Montfort	1.0	Rennes	73-76	14
18	J7353010	Meu	Montfort	Montfort Blervais	0.2 0.8	Rennes	71-78	468
19	J7483010	Seiche	Carce en Bruz	Erbrée Martigne-Ferchaud	0.5 0.5	Rennes	70-76	820
20	J7060620	Vilaine	Servon-sur-Vilaine	Erbrée	1.0	Rennes	74-76	604
21	J7083110	Chevré	La Bouexière	Mézières/Couesnon	1.0	Rennes	70-72	135
22	J0121510	Couesnon	Romazy	Fougères Mézières/Couesnon	0.6 0.4	Rennes	70-77	510
23	J0014010	Nancon	Lecousse	Fougères	1.0	Rennes	71-75	67

Tableau (IV.4): Liste des 23 bassins versants bretons étudiés.

N	a	b	c	d	BIL	NASH
01*	6.08	5.88	-10	-.21	-.8	90.6
02*	5.78	6.27	0.04	0.06	.1	88.7
03	6.34	5.40	-.03	-.18	-.7	88.0
04	5.82	5.52	0.37	-.23	-1.8	89.8
05	5.15	5.37	0.44	0.17	1.4	93.1
06	6.46	5.72	0.39	-.28	0.7	86.2
07	6.88	5.71	0.38	0.18	-0.5	91.1
08	6.83	5.87	0.21	-.13	0.5	85.4
09	6.30	6.18	0.18	-.34	-1.6	94.0
10*	6.53	6.41	-.02	.11	-1.1	93.0
11	6.52	6.30	0.03	-.11	-1.3	88.9
12	5.50	6.19	0.21	-.47	-0.7	93.5
13	5.91	5.47	0.50	0.08	-4.4	93.7
14	6.52	5.12	0.20	-.04	-1.1	83.7
15*	5.76	4.72	0.62	-.05	-4.2	88.2
16	5.69	4.90	0.16	0.09	2.9	91.9
17	5.46	3.27	0.17	0.04	-0.6	80.9
18	5.53	4.09	0.59	-.05	-2.2	84.3
19	6.06	4.60	0.96	0.20	-6.3	86.0
20*	5.89	4.28	0.59	0.19	0.2	93.2
21*	5.46	3.60	0.62	0.08	-2.9	83.8
22	6.15	4.89	0.48	-.18	-0.3	80.6
23	6.51	5.70	0.01	-.26	0.2	79.9

Tableau (IV.5): Résultats du calage du modèle GR4J sur les 23 bassins bretons.

IV.6 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J

Un certain nombre de relations entre les caractéristiques physiques et climatiques et les paramètres du modèle ont été étudiées à l'aide d'un modèle linéaire général appliqué à des transformées logarithmiques des paramètres et des caractéristiques.

Un seuil de signification s'impose afin d'éviter le risque d'établir une liaison inexistante malgré un coefficient de détermination (R^2) non nul. Nous avons utilisé le test de Student sur la signification des coefficients de régression, qui repose sur le calcul du rapport d'un coefficient à son écart-type ($x_i/\sigma x_i$); ce rapport doit être supérieur au $|t|$ de Student ($|t|$ = quantile 0.99 de Student pour $(n-k)$ degrés de liberté où n est le nombre d'observations de k variables). Le rapport de Student de chaque coefficient doit être grosso modo supérieur à 3.0 pour qu'une variable ait un effet significatif au seuil de 1 %.

Les résultats retenus à la suite de cette recherche n'incluent que des variables explicatives dont le rapport de Student est supérieur au seuil théorique choisi.

IV.6.1 - Capacité du réservoir sol (A)

Une seule équation a pu être établie en fonction du pourcentage d'affleurement en granite (Cf. **tableau IV.6**) avec un coefficient de détermination qui est légèrement supérieur à 0.30 (Cf. **figure IV.3**), ce qui traduit la faible liaison entre le paramètre A et les variables disponibles. Ce paramètre est en effet très global et intègre peut-être d'autres variables non utilisées du bassin versant comme par exemple les caractéristiques pédologiques.

$$A = 265.(PGRA + 1)^{0.16} \quad (IV.5)$$

Formule de Régression	Coefficient de Régression	Rapport de Student	Erreur standard	Coefficient de détermination
x_0	5.58	35.2	0.39	0.36
$x_1 \ln(1 + PGRA)$	0.16	73.43		

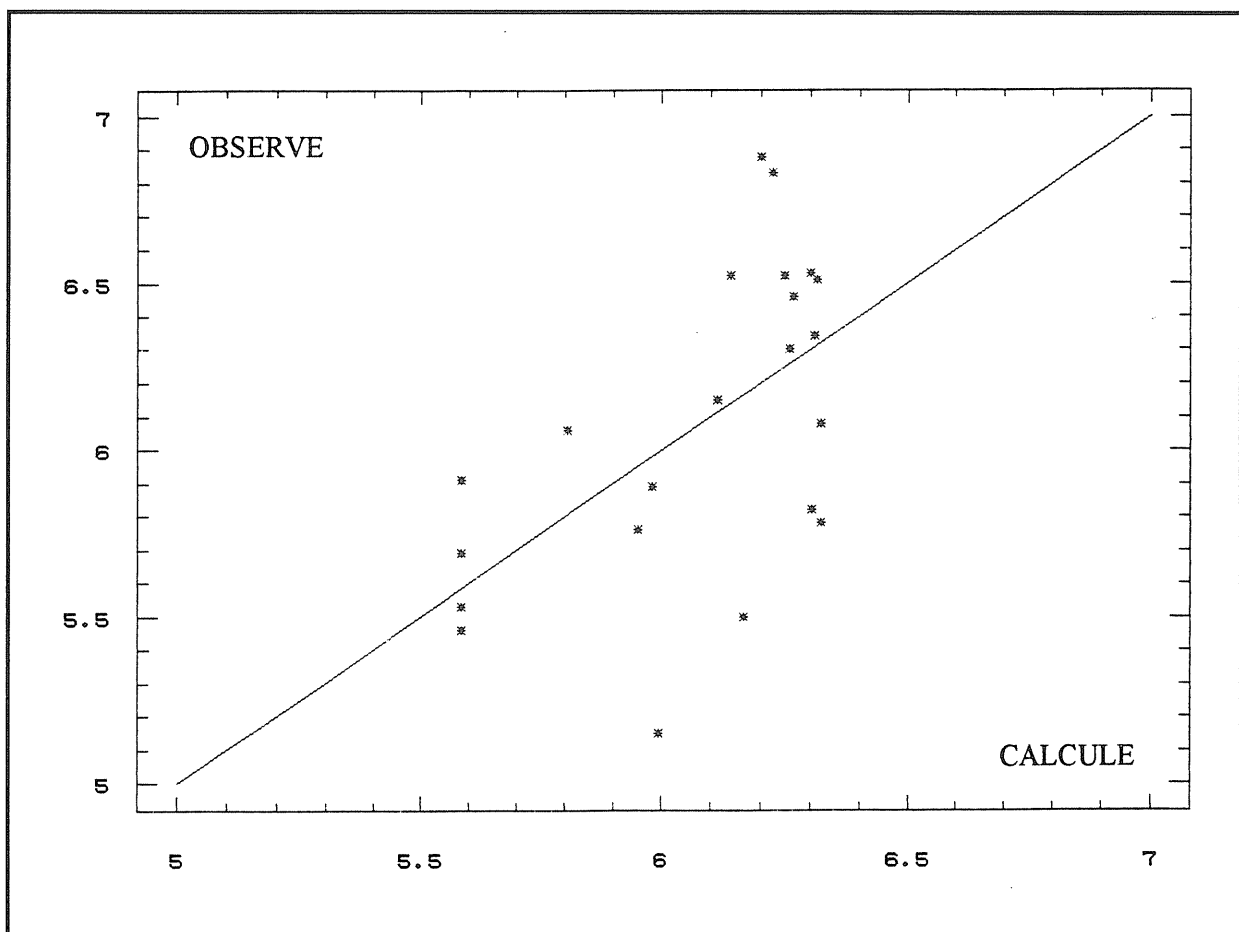
Tableau (IV.6): Résultats pour le paramètre a du modèle GR4J.

IV.6.2 - Capacité du réservoir eau gravitaire (B)

Le **tableau IV.7** représente les résultats pour le paramètre B . Nous avons retenu une équation avec comme variables explicatives PGRA et PPMA (Cf. **figure IV.4**).

$$B = 7.14 \cdot 10^{-6} (PGRA + 1)^{0.25} \cdot PPMA^{2.44} \quad (IV.6)$$

Formule de Régression	Coefficient de Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0 $x_1 \ln(PPMA)$	-21.15 3.93	4.51 5.63	0.56	0.60
x_0 $x_1 \ln(1 + PGRA)$	4.16 0.38	18.56 5.80	0.55	0.62
x_0 $x_1 \ln(1 + PGRA)$ $x_2 \ln(PPMA)$	-11.85 0.25 2.44	2.70 3.83 3.65	0.44	0.77

Tableau (IV.7): Résultats pour le paramètre b du modèle GR4J.Figure (IV.3): Régression de A en fonction de $PGRA$.

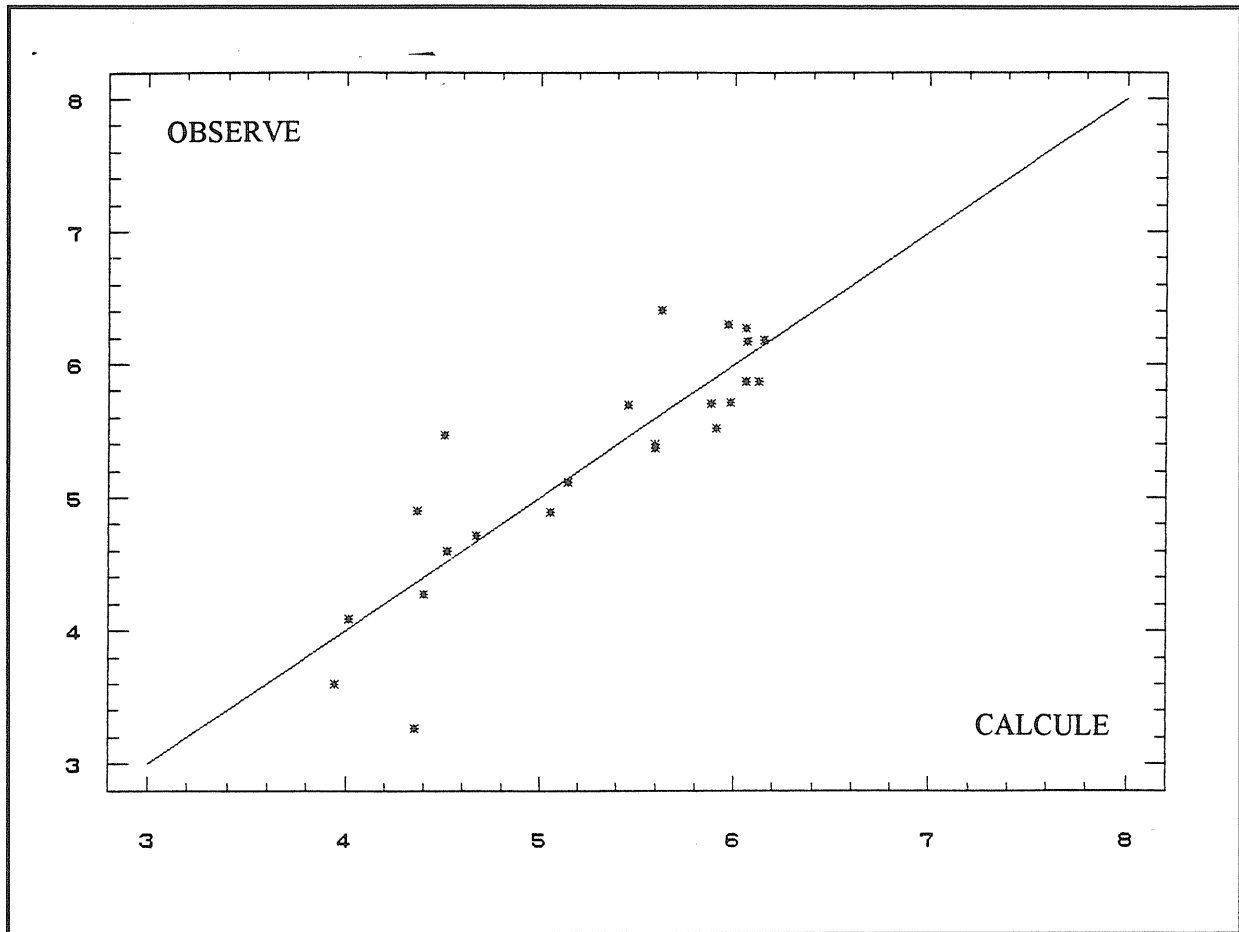


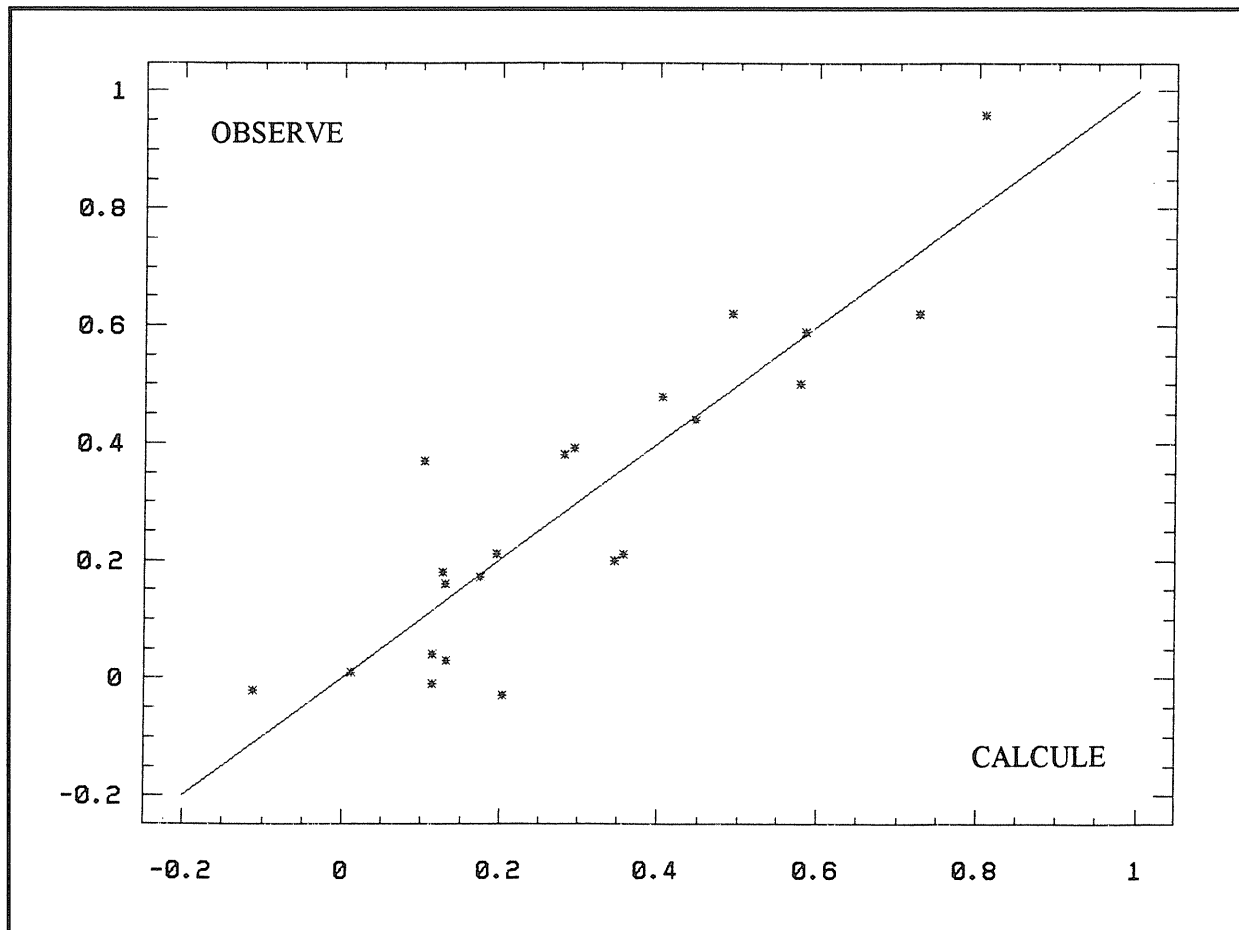
Figure (IV.4): Régression de B en fonction de PGRA et PPMA.

IV.6.3 - Paramètre (C) des hydrogrammes unitaires

Les résultats pour le paramètre C sont représentés dans le **tableau IV.8**; d'autres régressions ont été effectuées en introduisant la superficie (SURF), cette dernière devenant non significative. La meilleure relation est présentée sur la **figure IV.5**.

$$C = \frac{0.07 NJPA^{0.67}}{PENT^{0.32} \cdot (PGRA + 1)^{0.06}} \quad (IV.7)$$

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0 $x_1 \ln(PENT)$	0.85 -0.38	8.17 5.54	0.17	0.59
x_0 $x_1 \ln(1 + PGRA)$	0.55 -0.08	6.04 3.09	0.22	0.31
x_0 $x_1 \ln(SURF)$	-0.42 0.14	2.28 4.05	0.20	0.44
x_0 $x_1 \ln(PENT)$ $x_2 \ln(1 + PGRA)$ $x_3 \ln(NJPA)$	-2.61 -0.32 -0.06 0.67	2.68 5.83 3.49 3.61	0.12	0.81

Tableau (IV.8): Résultats pour le paramètre c du modèle GR4J.Figure (IV.5): Régression de C en fonction de $PGRA$, $PPMA$ et $NJPA$.

IV.6.4 - Paramètre d'échange souterrain (D)

Aucune relation significative n'est obtenue, toutes les régressions donnent des rapports de Student inférieurs à 1.5.

IV.6.5 - Conclusion

Les seules variables retenues en définitive sont la pente, la pluie annuelle moyenne, le nombre moyen de jours de pluie par an et le pourcentage de superficie à affleurement en granite.

Seuls les paramètres A , B et C du modèle GR4J ont pu donner lieu à une relation permettant de réduire leur variabilité, encore que ce résultat soit très modeste en ce qui concerne le paramètre A . Le paramètre D n'a donné lieu à aucune relation significative et par conséquent l'utilité de ce paramètre pour un bassin non-jaugé situé en Bretagne est pour l'instant nulle; c'est ce qu'on note MR1 (modèle régional 1). Pour un bassin non-jaugé on est donc amené à se contenter de l'utilisation du modèle obtenu par suppression de la quatrième fonction (identique au modèle GR3J).

IV.7 - TENTATIVE D'EXPLICATION AVEC D FIXE A ZERO

Le fait de ne pas pouvoir caler le paramètre d peut influencer sur les paramètres a , b et c . Il est donc apparu nécessaire de reprendre le calage de ces trois paramètres. Les résultats de ce calage apparaissent dans le **tableau IV.9** et l'**annexe II.3**. Les paramètres b et c sont très voisins de ceux obtenus précédemment tandis que le paramètre A est en général un peu plus faible, les valeurs moyennes sont les suivantes:

$$\begin{aligned}\bar{a} &= 5.96 \\ \bar{b} &= 5.34 \\ \bar{c} &= 0.32\end{aligned}\tag{IV8}$$

Les critères de Nash ont sensiblement baissé avec une moyenne de 87.3 et un écart-type de 4.86 alors que la moyenne du bilan est de -2.60 et un écart-type de 11.4. Cela montre bien qu'avec le paramètre D on gagne que très peu sur les critères de Nash mais on améliore bien les bilans.

Avec ce modèle simplifié la même recherche d'explication a été effectuée. En principe, ce modèle devrait être plus robuste et donc donner lieu à des relations meilleures.

IV.7.1 - Paramètre A

Aucune relation n'est significative au seuil théorique choisi; même la relation obtenue pour A avec D optimisable n'est plus significative lorsque l'on passe au modèle avec D nul.

IV.7.2 - Paramètre B

La relation retenue du **tableau IV.10** est la suivante (Cf. **figure IV.6**):

$$B = 54.(PGRA + 1)^{0.47} \quad (\text{IV.9})$$

B.V.	a	b	c	BIL	NASH
01*	5.90	5.98	-.10	5.7	90.0
02	5.87	6.28	0.05	-2.5	88.2
03	6.25	5.42	-.03	8.1	87.0
04	5.39	5.82	0.36	2.3	89.3
05	5.37	5.31	0.45	-6.0	92.7
06	6.29	5.68	0.38	14.0	84.5
07	6.94	5.79	0.38	-12.0	89.9
08	6.80	5.84	0.21	5.7	85.1
09	5.53	6.71	0.20	0.1	92.6
10*	6.61	6.41	-.01	-6.1	92.6
11	6.48	6.29	0.03	1.9	88.8
12	5.17	6.26	0.21	9.2	92.5
13	5.98	5.45	0.50	-11.0	93.4
14	6.52	5.12	0.20	1.1	83.6
15*	5.72	4.75	0.62	-.5	88.1
16	5.76	4.21	0.17	-4.3	91.6
17	5.50	3.23	0.19	-5.2	80.9
18	5.49	4.14	0.59	1.9	84.2
19	6.32	4.61	0.96	-39.7	80.9
20*	6.05	4.18	0.61	-18.3	91.6
21*	5.54	3.59	0.62	-12.2	83.4
22	6.03	4.92	0.48	10.8	79.1
23	5.53	6.97	0.16	-2.9	76.8

Tableau (IV.9): Résultats du calage de GR4J avec d nul sur les 23 bassins bretons.

Formule de Régression	Coefficient de Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
b	3.99	16.84	0.58	0.68
	0.47	6.66		
b	-22.15	3.61	0.74	0.49
	4.09	4.09		

Tableau (IV.10): Résultats pour le paramètre b du modèle avec $d = 0$.

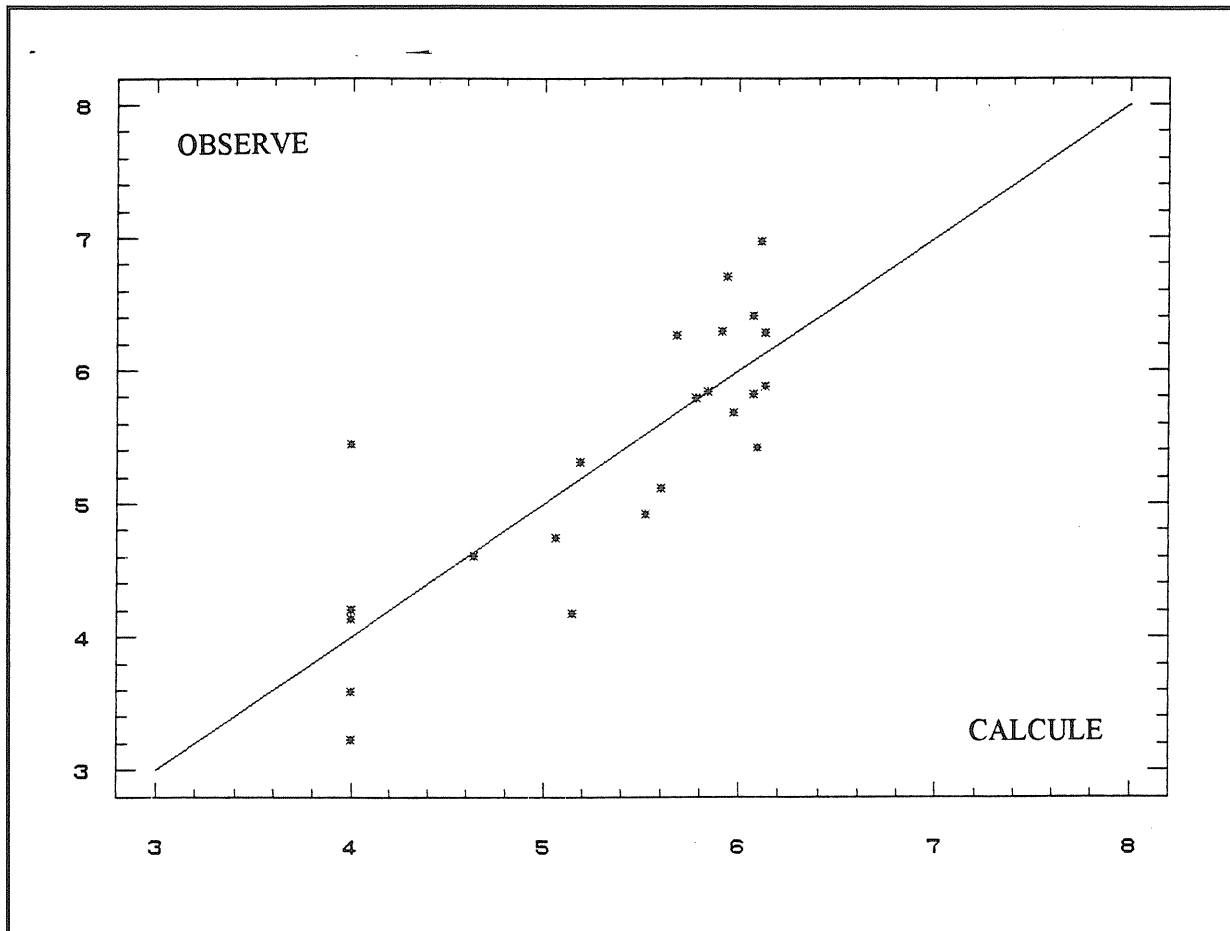


Figure (IV.6): Régression de *B* en fonction de *PGRA*.

IV.7.3 - Paramètre *C*

La relation retenue pour le modèle avec $d = 0$ est différente de celle de GR4J avec d optimisable. Notre choix s'est porté sur le coefficient de détermination le plus grand (Cf. **figure IV.7**); les résultats sont présentés dans le **tableau IV.11**.

$$c = \frac{2.34}{PENT^{0.38}} \tag{IV.10}$$

Formule de Régression	Coefficient de Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0 $x_1 \ln(1 + PGRA)$	0.55 -0.08	6.13 3.09	0.22	0.31
x_0 $x_1 \ln(SURF)$	-0.41 0.14	2.19 3.99	0.20	0.43
x_0 $x_1 \ln(1 + PENT)$	0.85 -0.38	8.25 5.55	0.17	0.59

Tableau (IV.11): Résultats pour le paramètre c du modèle avec $d = 0$.

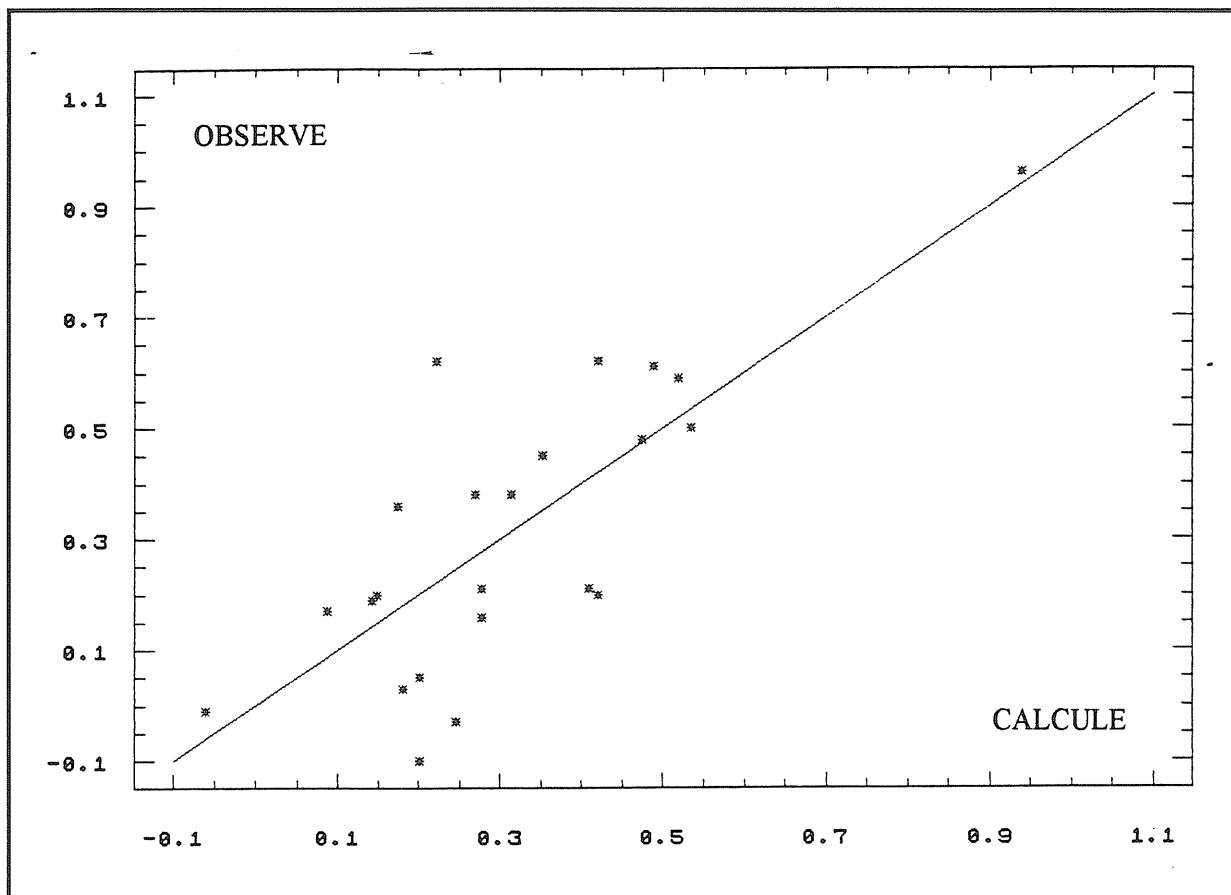


Figure (IV.7): Régression de C en fonction de PENT.

IV.7.4 - Conclusion

Les explications obtenues pour les trois paramètres sont un peu surprenantes: la relation obtenue pour A (modèle GR4J) n'est plus significative pour le modèle avec D nul. Seules subsistent les deux relations concernant les paramètres B et C . Cependant la variance expliquée pour le paramètre B diminue très sensiblement puisqu'elle passe de 0.81 à 0.68 mais avec deux variables explicatives pour le premier cas et une seule pour le deuxième, alors que pour la variable commune (PGRA) la variance expliquée augmente et passe de 0.62 à 0.68. La variance expliquée du paramètre C pour la même variable (PENT) ne change pas, puisqu'elle vaut 0.59 dans les deux cas.

L'interprétation de ces résultats est assez délicate. On peut avancer, entre autres, deux hypothèses:

- 1 - Le modèle à trois paramètres libres est trop simple. Ses paramètres sont obligés d'intégrer un trop grand nombre de phénomènes. Leur explication en est rendue plus floue.
- 2 - Les paramètres sont liés à des caractéristiques que l'on ne sait pas identifier et qui ne se retrouvent pas dans les variables descriptives usuellement utilisées. Plus le modèle est simple, plus ce caractère est renforcé car l'inadéquation des variables descriptives est rendue plus flagrante.

IV.8 - TENTATIVE D'EXPLICATION AVEC DEUX PARAMETRES FIXES

Puisqu'on n'a pas pu expliquer les paramètres A et D , essayons de voir ce que l'on peut obtenir en fixant D à 0 et A à sa valeur moyenne 5.96.

Les résultats de ce nouveau calage apparaissent sur le **tableau IV.12**. La moyenne du critère de Nash est de 83.8 et son écart-type de 5.50. Pour le bilan moyen: la moyenne est de -2.95 et l'écart-type de 18.3. Les valeurs moyennes des paramètres sont:

$$\bar{b} = 5.32$$

$$\bar{c} = 0.32$$

(IV.11)

B.V.	b	c	BIL	NASH
01*	5.90	-0.09	6.5	89.8
02*	6.19	0.06	-1.3	87.5
03	5.71	-0.04	3.4	86.0
04	5.36	0.37	8.7	88.7
05	4.94	0.48	2.0	90.3
06	5.95	0.36	8.9	83.8
07	6.47	0.35	-23.6	77.7
08	6.65	0.18	-7.0	77.8
09	6.34	0.19	7.5	92.6
10*	6.91	0.01	-17.7	88.6
11	6.59	0.03	-3.4	87.8
12	5.80	0.24	18.4	89.3
13	5.47	0.50	-11.5	93.3
14	5.52	0.18	-5.2	79.4
15*	4.38	0.64	0	88.0
16	4.02	0.22	2.0	90.4
17	2.52	0.40	13.3	75.9
18	3.32	0.65	20.2	78.9
19	4.99	0.87	-53.1	76.9
20*	5.03	0.50	-47.7	81.8
21*	2.96	0.66	-4.2	77.8
22	5.02	0.48	9.4	79.0
23	6.32	0.10	6.6	76.8

Tableau (IV.12): Résultats du calage du modèle GR4J (avec a et d fixés).

Nous avons repris la même recherche avec ces nouvelles valeurs des deux paramètres B et C . Les relations obtenues sont présentées dans le **tableau IV.13**, et les **Figures IV.8** et **IV.9**.

Paramètre	Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient détermination
<i>b</i>	x_0	3.67	13.6	0.66	0.71
	$x_1 \ln(1 + PGRA)$	0.57	7.11		
<i>b</i>	x_0	-24.15	3.04	0.95	0.40
	$x_1 \ln(PPMA)$	4.38	3.70		
<i>c</i>	x_0	0.60	7.73	0.19	0.46
	$x_1 \ln(1 + PGRA)$	-0.10	4.23		
<i>c</i>	x_0	0.79	7.01	0.19	0.49
	$x_1 \ln(PENT)$	-0.34	4.46		
<i>c</i>	x_0	0.87	9.33	0.15	0.69
	$x_1 \ln(PENT)$	-0.25	3.79		
	$x_2 \ln(1 + PGRA)$	-0.07	3.56		

Tableau (IV.13): Résultats pour les paramètres *b* et *c* du modèle GR4J (avec *a* et *d* fixés).

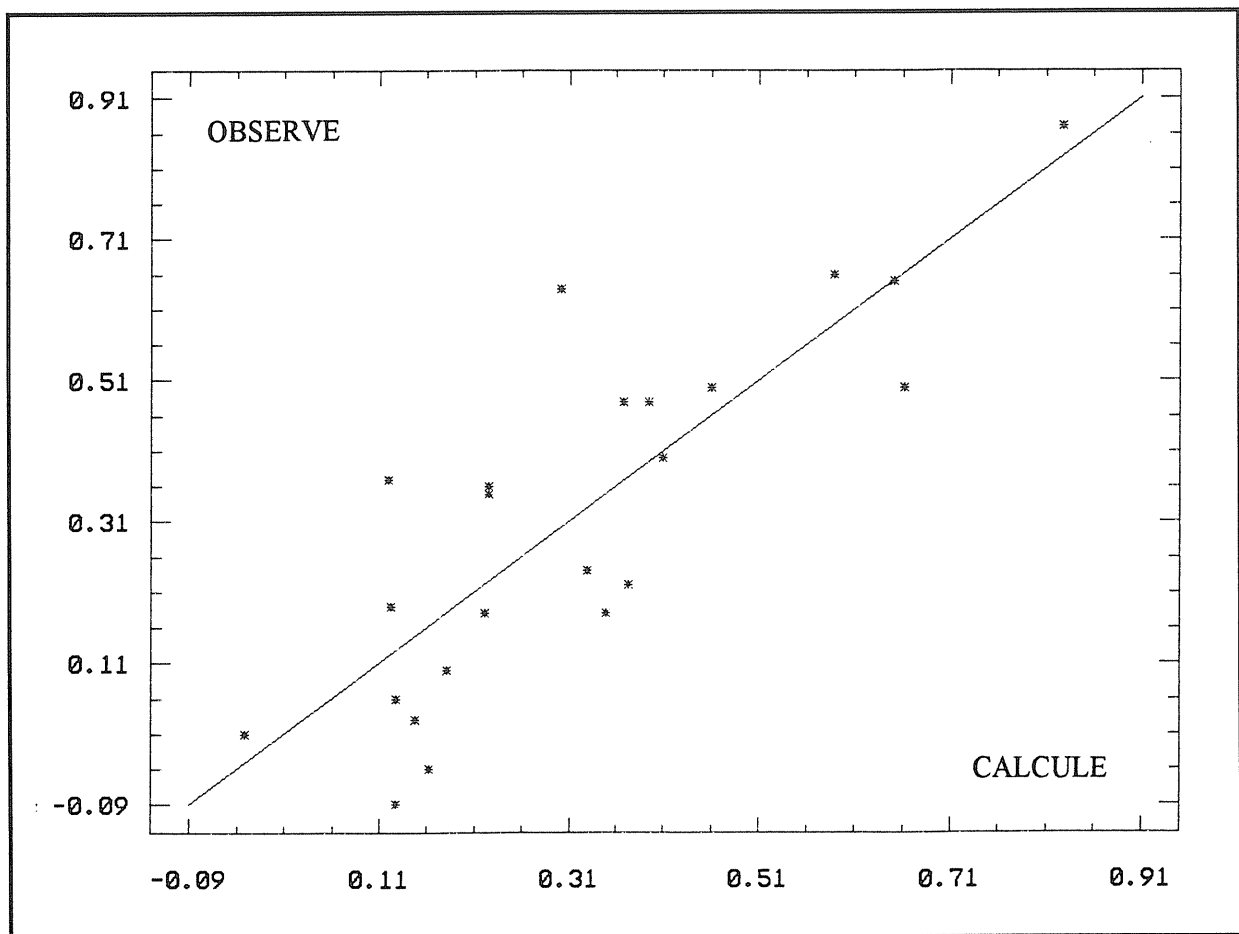


Figure (IV.8): Régression de *B* en fonction de PGRA.

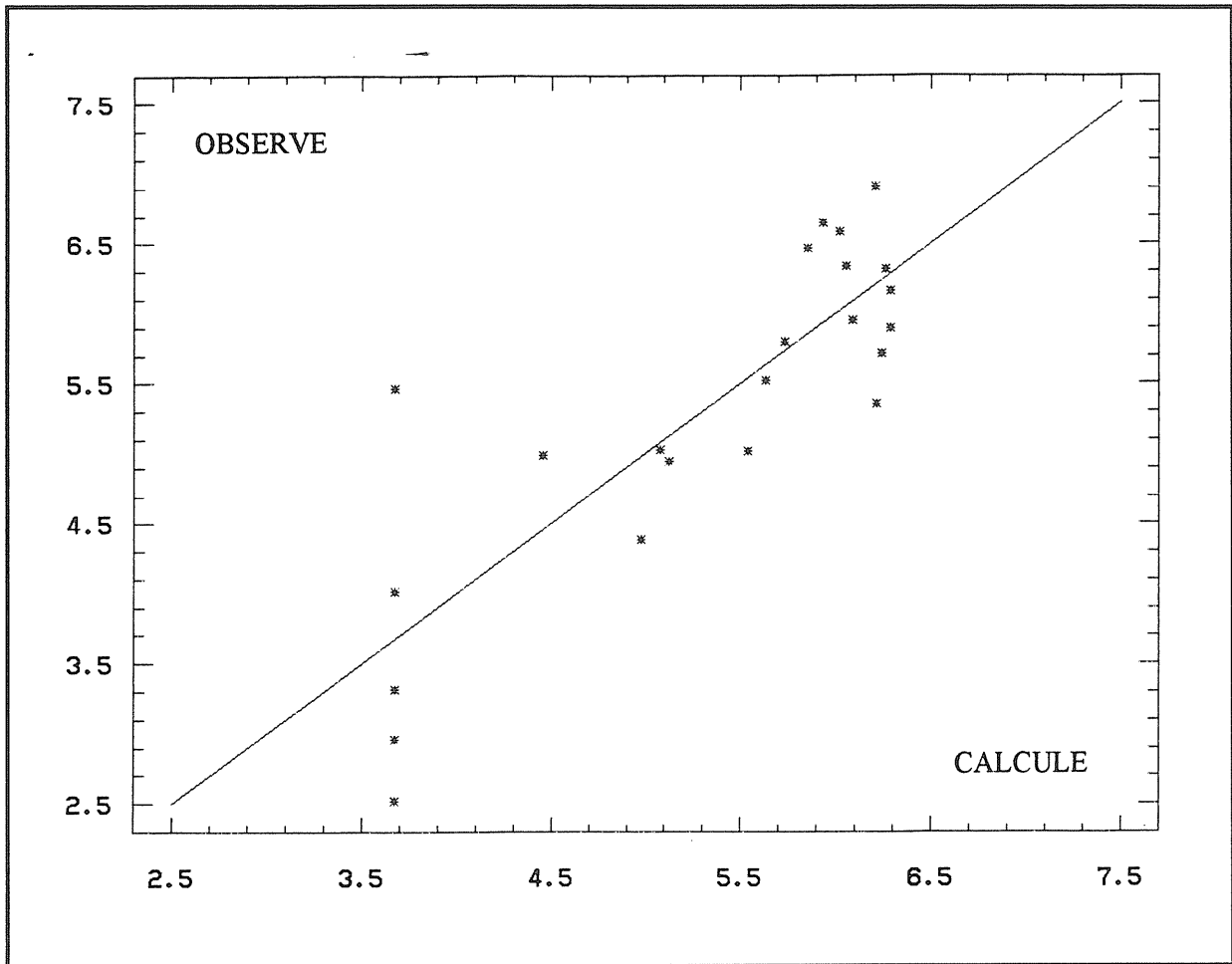


Figure (IV.9): Régression de C en fonction de PENT et PGRA.

Le nouveau modèle régional (MR2) pour la Bretagne sur les 23 bassins versants comprend une valeur régionale pour les paramètres A , D et une équation régionale pour chacun des deux autres paramètres B et C . La même variable pour les deux paramètres (B et C) est le pourcentage d'affleurement en granite (PGRA), et la variable pente (PENT) deuxième variable pour le paramètre C . Le modèle régional est :

$$a = 5.96$$

$$b = 39.25(PGRA + 1)^{0.57} \quad (IV.12)$$

$$c = 2.38 / \left[(PGRA + 1)^{0.07} PENT^{0.25} \right]$$

$$d = 0.$$

L'efficacité de ce modèle régional MR2 apparaît dans le **tableau IV.14**:

B.V.	<i>b</i>	<i>c</i>	BIL	NASH
01*	6.30	0.12	6.8	87.4
02*	6.30	0.12	-1.3	87.2
03	6.25	0.16	-2.2	82.0
04	6.23	0.11	12.7	81.6
05	5.13	0.36	6.9	90.1
06	6.10	0.22	6.4	83.3
07	5.86	0.22	-25.6	69.6
08	5.94	0.21	-8.4	66.8
09	6.07	0.12	25.6	85.5
10*	6.22	-0.04	-18.0	77.2
11	6.03	0.14	-2.5	80.7
12	5.74	0.32	15.9	90.8
13	3.67	0.66	-12.4	47.8
14	5.65	0.34	-15.5	75.1
15*	4.98	0.30	0	82.5
16	3.67	0.37	1.5	88.2
17	3.67	0.41	19.0	66.9
18	3.67	0.65	22.4	77.9
19	4.46	0.83	-62.2	62.9
20*	5.09	0.46	-47.8	81.7
21*	3.67	0.59	-4.3	73.5
22	5.55	0.39	10.7	72.8
23	6.27	0.17	11.7	76.5

Tableau (IV.14): Résultats du modèle régional MR2 (avec *a* et *d* fixés).

L'efficacité du premier modèle régional MR1 (voir § IV.6) apparaît dans le **tableau IV.15**:

$$\begin{aligned}
 a &= 265.(PGRA + 1)^{0.16} \\
 b &= 7.14 \cdot 10^{-6} (PGRA + 1)^{0.25} (PPMA)^{2.44} \\
 c &= 0.07 NJPA / \left[(PGRA + 1)^{0.06} PENT^{0.31} \right] \\
 d &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{IV.13}$$

Un essai supplémentaire a été effectué sur le modèle régional MR1 avec les valeurs calculées de *A*, *B* et *C* (voir **tableau IV.15**) et le paramètre *D* calé de nouveau isolément. Le **tableau IV.15** montre les résultats des critères et du paramètre *D*. Une tentative de relier ces nouvelles valeurs de *D* aux caractéristiques physico-climatiques n'a pas donné lieu à une relation significative.

N° B.V.	MR1 ($d = 0$)					MR1 (d calé)		
	a	b	c	BIL	NASH	d	BIL	NASH
01*	6.32	6.07	0.11	11.7	85.6	-.06	-3.2	88.3
02*	6.32	6.07	0.11	3.5	85.6	-.02	-1.2	85.8
03	6.31	5.61	0.20	2.4	85.9	-.01	-0.6	86.0
04	6.30	5.92	0.10	16.8	81.9	-.10	-5.4	86.8
05	5.99	5.60	0.44	7.0	85.3	-.07	-9.9	86.9
06	6.26	5.99	0.29	11.2	83.8	-.05	-0.3	85.1
07	6.20	5.89	0.28	-21.3	79.6	.06	0.9	84.8
08	6.22	6.13	0.19	-2.2	78.7	.01	1.4	78.9
09	6.25	6.07	0.12	29.2	81.4	-.16	-1.2	92.4
10*	6.30	5.64	-0.11	-11.4	69.4	.09	17.5	77.9
11	6.24	5.98	0.13	1.0	84.4	.02	6.5	84.7
12	6.16	6.16	0.35	18.1	87.0	-.14	-5.3	91.3
13	5.58	4.50	0.58	-24.3	54.9	.09	25.7	71.8
14	6.13	5.16	0.34	-13.4	76.3	.02	-1.7	77.9
15*	5.95	4.68	0.49	-0.3	86.6	-.01	-6.9	86.8
16	5.58	4.36	0.14	-11.1	89.6	.13	2.5	90.8
17	5.58	4.35	0.18	1.9	70.0	-.03	-16.6	71.0
18	5.58	4.01	0.59	8.1	84.0	-.01	1.3	84.3
19	5.80	4.52	0.80	-73.2	47.1	.07	11.1	80.9
20*	5.98	4.40	0.58	-46.3	77.1	.05	4.8	89.1
21*	5.58	3.94	0.73	-15.4	74.3	0	-15.4	74.3
22	6.11	5.06	0.40	14.2	75.1	-.04	-3.0	77.6
23	6.31	5.47	0.01	17.3	73.5	-.04	3.8	77.8

Tableau (IV.15): Résultats du modèle régional MR1 avec ($d = 0$ fixés) et (d calé).

IV.9 - COMPARAISON DES DIFFERENTS MODELES

La progression du critère de Nash entre les modèles peut être suivie par la comparaison des distributions des critères obtenues par les modèles calés sur les 23 bassins versants (Cf. **figure IV.10**) et les distributions des critères obtenues par les modèles régionaux (Cf. **figure IV.11**). Les deux distributions des deux modèles régionaux MR1 et MR2, ne nous permettent pas de faire un choix car elles s'entrecroisent entre elles. Cela nous a conduit à faire un graphique des distributions des erreurs de bilan (Cf. **figure IV.12**) qui nous a permis d'opter pour le modèle régional MR2. Il est en effet le plus simple des deux car il ne fait intervenir que deux caractéristiques physiques (PENT et PGRA) pour le paramètre C et uniquement PGRA pour le paramètre B et deux valeurs régionales pour A et D . Le modèle régional retenu est encourageant puisqu'il ne se dégrade pas beaucoup par rapport aux modèles calés.

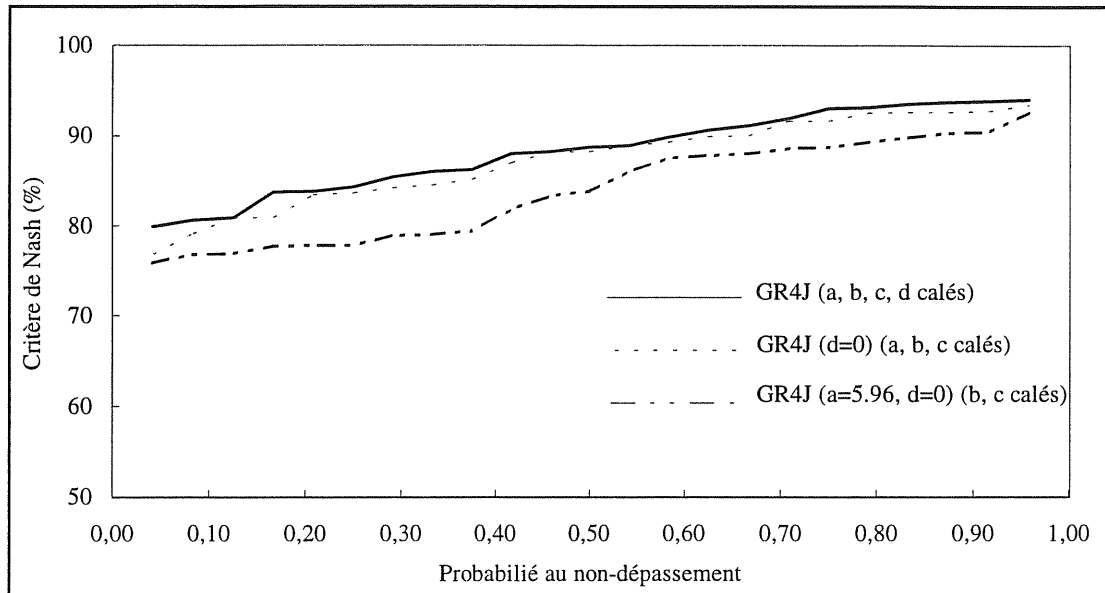


Figure (IV.10): Comparaison des distributions des critères de Nash pour les différentes applications du modèle GR4J avec calage.

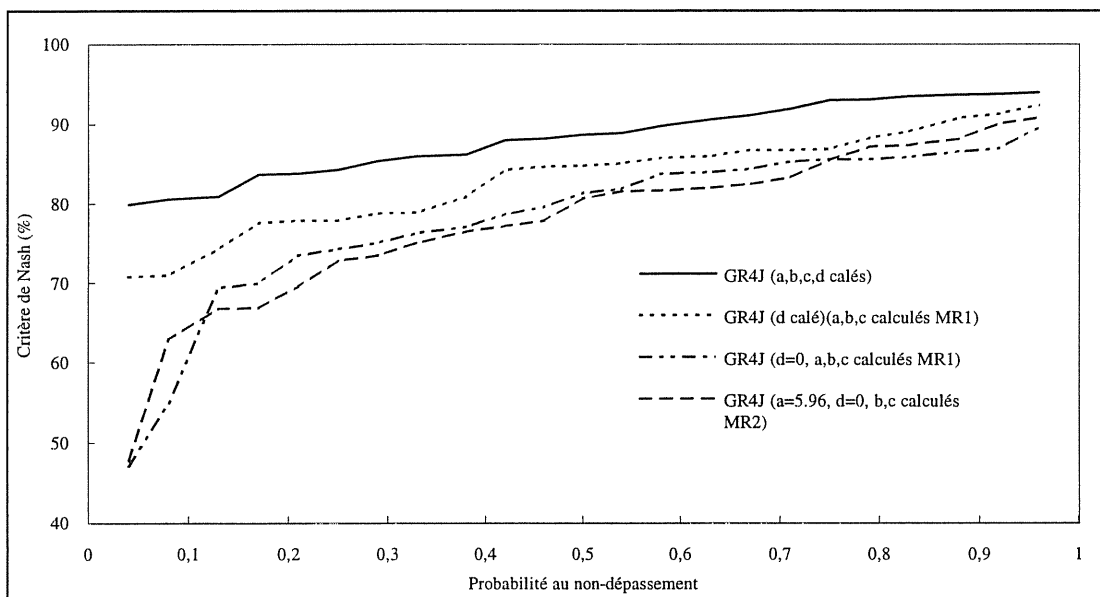


Figure (IV.11): Comparaison des distributions des critères de Nash pour les différentes applications des modèles régionaux.

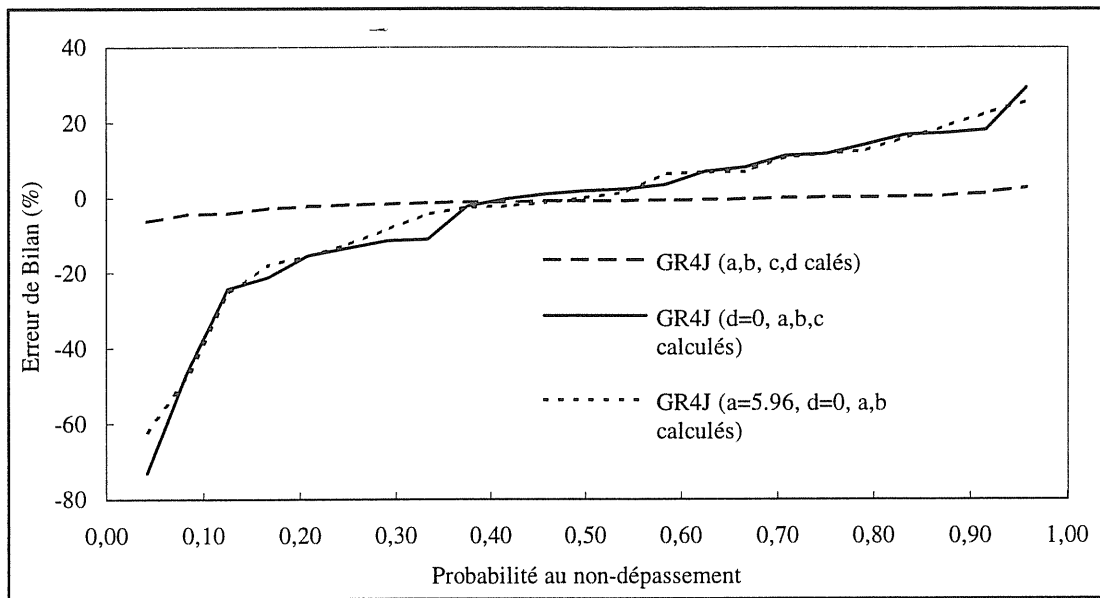


Figure (IV.12): Comparaison des distributions des erreurs de bilan pour les différentes applications.

IV.10 - COMPARAISON AVEC UNE ETUDE DU BRGM

Cette deuxième partie de l'étude présente quelques réflexions sur l'explication des paramètres d'un modèle conceptuel à l'aide d'un certain nombre de caractéristiques physiques des bassins versants correspondants.

La recherche a été entreprise avec le modèle GR4J sur 17 bassins de la région Bretagne qui avaient fait l'objet d'une investigation similaire pour deux modèles conceptuels (AMANDE et MARTINE) effectuée par Mazenc (1981).

Cette deuxième partie de l'étude a été entreprise avec un souci de comparaison avec l'étude réalisée par le BRGM. On a conservé les mêmes bassins versants et les mêmes caractéristiques descriptives de ces bassins, que ceux de l'étude citée au-dessus.

IV.10.1 - Les bassins versants et les caractéristiques utilisées

Les différents bassins versants, au nombre de 17, sont ceux déjà utilisés dans la première partie (à l'exception des 6 bassins précédés d'un * au **tableau IV.4**). Chaque bassin est caractérisé par 9 variables physiques liées à la morphologie, la géologie et la végétation (voir paragraphes précédents).

Une analyse en composantes principales a montré qu'il fallait prendre en compte 3 axes principaux pour atteindre 67 % de l'inertie totale et 5 axes principaux pour 89 %. Cela montre une certaine variété dans la description des bassins versants telle que permise par ces données.

IV.10.2 - Recherche des relations avec les paramètres du modèle GR4J

Un certain nombre de relations entre les paramètres du modèle GR4J et les caractéristiques physiques ont été étudiées. Les seules variables retenues en définitive sont la pente moyenne du plus long cours d'eau et le pourcentage de superficie à affleurement de granite.

Seuls les paramètres B et C ont pu donner lieu à des relations permettant de réduire leur variabilité (Cf. tableau IV.16, Figures IV.13 et IV.14). Les variables transformées, B et C , sont expliquées de la façon suivante:

Paramètre	Formule de Régression	Coefficient de Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
b	x_0	4.25	17.18	0.55	0.60
	$x_1 \ln(1 + PGRA)$	0.36	4.16		
c	x_0	0.83	8.20	0.15	0.68
	$x_1 \ln(PENT)$	-0.4	5.64		

Tableau (IV.16): Résultats pour les paramètres b et c du modèle GR4J.

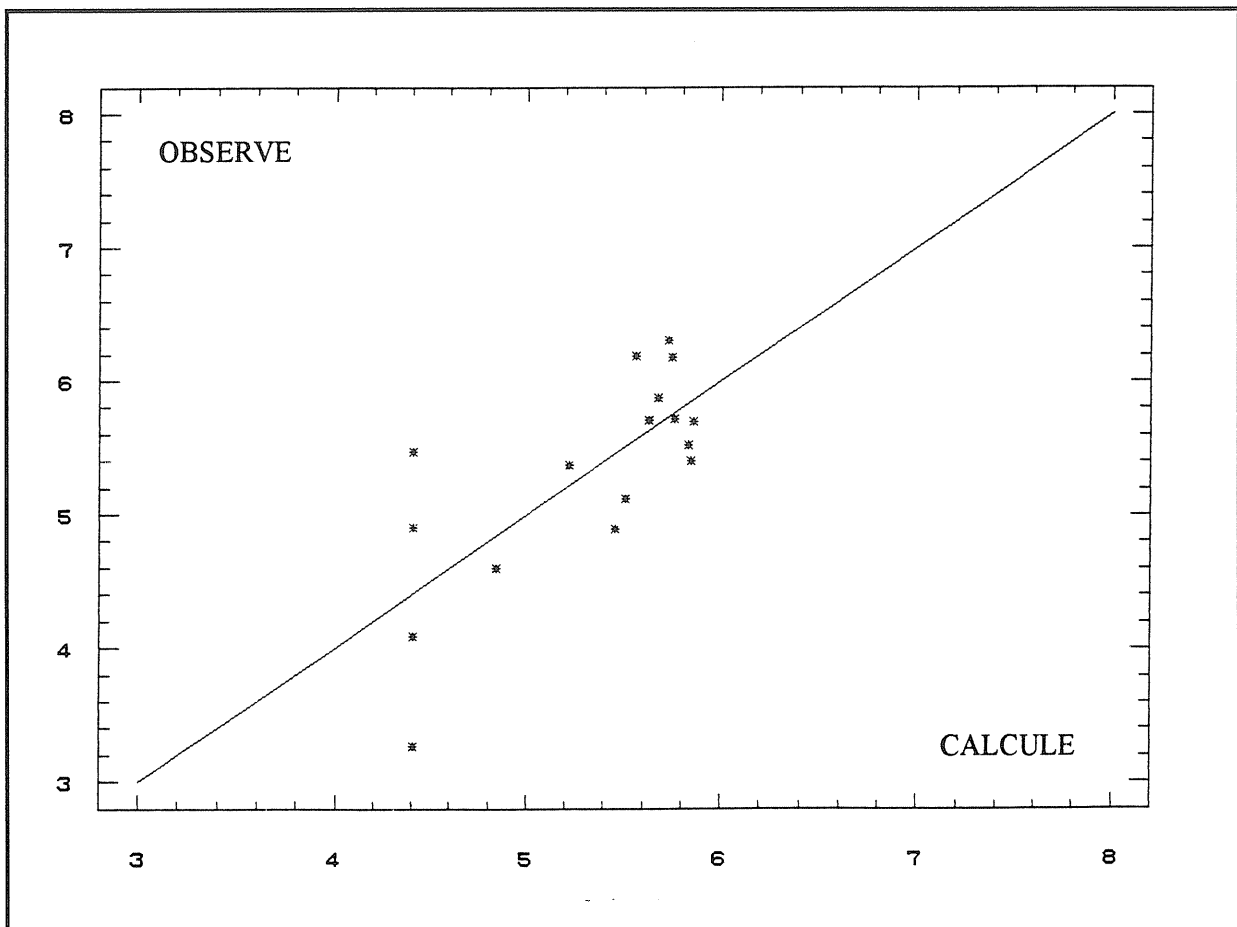


Figure (IV.13): Régression de B en fonction de PGRA.

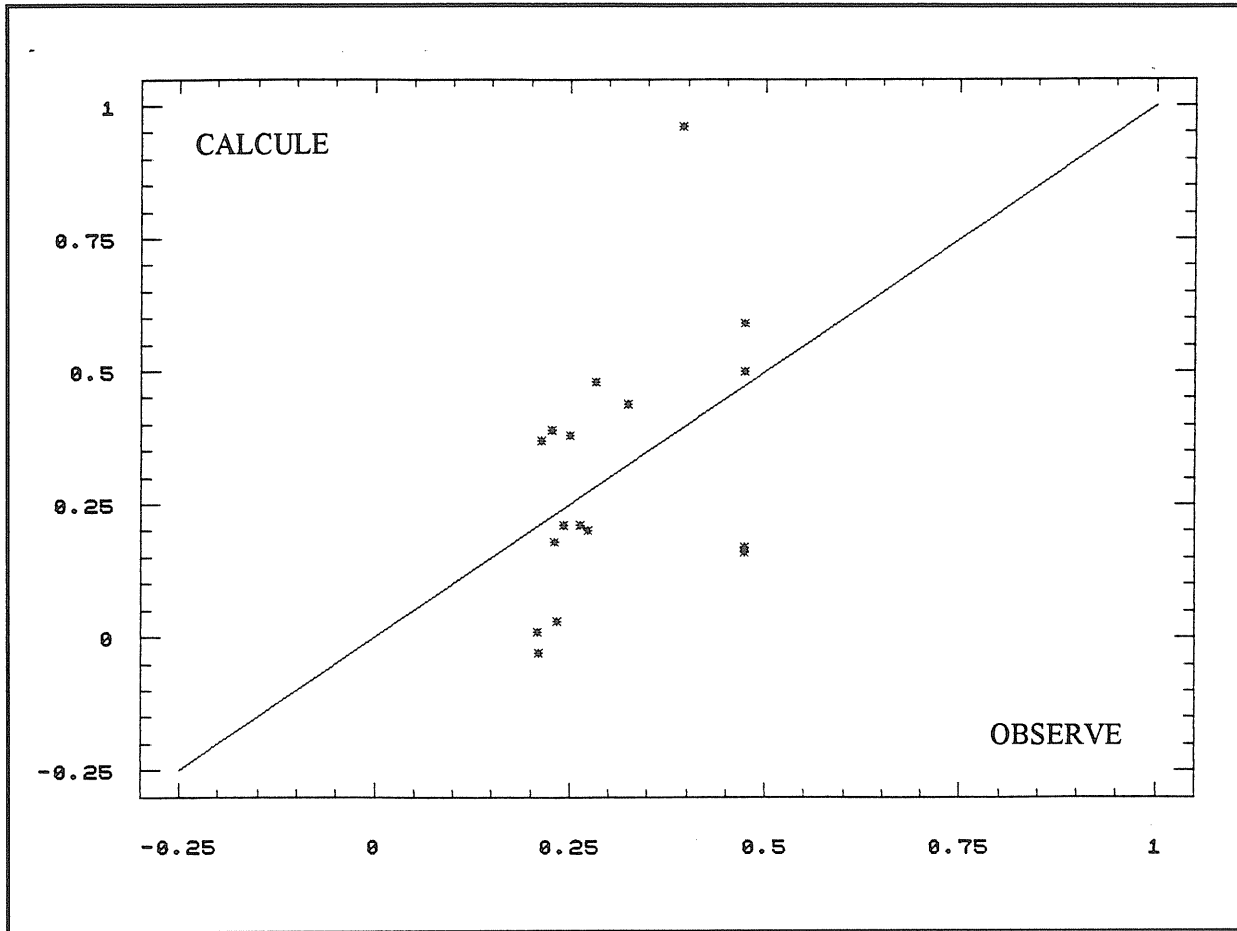


Figure (IV.14): Régression de C en fonction de PENT.

Les relations sont les suivantes:

$$\begin{aligned}
 b &= 70.1(1 + PGRA)^{0.36} \\
 c &= 2.29/PENT^{0.4}
 \end{aligned}
 \tag{IV.14}$$

Nous avons repris, le modèle avec deux paramètres fixés A et D , opéré la même recherche d'explication et obtenu les régressions ci-après. La valeur du paramètre A est fixée à la moyenne des 17 valeurs qui vaut 5.96 et la valeur de D est nulle. La variance expliquée pour le paramètre C diminue en passant de 68 % pour le modèle complet à 55 % pour le modèle avec 2 paramètres fixes.

Paramètre	Formule de Régression	Coefficient de Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
b	x_0	3.88	11.84	0.71	0.65
	$x_1 \ln(1 + PGRA)$	0.52	5.26		
c	x_0	0.75	7.02	0.16	0.55
	$x_1 \ln(PENT)$	-0.32	4.26		

Tableau (IV.17): Résultats pour les paramètres b et c du modèle GR4J avec $\bar{a} = 5.96$ et $d = 0$.

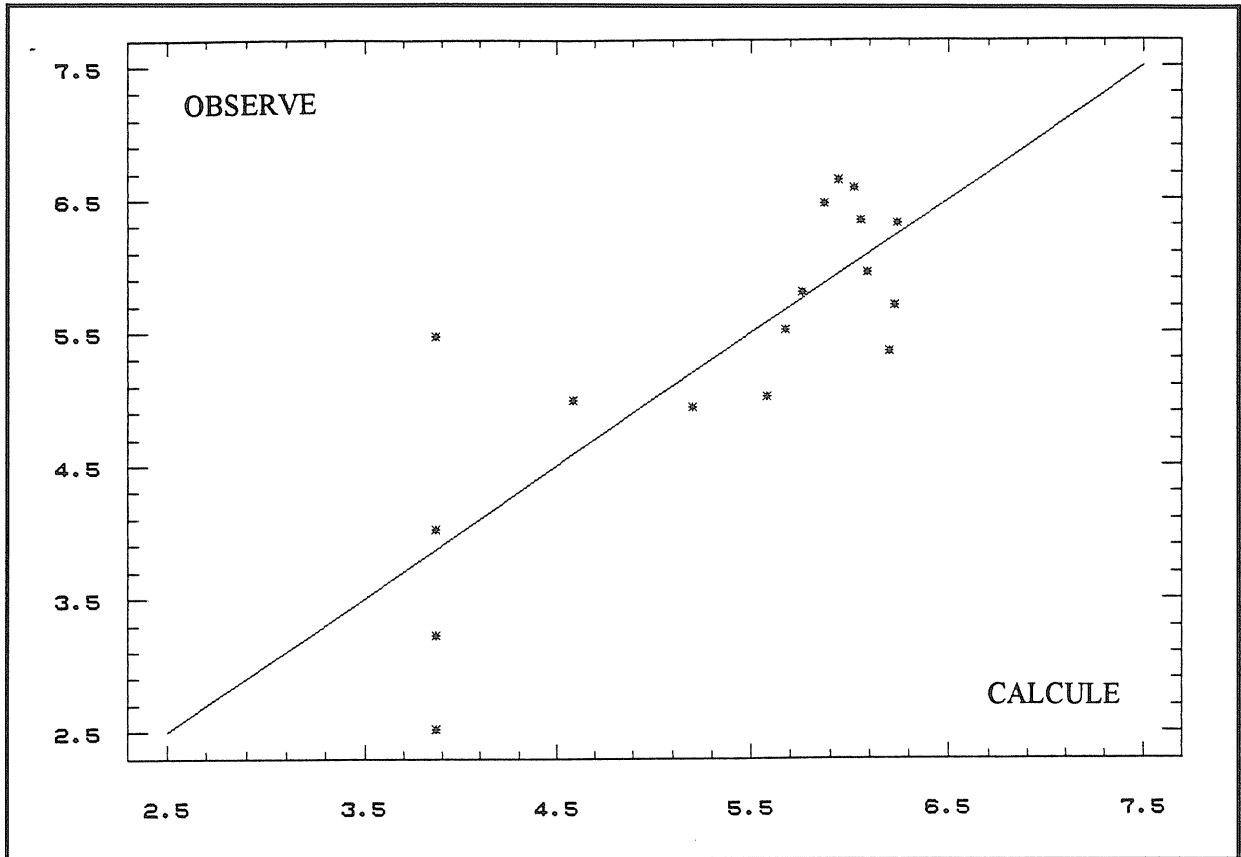


Figure (IV.15): Régression de B en fonction de PGRA.

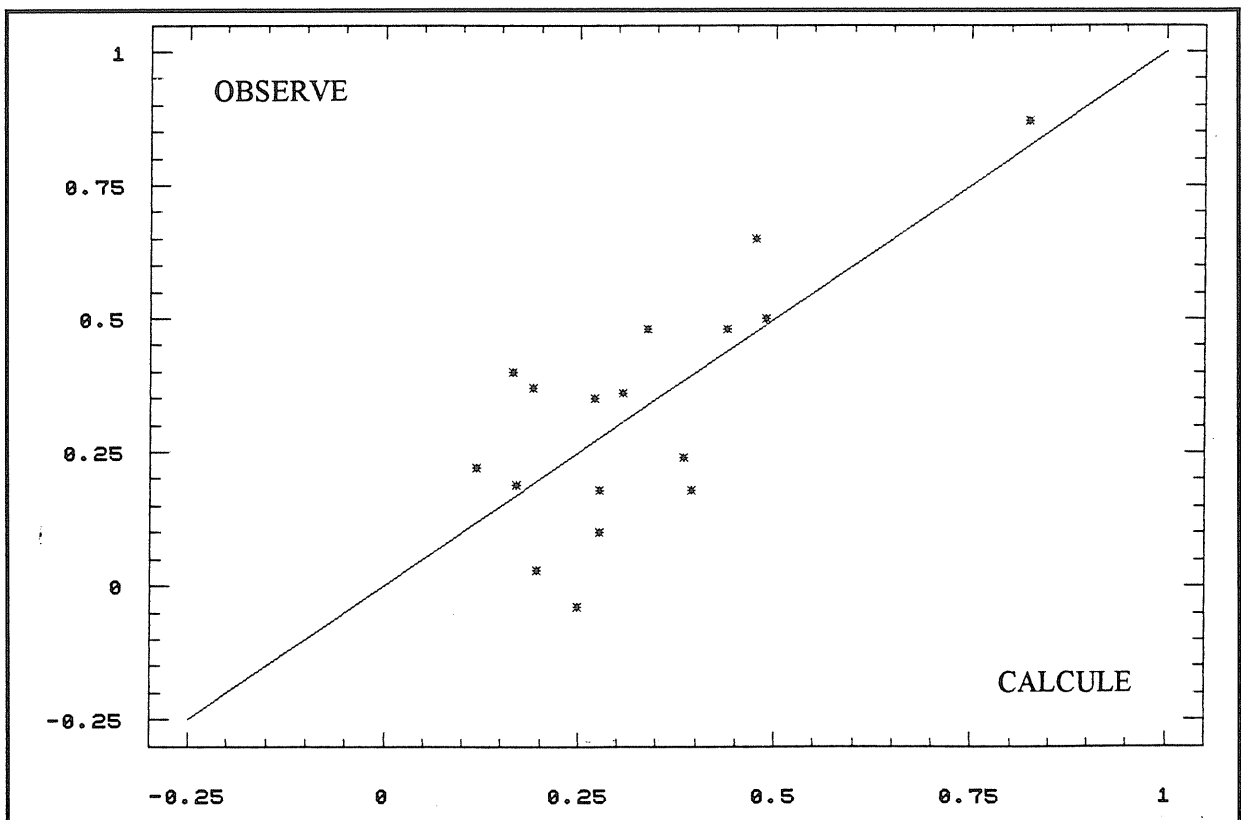


Figure (IV.16): Régression de C en fonction de PENT.

Les relations sont les suivantes:

$$b = 29.37(1 + PGRA)^{0.52}$$

$$c = 2.12/PENT^{0.32}$$
(IV.15)

IV.10.3 - Comparaison avec l'étude du BRGM

Dans cette partie nous comparons la tentative d'explication des paramètres de GR4J avec celle entreprise par le BRGM pour deux modèles conceptuels globaux à réservoirs comparables. Le modèle AMANDE et le modèle MARTINE ont respectivement 8 et 6 paramètres dans les versions utilisées. L'architecture des deux modèles et l'explication des paramètres sont dans l'**annexe II.4**. On se référera à l'étude précitée pour une description plus complète de ces modèles.

IV.10.4 - Recherche des relations

Disposant des résultats de calage des deux modèles AMANDE et MARTINE, une analyse a été entreprise pour établir des équations liant les paramètres avec les caractéristiques des bassins en appliquant les mêmes critères que précédemment pour le modèle GR4J.

Seuls deux paramètres du modèle AMANDE ont donné lieu à des relations significatives (au seuil de 1%); ce sont les paramètres *THY* (constante de temps du tarissement de l'écoulement superficiel différé) et *SHY* (pourcentage de surface de la zone semi-perméable) respectivement avec des coefficients de détermination de 0.52 et 0.40 (Cf. **tableau IV.18**).

Modèle	Param.	Formule de Régression	Coef. de Régre.	Rapport Student	Err. Stand.	Coef. déterm.	
AMANDE	<i>THY</i>	x_0	7.71	7.38	1.14	0.52	
		$x_1, LONG$	0.07	4.01			
	<i>SHY</i>	x_0	59.21	15.47	10.13	0.40	
			$x_1, PGRA$	-0.23			3.16
MARTINE	<i>LMAX</i>	x_0	246.57	8.48	28.63	0.70	
			$x_1, PSCH$	-0.79			3.80
			$x_2, PPRA$	-4.52			5.04

Tableau (IV.18): Résultats pour les modèles AMANDE et MARTINE.

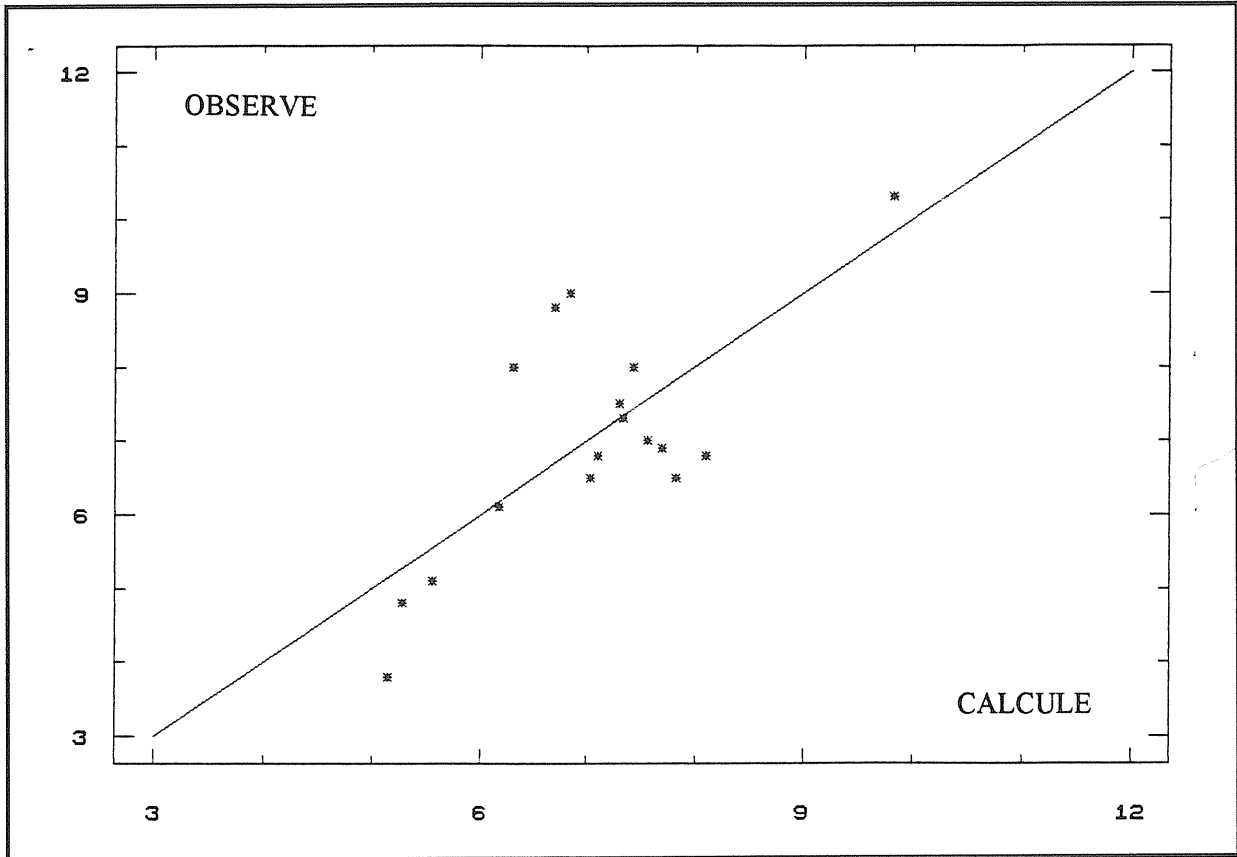


Figure (IV.17): Régression de *THY* en fonction de *LONG* (modèle AMANDE).

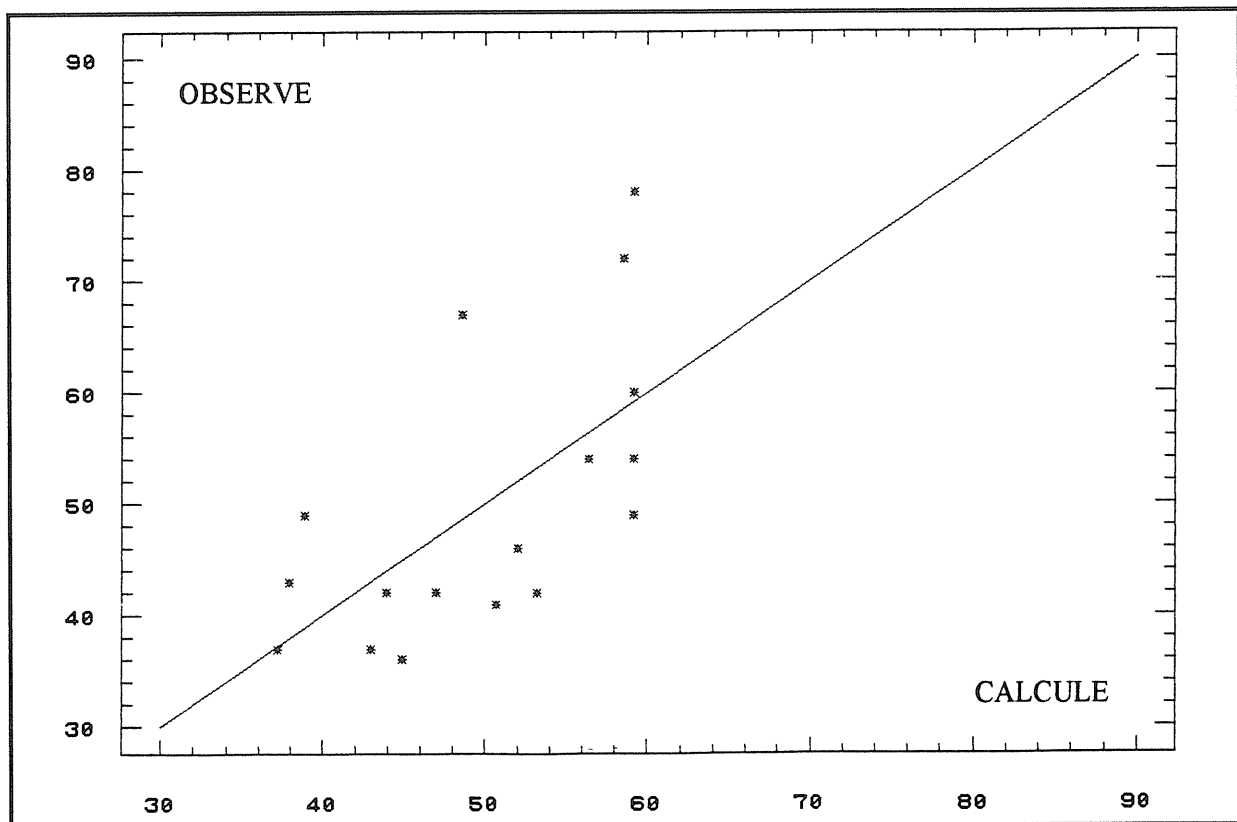


Figure (18): Régression de *SHY* en fonction de *PGRA* (modèle AMANDE).

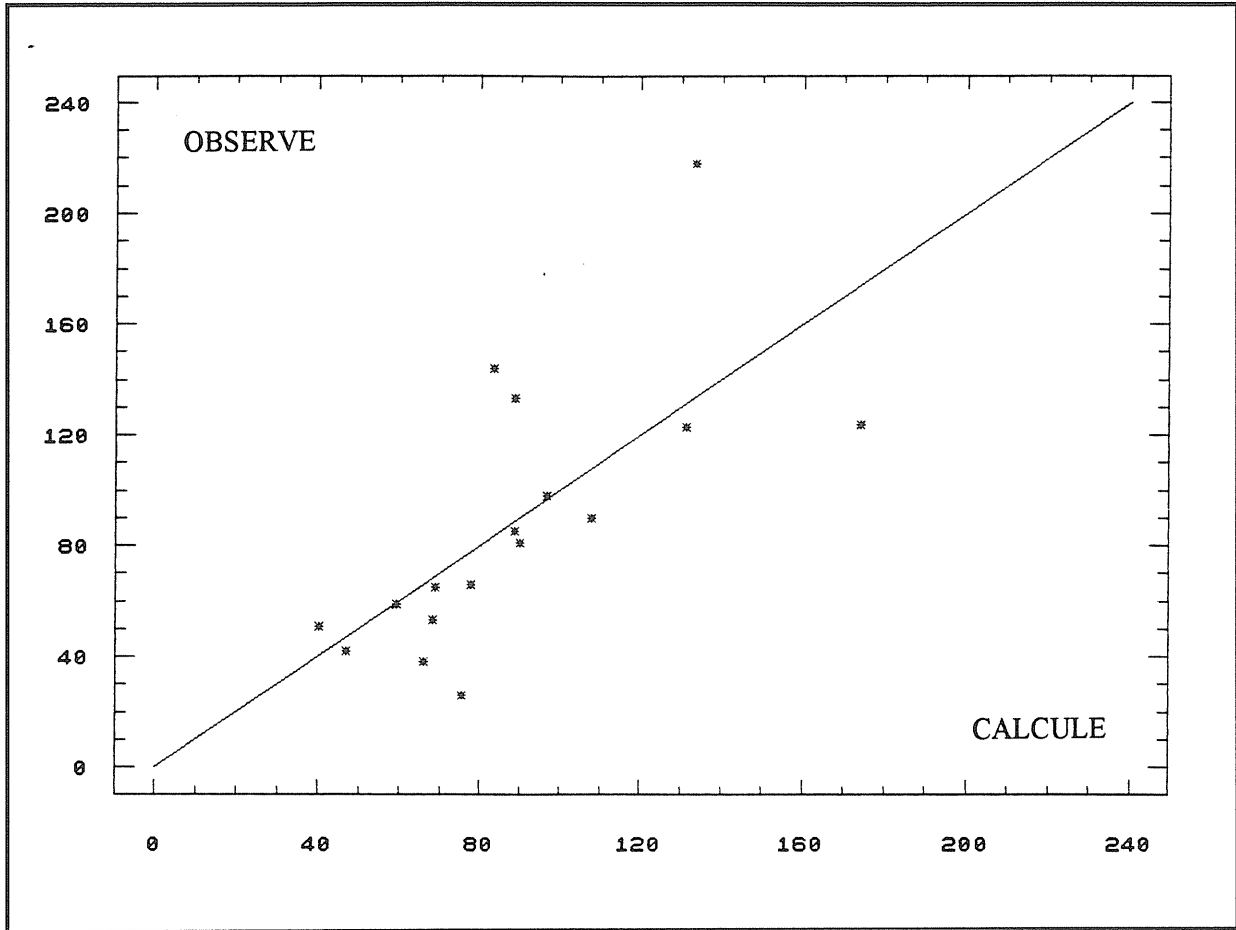


Figure (IV.19): Régression de $LMAX$ en fonction de $PSCH$ et $PPRA$ (modèle MARTINE).

Deux caractéristiques seulement ont été retenues pour l'explication: la longueur du plus long cours d'eau et le pourcentage de surface à affleurement en granite.

$$\begin{aligned} THY &= 4.71 - 0.07 LONG \\ SHY &= 59.21 - 0.23 PGRA \end{aligned} \quad (IV.16)$$

Pour le modèle MARTINE un seul paramètre a donné lieu à une relation significative; c'est le paramètre $LMAX$ (capacité maximale du réservoir intermédiaire) avec un coefficient de détermination de 0.70 et deux caractéristiques de bassin ont été retenues pour l'explication: le pourcentage de surface à affleurement en schiste et le pourcentage de surface en prairies ou en culture.

$$LMAX = 246.57 - 0.79 PSCH - 4.52 PPRA \quad (IV.17)$$

IV.10.5 - Comparaison des explications des paramètres

Nous avons procédé au calcul des coefficients de détermination pour le modèle GR4J afin de les comparer aux coefficients correspondants dont on dispose dans l'étude citée antérieurement pour les modèles AMANDE et MARTINE (Cf. tableau IV.19). Les distributions de ces coefficients apparaissent sur la figure IV.20.

N° B.V.	MODELE					
	GR4J	GR3J	GR3J ($\bar{a} = 5.96$)	REGIONAL	MARTINE	AMANDE
03	88.0	87.7	86.8	81.8	69.2	69.4
04	89.9	89.5	88.5	87.1	76.9	77.8
05	93.9	92.9	91.6	92.0	75.5	76.4
06	86.3	86.0	85.0	84.2	70.7	79.0
07	91.1	91.0	85.5	87.9	80.5	79.4
08	85.5	85.5	81.3	85.0	74.5	76.9
09	94.0	94.0	93.3	92.8	86.7	88.5
11	89.0	88.9	88.9	88.6	80.5	83.2
12	93.9	93.6	92.8	92.9	76.4	81.0
13	94.8	94.1	94.1	72.4	82.6	87.8
14	83.7	83.7	80.9	77.0	79.6	81.9
16	92.1	91.8	91.3	89.9	70.2	76.9
17	81.4	81.4	80.3	73.6	61.8	65.0
18	84.5	84.3	83.0	83.4	68.7	71.2
19	86.2	85.8	85.8	84.6	75.2	82.5
22	80.6	80.4	80.2	73.6	65.3	69.7
23	79.9	79.9	78.1	79.1	71.1	76.2

Tableau (IV.19): Valeurs des coefficients de détermination pour les 17 bassins.

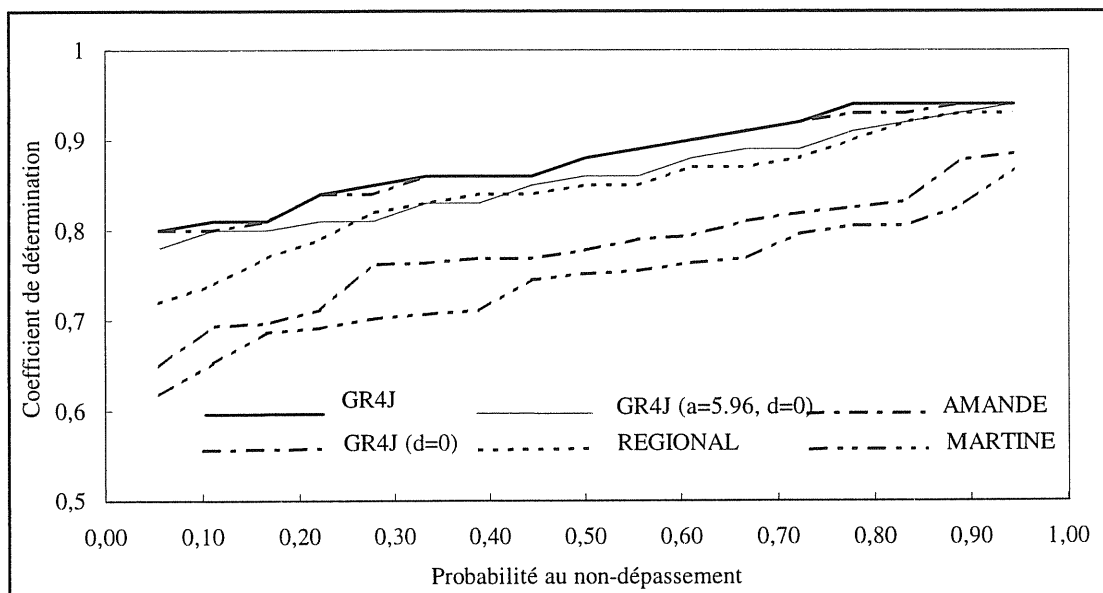


Figure (IV.20): Comparaison des distributions des coefficients de détermination pour les différents modèles.

Le but de cette étude est plutôt la comparaison des possibilités d'explication des paramètres. Le **tableau IV.20** illustre cette comparaison. Dans ce tableau *NPT* représente le nombre de paramètres à optimiser, *NPE* le nombre de paramètres (partiellement) explicables et *NV* le nombre de caractéristiques physiques des bassins versants entrant dans l'explication des paramètres, la dernière colonne donnant le coefficient de détermination moyen par paramètre de chaque modèle, c'est-à-dire, la somme des coefficients de détermination des différentes régressions divisée par le nombre de paramètres à expliquer.

MODELE	<i>NPT</i>	<i>NPE</i>	<i>NV</i>	$\Sigma R^2/NPT$
AMANDE	8	2	2	0.11
MARTINE	6	1	2	0.12
GR4	4	2	2	0.32
GR4 (a et d fixés)	2	2	2	0.60

Tableau (IV.20): Comparaison des succès dans l'explication des paramètres.

IV.11 - CONCLUSION

L'étude des relations entre les caractéristiques du bassin et les paramètres d'un modèle, dans le but de pouvoir simuler les débits de cours d'eau non jaugés, nous a conduit à tenter la mise en évidence de ces relations dans le cas du modèle GR4J sur la région Bretagne.

Dans un premier temps, nous avons appliqué une analyse en composantes principales qui nous a permis de synthétiser le tableau des données physico-climatiques en fonction de quelques critères. Dans un deuxième temps, nous avons essayé de préciser ces relations à l'aide de régressions multiples.

La mise en évidence de ces relations nous a conduit à expliquer trois paramètres (*A*, *B* et *C*), alors que *D* n'était pas significatif au seuil de 1 %. Si on cale GR4J avec *D* = 0, le paramètre *A* devient non significatif, ce qui nous a amenés à prendre une valeur moyenne pour *A* dans toute la région (5.96) et un paramètre *D* nul. Deux équations ont pu être mises au point avec chacune deux variables explicatives: le pourcentage de superficie à affleurement de granite et la pluie annuelle moyenne pour le paramètre *B* avec une variance expliquée de 77 % d'une part; la pente moyenne du plus long cours d'eau et le pourcentage de superficie à affleurement de granite pour le paramètre *C* avec une variance expliquée de 69 % d'autre part.

On a présenté une comparaison des tentatives d'explication des paramètres de 3 modèles conceptuels globaux de complexité croissante: GR4 (4 paramètres), MARTINE (6 paramètres) et AMANDE (8 paramètres). L'augmentation du nombre de paramètres ne facilite pas leur explication

Deux conclusions à noter: la première est qu'il faudrait rechercher de nouvelles caractéristiques pertinentes des bassins, la seconde est qu'il faudrait utiliser un plus grand nombre de bassins donnant ainsi la possibilité de calculer d'autres relations.

CHAPITRE V

TENTATIVE D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J SUR DES BASSINS VERSANTS DE LA MOSELLE

V.1 - INTRODUCTION

On s'intéressera dans ce chapitre à une autre région (la Moselle française) où on essayera d'expliquer les paramètres du modèle GR4J. On dispose sur cette région de caractéristiques physiques de bassins empruntées à une étude du BRGM. La démarche sera identique à celle déjà effectuée sur les bassins versants de la Bretagne.

V.2 - DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES

Les bassins versants retenus de la Moselle française sont situés sur quatre départements de la région Lorraine (Vosges (88), Meuse (55), Moselle (57) et Meurthe et Moselle (54)), (Cf. **figure V.1**). 34 bassins, qui présentent deux séries concomitantes de pluies et de débits, sont retenus pour notre étude (liste présentée au **tableau V.5**).

Les données hydrologiques employées dans l'étude sont des données journalières en continu de précipitations, de débits et d'évaporation décadaire moyenne. Ces données ont été obtenues auprès des mêmes sources que celles utilisées pour les bassins versants de la Bretagne.

Les données hydrométriques journalières ont été extraites de la banque HYDRO pour le bassin Rhin-Meuse, les données pluviométriques sont disponibles en 25 postes dont la liste figure dans le **tableau V.1**.

V.3 - DESCRIPTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Le fichier des caractéristiques physiques a été mis au point par l'ORSTOM. Nous l'avons emprunté à une étude du BRGM qui l'a utilisé dans son rapport (85 SGN 435 EAU).

La superficie totale du bassin de la Moselle française a été divisée en 538 mailles carrées de 5 km de côté, appelées carreaux (soit 13450 km²).

Chaque carreau est repéré par un numéro d'ordre (de 1 à 538) et par les coordonnées Lambert de son centre. Pour chaque carreau, les paramètres suivants ont été définis à partir des cartes au 1/25000.

Altitude moyenne (ALTI): Cette altitude exprimée en mètres correspond à la moyenne des altitudes des centres de cinq cercles tracés en quinconce sur le carreau. Chaque cercle a un diamètre de quatre centimètres sur la carte.

Pente (PENT): Il s'agit d'un indice de relief plutôt que de la pente. Dans chaque cercle, on trace selon la plus grande pente un diamètre et l'on compte le nombre de courbes de niveau, équidistant de 10 m sur la verticale, recoupées par ce diamètre. L'indice de pente est la moyenne du nombre maximal de courbes coupées dans les 5 cercles.

Occupation du sol: Elle est définie par les paramètres suivants exprimés en millième de surface du carreau: **Feuillus (FEUI)**, **Conifères (CONI)**, **Prairies (PRAI)** et **Cultures (CULT)**.

Deux paramètres d'occupation du sol, obtenus par regroupement d'autres paramètres, ont été ajoutés au fichier. Ce sont :

- * **Forêt (FORE)** = Feuillus + Conifères
- * **Champs (CHAM)** = Prairies + Cultures

Perméabilité - Lithologie

Cinq classes de perméabilités ont été définies :

* Zone perméable à aquifère drainé: Ce sont surtout les grès, les conglomérats du permio-trias, les calcaires fissurés, et les terrains karstiques du Muschelkalk moyen et les alluvions des vallées de la Meurthe et de la Moselle (**GRES**).

* Zone à Perméabilité moyenne ou faible: Correspond aux alternances d'argiles, de grès de calcaire du jurassique inférieur et du crétacé inférieur et de marnes du Rhétien supérieur et du lias (**ALTE**).

* Zone karstique: correspond aux calcaires du Dogger et de l'Oxfordien qui forment les côtes de la Moselle et de la Meuse (**KARS**).

* Zone marneuse: correspond aux marnes du Keuper et aux argiles de la Woevre (**MARN**).

* Zone du socle cristallin et cristallophyllien du primaire des Vosges (**CRIS**).

Pour chaque paramètre, le BRGM a réalisé des cartes d'isovaleurs (Cf. **annexe III.1**).

Calcul des paramètres physiographiques sur les bassins

On connaît d'évidence les carreaux sur lesquels se trouve chaque bassin, et le pourcentage de chaque type de carreau appartenant à ce bassin.

Chaque paramètre est calculé par la moyenne des valeurs prises sur chaque carreau, pondérée par la surface occupée par le bassin. Ces caractéristiques physiographiques sont rassemblées dans le **tableau V.2**.

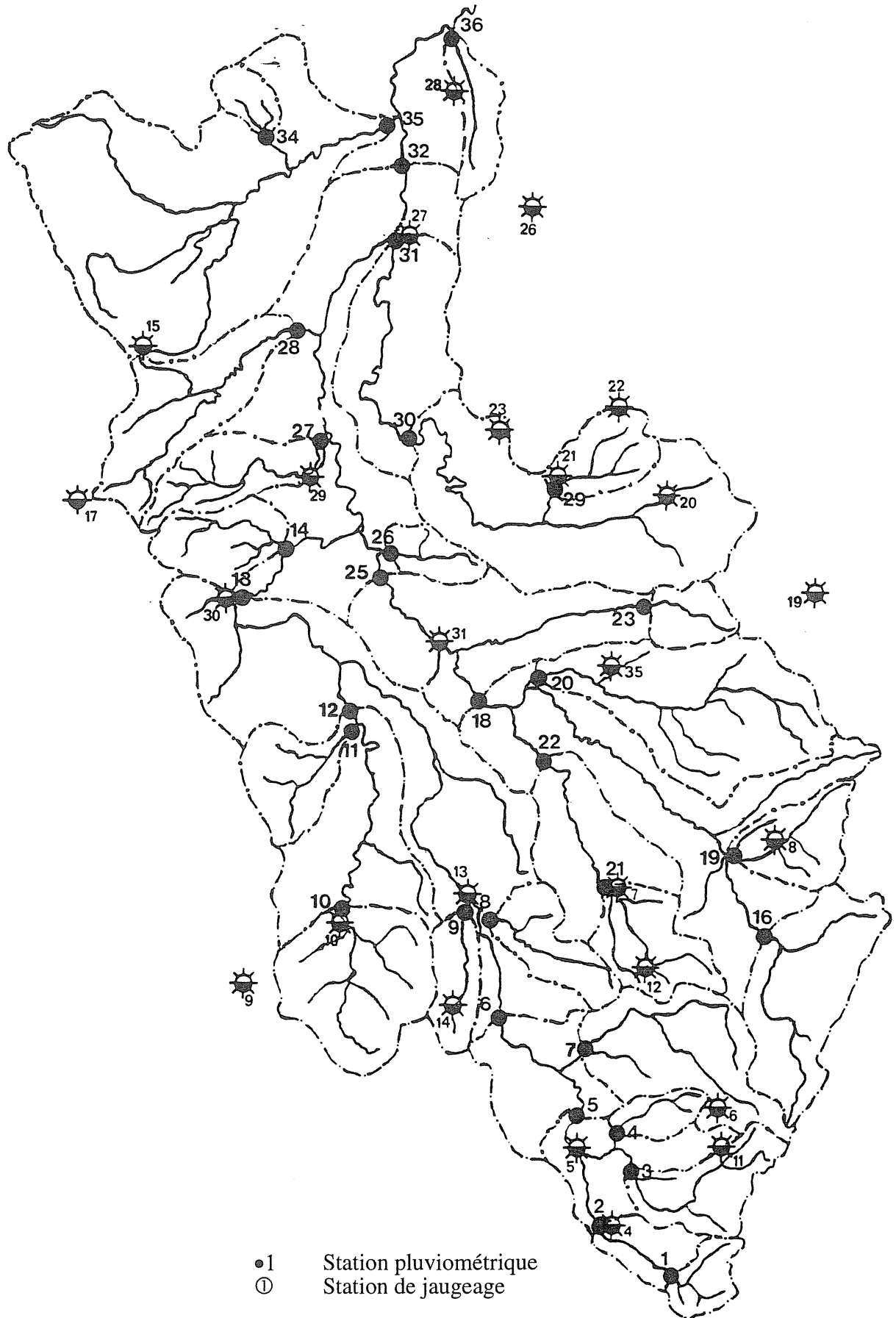


Figure (V.1): Plan de situation des 34 bassins versants de la Moselle.

N	Code	NOM DE LA STATION	ALTI (m)	CODE (Météo N.)	PERIODE
01	04	Rupt-sur-Moselle.	428	88408001	70-80
02	05	Remiremont.	380	88383001	70-80
03	06	Gérardmer.	666	88196001	70-80
04	07	Rambervilliers.	286	88367001	70-80
05	08	Senones.	340	88451001	70-80
06	09	Vittel.	330	88516002	70-80
07	10	Mirecourt.	274	88304001	70-80
08	11	La Bresse.	630	88075001	70-80
09	12	Brouvelieures.	400	88076001	70-80
10	13	Golbey.	340	88209001	70-80
11	14	Chaumousey (Etang).	357	88098001	70
12	15	Vigneulles les Hattenchâtel.	257	55551011	70-80
13	17	Commercy.	283	55122001	70-80
14	19	Sarrebourg.	250	57630901	70-80
15	20	Dieuze.	219	57177901	70-80
16	21	Château salins.	210	57132901	70-80
17	22	Morhange.	--	57483901	75-80
18	23	Delme.	226	57171901	70-80
19	26	Boulay - Moselle.	233	57097901	70-80
20	27	Metz - Frescaty.	190	57039901	70-80
21	28	Metzervisse.	220	57465901	70-80
22	29	Domevre sur Vezouze.	255	54161001	70-79
23	30	Toul.	285	54528001	70-80
24	31	St-Nicolas de Port.	210	54483001	70-80
25	35	Laneuville aux Bois.	240	54297001	70-80

Tableau (V.1): Liste des 25 stations pluviométriques utilisées.

Cod	SURF V1	ALTI V2	PENT V3	FEUI V4	CONI V5	PRAI V6	CULT V7	FORE V8	CHAM V9	GRES V10	ALTE V11	KARS V12	MARN V13	CRIS V14
01	69	803	15	29	36	27	1	66	28	4	0	0	0	95
02	153	746	14	26	28	35	2	54	37	0	0	0	0	99
03	183	819	13	19	34	33	1	55	34	0	0	0	0	99
04	66	703	10	13	40	34	5	53	39	3	0	0	0	96
05	621	720	12	18	34	34	3	53	37	3	0	0	0	96
06	1219	652	10	22	31	31	0	53	40	22	0	0	1	76
07	369	637	8	16	35	32	12	52	44	29	0	0	0	70
08	144	347	2	35	10	38	13	46	51	77	0	0	23	0
09	104	366	3	37	1	38	16	43	54	91	0	0	8	0
10	383	346	3	26	0	47	19	31	67	57	4	0	40	0
11	142	342	3	21	1	49	19	28	68	10	53	16	22	0
12	941	332	3	21	1	50	21	27	70	35	27	2	35	0
13	3340	441	5	27	12	38	15	43	53	34	11	6	22	27
14	169	252	2	30	2	41	19	37	59	6	0	18	76	0
16	369	655	11	5	46	35	5	52	41	3	1	0	0	95
17	151	531	11	3	64	24	5	67	28	27	22	0	10	41
18	2288	108	6	21	30	33	10	53	44	49	7	0	23	21
19	116	520	15	10	78	9	1	88	10	71	27	0	2	0
20	559	314	4	27	16	38	14	46	52	60	1	0	39	0
21	98	444	9	9	64	18	6	74	25	77	1	0	1	21
22	495	353	4	27	23	35	12	52	46	66	0	0	29	5
23	72	259	2	25	4	47	19	30	66	19	0	0	80	0
25	2914	375	6	21	24	35	13	48	49	43	0	0	30	16
26	85	256	1	22	1	39	26	32	65	10	68	0	20	0
27	229	266	2	36	4	24	31	42	55	2	0	60	30	0
28	372	263	3	32	2	32	27	37	59	0	0	51	59	0
29	143	251	3	16	1	44	32	22	76	17	4	0	80	0
30	923	241	3	18	1	45	29	23	74	12	45	0	63	0
31	1269	234	2	17	1	44	32	21	76	14	40	0	46	0
32	9387	357	5	24	12	36	19	40	56	30	16	9	30	15
33	377	242	2	22	1	45	24	27	70	0	0	24	75	0
34	76	273	3	19	1	39	36	22	75	0	0	92	7	0
35	1226	243	2	24	1	41	28	28	69	0	0	47	52	0
36	110	236	5	44	2	23	25	49	47	25	20	0	55	0

Tableau (V.2): Caractéristiques physiques des 34 bassins versants de la Moselle.

V.4 - ANALYSE DU TABLEAU DE DONNEES PHYSIOGRAPHIQUES

L'ACP est une technique qui transforme un ensemble de variables en un autre (composantes principales) non corrélées entre elles; elle a pour but premier de diminuer la dimension de l'espace des données tout en gardant le maximum d'informations possible. Il s'agit donc, d'une part, de mettre en évidence des ressemblances entre observations (groupes) et, d'autre part, de repérer d'éventuelles liaisons pouvant exister entre variables (variables liées positivement ou négativement, groupes de variables corrélées entre elles), mesurées par les coefficients de corrélation linéaire.

Dans notre étude, à cause de l'hétérogénéité des variables (km², m, %), nous avons utilisé une ACP normée qui consiste à centrer et réduire les variables. Nous avons réalisé une analyse sans transformation du fichier physiographique (36 bassins, 14 variables), afin de rechercher les combinaisons linéaires des variables résumant le mieux possible l'information contenue.

V.4.1 - Analyse de la matrice de corrélation

Cette matrice (Cf. **tableau V.3**), nous montre des liaisons importantes entre les variables (coefficient de corrélation linéaire):

- Altitude et pente (.880); altitude et pourcentage de cristallin (.926); altitude et cultures (-.809).

- Pente et cultures (-.861); pente et pourcentage de conifères (.858); pente et pourcentage de cristallin (.834).

Ces liaisons obtenues traduisent le fait réel banal que plus un bassin est pentu, plus l'altitude est grande, moins il y a de cultures.

- Forêt et champs (-.991); culture et champs (.882); prairies et forêt (-.880); conifère et forêt (.912) et conifère et champs (-.912).

Ces fortes corrélations sont liées au fait que la somme des pourcentages de forêts, de cultures et de prairies est presque égale 100 %.

Il nous est apparu judicieux de reprendre une ACP en supprimant les deux variables forêt et champs. Il ne reste alors plus que 12 variables. Une nouvelle ACP est réalisée sur le tableau avec seulement ces 12 variables.

V.4.2 - Valeurs propres

L'inertie n'est pas dispersée, car il faut 3 axes pour atteindre presque 72 % de l'inertie totale (Cf. **tableau V.4**). L'axe N°1 explique à lui seul 47.3 % de l'inertie du nuage. L'axe N°2 contribue pour 13.4 % à l'inertie. Ainsi le plan formé par les deux premiers axes explique 60.7 % de l'inertie totale. L'axe N°3 explique 10.5 % de l'inertie du nuage. Ainsi l'interprétation se fera sur les trois premiers axes.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14
V1	1000													
V2	-133	1000												
V3	-89	880	1000											
V4	64	-370	-438	1000										
V5	-88	685	858	-608	1000									
V6	39	-417	-646	113	-765	1000								
V7	51	-809	-861	321	-821	520	1000							
V8	-73	635	820	-242	912	-880	-843	1000						
V9	79	-713	-871	250	-912	854	882	-991	1000					
V10	77	-223	-108	131	156	-174	-174	294	-204	1000				
V11	85	-272	-217	-101	-149	134	259	-199	222	-39	1000			
V12	-38	-316	-345	217	-346	32	546	-347	353	-382	-162	1000		
V13	22	-734	-720	289	-684	547	704	-683	716	-113	26	134	1000	
V14	-81	926	834	-359	603	-323	-757	530	-626	-376	-322	-295	-675	1000

(Tous les coefficients sont multipliés par 1000)

Tableau (V.3): Matrice des corrélations.

N°	Val. Pro.	Pourct.	Cumul.	Variat.	Histogram. Des Val. Propr.
01	5.67520	47.293	47.293		*****
02	1.61164	13.430	60.724	33.863	*****
03	1.25522	10.460	71.184	2.970	*****
04	1.02535	8.545	79.184	1.916	*****
05	0.97873	8.156	87.884	0.388	*****
06	0.73091	6.091	93.975	2.065	****
07	0.46497	3.875	97.850	2.216	***
10	0.11248	0.937	98.788	2.937	**
11	0.08160	0.680	99.467	0.257	*
12	0.05514	0.459	99.927	0.220	*
13	0.00754	0.063	99.990	0.397	*
14	0.00123	0.010	100.00	0.53	*

Tableau (V.4): Les valeurs propres.

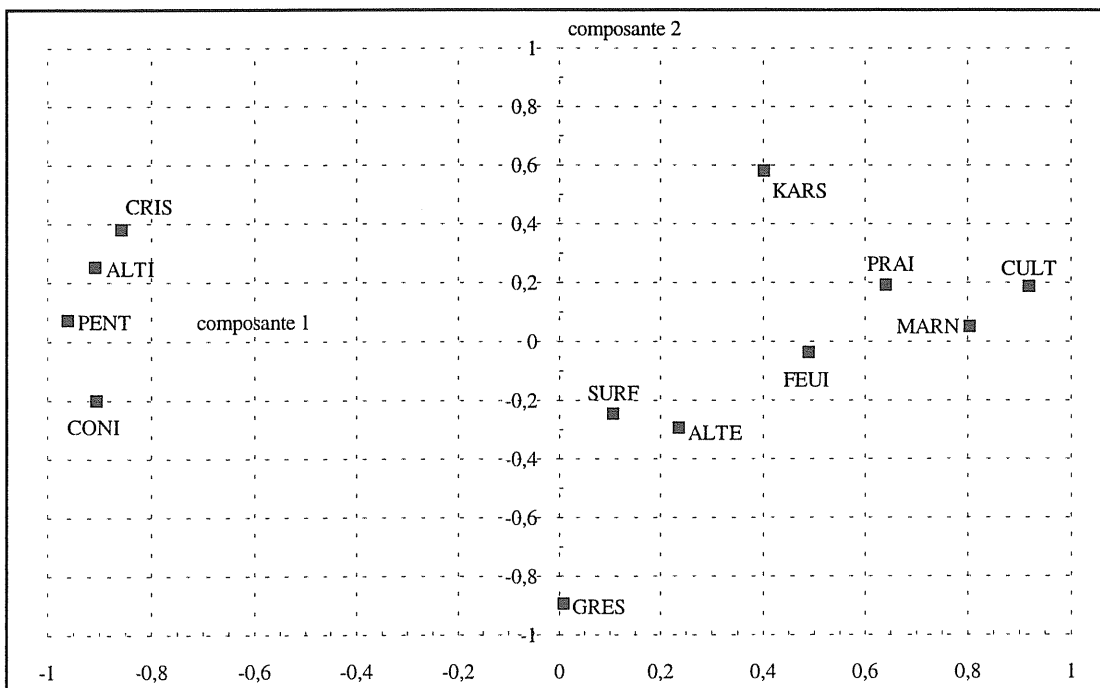


Figure (V.2a): Corrélations des caractéristiques de bassin - composantes 1 et 2.

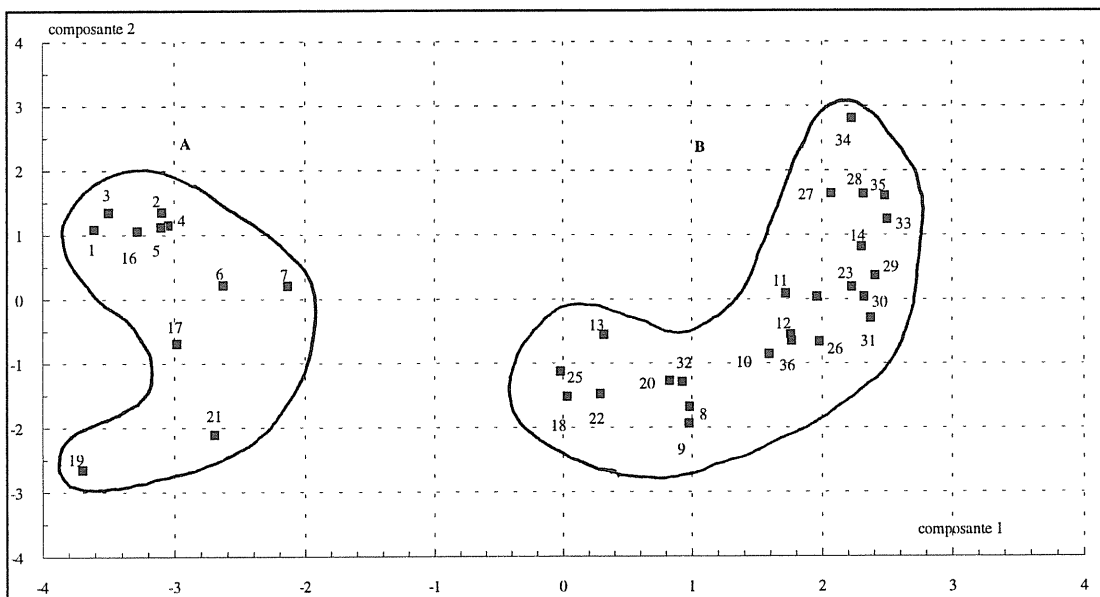


Figure (V.2b): Projection des bassins dans le plan des composantes 1 et 2.

V.4.3 - Définitions des axes

Pour l'interprétation des axes, les variables retenues seront celles qui apportent le plus de contribution.

L'axe 1: Le premier axe est expliqué par 6 variables (**ALTI**, **PENT**, **CONI**, **CULT**, **MARN** et **CRIS**). Il oppose des bassins de fort pourcentage de cultures et marneux à des bassins pentus et élevés, à grand pourcentage cristallin et de conifères.

L'axe 2: Il est expliqué par 2 variables (**GRES** et **KARS**), et surtout caractérisé par les bassins gréseux.

L'axe 3: Ce troisième axe est expliqué aussi par 2 variables (**FEUI** et **ALTE**), il est caractérisé par les bassins altérés qui s'opposent à des bassins à fort pourcentage de feuillus.

Les **figures V.2a** et **V.2b** et **annexe III.2** représentent les projections dans les plans formés par les 3 premiers axes deux à deux.

V.4.4 - Conclusion

Les projections des 34 bassins sur les plans engendrés par les trois premières composantes et l'examen du fichier physiographique met en évidence deux groupes de bassins.

Groupe A : Ce sont les bassins du massif des Vosges au sud-est qui sont caractérisés par de forts pourcentages de roches cristallines et de conifères. Il s'agit des bassins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 16, 17, 19 et 21 (Ils sont au nombre de 11).

Groupe B : Ce groupe est constitué des 23 bassins versants restants, ce sont des bassins marneux fortement cultivés.

V.5 - CALAGE DU MODELE GR4J SUR LES BASSINS UTILISES

Les quatre paramètres du modèle ne peuvent être identifiés ou mesurés sur le bassin. C'est la raison pour laquelle il y a lieu d'optimiser ces valeurs pour chaque bassin. Celles-ci sont recherchées par un processus itératif à partir de valeurs initiales visant au meilleur ajustement entre débits observés et débits calculés par le modèle.

V.5.1 - Résultats du calage

Les résultats obtenus lors du calage avec le modèle GR4J sont présentés dans l'**annexe III.3**, et le **tableau V.6**. Le **tableau V.5** illustre les périodes, les postes pluviométriques et leurs poids respectifs pour chaque bassin ainsi que la station l'évapotranspiration potentielle utilisée.

N°	Cod	Cod. Sta. Jaugeage	Station de Jaugeage	Cours d'eau	Stat. Poids PLUV	Station d'ETP	Périod. calage	SURF (km²)
01	01	A4020610	Fresse	Moselle	4 1.	Colmar	71-75	69
02	02	A4050620	Rupt	Moselle	4 1.	Colmar	71-75	153
03	03	A4152010	Zainvilliers	Moselotte	6 0.5 11 0.5	Colmar	73-77	183
04	04	A4173010	Cleurie	Cleurie	5 0.5 6 0.5	Colmar	73-77	66
05	05	A4200630	Noir-Gueux	Moselle	4 0.3 5 0.3 11 0.4	Colmar	73-77	621
06	06	A4250640	Epinal	Moselle	4 0.2 5 0.2 6 0.2 11 0.2 12 0.2	Colmar	7 3-77	1219
07	07	A4362010	Jarmenil	Vologne	6 0.5 12 0.5	Colmar	73-77	369
08	08	A4442010	Vaxoncourt	Durbion	7 0.3 12 0.3 13 0.4	Colmar	73-77	144
09	09	A4632010	Frizon-Basse	Avière	10 0.2 13 0.8	Colmar	73-77	104
10	10	A5251010	Mirecourt	Madon	9 0.4 10 0.4 13 0.2	Luxeuil	73-77	383
11	11	A5422010	Autry s/Madon	Brenon	10 0.5 37 0.5	Luxeuil	73-77	142
12	12	A5431010	Pulligny	Madon	9 0.2 10 0.4 13 0.2 37 0.2	Luxeuil	73-77	941
13	13	A5730610	Toul	Moselle	4 0.1 6 0.1 9 0.1 10 0.1 12 0.2 13 0.2 37 0.2	Nancy	73-77	3340
14	14	A5842010	Villy ST Etienne	Terrouine	17 0.3 29 0.3 30 0.4	Nancy	71-76	169
15	16	A6051020	Saint-Die	Meurthe	6 0.5 8 0.5	Colmar	73-77	369
16	17	A6142010	Moyenmouthier	Meurthe	8 0.5 12 0.5	Colmar	73-77	151
17	18	A6271010	Damelevières	Meurthe	8 0.35 12 0.3 35 0.35	Nancy	73-77	2288
18	19	A6332010	Trouche	Plaine	7 0.3 8 0.4 12 0.3	Phalsbourg	73-77	116
19	20	A6561110	Luneville	Vezouze	19 0.4 35 0.6	Phalsbourg	73-77	559

20	21	A6621210	Autry St Helène	Mortagne	7 0.4 12 0.4 13 0.2	Phalsbourg	73-77	98
21	22	A6731220	Gerbeviller	Mortagne	7 0.4 12 0.2 13 0.2 32 0.2	Nancy	73-77	495
22	23	A6812010	La Garde	Sanon	19 0.3 20 0.2 35 0.4	Phalsbourg	73-77	72
23	25	A6941010	Malzeville	Meurhe	7 0.25 8 0.25 31 0.25 35 0.25	Nancy	73-77	2914
24	26	A6953010	Lay St Christ	Amezule	21 0.3 31 0.4 29 0.3	Nancy	73-77	85
25	27	A7122010	Jezainville	Esch	15 0.15 17 0.35 29 0.35 30 0.15	Nancy	73-77	229
26	28	A7352010	Onville	Rupt de Mad	15 0.4 17 0.5 29 0.1	Metz	73-77	372
27	29	A7642010	Château Salins	Pont Seille	20 0.4 21 0.4 22 0.2	Phalsbourg	73-77	143
28	30	A7821010	Nomeny	Seille	20 0.3 21 0.3 22 0.1 23 0.3	Nancy	73-77	923
29	31	A7881010	Metz Pont Loth	Seille	20 0.25 21 0.2 23 0.2 27 0.25 29 0.1	Metz	73-77	1269
30	32	A7930610	Hauconcourt	Moselle	10 1/6 11 1/6 12 1/6 15 1/6 23 1/6 27 1/6	Nancy	73-77	9387
31	33	A8122010	Cartoucherie	Yron	15 0.8 27 0.2	Metz	73-77	377
32	34	A9322010	Briey	Waigot	27 0.5 28 0.5	Metz	73-77	76
33	35	A8431010	Rosselange	Orne	15 0.6 27 0.1 28 0.3	Metz	73-77	1226
34	36	A8732010	Koenigsmacker	Canner	26 0.3 28 0.7	Metz	71-75	110

Tableau (V.5): Liste des 34 bassins versants de la Moselle étudiés.

N°	Code	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	BIL	NASH
01	01	2.01	5.27	-.11	.23	5.4	80.7
02	02	3.60	5.17	0.15	-.16	3.6	82.1
03	03	6.26	5.02	-0.27	-0.50	-0.8	81.0
04	04	6.43	5.44	-0.37	-0.28	-0.9	80.8
05	05	6.28	5.26	0.12	-0.17	-0.6	85.7
06	06	6.66	5.33	0.16	-0.13	-0.8	86.5
07	07	6.87	5.61	-0.05	-0.08	-1.2	87.2
08	08	6.65	3.45	0.01	-0.06	-1.0	80.3
09	09	6.72	3.38	-0.05	-0.03	1.1	80.5
10	10	5.86	3.75	0.15	0.06	3.7	88.4
11	11	5.35	3.79	-0.08	0.16	1.4	79.8
12	12	5.75	3.60	0.45	0.19	5.1	89.1
13	13	6.20	4.82	0.61	-0.08	-1.5	91.3
14	14	5.94	3.38	0.47	0.22	-5.5	70.5
15	16	6.77	5.29	0.26	0.25	1.4	85.4
16	17	6.40	5.41	-0.18	-0.30	-1.4	82.2
17	18	6.18	4.89	0.55	0.09	-0.4	92.4
18	19	6.38	5.39	0.08	-0.20	0.0	85.7
19	20	5.51	3.59	0.70	-0.12	2.3	85.3
20	21	6.45	5.53	-0.11	-0.20	-0.2	87.2
21	22	6.47	4.58	-0.09	0.24	1.2	82.4
22	23	5.35	3.01	-0.10	-0.04	7.0	79.1
23	25	5.84	4.48	0.70	-0.07	-.7	94.9
24	26	5.78	3.84	0.02	0.16	-1.7	79.2
25	27	5.93	5.32	0.43	0.86	-3.6	84.3
26	28	5.89	4.83	0.39	0.43	1.5	83.0
27	29	6.02	4.25	0.31	-0.01	-0.7	88.3
28	30	5.89	4.35	0.68	0.12	-2.2	85.7
29	31	5.80	4.25	0.64	0.18	-2.2	86.6
30	32	6.34	4.81	0.82	-0.01	-1.9	92.3
31	33	5.76	3.63	0.37	0.26	9.9	86.5
32	34	5.38	5.36	-0.23	-0.47	0.1	76.7
33	35	5.86	4.23	0.45	0.15	2.9	90.4
34	36	5.94	4.31	0.31	0.20	3.9	81.3

Tableau (V.6): Résultats du calage du modèle GR4J sur les 34 bassins de la Moselle.

V.5.2 - Qualité de l'ajustement

Le **tableau V.7** illustre la qualité de l'ajustement entre débits observés et débits calculés. Sur les 34 bassins versants modélisés, le critère de Nash moyen est de 84.5 avec un écart-type de 5.03 et pour valeurs maximale et minimale respectivement 94.9 et 70.5. Les moyennes des paramètres sont proches de la moyenne nationale.

Le modèle GR4J permet d'obtenir de bonnes simulations des débits compte tenu des valeurs du critère de Nash obtenues.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	BIL	NASH
Moyenne	5.90	4.55	0.21	0.03	0.68	84.5
Ecart-type	0.91	0.77	0.06	0.26	3.12	5.03
valeur Max.	6.87	5.61	0.82	0.86	9.90	94.9
Valeur Min.	2.01	3.01	-0.37	-0.50	-5.50	70.5

Tableau (V.7): Résultats des statistiques du calage.

V.6 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DE GR4J

On a essayé d'établir par régression multiple des équations reliant chacun des paramètres du modèle GR4J aux caractéristiques physiographiques des sous-bassins de la Moselle, on s'efforçant de maximiser le coefficient de corrélation avec uniquement des variables ayant une influence significative différente de zéro, au moyen du rapport de Student ($|t|$) (rappelons que ces rapports doivent être au moins égaux à 3 pour qu'on puisse affirmer au seuil de confiance de 99 % qu'une variable explicative a un effet significatif différent de zéro).

V.6.1 - Capacité du réservoir sol (A)

La capacité du réservoir-sol n'a pas pu être reliée par régression aux variables physiographiques du fichier disponible. Il est apparu après plusieurs essais qu'une seule variable (**GRES**) a donné lieu à un rapport de Student presque satisfaisant de 2.78 (Cf. **tableau V.8** et **figure V.3**), mais elle reste toujours non significative au seuil choisi. D'autres régressions ont été tentées en ajoutant une deuxième variable au modèle linéaire. Ces essais n'ont donné aucune relation significative.

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0	5.26	22.57	0.69	0.19
$x_1 \ln(GRES + 1)$	0.22	2.78		

Tableau (V.8): Résultats pour le paramètre *a* du modèle GR4J.

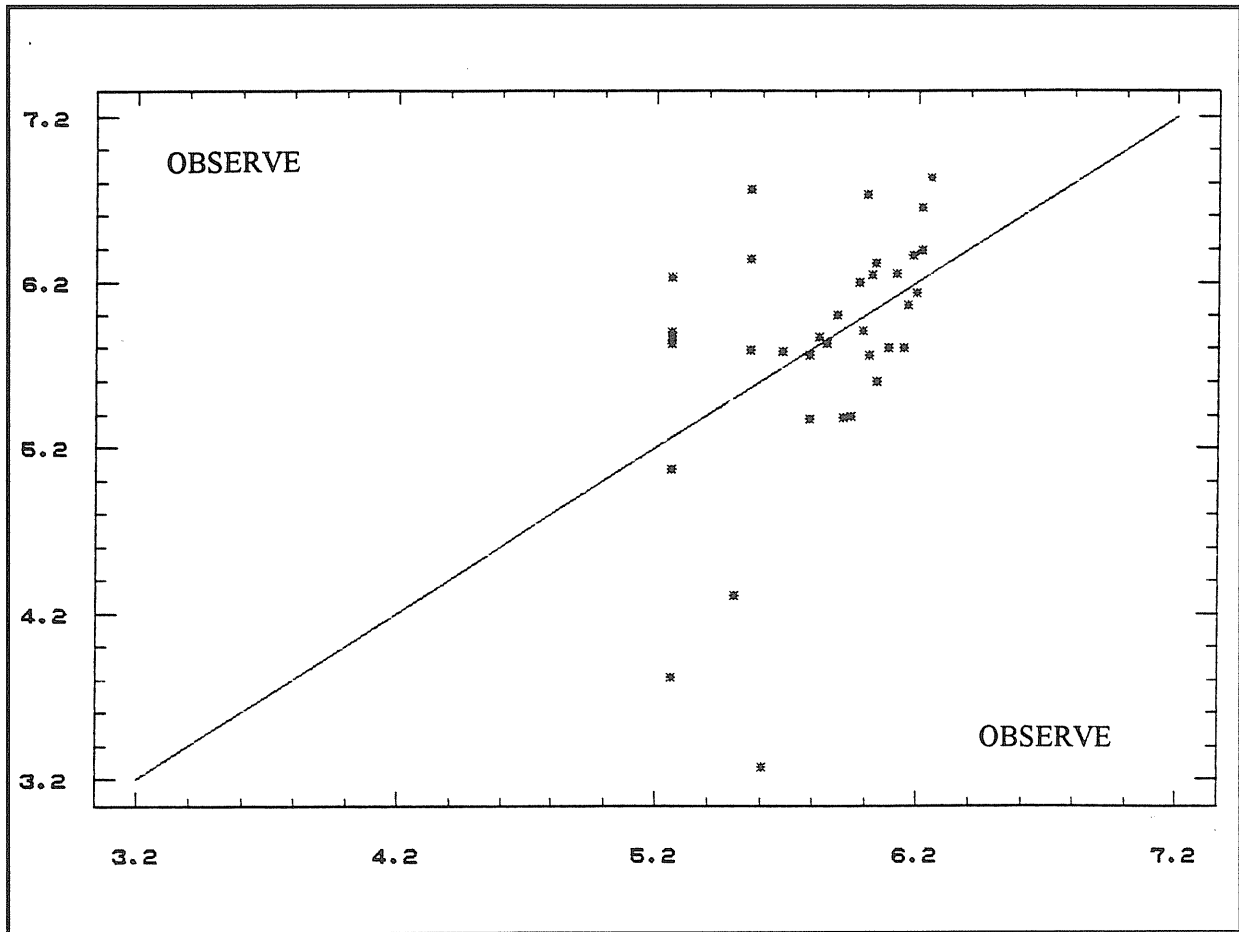


Figure (V.3): Régression de A en fonction de GRES.

V.6.2 - Capacité du réservoir eau gravitaire (*B*)

Les équations du paramètre *B* sont reproduites dans le **tableau V.9**. Ces équations font intervenir jusqu'à 5 variables explicatives. L'équation retenue pour ce paramètre est la suivante, elle fait intervenir les 5 variables (PENT, CONI, PRAI, CHAM et GRES) **figure V.4**.

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0	2.78	2.08		
$x_1 \ln PENT$	0.70	3.90		
$x_2 \ln(CONI + 1)$	0.33	3.58	0.36	0.83
$x_3 \ln PRAI$	-3.14	6.54		
$x_4 \ln CHAM$	2.98	5.33		
$x_5 \ln(GRES + 1)$	-0.16	3.72		
x_0	3.31	2.25		
$x_1 \ln PENT$	1.12	5.49	0.47	0.69
$x_2 \ln PRAI$	-2.99	4.86		
$x_3 \ln CHAM$	2.62	3.96		

Tableau (V.9): Résultats pour le paramètre *b* du modèle GR4J.

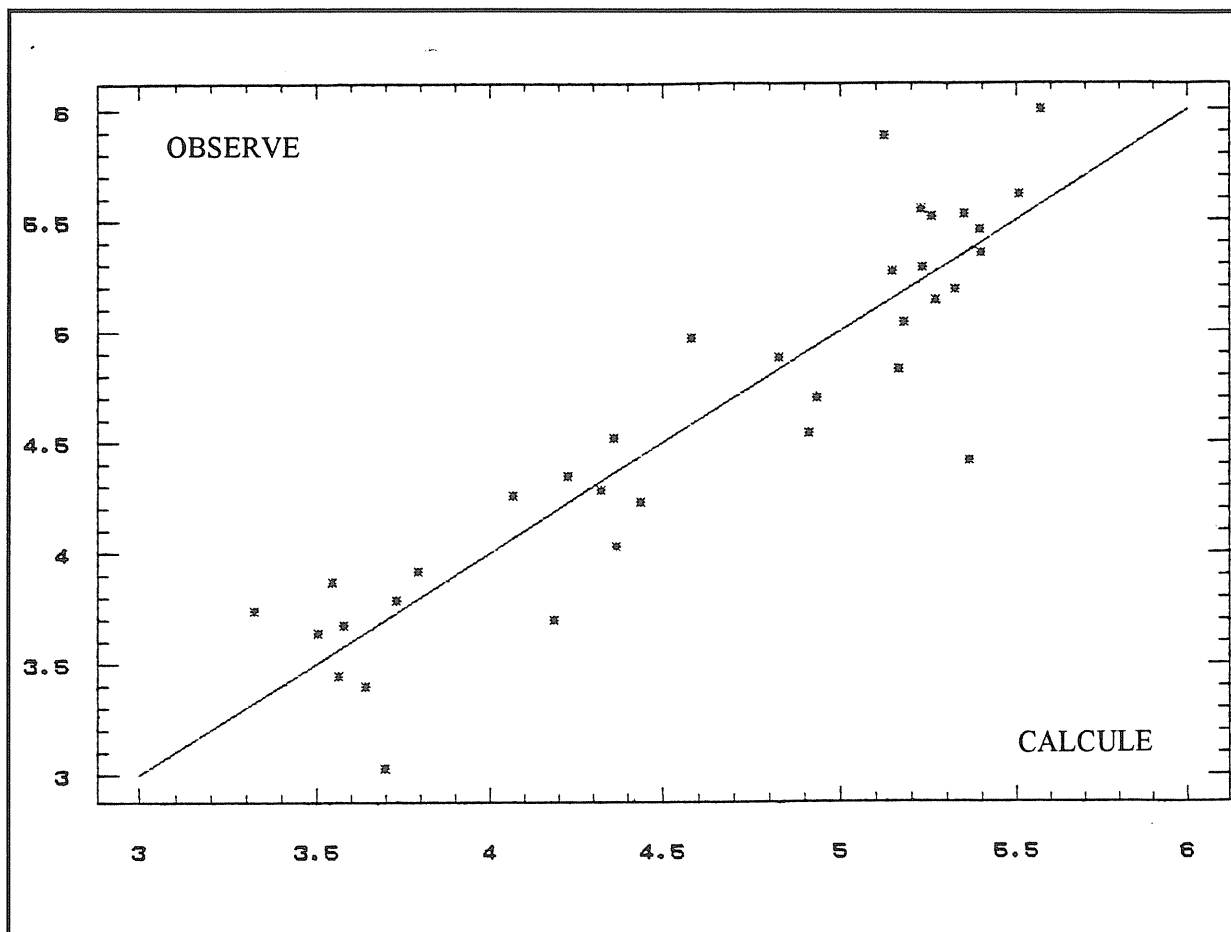


Figure (V.4): Régression de *B* en fonction de PENT, CONI, PRAI, CHAM et GRES.

V.6.3 - l'Hydrogramme unitaire (*C*)

L'équation retenue et représentée dans le **tableau V.10** pour ce troisième paramètre, est celle expliquée par les deux variables physiographiques qui sont: la surface et l'altitude (Cf. **figure V.5**) pour lesquelles le $|t|$ de Student est supérieur à 3. Une troisième variable (PENT) a donné lieu à une relation significative ($|t| = 5.1$). Un essai a été fait pour les rassembler dans une même relation, mais alors la variable pente devient non significative. La relation qui détermine le paramètre *C*, retenue en définitive est celle utilisant les deux variables (SURF et ALTI).

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0	-0.72	3.81	0.27	0.47
$x_1 \ln SURF$	0.17	5.36		
x_0	3.52	15.00	0.60	0.44
$x_1 \ln PENT$	0.72	5.10		
x_0	0.95	1.63		
$x_1 \ln SURF$	0.17	5.66	0.25	0.58
$x_2 \ln ALTI$	-0.27	30.2		

Tableau (V.10): Résultats pour le paramètre *c* du modèle GR4J.

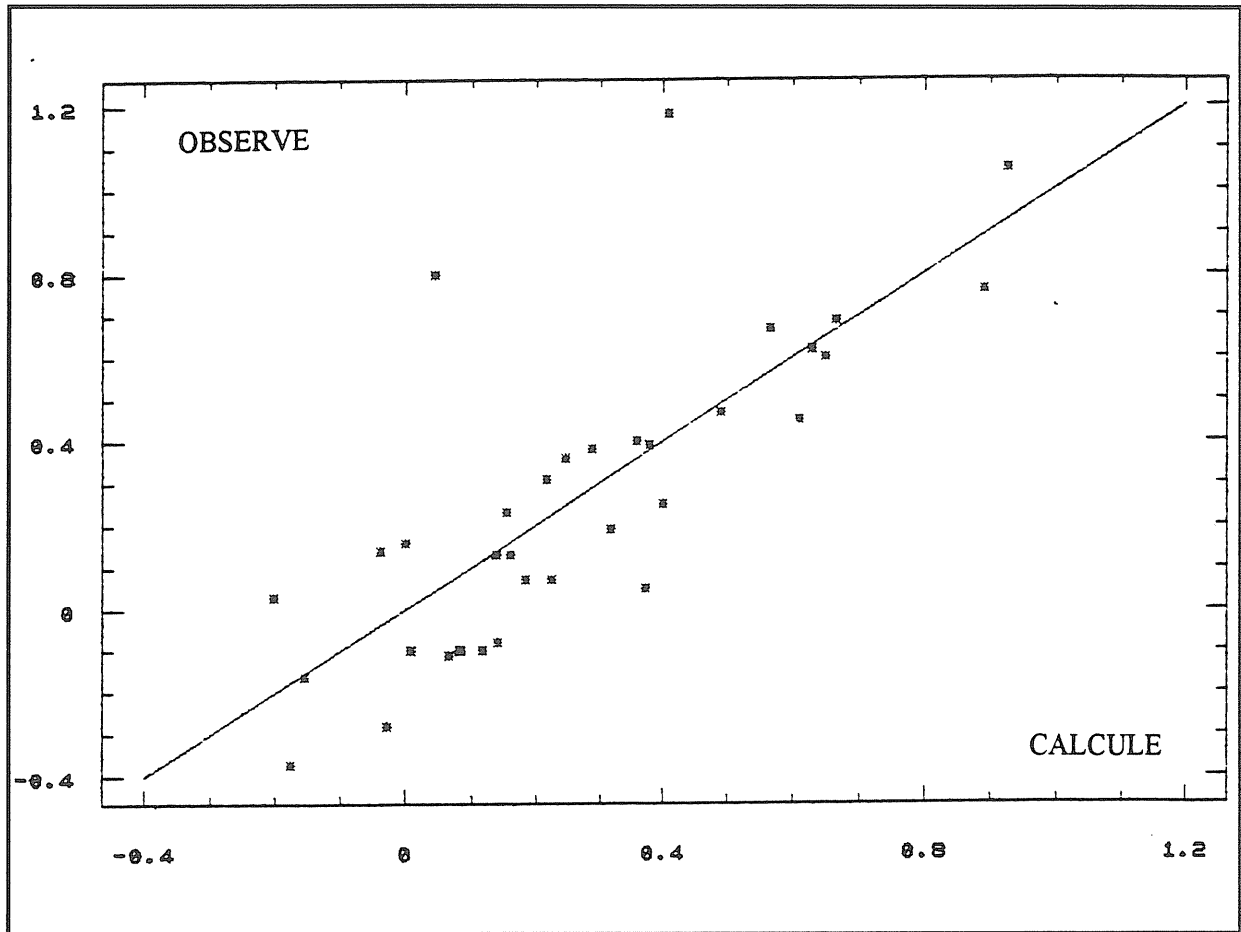


Figure (V.5): Régression de C en fonction de SURF et ALTI.

V.6.4 - Paramètre d'échange (D)

Les essais d'explication de ce dernier paramètre (Cf. **tableau V.11**) ont donné lieu à deux relations significatives avec chacune une des deux variables, l'altitude et la pente. L'essai de jumelage des deux variables n'est pas significatif. La relation retenue est celle qui fait intervenir l'altitude avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0.33 (Cf. **figure V.6**)

Formule de	Coefficient	Rapport	Erreur	Coefficient de
------------	-------------	---------	--------	----------------

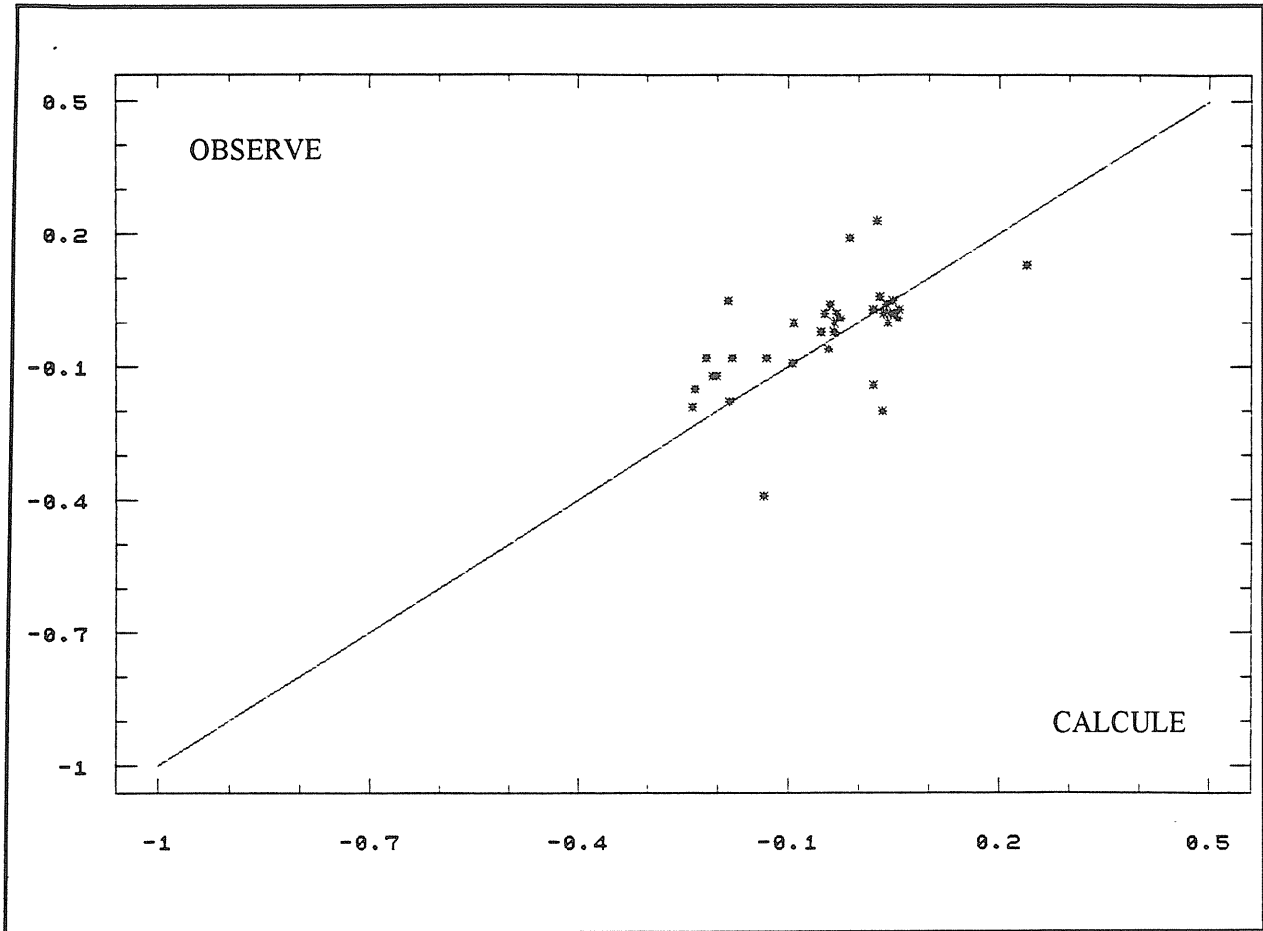


Figure (V.6): Régression de D en fonction de ALTI.

V.7 - APPRECIATION DE LA QUALITE DU MODELE REGIONAL

Nous avons procédé au calcul des coefficients de Nash pour le modèle GR4J à partir des trois relations identifiées pour les paramètres B , C et D par régression sur les 34 bassins de la Moselle. Dans un premier temps, nous avons fait un contrôle en considérant pour le paramètre A la valeur moyenne régionale de 5.90 sur les 34 bassins étudiés et dans un deuxième temps, nous avons calé ce dernier sur tous les bassins, tout en gardant les valeurs des autres paramètres calculées par les relations (VI.1).

Les résultats présentés dans le **tableau V.12**, les **figures V.7** et **V.8** illustrent les distributions des critères de Nash selon qu'on utilise le modèle GR4J calé par bassin où le modèle GR4J avec des paramètres issus des explications régionales.

N°	Code BV	Modèle GR4J (a calé, b, c et d calculés)						Modèle Régional ($\bar{a} = 5.90$)	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	BIL	NASH	BIL	NASH
01	01	2.67	5.19	-0.14	-0.11	10.5	74.6	1.0	78.9
02	02	4.91	4.33	0.02	-0.10	6.4	70.8	2.7	74.4
03	03	5.96	5.28	0.03	-0.11	9.2	78.5	9.7	78.5
04	04	6.62	5.24	-0.11	-0.09	-0.1	76.3	3.6	79.6
05	05	5.84	5.16	0.27	-0.09	3.6	84.2	3.7	84.2
06	06	5.12	5.24	0.41	-0.08	18.9	79.2	13.3	82.5
07	07	7.11	5.27	0.21	-0.07	-13.9	63.5	-6.6	84.3
08	08	6.49	3.65	0.22	0.01	3.4	67.0	14.4	75.9
09	09	6.92	3.52	0.15	0.01	-15.1	47.0	-0.6	78.1
10	10	5.90	3.34	0.38	0.01	7.5	87.1	9.1	87.2
11	11	5.44	3.75	0.22	0.01	6.9	79.1	-4.6	79.2
12	12	5.48	3.58	0.55	0.02	16.1	82.7	7.1	86.2
13	13	6.54	4.59	0.69	-0.02	-12.4	80.1	-3.8	89.2
14	14	5.69	3.81	0.33	0.06	9.7	70.6	4.2	71.5
15	16	6.98	5.41	0.20	-0.08	-38.0	56.6	-31.4	73.6
16	17	6.93	5.36	0.11	-0.05	-28.0	25.5	-21.5	55.9
17	18	7.15	4.84	1.00	0.17	-65.4	-34.6	-53.2	36.7
18	19	6.07	5.40	0.07	-0.05	3.1	86.8	5.8	87.4
19	20	7.02	4.38	0.47	0.03	-91.9	-96.2	-77.3	-20.0
20	21	6.04	5.52	0.08	-0.02	13.5	83.0	16.4	83.8
21	22	6.52	4.37	0.42	0.01	-23.3	64.7	-14.4	81.6
22	23	4.71	3.71	0.18	0.05	52.3	44.7	23.8	71.5
23	25	5.57	4.92	0.71	0	8.8	91.2	3.7	92.9
24	26	5.70	3.56	0.21	0.05	17.8	69.8	14.8	70.1
25	27	6.05	5.58	0.37	0.05	-63.1	56.8	-54.0	59.6
26	28	5.84	5.18	0.45	0.05	-7.3	81.2	-6.5	81.2
27	29	5.58	4.34	0.30	0.06	37.5	72.7	29.8	76.2
28	30	5.63	4.24	0.63	0.06	28.5	77.4	22.8	79.1
29	31	5.62	4.08	0.69	0.07	28.7	79.9	21.9	81.8
30	32	5.27	4.95	0.92	0.01	25.3	77.7	13.7	84.0
31	33	5.69	4.20	0.48	0.06	13.8	76.1	9.2	76.7
32	34	4.58	5.14	0.17	0.04	66.7	5.58	45.3	45.8
33	35	5.59	5.45	0.67	0.06	25.3	80.7	17.4	83.3
34	36	5.43	5.38	0.29	0.07	37.4	47.5	22.8	54.2

Tableau (V.12): Résultats de deux applications différentes.

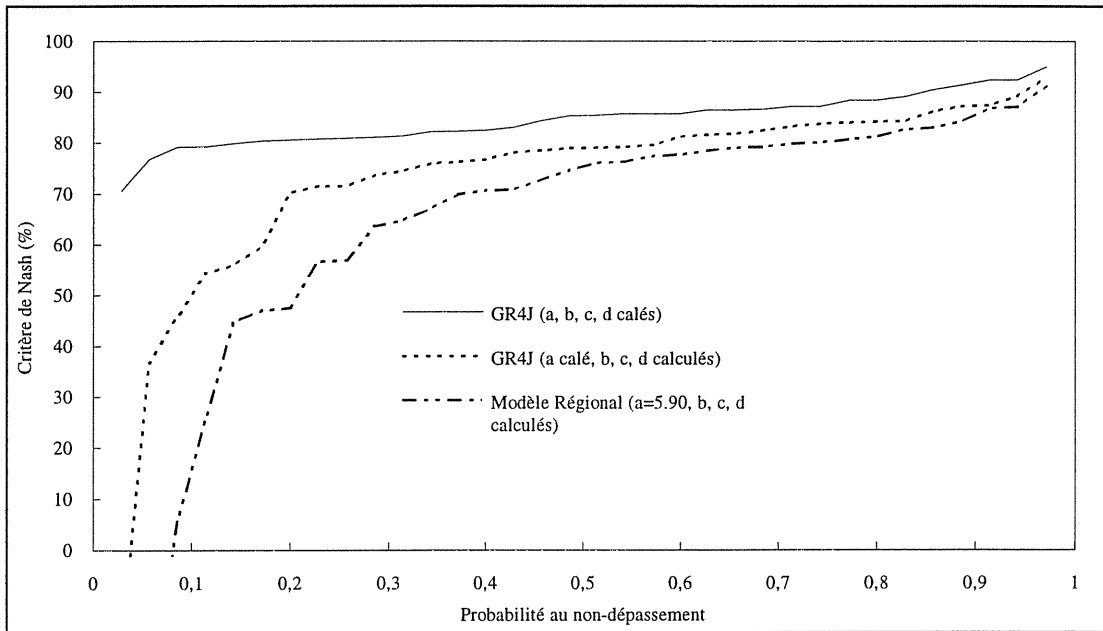


Figure (V.7): Comparaison des distributions des critères de Nash pour les différentes applications.

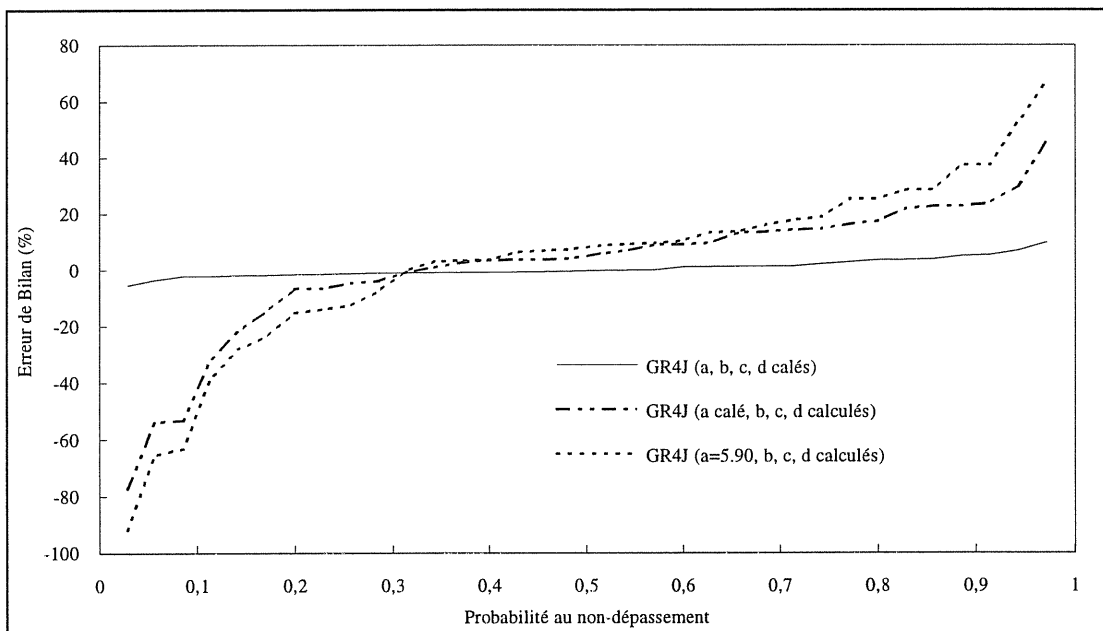


Figure (V.8): Comparaison des distributions des erreurs de bilan pour les différentes applications.

V.8 - CONCLUSION

La surprise dans l'explication des paramètres de GR4J est la relation significative obtenue pour D sur les bassins de la Moselle. Trois relations ont été obtenues pour les paramètres B , C et D (équations V.1). Seul le paramètre A reste inexpliqué. La variance expliquée pour le paramètre B est de 0.83 avec cinq caractéristiques (PENT, CONI, PRAI, CHAM et GRES). Le paramètre C est aussi bien expliqué (58 % de la variance) avec deux caractéristiques de bassin (SURF et ALTI) alors que D est expliqué pour 33 % de sa variance avec une seule variable (ALTI).

$$B = 16 \frac{PENT^{0.7} \cdot (CONI + 1)^{0.33} \cdot CHAM^{2.98}}{PRAI^{3.14} \cdot (GRES + 1)^{0.16}}$$

$$C = 2.6 SURF^{0.17} / ALTI^{0.27} \tag{V.1}$$

$$D = 2.3 / ALTI^{0.14}$$

La comparaison des distributions - dans le paragraphe précédent - des critères de Nash et des erreurs de bilan montrent que le modèle régional avec les trois relations et la valeur moyenne régionale de A donne des résultats satisfaisants. Il faut noter néanmoins que quelques bassins versants induisent une importante erreur de bilan et un Nash faible. On pense que ce problème est lié aux précipitations neigeuses que l'on n'a pas pris en considération et au faible nombre de pluviomètres par bassin. Dans le chapitre qui suit, on traitera de la question du devenir des précipitations neigeuses, dont on pressent l'importance dans une grande partie du territoire national.

CHAPITRE VI

LE SOUS-MODELE NEIGE

VI.1 - INTRODUCTION

Le modèle GR4J a été développé sous le climat français. Il a été prévu pour exprimer la transformation pluie-débit exclusivement. Le problème du devenir de la neige n'a été 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 un bassin versant où la neige joue un rôle important. Edijatno (1991) a noté que le modèle GR3J est très fortement perturbé au delà de 25 jours de neige (ou de trace de neige) par an.

Après l'étude sur l'explication des paramètres du modèle GR4J sur des bassins de la Moselle soumis à des précipitations neigeuses, il a semblé nécessaire de mettre au point un module neige qui sera couplé au modèle GR4J. Contrairement aux pays Nordiques, les grandes crues annuelles ont lieu en hiver ou au printemps, elles ne sont pas dues à la fonte de la neige. Pour ce qui est des précipitations neigeuses sous un climat de région froide en France, un traitement sommaire a été proposé en utilisant uniquement le code des précipitations présent dans les fichiers de METEO FRANCE. Ce module sera testé sur plus d'une trentaine de bassins versants de la Moselle française qui ont déjà servi dans le **chapitre V**.

VI.2 - BASSINS ET DONNEES DISPONIBLES

Les bassins versants utilisés sont ceux déjà cités dans le chapitre précédent (V). Il sont au nombre de 34.

VI.3 - LES RESULTATS DE GR4J INITIAL

Les résultats obtenus lors du calage de chaque bassin par le modèle GR4J sont présentés dans le **tableau V.6** du **chapitre V**. Les périodes et les postes pluviométriques avec leurs poids utilisés respectivement pour chaque bassin sont présentés dans le **tableau V.5** du même chapitre.

VI.4 - LES NOUVELLES APPROCHES

Notre première intervention dans le modèle GR4J, avant toute chose, a été d'effectuer un changement au niveau de la lecture des données des précipitations en séparant en deux, la pluie et la neige selon les codes donnés par METEO-FRANCE. Une deuxième étape consistait à mettre au point un traitement sommaire de la neige sans paramètre supplémentaire qui est présenté dans le paragraphe qui suit. Chaque nouvelle proposition a été conçue à partir d'une analyse quantitative et qualitative des résultats des solutions précédentes. Pour juger de la performance de nos propositions, on va les comparer chaque fois à la version initiale de GR4J.

VI.4.1 - Traitement de la neige

La transformation neige-pluie se fait dans un seul sens: fonte de la neige. Nous allons essayer de traiter le problème du manteau neigeux intermittent dans la transformation pluie-débit et non le manteau neigeux saisonnier. Dans le processus de traitement, on exploite uniquement l'information sur les données pluviométriques (code) sans introduire de nouvelles variables de forçage (température, ensoleillement, ...).

Un sous-modèle conceptuel a été conçu qui traite de l'accumulation et de la fonte de la neige en fonction de l'énergie disponible sous la forme de la donnée d'ETP et de la présence de pluie ultérieure. Ce sous-modèle est pseudo-distribué, chaque poste pluviométrique commande une fraction de la superficie du bassin et donc la précipitation neigeuse varie selon ces fractions.

Pour ne pas trop compliquer la situation on n'a considéré une subdivision en dix zones, correspondant chacune à une hauteur de neige. Comme illustré dans la **figure VI.1**. Si N_1 postes pluviométriques ont reçus de la neige et N_2 postes, de la pluie, on considère que les $10 \cdot N_1 / (N_1 + N_2)$ zones ont reçu de la neige et que les autres zones ont reçu de la pluie.

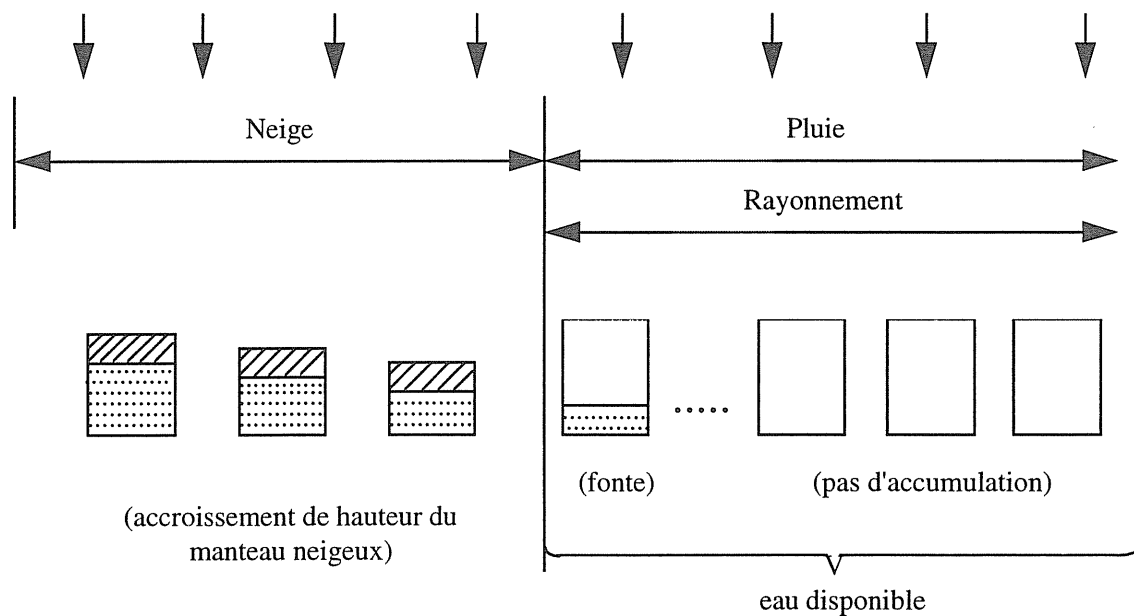


Figure (VI.1): Découpage statistique en dix zones.

Le sous-modèle fait intervenir trois paramètres à fixer (X_p , X_e et X_n).

- X_p : Coefficient de fonte de neige engendrée par la pluie;
- X_e : Coefficient de fonte de neige engendrée par l'évaporation;
- X_n : Fraction neigeuse.

Plus précisément le coefficient X_n est traité de deux façons différentes. Dans un cas, il est considéré comme la portion de précipitation prise en compte comme de la neige et dans la deuxième, on considère que, non seulement tout est neige, mais on majore la valeur de la donnée de la fraction X_n .

Une première étape consiste à calculer la part ou la majoration de la neige dans les précipitations (TPN) pour chaque pluviomètre, la fonte engendrée par la pluie (FTP) et la fonte engendrée par l'évaporation (FTE). Ce calcul est effectué en testant toutes les combinaisons de valeurs des trois paramètres fixés, X_p , X_e et X_n .

$$\begin{aligned} TPN &= P \cdot X_n \\ FTP &= P \cdot X_p \\ FTE &= 7.4 E \cdot X_e \end{aligned} \tag{VI.1}$$

Le coefficient 7.4 est le rapport des chaleurs latentes d'évaporation et de fusion.

On obtient une fonte totale (FTI):

$$FTI = FTP + FTE \tag{VI.2}$$

Plusieurs combinaisons des trois paramètres (X_p , X_e et X_n) ont été testées. Les résultats sont présentés dans les **tableaux VI.1** et **VI.2** respectivement d'une part pour la majoration ($M/X_p/X_e/X_n$) et d'autre part pour la portion de neige ($R/X_p/X_e/X_n$). Les **figures VI.2** et **VI.3** présentent les distributions des critères de Nash. Les distributions des critères de Nash sont comprises entre deux courbes extrêmes et on peut les comparer à celle de la version initiale du modèle GR4J.

Les résultats obtenus sont inférieurs à ceux obtenus avec le modèle GR4J initial, pour toutes les combinaisons des coefficients (X_p , X_e et X_n) testées de deux façons différentes (la neige n'est qu'une fraction de la précipitation, ou la neige est plus que la précipitation indiquée).

N°	Code	GR4J	M/1/.5/1	M/1/.2/1	M/1/1/.1	M/1/.2/.5	M/1/.5/.2	M/1/.8/.2	M/2/.5/.2	M/.5/.5/.4	M/1/1/.2	M/1/1/.4	R/1/1/.4	M/1/1/.5	M/1/1/.6	M/1/1/.8
01	01	80.7	60.8	63.1	59.4	80.2	80.2	80.1	79.9	81.3	80.1	76.6	74.5	72.5	68.6	
02	02	82.1	57.3	60.1	56.7	80.8	80.7	80.7	80.6	83.3	80.7	76.0	73.3	70.7	65.8	
03	03	81.0	67.9	70.7	63.0	85.0	84.8	84.5	84.3	85.8	84.4	84.9	84.8	84.4	79.9	
04	04	80.8	75.6	78.6	73.7	83.3	83.2	83.1	83.2	83.9	83.1	83.8	83.2	84.2	81.9	
05	05	85.7	80.7	83.6	77.6	89.1	89.0	88.9	88.7	88.8	88.7	89.9	89.3	88.8	87.2	
06	06	86.5	83.2	85.1	80.6	88.8	88.7	88.6	88.6	89.2	88.5	89.6	89.8	89.7	88.0	
07	07	87.2	80.6	82.4	79.3	88.5	88.4	88.3	88.3	90.2	88.2	88.4	88.2	87.9	85.8	
08	08	80.3	72.8	73.4	72.2	79.4	79.4	79.4	79.4	80.0	79.4	78.4	77.8	77.1	75.6	
09	09	80.5	77.2	77.6	77.1	80.8	80.4	80.4	80.4	80.4	80.3	80.1	79.8	79.6	78.8	
10	10	88.4	81.3	82.3	80.5	88.3	88.3	88.3	88.2	88.4	88.2	87.6	87.7	86.6	84.9	
11	11	79.8	73.3	72.9	73.2	79.3	79.3	79.3	79.3	79.4	79.3	78.3	77.6	76.6	75.0	
12	12	89.1	81.7	82.3	80.9	88.7	88.7	88.7	88.7	89.1	88.7	87.8	87.2	86.5	84.8	
13	13	91.3	86.2	87.2	85.7	90.4	90.8	90.7	90.7	90.8	90.6	90.6	90.4	90.1	89.2	
14	14	70.5	58.3	58.8	58.6	68.5	68.6	69.6	68.6	72.3	68.6	66.3	65.1	63.7	61.3	
15	16	85.4	78.8	79.6	77.3	87.4	87.1	86.8	86.9	88.0	86.7	87.5	87.5	86.7	83.8	
16	17	82.2	77.5	78.2	76.9	82.6	82.5	82.4	82.4	81.5	82.4	82.2	82.0	81.5	80.1	
17	18	92.4	86.2	86.7	85.9	92.5	92.9	92.4	92.4	92.3	92.3	92.0	91.6	91.0	89.2	
18	19	85.7	81.1	81.5	80.2	86.5	86.5	86.3	86.3	86.3	86.2	86.4	86.1	85.6	83.6	
19	20	85.3	74.4	74.0	75.0	85.1	85.0	85.0	85.0	84.8	85.0	83.1	81.8	80.4	77.2	
20	21	87.2	85.9	86.4	85.6	87.1	87.5	87.5	87.5	87.3	87.5	87.4	87.5	87.4	87.2	
21	22	82.4	77.3	78.0	76.7	81.5	81.5	81.5	81.5	81.7	81.5	80.7	80.4	80.1	79.4	
22	23	79.1	65.3	66.0	64.9	78.7	78.7	78.7	78.7	78.3	78.7	76.8	75.4	73.8	70.2	
23	25	94.9	88.6	88.8	88.7	94.9	94.8	94.7	94.8	94.5	94.7	94.1	93.6	92.9	91.2	
24	26	79.2	71.7	75.0	70.6	73.6	73.0	72.8	72.9	73.5	72.7	73.6	74.5	75.3	76.7	
25	27	84.3	82.4	82.4	82.5	83.2	83.2	83.2	83.2	83.8	83.2	83.1	83.0	82.8	82.5	
26	28	83.0	81.1	80.8	81.2	82.0	82.2	82.2	82.2	82.9	82.2	81.9	81.7	81.3	81.0	
27	29	88.3	82.8	82.7	82.7	87.2	87.4	87.4	87.4	88.7	87.4	86.5	85.9	85.1	83.8	
28	30	85.7	82.3	81.6	82.6	84.7	84.9	84.9	84.9	86.3	85.0	84.2	83.8	83.1	81.8	
29	31	86.6	84.6	84.1	84.9	86.1	86.2	86.2	86.2	88.4	86.2	86.0	85.8	85.4	84.5	
30	32	92.3	89.5	90.2	88.9	92.3	92.3	92.3	92.3	93.2	92.3	92.2	92.1	91.9	91.2	
31	33	86.5	59.8	56.9	60.4	77.4	77.8	77.8	77.8	76.1	77.9	74.8	72.2	69.5	62.9	
32	34	76.7	74.4	74.6	74.2	74.6	74.5	74.6	74.5	75.6	74.6	74.7	74.8	74.8	74.8	
33	35	90.4	87.9	87.6	88.2	89.6	89.8	89.9	89.8	90.2	89.9	89.3	88.9	88.6	87.9	
34	36	81.3	78.7	79.6	78.7	82.1	81.7	81.5	81.7	81.0	81.5	81.6	81.5	81.6	81.1	

Tableau (VI.1): Résultats des différentes valeurs de $X_p / X_e / X_n$ coefficient de la portion de neige prise en compte dans les précipitations.

N°	Code	GR4J	R/1/1/1	R/2/1/1	R/4/1/1	R/5/1/1	R/6/1/1	R/8/1/1	R/1/8/1	R/2/8/1	R/4/8/1	R/5/8/1	R/8/8/1	R/8/1/2	R/8/1/4	R/8/8/2
01	01	80.7	64.8	65.1	64.9	64.9	64.5	64.9	65.4	65.9	65.7	65.7	65.4	80.2	76.9	80.2
02	02	82.1	61.3	59.3	60.3	60.6	60.9	61.4	61.8	59.7	60.8	61.2	61.7	80.7	76.2	80.7
03	03	81.0	74.8	66.4	71.4	71.7	72.3	74.5	75.3	64.6	70.6	72.3	74.0	84.5	85.8	84.7
04	04	80.8	77.9	76.4	77.2	77.1	77.4	77.2	77.4	76.2	78.2	77.2	77.3	83.0	83.8	83.1
05	05	85.7	83.0	82.2	85.5	85.9	85.9	82.7	82.9	82.4	85.3	86.1	82.7	88.8	89.9	88.9
06	06	86.5	85.1	83.7	83.2	83.6	83.9	84.6	84.8	84.1	85.0	85.3	84.4	88.5	89.7	88.6
07	07	87.2	82.2	78.2	79.6	80.0	80.8	81.6	82.0	77.6	78.9	79.4	81.3	88.2	88.5	88.3
08	08	80.3	74.0	74.6	74.2	74.1	74.1	74.1	74.1	75.1	74.7	74.2	74.2	79.4	78.4	79.5
09	09	80.5	78.0	82.0	82.5	78.2	82.9	78.0	78.1	78.0	78.3	78.4	78.2	80.3	80.1	80.4
10	10	88.4	83.0	74.0	73.9	82.8	73.9	83.1	83.1	82.1	82.4	82.6	83.1	88.2	87.7	88.3
11	11	79.8	73.6	83.9	83.3	73.9	83.2	73.8	73.6	73.9	74.1	73.8	73.8	79.4	78.4	79.4
12	12	89.1	82.6	87.8	87.8	83.2	87.8	83.1	83.0	83.0	83.2	83.2	83.1	88.7	87.9	88.7
13	13	91.3	87.7	72.5	76.9	87.7	78.9	87.8	88.7	88.5	88.6	88.5	88.7	91.5	91.6	91.5
14	14	70.5	59.3	85.6	86.2	58.9	86.7	59.2	59.1	58.0	58.3	58.4	58.9	68.6	66.4	69.3
15	16	85.4	79.1	66.7	66.9	78.3	66.9	78.8	78.6	72.9	75.8	77.1	79.1	86.7	87.7	86.8
16	17	82.2	78.0	67.4	67.3	78.0	67.2	78.1	78.1	78.4	78.0	77.9	78.1	82.4	82.3	82.4
17	18	92.4	87.0	88.3	88.7	86.5	89.2	86.9	87.0	85.3	86.1	86.4	87.0	92.4	92.1	92.4
18	19	85.7	81.0	76.3	76.7	80.5	77.0	80.8	80.6	79.7	80.2	80.2	80.5	86.2	86.5	86.3
19	20	85.3	73.9	82.4	82.5	73.4	82.4	73.7	73.9	72.7	73.1	73.3	73.7	85.0	83.1	85.0
20	21	87.2	86.7	80.2	80.7	86.8	80.8	86.9	86.9	87.3	87.0	86.9	86.9	87.5	87.5	87.5
21	22	82.4	78.4	82.6	82.7	78.3	82.8	78.4	78.4	78.9	78.4	78.3	78.4	81.5	80.8	81.5
22	23	79.1	66.6	80.6	80.7	66.9	80.7	66.8	67.0	66.8	67.1	67.2	67.1	78.7	76.8	78.7
23	25	94.9	89.2	90.1	90.3	89.0	90.4	89.3	89.4	88.2	88.7	88.9	89.3	94.7	94.1	94.8
24	26	79.2	77.4	56.4	55.3	76.9	55.3	77.3	71.6	71.3	77.5	71.6	71.7	78.2	76.9	78.2
25	27	84.3	82.4	86.8	87.1	82.4	87.2	82.3	82.2	82.1	82.4	82.4	82.2	83.2	83.1	83.2
26	28	83.0	80.9	80.5	80.5	80.8	80.3	80.9	80.7	79.7	80.3	80.5	80.6	82.2	81.9	82.1
27	29	88.3	82.7	78.1	78.2	82.7	78.1	82.8	82.9	82.5	82.6	82.7	82.9	87.4	86.5	87.4
28	30	85.7	80.9	58.6	58.8	80.7	59.0	80.9	80.5	80.1	80.2	80.2	80.4	85.0	84.2	84.9
29	31	86.6	83.7	38.3	43.1	83.4	44.9	83.6	83.3	82.4	82.9	83.0	83.2	86.2	86.0	86.2
30	32	92.3	90.5	78.9	77.9	90.4	78.1	90.5	90.5	89.9	90.2	90.3	90.5	92.3	92.2	92.3
31	33	86.5	54.9	80.3	80.4	55.3	80.6	55.1	83.3	82.9	82.8	82.9	83.2	86.8	86.1	86.8
32	34	76.7	74.6	87.1	86.8	74.5	86.9	74.6	74.6	74.2	74.4	74.5	74.5	74.6	74.7	74.6
33	35	90.4	87.2	78.6	78.3	87.2	78.3	87.3	86.8	86.3	86.6	86.7	86.8	89.9	89.3	89.9
34	36	81.3	80.2	74.4	74.5	80.4	74.5	80.1	80.4	80.7	80.6	80.6	80.4	81.5	81.6	81.5

N°	R/2.2/1	R/4.2/1	R/5.2/1	R/8.2/1	R/1/4/1	R/2/4/1	R/4/4/1	R/5/4/1	R/8/4/1	R/1/2/5/1	R/4/5/1	R/5/5/1	R/8/5/1	R/5/4/3	R/6/5/2	R/5/5/2	R/5/5/3
01	60.3	64.7	65.6	66.1	67.1	65.5	67.4	67.2	66.6	65.6	67.2	66.9	66.3	79.9	80.3	80.3	79.9
02	55.0	59.4	60.7	61.8	62.9	59.2	61.8	62.2	62.4	59.3	61.8	61.9	62.1	79.4	80.7	80.7	79.3
03	51.8	61.9	65.6	72.8	76.1	58.4	67.2	69.8	74.2	61.3	67.8	70.4	74.4	87.5	85.2	85.4	87.2
04	72.9	76.9	77.9	76.9	77.0	75.1	77.7	78.1	77.6	75.0	77.9	78.2	77.2	83.5	83.2	83.2	83.7
05	77.9	82.2	83.9	86.3	86.5	80.2	83.8	85.6	86.4	80.8	84.5	86.0	86.4	90.3	89.1	89.2	90.2
06	81.6	83.5	84.4	84.3	84.5	83.0	85.1	84.2	85.1	83.5	83.8	84.6	84.2	89.7	88.7	88.8	89.7
07	76.0	74.0	75.6	77.9	80.0	73.4	76.6	77.9	79.8	74.6	77.5	78.5	80.2	89.2	88.4	88.4	89.1
08	74.7	75.1	74.9	74.3	74.3	75.0	75.1	74.7	74.4	75.3	75.0	74.6	74.3	79.1	79.5	79.5	79.1
09	77.6	77.6	77.9	78.6	78.6	77.6	78.2	78.4	78.6	77.7	78.3	78.4	78.6	80.4	80.4	80.4	80.7
10	77.8	78.4	78.7	79.9	82.3	79.9	80.7	81.1	82.0	80.8	81.5	81.8	82.6	88.3	88.3	88.3	88.3
11	72.1	73.1	73.9	73.8	73.5	73.2	74.2	74.3	73.6	73.4	74.2	74.2	73.7	79.0	79.4	79.4	79.0
12	81.4	81.9	81.8	82.0	82.8	82.6	82.7	82.8	82.8	82.9	82.9	83.0	82.9	88.5	88.7	88.7	88.5
13	85.4	87.4	87.9	88.1	88.7	87.3	88.5	88.5	88.6	87.9	88.7	88.6	88.7	92.0	91.7	91.7	92.0
14	56.0	56.8	57.1	57.4	57.5	57.2	57.5	57.6	57.6	57.5	57.7	57.7	57.8	67.7	68.7	68.7	67.8
15	71.3	72.4	74.5	77.3	78.7	69.5	74.5	76.6	79.5	70.5	75.4	77.1	79.5	88.1	87.2	87.3	88.0
16	76.8	76.5	76.1	77.3	77.8	77.6	76.9	77.5	77.7	77.7	77.6	77.8	77.9	82.7	82.6	82.6	82.7
17	81.9	83.8	84.3	85.4	86.6	84.1	85.0	85.4	86.4	84.7	85.4	85.8	86.7	92.5	92.5	92.5	92.5
18	75.1	76.9	77.2	77.7	79.3	77.4	78.6	78.8	79.2	78.0	79.2	79.3	79.6	86.7	86.6	86.6	86.7
19	71.7	72.7	72.9	73.4	73.4	72.3	72.5	72.7	73.2	72.1	72.5	72.6	73.2	84.4	85.0	85.0	84.4
20	85.8	86.7	86.6	86.1	86.7	86.7	87.0	86.9	86.7	87.3	87.1	87.0	86.8	87.6	87.5	87.5	87.6
21	78.3	78.1	77.9	77.2	77.9	78.6	78.4	78.1	77.9	79.0	78.6	78.3	78.1	81.4	81.5	81.5	81.4
22	66.4	66.4	66.5	66.9	67.3	67.2	67.0	67.2	67.4	66.7	66.7	66.9	67.1	78.0	78.7	78.7	78.0
23	85.7	86.9	87.4	88.3	89.2	87.7	88.5	88.7	89.1	88.2	88.5	88.7	89.1	94.7	94.8	94.8	94.7
24	67.3	68.6	68.9	68.3	70.4	69.4	69.8	70.0	70.3	70.0	70.5	70.6	70.9	77.5	78.2	78.2	77.4
25	80.2	81.3	81.6	81.9	81.8	81.3	81.8	82.0	81.9	81.7	82.1	82.1	82.0	83.0	83.2	83.2	83.1
26	75.9	77.9	78.4	79.2	80.0	78.0	79.0	79.4	79.9	78.6	79.4	79.8	80.1	81.9	82.2	82.2	81.9
27	77.4	78.1	78.3	78.7	81.4	80.4	80.9	81.0	81.3	80.7	81.3	81.3	81.5	68.8	87.4	87.4	86.8
28	74.9	76.7	77.0	77.4	79.4	78.5	79.0	79.0	79.3	79.1	79.4	79.4	79.6	84.4	84.9	84.9	84.5
29	76.0	78.0	78.7	79.8	82.3	79.3	80.7	81.1	81.8	80.4	81.6	81.9	82.5	86.1	86.2	86.2	86.1
30	85.1	87.8	88.4	88.9	90.0	88.2	89.5	89.6	89.8	89.1	89.8	89.9	90.1	92.4	92.4	92.4	92.4
31	81.7	80.2	80.1	80.5	81.9	81.7	81.4	81.2	81.7	82.4	81.7	81.7	82.2	86.2	86.7	86.7	86.3
32	72.8	73.0	73.2	73.6	74.3	73.6	73.9	74.0	74.2	73.8	74.1	74.3	74.4	74.7	74.5	74.5	74.7
33	82.7	82.9	82.7	83.1	85.1	84.9	84.4	84.6	85.0	85.5	85.1	85.2	85.6	89.4	89.8	89.8	89.4
34	77.1	77.8	78.3	78.8	80.3	78.7	79.9	79.9	80.2	79.6	80.3	80.4	80.5	82.2	81.7	81.7	82.0

Tableau (VI.2): Résultats des différentes valeurs pour X_n : coefficient multiplicatif de la neige.

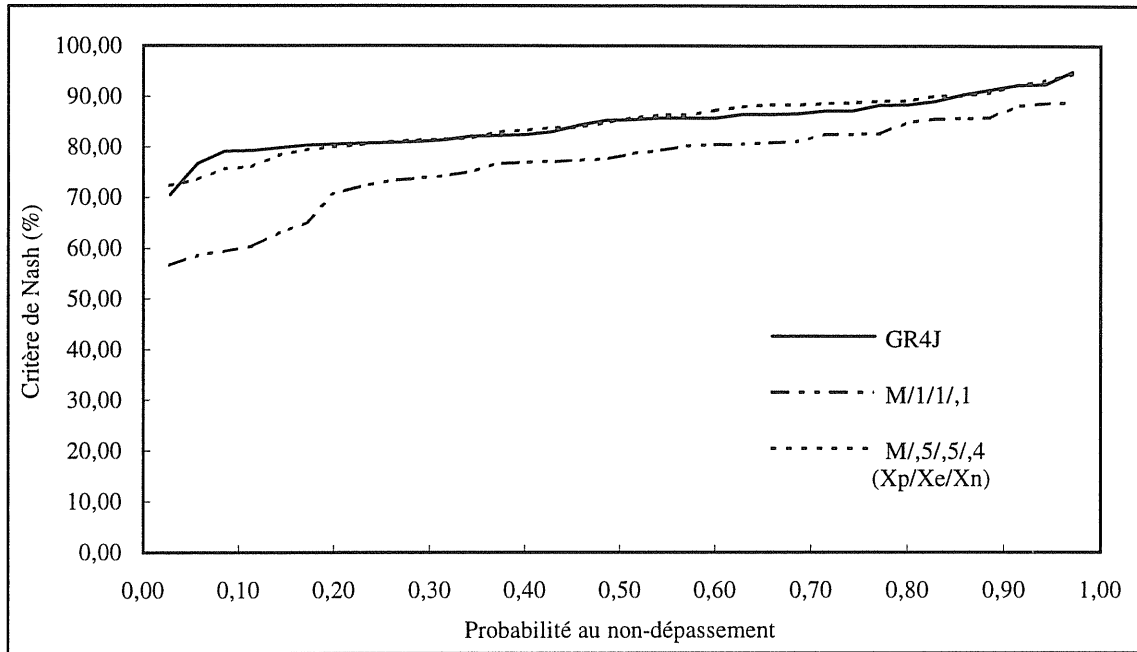


Figure (VI.2): Distributions des critères de Nash (X_n : portion de neige prise en compte).

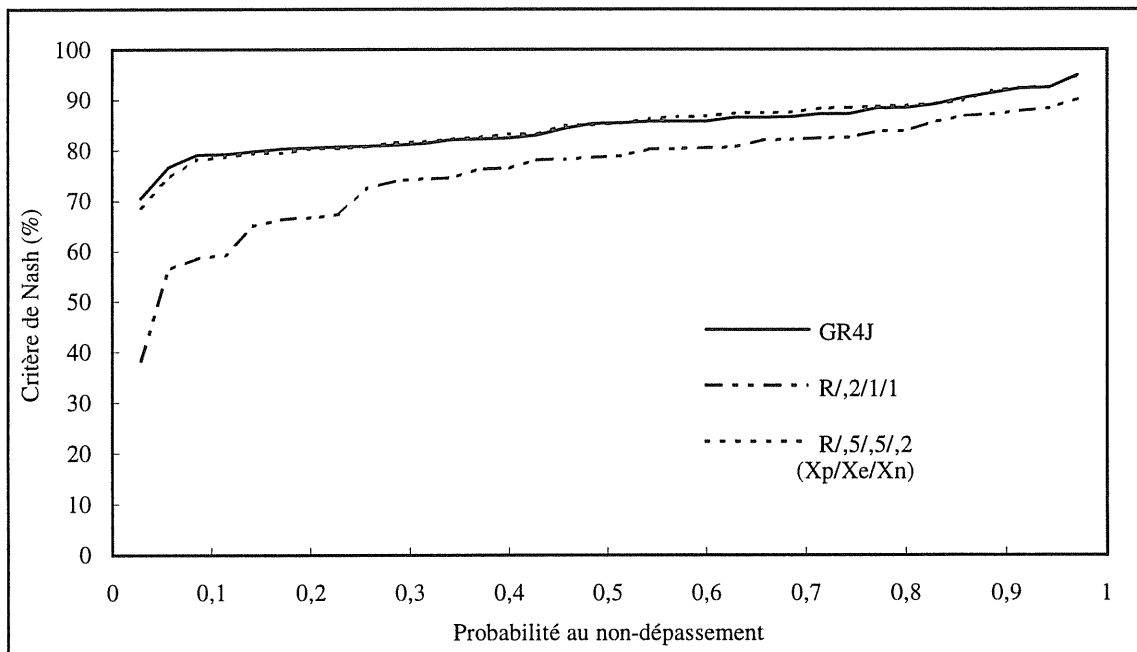


Figure (VI.3): Distributions des critères de Nash (X_n : coefficient multiplicatif de la neige).

VI.4.2 - Combinaisons des deux premiers schémas

A la suite de cet échec, nous avons procédé à une autre complication du schéma qui consiste à utiliser quatre coefficients à tester X_p , X_e , X_m et X_r . Les deux premiers coefficients sont identiques à ceux utilisés précédemment. En ce qui concerne les deux autres coefficients, pour le premier (X_m) comme coefficient de majoration de la neige, il est borné entre 1 et 2. Le deuxième (X_r) représente la part de neige prise en considération dans la précipitation décrite comme neige dans le fichier de METEO-FRANCE. La **figure VI.4** illustre le rôle de ces deux derniers coefficients.

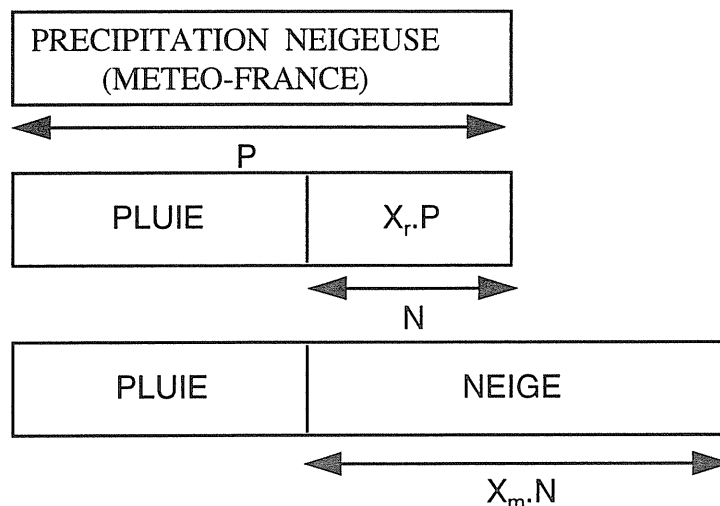


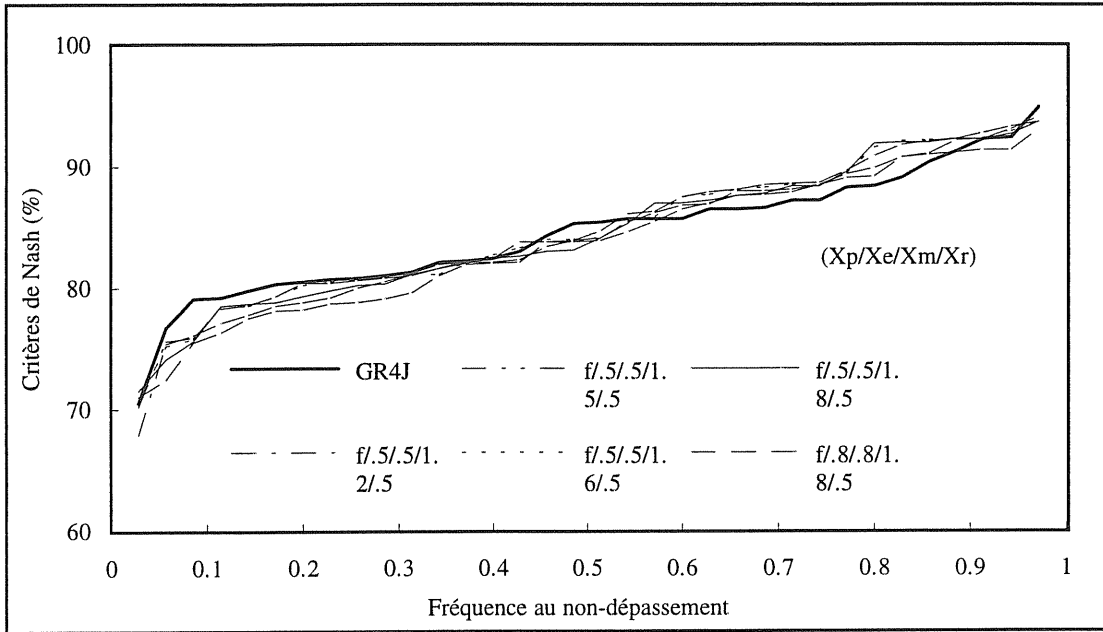
Figure (VI.4): Transformation de l'information "Neige".

Dix-huit essais ont été effectués, leurs résultats sont reportés dans le **tableau V1.3**. Les distributions des coefficients de NASH correspondant à ces essais sont présentés sur quatre figures (voir **figure VI.5a**, **VI.5b**, **VI.5c** et **VI.5d**) pour une meilleure distinction des dix-huit courbes représentatives des distributions du critère de NASH.

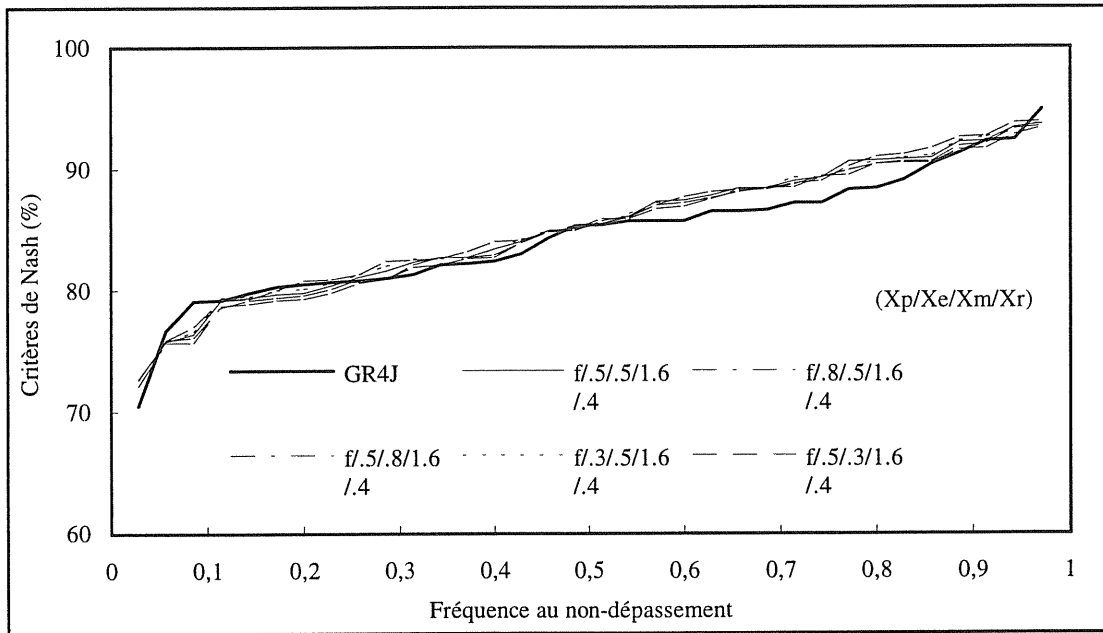
VI.4.3 - Conclusion partielle

Les deux premières approches (trois coefficients à tester) nous ont montré que les résultats par rapport à GR4J se sont dégradés dans tous les cas. La dernière approche qui fait appel à quatre coefficients X_p , X_e , X_m et X_r montre un léger gain pour la combinaison (F/3/3/1.5/4) ce qui signifie que 40 % de la précipitation est considérée comme de la neige et que cette fraction de neige est majorée de 50 %. De plus, un coefficient de 0.3 est utilisé pour la fonte provoquée par la pluie et l'ETP (Cf. **figure VI.5d**), 4 mm seulement étaient considérés comme étant de la neige, 6 mm étaient considérés comme de la pluie et on admettait un défaut de captation de la neige conduisant à majorer les 4 mm de 50 % soit 6 mm de neige effective.

Un gain n'est pas obtenu pour tous les bassins versants. On pense que cela est dû à la mauvaise représentation des bassins par la pluviométrie (parfois un seul poste). On a donc été conduit par la suite à accepter de caler X_r (ou X_m) bassin par bassin concomitamment aux quatre autres paramètres du modèle GR4J, en cherchant les meilleures valeurs fixes pour X_p , X_e et X_r (ou X_m).



(a)



(b)

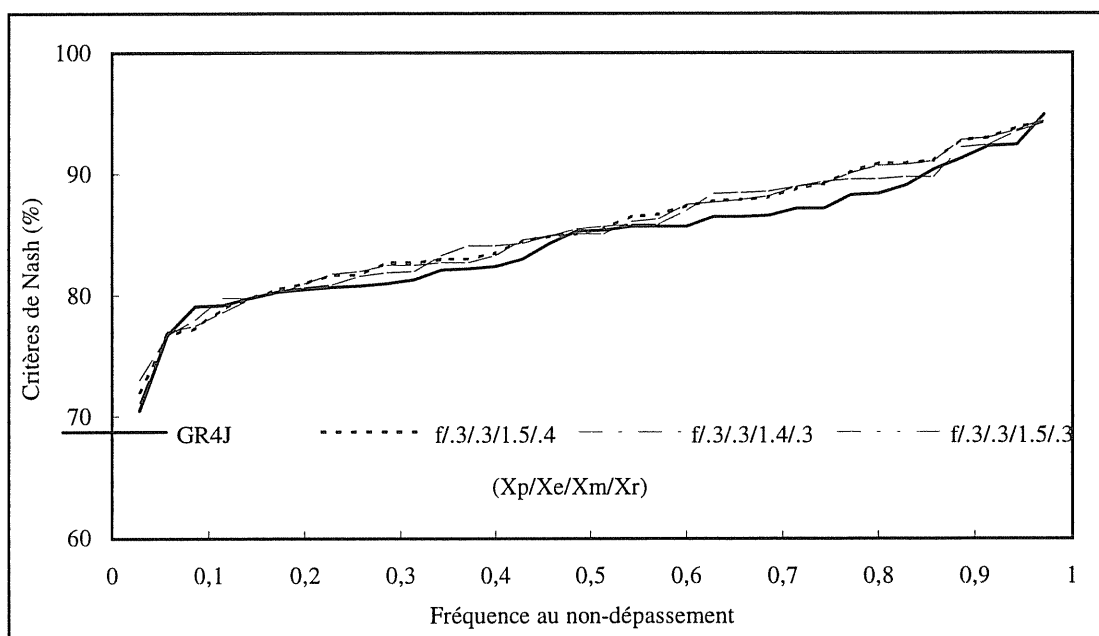
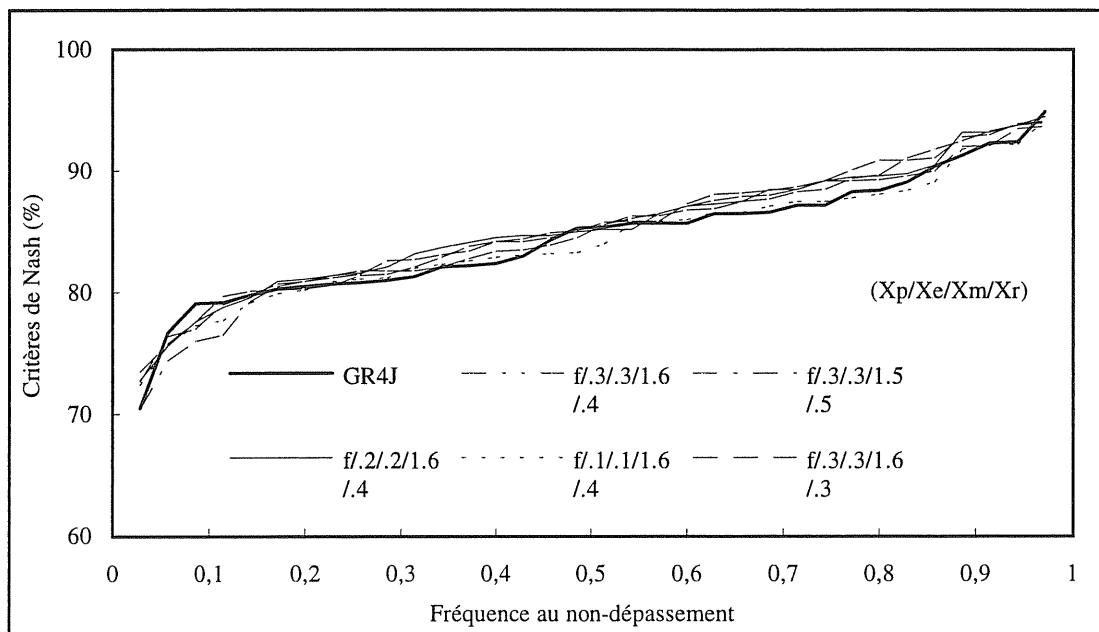


Figure (VI.5): Comparaisons des distributions des critères de Nash pour les solutions à quatre paramètres fixes ($X_p / X_e / X_m / X_r$).

VI.4.4 - Introduction d'un paramètre à optimiser

Après les nombreux essais précédents et les résultats mitigés qui ont été obtenus, on est forcé d'admettre qu'une majoration de la précipitation permettait, seule, un gain sur les critères. Dans la version précédente la majoration X_m ne porte que sur la neige; si X_r est nul, on se retrouve ramené à la version initiale de GR4J, quel que soit X_m . On va donc ici, optimiser un coefficient multiplicateur de la précipitation.

On peut considérer différentes modalités d'application de ce principe. Les six principales modalités testées sont représentées schématiquement sur la **figure VI.6**. Dans ces schémas, l'axe des abscisses représente le paramètre à optimiser, en ordonnée on représente la quantité de pluie et au-dessus de celle-ci la quantité de neige. On décrit brièvement ci-après les six schémas; où l'on note X_5 le paramètre à optimiser, et P la précipitation réputée être de la neige.

(a) - La précipitation totale est égale à $P.e^{X_5}$.

Si X_5 est négatif, il n'y a pas de neige. Si X_5 est positif $P.e^{-X_5}$ est la quantité de pluie et par suite $P.(e^{X_5} - e^{-X_5})$ est la quantité de neige effective.

(b) - La quantité de pluie est $P.e^{-X_5}$.

Si X_5 est négatif, il n'y a pas de neige. Si X_5 est positif, la précipitation totale est $P.X_5$. Il s'ensuit que, dans ce cas, la quantité de neige est: $P.(X_5 - e^{-X_5})$.

(c) - La précipitation totale est: $(1 + X_5).P$.

Si X_5 est négatif et inférieur à -1, la précipitation totale est nulle. Si X_5 est négatif et supérieur à -1, il n'y a pas de neige. Si X_5 est positif, la quantité de pluie est: P/X_5 et par suite la quantité de neige est: $P.(X_5 - 1/X_5)$.

(d) - La précipitation totale est: $P.e^{X_5}$.

Si X_5 est négatif, il n'y a pas de neige. Si X_5 est positif la pluie est égale à P et par la suite la quantité de neige est égale à $P.(e^{X_5} - 1)$.

(e) - Si X_5 est positif la précipitation totale est: $P.e^{X_5}$, la pluie P et la neige est, par suite, $P.(e^{X_5} - 1)$. Si X_5 est négatif la précipitation totale et la pluie sont toutes deux égales à P et l'ETP est corrigée pour devenir $E.e^{-X_5}$ (E désignant l'ETP moyenne entrée dans GR4J).

(f) - La pluie est toujours égale à P . Si X_5 est positif la précipitation totale est égale à $P.e^{X_5}$, ce qui laisse une quantité de neige égale à $P.(e^{X_5} - 1)$.

Les résultats obtenus apparaissent dans le **tableau VI.4**, l'**annexe IV.1** et les **figures VI.7a** et **VI.7b** pour les distributions du critère de Nash.

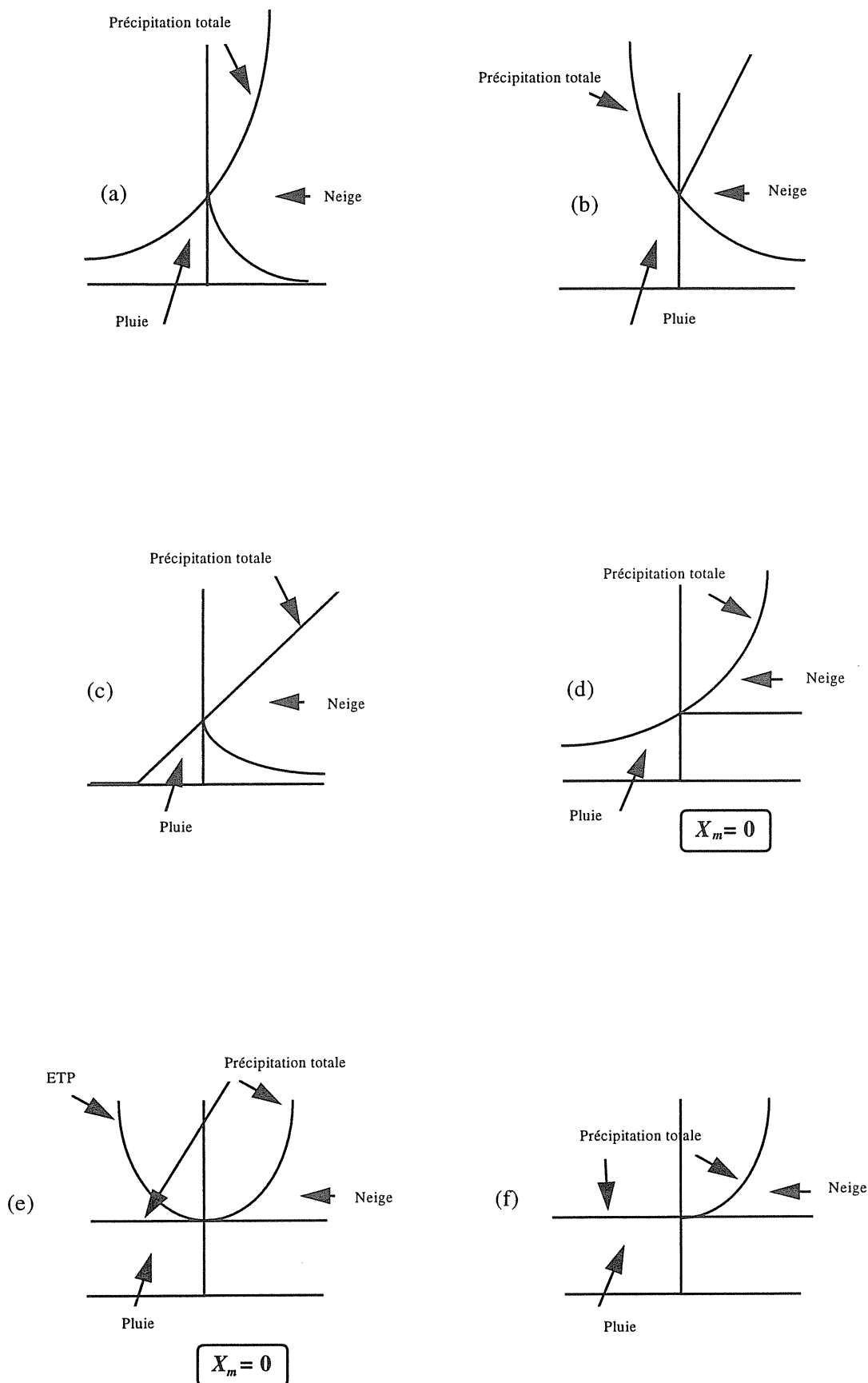
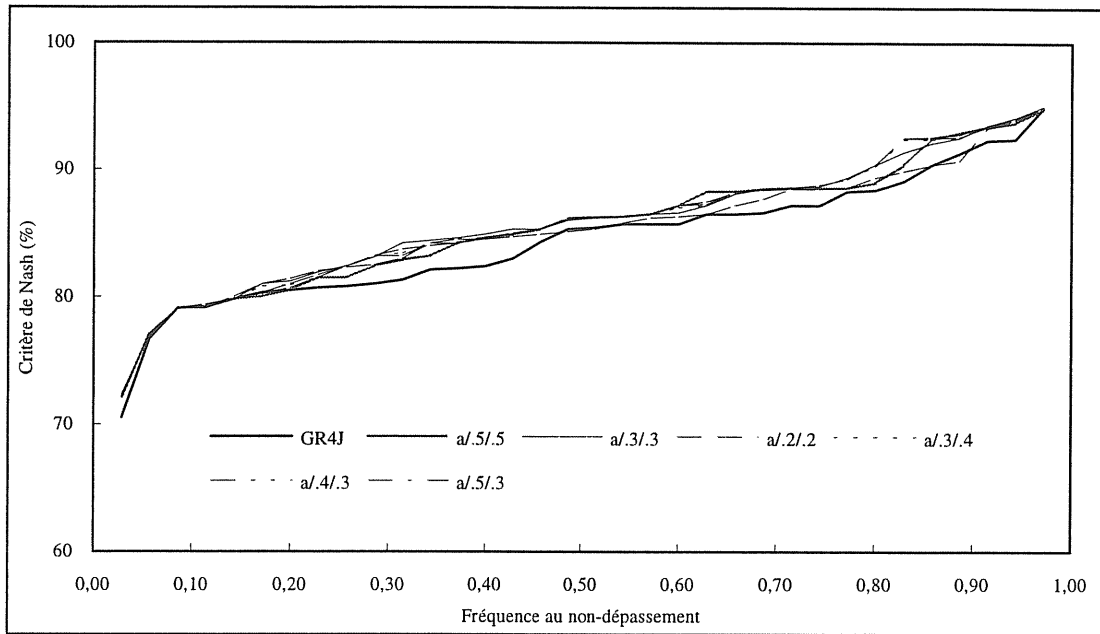


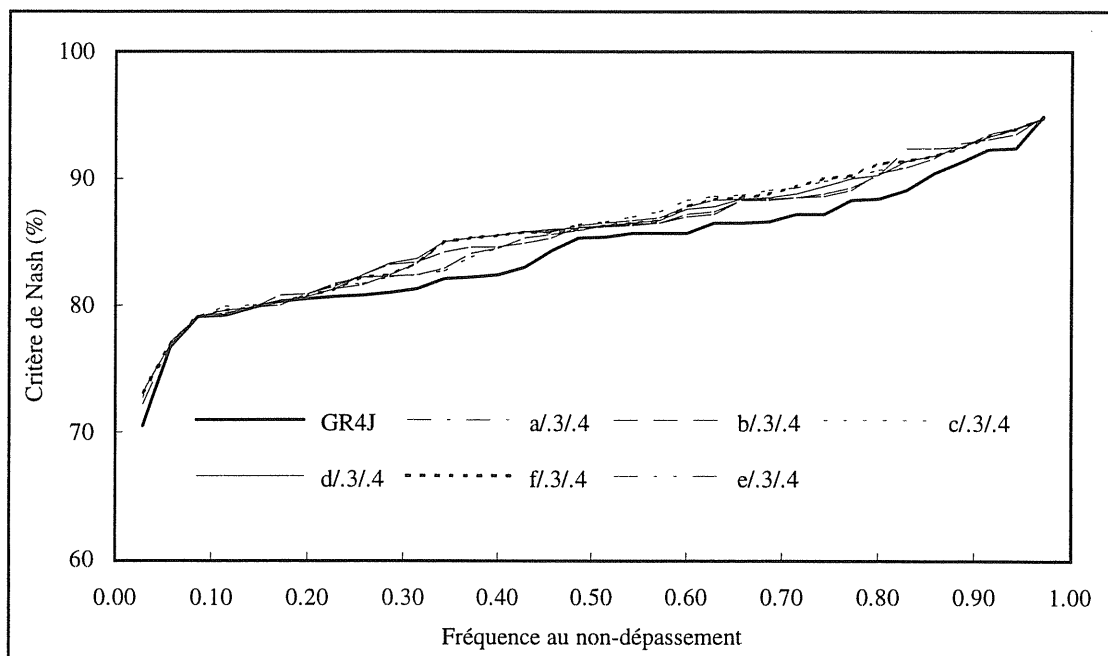
Figure (VI.6): Schémas des six différents essais d'optimisation du paramètre libre porté en abscisse.

N°	Code	a33	a/5/5	a/2/2	a/3/4	a/4/3	a/5/3	b/3/4	c/3/4	d/3/4	e/3/4	f/3/4
01	01	85.3	81.5	84.9	84.6	84.0	84.2	81.7	81.7	85.5	85.5	85.5
02	02	84.4	82.9	84.5	83.4	83.7	83.2	82.3	82.7	85.8	85.8	85.8
03	03	86.6	88.6	85.1	87.0	87.5	87.3	88.3	88.3	86.7	86.7	86.7
04	04	84.6	84.6	84.5	84.6	84.6	84.6	85.9	85.9	86.0	86.9	86.0
05	05	91.4	93.4	89.9	92.4	92.8	92.6	90.9	90.9	91.4	91.4	91.4
06	06	92.1	88.3	90.7	92.4	92.6	92.5	91.6	91.6	91.8	91.8	91.8
07	07	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	89.8	90.0	90.0	90.0
08	08	81.2	80.0	81.4	80.8	80.3	80.2	80.0	80.0	80.3	80.3	80.3
09	09	81.0	80.5	81.0	80.9	81.0	80.7	80.9	80.9	80.7	80.7	80.7
10	10	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.7	88.4	88.4	88.4
11	11	79.8	79.8	80.0	79.8	79.8	79.8	79.8	79.9	79.8	79.8	79.8
12	12	89.4	89.0	89.4	89.3	89.3	89.3	89.1	89.1	89.4	89.4	89.4
13	13	93.5	92.9	93.3	93.5	93.5	93.4	93.1	93.1	93.3	93.3	93.3
14	14	72.3	72.1	72.3	72.2	72.1	72.2	70.4	72.7	73.1	73.1	73.1
15	16	86.3	86.3	86.3	86.3	86.3	86.3	86.3	90.1	87.6	88.3	91.2
16	17	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2	84.1	81.6	83.7	81.6	82.2
17	18	92.5	92.5	82.5	92.5	92.5	92.5	92.8	92.8	92.5	92.5	92.4
18	19	86.2	86.2	86.2	86.2	86.2	86.2	86.4	86.4	86.1	85.8	85.8
19	20	85.3	85.3	85.3	85.3	85.3	85.3	85.3	85.3	85.3	85.3	85.3
20	21	88.6	88.6	88.5	88.4	88.6	88.3	88.6	88.6	87.8	87.8	87.8
21	22	82.4	82.4	82.3	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4
22	23	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1
23	25	95.0	94.8	95.1	94.8	94.9	94.9	94.9	95.0	94.8	94.8	94.8
24	26	79.1	79.2	79.2	79.4	79.3	79.4	79.2	80.2	79.6	79.6	79.6
25	27	84.9	84.9	84.7	84.9	85.0	84.9	84.5	84.5	85.0	85.0	85.0
26	28	83.1	83.2	83.0	83.2	83.2	83.2	82.9	83.8	83.3	83.3	83.3
27	29	88.7	88.6	88.6	88.8	88.8	88.8	88.3	89.3	88.8	88.8	88.8
28	30	86.0	86.1	85.8	86.2	86.2	86.3	85.6	87.0	86.3	86.3	86.3
29	31	88.1	88.3	87.7	88.3	88.2	88.4	87.4	87.4	88.5	88.5	88.5
30	32	94.1	93.7	93.7	94.0	94.0	93.9	93.5	93.5	93.9	93.9	93.9
31	33	86.5	86.5	86.5	86.5	86.5	86.5	86.5	86.6	86.5	86.5	86.5
32	34	77.0	77.0	77.0	76.9	77.0	76.9	77.1	77.1	76.9	76.9	76.9
33	35	90.4	90.4	90.4	90.3	90.4	90.4	90.4	90.7	90.3	90.3	90.3
34	36	81.9	81.5	82.0	81.5	81.7	81.5	82.2	82.2	81.3	81.3	81.3

Tableau (VI.4): Résultats des six différents essais.



(a)



(b)

Figure (VI.7): Distributions des critères de Nash avec un paramètre libre de modification de la précipitation neigeuse.

VI.5 - RESULTATS ET COMPARAISON

Le travail de comparaison des différents schémas imaginés précédemment est assez lourd puisqu'il convient non seulement de les confronter aux données des 34 bassins servant de référence, mais encore de faire varier les deux paramètres fixe X_p et X_e . Le **tableau VI.4** et la **figure VI.7** ne reproduisent que les versions les plus significatives. A l'examen des différentes figures on s'aperçoit que le meilleur compromis entre simplicité et efficacité conduit à privilégier la solution (f) accompagnée de deux paramètres $X_p = 0.3$ et $X_e = 0.4$. Cette solution conduit donc à avoir un certain nombre de bassins où $X_s = 0$ et qui sont donc traités avec la version initiale de GR4J. Environ un bassin sur cinq est dans ce cas. Si X_s est positif la solution proposée revient à imaginer que la neige correspond seulement à la partie de majoration de la précipitation globale. Ce résultat est très surprenant. On peut se demander si le modèle initial ne traite pas, déjà, la neige à sa façon, le problème des précipitations neigeuses, de façon globale avec la description de l'évolution du réservoir S . Cette étude montre la difficulté à introduire un sous-schéma conceptuel dans un modèle global (du point de vue des processus) construit progressivement et de façon empirique.

VI.7 - CONCLUSION

En utilisant simplement le code des précipitations présent dans les fichiers de données pluviométriques, l'énergie disponible sous la forme de l'ETP et la présence de pluies ultérieures, on a pu concevoir un sous-modèle conceptuel semi-distribué pour le traitement de la neige. Une conclusion inattendue, mais incontournable après de nombreux essais, est que les précipitations totales (neige et pluie) en cas de "code de neige" doivent toujours être majorées pour être compatibles avec les écoulements observés. Cette majoration est d'environ 50 % de la précipitation mesurée. La faiblesse de la représentativité des pluviomètres sur les bassins est sans doute la raison pour laquelle cette majoration est optimisée bassin par bassin.

Ainsi, le sous-modèle neige améliore sensiblement la performance du modèle GR4J sur les bassins soumis à des périodes neigeuses (hors du régime nival proprement dit) au prix d'un seul paramètre supplémentaire calé bassin par bassin. Il est possible qu'une augmentation du nombre de pluviomètres par bassin permettrait de proposer une solution avec une majoration fixe, économisant ainsi un paramètre à caler. La difficulté à obtenir des données pluviométriques dans des délais réduits n'a pas permis de tester cette hypothèse dans le cadre de notre recherche.

CHAPITRE VII

CONCEPTION D'UN MODELE PLUIE-DEBIT MENSUEL A DEUX PARAMETRES

VII.1 - INTRODUCTION

Les modèles conceptuels ou empiriques ont la particularité d'intégrer des facteurs complexes tout en ayant l'ambition de décrire, par une représentation voulue aussi simple que possible, le comportement d'un bassin versant. Ils sont, de ce fait, réductionnistes de la complexité naturelle, bien qu'ils aient l'avantage d'introduire une dimension physique.

On rencontre, dans la littérature, des modèles de simulation mensuels qui, pour simuler le comportement d'un bassin, utilisent des schémas à trois paramètres et plus (Thomas (1981), Alley (1985), Vandewiele et al. (1992) Kabouya (1990), Michel (1989), modèle de Nanjing (Wood et al. 1991), et modèles linéaires).

On poursuit présentement deux objectifs principaux. Le premier consiste en la recherche d'un modèle conceptuel global de simulation au pas de temps mensuel qui permette la meilleure représentation du fonctionnement d'un bassin versant avec deux paramètres, que nous appellerons GR2M. On se limite à deux paramètres car on cherche à maximiser les chances de pouvoir relier les paramètres du modèle aux caractéristiques physiques des bassins versants, c'est pourquoi nous tenons à respecter cet objectif essentiel dans l'élaboration de notre modèle. Le second objectif est de déterminer d'une part les relations éventuelles entre paramètres du modèle mensuel et caractéristiques physiques des bassins et d'autre part, les relations entre paramètres des deux modèles mensuel et journalier (GR4J).

VII.2 - MODELES CONCEPTUELS SERVANT DE COMPARAISON

Comme il a été souligné précédemment, notre étude consiste à mettre au point un modèle simple au pas de temps mensuel sur un ensemble de 91 bassins disponibles en comparant les différentes versions obtenues lors de son développement à la panoplie des modèles existants.

Il convient de procéder à la présentation des modèles mensuels de simulation utilisés dans notre comparaison.

VII.2.1 - Modèle ABCD de Thomas (in Alley, 1985)

Thomas (1981) a présenté un modèle de bilan en eau appelé ABCD dépendant de quatre paramètres avec deux réservoirs.

On définit au préalable deux variables W et Y comme suit:

$$W_i = P_i + S_{i-1} \quad (\text{VII.1})$$

et

$$Y_i = ER_i + S_i \quad (\text{VII.2})$$

où:

W_i : est la quantité d'eau totale "disponible" du mois (i);

P_i : est la pluie du mois (i);

S_i : est le stock d'humidité du mois (i);

E_{ri} : est l'évapotranspiration réelle du mois (i);

Y_i : rassemble l'eau stockée dans le bassin et l'eau perdue par évaporation.

La fonction de rendement consiste à relier Y_i à W_i et S_i à Y_i . Le modèle *ABCD* réalise cela par la relation (Cf. **figure VII.1**) suivante:

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_i + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_i b}{a}} \quad (\text{VII.3})$$

où a est un paramètre supérieur ou égal à 1.

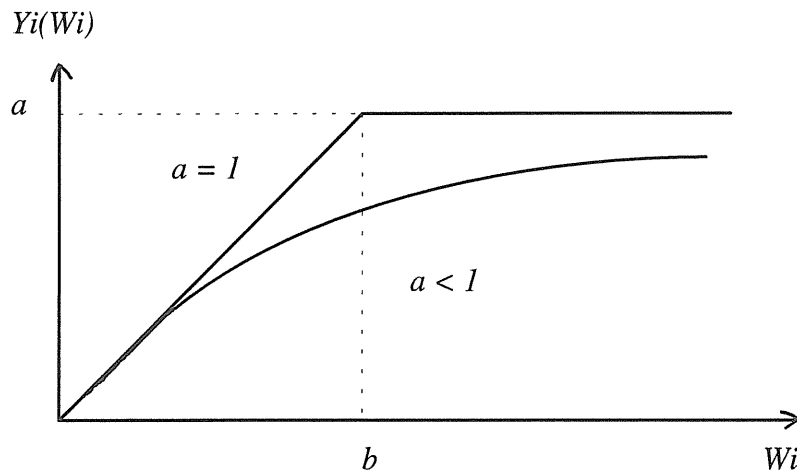


Figure (VII.1): Relation entre Y_i et W_i du modèle *ABCD*.

Le stock d'humidité à la fin du mois est déterminé par:

$$S_i = Y_i e^{(-E_i/b)} \quad (\text{VII.4})$$

où E_i désigne l'évaporation potentielle du mois (i).

La partie transfert (dépendant de 2 paramètres) concerne l'eau disponible pour l'écoulement, à savoir:

$$P_n = W_i - Y_i \quad (\text{VII.5})$$

Une partie (G_R) est routée à travers un réservoir linéaire et le complément donne lieu à un écoulement direct *QD*, le partage étant réalisé par un paramètre noté c :

$$G_R = c \cdot P_n \quad (\text{VII.6})$$

$$QD = (1 - c) \cdot P_n \quad (\text{VII.7})$$

Le réservoir linéaire G qui reçoit G_R a pour paramètre d .

Le débit QG délivré par ce réservoir est:

$$QG = d(G_{i-1} + G_R) \quad (\text{VII.8})$$

Si G_i désigne le stock à la fin du mois (i), l'évolution de ce stock est donnée par:

$$G_i = (G_R + G_{i-1})(1 - d) \quad (\text{VII.9})$$

Le débit total à l'exutoire est QT :

$$QT = QD + QG \quad (\text{VII.10})$$

L'architecture du modèle de Thomas est présentée en **figure (VII.2)**.

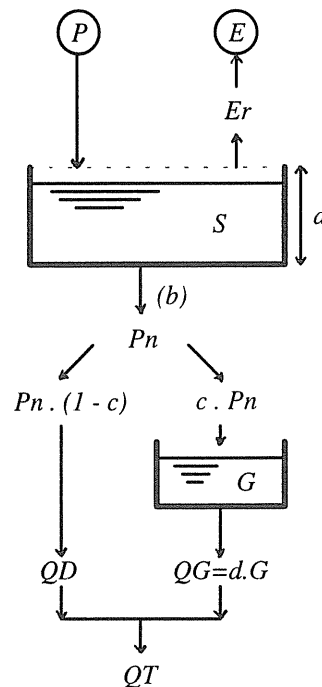


Figure (VII.2): Modèle *ABCD* de Thomas (Alley, 1985).

VII.2.2 - Modèle T -alpha d'Alley et al. (1985)

Le modèle $T\alpha$ est issu des travaux de Thornthwaite et Mather (1955) pour lesquels le sol est considéré comme ayant une capacité maximale d'humidité γ (paramètre à caler). On peut en voir une description dans Mather (1981) et Arnell (1992). L'humidité du sol à la fin du mois i est désignée par S_i .

Une fraction α (autre paramètre à caler) de la pluie P du mois i participe directement à l'écoulement, le complément noté P_n est comparé à l'évaporation potentielle mensuelle E du même mois.

$$P_n = (1 - \alpha) \cdot P \quad (\text{VII.11})$$

Selon que la fraction P_n est supérieure ou inférieure à E , la différence est ajoutée ou soustraite au réservoir-sol (S_i).

Dans le cas où $P_n \geq E$ on a:

$$S_i = \text{Min}[(P_n - E) + S_{i-1}, \gamma] \quad (\text{VII.12})$$

Quand la fraction P_n de la précipitation du mois est supérieure à l'évaporation potentielle et que l'humidité du sol atteint sa capacité γ , alors l'excès d'eau contribue à l'écoulement:

$$\begin{aligned} \Delta R &= P_n - E + S_{i-1} - \gamma & \text{si } P_n - E + S_{i-1} - \gamma > 0. \\ \Delta R &= 0 & \text{sinon} \end{aligned} \quad (\text{VII.13})$$

Dans le cas où $P_n < E$, le déficit d'humidité du sol apparaît ou s'accroît:

$$S_i = S_{i-1} \exp[-(E - P_n) / \gamma] \quad (\text{VII.14})$$

Une fraction β (paramètre à caler) de ΔR entre dans un réservoir qui se vidange selon une loi linéaire.

$$R_i = \beta (R_{i-1} + \Delta R) \quad (\text{VII.15})$$

Le débit du mois "i" est alors égal à la somme des deux écoulements:

$$QT = (1 - \beta)(R_{i-1} + \Delta R) + \alpha \cdot P \quad (\text{VII.16})$$

Le modèle T alpha est à 3 paramètres, dont deux, α et β , sont bornés à 1.

Le modèle T α (Cf. **figure VII.3**) introduit la possibilité d'un écoulement direct d'une fraction de la pluie, ce qui rend l'écoulement moins intermittent par rapport au modèle de Thornthwaite. Ce modèle a donné de bons résultats sur 6 bassins versants au Nord du New-Jersey.

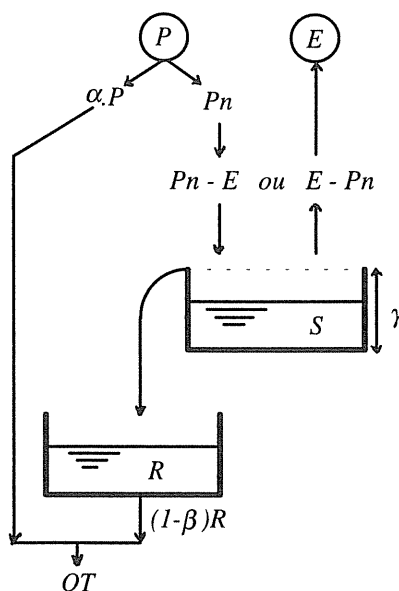


Figure (VII.3): Modèle T α d'Alley et al. (1985).

VII.2.3 - Modèle de Kabouya (1990).

Kabouya a mis au point un modèle qui est inspiré des travaux d'Edijatno et Michel (1989) sur le modèle GR3J (Le modèle à trois paramètres). Il a été élaboré uniquement sur des bassins de l'Algérie septentrionale dont la pluviométrie varie de 250 à 1800 mm.

Un paramètre C consiste à introduire une réduction d'une entrée, soit l'évaporation potentielle, soit la pluie:

$$\text{Si } C < 0 \quad \text{alors } P_n = P + C \quad \text{et} \quad E_n = E \quad (\text{VII.17})$$

$$\text{Si } C > 0 \quad \text{alors } P_n = P \quad \text{et} \quad E_n = E - C \quad (\text{VII.18})$$

La fonction de production est assurée par une procédure de suivi de l'humidité du bassin versant. Cette "humidité" est représentée par le stock en eau S d'un réservoir "sol", fonction de son taux de remplissage S/A , avec A paramètre du modèle (similaire au paramètre correspondant du modèle GR4J). Ce niveau de remplissage détermine la fraction de la pluie P_r destinée au transfert, le réservoir "sol" absorbe le complément $P_s = P_n - P_r$:

$$P_s = \frac{(A - S). \tanh(P_n / A)}{A + S. \tanh(P_n / A)} \quad (\text{VII.19})$$

puis:

$$E_r = S. \frac{(2 - S / A). \tanh(E_n / A)}{1 + (1 - S / A). \tanh(E_n / A)} \quad (\text{VII.20})$$

La fraction P_r est répartie en deux moitiés égales, dont l'une transite par un réservoir de "routage" où la vidange est fonction quadratique de son contenu R . Le débit relâché par ce réservoir est obtenu par intégration de cette loi instantanée quadratique:

$$QR = R^2 / (R + B) \quad (\text{VII.21})$$

B est un paramètre du modèle.

L'autre moitié est destinée à l'écoulement et court-circuite le réservoir R ; c'est l'écoulement pseudo-direct QD .

L'écoulement mensuel à l'exutoire est la somme des deux écoulements.

$$QT = QR + QD \quad (\text{VII.22})$$

L'architecture du modèle est présentée sur la **figure (VII.4)**.

L'application du modèle de Kabouya sur un ensemble de 63 bassins d'une région assez aride de l'Algérie septentrionale a donné des résultats probants.

VII.2.4 - Modèle de prévision de Michel (1989)

Le modèle de prévision d'étiage mis au point par Michel à l'occasion de la sécheresse de 1989 compte 3 paramètres. Ce modèle est également inspiré des travaux d'Edijatno (1989).

Les deux premiers paramètres du modèle (A et B) sont les mêmes que ceux exposés dans le paragraphe précédent pour le modèle de Kabouya. Seul le dernier paramètre (C)

diffère. Celui-ci porte sur une neutralisation préalable entre la pluie P et une fraction C de l'évaporation potentielle E (Cf. figure VII.5):

On considère une entrée de pluie P_n dans le réservoir "sol" et une sortie d'évaporation potentielle E_n du même réservoir si $P > C.E$, ce qui donne:

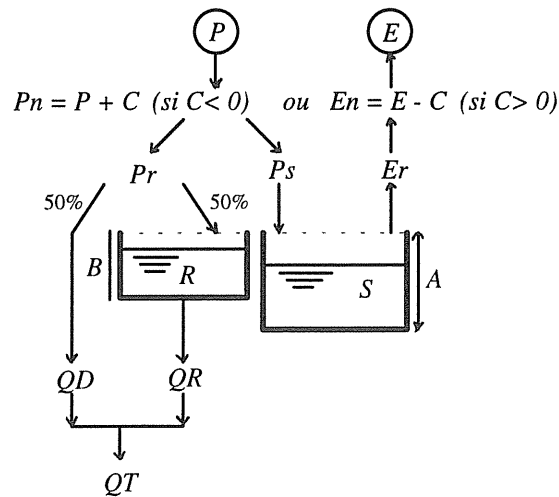


Figure (VII.4): Modèle de Kabouya (1990).

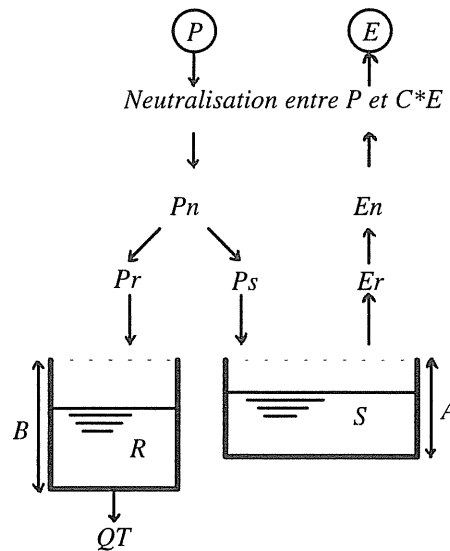


Figure (VII.5): Modèle de prévision d'étiage de Michel (1989).

$$\begin{aligned}
 P_n &= P - C \cdot E \\
 E_n &= (1 - C) \cdot E
 \end{aligned}
 \tag{VII.23}$$

Si $P < C E$, alors on a seulement une sortie potentielle E_n et P_n est nulle.

$$E_n = E - P
 \tag{VII.24}$$

Ce modèle a été conçu spécialement pour la prévision des étiages en 1989. Une application a été faite sur une dizaine de bassins versants en France dont la superficie avoisine le millier de km² en moyenne.

VII.2.5 - Modèle de Vandewiele et al. (1992)

Vandewiele (1992) a proposé un modèle mensuel avec plusieurs variantes. Nous ferons une présentation de la variante N°2. Cette variante est à trois paramètres avec un seul réservoir. Ce réservoir dont le contenu en eau est S , reçoit une pluie mensuelle P et est soumis à une évapotranspiration potentielle E qui engendre une évapotranspiration réelle E_r prélevée dans le réservoir. E_r est donnée par l'équation ci-dessous:

$$E_r = E \cdot \left(1 - a^{((P+S)/E)}\right) \quad (\text{VII.25})$$

a est un paramètre borné par 0 et 1.

Le réservoir S se vidange selon une loi quadratique et relâche un débit QS en fonction du niveau S du réservoir, en introduisant un deuxième paramètre b :

$$QS = b \cdot S^2 \quad (\text{VII.26})$$

La pluie P donne lieu à un écoulement direct QD dépendant d'un troisième paramètre c , après une neutralisation partielle par l'ETP qui le réduit au niveau P_n :

$$P_n = P - E \cdot \left(1 - e^{(P/E)}\right) \quad (\text{VII.27})$$

$$QD = c \cdot S \cdot P_n \quad (\text{VII.28})$$

L'écoulement mensuel QT à l'exutoire du bassin est la somme des deux écoulements:

$$QT = QD + QS \quad (\text{VII.29})$$

Après prélèvement de E_r et relâchement de l'écoulement QT , le niveau du stock d'eau dans le réservoir devient S' donné par l'équation de bilan:

$$S' = S + P - E_r - QT \quad (\text{VII.30})$$

L'architecture du modèle est présentée sur la **figure VII.6**.

Ce modèle a été appliqué (Vandewiele, 1991) sur 79 bassins dans quatre régions: Nord de la Belgique (65 bassins), Ardennes (6 bassins), Sud de la Chine (6 bassins), et Birmanie (2 bassins).

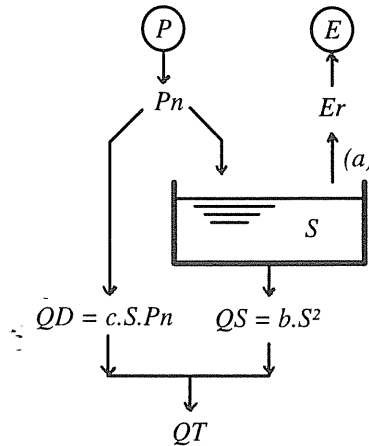


Figure (VII.6): Modèle de Vandewiele et al. Variante N° 2 (1992).

VII.2.6 - Modèle de Nanjing (in Wood et al. 1991)

Il s'agit d'un modèle mis au point à l'institut des ressources en eau de Nanjing et introduit sur la scène internationale par Todini et al. au congrès de Hambourg en 1983. La version présentée ci-dessous est conforme à l'exposé qu'en ont fait Wood et al. (1991).

Le modèle comprend un seul réservoir stockant toute l'humidité du bassin (S). Ce réservoir se vidange de façon linéaire pour donner un débit de base Q_b :

$$Q_b = X_1 \cdot S \quad , \quad 0 \leq X_1 \leq 1. \quad (\text{VII.31})$$

L'évaporation réelle (E_r) est prélevée dans ce réservoir en début du mois. E_r est liée à l'évaporation potentielle (E_p) par:

$$E_r = E_p \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{S}{X_2} \right)^{X_3} \right] \quad (\text{VII.32})$$

où X_2 est la capacité maximale du réservoir S . E_r est limitée supérieurement par S .

Ensuite, la pluie P donne lieu à un écoulement direct, QD , dépendant d'un paramètre X_4 :

$$\text{Si} \quad P \leq X_2 \cdot X_4 \cdot \left(1 - \frac{S}{X_2} \right)^{1/X_4} \quad (\text{VII.33})$$

$$\text{alors} \quad QD = P + S - X_2 \left[\left(1 - \frac{S}{X_2} \right)^{1/X_4} - \frac{P}{X_2 \cdot X_4} \right]^{X_4}$$

$$\text{Si} \quad P \geq X_2 \cdot X_4 \cdot \left(1 - \frac{S}{X_2} \right)^{1/X_4} \quad (\text{VII.34})$$

$$\text{alors} \quad QD = P + S - X_2$$

Dans ce qui précède, le paramètre X_4 est supérieur ou égal à 1 le débit total simulé par le modèle est:

$$QT = QB + QD \quad (\text{VII.35})$$

Ce modèle se prête très facilement à la création d'une variante à deux paramètres, en fixant des valeurs constantes aux paramètres X_3 et X_4 .

La présentation originelle du modèle, donne une interprétation conceptuelle à l'expression donnant QD en se référant à la notion d'aire contributrice variable.

Il faut remarquer la coïncidence entre ce modèle et les modèles de Kabouya et Michel en ce qui concerne le rendement de la pluie pour donner QD et le rendement de l'évaporation qui donne E_r à partir de E_p .

L'architecture du modèle est présentée sur la **figure VII.7**.

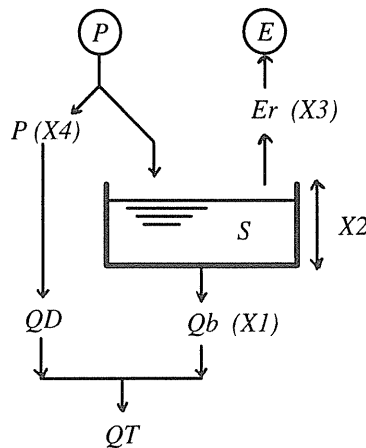


Figure (VII.7): Modèle de Nanjing, (Wood et al. 1991).

VII.2.7 - Modèle linéaire de comparaison

Pour un mois " i ", le débit Q_i est en relation avec la pluie concomitante P_i le débit du mois précédent Q_{i-1} , comme pour un modèle de type ARX.

$$Q_i = X_1 P_i + X_2 Q_{i-1} \quad (\text{VII.36})$$

Ce type de modèle est recommandé par Kothyani et al. (1993). Des modèles non-linéaires peuvent être dérivés de ce genre de modèle linéaire (Kachroo et Natale, 1992).

Le modèle linéaire ci-dessus nécessite 24 paramètres car les deux paramètres X_1 et X_2 sont calés pour chaque mois.

VII.3 - GENERALITES SUR LA MISE EN OEUVRE DES MODELES

En hydrologie, les principaux modèles opérationnels sont des modèles globaux dont les paramètres ne peuvent pas être estimés directement par la mesure de quelques grandeurs physiques sur le terrain. On ne peut les obtenir que par optimisation d'un critère de qualité des débits générés par le modèle.

On doit disposer de:

- a - séries de données "représentatives" des différentes variables d'entrées dans le système.
- b - l'estimation initiale des paramètres et des variables d'état du système.
- c - méthode d'ajustement des paramètres.
- d - méthode ou d'un critère (ou d'un faisceau de critères) pour évaluer la qualité de la simulation des débits par le modèle.

VII.3.2 - Initialisation et période de mise en route

Comme il a été expliqué dans le **chapitre II**, le choix portant sur l'initialisation est inévitablement assez grossier. On utilisera systématiquement deux années pour cette période de mise en route dont les résultats ne seront pas comptabilisés dans la fonction critère.

VII.3.3 - Critère de qualité d'ajustement

Le modèle sera d'autant plus satisfaisant que les débits Q_c seront proches des débits Q_o effectivement observés.

Apprécier la validité du modèle consiste à juger de la proximité des deux séries chronologiques Q_o et Q_c .

VII.3.4 - Optimisation des paramètres

L'optimisation des différents paramètres d'un modèle consiste à trouver un jeu de paramètres rendant minimale la fonction critère. Nous utiliserons la méthode dite de la recherche systématique pas à pas utilisée (**voir chapitre II**). Le sous-programme FOND permet une description plus précise de la procédure de recherche de l'optimum.

VII.3.5 - Période de calage et de contrôle

On distingue, parmi les données disponibles, deux périodes d'égale importance, l'une servira au calage du modèle et l'autre à son contrôle.

VII.3.6 - Analyse et comparaison des modèles

La procédure adoptée dans la comparaison des modèles conceptuels est l'application de chaque modèle à un ensemble de 91 bassins versants dont les données étaient disponibles.

Pour que l'on puisse comparer les résultats de ces modèles, nous avons utilisé la même méthode d'optimisation, avec une durée de mise en route de 24 mois. Les modèles ont été calés puis contrôlés avec le même jeu de paramètres respectivement sur deux périodes d'égale importance pour chaque bassin.

Nous avons jugé la performance de chaque modèle essentiellement sur la distribution des critères de Nash sur la période de contrôle pour l'ensemble des 91 bassins. Nous avons synthétisé chaque distribution par son quantile 0.3 calculé sur la distribution expérimentale utilisant la formule de Chedogayev.

$$F_i = \frac{(i - 0.3)}{(n + 0.4)} \quad (\text{VII.37})$$

où n est la taille de l'échantillon, i le rang dans un classement d'ordre croissant des critères de Nash, et F_i la fréquence expérimentale au non-dépassement.

Le quantile 0.3 est obtenu par interpolation linéaire entre deux couples successifs $(i, i+1)$.

VII.3.7 - Présentation du programme de test des modèles

Un programme a été établi en langage Fortran 77 (**annexe V-1**). Le programme principal et 17 sous-programmes sont présentés dans l'organigramme de la **figure VII.8**.

Le programme principal est chargé d'une partie du dialogue avec l'utilisateur et l'autre partie est assurée par le sous-programme OPTIONS; il permet de faire le choix des bassins à traiter puis fait appel aux sous-programmes de lecture des données LECE (lecture des 12 valeurs d'ETP), LECP (lecture des pluies mensuelles) et LECQ (lecture des débits mensuels).

Le sous-programme FOND est appelé par le programme principal lorsque les paramètres doivent être optimisés. Il appelle le sous-programme FONC qui génère les débits pour un jeu de paramètres donné, grâce au sous-programme MODELE appelé à chaque pas de temps, puis calcule l'erreur quadratique moyenne. Le sous-programme SENSIB donne une approximation du premier ordre de la matrice des variances-covariances des paramètres.

Les autres sous-programmes assurent généralement des tâches annexes correspondant à la sortie des différents résultats.

VII.4 - DONNEES UTILISEES POUR LE DEVELOPPEMENT DU MODELE

Précisément, 91 bassins versants ayant une superficie comprise entre 260 et 5600 km², dont certains avaient servi au développement du modèle de prévision d'étiage (Michel, 1989), étaient disponibles pour cette étude sans critique préalable des données. La **figure VII.9** montre la situation de ces 91 bassins. Pour plus de détails on se rapportera à l'**annexe V.2**. Ces bassins versants sont de taille moyenne car on s'intéresse essentiellement aux ressources en eau régionales.

Les données de débit proviennent de la banque HYDRO où chaque bassin est désigné par un code hydrologique.

Les données de pluie mensuelle sont issues directement de la banque PLUVIO. Le programme calcule la pluie mensuelle moyenne sur le bassin en fonction des postes disponibles à un mois donné.

Les données d'évaporation sont obtenues à partir des valeurs calculées par la formule de Penman pour 150 postes synoptiques par la météorologie nationale. Les données utilisées sont des moyennes sur trente ans (1951-1980).

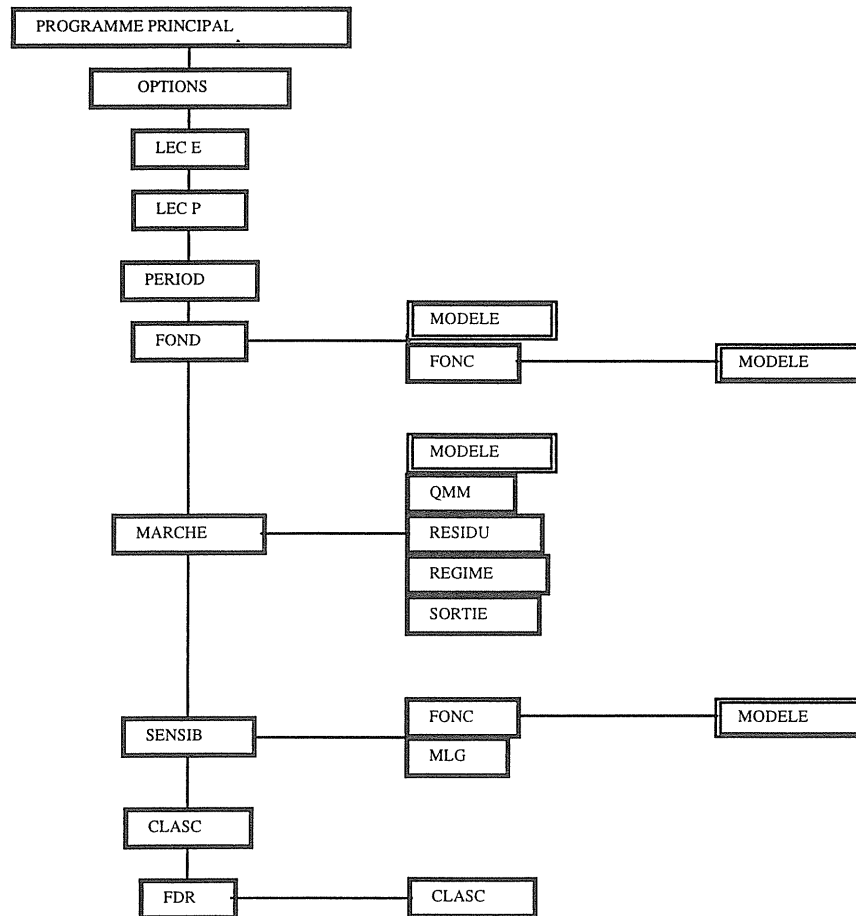


Figure (VII.8): Organigramme de mise en oeuvre comparée des modèles.

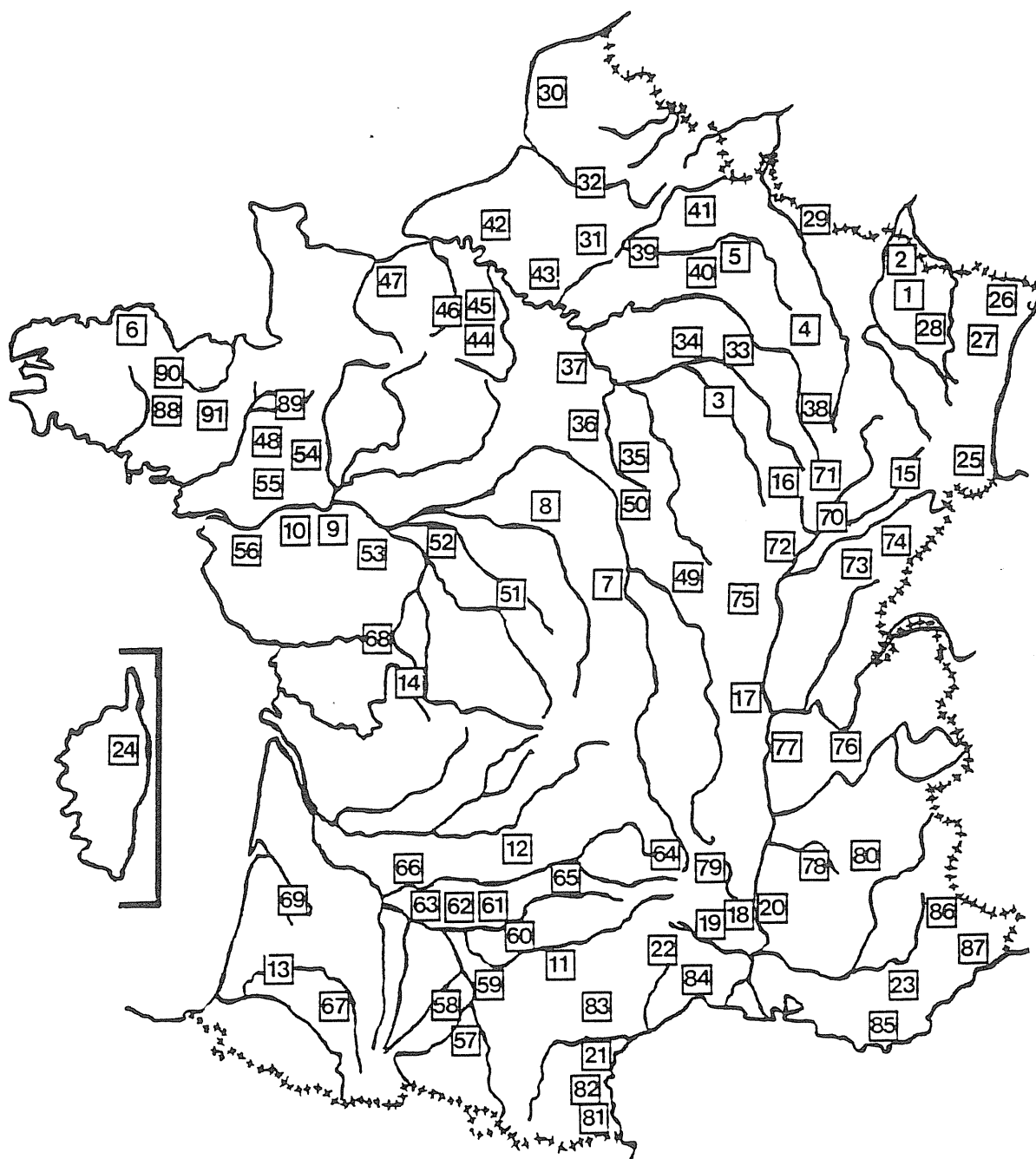


Figure (VII.9): Plan de situation des bassins versants utilisés pour le développement du modèle mensuel.

VII.5 - COMPARAISON DES EFFICACITES DES MODELES EXISTANTS

Les résultats issus de l'application des sept modèles: $T\alpha$, modèle de Kabouya, modèle de prévision des étiages de Michel, modèle de Vandewiele, modèle $ABCD$ de Thomas, modèle de Nanjing (deux variantes), modèle linéaire et trois autres variantes du modèle de Thomas sont présentés dans le **Tableau VII.1**.

En plus du modèle de Thomas ($ABCD$) nous avons testé trois versions supplémentaires à trois paramètres.

- Variante N°1 (ABD): C'est le modèle $ABCD$ avec la fraction qui donne l'écoulement direct fixé pour l'ensemble des bassins à 65%, taux fixe le plus intéressant obtenu après plusieurs essais (Cf. **Annexe V.3**).

- Variante N°2 ($ABC0$): C'est le modèle $ABCD$ avec le troisième et le quatrième paramètres égaux ($D = C$).

- Variante N°3 ($ABC1$): C'est le modèle $ABCD$ avec le quatrième paramètre égal au complément à 1 du troisième ($D = 1 - C$).

Dans le **tableau VII.1**, nous présentons pour chaque modèle le nombre de paramètres optimisés et la version utilisée, la valeur moyenne, le quantile 0.3, et les valeurs maximales et minimales du critère de Nash.

MODELES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	ABCD	ABD	ABC0	ABC1	(7)
NB. PARAM.	3	3	3	3	4	2	4	3	3	3	24
NASH MOY.	52.2	66.9	73.4	46.0	70.5	66.1	76.7	76.4	69.0	75.4	****
QUANT. 0.3	72.9	66.3	75.5	70.9	70.8	65.9	75.9	74.7	66.8	74.9	29.7
NASH MIN.	-849.	-48.	-139.	****	-111.	-343.	8.9	11.7	-75.	4.7	****
NASH MAX.	92.9	89.2	92.6	90.3	89.9	90.8	93.0	92.5	92.5	92.8	90.8

(1) : Modèle de Kabouya;

(2) : Modèle $T\alpha$ d'Alley;

(3) : Modèle de prévision d'étiage de Michel;

(4) : Modèle de Vandewiele;

(5) : Modèle de Nanjing;

(6) : Modèle de Nanjing ($\bar{X}_3 = 7.0$ et $\bar{X}_4 = 18.0$);

(7) : modèle linéaire;

(*) : Trop petit, non calculé.

Tableau (VII.1): Résumé des résultats de modèles existants.

L'examen du **tableau VII.1** et de la **figure VII.10** permet de faire les remarques suivantes:

- La comparaison des critères moyens de Nash montre que le modèle $T\alpha$, le modèle de Kabouya, le modèle de Vandewiele, le modèle de Nanjing et le modèle $ABC0$ présentent des résultats moyens. Le modèle linéaire est celui qui donne les moins bons résultats que tous les autres.

- Les variantes *ABD* et *ABC1* et le modèle de prévision d'étiage donnent des résultats sensiblement meilleurs pour le critère moyen de Nash et pour le quantile 0.3 de la distribution de ce critère.

- Les meilleurs résultats sont obtenus avec le modèle *ABCD* de Thomas à quatre paramètres avec un critère de Nash moyen sur l'ensemble des bassins de 76.7% et un quantile 0.3 de 75.9 %.

Nous utiliserons ce modèle comme base de comparaison lors du développement du modèle GR2M que nous retraçons ci-après.

On ne peut pas retenir le modèle de Thomas pour l'établissement de liaisons éventuelles entre ses paramètres et ceux du modèle GR4J, pour trois raisons:

1 / Le modèle de Thomas a 4 paramètres comme GR4J, et l'on n'a guère plus de chances de pouvoir les expliquer.

2 / Les paramètres du modèle de Thomas ne sont pas toujours définis avec précision; très souvent un paramètre est imprécis et parfois même deux.

3 / Le modèle de Thomas est d'une conception trop différente de GR4J pour que les liaisons entre paramètres des deux modèles soient simples.

Le modèle GR2M que nous chercherons à développer sera beaucoup plus simple (2 paramètres) et proche de GR4J au moins par la fonction de rendement.

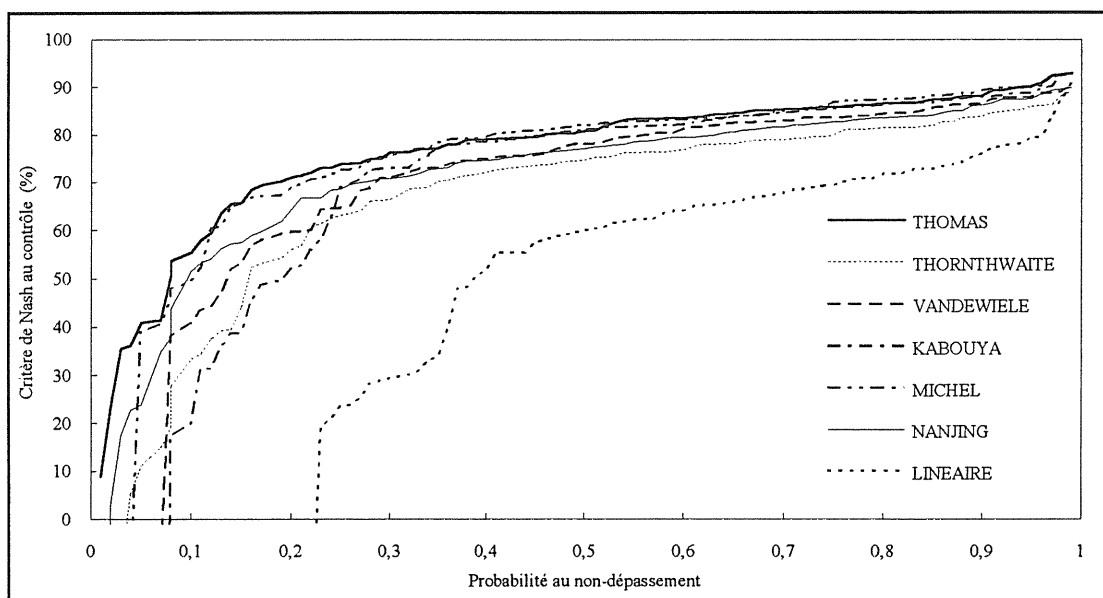


Figure (VII.10): Distribution des critères de Nash pour sept modèles sur 91 bassins versants.

VII.6 - DEVELOPPEMENT DU MODELE GR2M

Le rappel bibliographique nous a permis d'avoir une idée de la variété des différents modèles conceptuels globaux existants pour simuler le comportement d'un bassin versant au pas de temps mensuel. Il nous a permis également de retenir un modèle qui semble très efficace, le modèle *ABCD* de Thomas, et nous pourrions ainsi juger de la qualité du modèle GR2M à la manière dont ce dernier pourra approcher une même qualité de résultats.

VII.6.1 - Idées de base

L'objectif est de mettre au point un modèle de simulation mensuel simple pour pouvoir répondre à une ambition permanente en hydrologie, qui est d'estimer a priori les paramètres sur des bassins sans données hydrométriques (bassins non jaugés).

Dans ce cadre, nous avons mis au point un groupe de variantes de modèles inspirés des travaux sur le modèle GR4J dont les performances sont très correctes dans des régions variées.

Le modèle GR4J schématise un bassin versant par deux réservoirs, un hydrogramme unitaire et une loi d'échange:

1- Un réservoir "sol" ayant une seule sortie, le prélèvement occasionné par l'ETP; il commande la création de la pluie nette.

2- deux hydrogrammes unitaires qui correspondent à la fonction "retard".

3- Un réservoir eau-gravitaire qui assure le tarissement des écoulements (réservoir de routage).

4- Une fonction d'échange susceptible de se produire dans le cas des bassins soumis à un effet de drainance ou encore à un écoulement très intermittent.

Chacun de ces opérateurs comporte le calage d'un seul paramètre.

Le passage du pas de temps journalier au pas de temps mensuel induit la disparition de la fonction "retard". Du coup, la fonction de transfert s'en trouve particulièrement affectée. Le transfert étant plus simple qu'il ne l'est au pas de temps journalier, nous garderons la fonction de production de GR4J avec le même paramètre et nous essayerons de simplifier la fonction de transfert qui dépendra d'un deuxième paramètre.

VII.6.2 - Premier groupe de variantes

Comme base de départ, on a procédé à la constitution d'un groupe de variantes qui s'organise autour de deux réservoirs; chacun de ces réservoirs, caractérisé par un paramètre à caler, représente soit la fonction de transfert soit celle de la production.

Un troisième paramètre est introduit dans deux des variantes. Toutes les variantes ont été testées sur les 91 bassins versants. Le **tableau VII.2** résume les fonctions utilisées et les résultats obtenus sur la période de contrôle. Les origines des différentes variantes sont présentées ci-après.

VII.6.2.1 - Neutralisation initiale entre la pluie et l'évaporation

Nous avons testé différentes versions pour la neutralisation pluie-évaporation.

1 - Une première consiste en une neutralisation totale pluie-évaporation, c'est-à-dire que l'évapotranspiration potentielle (E) agit en totalité sur la pluie (P) correspondante.

$$\begin{aligned} \text{Si } E > P \quad \text{on a } E_n &= E - P & P_n &= 0. \\ \text{Si } E < P \quad \text{on a } E_n &= 0. & P_n &= P - E \end{aligned} \quad (\text{VII.38})$$

Elle sera repérée par le sigle GRM4.

2 - Un deuxième type de variantes introduit une neutralisation définie comme ci-après, avec un exposant Y à définir (variante GRM6). Cette neutralisation consiste à soustraire aux deux entrées une même quantité:

$$F = P \cdot E / (E^Y + P^Y)^{(1/Y)} \quad (\text{VII.39})$$

d'où

$$\begin{aligned} P_n &= P - F \\ E_n &= E - F \end{aligned} \quad (\text{VII.40})$$

Le cas où $Y = 1$ s'écrit:

$$P_n = P^2 / (E + P) \quad \text{et} \quad E_n = E^2 / (E + P) \quad (\text{VII.41})$$

3 - Une dernière variante consiste à abandonner toute neutralisation pluie-évaporation dans le modèle (variante notée GRM5).

VII.6.2.2 - Réservoir sol (Production)

Ce réservoir, qui régit la fonction de production, est caractérisé par sa capacité maximale (α , paramètre à caler). Deux versions de cette fonction ont été utilisées dans des variantes du modèle. La première fonction est celle utilisée dans le modèle journalier ($\alpha = A$) que l'on appellera " PROD. GR4J" dans le **tableau VII.2**; la deuxième fonction est une version simplifiée de la première (variante GRM7), où l'on garde au pas de temps mensuel, les relations instantanées utilisées pour GR4J.

Soit S_1 et S_2 les valeurs de S (capacité du réservoir) en début et fin d'un pas de temps.

$$\begin{aligned} S_2 &= S_1 + P_n \cdot (1 - K^2) \\ \text{avec } K &= S_1 / \alpha \end{aligned} \quad (\text{VII.42})$$

Le niveau du réservoir est réduit de E_r , évaporation réelle, donnée par:

$$E_r = E_n \cdot K(2 - K) \quad (\text{VII.43})$$

VII.6.2.3 - Réservoir eau gravitaire (Transfert)

L'écoulement transite par un réservoir de routage, dont la vidange est fonction de son contenu R , avec un paramètre β à caler (capacité maximale à un mois).

Deux lois sont employées pour la vidange:

1 - La loi linéaire:

$$QR = \beta \cdot R \quad (VII.44)$$

(GRM4, GRM5, GRM6, GRM7)

2 - La loi quadratique:

$$QR = R^2 / (R + \beta) \quad (VII.45)$$

(GRM1, GRM2, GRM3)

VII.6.2.4 - Ecoulement pseudo-direct

On teste l'introduction d'une fraction d'écoulement pseudo-direct (EPD) qui court-circuite le réservoir de routage (variante GRM1). Ce test demande la prise en compte d'un troisième paramètre γ .

VII.6.2.5 - Correction d'entrée

On peut tester l'intérêt d'une correction d'entrée (variante GRM2):

- Soit sur la pluie (P) qui devient:

$$P' = P \cdot \gamma \quad (VII.46)$$

- Soit sur l'évapotranspiration (E) qui devient:

$$E' = E \cdot \gamma \quad (VII.47)$$

- Soit sur les deux entrées simultanément:

$$P' = P \cdot \gamma \quad \text{et} \quad E' = E / \gamma \quad (VII.48)$$

VII.6.2.6 - Comparaison des résultats

Le **tableau VII.2**, illustre ce premier groupe de sept variantes avec leurs caractéristiques, ainsi que les résultats obtenus sur la période de contrôle. Parmi les modèles à deux paramètres, deux variantes se détachent des autres avec des performances raisonnables. Ces deux variantes sont: GRM3 et GRM6.

MODELE	MODULATION DES ENTREES	FONCTION DE PRODUCTION		FONCTION DE TRANSFERT		NB. DE PARA	CONTROLE CRITERES DE NASH			
		NEUTRALISATION	RESERVOIR- SOL	ROUTAGE	EPD.		MOY	QUANT. 0.3	MIN.	MAX.
GRM1		$Y = 1.0$	PROD. GR4J	$R^2 / R + \beta$	$EPD = \gamma$	3	73.2	74.9	-106.	93.0
GRM2	$P' = P \cdot \gamma$ $E' = E / \gamma$ $P' = P \cdot \gamma$ et $E' = E / \gamma$	$Y = 1.0$	PROD. GR4J	$R^2 / R + \beta$		3	70.0	75.6	-539.	93.5
GRM3		$Y = 1.0$	PROD. GR4J	$R^2 / R + \beta$		2	73.4	72.5	-108.	93.1
GRM4		COMPLETE	PROD. GR4J	$R \cdot \beta$		2	65.0	64.8	-23.	90.3
GRM5		SANS NEUTRALISATION	PROD. GR4J	$R \cdot \beta$		2	48.2	57.2	-775.	92.8
GRM6		$Y = 1.25$ (Cf. Tableau VII.3)	PROD. GR4J	$R \cdot \beta$		2	74.1	71.4	-11.	92.6
GRM7		$Y = 1.0$	PROD. SIMPLIFIEE	$R \cdot \beta$		2	69.1	69.8	-81.	90.1

Tableau (VII.2): Caractéristiques et résultats du premier groupe de variantes.

Les deux modèles ont la même production que le modèle GR4J, une vidange quadratique pour le premier et linéaire pour le deuxième et une neutralisation définie avec un exposant respectif Y de 1 et de 1.25 (Cf. **tableau VII.3**).

EXPOSANT (Y)	0.50	1.00	1.20	1.25	1.30	1.40	1.50	2.00	2.50	3.00
NASH MOY.	68.5	73.3	73.3	74.1	74.0	73.9	73.5	71.4	70.2	69.3
QUANT. 0.3	68.0	71.8	71.5	71.4	71.4	71.3	71.3	69.7	69.1	68.5
NASH MIN.	-278.	-77.	-75.	-11.	-13.	-16.	-18.	-56.	-54.	-53.
NASH MAX.	92.1	92.3	92.6	92.6	92.6	92.6	92.5	92.1	91.5	91.1

Tableau (VII.4): Résultats correspondant à différents exposants de neutralisation (modèle GRM6).

VII.6.3 - Introduction d'un écoulement pseudo-direct sur les modèles retenus

Pour respecter la limite de deux paramètres, la solution est d'attribuer un taux fixe à cet écoulement qui court-circuite le réservoir de routage.

On est alors amené à tester différents pourcentages. Il s'agit de déterminer la valeur du pourcentage pour laquelle on obtient les meilleures critères.

Nous avons testé en même temps différentes options de neutralisation et les deux lois de vidange du réservoir (linéaire et quadratique) pour les deux variantes GRM3 et GRM6.

Les résultats de ces essais sont présentés dans le **tableau VII.4** pour la loi quadratique et dans le **tableau VII.5** pour la loi linéaire.

Au vu de ces résultats, les différentes variantes du modèle GRM3 ne présentent pas d'amélioration des critères satisfaisants pour les différents tests (Cf. **tableau VII.4**). Celles du modèle GRM6, par contre, présentent une amélioration nette des critères avec 73.9 pour le Nash moyen et 73.4 pour le quantile 0.3. Cette variante a un taux de 20 % de pluie qui court-circuite le réservoir de routage linéaire, et un exposant de neutralisation de 1. C'est le modèle qu'on appellera GRM par la suite. Ce modèle présente de bons résultats par comparaison à ceux des modèles existants à 3 paramètres.

EPD	5%			
EXPOSANT (Y)	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	68.7	73.4	73.1	72.6
QUANT. 0.3	69.7	73.0	73.7	73.7
NASH MIN.	-300.	-121.	-114.	-123.
EPD	10%			
EXPOSANT (Y)	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	68.4	73.0	72.6	66.9
QUANT. 0.3	69.7	73.3	73.0	72.0
NASH MIN.	-308.	-137.	-132.	-548.
EPD	15			
EXPOSANT (Y)	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	68.0	72.3	70.1	65.0
QUANT. 0.3	69.1	73.2	72.7	72.6
NASH MIN.	-322.	-164.	-317.	-603.
EPD	20%			
EXPOSANT (Y)	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	67.4	71.4	68.9	63.8
QUANT. 0.3	68.4	72.7	73.3	71.4
NASH MIN.	-340.	-195.	-375.	-669.
EPD	25%			
EXPOSANT (Y)	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	66.6	70.2	67.3	61.8
QUANT. 0.3	67.6	72.2	73.0	71.7
NASH MIN.	-360.	-229.	-405.	-718.

Tableau (VII.4): Résultats correspondant à différents taux d'EPD et différents exposants de neutralisation pour la loi de vidange quadratique (modèle GRM3).

EPD	5%				
EXPOSANT (Y)	0.2	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	50.6	68.7	74.1	74.2	71.2
QUANT. 0.3	58.8	67.9	72.0	72.0	71.2
NASH MIN.	-693	-273	-80	-65.	-11.
EPD	10%				
EXPOSANT (Y)	0.2	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	51.0	68.6	74.2	74.3	74.5
QUANT. 0.3	58.7	68.0	71.9	72.4	73.1
NASH MIN.	-694	-273.	-71.0	-41.	-11.
EPD	15%				
EXPOSANT (Y)	0.2	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	51.4	68.6	74.1	74.7	73.8
QUANT. 0.3	59.6	68.0	72.6	72.9	72.5
NASH MIN.	-697.	-275	-65.	5.6	-4.
EPD	20%				
EXPOSANT (Y)	0.2	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	51.4	68.2	73.8	73.9	73.4
QUANT. 0.3	59.0	67.8	73.1	73.4	72.2
NASH MIN.	-706.	-281.	-69.	-3.9	10.
EPD	25%				
EXPOSANT (Y)	0.2	0.5	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	51.0	67.6	72.6	73.0	72.5
QUANT. 0.3	58.3	67.3	71.2	72.2	71.5
NASH MIN.	-718.	-291.	-79.	-19.	5.9

Tableau (VII.5): Résultats correspondant à différents taux d'EPD et différents exposants de neutralisation pour la loi de vidange linéaire (modèle GRM6).

VII.6.4 - Etude de capacité du réservoir sol

Quand on analyse les résultats du modèle GRM relatifs aux valeurs des paramètres, on s'aperçoit que la capacité du réservoir "sol", c'est-à-dire le paramètre α , prend parfois des valeurs extrêmes susceptibles d'entraîner des difficultés lors de la tentative ultérieure d'explication des paramètres. On peut se poser la question de savoir si ce phénomène peut être lié à des entrées inadéquates, par exemple des pluies trop fortes ou trop faibles par rapport à la réalité.

On peut tester cette hypothèse, sans introduire de paramètre supplémentaire, en corrigeant les entrées à partir du moment où le paramètre α (en fait le logarithme de la capacité du réservoir-sol) s'écarte trop de la fourchette habituelle. La valeur moyenne est de 5.2 et l'on peut considérer comme exclu d'avoir un écart supérieur à 5. Pour mieux préciser cet écart maximum nous le noterons Z en nous réservant la possibilité de tester plusieurs valeurs. Il faut, bien entendu, que la correction d'entrées intervienne graduellement. La **figure VII.11** montre le principe de cette correction graduelle.

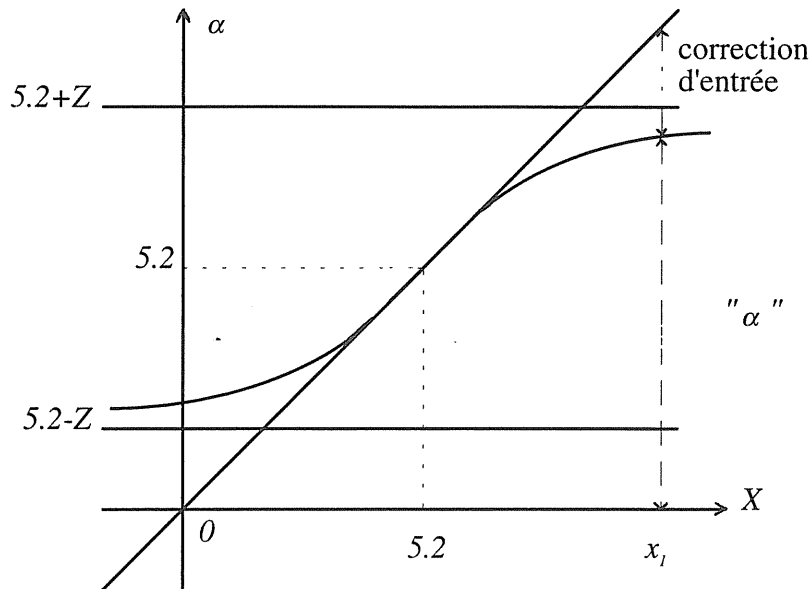


Figure (VII.11): Correction d'entrées concomitante à une valeur extrême pour le paramètre (α).

Appelons x_1 la valeur que nous cherchons à optimiser. Si x_1 est voisin de 5.2, le paramètre α est à peu près égal à x_1 . Par contre si x_1 s'écarte très sensiblement de 5.2 alors le paramètre α tend asymptotiquement vers une limite liée à Z .

Cela peut être traduit analytiquement par l'expression :

$$\alpha = 5.2 + Z \cdot \text{Tanh}((x_1 - 5.2) / Z) \quad (\text{VII.49})$$

Si α est trop fort, cela est généralement attribué à une pluie surévaluée par rapport à la pluie réelle et inversement si α est trop faible. On peut donc associer à de fortes valeurs pour α , une réduction de la pluviométrie et donc utiliser $\exp[\alpha - x_1]$ comme facteur correctif des entrées.

Des essais antérieurs avaient montré qu'il est plus intéressant de modifier les deux entrées pluie et évaporation dans la même proportion et concomitamment. C'est la solution qui a été étudiée en cherchant à préciser la valeur de Z . Ce n'est plus, à proprement parler, une correction des entrées.

Différents essais dont les résultats sont regroupés dans le **tableau VII.6** montrent que la valeur optimale de Z est en fait 0 pour un taux d'EPD de 20 %. Autrement dit, le paramètre α devient fixe et le paramètre à optimiser est une correction commune aux deux entrées du modèle, P et E , que l'on appellera désormais coefficient de modulation des entrées.

VALEUR DE Z	6.0	5.5	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.1
NASH MOY.	75.1	75.1	75.1	75.2	75.3	75.4	75.4	76.1	76.4
QUANT. 0.3	73.9	73.9	73.9	73.9	73.8	74.1	75.1	75.1	75.8
NASH MIN.	5.0	5.2	5.2	5.0	6.8	7.9	13.	17.	16.
NASH MAX.	92.4	92.4	92.4	92.4	92.4	92.4	92.4	92.5	92.6

Tableau (VII.6): Résultats correspondant à différentes valeurs de Z.

Nous noterons **GR2M** ce nouveau modèle.

Comme ce modèle est dans son principe assez différent de GRM, il convient de reprendre quelques unes des analyses précédentes pour les adapter à GR2M. La valeur fixe de la capacité du réservoir sol a été arrondie à 200 mm (Cf. **tableau VII.7**).

VALEUR DE $\ln\alpha$	140	150	160	170	180	190	200	210	300
NASH MOY.	75.8	76.0	76.2	76.2	76.2	76.4	76.2	76.1	74.9
QUANT. 0.3	75.4	75.9	75.7	75.7	75.7	75.6	75.2	75.2	74.1
NASH MIN.	18.	17.	16.	14.	13.	13.	12.	11.	22.
NASH MAX.	91.8	92.1	92.3	92.4	92.5	92.4	92.6	92.6	90.3

Tableau (VII.7): Résultats correspondant à différentes valeurs de $\ln\alpha$.

Il est important de vérifier si la neutralisation partielle adoptée dans le modèle GRM9 est bien adaptée à GR2M. Cet essai (Cf. **Tableau VII.8**), nous montre qu'une neutralisation partielle avec un exposant 1/2 améliore les résultats. Autrement dit, la quantité soustraite aux deux entrées est égale à $\left[P.E / (\sqrt{P} + \sqrt{E})^2 \right]$ au lieu de $\left[P.E / (P + E) \right]$ adopté dans GRM.

EXPOSANT Y	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25
NASH MOY.	75.1	76.3	76.7	77.0	76.8	76.2	75.4
QUANT. 0.3	73.4	75.2	76.3	76.0	75.8	75.2	74.7
NASH MIN.	27.6	27.6	27.0	27.0	20.0	12.0	8.0
NASH MAX.	91.1	91.8	92.2	92.4	92.6	92.6	92.9

Tableau (VII.8): Résultats correspondant à différents exposants de Y.

On doit également procéder à la vérification de la fraction de la pluie qui participe directement à l'écoulement pour laquelle on obtient les meilleurs critères. D'après les résultats des essais obtenus (Cf. **tableau VII.9**), la meilleure fraction pour l'ensemble des 91 bassins est de 20 %.

EPD (%)	5	10	15	20	25	30
NASH MOY.	75.8	76.5	76.7	76.7	76.1	75.4
QUANT. 0.3	75.9	75.9	76.3	76.3	75.5	75.8
NASH MIN.	-9.0	17.	27.	33.4	25.	21.
NASH MAX.	92.2	92.2	92.0	92.2	92.2	92.1

Tableau (VII.9): Résultats correspondants à différents taux d'EPD.

La recherche précédente a finalement conduit à deux modèles simples dotés chacun de deux réservoirs et deux paramètres, GRM et GR2M. Le réservoir sol de GR2M a une capacité de 200 mm, et le deuxième paramètre est le coefficient de modulation des entrées. Ces deux modèles ont une loi de vidange linéaire, un écoulement direct de 20 % et un exposant de neutralisation partielle de 1 pour le premier et de 1/2 pour le second.

Pour choisir entre les deux modèles nous allons faire une comparaison de leurs avantages respectifs.

VII.6.5 - Choix du meilleur modèle mensuel à deux paramètres

On pourra mieux apprécier les performances des deux modèles GRM et GR2M si on les compare aux performances du modèle *ABCD* de Thomas.

Nous avons retenu les mêmes critères déjà utilisés dans la comparaison des différents modèles de simulation mensuels que l'on a relevés dans la littérature.

Le résumé des résultats des simulations des trois modèles est donné dans le **tableau VII.10**. La **figure VII.12** montre la comparaison des distributions des critères de Nash pour les trois modèles.

MODELES	NB. PARA.	NASH MOY.	QUANT. 0.3	NASH MIN.	NASH MAX.
ABCD	4	76.7	75.9	8.9	93.0
GR2M	2	76.7	76.3	33.4	92.2
GRM	2	73.9	73.4	-3.9	92.4

Tableau (VII.10): Résultats des simulations au contrôle des trois modèles.

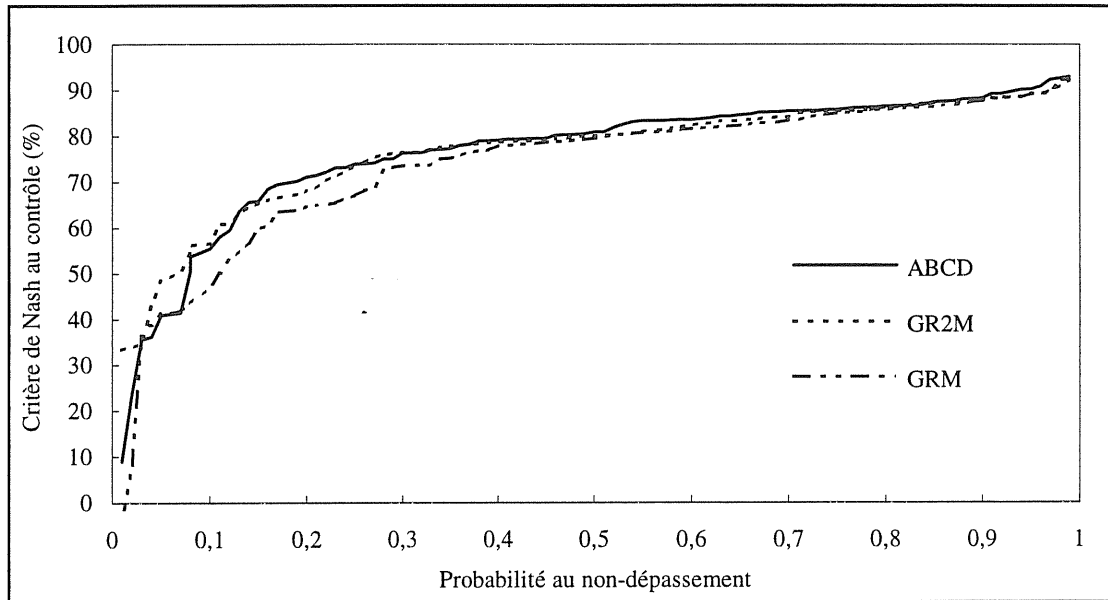


Figure (VII.12): Distributions des critères de Nash pour trois modèles sur les 91 bassins versants étudiés.

Les résultats issus de la simulation du modèle *ABCD* sont meilleurs que ceux obtenus par *GRM*, mais *ABCD* ne le surclasse pas vraiment, et il faut rappeler qu'il y a deux paramètres de différence entre les deux modèles.

On obtient une légère différence entre les distributions du coefficient de Nash sur les 91 bassins en faveur du modèle *GR2M*, dont les performances sont très proches de celles du modèle *ABCD* de Thomas. Les distributions sont très voisines pour ces deux modèles dont nous résumons l'architecture dans les **figures VII.13 et VII.14**.

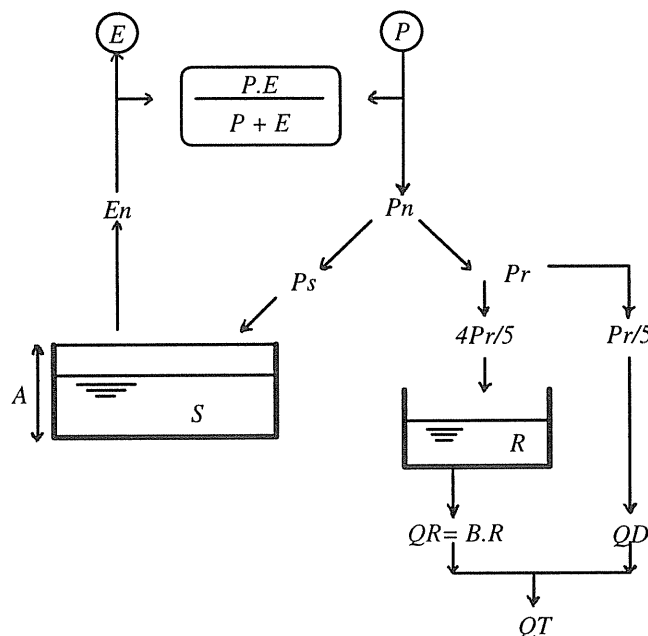


Figure (VII.13): Architecture du modèle GRM

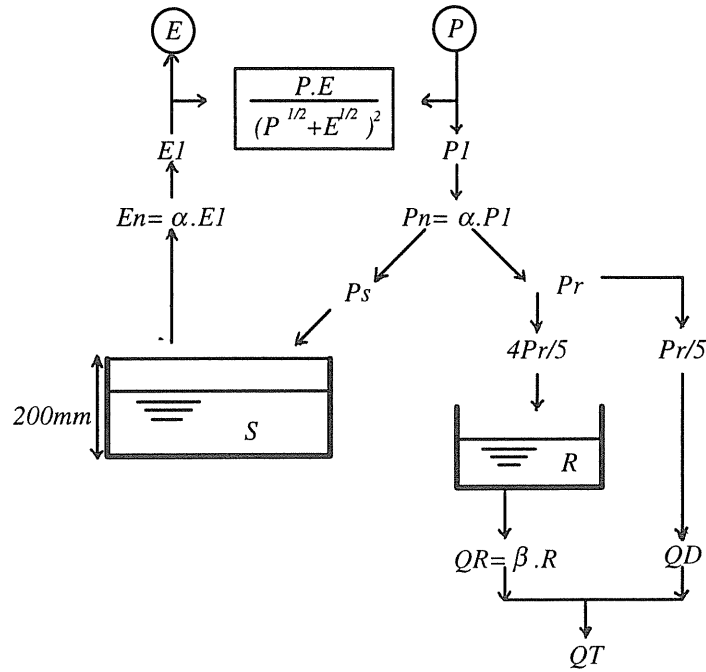


Figure (VII.14): Architecture du modèle GR2M

Les résultats sont résumés dans les **tableaux VII.11 et VII.12** qui présentent les caractéristiques statistiques des distributions et détaillés dans l'**annexe V.4** pour GR2M.

VARIABLE	MODELE						
	GRM			GR2M			ABCD
	a	b	NASH	α	β	NASH	NASH
MOYENNE	5.02	-.08	73.9	-.08	.23	76.7	76.7
MEDIANE	5.36	.19	79.5	-.01	.62	80.1	80.9
ECART-TYPE	.15	1.19	17.2	.21	1.39	12.7	15.3
MINIMUM	0.	-3.68	-3.9	-.49	-3.43	33.4	8.9
MAXIMUM	7.7	2.58	92.4	.62	2.86	92.2	93.0
PREMIER QUARTILE	4.95	-.65	67.0	-.23	-.40	73.5	73.9
TROISIEME QUARTILE	5.64	.64	85.1	.04	1.07	85.6	85.8
INTER-QUARTILE	.69	1.29	18.1	.26	1.47	12.2	11.9

Nash : critère au contrôle, il s'agit des valeurs transformées des paramètres.

Tableau (VII.11): Statistiques des paramètres et du critère pour trois modèles.

BV N°	SURF km ²	MODELE GRM						MODELE GR2M					
		LnA		LnB		N. Cnt	N. Cal	α		β		N. Cnt	N. Cal
		m	s	m	s			m	s	m	s		
01	925	5.07	.09	.56	.19	81.5	80.5	-.02	.03	1.51	.31	79.5	80.7
02	1160	4.16	.17	.28	.17	77.9	84.8	.16	.03	1.53	.31	76.0	85.9
03	2340	5.45	.07	.35	.13	84.7	85.5	-.13	.02	.68	.16	82.7	82.9
04	820	5.48	.14	.03	.17	83.5	74.0	-.19	.03	.62	.20	83.4	77.5
05	802	5.35	.16	-1.49	.19	93.8	54.0	-.15	.07	-1.21	.23	66.6	58.7
06	260	4.75	.14	-.24	.11	89.4	85.9	.14	.03	-.14	.12	91.0	91.4
07	553	5.18	.07	.50	.17	87.7	79.3	-.07	.03	.98	.22	86.8	77.8
08	1200	5.18	.11	-.38	.14	87.5	92.1	-.12	.02	.30	.14	88.5	92.0
09	920	5.43	.06	.86	.22	83.1	77.3	-.21	.03	1.24	.32	78.3	70.8
10	814	5.48	.07	.52	.13	92.3	89.1	-.14	.02	.87	.16	92.2	88.0
11	597	5.36	.10	.64	.19	86.3	83.3	-.06	.03	.80	.21	85.4	82.2
12	1190	4.60	.20	.02	.20	78.7	82.0	.14	.04	.48	.20	86.5	85.9
13	2930	5.37	.17	.10	.21	82.7	85.1	-.07	.05	.26	.21	83.0	85.5
14	1070	5.36	.15	-.41	.18	88.6	82.5	-.16	.03	.20	.17	87.1	83.4
15	1710	5.29	.11	.37	.13	89.2	91.6	-.06	.03	.83	.16	89.4	91.1
16	708	4.40	.18	-.11	.16	78.8	74.6	.18	.03	.40	.19	79.0	70.8
17	336	4.28	.17	.78	.24	79.2	72.7	.25	.03	1.39	.30	87.8	77.8
18	2240	5.48	.11	1.23	.24	81.9	82.1	-.04	.03	1.07	.23	86.2	82.5
19	1060	5.41	.10	.59	.20	81.0	79.5	-.04	.03	.56	.17	83.4	82.1
20	586	4.26	.22	-.65	.19	68.6	55.5	.18	.06	-.21	.25	80.6	63.4
21	1300	1.47	1.71	-1.14	.19	41.8	45.7	.62	.08	-1.49	.23	48.5	51.4
22	756	5.04	.19	.38	.14	65.5	86.1	-.10	.03	1.16	.20	72.2	88.5
23	1730	4.76	.16	-1.00	.14	47.0	86.1	.04	.05	-.79	.20	65.4	88.3
24	930	0.00	8.61	-.92	.14	53.1	49.0	.58	.07	-1.83	.19	60.8	50.5
25	659	5.98	.08	1.15	.19	80.3	73.8	-.27	.03	2.03	.48	84.2	74.3
26	622	5.19	.09	-1.37	.08	79.8	78.2	-.15	.03	-.58	.12	80.2	75.6
27	688	5.82	.50	.40	.10	80.0	77.3	-.20	.02	.66	.15	79.0	75.5
28	559	6.02	.08	.70	.11	77.0	80.3	-.29	.02	1.69	.27	85.8	85.2
29	1970	4.98	.15	-.83	.12	79.5	74.7	-.08	.03	-.10	.15	79.1	75.1
30	894	4.99	.08	-2.57	.06	43.1	44.0	-.02	.02	-2.60	.07	50.4	63.2
31	630	6.90	.23	-3.11	.20	-3.9	60.9	-.45	.03	-3.23	.13	56.6	46.9
32	5560	5.81	.09	-2.98	.09	63.5	59.8	-.24	.03	-2.79	.11	66.1	66.7
33	675	5.30	.11	.22	.16	82.6	82.2	-.11	.03	.78	.20	83.7	81.4
34	896	5.48	.07	.80	.19	83.5	79.9	-.16	.03	1.53	.32	81.4	80.6
35	883	5.44	.09	-.27	.15	75.2	88.1	-.20	.02	.29	.15	78.3	88.7
36	875	5.30	.04	-3.0	.06	59.9	75.6	-.16	.02	-3.04	.07	67.3	84.3
37	922	6.54	.05	.19	.10	65.0	73.7	-.49	.02	1.05	.18	56.1	64.3
38	614	5.04	.11	.50	.16	86.6	89.5	.02	.02	.98	.18	85.7	90.3
39	2940	5.53	.08	.39	.15	84.2	81.3	-.14	.03	.73	.20	82.4	80.3
40	828	5.64	.21	-1.13	.30	65.0	62.2	-.22	.08	-.98	.29	68.6	62.8
41	733	4.50	.14	-1.96	.09	76.6	61.9	.12	.04	-1.96	.13	60.8	72.6
42	747	6.19	.11	-2.83	.10	73.6	81.6	-.29	.03	-2.82	.11	73.5	81.0
43	1370	6.86	.07	1.32	.07	75.7	75.6	-.28	.03	-2.29	.11	80.0	74.8
44	880	5.82	.10	-2.2	.14	56.7	79.3	-.37	.04	-2.02	.15	63.0	76.3
45	1050	7.70	.11	-1.96	.11	7.4	56.2	-.45	.03	-3.43	.10	33.4	81.9
46	1910	5.87	.10	-3.68	.08	41.2	70.8	-.29	.03	-2.28	.11	76.5	76.7
47	659	6.22	.07	-.49	.10	82.1	80.4	-.33	.04	-.68	.16	78.7	78.6
48	820	5.62	.06	.45	.16	84.5	85.3	-.24	.03	.75	.22	80.0	82.7
49	338	5.28	.64	.10	.16	80.5	87.2	-.07	.03	1.17	.22	80.1	85.3
50	473	5.64	.13	-.72	.17	64.6	85.2	-.18	.05	-.60	.17	70.3	83.5
51	434	5.45	.05	1.35	.20	88.4	89.5	-.14	.02	2.07	0.37	85.6	88.3
52	897	6.12	.05	.89	.17	81.1	86.9	-.36	.02	1.32	.27	80.4	87.3
53	634	5.36	.05	.96	.16	92.4	86.1	-.15	.02	1.53	.25	90.0	93.8
54	734	5.60	.06	.69	.18	86.2	87.8	-.23	.03	1.06	.26	82.1	85.0

55	472	5.56	.05	.60	.15	85.2	92.9	-.22	.02	1.00	.22	83.4	78.4
56	597	5.24	.06	1.77	.33	87.2	91.2	-.04	.02	2.39	.55	86.3	89.8
57	476	6.58	.17	.21	.16	68.1	58.0	-.38	.04	1.06	.31	75.4	83.9
58	486	3.66	.21	-1.07	.09	50.2	71.5	.13	.07	-1.37	.20	34.6	58.6
59	522	5.39	.06	.82	.24	75.0	84.5	-.17	.03	1.31	.33	64.6	82.3
60	503	4.91	.11	.44	.22	81.8	82.9	.04	.03	1.04	.22	81.8	83.8
61	403	5.70	.05	1.18	.21	78.4	85.3	-.28	.02	2.00	.43	79.4	83.2
62	477	5.51	.06	.75	.18	82.4	86.2	-.18	.03	1.20	.24	81.1	82.7
63	463	5.52	.06	.87	.21	80.6	86.3	-.19	.03	1.38	.30	78.0	84.1
64	456	5.24	.30	-.24	.24	60.4	56.4	.22	.06	.21	.28	74.4	63.8
65	464	4.95	.11	2.58	.74	79.2	81.2	.16	.03	2.10	.43	83.8	87.9
66	411	6.00	.08	1.66	.36	76.7	67.3	-.36	.03	2.99	1.35	76.2	65.9
67	423	5.40	.07	1.65	.24	79.8	92.6	-.10	.02	2.24	.42	77.8	91.8
68	523	5.20	.11	-.23	.15	85.4	86.9	-.06	.03	.08	.15	85.0	86.9
69	1650	6.14	.08	-.30	.10	85.3	80.8	-.28	.04	-.18	.16	86.3	83.1
70	1130	5.53	.07	.61	.12	89.5	86.6	-.09	.02	.94	.16	89.4	85.6
71	623	5.52	.07	.52	.13	87.2	87.9	-.15	.02	.92	.19	85.6	86.2
72	655	5.02	.10	.12	.16	82.9	88.0	-.03	.02	.80	.18	85.4	85.2
73	358	4.93	.13	1.29	.20	87.3	86.2	.04	.03	1.89	.30	85.5	86.8
74	1380	0.00	5.24	.62	.14	73.3	73.8	.27	.02	.90	.14	85.3	89.2
75	332	4.85	.11	.34	.15	85.1	84.0	.05	.02	1.13	.20	88.4	85.2
76	703	6.47	.08	-.44	.08	67.0	75.0	-.26	.04	-.48	.13	68.1	78.1
77	378	5.21	.20	-.56	.26	72.5	72.1	-.02	.07	-.24	.26	78.7	75.1
78	1150	3.18	.32	-.83	.13	54.9	58.0	.23	.06	-.40	.20	71.3	75.9
79	636	0.00	***	.16	.10	78.2	77.5	.25	.04	.14	.13	84.2	84.0
80	771	.55	***	-.65	.17	43.6	48.5	.34	.08	-.58	.25	54.6	61.3
81	473	1.99	1.58	-.06	.23	36.4	76.0	.36	.08	-.02	.34	43.1	83.8
82	440	4.07	.19	-.43	.11	66.4	76.7	.20	.03	-.21	.13	77.2	84.5
83	905	5.04	.09	.25	.09	73.5	87.7	.04	.02	.31	.10	78.6	89.7
84	798	5.78	.06	2.04	.35	88.2	87.4	.18	.02	1.99	.34	85.9	88.1
85	517	5.88	.04	.83	.13	87.6	89.2	-.28	.02	1.04	.14	88.7	90.7
86	676	0.00	***	-2.05	.22	38.7	21.1	.37	.08	-2.61	.23	34.0	20.2
87	451	5.55	.15	-.26	.17	73.6	69.0	-.09	.05	-.29	.16	77.6	69.1
88	316	5.30	.11	.06	.19	81.6	86.8	-.06	.04	.22	.18	80.3	85.7
89	604	5.48	.09	.59	.22	77.9	84.4	-.12	.03	.78	.25	76.4	82.4
90	379	5.40	.12	-.02	.16	87.6	92.5	-.10	.03	.27	.18	86.8	91.7
91	315	5.83	.08	.34	.19	87.6	82.0	-.29	.04	.69	.26	87.6	81.9

***: écart-type trop grand, non calculé.

m: Valeur du paramètre.

s: Ecart-type du paramètre.

N. Cnt. : Valeur du critère de Nash au contrôle.

N. Cal. : Valeur du critère de Nash au calage.

Tableau (VII.12): Résultats des simulations sur les 91 bassins versants.

Une autre comparaison entre les deux modèles peut porter sur les valeurs des paramètres. Pour le modèle GRM le paramètre "a" peut prendre des valeurs assez éloignées de la majeure partie de l'échantillon; c'est ce que l'on observe sur la distribution de la **figure VII.15** où il est compris entre 0. et 7.7, alors que la valeur moyenne est de 5.02. Le premier paramètre de GR2M qui correspond à la modulation des entrées a une distribution régulière autour de sa moyenne -0.07; ses valeurs extrêmes sont -0.49 et 0.62.

Le deuxième paramètre représente pour les deux modèles la constante de temps du réservoir eau-gravitaire avec une vidange linéaire. Les deux distributions (Cf. **figure VII.16**) ont la même allure. La distribution pour le modèle GR2M est un peu au-dessus de celle du modèle GRM; les deux distributions s'entrecroisent pour les valeurs inférieures à une fréquence de 0.2.

Pour terminer cette comparaison entre GR2M et GRM, il faut s'assurer que la supériorité de GR2M n'est pas due à un aspect de correction des entrées.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord sélectionné tous les bassins mal simulés par le modèle GRM ainsi que tous ceux qui ont une capacité du réservoir sol inférieure à 4 pour GRM (Cf. **tableau VII.13**). Cette analyse va nous renseigner sur l'intérêt spécifique du premier paramètre du modèle GR2M.

Afin d'élargir la comparaison, nous avons repris deux variantes de GRM: GRM3 et GRM2 qui ont respectivement la même architecture, sauf que pour GRM2 (Cf. § VII.6.2.3, et VII.6.2.5), il existe un paramètre supplémentaire de modulation des entrées.

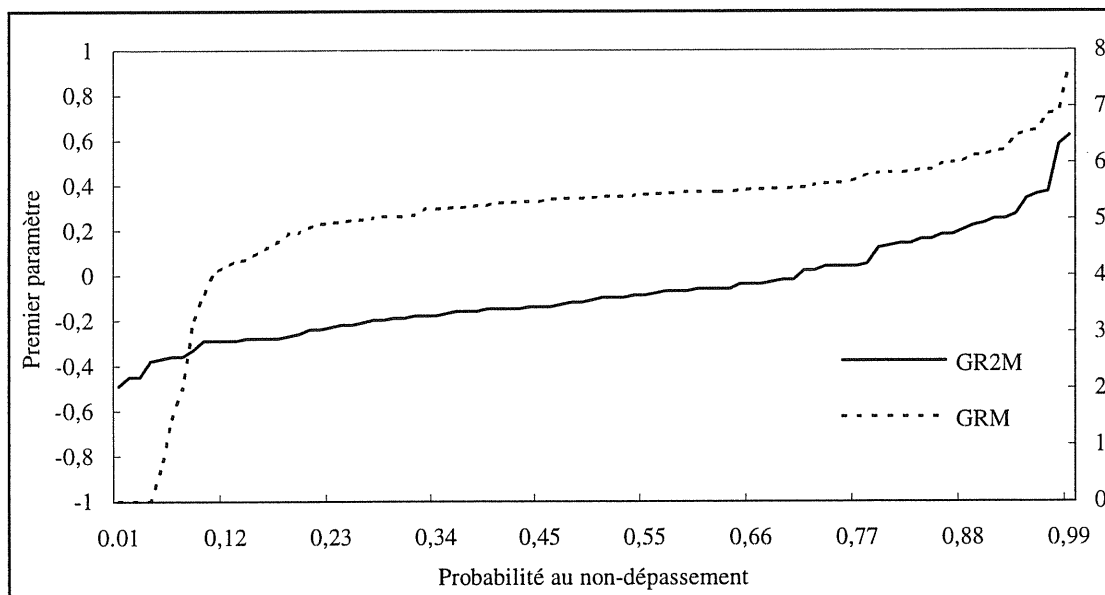


Figure (VII.15): Distributions du premier paramètre pour les modèles GR2M et GRM.

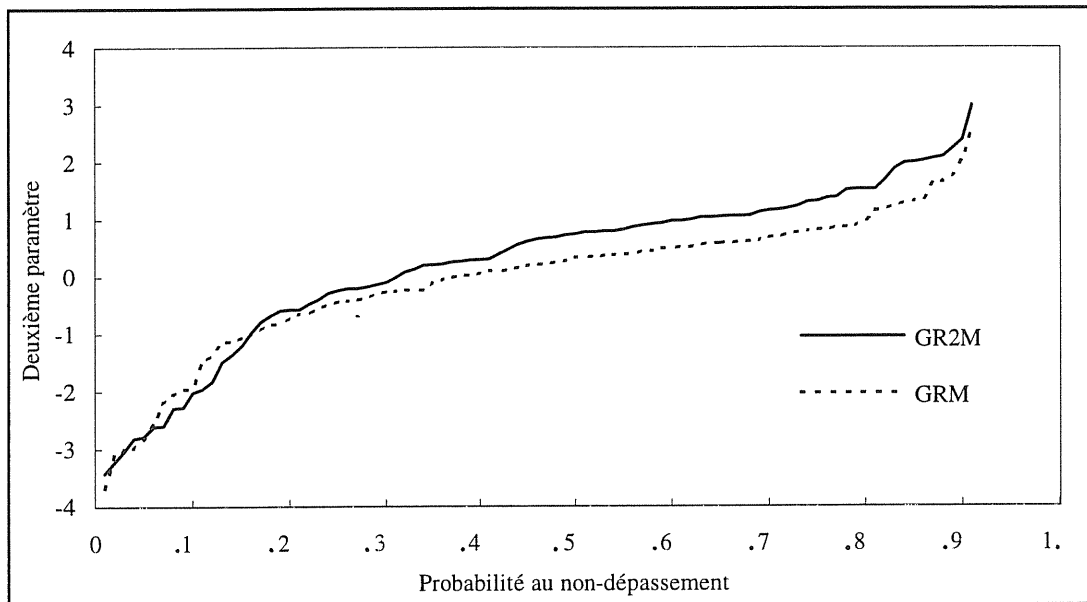


Figure (VII.16): Distributions du deuxième paramètre pour les modèles GR2M et GRM.

	A F		MODELE													
			GRM3		GRM2 <i>P.C, E/C</i>		GRM2 <i>P.C</i>		GRM2 <i>E/C</i>		GR2M		GRM		ABCD	
			Cal	Cnt	Cal	Cnt	Cal	Cnt	Cal	Cnt	Cal	Cnt	Cal	Cnt	Cal	Cnt
01	*	*	44.7	43.1	58.1	48.5	45.5	42.4	57.1	50.7	51.4	48.5	45.7	41.0	55.1	50.7
02		*	85.1	63.6	84.2	46.2	84.9	46.2	92.8	76.4	88.3	65.4	86.0	47.0	92.3	76.4
03	*		51.0	55.6	55.7	67.5	55.6	65.0	58.9	71.4	50.5	60.8	49.0	53.1	60.1	71.4
04		*	78.5	70.1	81.6	74.3	80.4	71.2	84.2	79.1	63.2	50.4	44.0	43.1	89.3	79.1
05		*	77.8	***	65.0	***	61.7	***	59.2	8.9	46.9	56.6	60.9	***	78.8	8.9
06		*	76.0	***	73.7	***	78.7	***	76.1	23.4	81.9	33.4	56.2	7.4	63.6	23.4
07		*	71.8	65.3	54.6	53.5	75.4	67.1	73.1	36.2	76.7	76.5	70.8	41.2	75.3	36.2
08	*		69.7	50.4	74.9	54.4	74.9	55.0	75.1	55.4	58.6	34.6	71.5	50.2	74.1	55.4
09	*		75.2	75.6	86.8	85.2	87.7	85.3	78.9	82.6	89.2	85.3	73.8	73.3	81.8	82.6
10	*		60.7	56.6	75.4	73.3	74.2	73.6	74.8	74.0	75.9	71.3	58.0	54.9	78.1	74.0
11	*		78.5	81.4	84.7	86.0	84.0	85.5	80.8	84.8	84.0	84.2	77.5	78.2	81.4	84.8
12	*	*	51.7	44.1	62.7	54.2	61.7	52.3	60.7	58.0	61.3	54.6	48.5	43.6	62.5	58.0
13	*	*	76.7	39.0	86.6	43.3	85.5	42.4	84.8	41.1	83.8	43.1	76.0	36.4	85.1	41.4
14	*	*	25.6	42.8	29.3	44.2	24.5	42.8	32.0	53.7	20.2	34.0	21.1	38.7	35.4	53.7

A : Valeur du paramètre A < 4 pour le modèle GRM;
 F : Critère de Nash inférieur à 50 % avec le modèle GRM;

Tableau (VII.13): Résultats des simulations sur les 14 bassins versants.

Le **tableau VII.13** résume les résultats des 14 bassins pour les 4 modèles; il nous permet de faire les remarques suivantes:

- La modulation des entrées apporte à chaque fois une amélioration pour le cas du modèle GRM2.
- Le modèle GR2M se comporte mieux pour les bassins mal simulés, (Cf. **figure VII.17**).

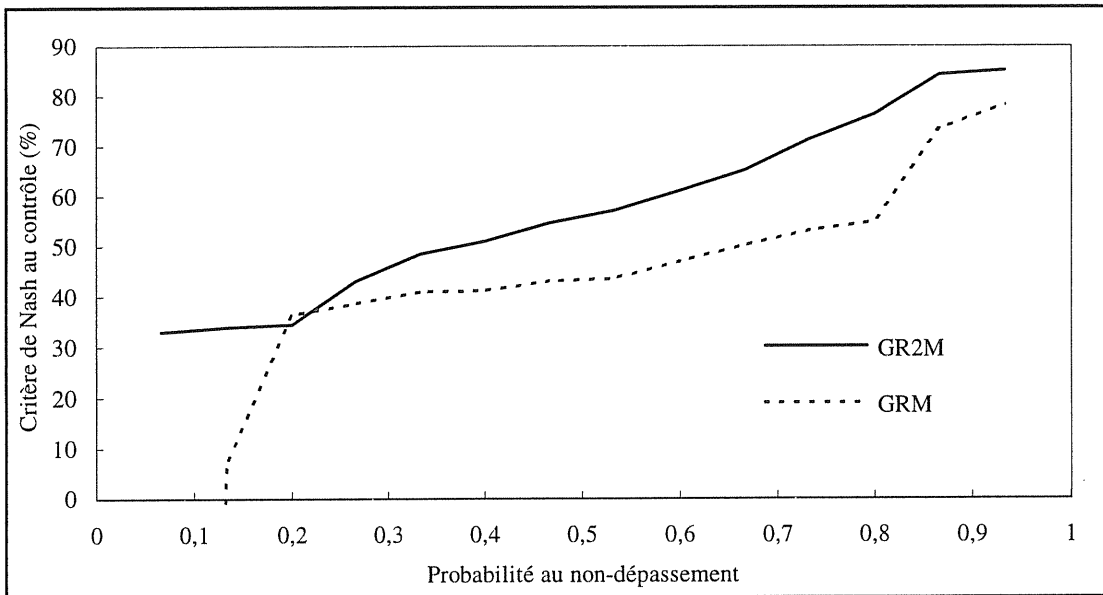


Figure (VII.17): Distributions des critères de Nash pour les 14 bassins pour GRM et GR2M.

Pour confirmer ces résultats, nous avons focalisé la comparaison sur les bassins qui ne conduisent pas à une amélioration de GRM2 quand on corrige les entrées. Nous avons donc écarté tous les bassins dont le troisième paramètre du modèle GRM2 apporte une nette amélioration. Ces bassins sont au nombre de 13. Nous avons retracé la distribution pour les 78 bassins versants restant. **La figure VII.18** montre les distributions des critères de Nash pour les trois modèles. On voit que le modèle GR2M reste meilleur que GRM et GRM2.

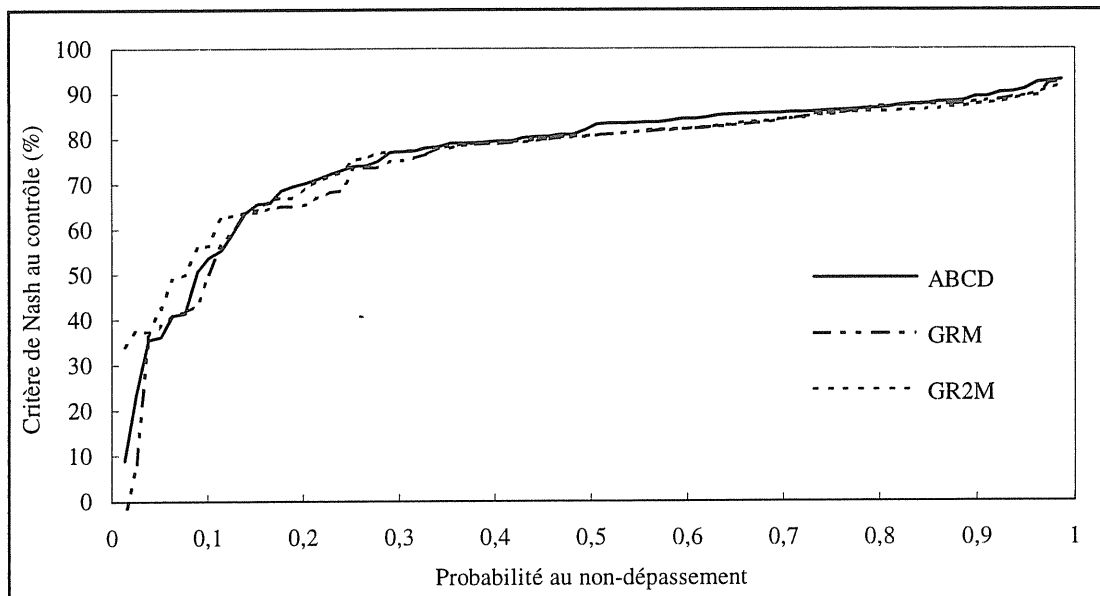


Figure (VII.18): Distributions des critères de Nash pour trois modèles sur 78 bassins versants.

VII.7 - ETUDE DE LA RUSTICITE DU MODELE GR2M

La rusticité de GR2M peut être démontrée en comparant les distributions des critères de Nash correspondant d'abord aux périodes de 'calage' et ensuite aux périodes de 'vérification' comme montré sur la **figure VII.19**. Il ne semble pas y avoir de différence sensible dans le critère de qualité (pour la période de vérification) entre les bassins de petite taille et ceux de grande taille, comme on le voit sur la **figure VII.20**.

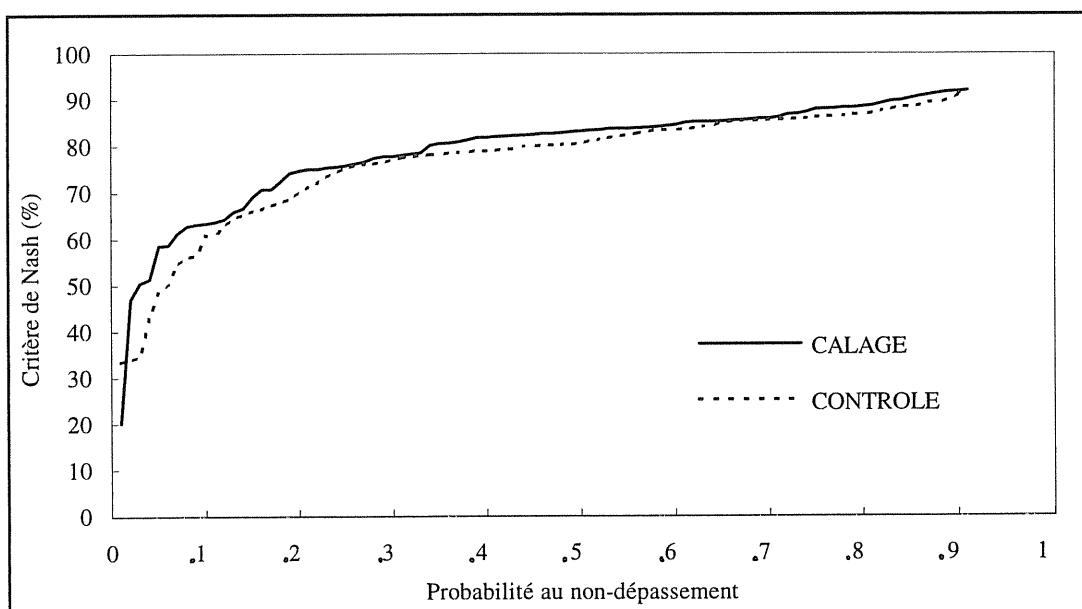


Figure (VII.19): Diminution des critères de Nash en passant du calage au contrôle.

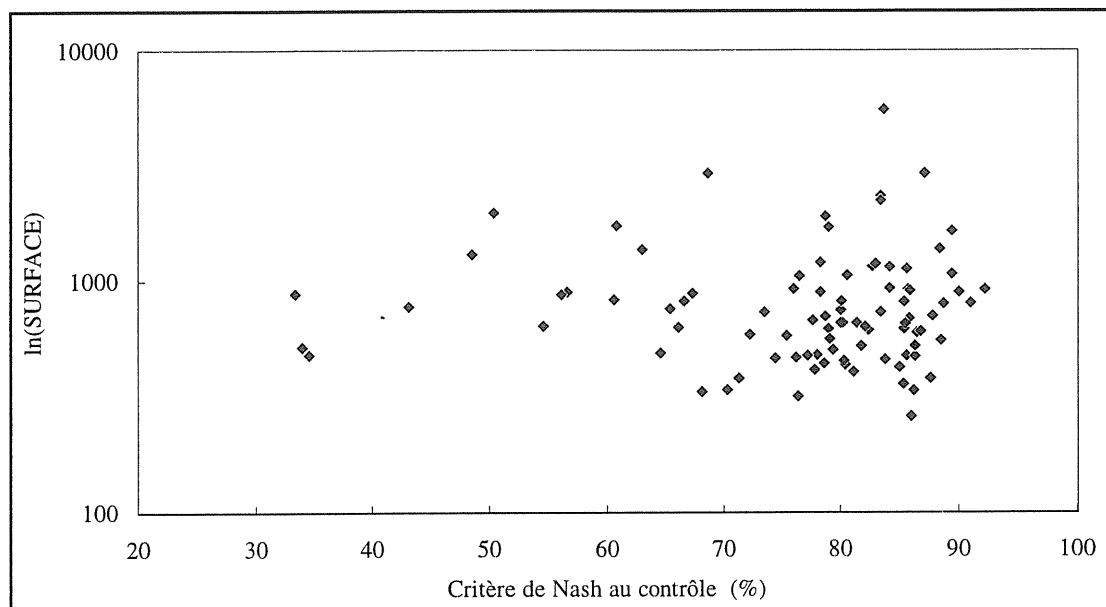


Figure (VII.20): Absence de corrélation entre la superficie des bassins et le critère de Nash

VII.8 - TESTS SUR LE MODELE GR2M

Il est très intéressant de voir les performances du modèle GR2M, on le comparant au même modèle mais avec respectivement les 200 mm du réservoir "sol" (1), les 20 % de l'écoulement pseudo-direct (EPD) (2) et les deux simultanément optimisés (3) sur les deux périodes (calage contrôle).

Respectivement les figures VII.21 et VII.22 illustrent les distributions des critères sur la période de calage et la période de contrôle. Le tableau VII.14 résume les résultats de ces modèles.

	PERIODE DE CALAGE				PERIODE DE CONTROLE			
	GR2M	1	2	3	GR2M	1	2	3
NB PARA	2	3	3	4	2	3	3	4
N. MOY.	79.0	80.3	80.6	81.6	76.7	77.1	77.4	77.0
QUANT.0.3	77.3	78.4	79.9	80.6	76.3	76.8	75.9	76.3
N. MIN	20.2	19.9	23.4	29.3	33.4	9.4	31.8	29.8
N. MAX.	92.0	92.6	92.5	92.8	92.2	92.1	92.2	92.1

Tableau (VII.14): Résultats des différentes simulations.

Les gains obtenus pour les modèles à 3 ou 4 paramètres sont si faibles qu'il est plus judicieux de rester à deux paramètres.

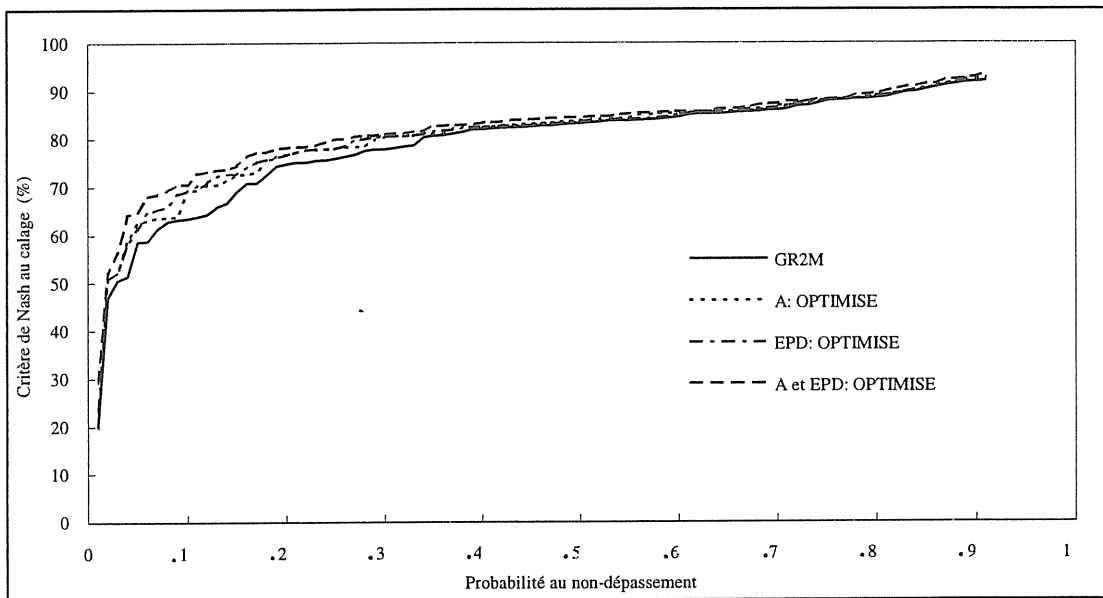


Figure (VII.21): Gain obtenu au calage pour les différents tests de modèles

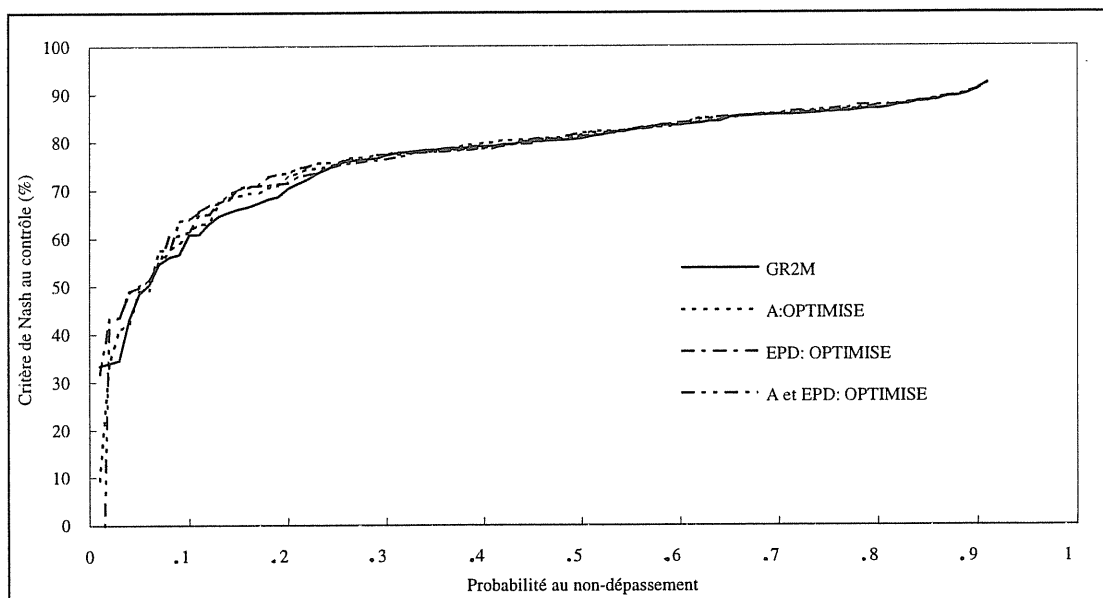


Figure (VII.22): Gain obtenu au contrôle pour les différents tests de modèles.

VII.9 - APPLICATION DU MODELE GR2M AU BASSIN DE BAR-SUR-SEINE

Comme exemple, les débits mensuels générés par GR2M sont montrés pour la Seine à Bar-sur-Seine (2340 km²) en amont de Paris dans la **figure VII.23**. Pour ce bassin, quelques statistiques sur les résidus sont présentées dans le **tableau VII.15**.

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
erreur moyenne (mm)	5	10	0	6	0	0	0	-1	0	1	0	7
erreur quadrat. moy. (mm)	17	13	11	9	6	8	3	5	5	7	6	16
auto-corrélation des erreurs	.19	-.38	-.01	-.42	-.11	-.04	.48	.36	-.28	.43	.01	-.37

Tableau (VII.15): Statistiques sur les résidus pour la Seine à Bar-sur-Seine.
(période de vérification (64-80), Critère de Nash: 82.7 %)

VII.10 - TENTATIVE DE REGIONALISATION DES DEUX PARAMETRES

La régionalisation des paramètres est basée sur le constat d'une éventuelle constance d'un paramètre dans une région donnée. Il est intéressant de reporter sur un graphe les différents bassins en prenant $\ln(\alpha)$ et $\ln(\beta)$ comme coordonnées. Nous avons également reporté sur la carte de France les bassins présentant soit une faible valeur ou une grande valeur pour l'un des deux paramètres de GR2M, comme on peut le voir sur les **figures VII.23.b** et **VII.24.b** respectivement pour $\ln(\alpha)$ et $\ln(\beta)$. Le domaine de variation de chaque paramètre a été divisé en cinq intervalles d'égale fréquence. Seuls les bassins où les valeurs des paramètres se trouvent soit dans l'intervalle supérieur soit dans l'intervalle inférieur figurent sur la carte.

VII.10.1 - Paramètre α

Les valeurs du paramètre α qui représente la modulation conjointe des entrées variant de -0.49 à 0.62 ont été réparties dans les cinq classes suivantes:

- 1 - $\alpha \leq -0.25$
- 2 - $\alpha \in]-0.25, -0.15]$
- 3 - $\alpha \in]0.15, -0.06]$
- 4 - $\alpha \in]-0.06, 0.13]$
- 5 - $\alpha > 0.13$

La **figure VII.23.a** relative aux bassins ayant un paramètre α supérieur à 0.13 montre un léger regroupement pour le Sud de la France à l'exception de quatre bassins (trois au Nord-Est et un bassin au Nord-Ouest). Pour les valeurs faibles de α inférieur à -0.25, la même figure montre une grande variabilité spatiale sauf peut être pour le Centre-Nord de la France.

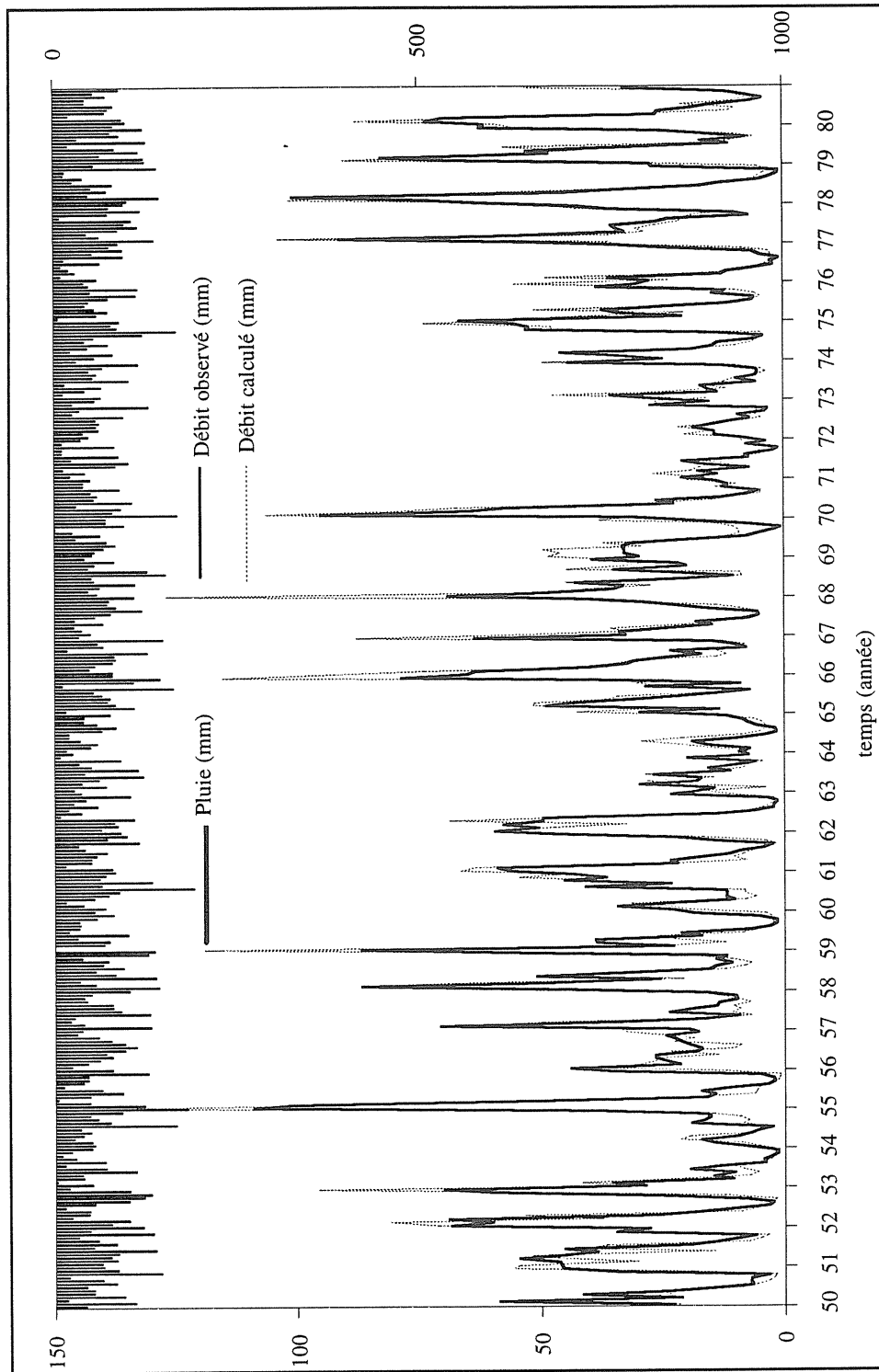


Figure (VII.) : Débits générés par GR2M pour la Seine à Bar-sur-Seine.
Calage sur : 1950-1963; Contrôle sur : 1964-1980.

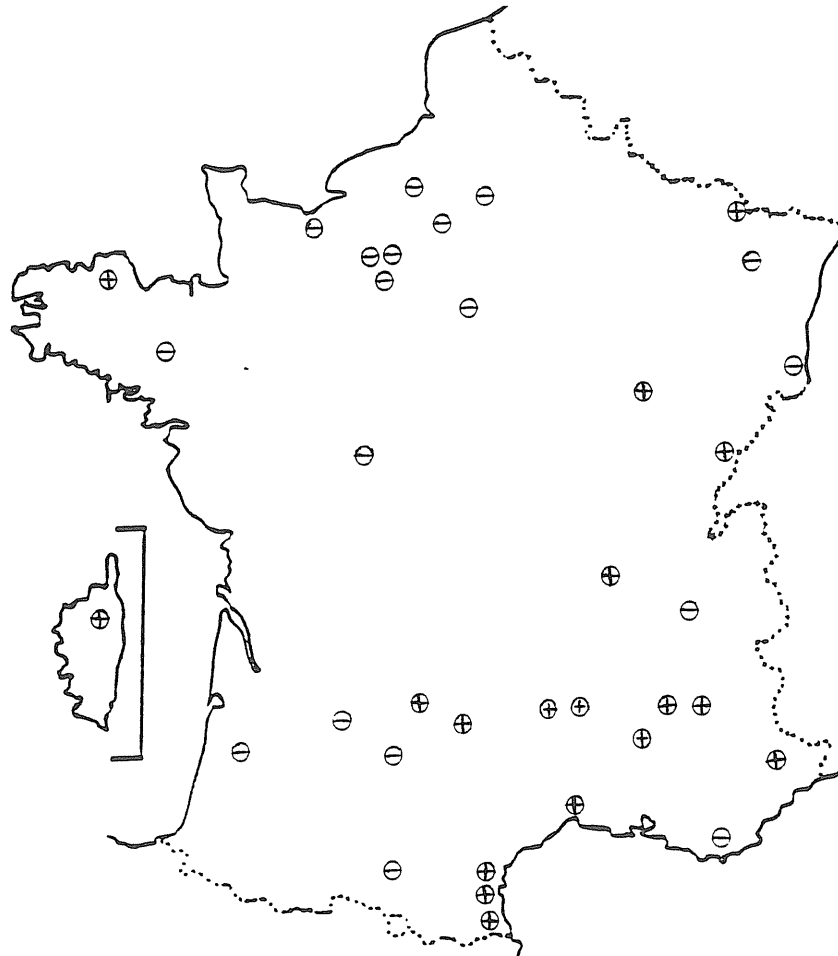


Figure (VII.23.a): Situation géographique des bassins ayant une forte ou une faible valeur pour le paramètre α .

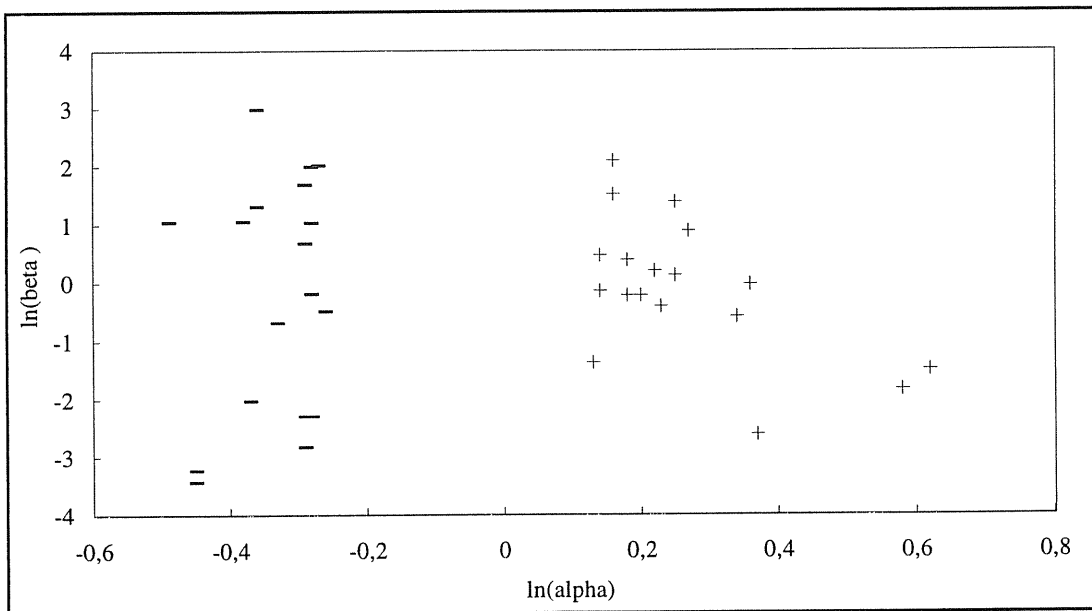


Figure (VII.23.b): Couples de paramètres pour lesquels α est soit faible soit fort dans l'espace $(\ln \alpha), (\ln \beta)$.

VII.10.2 - Paramètre β :

Le paramètre β qui caractérise la constante de temps du réservoir linéaire varie de -3.42 à 2.86. Comme pour le paramètre α cet intervalle de variation a été découpé en cinq classes:

- 1 - $\beta \leq -0.60$
- 2 - $\beta \in]-0.60, 0.23]$
- 3 - $\beta \in]0.23, 0.85]$
- 4 - $\beta \in]0.85, 1.25]$
- 5 - $\beta > 1.25$

La figure VII.24.a montre que la répartition spatiale des bassins ayant un paramètre β inférieur à -0.60 est aléatoire sauf pour la partie Centre-Nord où un certain nombre de bassins sont regroupés. Cette figure montre que le regroupement des bassins ayant un paramètre β supérieur ne semble pas possible.

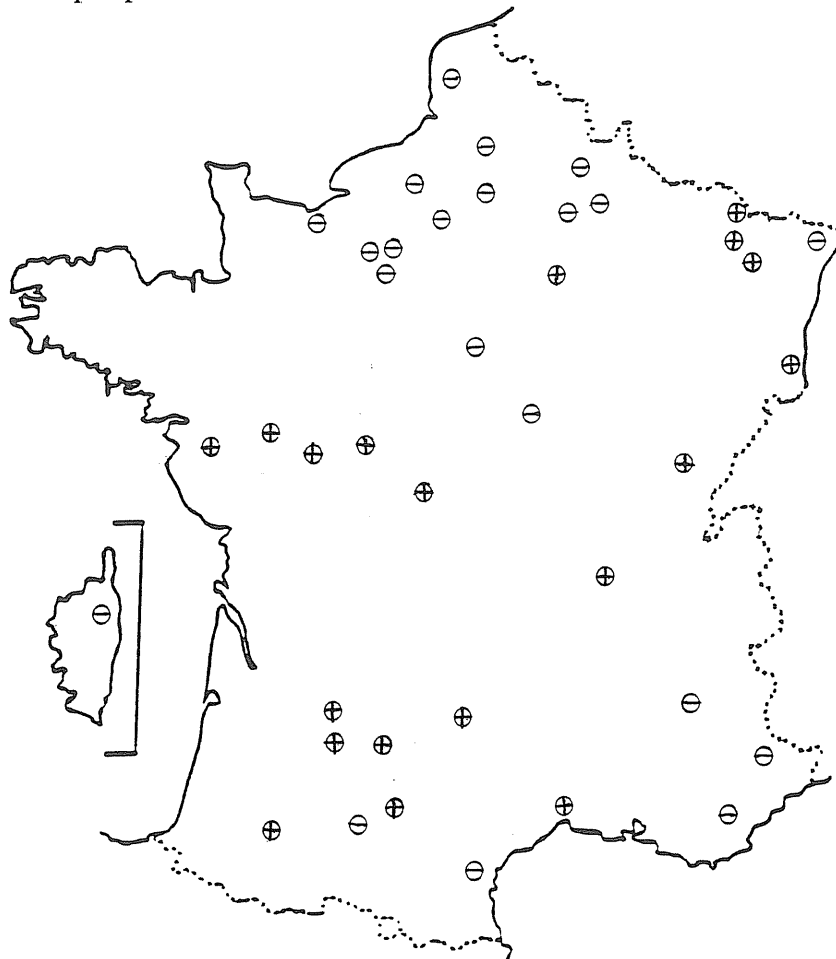


Figure (VII.24.a): Situation géographique des bassins ayant une forte ou faible valeur pour le paramètre β .

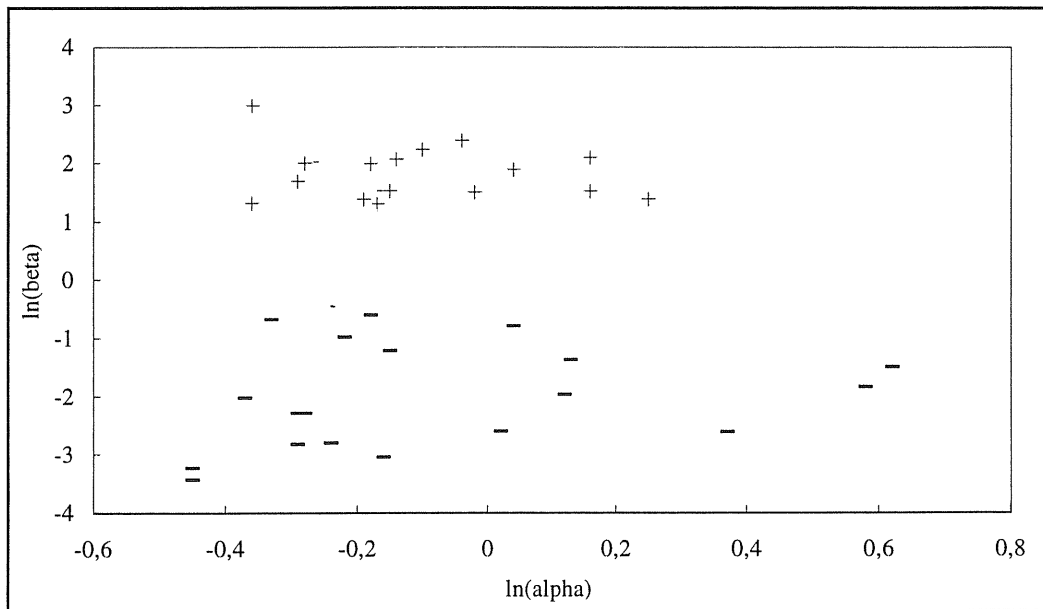
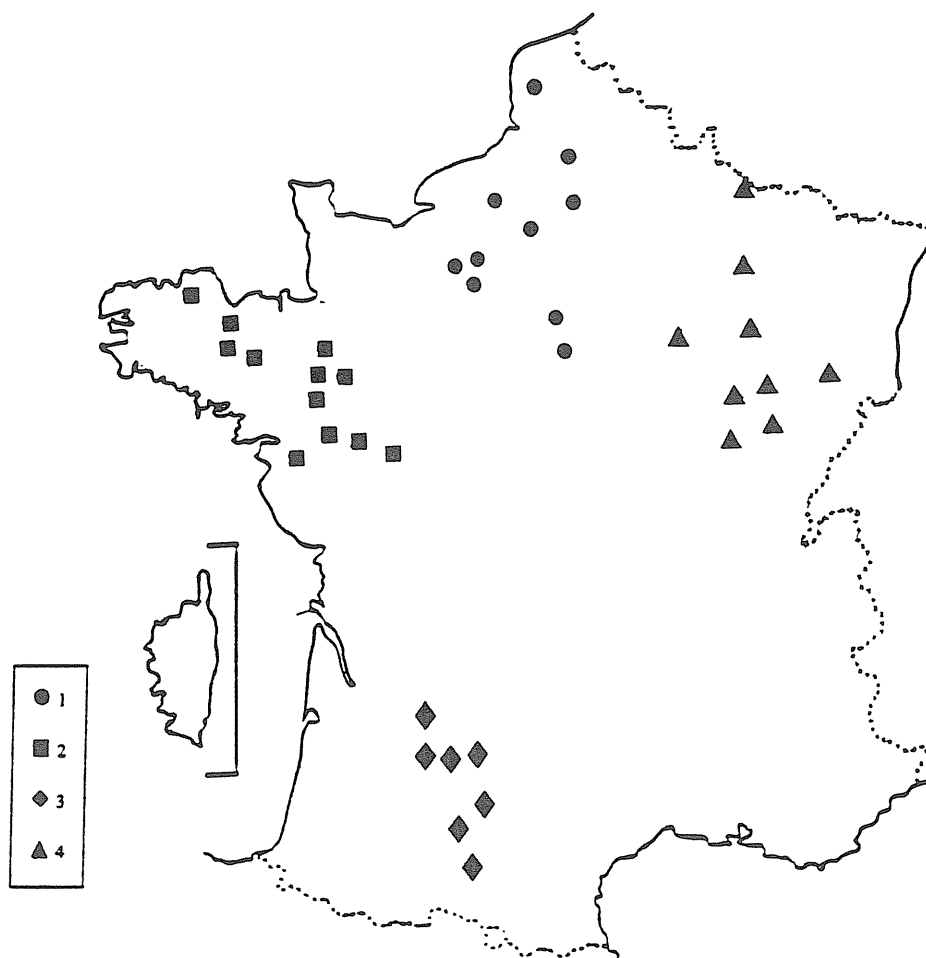


Figure (VII.24.b): Couples de paramètres pour lesquels β est soit faible soit fort dans l'espace $(\ln \alpha), (\ln \beta)$.

Une troisième analyse a consisté à identifier dans l'espace $[\ln(\alpha), \ln(\beta)]$ les bassins appartenant à certaines régions homogènes typiques. Dans les **figures VII.25.a** et **VII.25.b**, on peut voir l'emplacement des couples de paramètres correspondant aux bassins de quatre régions qui peuvent sembler homogènes du point de vue de la géologie et de la pédologie (cartes pédologique et géologique au 1/1.000.000)

L'analyse des cartes montre la variabilité spatiale des paramètres du modèle GR2M, sauf pour la région Centre-Nord où les valeurs des paramètres sont très typées avec des valeurs de α et β faibles ($\alpha \leq -0,25, \beta \leq -0,2$.)



- (1) : Terrains tertiaires du bassin parisien, sols lessivés;
(2) : Roches métamorphiques primaires, sols bruns acides;
(3) : Roches tertiaires du bassin aquitain , sols lessivés calcaires;
(4) : Roches de l'ère secondaire, redzines rouges.

Figure (VII.25.a): Régions apparemment homogènes d'un point de vue géologique et pédologique.

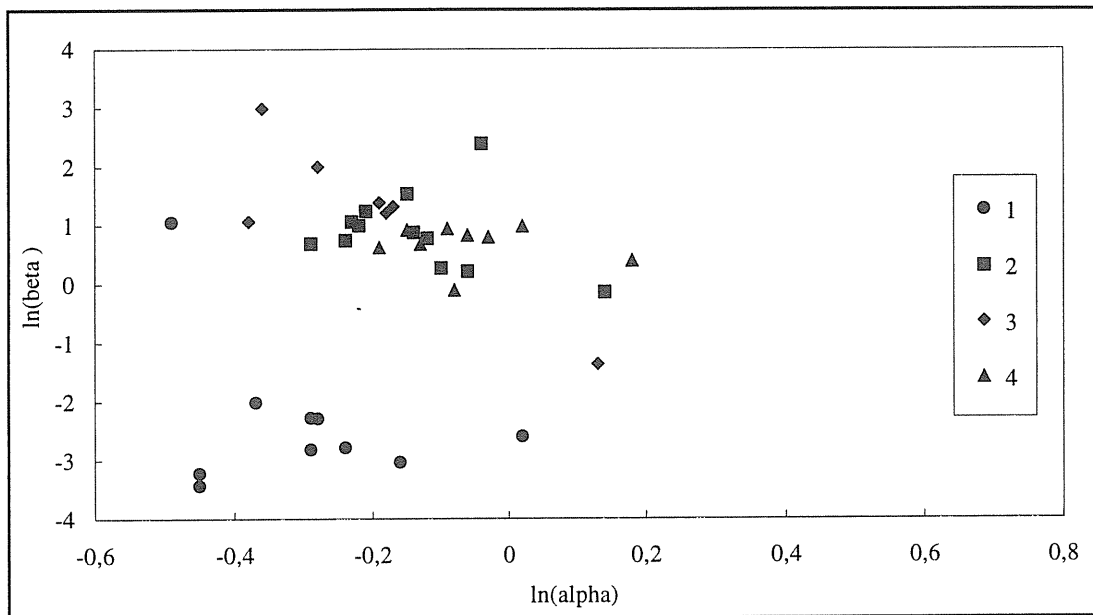


Figure (VII.25.b): Couples de paramètres de bassins situés dans des régions apparemment homogènes par la géologie et la pédologie.

VII.11 - CONCLUSION

Les simulations mensuelles réalisées avec un grand nombre de modèles ont permis de mettre au point un modèle très simple à deux réservoirs et deux paramètres: le premier représente une modulation conjointe des entrées et le deuxième caractérise la constante de temps du réservoir linéaire eau-gravitaire.

Le modèle GR2M, malgré sa simplicité parvient à donner des résultats très satisfaisants avec deux paramètres seulement puisqu'il surclasse tous les modèles à trois paramètres relevés dans la littérature et supporte très bien la comparaison avec un modèle performant à 4 paramètres (le modèle ABCD de Thomas) (Cf. figure VII.26).

La tentative de régionalisation nous a montré qu'il est difficile d'établir une liaison convaincante avec le zonage d'une carte pédologique et géologique. A première vue, les résultats ne sont pas simples à analyser. Il apparaît un certain nombre de points "en dehors de l'épure", même dans une région réputée homogène. Il est clair qu'un supplément d'analyse est nécessaire pour clarifier cette situation.

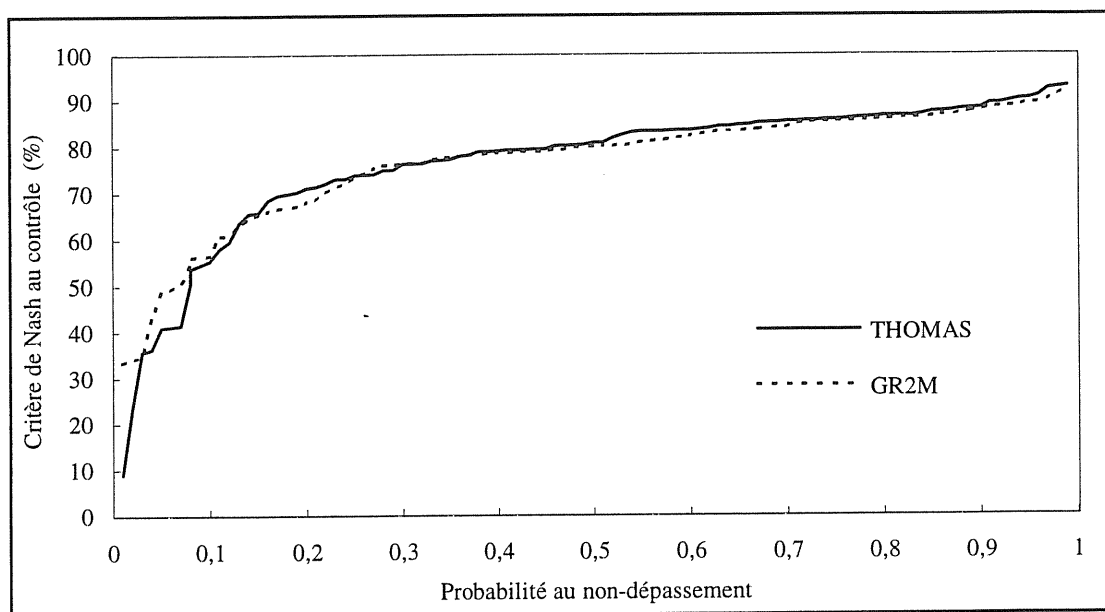


Figure (VII.26): Comparaison des distributions du critère de Nash pour deux modèles sur 91 bassins versants.

L'objectif fixé en début de cette partie est atteint. Il reste maintenant à relier les paramètres des deux modèles journalier et mensuel et ensuite à relier les paramètres du modèle mensuel aux caractéristiques physiques, en espérant que ce détour par un modèle mensuel très simple permettra de faciliter la recherche.

CHAPITRE VIII

ESTIMATION DES DEUX PARAMETRES DU MODELE MENSUEL SUR LA REGION BRETAGNE.

VIII.1 - INTRODUCTION

L'objectif poursuivi ici est de tenter de déterminer les relations entre les deux paramètres du modèle mensuel GR2M et les caractéristiques physiques disponibles sur la région Bretagne. Cette étude est composée de trois parties. Dans la première partie, on analysera l'ensemble des caractéristiques des bassins versants utilisés et on examinera les corrélations existantes entre ces variables. La deuxième partie concernera le calage des deux paramètres du modèle sur tous les bassins et la qualité de cet ajustement. On terminera par la démarche de mise au point du modèle régional et sa validation sur d'autres périodes de ces mêmes bassins et sur d'autres bassins n'ayant pas servi à la mise au point du modèle.

VIII.2 - DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES

Les différents bassins versants, au nombre de 42, sont situés sur la région Bretagne (Cf. figure VIII.1), ils sont numérotés de 1 à 42 et leurs tailles varient de 10 à 820 km².

Les données utilisées dans ce chapitre sont de nature hydrométrique et pluviométrique mensuelles et englobent des données moyennes interannuelles d'évapotranspiration potentielle (ETP, Penman).

Le fichier des caractéristiques physiographiques et climatiques mis au point par Duffar au BRGM en 1982 apparaît sur le tableau VIII.1. Chaque bassin est caractérisé par 13 variables qui sont les suivantes:

VIII.2.1 - Caractéristiques morphologiques

- V1 - SURF : Superficie du bassin versant (km²).
- V2 - IALL : Indice d'allongement du plus long cours d'eau.
- V3 - ALTI : Altitude moyenne estimée au milieu du plus long thalweg (mètre).
- V4 - PENT : Pente moyenne du plus long cours d'eau (°/100).
- V5 - LONG : Longueur du plus long thalweg (km).
- V6 - LCHE : Longueur totale du chevelu (km). Ce sont les longueurs de cours d'eau pérennes ou non mesurées sur les cartes IGN au 1/100 000.
- V7 - NBCO : Nombre de cours d'eau du bassin versant (sans unité). C'est le nombre de confluence + 1, chaque bras multiple est compté comme un cours d'eau.
- V8 - DEDR : Densité de drainage du bassin versant (km⁻¹): $DEDR = \frac{LCHE}{SURF}$.
- V9 - SDRK : Surface drainée par km de cours d'eau (km).
- V10 - NBCK : Nombre de cours d'eau par km² de bassin versant (km⁻²).
- V11 - SDRE : Surface drainée par cours d'eau (km²).

VIII.2.2 - Géologie des bassins

A partir de cartes géologiques couvrant la Bretagne, Duffar à pu définir:

V12 - **PSCH** : Pourcentage de superficie à affleurement de schiste (%).

V13 - **PGRA** : Pourcentage de superficie à affleurement de granite (%);

V14 - **PSED** : Pourcentage de superficie à affleurement de sédiment (%).

VIII.3 - ANALYSE DU TABLEAU DES DONNEES PHYSIQUES

On dispose de données hydrométriques sur 42 bassins versants bretons. Pour 12 de ces bassins, on ne dispose pas de toutes les variables morphologiques et géologiques. L'analyse d'explication des paramètres du modèle GR2M ne sera donc effectuée que sur 30 bassins.

On a calculé la matrice des corrélations pour ces variables qui est reproduite sur le **tableau VIII.2** où les variables sont désignées par V1 à V14 comme indiqué dans le paragraphe précédent..

VIII.3.1 - Analyse de la matrice de corrélation

La forte corrélation de la superficie face avec LONG, LCHE et NBCO s'explique par la faible variation de la densité de drainage. LONG, LCHE et NBCO sont très corrélés entre eux, ce qui traduit de faibles différences dans la forme du chevelu hydrographique quelle que soit la surface ou la forme des bassins versants.

La densité de drainage (DEDR) et NBCK sont bien corrélés entre eux (.874), et ont des coefficients de corrélation de -.301 et -.260 avec la surface. Ce qui signifie que les petits bassins versants sont plutôt mieux drainés que les grands.

L'altitude moyenne (ALTI) et l'indice d'allongement (IALL) sont corrélés négativement (-.326). Nos bassins présentent donc une forme allongée plutôt quand ils sont situés à faible altitude.

La géologie est aussi corrélée avec la densité de drainage, le granite (PGRA) et schiste (PSCH) occupant le plus souvent la majeure partie de la surface. La densité de drainage est plus souvent élevée sur les granites que sur les schistes.

N°	Bv	SURF	IALL	ALTI	PENT	LONG	LCHE	NBCO	DEDR	SDRK	NBCK	SDRE	PSCH	PGRA	PSED
01	B1	117	2.1	168	8.0	18.0	106	26	.91	1.10	.22	4.50	85	10	5
02	B2	129	4.6	97	3.0	32.0	98	28	.76	1.32	.22	4.61	62	11	27
03	B3	37	2.1	41	1.9	12.0	19	6	.51	1.95	.16	6.17	93	0	7
04	B4	48	2.1	85	9.1	11.0	35	14	.73	1.37	.29	3.43	11	89	0
05	B5	138	1.8	90	8.3	18.0	115	35	.83	1.20	.25	3.94	99	0	1
06	B6	89	5.5	50	4.3	23.0	80	33	.90	1.11	.37	2.70	8	92	0
07	B9	44	3.5	130	13.4	14.0	35	7	.80	1.26	.16	6.29	24	76	0
08	C3	82	3.2	82	4.4	21.0	86	41	1.05	.95	.50	2.00	19	66	15
09	C4	51	3.8	50	6.7	15.0	44	20	.86	1.19	.39	2.55	0	100	0
10	C5	88	2.7	130	11.8	17.0	63	15	.72	1.40	.17	5.87	48	46	6
11	C7	22	2.8	42	4.3	9.5	18	7	.82	1.22	.32	3.14	30	69	1
12	C9	102	3.6	78	4.5	18.0	40	9	.39	2.55	.09	11.33	72	18	10
13	D1	383	3.6	50	1.3	50.0	227	56	.59	1.69	.15	6.84	72	0	28
14	D2	14	2.4	113	7.3	6.0	10	5	.71	1.40	.36	2.80	38	0	62
15	D3	70	3.2	52	1.9	18.0	81	49	1.16	.86	.70	1.43	32	68	0
16	D4	61	3.1	72	3.3	18.0	47	14	.77	1.30	.23	4.36	48	0	52
17	D5	82	2.7	90	4.5	14.0	56	15	.68	1.46	.18	5.47	40	1	59
18	D6	468	3.9	100	2.3	54.0	304	73	.65	1.54	.16	6.41	50	0	50
19	E1	24	3.4	77	2.6	11.0	31	11	1.29	.77	.46	2.18	0	100	0
20	E2	153	3.5	80	2.6	29.0	110	29	.72	1.39	.19	5.28	40	0	60
21	E4	604	2.7	86	2.0	56.0	436	140	.72	1.39	.23	4.31	63	12	25
22	E5	315	3.6	108	3.7	42.0	183	46	.58	1.72	.15	6.85	87	3	10
23	E6	30	2.9	140	11.5	13.0	21	6	.70	1.43	.20	5.00	54	0	46
24	E7	184	3.3	78	5.8	29.0	195	104	1.06	.94	.57	1.77	30	65	5
25	E9	14	2.5	80	6.3	6.0	12	3	.86	1.17	.21	4.67	91	0	9
26	F4	316	2.1	75	2.6	34.0	190	65	.60	1.66	.21	4.86	91	0	9
27	F6	108	2.5	77	6.6	22.0	109	45	1.01	.99	.42	2.40	41	56	3
28	F7	379	3.5	118	2.9	50.0	331	115	.87	1.15	.30	3.30	62	30	8
29	F8	67	1.6	140	3.8	12.0	89	47	1.33	.75	.70	1.43	1	66	33
30	G1	820	4.4	45	.8	82.0	545	176	.66	1.50	.21	4.66	93	2	5

Tableau (VIII.1): Caractéristiques physiques des 30 bassins versants bretons étudiés.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14
V1	1000													
V2	291	1000												
V3	-139	-326	1000											
V4	-489	-280	562	1000										
V5	973	440	-161	-526	1000									
V6	981	272	-98	-447	959	1000								
V7	900	235	-139	-469	879	959	1000							
V8	-301	-110	122	20	-286	-159	21	1000						
V9	230	83	-148	-115	211	86	-67	-925	1000					
V10	-260	-111	-84	-117	-249	-129	102	874	-758	1000				
V11	194	129	75	27	194	55	-137	-824	899	-835	1000			
V12	435	-169	27	-172	392	365	244	-600	546	-617	534	1000		
V13	-376	165	-153	225	-346	-295	-146	634	-448	627	-522	-823	1000	
V14	22	-41	230	-143	32	-16	-102	-236	163	-198	157	-20	-552	1000

(Tous les coefficients sont multipliés par 1000)

Tableau (VIII.2): Matrice des corrélations.

VIII.3.2 - Valeurs propres

L'analyse n'est faite que sur les trois premiers axes qui expliquent à eux seuls (Cf. **tableau VIII.3**) 76.8 % de la variance totale, avec une contribution de 38.9 % pour le premier axe. Le deuxième participe avec 26.4 % à la variance totale et le troisième explique 11.5 % de l'inertie totale.

N°	Val. Pro	Pourct.	Cumul..	Variat.	Histogram. Des Val.. Propr.
1	5.45120	38.937	38.927		*****
2	3.68280	26.377	65.314	12.560	*****
3	1.60535	11.467	76.781	14.910	*****
4	1.18758	8.483	85.264	2.984	*****
5	1.01720	7.266	92.529	1.217	*****
6	.42184	3.013	95.543	4.253	**
7	.32512	2.322	97.865	.691	**
8	.15935	1.138	99.003	1.184	*
9	.08515	.608	99.611	.530	
10	.03274	.234	99.845	.374	
11	.01349	.096	99.941	.137	
12	.00645	.046	99.988	.050	
13	.00174	.012	100.000	.034	
14	.00000	.000	100.000	.012	

Tableau (VIII.3): Les valeurs propres.

VIII.3.3 - Définition des axes

Le premier axe (38.9 %) représente les bassins versants de grande surface, de pente plutôt faible, à dominante schisteuse et relativement peu drainés. Le deuxième axe représente les bassins à fort pourcentage en granite et bien drainés. Le troisième regroupe les bassins de forme compacte avec des altitudes élevées.

La projection des bassins sur les 3 plans et la confrontation avec le tableau des données ont permis de mettre en évidence des regroupements (Cf. **figures VIII.2a**, **VIII.2b** et **annexe VI.1**).

Groupe 1: Ce sont des bassins de grand taille, à forte prédominance schisteuse avec des pentes faibles ou relativement moyennes (2, 13, 18, 20, 21, 22, 26, 28 et 30).

Groupe 2: C'est un groupe de petits bassins avec une forte pente et une prédominance granitique (4, 6, 7, 8, 9, 11, 15, 19, 24, 27 et 29).

Groupe 3: Ce sont des bassins où les caractéristiques sont variables.

Le seul bassin versant que l'on n'a pas pu rattacher à l'un des groupes précédents est le bassin de la Rosette (12), car ce dernier est fortement drainé.

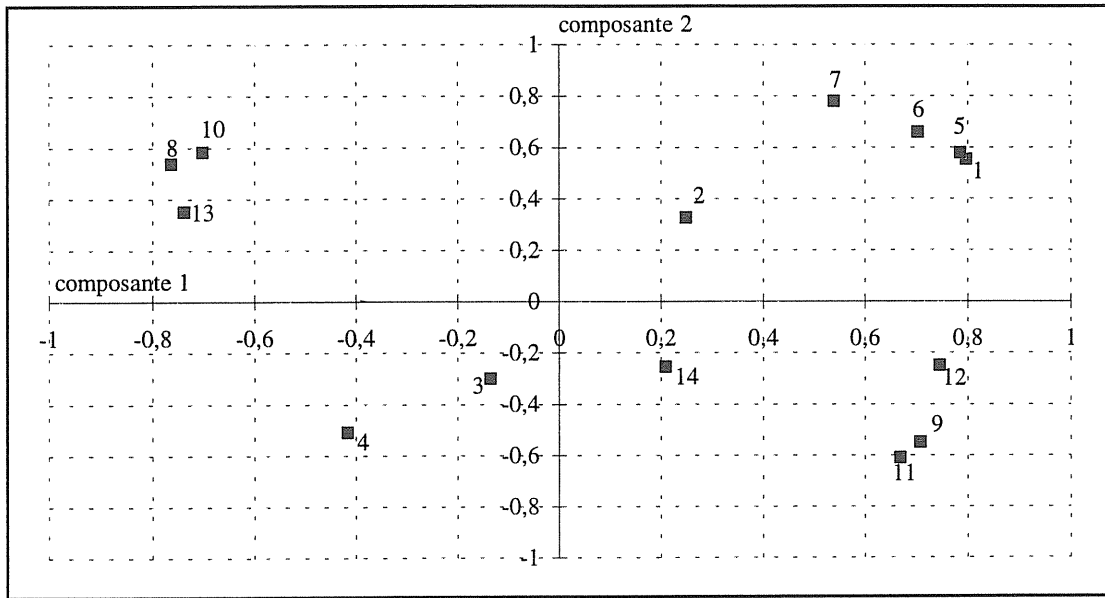


Figure (VIII.2a): Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 1 et 2.

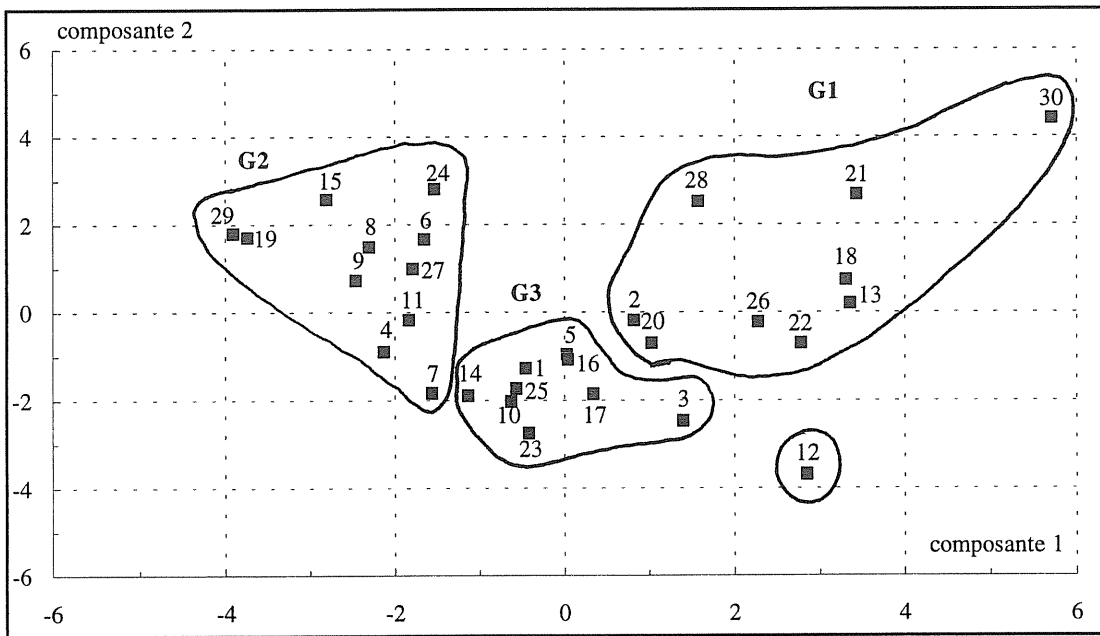


Figure (VIII.2b): Projection des bassins dans le plan 1 et 2.

VIII.4 - DEMARCHE SUIVIE POUR L'EXPLICATION DES PARAMETRES

Une méthodologie simple à été adoptée dans ce chapitre quant à l'explication des paramètres du modèle GR2M en fonction des caractéristiques physiques. Les données de pluie et de débit seront réparties en deux périodes d'égale importance; la première servira pour le calage et la deuxième pour le contrôle.

Dans une première phase nous allons caler les deux paramètres du modèle sur la première période pour les 30 bassins versants de la Bretagne et vérifier ces résultats sur la deuxième période.

Dans la deuxième phase nous allons essayer de relier les deux paramètres aux fonctions des caractéristiques physiques des bassins. Les Critères du calage et ceux obtenus avec les variables explicatives seront comparés sur la période de contrôle.

Enfin, on contrôlera le modèle régional retenu sur 12 bassins versants n'ayant pas servi à le mettre au point. Ces bassins n'ont pas servi dans la première partie de l'étude car on ne disposait ni de toutes les caractéristiques physiques ni d'une longue période scindable en deux sous-périodes (calage et contrôle).

VIII.5 - CALAGE DU MODELE GR2M SUR LES BASSINS UTILISES

Les valeurs optimales des deux paramètres du modèle GR2M pour la première période (calage) et pour la totalité de la période sont présentées dans le **tableau VIII.4** avec les dates limitant la période totale. Le processus itératif de calage utilisé a été présenté dans le **chapitre II**.

La moyenne des critères de Nash pour les 30 bassins versants sont respectivement de 85.5 % et 77.7 % sur les périodes de calage et de contrôle avec un écart-type de 4.7 pour le calage et de 27.3 pour le contrôle. Un essai de calage sur toute la période a donné aussi de bons résultats avec un critère de Nash moyen de 84.1 % et un écart-type de 4.99. Compte tenu des valeurs obtenues (Cf. **tableau VIII.5**) (où Quant 0.3 représente la valeur du quantile 0.3 de la distribution de la variable considérée) le modèle GR2M permet d'obtenir une bonne simulation des débits mensuels.

Les valeurs moyennes des deux paramètres sur la première période (calage) sont:

$$\bar{\alpha} = -.13 \text{ et } \bar{\beta} = .33 \quad (\text{VIII.1})$$

La **figure VIII.3** présente les distributions des critères de Nash obtenues lors des trois applications du modèle GR2M et nous montre une légère perte de qualité entre le calage et le contrôle. Les distributions des deux paramètres pour la période de calage et pour la période totale (Cf. **figures VIII.4 et VIII.5**) montrent qu'ils ne varient pas de beaucoup sur deux périodes différentes. Les couples de paramètres des 30 bassins bretons sont présentés dans l'espace $(\ln\alpha), (\ln\beta)$ (Cf. **figure VIII.6**).

N° Bv	Code Bv	Toute la période			Deux périodes				Période Totale
		ln α	ln β	N. Cal	ln β	ln α	N. Cal	N. Cnt	
01	B1	-.14	1.10	92.9	-.15	.80	93.4	92.0	01-73/12-88
02	B2	-.15	.63	85.7	-.11	.50	85.8	82.9	01-74/12-90
03	B3	-.06	.68	86.2	-.02	.54	86.4	85.3	01-72/12-90
04	B4	-.13	-.24	84.6	-.14	-.33	88.1	80.5	01-71/12-90
05	B5	-.04	1.15	85.7	-.15	.70	87.1	78.2	01-67/12-92
06	B6	-.25	.39	86.7	-.24	.26	87.5	86.5	01-80/12-92
07	B9	.06	-.44	83.1	.06	-.57	83.6	80.5	01-79/12-92
08	C3	-.18	-.84	75.0	-.20	-1.06	67.7	83.4	01-74/12-89
09	C4	.12	-.41	64.3	.17	-.63	85.4	-67.2	01-66/10-90
10	C5	-.11	-.03	89.8	-.10	-.04	91.7	87.6	01-72/12-88
11	C7	-.24	.10	79.4	-.27	.10	75.9	87.6	01-77/12/88
12	C9	-.08	.42	81.6	-.06	.31	81.4	81.3	01-74/12-89
13	D1	-.10	1.47	86.5	-.16	1.48	84.7	85.7	01-68/12/88
14	D2	-.07	1.32	87.2	-.08	1.10	86.9	86.8	01-71/12-88
15	D3	-.09	-.25	81.9	-.12	-.39	87.1	76.2	01-76/12-90
16	D4	-.24	.64	83.2	-.36	.49	86.7	72.9	01-70/12-83
17	D5	-.20	1.28	80.5	-.17	1.32	82.1	74.7	01-71/12-92
18	D6	-.16	.97	85.4	-.18	.89	84.5	84.3	01-72/12-89
19	E1	-.11	-.33	84.1	-.12	-.34	85.5	83.1	01-77/12-90
20	E2	-.15	1.62	85.1	-.10	1.25	85.5	82.5	01-68/12-90
21	E4	-.08	.74	82.5	-.14	.80	86.2	76.7	01-68/12-90
22	E5	-.18	.64	88.2	-.18	.69	86.9	89.6	01-68/02-82
23	E6	-.06	.68	86.5	-.04	.55	91.0	82.9	01-68/12-90
24	E7	-.10	-.24	86.0	-.11	-.36	88.3	83.3	01-76/12/90
25	E9	.04	1.64	86.6	.02	1.66	84.8	87.9	01-68/12-89
26	F4	-.02	.31	83.5	-.05	.19	88.6	78.6	01-69/12-90
27	F6	-.13	-.02	83.3	-.15	-.13	85.5	80.7	01-76/12-90
28	F7	-.22	.19	89.4	-.23	.33	90.8	87.6	01-68/12-82
29	F8	-.09	-.86	87.1	-.10	-.94	84.4	88.0	01-70/12-89
30	G1	-.33	.80	80.6	-.40	.74	80.2	76.9	01-70/12/88

Tableau (VIII.4): Résultats du calage et du contrôle du modèle GR2M sur les 30 bassins bretons.

	Toute la période			Deux période			
	ln α	ln β	N. Cal	ln α	ln β	N. Cal	N. Cnt
Moyenne	-.12	.44	84.1	-.13	.33	85.5	77.7
Ecart-type	.04	.22	4.99	.04	.22	4.7	27.3
Minimum	-.33	-.86	64.3	-.40	-1.06	67.7	-67.2
Maximum	.06	1.64	92.9	.17	1.66	93.4	92.0
Quant 0.3	--	--	83.1	--	--	84.7	80.5

Tableau (VIII.5): Statistiques sur l'application du modèle GR2M sur les 30 bassins bretons.

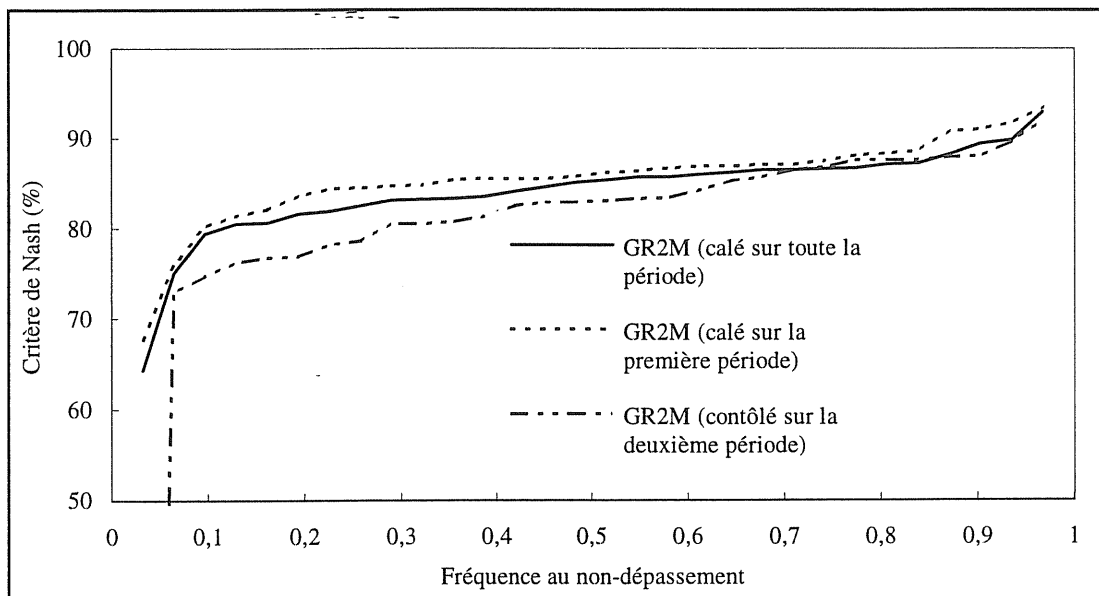


Figure (VIII.3): Comparaison des distributions des critères de Nash pour les différentes applications du modèle GR2M.

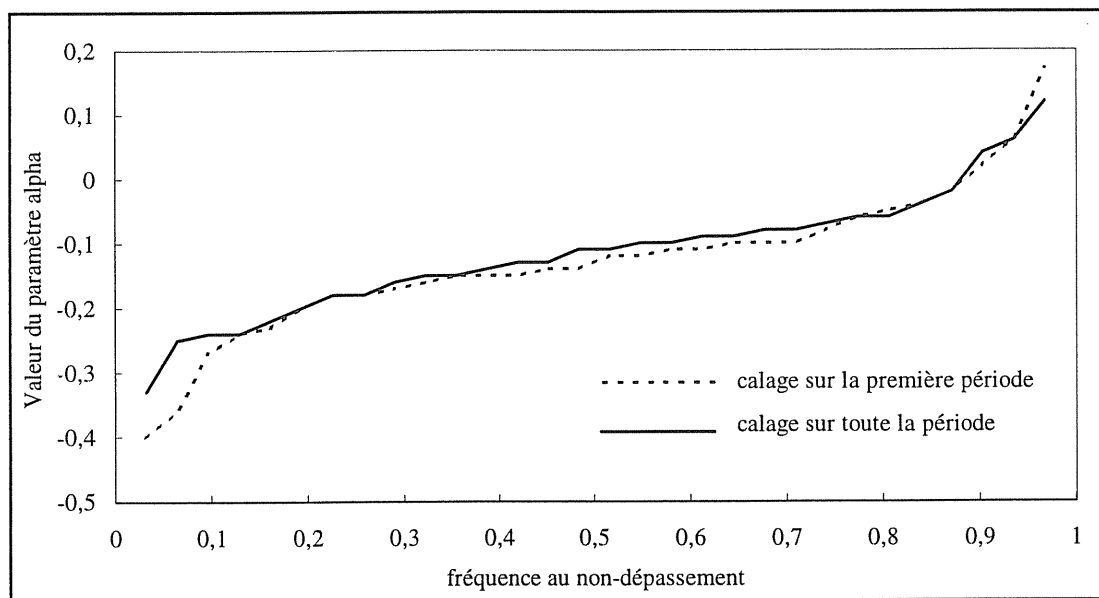


Figure (VIII.4): Comparaison des distributions du paramètre $\ln\alpha$ pour deux périodes de calage.

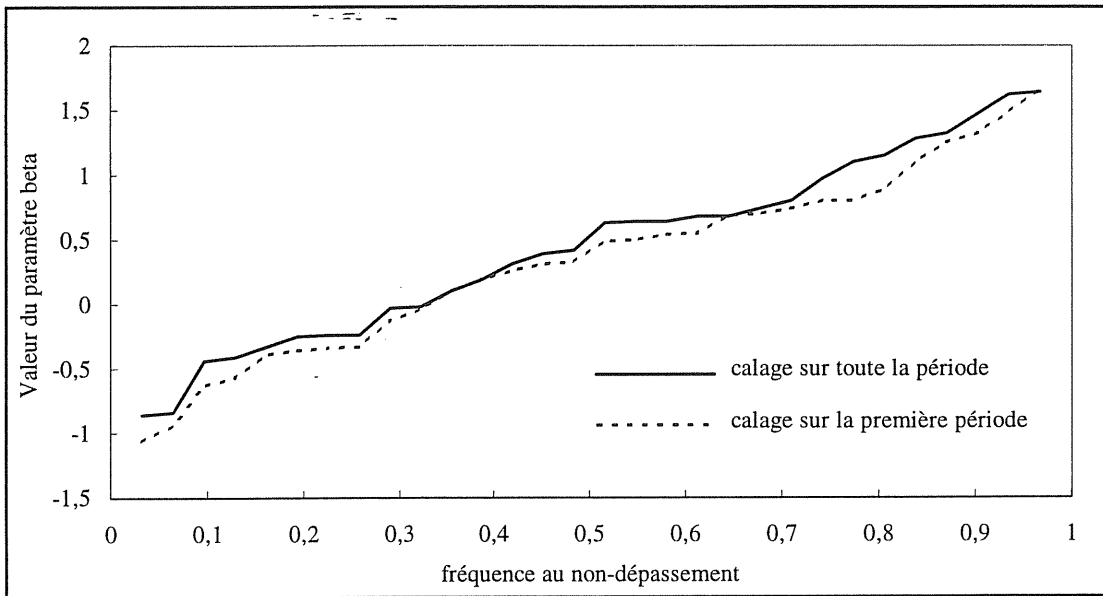
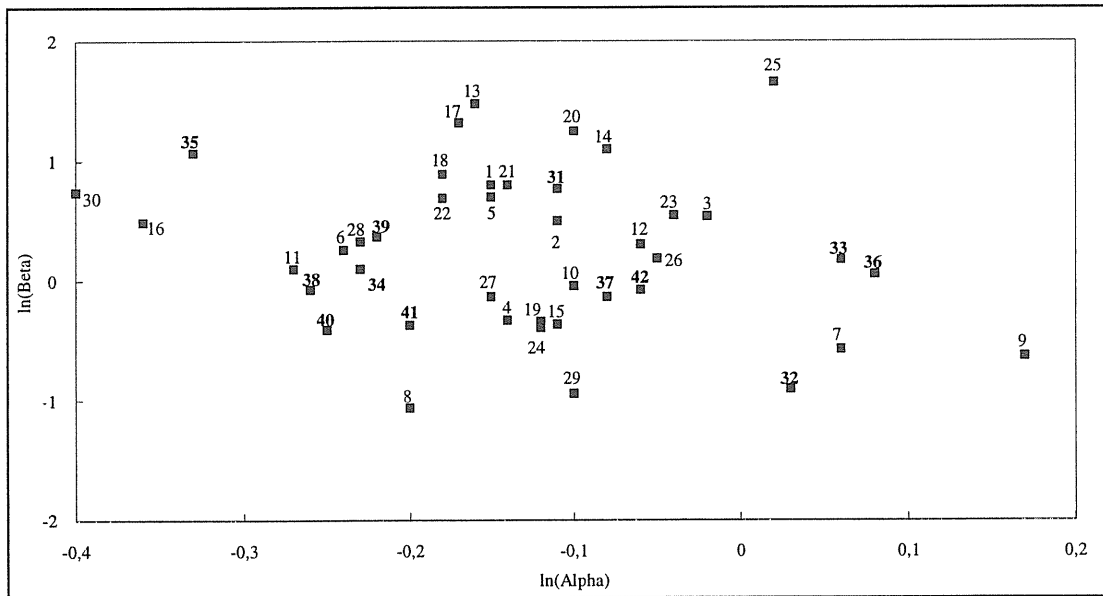


Figure (VIII.5): Comparaison des distributions du paramètre $\ln\beta$ pour deux périodes de calage.



(Les chiffres en gras correspondent aux bassins versants n'ayant pas servi pour les régressions)

Figure (VIII.6): Couples de paramètres des 30 bassins bretons dans l'espace $(\ln\alpha), (\ln\beta)$.

VIII.6 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR2M

Les relations entre les caractéristiques physiques et les deux paramètres du modèle GR2M calés sur la première période (calage) ont été étudiées à l'aide du modèle linéaire général appliqué à des transformées logarithmiques des paramètres et des caractéristiques. Le seuil de signification est le même que celui choisi dans le **chapitre IV, § IV.6**.

Les résultats retenus à la suite de cette recherche n'incluent que des variables explicatives dont le rapport de Student est supérieur au seuil théorique choisi. Une seule variable physique a pu être retenue pour le paramètre β . Deux caractéristiques climatiques, la pluie annuelle moyenne (mm/jour) et la pluie journalière de fréquence décennale ont été testées et ne se sont pas révélées significatives aussi bien pour le paramètre α que pour le paramètre β .

Le résultat retenu est présenté dans le **tableau VIII.6**.

Paramètre	Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient détermination
β	x_0	1.0	8.8	0.40	0.68
	$x_1 \sqrt{PGRA}$	-.15	7.8		

Tableau (VIII.6): Résultat pour le paramètre $\ln\beta$ du modèle GR2M.

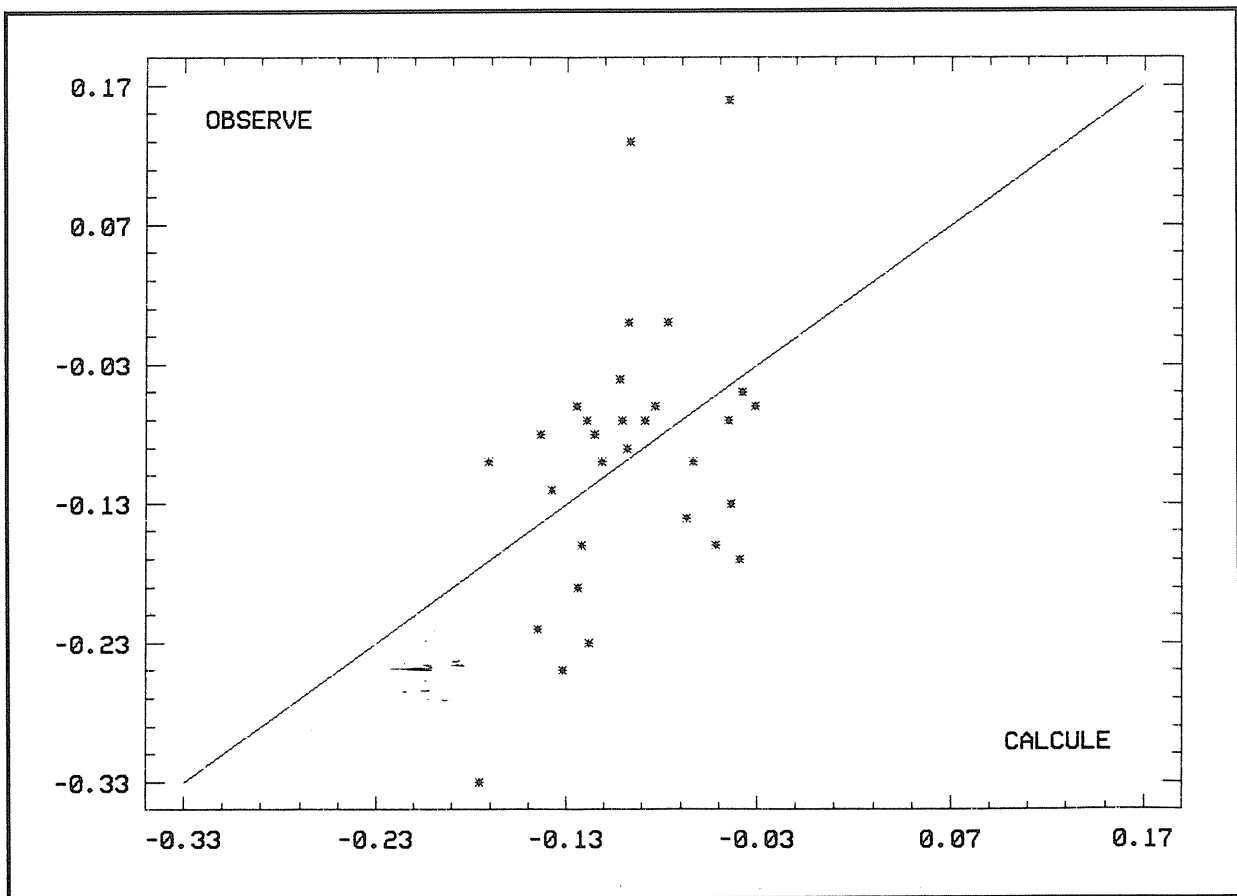


Figure (VIII.7): Régression de β en fonction de PGRA.

Nous avons donc retenu une seule équation avec comme variable explicative le pourcentage de surface à affleurement de granite pour le paramètre β et la valeur moyenne régionale pour le paramètre α (Cf. figure VIII.7).

Le modèle régional proposé est donc le suivant:

$$\begin{aligned} \ln \alpha &= -0.13 \\ \ln \beta &= 1.0 - 0.15 \sqrt{P_{gra}} \end{aligned} \quad (\text{VIII.2})$$

Rappelons qu'un modèle régional élémentaire est composé des valeurs moyennes données par les égalités (VIII.1):

$$\ln \alpha = -0.13 \quad \text{et} \quad \ln \beta = 0.33$$

VIII.7 - APPLICATION DU MODELE REGIONAL SUR LES BASSINS UTILISES

Un premier point concerne la comparaison du modèle régional élémentaire reposant sur les valeurs moyennes des paramètres et du modèle régional (la valeur régionale pour le paramètre α et la relation obtenue pour le paramètre β). Pour cela on applique ces derniers sur les trois périodes déjà identifiées (calage, contrôle et période globale).

Cette application donne les résultats présentés dans les tableaux VIII.7 et VIII.8. La comparaison des critères numériques est rendue plus commode avec les graphiques des figures VIII.8 et VIII.9.

On dégage une conclusion importante à noter: l'application des valeurs moyennes et du modèle régional sur les périodes (calage, contrôle et période globale) donne des résultats peu dégradés par rapport au modèle calé sur les mêmes périodes.

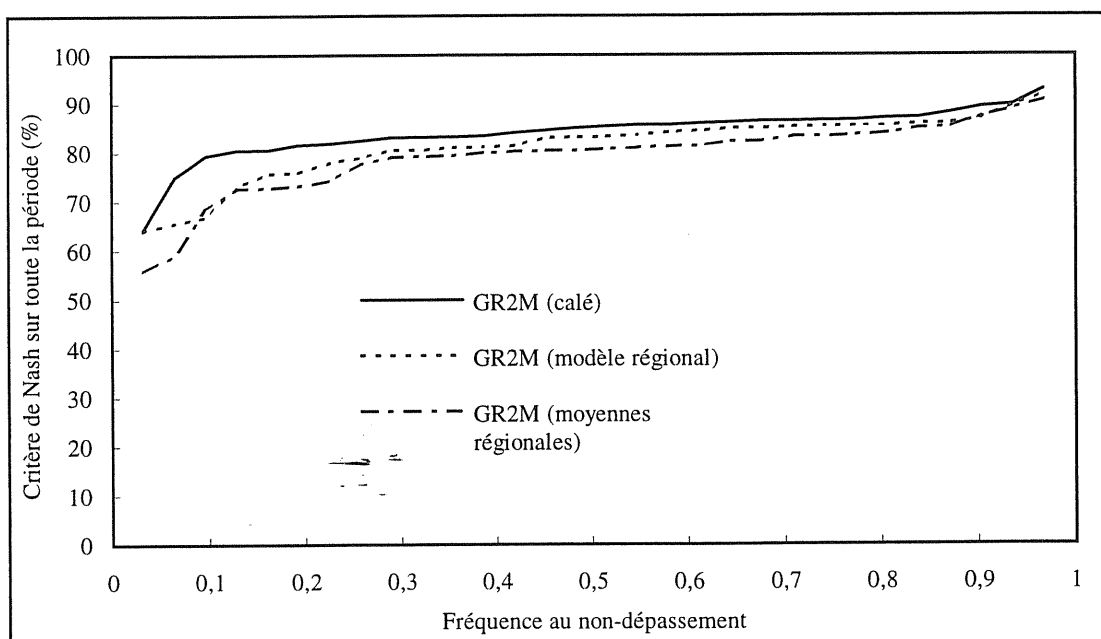


Figure (VIII.8): Comparaison des distributions des critères de Nash pour trois applications du modèle GR2M sur la période globale.

N°	BV	MOYENNES REGIONALES			MODELE REGIONAL			
		Toute la période	Deux périodes		ln β	toute la période	Deux périodes	
		N. Cal	N. Cal	N. Cnt		N. Cal	N. Cal	N. Cnt
01	B1	90.7	92.6	89.4	.53	91.8	93.1	90.9
02	B2	85.3	85.4	84.2	.50	85.5	85.7	84.2
03	B3	83.3	82.1	84.8	1.00	85.0	83.9	86.2
04	B4	81.0	82.0	80.3	-.42	84.2	88.0	80.2
05	B5	80.0	86.6	76.2	1.00	83.6	86.5	81.5
06	B6	82.3	82.6	82.2	-.44	81.2	83.0	80.7
07	B9	74.3	72.0	73.1	-.31	73.1	72.1	70.8
08	C3	55.9	40.9	78.4	-.22	66.9	53.3	87.0
09	C4	59.0	64.2	45.3	-.50	64.1	60.7	65.5
10	C5	88.9	90.8	87.1	-.02	89.6	81.4	87.7
11	C7	72.8	64.5	76.4	-.25	76.0	70.0	79.4
12	C9	80.5	79.8	81.0	.36	80.6	79.9	81.0
13	D1	81.4	81.4	81.0	1.00	85.5	84.2	85.8
14	D2	81.3	82.7	79.8	1.00	85.4	85.9	84.7
15	D3	79.3	81.0	78.1	-.24	81.5	86.9	77.0
16	D4	79.1	60.0	83.6	1.00	75.7	46.9	82.8
17	D5	77.7	79.5	72.1	.85	79.0	81.5	72.6
18	D6	84.0	83.2	83.3	1.00	85.0	83.3	85.6
19	E1	79.4	80.2	79.2	-.50	83.3	85.0	82.2
20	E2	80.8	81.6	78.5	1.00	84.5	85.0	82.5
21	E4	80.3	85.3	75.2	.48	81.1	85.8	76.1
22	E5	87.4	86.1	88.5	.74	87.0	85.9	87.8
23	E6	83.6	87.9	80.3	1.00	85.3	89.2	82.2
24	E7	83.3	82.9	83.7	-.21	85.9	88.0	83.7
25	E9	72.7	72.5	72.5	1.00	78.0	77.7	78.1
26	F4	80.4	87.2	75.2	1.00	80.6	85.9	76.4
27	F6	82.3	82.7	82.3	-.12	83.2	85.4	81.3
28	F7	85.0	86.6	83.0	.18	86.0	87.4	84.3
29	F8	73.2	65.9	80.1	-.22	83.0	78.4	86.8
30	G1	68.5	51.1	77.2	.79	65.6	44.4	76.4

Tableau (VIII.7): Résultats du modèle régional sur 30 bassins bretons.

	MOYENNES REGIONALES			MODELE REGIONAL			
	Toute la période	Deux périodes		$\ln\beta$	toute la période	Deux périodes	
	N. Cal	N. Cal	N. Cnt		N. Cal	N. Cal	N. Cnt
Moyenne	79.2	78.1	79.1	.37	81.2	79.8	81.4
Ecart-type	7.5	11.7	7.6	.21	6.5	12.4	5.4
Minimum	55.9	40.9	45.3	-.50	64.1	44.4	65.5
Maximum	90.7	92.6	89.4	1.00	91.8	93.1	90.9
Quant 0.3	79.2	79.6	77.6	--	80.6	80.5	79.7

Tableau (VIII.8): Statistiques sur l'application du modèle régional sur 30 bassins bretons.

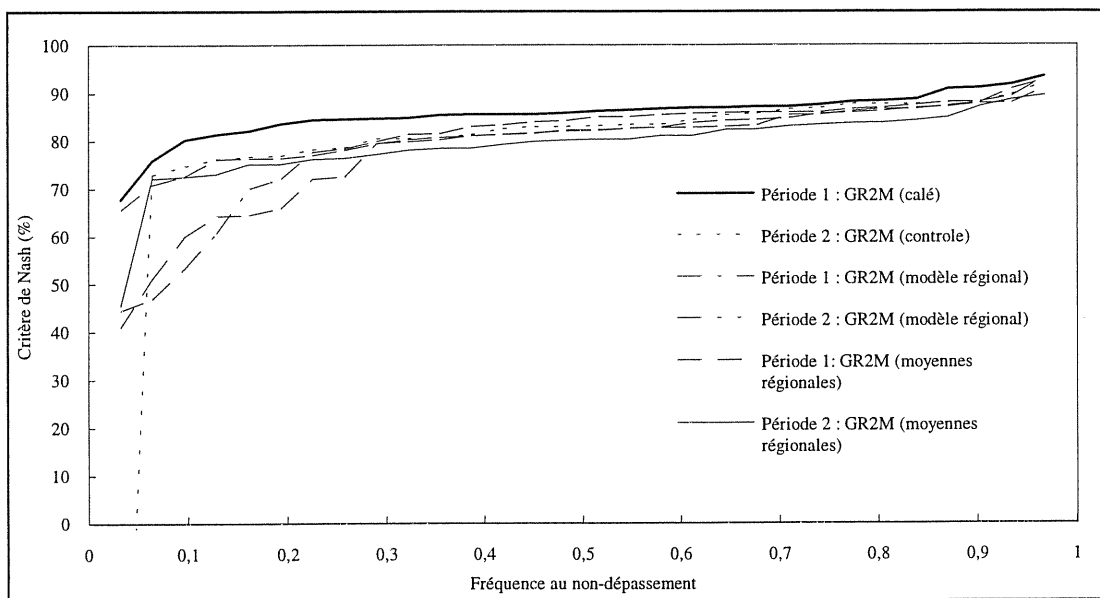


Figure (VIII.9): Comparaison des distributions des critères de Nash pour différentes applications du modèle GR2M sur deux périodes distinctes.

VIII.8 - CONTROLE SUR D'AUTRES BASSINS BRETONS

Douze bassins versants (numérotés de 31 à 42) n'ayant pas servi à la mise au point du modèle régional faute d'avoir toutes les caractéristiques utilisées lors des régressions, nous ont permis de valider ce dernier puisqu'on dispose de la caractéristique physique utilisée par le modèle régional (l'pourcentage de granite) comme illustré dans le **tableau VIII.9**.

N°	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
BV	B7	B8	C2	C8	D7	D8	D9	E3	F1	F5	F9	G2
PGRA	44	23	74	59	60	37	100	84	42	53	78	92

Tableau (VIII.9): Caractéristiques physiques des 12 bassins bretons.

On peut comparer sur ces douze nouveaux bassins trois applications du modèle GR2M:

- 1 - Le modèle calé sur chaque bassin.
- 2 - Le modèle régional élémentaire utilisant les valeurs moyennes données par les équations (VIII.1).
- 3 - Le modèle régional exploitant une caractéristique physique pour le paramètre β selon les équations (VIII.2).

Les résultats correspondants apparaissent dans le **tableau VIII.10**.

N° BV	Code BV	GR2M (Calage)			$\ln\alpha = 0.13$	MODELE REGIONAL		Période
		$\ln\alpha$	$\ln\beta$	N. Cal	$\ln\beta = 0.33$ Nash	$\ln\beta$	N. Cal	
31	B7	-.11	.77	86.1	84.8	.01	82.3	01-78/12-85
32	B8	.03	-.90	90.5	74.1	.28	74.9	01-79/12-85
33	C2	.06	.18	89.7	78.9	-.29	71.8	01-80/12-92
34	C8	-.23	.10	79.8	86.1	-.15	83.9	01-79/12-88
35	D7	-.33	1.07	87.5	52.0	-.16	57.7	01-86/12-92
36	D8	.08	.06	93.8	86.3	.09	84.9	01-72/12-77
37	D9	-.08	-.13	91.2	88.7	-.05	91.0	01-70/12-75
38	E3	-.26	-.07	86.6	78.0	-.37	84.2	01-83/12-90
39	F1	-.22	.37	87.4	87.1	.03	86.9	01-81/12-89
40	F5	-.25	-.41	94.9	70.6	-.09	82.6	01-70/12-77
41	F9	-.20	-.37	86.1	74.4	-.25	83.4	01-70/12-88
42	G2	-.06	-.07	88.7	87.0	-.44	83.9	01-71/12-75
Moyenne		-.12	.05	88.8	79.0	-.16	80.6	
Ecart-type		.06	.25	3.1	10.0	.23	8.4	

Tableau (VIII.10): Résultats des différentes applications du modèle GR2M sur 12 bassins bretons, étrangers au calage des modèles régionaux.

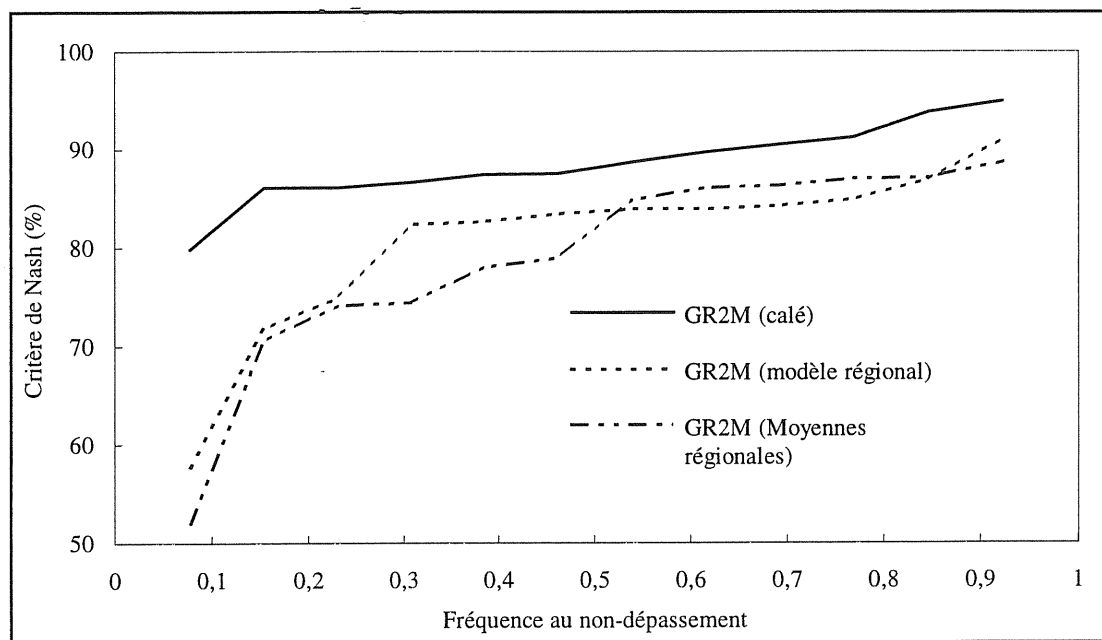


Figure (VIII.10): Comparaison des distributions des critères de Nash pour trois applications du modèle GR2M sur 12 bassins versants.

On constate, que la région Bretagne est assez homogène puisque le modèle régional élémentaire reposant sur de simples valeurs moyennes donne sur la majorité des bassins, des résultats acceptables. Cependant le modèle régional exploitant, même modestement, les caractéristiques physiques des bassins (paramètres β) semble très satisfaisant car il ne perd que 5% du critère de Nash par rapport aux calage sur des données existantes (Cf. figure VIII.10).

VIII.9- CONCLUSION

L'expérience de la région Bretagne permet d'espérer que le modèle GR2M devienne applicable sur une région donnée en utilisant des relations explicatives de ses deux paramètres après calage direct du modèle sur une trentaine de bassins versants de cette région.

Sachant qu'on montrera au **chapitre IX** que les paramètres A et D seront assez bien corrélés aux deux paramètres du modèle mensuel GR2M, et cela permettra de penser que l'on pourrait, dans une région donnée, déterminer A et D sur des bassins non jaugés. Sachant que A et D sont justement les deux paramètres les plus mal expliqués au niveau national: l'analyse conduite dans ce chapitre permettra d'entrevoir une solution acceptable pour appliquer GR4J sur des bassins non jaugés dans une région appropriée.

Chapitre IX

11-56 -

11-56 -

CHAPITRE IX

ESSAI DE LIAISON ENTRE LES PARAMETRES DES MODELES GR4J ET GR2M ET DES CARACTERISTIQUES DU BASSIN

IX.1 - INTRODUCTION

Dans ce chapitre, deux points importants seront abordés. Tout d'abord nous allons tenter d'établir une éventuelle liaison entre les paramètres du modèle journalier GR4J et le modèle mensuel GR2M. Ensuite, profitant de l'accroissement du nombre de bassins traités avec le modèle GR4J, nous reprendrons en l'affinant l'étude entreprise par Edijatno (1991).

IX.2 - LIAISON ENTRE LES PARAMETRES DE GR4J ET GR2M

Nous allons essayer de voir les possibilités de liaison entre les paramètres du modèle GR4J et du modèle GR2M sur soixante bassins versants français. Nous allons procéder dans les deux sens d'abord en expliquant les paramètres de GR4J en fonction des paramètres de GR2M et éventuellement des caractéristiques des bassins et ensuite en expliquant les deux paramètres de GR2M en fonction des quatre paramètres de GR4J et des caractéristiques du bassin.

Les bassins versants utilisés sont présentés dans l'**annexe VII.1**. Les paramètres des deux modèles et les caractéristiques utilisées figurent sur le **tableau IX.1**. Les soixante bassins retenus sont ceux où l'on dispose des données sur une durée assez longue pour les deux pas de temps.

Les caractéristiques des bassins utilisées sont:

SURF : Superficie du bassin versant (km²).

PAM : Pluie annuelle moyenne (mm).

EAM : Evapotranspiration potentielle annuelle moyenne (mm).

PJ10 : Pluie journalière de fréquence décennale (mm).

TAM : Température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C)
(telle qu'elle a été utilisée dans la méthode de SOCOSE (1980)).

Dans ce qui va suivre, nous présenterons uniquement les résultats des régressions comportant des rapports de Student ≥ 2.7 .

Cod BV	N	GR4J				GR2M		CARACTERISTIQUES				
		lnA	lnB	lnC	lnD	α	β	SURF	PAM	EAM	PJ10	TAM
02	01	6.24	4.86	1.04	.13	-.25	.98	2404	1054	703.2	49	11.1
03	02	7.05	5.52	.59	.33	-.57	1.13	439	1085	703.2	49	11.2
04	03	6.08	3.99	1.18	.19	-.24	1.69	559	696	703.2	49	11.1
05	04	5.64	5.62	.77	-.58	.38	-1.05	69	1048	703.2	56	11.2
06	05	5.93	5.46	.80	-.16	.01	.11	153	1086	703.2	59	11.2
14	06	5.27	3.50	-.39	-.09	.00	1.62	33	727	653.8	47	10.9
15	07	4.63	3.71	-.45	.18	.08	2.39	16	706	686.8	47	10.9
20	08	5.48	2.89	.06	-.09	.00	1.99	27	650	770.8	43	11.9
22	09	5.80	5.05	.52	.20	-.26	.94	529	910	793.8	54	12.7
24	10	6.23	4.40	.20	-.03	-.21	1.62	26.5	1039	872.5	88	14.5
25	11	4.86	4.56	.03	-.09	.10	1.89	62	866	765.3	64	13.5
26	12	5.61	4.43	-.28	-.33	.23	-.07	67	830	776.2	85	13.6
28	13	5.22	3.35	-.21	.06	-.05	2.64	10.2	870	765.3	66	13.8
29	14	6.59	4.08	.14	.12	-.14	.42	76	1174	719.3	73	13.7
30	15	5.52	4.02	-.03	-.29	.14	1.22	64	1046	719.1	90	13.1
31	16	5.34	4.68	-.08	-.08	.10	.76	235	854	748.6	55	12.4
32	17	6.21	5.19	.00	-.14	.00	-.14	131	983	719.1	70	12.6
34	18	6.03	5.51	.00	-.25	.10	.13	100	989	670.4	54	11.3
37	19	6.17	4.31	.51	.45	-.62	1.37	67.5	653	757.0	44	11.6
38	20	6.08	4.54	.53	-.02	-.26	.56	94	653	757.0	44	11.7
41	21	6.56	5.38	.34	-.01	-.24	-.96	257	726	688.6	48	10.8
43	22	5.44	4.37	.51	.16	-.12	1.61	115	1020	692.6	53	11.0
46	23	5.42	6.56	-.10	.08	-.08	-.23	47.7	950	751.7	55	11.9
47	24	5.69	3.75	.51	.48	-.24	1.48	118.8	809	728.0	46	11.7
50	25	5.68	4.60	.65	-.31	.21	.85	23	834	721.3	65	12.7
51	26	5.26	4.24	.18	-.13	.13	1.69	115	1130	727.0	57	12.2
52	27	5.59	3.97	.26	.10	-.10	1.68	115	912	693.4	54	12.2
53	28	5.49	4.21	.35	.14	-.30	1.37	60	700	721.3	67	12.9
54	29	6.05	4.47	.09	-.09	-.16	.52	79	788	766.4	49	12.0
56	30	6.34	5.74	-.10	-.04	-.15	-1.43	79	776	723.7	53	11.2
57	31	7.60	3.34	.16	.08	-.22	.69	67	691	781.5	45	11.7
58	32	5.32	3.03	.26	.37	-.21	2.88	79	724	746.4	46	11.8
59	33	5.19	3.23	.09	-.09	.12	2.74	60	734	746.4	46	11.90
61	34	5.67	4.07	-.17	.27	-.23	2.09	61.1	905	784.2	61	12.20
62	35	6.07	3.28	.00	-.13	-.10	1.03	91	973	964.5	73	14.50
63	36	6.72	5.39	.36	-.14	-.07	-.48	333	941	768.9	58	12.60
65	37	5.48	3.68	-.10	.41	-.24	2.59	48.6	935	736.4	62	13.50
66	38	6.46	3.58	-.25	-.42	.16	.40	17.9	1990	853.9	125	13.80
73	39	5.17	4.31	-.20	-.45	.16	1.66	43	1353	670.5	63	11.70
75	40	6.01	4.56	-.05	.02	-.12	1.03	34	958	720.6	69	12.20
76	41	6.55	5.43	-.21	.56	-.32	-.12	30.5	1200	720.6	75	12.00
79	42	6.61	4.48	.05	-.29	-.03	-.930	85	930	1118.9	99	13.5
80	43	5.14	3.55	-.31	-.39	.20	1.79	32.3	800	986.9	299	15.5
82	44	3.89	4.21	-.32	-.24	.49	1.07	44.4	950	1084	163	15.7
84	45	6.19	3.92	.01	-.45	-.03	.21	18	950	1084	185	15.8
85	46	5.35	4.20	-.32	-.16	-.02	1.13	53.3	801	991.4	110	14.4
87	47	5.45	3.63	.59	-.19	.18	.82	275	889	682.3	53	10.5
88	48	5.43	4.27	.71	-.17	.10	.86	187	800	682.3	55	10.5
89	49	5.36	4.31	1.03	-.20	.16	.44	320	830	682.3	53	10.5
91	50	6.63	6.05	-.25	.54	-.36	-.05	87.6	1006	672.6	47	11.7
94	51	6.25	4.93	.81	.21	-.34	1.45	881.6	920	793.8	52	12.8
98	52	5.30	3.76	.02	-.26	.18	1.96	110.0	895	768.9	57	12.5
99	53	5.93	3.69	.63	-.17	-.08	.50	492.0	855	768.9	56	12.3
a1	54	6.19	4.67	.75	.08	-.25	.28	203.2	912	768.9	57	12.4
a2	55	6.11	4.73	.33	-.26	.09	-.05	389.0	951	768.9	57	12.5

a5	56	5.86	5.33	.96	.22	-.30	1.23	452.0	818	793.8	57	12.5
a6	57	6.22	4.90	1.32	-.02	-.19	.45	3750.0	878	768.9	57	12.5
a7	58	5.20	5.33	-.02	.32	-.16	.98	75.0	856	793.8	53	12.5
a8	59	5.34	5.38	.75	-.18	.10	.76	523	908	793.8	56	12.4
b0	60	5.59	4.72	.23	-.29	.08	.74	1090	1531	988.2	140	14.5

Tableau (IX.1): Fichier des paramètres des modèles GR4J et GR2M et des caractéristiques des 60 bassins versants retenus.

IX.2.1 - Essai d'explication des paramètres de GR4J

IX.2.1.1 - Paramètre A

Les résultats concernant les 60 bassins sont présentés dans le **tableau IX.2**. Le paramètre A est expliqué par les deux paramètres du modèle GR2M (α et β) avec un R^2 (coefficient de détermination) égal 0.68. Une seule variable (PAM) est significative au seuil choisi, ce qui nous donne avec les deux paramètres un R^2 de 0.74. Les **figures IX.1** et **IX.2** présentent les régressions de A.

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0	5.97	100.61		
$x_1 \ln \alpha$	-1.65	8.27	0.33	0.68
$x_2 \ln \beta$	-0.34	7.65		
x_0	5.67	91.53	0.46	0.35
$x_1 \ln \alpha$	-1.57	5.58		
x_0	6.06	70.50	0.48	0.30
$x_1 \ln \beta$	-0.32	4.92		
x_0	0.93	0.68		
$x_1 \ln \alpha$	-1.80	-9.72	0.30	0.74
$x_2 \ln \beta$	-0.30	-7.55		
$x_3 \ln PAM$	0.74	3.70		

Tableau (IX.2): Résultats pour le paramètre a du modèle GR4J.

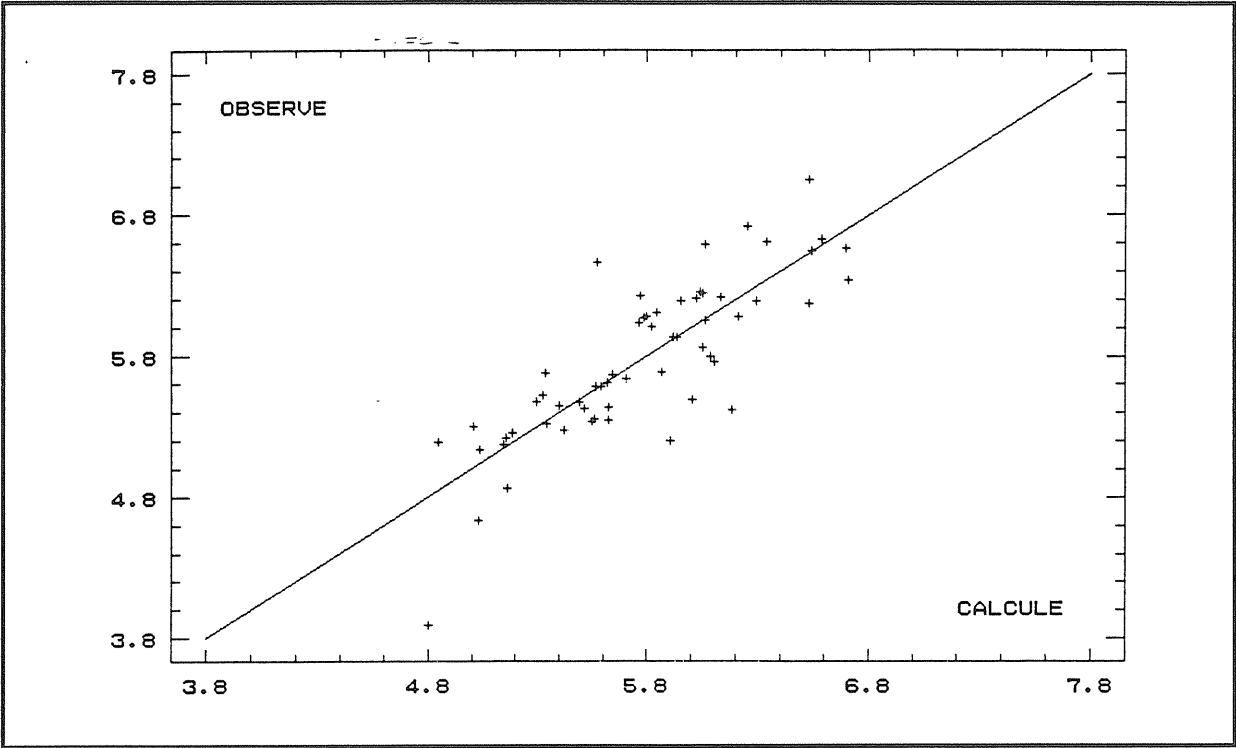


Figure (IX.1): Régression de A en fonction de α et β .

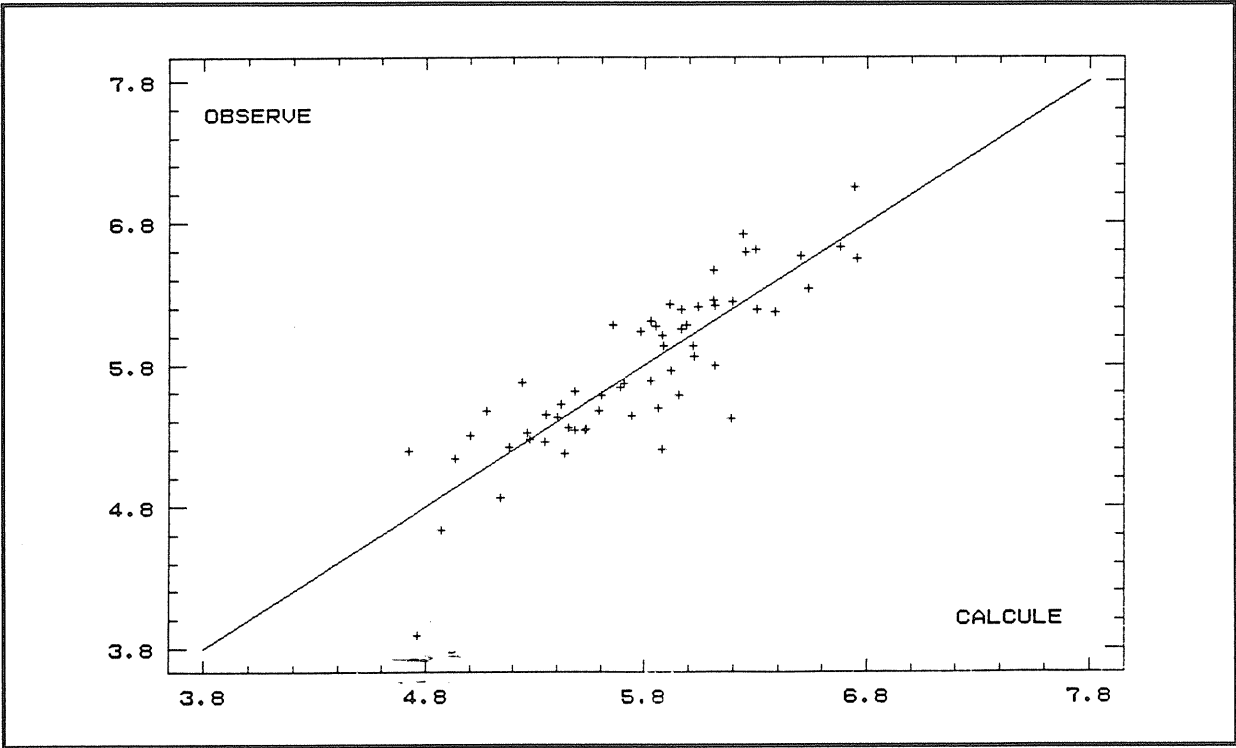


Figure (IX.2): Régression de A en fonction de α , β et PAM.

IX.2.1.2 - Paramètre B

Les résultats pour le paramètre B sont présentés dans le **tableau IX.3**. Seul le paramètre β est significatif ($R^2=0.44$). Deux variables (EAM et SURF) sont aussi significatives mais dans deux équations différentes. La première variable (EAM) s'associe avec β pour donner un R^2 égal à 0.48, par contre la variable SURF seule donne un R^2 égal à 0.12. Les **figure IX.3** et **IX.4** représentent les meilleures régressions.

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0 $x_1 \ln \alpha$ $x_2 \ln \beta$	4.91 -0.82 -0.56	46.24 2.30 7.04	0.58	0.48
x_0 $x_1 \ln \beta$	4.95 -0.55	45.73 6.68	0.60	0.44
x_0 $x_1 \ln \beta$ $x_2 \ln EAM$	14.41 -0.56 -1.42	3.54 7.05 2.23	0.58	0.48
x_0 $x_1 \ln SURF$	3.41 0.22	8.75 2.74	0.76	0.12

Tableau (IX.3): Résultats pour le paramètre b du modèle GR4J.

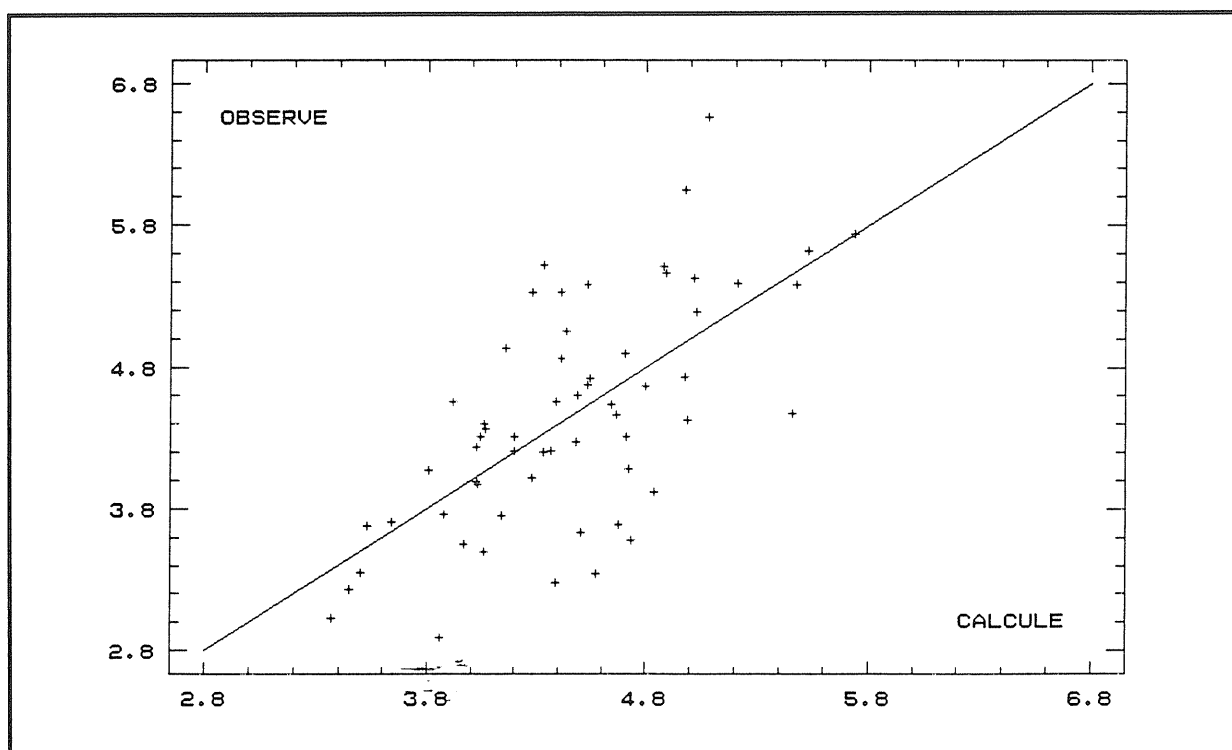
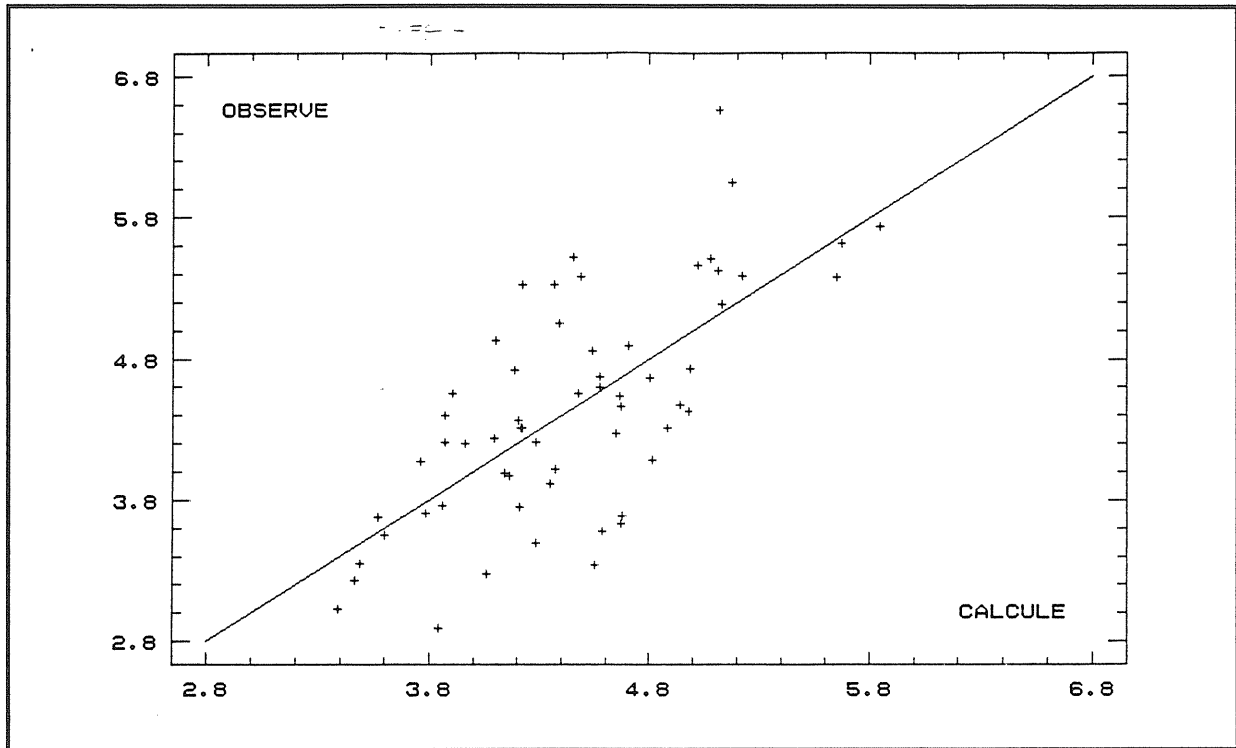


Figure (IX.3): Régression de B en fonction de β .

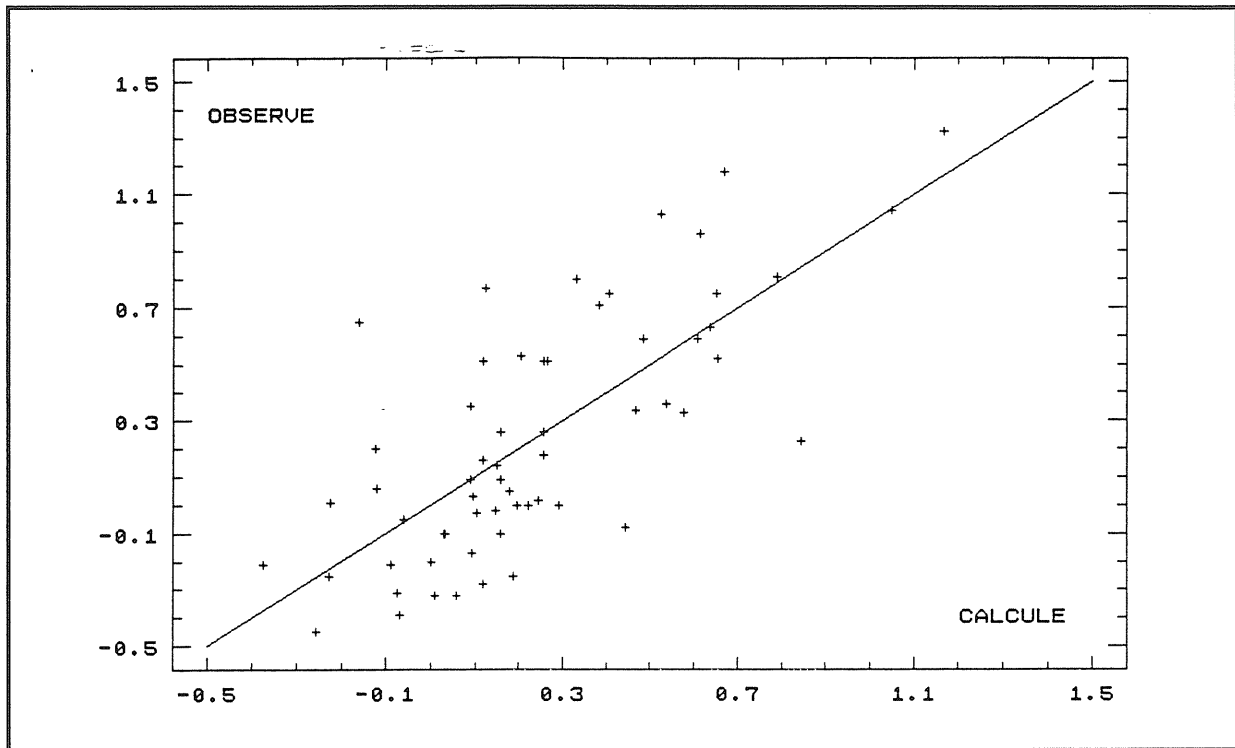
Figure (IX.4): Régression de B en fonction de β et EAM.

IX.2.1.3 - Paramètre C

Le **tableau IX.4** représente les résultats pour le paramètre C . Nous avons retenu la régression avec comme variable explicative SURF (voir **figure IX.5**). La surface à elle seule donne un R^2 de 0.55 alors qu'avec les deux variables jumelées (SURF et EAM) on a un R^2 de 0.58. Les deux paramètres du modèle GR2M ne sont pas significatifs.

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0	-0.98	6.46	0.29	0.55
$x_1 \ln SURF$	0.26	8.32		
x_0	1.37	1.35	0.28	0.58
$x_1 \ln SURF$	0.24	7.69		
$x_2 \ln EAM$	-0.90	2.34		

Tableau (IX.4): Résultats pour le paramètre c du modèle GR4J.

Figure (IX.5): Régression de C en fonction de SURF.

IX.2.1.4 - Paramètre D

Le quatrième paramètre D est expliqué par les deux paramètres du modèle mensuel avec un R^2 de 0.70 (Cf. tableau IX.6 et figure IX.6). Le paramètre α comme variable explicative seule donne un R^2 de 0.64. Une variable climatique (PJ10) du bassin est significative mais donne une liaison faible ($R^2=0.20$).

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0	-0.14	5.38		
$x_1 \ln \alpha$	-0.97	10.81	0.15	0.70
$x_2 \ln \beta$	0.07	3.42		
x_0	-0.08	3.82	0.16	0.64
$x_1 \ln \alpha$	-0.98	10.11		
x_0	-0.09	2.05	0.25	0.08
$x_1 \ln \beta$	0.08	2.31		
x_0	1.27	3.72	0.24	0.20
$x_1 \ln PJ10$	-0.31	3.80		
x_0	-1.15	3.45	0.23	0.27
$x_1 \ln \beta$	0.07	2.28		
$x_2 \ln PJ10$	-0.30	3.76		

Tableau (IX.5): Résultats pour le paramètre d du modèle GR4J.

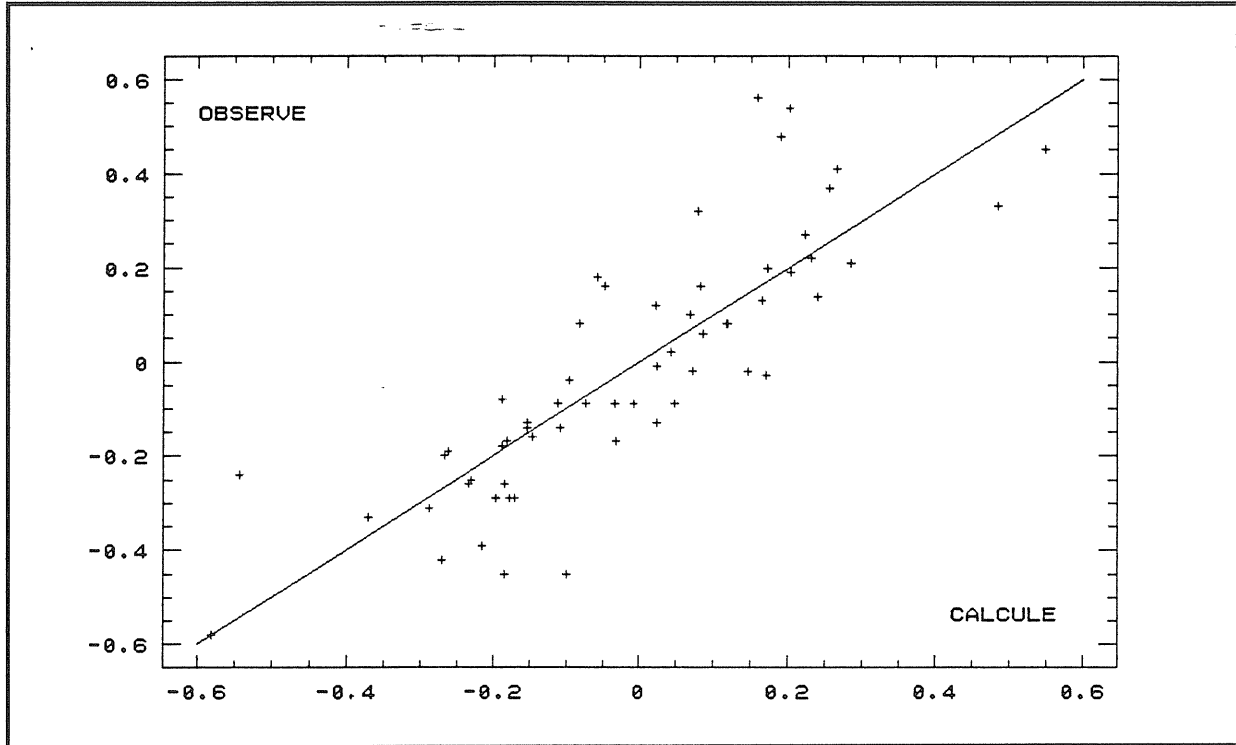


Figure (IX.6): Régression de D en fonction de α et β .

IX.2.2 - Essai d'explication des paramètres de GR2M

Une autre tentative inverse est celle d'expliquer les paramètres du modèle mensuel en fonction des paramètres du modèle GR4J et les caractéristiques disponibles. Cette démarche n'est pas très utile opérationnellement mais permet de mieux comprendre l'articulation entre les deux modèles.

IX.2.2.1 - Paramètre α

Le tableau IX.6 illustre les résultats des régressions. La figure (IX.7) représente la relation retenue:

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0	0.92	7.88	0.09	0.84
$x_1 \ln A$	-0.17	8.57		
$x_2 \ln D$	-0.58	13.32		
x_0	1.22	5.28	0.17	0.35
$x_1 \ln A$	-0.22	5.58		
x_0	-0.08	4.53	0.13	0.64
$x_1 \ln D$	-0.65	10.11		
x_0	-0.08	0.22	0.08	0.86
$x_1 \ln A$	-0.19	9.52		
$x_2 \ln D$	-0.54	12.46		
$x_3 \ln PAM$	0.16	2.84		
x_0	-1.24	1.80	0.16	0.48
$x_1 \ln A$	-0.25	6.86		
$x_2 \ln PAM$	0.39	3.75		
x_0	-1.01	3.56	0.20	0.16
$x_1 \ln PJ10$	0.23	3.35		

Tableau (IX.6): Résultats pour le paramètre $\ln \alpha$ du modèle GR2M.

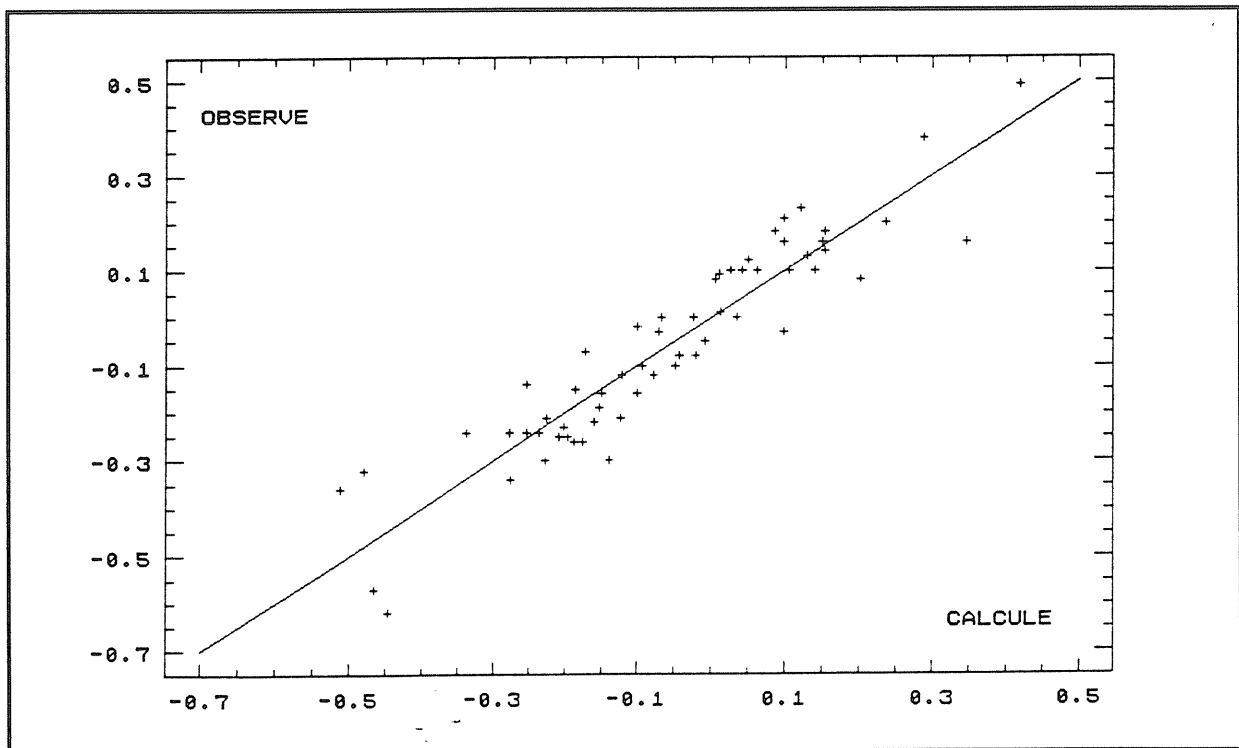


Figure (IX.7): Régression de α en fonction de A , D et PAM .

IX.2.2.2 - Paramètre β

Le deuxième paramètre β est expliqué par trois paramètres du modèle GR4J (A , B et D) avec un R^2 égal à 0.71 (Cf. tableau IX.7 et figure IX.8).

Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
x_0 $x_1 \ln A$	6.21 -0.92	5.74 4.92	0.81	0.30
x_0 $x_1 \ln B$	4.44 -0.79	8.29 6.68	0.73	0.44
x_0 $x_1 \ln A$ $x_2 \ln B$ $x_3 \ln D$	7.88 -0.70 -0.65 1.54	10.69 5.18 6.93 5.69	0.53	0.71

Tableau (IX.7): Résultats pour le paramètre $\ln \beta$ du modèle GR2M.

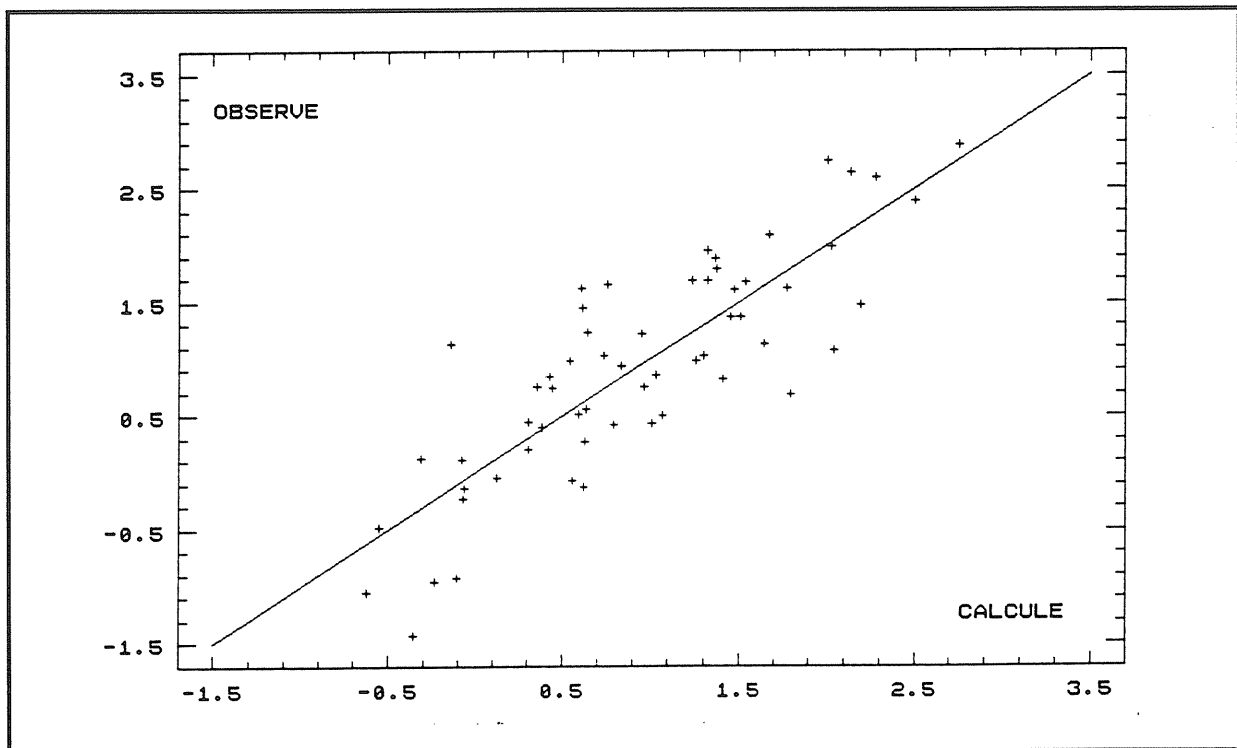


Figure (IX.8): Régression de β en fonction de A , B et D .

IX.2.3 - Conclusion

Trois des quatre paramètres du modèle journalier ont pu être reliés aux deux paramètres du modèle mensuel (A , B , et D) avec un coefficient de détermination minimal de 0.48. Le quatrième paramètre (C) n'a pas donné lieu à une relation significative avec les deux paramètres de GR2M mais se trouve expliqué de façon convenable par deux caractéristiques

du bassin. Le paramètre A donne un R^2 meilleur en introduisant la variable PAM en plus des deux paramètres. Les relations retenues sont:

$$\begin{aligned} a &= 0.93 - 1.80 \ln \alpha - 0.30 \ln \beta + 0.74 \ln PAM + 0.30 \mu \\ b &= 4.95 - 0.56 \ln \beta \\ c &= -0.98 + 0.26 \ln SURF \\ d &= -0.14 - 0.97 \ln \alpha + 0.07 \ln \beta + 0.15 \mu \end{aligned} \quad (IX.1)$$

où μ représente la variable normal centré réduite.

Les résultats de la deuxième tentative d'explication des paramètres de GR2M en fonction de ceux de GR4J sont peu surprenants après les résultats obtenus à partir du premier essai. Les relations retenues sont:

$$\begin{aligned} \alpha &= 2.5 / (A^{0.17} \cdot D^{0.58}) \\ \beta &= 2644 \cdot D^{1.54} / (A^{0.70} \cdot B^{0.65}) \end{aligned} \quad (IX.2)$$

Il est satisfaisant que B , qui joue un rôle dans le routage à long terme intervienne dans le paramètre β de la fonction de transfert de GR2M.

IX.3 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES SIMPLES

Le modèle GR4J, comme il a été précédemment souligné (voir **chapitre II**), est un modèle empirique proposant un schéma sans lien direct avec les processus mesurables. Cependant, on peut très bien chercher a posteriori des liaisons entre les quatre paramètres du modèle et certaines caractéristiques des bassins. Le travail accompli ici prolonge l'étude déjà effectuée par Edijatno (1991) par l'introduction de nouvelles variables explicatives et surtout par l'augmentation du nombre des bassins traités (presque un triplement).

En raison de différences dans la disponibilité des données (voir **Annexe VII.2**), nous procéderons en trois étapes et selon quatre niveaux de Nash.

Les caractéristiques des bassins disponibles sont:

- SURF** : Superficie du bassin versant (km²)
- PJ10** : Pluie journalière décennale (mm)
- PAM** : Pluie annuelle moyenne (mm)
- TAM** : Température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C)
- R** : Coefficient régional (**Cf. figure IX.9**)
(méthode CRUPEDIX, Scherer, 1980)
- G** : Intercéption potentielle décennale (mm) (méthode SOCOSE, 1980)
- IG** : Indice de pente de Dubreuil (m/km)

1 - Etude sur la totalité des bassins (TB); 349 bassins versants avec quatre caractéristiques de bassin (SURF, PAM, TAM et R).

2 - Etude sur un premier sous-groupe (G1); 232 bassins versants avec cinq caractéristiques de bassin (SURF, PJ10, PAM, TAM et R).

3 - Etude sur un deuxième sous-groupe (G2); 182 bassins versants avec l'ensemble des sept caractéristiques de bassin disponibles.

Le **tableau IX.8** résume la répartition de notre échantillon de 349 bassins versants en trois groupes, présente le seuil du critère de Nash choisi, les statistiques sur les paramètres ainsi que le critère de Nash pour les trois sous-groupes.

Les tableaux des régressions qui suivent ne comportent que des rapports de Student ≥ 2.7

IX.3.1 - Paramètre A

Les résultats significatifs concernant le paramètre A sont illustrés dans le **tableau IX.9**. On remarque qu'on retrouve cinq caractéristiques (SURF, PJ10, PAM, TAM et R). L'explication du paramètre A reste faible, la meilleure relation obtient un R^2 égal à 0.26 (Cf. **figure IX.10**) avec trois variables (SURF, PJ10 et TAM) pour le groupe 2 avec Nash ≥ 75 .

Code du Groupe	Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
TB ≥ 70	x_0	4.10	2.48	0.84	0.17
	$x_1 \ln SURF$	0.21	6.14		
	$x_2 \ln PAM$	-0.53	2.94		
	$x_3 \ln TAM$	1.72	3.22		
	$x_4 \ln R$	-0.57	2.81		
TB ≥ 75	x_0	4.74	2.94	0.78	0.19
	$x_1 \ln SURF$	0.20	6.23		
	$x_2 \ln PAM$	-0.63	3.56		
	$x_3 \ln TAM$	1.77	3.35		
	$x_4 \ln R$	-0.54	2.82		
TB ≥ 80	x_0	5.20	41.48	0.62	0.10
	$x_1 \ln SURF$	0.13	5.05		
G1 ≥ 70	x_0	-0.66	0.39	0.91	0.22
	$x_1 \ln SURF$	0.19	3.84		
	$x_2 \ln PJ10$	-1.12	4.71		
	$x_3 \ln TAM$	4.07	4.77		
G1 ≥ 80	x_0	5.09	31.67	0.65	0.11
	$x_1 \ln SURF$	0.15	4.11		
G2 ≥ 70	x_0	-1.49	0.74	0.98	0.23
	$x_1 \ln SURF$	0.31	3.75		
	$x_2 \ln PJ10$	-1.14	4.24		
	$x_3 \ln TAM$	4.27	4.37		
G2 ≥ 75	x_0	-1.41	0.71	0.92	0.26
	$x_1 \ln SURF$	0.34	4.17		
	$x_2 \ln PJ10$	-1.04	4.07		
	$x_3 \ln TAM$	4.04	4.21		
G2 ≥ 80	x_0	4.90	20.79	0.69	0.10
	$x_1 \ln SURF$	0.21	3.30		

Tableau (IX.9): Résultats pour le paramètre a du modèle GR4J.

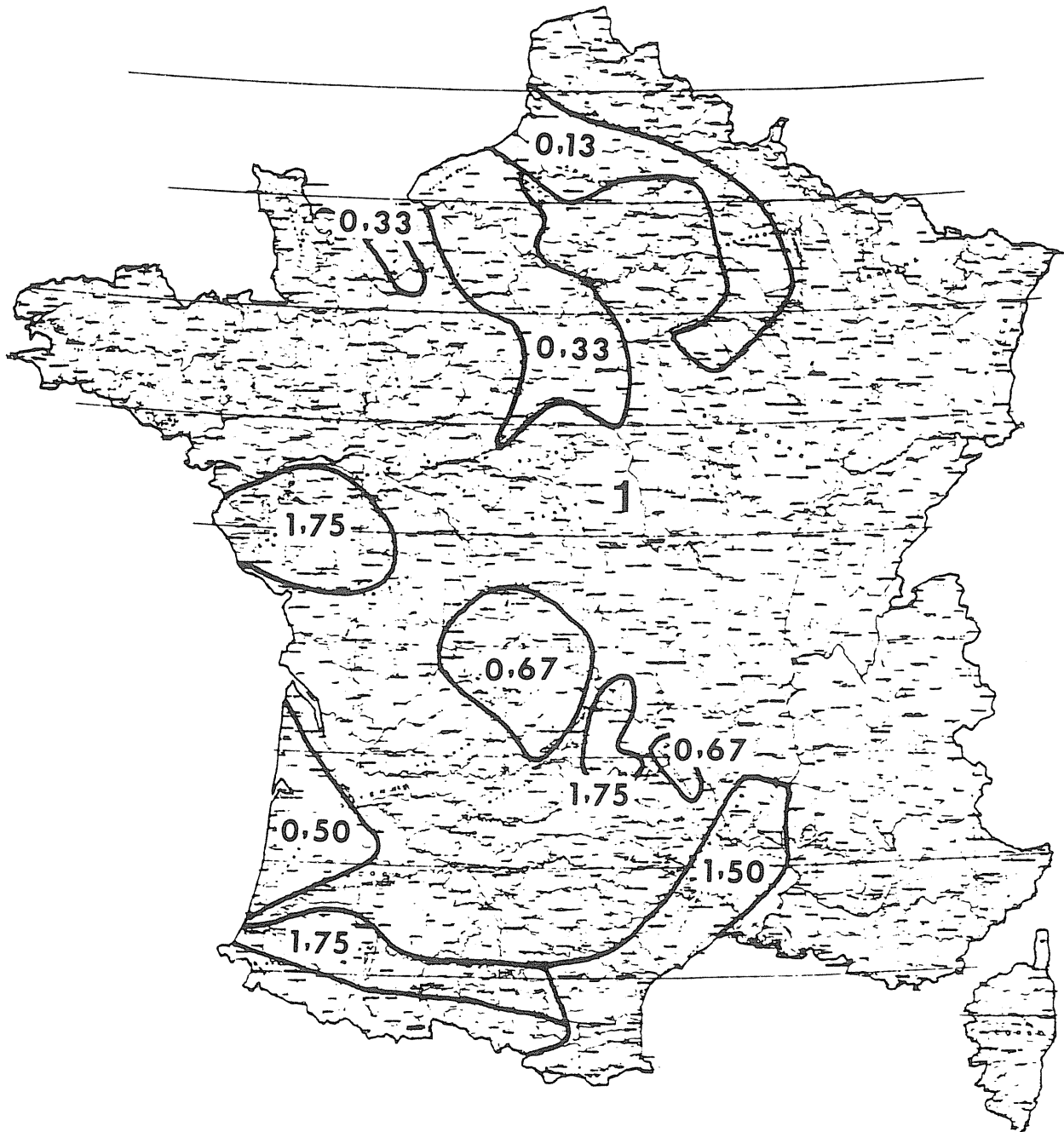


figure (IX.9): Carte du coefficient régional (R) de la méthode CRUPEDIX d'après Scherer (1980).

Code Groupe	Nb de Bassins	Critère de Nash (%)			Paramètre du modèle GR4J et écart-type						Surface (km ²)					
		Moy	σ	Max.	Min.	a	σ	b	σ	c	σ	d	σ	Moy	Max.	Min.
TB	349	81.6	11.8	96.7	22.9	5.68	1.02	4.71	1.09	0.12	0.40	0.11	0.45	279.2	9387	1.4
TB \geq 70	299	85.8	6.4	96.7	70.6	5.71	0.91	4.74	1.00	0.15	0.40	0.14	0.42	310.2	9387	1.4
TB \geq 75	276	86.6	5.38	97.7	75.0	5.72	0.86	4.76	0.99	0.16	0.40	0.13	0.41	324.6	9387	1.4
TB \geq 80	234	88.1	4.3	96.7	80.0	5.79	0.65	4.80	0.96	0.18	0.40	0.12	0.37	375.3	9387	1.4
TB \geq 85	166	90.3	2.9	96.7	85.0	5.83	0.57	4.93	0.86	0.22	0.42	0.14	0.34	420.9	9387	1.4
TB \geq 90	90	92.5	1.8	96.8	90.0	5.86	0.58	5.08	0.79	0.26	0.47	0.16	0.36	572.0	9387	1.5
G1	232	79.1	12.9	96.7	22.9	5.59	1.14	4.56	1.14	0.08	0.43	0.09	0.48	162.2	3750	1.4
G1 \geq 70	183	84.6	6.33	96.7	70.6	5.63	1.0	4.57	1.00	0.11	0.43	0.12	0.46	180.6	3750	1.4
G1 \geq 75	168	85.7	5.34	96.7	75.0	5.64	0.97	4.57	1.01	0.12	0.43	0.11	0.45	193.3	3750	1.4
G1 \geq 80	139	87.4	4.35	96.7	80.0	5.70	0.68	4.59	0.99	0.14	0.43	0.10	0.38	210.2	3750	1.4
G1 \geq 85	90	90.1	2.69	96.7	85.0	5.75	0.58	4.73	0.86	0.21	0.45	0.15	0.37	290.4	3750	1.4
G1 \geq 90	47	92.1	1.84	96.7	90.0	5.83	0.48	4.76	0.76	0.27	0.51	0.15	0.39	452.3	3750	1.5
G2	182	78.3	13.3	96.7	22.9	5.54	1.24	4.59	1.20	-0.2	0.34	0.12	0.52	52.7	414	1.4
G2 \geq 70	143	84.0	6.02	96.7	71.0	5.57	1.11	4.56	1.05	.003	0.34	0.16	0.49	52.6	246	1.4
G2 \geq 75	131	85.1	5.09	96.7	75.0	5.58	1.05	4.55	1.07	.008	0.34	0.15	0.59	53.9	246	1.4
G2 \geq 80	107	86.7	4.19	96.7	80.0	5.65	0.71	4.55	1.03	0.01	0.34	0.13	0.40	55.6	249	1.4
G2 \geq 85	64	89.5	2.67	96.7	85.0	5.72	0.61	4.71	0.93	0.02	0.31	0.19	0.39	57.2	131	1.4
G2 \geq 90	29	91.9	1.67	96.7	90.0	5.78	0.48	4.73	0.86	-0.2	0.33	0.23	0.42	55.9	122	1.5

Tableau (IX.8): Résultats des statistiques des paramètres et du critère de Nash sur les trois groupes

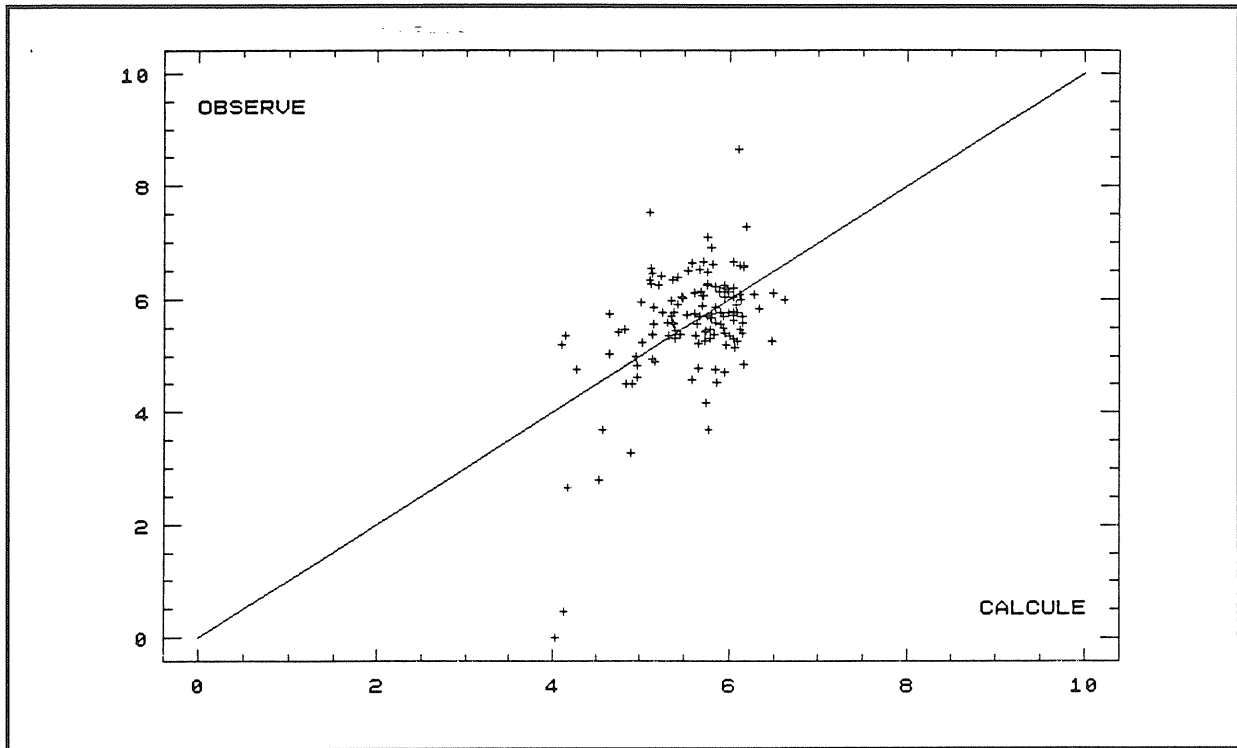


Figure (IX.10): Régression de A en fonction de SURF, PJ10 et TAM.

IX.3.2 - Paramètre B

Les coefficients de détermination pour le paramètre B (Cf. **Tableau IX.10**) varient de 0.24 à 0.42 et les caractéristiques qu'on retrouve sont SURF, PAM, TAM et R. On note que plus on sélectionne les bassins selon leur performance au calage critère et plus le R^2 est grand. La relation qu'on retiendra (Cf. **figure IX.11**) est celle utilisant uniquement deux variables PAM et R conduisant à un R^2 égal à 0.42 pour le $G2 \geq 80$.

Code du Groupe	Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
TB	x_0	-6.46	5.07	0.96	0.24
	$x_1 \ln SURF$	0.10	2.90		
	$x_2 \ln PAM$	1.58	8.63		
	$x_3 \ln R$	-1.17	5.45		
TB ≥ 70	x_0	-5.97	4.68	0.88	0.24
	$x_1 \ln SURF$	0.10	2.91		
	$x_2 \ln PAM$	1.51	8.24		
	$x_3 \ln R$	-0.94	4.48		
TB ≥ 80	x_0	-1.90	1.06	0.84	0.26
	$x_1 \ln PAM$	1.68	7.79		
	$x_2 \ln TAM$	-1.90	3.19		
	$x_3 \ln R$	-1.07	4.25		
TB ≥ 85	x_0	-2.89	1.40	0.77	0.26
	$x_1 \ln PAM$	2.15	7.61		
	$x_2 \ln TAM$	-2.71	3.83		

TB ≥ 90	x_0	-0.23	0.08	0.70	0.22
	$x_1 \ln PAM$	1.84	5.59		
	$x_2 \ln TAM$	-2.89	3.40		
G1	x_0	-1.69	4.73	0.98	0.28
	$x_1 \ln PAM$	1.67	7.87		
	$x_2 \ln R$	-1.28	5.70		
G1 ≥ 70	x_0	-6.73	4.71	0.84	0.32
	$x_1 \ln PAM$	1.65	7.90		
	$x_2 \ln R$	-1.70	5.13		
G1 ≥ 75	x_0	-7.10	4.79	0.84	0.35
	$x_1 \ln PAM$	1.70	7.87		
	$x_2 \ln R$	-1.10	5.40		
G1 ≥ 80	x_0	-7.14	4.36	0.80	0.36
	$x_1 \ln PAM$	1.71	7.18		
	$x_2 \ln R$	-1.27	5.63		
G2	x_0	-6.77	4.02	1.01	0.30
	$x_1 \ln PAM$	1.65	6.78		
	$x_2 \ln R$	-1.63	6.16		
G2 ≥ 75	x_0	-7.90	4.78	0.83	0.41
	$x_1 \ln PAM$	1.81	7.55		
	$x_2 \ln R$	-1.47	6.09		
G2 ≥ 80	x_0	-7.89	4.31	0.79	0.42
	$x_1 \ln PAM$	1.82	6.84		
	$x_2 \ln R$	-1.73	6.35		

Tableau (IX.10): Résultats pour le paramètre b du modèle GR4J.

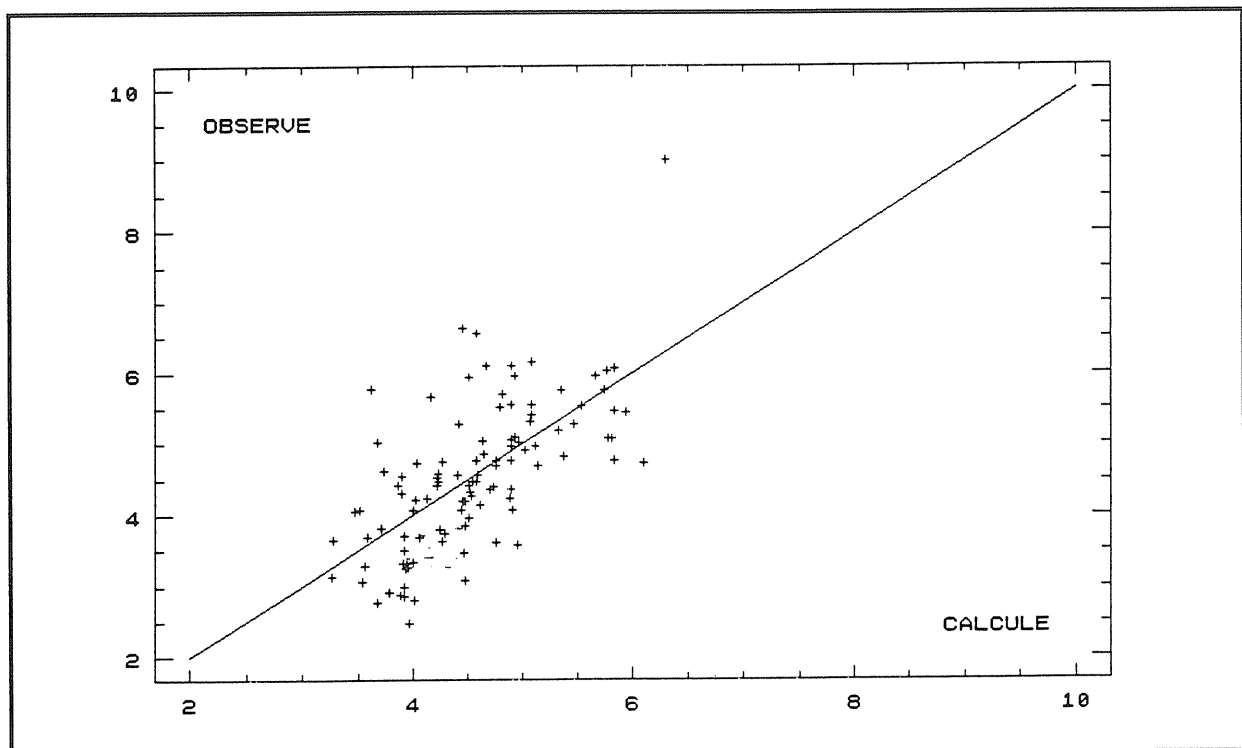


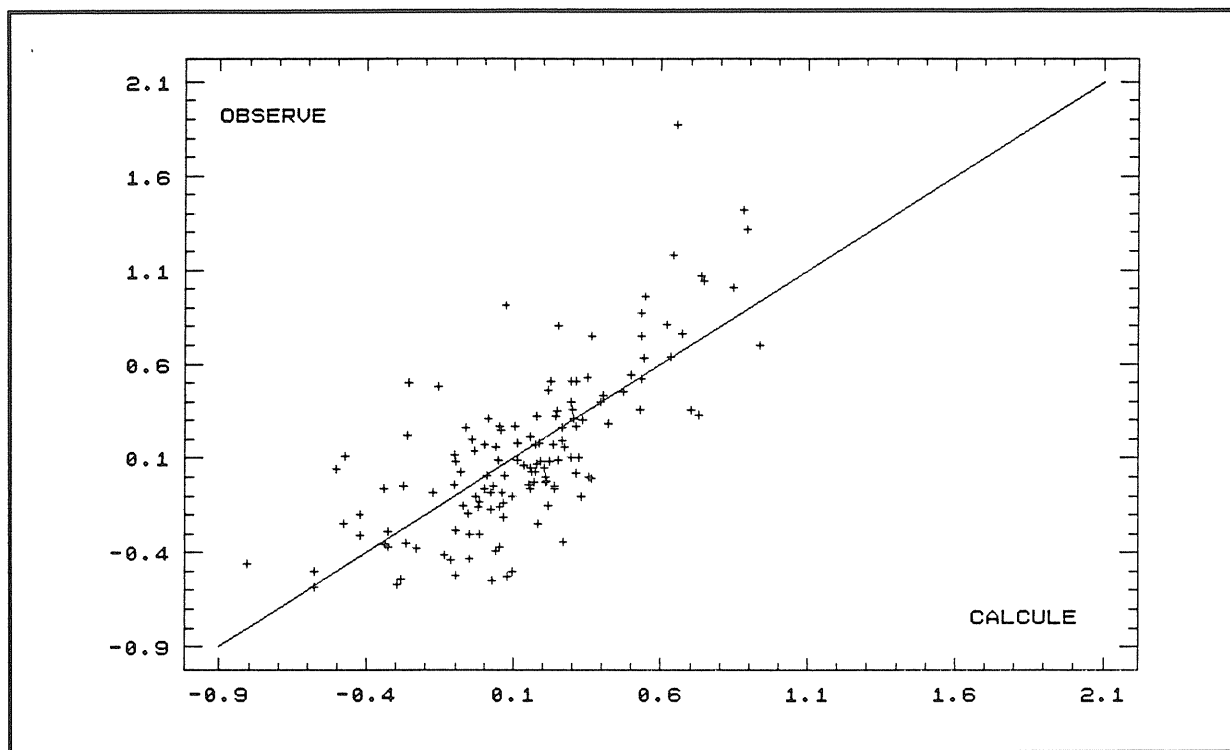
Figure (IX.11): Régression de B en fonction de PAM et R.

IX.3.3 - Paramètre C

Le paramètre C est mieux expliqué que les deux premiers puisqu'on atteint 0.54 pour R^2 (Cf. tableau IX.11). Il est par ailleurs expliqué par les variables SURF, PAM et R (Cf. figure IX.12) pour le groupe 1 avec un Nash au calage ≥ 80 . Deux autres variables interviennent dans d'autres relations: TAM dans le groupe 1 et IG dans le groupe 2.

Code du Groupe	Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
TB	x_0	1.66	4.19	0.30	0.46
	$x_1 \ln SURF$	0.15	14.43		
	$x_2 \ln PAM$	-0.32	5.66		
	$x_3 \ln R$	-0.25	3.88		
TB ≥ 70	x_0	1.63	3.83	0.29	0.48
	$x_1 \ln SURF$	0.51	13.56		
	$x_2 \ln PAM$	-0.31	5.16		
	$x_3 \ln R$	-0.28	4.09		
TB ≥ 75	x_0	1.75	4.00	0.29	0.51
	$x_1 \ln SURF$	0.16	14.07		
	$x_2 \ln PAM$	-0.34	5.37		
	$x_3 \ln R$	-0.26	3.73		
TB ≥ 80	x_0	2.08	4.24	0.28	0.52
	$x_1 \ln SURF$	0.16	12.97		
	$x_2 \ln PAM$	-0.38	5.42		
	$x_3 \ln R$	-0.25	3.19		
TB ≥ 85	x_0	3.27	5.05	0.27	0.58
	$x_1 \ln SURF$	0.17	12.38		
	$x_2 \ln PAM$	-0.57	6.14		
TB ≥ 90	x_0	2.70	2.59	0.27	0.67
	$x_1 \ln SURF$	0.21	12.07		
	$x_2 \ln PAM$	-0.51	3.36		
G1	x_0	3.02	4.93	0.31	0.47
	$x_1 \ln SURF$	0.15	10.29		
	$x_2 \ln PAM$	-0.28	4.02		
	$x_3 \ln TAM$	-0.64	3.39		
	$x_4 \ln R$	-0.20	2.72		
G1 ≥ 75	x_0	1.76	3.14	0.30	0.52
	$x_1 \ln SURF$	0.17	10.67		
	$x_2 \ln PAM$	-0.34	4.28		
	$x_3 \ln R$	-0.23	3.11		
G1 ≥ 80	x_0	1.92	3.08	0.30	0.54
	$x_1 \ln SURF$	0.18	10.06		
	$x_2 \ln PAM$	-0.37	4.08		
	$x_3 \ln R$	-0.24	2.75		
G2 ≥ 70	x_0	0.32	5.49	0.20	0.34
	$x_1 \ln R$	-0.39	4.71		
	$x_2 \ln IG$	-0.11	5.81		

Tableau (IX.11): Résultats pour le paramètre c du modèle GR4J.

Figure (IX.12): Régression de C en fonction de SURF, PAM et R.

IX.2.4 - Paramètre D

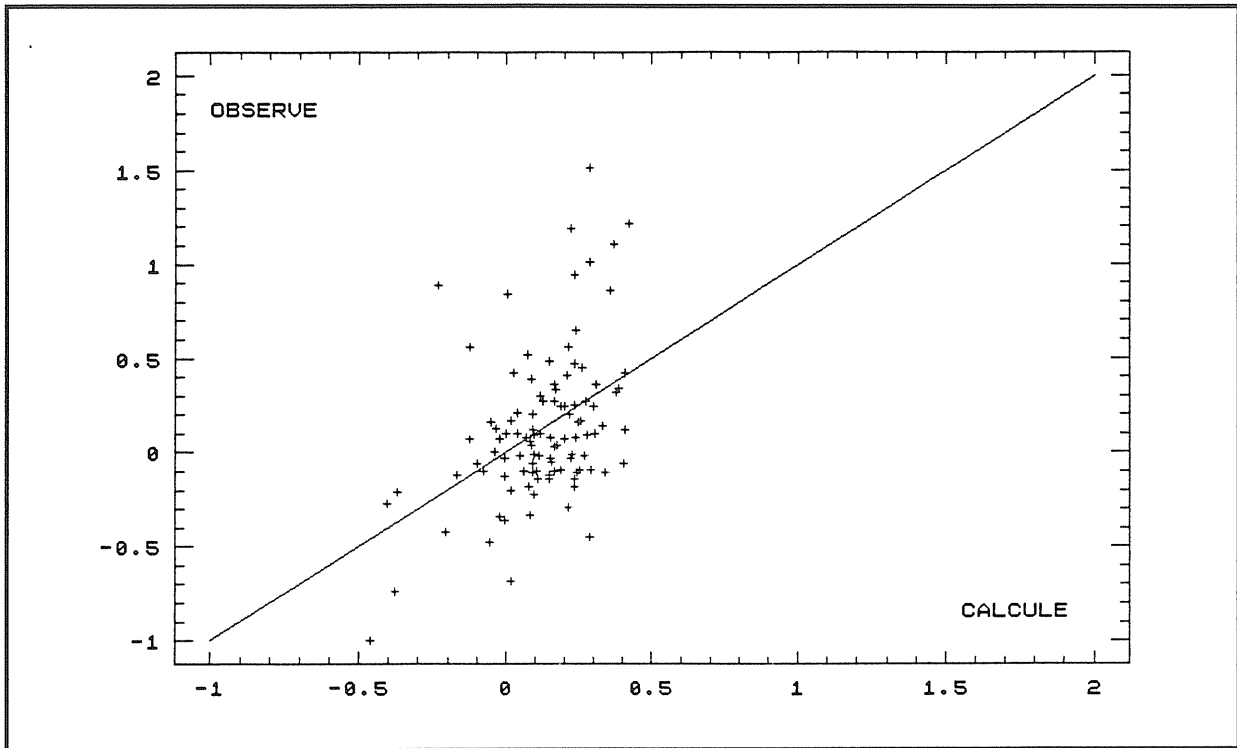
Deux variables (PAM et TAM) ont donné deux équations significatives (Cf. Tableau IX.12) mais expliquent faiblement D avec un R^2 de 0.16 et 0.19. La figure IX.13 représente la régression pour le groupe 2 avec un Nash ≥ 80 .

Code du Groupe	Formule de Régression	Coefficient Régression	Rapport de Student	Erreur Standard	Coefficient de détermination
G1 ≥ 80	x_0	1.39	1.57	0.35	0.16
	$x_1 \ln PAM$	-0.53	4.84		
	$x_2 \ln TAM$	0.91	3.09		
G2 ≥ 80	x_0	1.5	1.50	0.36	0.19
	$x_1 \ln PAM$	-0.58	4.59		
	$x_2 \ln TAM$	1.01	3.09		

Tableau (IX.12): Résultats pour le paramètre d du modèle GR4J.

IX.3.4 - Conclusion

La recherche d'une "explication" des paramètres de GR4J nous a conduit aux relations suivantes sur différents échantillons:

Figure (IX.13): Régression de d en fonction de PAM et TAM.

$$\begin{aligned}
 a &= 4.1 \frac{SURF^{0.3} \cdot TAM^4}{PJ10} \rightarrow R^2 = 0.26 \\
 b &= \frac{PAM^{1.8}}{2700 \cdot R^{1.7}} \rightarrow R^2 = 0.42 \\
 c &= 6.8 \frac{SURF^{0.2}}{PAM^{0.4} \cdot R^{0.2}} \rightarrow R^2 = 0.54 \\
 d &= 4.5 \frac{TAM}{PAM^{0.6}} \rightarrow R^2 = 0.19
 \end{aligned}
 \tag{IX.3}$$

Les relations concernant A et D restent d'une efficacité très limitée. Il est surprenant de noter que les relations baissent légèrement de qualité quand on réduit le nombre des bassins en ne retenant que ceux où le critère de Nash est meilleur.

Les relations obtenues pour le paramètre B sont satisfaisantes puisqu'on atteint 0.42 pour R^2 , ce dernier augmentant avec le choix de bassins ayant un coefficient de Nash supérieur. La meilleure relation est obtenue avec le groupe G2. Le paramètre C est le mieux expliqué des quatre paramètres avec R^2 égal à 0.54 et trois variables (SURF, PAM et R). Le paramètre régional R introduit par Scherer (1980) dans la méthode CRUPEDIX conditionne directement la valeur du débit instantané décennal. Cette analyse montre que l'effet de R sur le débit décennal proviendrait d'une réduction des temps de transfert (C variant inversement en fonction de R et non pas d'une réduction de la fonction de rendement).

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Dès les premières esquisses de construction de la problématique, nous avons fixé comme objectif à notre recherche, l' "explication" des paramètres du modèle pluie-débit GR4J, préalable à son utilisation sur des bassins non jaugés. Il est en effet notoire que cette question présente des difficultés singulières. Nous avons pensé cependant qu'avec un modèle empirique aussi simple que GR4J (seulement quatre paramètres libres de varier en fonction du bassin versant traité) on augmenterait sérieusement nos chances de succès par rapport à ce qu'il est normalement attendu des modèles conceptuels rencontrés dans la littérature hydrologique. La performance du modèle GR4J est inédite; aucun modèle ne permet actuellement, avec un aussi faible nombre de paramètres, de couvrir une aussi grande variété de bassins versants. La problématique retenue promettant d'être d'une complexité certaine, il a fallu se contenter de quelques voies exploratoires.

Une première voie d'approche a été d'exploiter les synthèses hydrologiques existantes qui ont tenté de relier directement des variables hydrologiques classiques (crues instantanée et journalière décennales, module, débit mensuel d'étiage) aux caractéristiques physico-climatiques des bassins versants. Si des relations existent entre ces variables hydrologiques classiques et les différents paramètres du modèle, on peut en déduire ipso-facto, des liaisons entre ces paramètres et les variables physico-climatiques dont les synthèses antérieures auraient prouvé la pertinence. Telle fut notre approche exposée au chapitre III.

Une deuxième approche, est de s'intéresser à une région assez homogène où l'on peut espérer trouver plus facilement des variables physiques discriminantes du fait de la plus grande simplicité de la situation. En effet, certaines différences observables dans un contexte régional restreint, l'allongement du bassin par exemple, peuvent présenter une efficacité qui serait complètement masquée dans un contexte plus large. Une telle recherche a été entreprise dans deux régions de France, la Bretagne et le bassin de la Moselle. On a pu montrer (chapitres IV et V) que cette voie d'approche permettait de réussir presque au delà des espérances initiales. Avec des explications assez sommaires de certains des paramètres du modèle, les autres étant fixés au niveau de leurs moyennes régionales, on a pu obtenir des résultats très corrects sur ces deux régions, avec un succès très net pour la Bretagne.

En adoptant la même démarche pour la Moselle nous avons estimé que l'absence de tout traitement, même sommaire, du phénomène neigeux allait gêner le calage du modèle, en faisant "dérapier" ses quatre paramètres. La nécessité de mettre en oeuvre un sous-modèle traitant des précipitations neigeuses, s'est vite fait sentir. La prise en compte du phénomène neigeux dans ce contexte n'a pas le même degré de complexité que celui que pouvait atteindre le problème du manteau neigeux saisonnier tel qu'il existe en haute montagne ou dans les pays nordiques. Il convenait d'éviter compliquer l'acquisition des données par l'introduction d'une ou plusieurs variables de forçages telles que les températures ou l'ensoleillement, en cherchant seulement à exploiter l'information existante dans les données pluviométriques de METEO-FRANCE dont un code de qualité associé à toute précipitation journalière indique s'il s'agit de pluie ou de neige. Il a fallu concevoir un sous-modèle conceptuel qui traite de la fonte de neige en fonction de l'énergie disponible sous la forme de la donnée d'ETP et de la présence de pluie ultérieure considérée, non pas tellement pour son énergie d'advection mais pour l'indication d'un radoucissement du temps. Ce sous-modèle est pseudo-distribué dans la

mesure où chaque poste pluviométrique commande une certaine fraction de la superficie du bassin, et par conséquent les précipitations neigeuses varient avec ces différentes fractions de territoire. Ce travail nous a conduit en fait à lever le voile sur des difficultés insoupçonnées. On a constaté, de façon surprenante, que quelles que soient les valeurs affectées aux paramètres de ce sous-modèle conceptuel sommaire, ce dernier dégradait les résultats obtenus avec le modèle GR4J initial. Après de très nombreux essais, force a été de reconnaître que ce traitement de l'information neigeuse n'apportait d'amélioration que lorsqu'il était appliqué avec une majoration d'environ 50 % de la donnée pluviométrique. Autrement dit, si 10 mm étaient réputés être tombés sous forme neigeuse, il rentraient dans le modèle GR4J directement en tant que pluie, le sous-modèle neige étant alimenté par 5 mm de précipitation neigeuse. Ce résultat nous a beaucoup surpris et nous a montré à quel point il était difficile de dissocier les phénomènes dans un modèle comme GR4J où ces derniers sont appréhendés de façons très globale. Il n'y a peut-être pas tellement de différence entre l'eau stockée sous forme de neige et une partie de celle stockée dans le sol. De plus, la faiblesse de la couverture des bassins versants en postes pluviométriques (parfois un seul poste par bassin) n'a pas permis de garantir un gain en utilisant une majoration fixe de 50 % et, pour la Moselle, on a été amené à optimiser ce coefficient bassin par bassin. Il est en effet admissible qu'un bassin avec un seul poste ne puisse pas être traité de la même façon selon que ce poste est situé en plaine où sur les parties hautes du bassin. Cependant, il est clair que l'on ne peut pas se permettre d'introduire un paramètre libre supplémentaire compte tenu de la faiblesse des gains obtenus en qualité de simulation des débits. L'existence d'un module "neige" à paramètres fixes qui permet de réduire la plage de variation des autres paramètres est, à ce seul titre, bénéfique.

La tentative d'explication des paramètres, entreprise par Edijatno (1991), et reprise ici (voir chapitre IX) avec un nombre imposant de bassins versants, a mis en évidence que les paramètres *A* et *D* étaient les plus délicats à estimer en fonction des caractéristiques physico-climatiques disponibles. On a pensé qu'un modèle mensuel, n'ayant pas à traiter le routage à court terme repris par les paramètres *C* et *D*, reposerait sur des paramètres proches de *A* et *D*. Ce modèle mensuel, obligatoirement plus simple que GR4J, devrait se prêter encore plus facilement que GR4J à l'explication de ses paramètres par les caractéristiques physiques des bassins.

Ce détour par un modèle mensuel pouvait ainsi nous mettre sur la voie pour découvrir des caractéristiques influençant les paramètres *A* et *D*. Ces conclusions imposèrent la mise au point d'un modèle mensuel, tirant parti de l'expérience déjà accumulée par Kabouya (1990) dans sa thèse sur les écoulements en Algérie septentrionale. Après une recherche assez longue (Cf. chapitre VII) nous sommes parvenus à un modèle extrêmement simple (GR2M avec seulement 2 paramètres) dérivé du modèle GR4J quant à la fonction de production. Nous avons constaté que ce modèle se comportait presque aussi bien que le meilleur modèle existant actuellement (modèle de Thomas) utilisant quatre paramètres libres. Sur une soixantaine de bassins versants traités aux deux pas de temps, journalier et mensuel, les paramètres *A* et *D* de GR4J étaient assez bien liés aux deux paramètres de GR2M. Comme le modèle GR2M est extrêmement rustique et que ses deux paramètres sont particulièrement précis, cette correspondance confirmait au passage le bien-fondé du quatrième paramètre *D* du modèle GR4J et à travers lui la fonction d'échange qui avait été introduite par Nascimento (1991). On peut penser que le modèle GR2M est plus facile à régionaliser que GR4J, comme son application à la Bretagne le laisse supposer (voir chapitre VIII). Ce modèle mensuel pourrait ainsi servir d'étape intermédiaire soit en rattachant *A* et *D* aux deux paramètres de GR2M calé par grands bassins, soit en suggérant des variables explicatives à faire intervenir pour l'estimation de ces deux paramètres "délicats" du modèle GR4J.

En somme cette recherche a permis d'aborder des sujets importants (comment traiter la neige, intérêt du modèle mensuel...) et a donc enrichi la connaissance du comportement du modèle GR4J et permet d'esquisser différentes voies d'approche en ce qui concerne l'estimation a priori des quatre paramètres de ce dernier. Pour aller plus loin, il conviendra très probablement de découvrir des variables physiques plus pertinentes que celle manipulées jusqu'à présent. Il est possible que diverses analyses telles que les études physico-chimiques ou l'analyse des influences des actions anthropiques ou encore l'exploitation heureuse des systèmes d'information géographique révèlent des caractéristiques plus intimement liées à la transformation pluie-débit et aux paramètres de GR4J qui en sont un résumé numérique.

*Références
Bibliographiques*

- Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E O'Connel and J. Rasmussen**, 1986. An introduction to the European Hydrological System "SHE". 1- History and philosophy of physically-based, distributed modelling system. 2- Structure of physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol*, 87: 45-59 et 61-77.
- Aide mémoire pratique des techniques statistiques**, 1986. Revue de statistique appliquée, Vol. XXXIV, Numéro spécial.
- Alley, M. W.**, 1985. Water balance models in one-month-ahead stream flow forecasting. *Water Resour. Res.*, 21(4) : 597-606.
- Arnell, W. N.**, 1992. Factors controlling the effects of climate change on river regimes in a humid temperate environment. *J. Hydrol.*, 132 : 321-342.
- Baraka, L. S.**, 1992. Element de modélisation à introduire dans une méthode de calcul d'un quantile de crue sur un bassin non jaugeé. Mémoire de DEA Université Paris-Sud.
- Bates, B. C.**, 1992. Improved methodology for parameter inference in non-linear, hydrologic regression models. *Water resour. res.*, 28(1) : 89-97.
- Berod, D.**, 1988. Etude d'un modèle en simulation continue, le GR3 et comparaison avec d'autres méthodes de détermination de débits. Ecole Polytechnique de Lausanne.
- Beven, K.**, 1987. Towards a new paradigm in hydrology. In *water for the future: Hydrology in perspective*. IASH Publ., 164 : 393-403.
- Beven, K.**, 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *J. Hydrol.*, 105 : 157-172.
- Beven, K.**, 1993. Estimating transport parameters at the grid scale: on the value of a simple measurement. *J. of Hydrol.*, 143 : 109-123.
- Braun, L. N., C. B. Renner**, 1992. Application of a conceptual runoff model in different physiographic regions of Switzerland. *Hydr. Scien. Journal*, 37 (3-6) : 217-231.
- Burn, H. S., D. B. Boorman**, 1993. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *J. Hydrol.*, 143 : 429-454.
- CEMAGREF et EDF**, 1987. Critères d'applications opérationnelles de modèles hydrologiques. Rapport final.
- Cernesson, F.**, 1992. Modèle simple de prédétermination des crues de fréquence courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens. Rapport de thèse, Université de Montpellier II.
- Chiew, F., T. McMahon**, 1994. Application of the daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG to 28 Australian catchments. *J. Hydrol.*, 153 : 383-416.
- Crawford, N. H., R. K. Linsley**, 1963. A conceptual model of hydrologic cycle. *IASH Pub.*, 63 : 573-587.
- Delattre, P.**, 1979. Le problème de la justification des modèles dans le cadre du formalisme des systèmes de transformation. Actes du colloque "Elaboration et justification des modèles: Applications en Biologie", Tome I, Maloine Editeur, 97-128.
- Dezetter, A.**, 1991. Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savanes soudanaises. Rapport de thèse, Université Montpellier II.
- Duan, Q., S. Sorooshian and V. Gupta**, 1992. Effective and efficient global optimisation for conceptual rainfall-runoff models. *Water resour. res.* 28(4) : 1015-1031.
- Duffar, L.**, 1982. Constitution d'un fichier de données physiographiques et de débits mensuels sur 51 bassins versant bretons. Rapport BRGM 82-SGN-EAU.
- Edijatno**, 1987. Amélioration des modèles simples de transformations pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. mémoire de DEA, Université Louis Pasteur Strasbourg.
- Edijatno, C. Michel**, 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2 : 113-121.

- Edijatno**, 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Rapport de thèse, Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- Edijatno, N. O. Nascimento, X. Yang and Z. Makhoulouf**, 1994. GR4J: an empirical rainfall-runoff model. soumis au J. Hydrol.
- Fortin, J. P., et al.**, 1971. Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. AISH (Actes du colloque de Varsovie) pub 101 vol 2 : 548-557.
- Galea, G.**, 1972. Modèles déterministes des relations pluies-débits sur le bassin de l'Orgeval. Rapport de thèse. Université de Montpellier.
- Girard, G.**, 1977. Etude de l'efficacité relative et du domaine d'application des différents modèles hydrologiques pour prévoir les étiages. ORSTOM.
- Grayson, R. B., I. D. Moore and T.A. McMahon**, 1992. Physically based hydrologic modelling. 2- Is the concept realist ?. Water resour. res., 26(10) : 2659-2666.
- Gupta, V. K., S. Sorooshian**, 1985. The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. J. Hydrol., 81 : 57-77.
- Hubert, P.**, 1984. Eaupuscule: une introduction à la gestion de l'eau. Ellipses (Ed. Marketing, Paris).
- Hughes, D. A.**, 1989. Estimation of the parameters of an isolated event conceptual model from physical catchment characteristics. Hydr. Scien. Journal, 34 (5-10) : 539-557.
- Jain, S. K.**, 1993. Calibration of conceptual modes for rainfall-runoff simulation. J. Scien. Hydro., 38 (5) : 431-441.
- Jakeman, A. J. and G. M. Hornberger**, 1993. How much complexity is warranted in a rainfall runoff models? Water resour. res., 29(8) :2637-2649.
- James, L. D.**, 1972. Hydrologic modelling, parameter estimation and watershed characteristics. J. Hydrol., 17 : 283-307.
- Jacquet, J.**, 1984. Modélisation et stratégie de la mesure dans l'eau et dans l'air. la Houille Blanche, 1/2 : 67-79.
- Jarboe, J. E., C. T. Haan**, 1974. Calibrating a water yield model for small ungauged watersheds. Water resour. res., 10(2) :256-262.
- Kabouya, M.**, 1990. Modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Rapport de thèse. Université Paris-Sud.
- Kabouya, M., C. Michel.**, 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel. Application à un pays semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau, 4 : 569-587.
- Kachroo, R. K., L. Natale**, 1992. Non-linear modelling of the rainfall-runoff transformation. J. Hydrol., 135 : 341-369.
- Kauark, L. L. A.**, 1990. Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole. Rapport de thèse. ENPC-CERGRENE.
- Klemes, V.**, 1986. Dilettantism in hydrology: Transition or Destiny? Water resour. res. 22(9) : 177-188.
- Klemes, V.**, 1988. A hydrological Perspective. J. Hydrol., 144 : 371-379.
- Kothyari, U. C., V. Aravamuthan and V. P. Singh**, 1993. Monthly runoff generation using the linear perturbation model. J. Hydrol., 144 : 371-379.
- Kuczera, G.**, 1982. On the relationship between the reliability of parameter estimates and hydrologic time series data used in calibration. Water resour. res., 18(1) : 146-154.
- Kuczera, G.**, 1983. Improved parameter inference in catchment models, 1- Evaluating parameter uncertainty. Water resour. res., 19(5) : 1151-1162.
- Kundzewicz, Z. W.**, 1986. The hydrology of tomorrow. Hydrol. Scien. Journal, 31:223-235.
- Lavabre, J., D. Sempere Torres and F. Cernesson**, 1993. Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. J. Hydrol.,142:273-299.

- Lebart, L. A. Morineau, J. P. Felon,** 1982. Traitement des données statistiques. Méthodes et programmes. Edition DUNOD, 185-264.
- Lee, L. ,** 1993. A formal approach to hydrological model conceptualisation. *J. Scien. Hydro.*, 38 (5) : 391-401.
- Leviandier, T.,** 1988. Mise en oeuvre et interprétation de la comparaison de modèles. *La Houille Blanche*, 5/6 : 395-399.
- Lichtiger, L.,** 1986. Modèles pluies-débits : Que choisir ? Mémoire de fin M.S.T. I.S.I.M.
- Magette, W. L., V. O. Shanholtz and J. C. Carr,** 1976. Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water resour. res.* 12(3) : 472-476.
- Martinec, J. Rango A.,** 1989. Merits of statistical criteria for the performance of hydrological models. *Water resour. Bul.*, 25(2) : 421-432.
- Mather John R.,** 1981. Using computed stream flow in watershed analysis. *Water resour. Bul.*, 17 (3) : 474-482.
- Makhlouf, Z.,** 1991. Signification hydrologique des paramètres d'un modèle conceptuel pluie-débit. mémoire de DEA. Université Paris-Sud.
- Makhlouf, Z., C. Michel,** 1992. Relation entre les paramètres d'un modèle global pluie-débit et les caractéristiques physiques d'un bassin breton. 8^{ème} Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier.
- Makhlouf, Z., C. Michel,** 1993. Conception d'un modèle pluie-débit mensuel à deux paramètres. CEMAGREF, Antony.
- Makhlouf, Z.,** 1994a. Parameters assessment for a monthly water balance model. Congrès EGS de Grenoble.
- Makhlouf, Z., C. Michel,** 1994b. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *J. Hydrol.* 162 (1994) : 299-318.
- Mazenc, B., M. Sanchez et D. Thiery,** 1984. analyse de l'influence de la physiographie d'un bassin versant sur les paramètres d'un modèle hydrologique global et sur les débits caractéristiques à l'exutoire. *J. Hydrol.*, 69 : 97-188.
- Mazenc, B.,** 1981. Etude des relations entre les paramètres d'un modèle global pluie-débit et les caractéristiques physiques d'un bassin versant correspondant. Application à 17 bassins versants Bretons. Rapport BRGM, 81 SGN 525 EAU.
- Michel, C.** 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle à un paramètres? *La Houille Blanche*, 1 : 39-44.
- Michel, C.,** 1989. Modèle pluie-débit de prévision d'étiages en valeurs mensuelles. CEMAGREF, Antony.
- Michel, C.,** 1991. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. CEMAGREF, Antony.
- Michel C., Edijatno, T. Leviandier,** 1992. Progrès et application de la modélisation pluie-débit. contribution française en hydrologie pour la quadrienne, 1987-1990, IUGG. 219-222.
- Ministère de l'agriculture ,** 1980. Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 1: Eléments de pluviométrie. Fascicule 2: La méthode de SOCOSE (méthode sommaire d'estimation de la crue décennale sur un petit bassin versant non-jaugé. Fascicule 3: La méthode CRUPEDIX).
- Nascimento, N. O.,** 1991. Adaptation d'un modèle conceptuel journalier (GR3J) aux bassins versants intermittents. Mémoire de DEA, CERGRENE, ENPC.
- Nascimento, N. O., C. Michel,** 1992. Some epistemological aspects of the development and use of hydrologic conceptual models. In Graillot, D., Schilling, W., et Einfalt, T. (ed), *Proceeding of the fourth European junior scientist course on "Assessment of modelling uncertainties and measurement, errors in hydrology"*, Saint-Victor-sur-Loire, 256-264.

- Nascimento, N. O.**, 1994. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Rapport provisoire de thèse de l'ENPC.
- Nash, J. E., J. V. Sutcliffe**, 1970. River flow forecasting through conceptual models. *J. Hydrol.*, 10 : 282-290.
- Pirt, J., E. A. Bramley**, 1985. The application of simple moisture accounting models to ungauged catchments. *J. of the Inst. of Wat. Eng. and Scientists*, N°39, pp. 169-177.
- Roche, M.**, 1971. Les divers types de modèles déterministes. *La Houille Blanche*, 2 : 111-129.
- Roche, M.**, 1986. Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Masson, Paris.
- Roche, P. A.**, 1988. Les modèles. In Valiron F. (ed), gestion des eaux: automatisation, informatisation et télégestion, Tome III, 138-166.
- Schaake, Jr. J. C., Liu Chunzhen**, 1989. Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. *IAHS Publ.* 181 : 343-352.
- 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*, 3(2) : 117-129.
- Servat, E, A. Dezetter, J. M. Lapetite**, 1989. Modélisation pluie-débit, étude et sélection des critères de calage des modèles pluie-débit. ORSTOM, Programme ERREAU, Note N°2.
- Sorooshian, S., J. A. Dracup**, 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff model : correlated and heteroscedastic error cases. *J. Hydrol.*, 16(2) : 430 - 442.
- Sorooshian, S., V. Gupta**, 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness. *Water resour. res.*, 19(1) : 260-268.
- Thiery, D.**, 1985. Analyse et modélisation des bassins versants de la Moselle française. Modélisation de 40 bassins versants et analyse de sensibilité du calage. Rapport BRGM 85 SGN 435 EAU.
- Troutman, B. M.**, 1985. Errors and parameter estimation in precipitation-runoff modelling. 1. Theory. *Water resour. res.* 21(8) : 1195-1213.
- Tulu, T.**, 1991. Simulation of streamflows for ungauged catchments. *J. Hydrol.*, 129 : 3-17.
- Vandewiele, G. L., C.-Y. Xu, and W. Huybrechts**, 1991. Regionalisation of physically-based water balance models in Belgium. Application to ungauged catchments. *Water resour. manag.* 5 : 199-208.
- Vandewiele, G. L., C.-Y. Xu, and Ni-Lar-Win**, 1992. Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma. *J. Hydrol.*, 134 : 315-347.
- Williams, B. J., W. W. G. Yeh**, 1983. Parameter estimation in rainfall-runoff models. *J. Hydrol.* 63 :373-393.
- Wood, E. F., D. P. Lettenpaier and J. R. Wallis**, 1991. Comparison of an alternative land surface parameterization with the GFDL high resolution climate model. *IAHS Publ.* n°204 : 53-64
- Xu, C.-Y., G. L. Vandewiele**, 1994. Sensitivity of monthly rainfall-runoff models to input errors and data length. *J. Scien. Hydro.*, 39 (2) : 157-176.
- Yang, X., E. Parent, C. Michel, et P. A. Roche**, 1991. Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits. *La Houille Blanche*, 6 : 433-440.
- Yang, X.**, 1993. Utilisation d'un modèle conceptuel pluie-débit pour la prévision des crues. Rapport de thèse de l'ENPC.

Liste des Figures

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure (I.1): Définition du système et des variables.	4
--	---

CHAPITRE II

Figure (II.1): Schéma du modèle GR2.....	24
Figure (II.2): Schéma du modèle GR3J.....	25
Figure (II.3): Rendement de la pluie et de l'évaporation	27
Figure (II.4): Schéma du modèle GR4J.....	33
Figure (II.5): Variation de la crue cinquantennale en fonction du paramètre <i>C</i> . (bassins hypothétiques placés dans le contexte climatique parisien).	38
Figure (II.6): Débit généré par GR4J pour la Seine à Bar-Sur-Seine (période de validation)	39

CHAPITRE III

Figure (III.1): Plan de situation de 20 stations climatiques	46
Figure (III.2): Influence des paramètres sur les écoulements annuels ($F^* = 0.5$) (Paris-Montsouris).....	51
Figure (III.3): Influence des paramètres sur les crues. ($F^* = 0.9$) (Paris-Montsouris).....	52
Figure (III.4): Influence des paramètres sur les étiages. ($F^* = 0.5$) (Paris-Montsouris)	53
Figure (III.5): Effet comparé des différents paramètres sur trois aspects des écoulements d'un bassin versant.....	54

CHAPITRE IV

Figure (IV.1): Plan de situation des 23 bassins versants bretons.....	58
Figure (IV.2a): Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 1 et 2.....	64
Figure (IV.2b): Projection des bassins dans le plan 1 et 2.....	64
Figure (IV.3): Régression de <i>A</i> en fonction de PGRA.....	69
Figure (IV.4): Régression de <i>B</i> en fonction de PGRA et PPMA.....	70
Figure (IV.5): Régression de <i>C</i> en fonction de PGRA, PPMA et NJPA	71
Figure (IV.6): Régression de <i>B</i> en fonction de PGRA.....	74
Figure (IV.7): Régression de <i>C</i> en fonction de PENT.....	75
Figure (IV.8): Régression de <i>B</i> en fonction de PGRA.....	77
Figure (IV.9): Régression de <i>C</i> en fonction de PENT et PGRA.....	78
Figure (IV.10): Comparaison des distributions des critères de Nash pour les différentes applications du modèle GR4J avec calage.....	81
Figure (IV.11): Comparaison des distributions des critères de Nash pour les différentes applications des modèles régionaux.	81
Figure (IV.12): Comparaison des distributions des erreurs de bilan pour les différentes applications.	82
Figure (IV.13): Régression de <i>B</i> en fonction de PGRA.....	83
Figure (IV.14): Régression de <i>C</i> en fonction de PENT.....	85
Figure (IV.15): Régression de <i>B</i> en fonction de PGRA.....	85
Figure (IV.16): Régression de <i>C</i> en fonction de PENT.....	87
Figure (IV.17): Régression de <i>THY</i> en fonction de LONG (modèle AMANDE).....	87
Figure (IV.18): Régression de <i>SHY</i> en fonction de PGRA (modèle AMANDE).	88
Figure (IV.19): Régression de <i>LMAX</i> en fonction de PSCH et PPRA (modèle MARTINE).	89
Figure (IV.20): Comparaison des distributions des coefficients de détermination pour les différents modèles.....	90

CHAPITRE V

Figure (V.1): Plan de situation des 34 bassins versants de la Moselle.	95
Figure (V.2a): Corrélations des caractéristiques de bassin - composantes 1 et 2.	100
Figure (V.2b): Projection des bassins dans le plan des composantes 1 et 2.	100
Figure (V.3): Régression de A en fonction de GRES.	106
Figure (V.4): Régression de B en fonction de PENT, CONI, PRAI, CHAM et GRES.	107
Figure (V.5): Régression de C en fonction de SURF et ALTI.	108
Figure (V.6): Régression de D en fonction de ALTI.	109
Figure (V.7): Comparaison des distribution des critères de Nash pour les différentes applications.	111
Figure (V.8): Comparaison des distributions des erreurs de bilan pour les différentes applications.	111

CHAPITRE VI

Figure (VI.1): Découpage statistique en vingt zones.	116
Figure (VI.2): Distributions des critères de Nash (X_n : portion de neige prise en compte).	121
Figure (VI.3): Distributions des critères de Nash (X_n : coefficient multiplicatif de la neige).	121
Figure (VI.4): Transformation de l'information "Neige".	122
Figure (VI.5): Comparaisons des distributions des critères de Nash pour les solutions à quatre paramètres fixes ($X_p/X_e/X_m/X_r$)	124/125
Figure (VI.6): Schémas des six différents essais d'optimisation du paramètre libre porté en abscisse.	127
Figure (VI.7): Distributions des critères de Nash avec un paramètre libre de modification de la précipitation neigeuse.	129

CHAPITRE VII

Figure (VII.1): Relation entre Y_i et W_i du modèle ABCD.	134
Figure (VII.2): Modèle ABCD de Thomas (1981).	135
Figure (VII.3): Modèle $T \alpha$ d'Alley et al. (1984).	136
Figure (VII.4): Modèle de Kabouya (1990).	138
Figure (VII.5): Modèle de prévision d'étiage de Michel (1989).	138
Figure (VII.6): Modèle de Vandewiele et al. Variante N° 2 (1992).	140
Figure (VII.7): Modèle de Nanjing (Wood et al. 1991).	141
Figure (VII.8): Organigramme de mise en oeuvre comparée des modèles.	144
Figure (VII.9): Plan de situation des bassins versants utilisés pour le développement du modèle mensuel.	145
Figure (VII.10): Distribution des critères de Nash pour sept modèles sur 91 bassins versants.	147
Figure (VII.11): Correction d'entrées concomitante à une valeur extrême pour le paramètre (α).	155
Figure (VII.12): Distributions des critères de Nash pour trois modèles sur les 91 bassins versants étudiés.	158
Figure (VII.13): Architecture du modèle GRM.	158
Figure (VII.14): Architecture du modèle GR2M.	159
Figure (VII.15): Distributions du premier paramètre pour les modèles GR2M et GRM.	162
Figure (VII.16): Distributions du deuxième paramètre pour les modèles GR2M et GRM.	163
Figure (VII.17): Distributions des critères de Nash pour les 14 bassins pour GRM et GR2M.	164
Figure (VII.18): Distributions des critères de Nash pour trois modèles sur 78 bassins versants.	165
Figure (VII.19): Diminution des critères de Nash en passant du calage au contrôle.	165
Figure (VII.20): Absence de corrélation entre la superficie des bassins et le critère de Nash.	166
Figure (VII.21): Gain obtenu au calage pour les différents tests de modèles.	167
Figure (VII.22): Gain obtenu au contrôle pour les différents tests de modèles.	167
Figure (VII.23): Débits générés par GR2M pour la Seine à Bar-sur-Seine. Calage sur : 1950-1963; Contrôle sur : 1964-1980.	169
Figure (VII.23.a): Situation géographique des bassins ayant une forte ou une faible valeur pour le paramètre α	170
Figure (VII.23.b): Couples de paramètres pour lesquels a est soit faible soit fort dans l'espace $\ln \alpha \ln \beta$	170
Figure (VII.24.a): Situation géographique des bassins ayant une forte ou faible valeur pour le paramètre β	171
Figure (VII.24.b): Couples de paramètres pour lesquels b est soit faible soit fort dans l'espace $\ln \alpha \ln \beta$	171
Figure (VII.25.a): Régions apparemment homogènes d'un point de vue géologique et pédologique.	173
Figure (VII.25.b): Couples de paramètres de bassins situés dans des régions apparemment homogènes par la géologie et la pédologie.	174
Figure (VII.26): Comparaison des distributions du critère de Nash pour deux modèles sur 91 bassins versants.	175

CHAPITRE VIII

Figure (VIII.1): Plan de situation des 42 bassins versants bretons.	180
Figure (VIII.2a): Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 1 et 2.	184
Figure (VIII.2b): Projection des bassins dans le plan 1 et 2.	184
Figure (VIII.3): Comparaison des distributions des critères de Nash pour les différentes applications du modèle GR2M.	187
Figure (VIII.4): Comparaison des distributions du paramètre $\ln\alpha$ pour deux périodes de calage.	187
Figure (VIII.5): Comparaison des distributions du paramètre $\ln\beta$ pour deux périodes de calage.	188
Figure (VIII.6): Couples de paramètres des 30 bassins bretons dans l'espace $(\ln\alpha), (\ln\beta)$	188
Figure (VIII.7): Régression de β en fonction de PGRA.	189
Figure (VIII.8): Comparaison des distributions des critères de Nash pour trois applications du modèle GR2M sur la période globale.	190
Figure (VIII.9): Comparaison des distributions des critères de Nash pour différentes applications du modèle GR2M sur deux périodes distinctes.	192
Figure (VIII.10): Comparaison des distributions des critères de Nash pour trois applications du modèles GR2M sur 12 bassins versants.	194

CHAPITRE IX

Figure (IX.1): Régression de A en fonction de α et β	200
Figure (IX.2): Régression de A en fonction de α , β et PAM.	200
Figure (IX.3): Régression de B en fonction de β	201
Figure (IX.4): Régression de B en fonction de β et EAM.	202
Figure (IX.5): Régression de C en fonction de SURF.	203
Figure (IX.6): Régression de D en fonction de α et β	204
Figure (IX.7): Régression de α en fonction de A , D et PAM.	205
Figure (IX.8): Régression de b en fonction de A , B et D	206
figure (IX.9): Carte du coefficient régional (R) de la méthode CRUPEDIX d'après Scherer (1980).	209
Figure (IX.10): Régression de A en fonction de SURF, PJ10 et TAM.	211
Figure (IX.11): Régression de B en fonction de PAM et R	212
Figure (IX.12): Régression de C en fonction de SURF, PAM et R	214
Figure (IX.13): Régression de d en fonction de PAM et TAM.	215

Liste des Tableaux

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau (I.1): Les principales classes de modèles hydrologiques	17
---	----

CHAPITRE II

Tableau (II.1): Résultats de calage du modèle GR3J.....	29
Tableau (II.2): Résultats de calage du modèle GR4J.....	30
Tableau (II.3): Rapport S/A sur 120 bassins versants	35
Tableau (II.4): Valeurs moyennes de S/A et de R/B au début d'un pas de temps	36
Tableau (II.5): Statistiques sur les paramètres de GR4J.....	40

CHAPITRE III

Tableau (III.1): Période d'observation des 20 stations pluviométriques.....	47
---	----

CHAPITRE IV

Tableau (IV.1): Caractéristiques physico-climatiques des 23 bassins versants bretons étudiés	61
Tableau (IV.2): Matrice des corrélations.....	62
Tableau (IV.3): Les valeurs propres.....	63
Tableau (IV.4): Liste des 23 bassins versants bretons étudiés.....	66
Tableau (IV.5): Résultats du calage du modèle GR4J sur les 23 bassins bretons.....	67
Tableau (IV.6): Résultats pour le paramètre a du modèle GR4J.....	68
Tableau (IV.7): Résultats pour le paramètre b du modèle GR4J.....	69
Tableau (IV.8): Résultats pour le paramètre c du modèle GR4J.....	71
Tableau (IV.9): Résultats du calage de GR4J avec d nul sur les 23 bassins bretons	73
Tableau (IV.10): Résultats pour le paramètre b du modèle avec $d=0$	73
Tableau (IV.11): Résultats pour le paramètre c du modèle avec $d=0$	74
Tableau (IV.12): Résultats du calage du modèle GR4J (avec a et d fixés).....	76
Tableau (IV.13): Résultats pour les paramètres b et c du modèle GR4J (avec a et d fixés).....	77
Tableau (IV.14): Résultats du modèle régional MR2 (avec a et d fixés).....	79
Tableau (IV.15): Résultats du modèle régional MR1 avec ($d=0$ fixés) et (d calé).....	80
Tableau (IV.16): Résultats pour les paramètres b et c du modèle GR4J.....	83
Tableau (IV.17): Résultats pour les paramètres b et c du modèle GR4J avec $a=5.96$ et $d=0$	84
Tableau (IV.18): Résultats pour les modèles AMANDE et MARTINE.....	86
Tableau (IV.19): Valeurs des coefficients de détermination pour les 17 bassins.....	89
Tableau (IV.20): Comparaison des succès dans l'explication des paramètres.....	90

CHAPITRE V

Tableau (V.1): Liste des 25 stations pluviométriques utilisées.....	96
Tableau (V.2): Caractéristiques physiques des 34 bassins versants de la Moselle.....	97
Tableau (V.3): Matrice des corrélations.....	99
Tableau (V.4): Les valeurs propres.....	99
Tableau (V.5): Liste des 34 bassins versants de la Moselle étudiés.....	103
Tableau (V.6): Résultats du calage du modèle GR4J sur les 34 bassins de la Moselle.....	104
Tableau (V.7): Résultats des statistiques du calage.....	105
Tableau (V.8): Résultats pour le paramètre a du modèle GR4J.....	105
Tableau (V.9): Résultats pour le paramètre b du modèle GR4J.....	106
Tableau (V.10): Résultats pour le paramètre c du modèle GR4J.....	107
Tableau (V.11): Résultats pour le paramètre d du modèle GR4J.....	108
Tableau (V.12): Résultats de deux applications différentes.....	110

CHAPITRE VI

Tableau (VI.1): Résultats des différentes valeurs de $X_p/X_e/X_n$ coefficient de la portion de neige prise en compte dans les précipitations.	118
Tableau (VI.2): Résultats des différentes valeurs pour X_n : coefficient multiplicatif de la neige.	119/120
Tableau (VI.3): Résultats des différentes essai effectuer sur les quatre coefficients.	123
Tableau (VI.4): Résultats des six différents essais.	128

CHAPITRE VII

Tableau (VII.1): Résumé des résultats de modèles existants.	146
Tableau (VII.2): Caractéristiques et résultats du premier groupe de variantes.	152
Tableau (VII.3): Résultats correspondant à différents exposants de neutralisation.	151
Tableau (VII.4): Résultats correspondant à différents taux d'EPD et différents exposants de neutralisation pour la loi de vidange quadratique.	153
Tableau (VII.5): Résultats correspondant à différents taux d'EPD et différents exposants de neutralisation pour la loi de vidange linéaire.	155
Tableau (VII.6): Résultats correspondant à différentes valeurs de Z	156
Tableau (VII.7): Résultats correspondant à différentes valeurs de $\ln\alpha$	156
Tableau (VII.8): Résultats correspondant à différents exposants de Y	156
Tableau (VII.9): Résultats correspondant à différents taux d'EPD.	157
Tableau (VII.10): Résultats des simulations au contrôle des trois modèles.	157
Tableau (VII.11): Statistiques des paramètres et du critère pour trois modèles.	159
Tableau (VII.12): Résultats des simulations sur les 91 bassins versants.	160/161
Tableau (VII.13): Résultats des simulations sur les 14 bassins versants.	163
Tableau (VII.14): Résultats des différentes simulations.	166
Tableau (VII.15): Statistiques sur les résidus pour la Seine à Bar-sur-Seine. (période de vérification (64-80), Critère de Nash: 82.7 %)	168

CHAPITRE VIII

Tableau (VIII.1): Caractéristiques physiques des 30 bassins versants bretons étudiés.	182
Tableau (VIII.2): Matrice des corrélations.	182
Tableau (VIII.3): Les valeurs propres.	183
Tableau (VIII.4): Résultats du calage et du contrôle du modèle GR2M sur les 30 bassins bretons.	186
Tableau (VIII.5): Statistiques sur l'application du modèle GR2M sur les 30 bassins bretons.	186
Tableau (VIII.6): Résultats pour les paramètres $\ln\alpha$ et $\ln\beta$ du modèle GR2M.	189
Tableau (VIII.7): Résultats du modèle régional sur 30 bassins bretons.	191
Tableau (VIII.8): Statistiques sur l'application du modèle régional sur 30 bassins bretons.	192
Tableau (VIII.9): Caractéristiques physiques des 12 bassins bretons.	192
Tableau (VIII.10): Résultats des différentes applications du modèle GR2M sur 12 bassins bretons. étrangers au calage des modèles régionaux.	193

CHAPITRE IX

Tableau (IX.1): Fichier des paramètres des modèles GR4J et GR2M et des caractéristiques des 60 bassins versants retenus.	198/199
Tableau (IX.2): Résultats pour le paramètre a du modèle GR4J.	199
Tableau (IX.3): Résultats pour le paramètre b du modèle GR4J.	201
Tableau (IX.4): Résultats pour le paramètre c du modèle GR4J.	202
Tableau (IX.5): Résultats pour le paramètre d du modèle GR4J.	203
Tableau (IX.6): Résultats pour le paramètre $\ln\alpha$ du modèle GR2M.	205
Tableau (IX.7): Résultats pour le paramètre $\ln\beta$ du modèle GR2M.	206
Tableau (IX.8): Résultats des statistiques des paramètres et du critère de Nash sur les trois groupes.	210
Tableau (IX.9): Résultats pour le paramètre a du modèle GR4J.	208
Tableau (IX.10): Résultats pour le paramètre b du modèle GR4J.	211/212
Tableau (IX.11): Résultats pour le paramètre c du modèle GR4J.	213
Tableau (IX.12): Résultats pour le paramètre d du modèle GR4J.	214

Liste des Annexes

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	253
Annexe (I.1): Influence des paramètres sur les écoulements annuels.....	255
Annexe (I.2): Influence des paramètres sur les crues.	277
Annexe (I.3): Influence des paramètres sur les étiages.....	299
ANNEXE II	321
Annexe (II.1): Analyse en composantes principales sur les 23 bassins versants bretons.....	323
Annexe (II.2): Résultats de simulation du modèle GR4J sur les 23 bassins versants bretons.....	327
Annexe (II.3): Résultats de simulation du modèle GR3J sur les 23 bassins versants bretons.....	335
Annexe (II.4): Description des deux modèles AMANDE et MARTINE.	341
ANNEXE III	345
Annexe (III.1): Résultats de simulation du modèle GR4J sur les 34 bassins versants de la Moselle.....	347
Annexe (III.2): Analyse en composantes principales sur les 34 bassins versants de la Moselle.....	359
Annexe (III.3): Cartes physiographiques du bassin de la Moselle.	363
ANNEXE IV	369
Annexe (IV.1): Résultats de simulation du modèle GR4J avec le sous-modèle neige sur les 34 bassins versants de la Moselle.	381
ANNEXE V	381
Annexe (V.1): Programmes Fortran des modèles mensuels.....	383
Annexe (V.2): Liste des 91 bassins versants étudiés.....	395
Annexe (V.3): Résultats du modèle ABD (variante du modèle de Thomas).....	399
ANNEXE VI	401
Annexe (VI.1): Analyse en composantes principales sur les 30 bassins versants bretons.	403
Annexe (VI.2): Liste des 12 bassins versants étudiés.....	405
ANNEXE VII	409
Annexe (VII.1): Liste des 60 bassins versants étudiés.....	411
Annexe (VII.2): Liste des 349 bassins versants étudiés.....	413

TABLE DES MATIERES

PLAN	1
RESUME/ABSTRACT	3
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE I	11
GENERALITES SUR LA MODELISATION PLUIE-DEBIT	
I.1 - INTRODUCTION.....	13
I.2 - QU'EST CE QU'UN MODELE ?.....	13
I.3 - LES MODELES EN GENERAL.....	14
I.3.1 - Modèle de simulation et modèle de gestion.....	14
I.3.2 - Modèle distribué et modèle global.....	14
I.3.3 - Modèle stochastique et modèle déterministe.....	15
I.3.4 - Modèle dynamique et modèle statique.....	15
I.3.5 - Modèle continu et modèle discontinu.....	15
I.3.6 - Modèle linéaire et modèle non-linéaire.....	16
I.3.7 - Modèle mécaniste, modèle conceptuel et modèle empirique.....	16
I.4 - GENERALITES SUR LA MISE EN OEUVRE DES MODELES.....	17
I.4.1 - Calage du modèle.....	17
I.4.2 - Optimisation des paramètres.....	17
I.4.3 - Critères de qualité d'ajustement.....	18
I.4.4 - Initialisation et période de mise en route.....	19
I.4.5 - Période de calage et contrôle.....	20
CHAPITRE II	21
LES MODELES GR (GENIE RURAL)	
II.1 - INTRODUCTION.....	23
II.2 - POURQUOI "GR" EST NE ?.....	23
II.3 - LE MODELE GR2J.....	23
II.4 - LE MODELE GR3J.....	24
II.4.1 - Interaction pluie-évaporation.....	25
II.4.2 - Réservoir-sol.....	26
II.4.3 - L'hydrogramme unitaire.....	27
II.4.4 - Le réservoir eau-gravitaire.....	28
II.5 - LE MODELE GR4J (Echanges souterrains).....	29
II.6 - SCHEMA ACTUEL DU MODELE GR4J.....	30
II.6 - METHODE D'OPTIMISATION UTILISEE.....	33
II.7 - INITIALISATION DU SYSTEME.....	34
II.8 - EVOLUTION ET COMPORTEMENT DU SYSTEME.....	35
II.9 - CRITERES D'EVALUATION ET DE QUALITE.....	36
II.10 - INCERTITUDE DES PARAMETRES.....	40
II.11 - APPLICATIONS DU MODELE GR4J.....	40

CHAPITRE III 43**ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES DU MODELE GR4J
SUR LES VARIABLES HYDROLOGIQUES**

III.1 - INTRODUCTION	45
III.2 - DESCRIPTION DES DONNEES	45
III.2.1 - Les bassins modélisés.....	45
III.2.2 - Les données climatiques.....	45
III.3 - VARIABLES HYDROLOGIQUES RETENUES	47
III.3.1 - Les variables aléatoires	47
III.3.2 - Ecoulements annuels	48
III.3.3 - Ecoulements de crue	48
III.3.4 - Ecoulement d'étiage	48
III.4 - ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES	49
III.4.1 - Démarche suivie.....	49
III.4.2 - Influence sur les écoulements annuels.....	50
III.4.3 - Influence sur les crues	50
III.4.4 - Influence sur les étiages	50
III.5 - CONCLUSION	54

CHAPITRE IV 55**TENTATIVE D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J
SUR LES BASSINS BRETONS**

IV.1- INTRODUCTION	57
IV.2 - DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES	57
IV.3 - DESCRIPTION DES CARACTERISTIQUES PYSICO-CLIMATIQUES	58
IV.3.1 - Caractéristiques morphologiques	58
IV.3.2 - Géologie des bassins	59
IV.3.3 - Caractéristiques de la végétation.....	59
IV.3.4 - Données climatiques calculées.....	59
IV.4 - ANALYSE DU TABLEAU DES DONNEES PHYSICO-CLIMATIQUES	60
IV.4.1 - Analyse de la matrice de corrélation	61
IV.4.2 - Valeurs propres	62
IV.4.3 - Définition des axes.....	63
IV.5 - CALAGE DU MODELE GR4J SUR LES BASSINS UTILISES	65
IV.5.1 - Qualité de l'ajustement	65
IV.6 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J.....	68
IV.6.1 - Capacité du réservoir sol (A)	68
IV.6.2 - Capacité du réservoir eau gravitaire (B)	68
IV.6.3 - Paramètre (C) des hydrogrammes unitaires	70
IV.6.4 - Paramètre d'échange souterrain (D)	72
IV.6.5 - Conclusion	72
IV.7 - TENTATIVE D'EXPLICATION AVEC D FIXE A ZERO	72
IV.7.1 - Paramètre A	72
IV.7.2 - Paramètre B	73
IV.7.3 - Paramètre C.....	74
IV.7.4 - Conclusion	75
IV.8 - TENTATIVE D'EXPLICATION AVEC DEUX PARAMETRES FIXES.....	76
IV.9 - COMPARAISON DES DIFFERENTS MODELES	80
IV.10 - COMPARAISON AVEC UNE ETUDE DU BRGM	82
IV.10.1 - Les bassins versants et les caractéristiques utilisées	82
IV.10.2 - Recherche des relations avec les paramètres du modèle GR4J	83
IV.10.3 - Comparaison avec l'étude du BRGM	86
IV.10.4 - Recherche des relations.....	86
IV.10.5 - Comparaison des explications des paramètres	88
IV.11 - CONCLUSION.....	90

CHAPITRE V 91**TENTATIVE D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J
SUR LES BASSINS DE LA MOSELLE**

V.1 - INTRODUCTION.....	93
V.2 - DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES	93
V.3 - DESCRIPTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	93
V.4 - ANALYSE DU TABLEAU DE DONNEES PHYSIOGRAPHIQUES	98
V.4.1 - Analyse de la matrice de corrélation	98
V.4.2 - Valeurs propres	98
V.4.3 - Définitions des axes.....	101
V.4.4 - Conclusion.....	101
V.5 - CALAGE DU MODELE GR4J SUR LES BASSINS UTILISES	101
V.5.1 - Résultats du calage	101
V.5.2 - Qualité de l'ajustement	104
V.6 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DE GR4J	105
V.6.1 - Capacité du réservoir sol (A).....	105
V.6.2 - Capacité du réservoir eau gravitaire (B).....	106
V.6.3 - l'Hydrogramme unitaire (C).....	107
V.6.4 - Paramètre d'échange (D)	108
V.7 - APPRECIATION DE LA QUALITE DU MODELE REGIONAL	109
V.8 - CONCLUSION	112

CHAPITRE VI 113**LE SOUS-MODELE NEIGE**

VI.1 - INTRODUCTION	115
VI.2 - BASSINS ET DONNEES DISPONIBLES	115
VI.3 - LES RESULTATS DE GR4J INITIAL	115
VI.4 - LES NOUVELLES APPROCHES	115
VI.4.1 - Traitement de la neige.....	116
VI.4.2 - Combinaisons des deux premiers schémas.....	122
VI.4.3 - Conclusion partielle	122
VI.4.4 - Introduction d'un paramètre à optimiser.....	126
VI.5 - RESULTATS ET COMPARAISON	130
VI.7 - CONCLUSION.....	130

CHAPITRE VII 131**CONCEPTION D'UN MODELE MENSUEL
A DEUX PARAMETRES (GR2M)**

VII.1 - INTRODUCTION.....	133
VII.2 - MODELES CONCEPTUELS SERVANT DE COMPARAISON	133
VII.2.1 - Modèle ABCD de Thomas (1981).....	133
VII.2.2 - Modèle T-alpha d'Alley et al. (1984).....	135
VII.2.3 - Modèle de Kabouya (1990).....	137
VII.2.4 - Modèle de prévision de Michel (1989).....	137
VII.2.5 - Modèle de Vandewiele et al. (1992).....	139
VII.2.6 - Modèle de Nanjing Wood et al. (1991)	140
VII.2.7 - Modèle linéaire de comparaison.....	141
VII.3 - GENERALITES SUR LA MISE EN OEUVRE DES MODELES	141
VII.3.2 - Initialisation et période de mise en route	142
VII.3.3 - Critère de qualité d'ajustement.....	142
VII.3.4 - Optimisation des paramètres.....	142
VII.3.5 - Période de calage et de contrôle	142
VII.3.6 - Analyse et comparaison des modèles.....	142
VII.3.7 - Présentation du programme de test des modèles.....	143

VII.4 - DONNEES UTILISEES POUR LE DEVELOPPEMENT DU MODELE	143
VII.5 - COMPARAISON DES EFFICACITES DES MODELES EXISTANTS	146
VII.6 - DEVELOPPEMENT DU MODELE GR2M.....	148
VII.6.1 - Idées de base.....	148
VII.6.2 - Premier groupe de variantes	148
VII.6.2.1 - Neutralisation initiale entre la pluie et l'évaporation	149
VII.6.2.2 - Réservoir sol (Production).....	149
VII.6.2.3 - Réservoir eau gravitaire (Transfert).....	150
VII.6.2.4 - Ecoulement pseudo-direct	150
VII.6.2.5 - Correction d'entrée	150
VII.6.2.6 - Comparaison des résultats	150
VII.6.3 - Introduction d'un écoulement pseudo-direct sur les modèles retenus	152
VII.6.4 - Etude de capacité du réservoir sol	154
VII.6.5 - Choix du meilleur modèle mensuel à deux paramètres.....	154
VII.7 - ETUDE DE LA RUSTICITE DU MODELE GR2M.....	165
VII.8 - TESTS SUR LE MODELE GR2M	166
VII.9 - APPLICATION DU MODELE GR2M AU BASSIN DE BAR-SUR-SEINE	167
VII.10 - TENTATIVE DE REGIONALISATION DES DEUX PARAMETRES	168
VII.10.1 - Paramètre α	168
VII.10.2 - Paramètre β	171
VII.11 - CONCLUSION	174

CHAPITRE VIII

ESTIMATION DES DEUX PARAMETRES DU MODELE MENSUEL SUR LA REGION BRETAGNE

VIII.1 - INTRODUCTION.....	179
VIII.2 - DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES	179
VIII.2.1 - Caractéristiques morphologiques	179
VIII.2.2 - Géologie des bassins	181
VIII.3 - ANALYSE DU TABLEAU DES DONNEES PHYSIQUES	181
VIII.3.1 - Analyse de la matrice de corrélation	181
VIII.3.2 - Valeurs propres	183
VIII.3.3 - Définition des axes	183
VIII.4 - DEMARCHE SUIVIE POUR L'EXPLICATION DES PARAMETRES	184
VIII.5 - CALAGE DU MODELE GR2M SUR LES BASSINS UTILISES	185
VIII.6 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR2M.....	189
VIII.7 - APPLICATION DU MODELE REGIONAL SUR LES BASSINS UTILISES	190
VIII.8 - CONTROLE SUR D'AUTRES BASSINS BRETONS.....	192
VIII.9- CONCLUSION	194

CHAPITRE IX

ESSAI DE LIAISON ENTRE LES PARAMETRES DES MODELES GR4J ET GR2M ET LES CARACTERISTIQUES DU BASSIN

IX.1 - INTRODUCTION	197
IX.2 - LIAISON ENTRE LES PARAMETRES DE GR4J ET GR2M	197
IX.2.1 - Essai d'explication des paramètres de GR4J	199
IX.2.1.1 - Paramètre A	199
IX.2.1.2 - Paramètre B	201
IX.2.1.3 - Paramètre C	202
IX.2.1.4 - Paramètre D	203
IX.2.2 - Essai d'explication des paramètres de GR2M	204
IX.2.2.1 - Paramètre α	204
IX.2.2.2 - Paramètre β	206
IX.2.3 - Conclusion	206

IX.3 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR4J EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES SIMPLES	207
IX.3.1 - Paramètre A	208
IX.3.2 - Paramètre B	211
IX.3.3 - Paramètre C.....	213
IX.2.4 - Paramètre D	214
IX.3.4 - Conclusion	214
 CONCLUSION GENERALE	217
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	223
 LISTE DES FIGURES	229
 LISTE DES TABLEAUX	235
 LISTE DES ANNEXES	239
 ANNEXES	251

ANNEXES

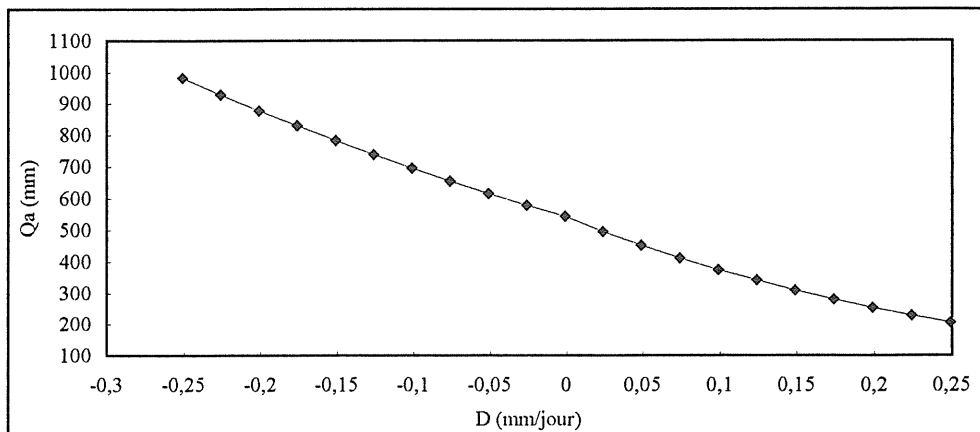
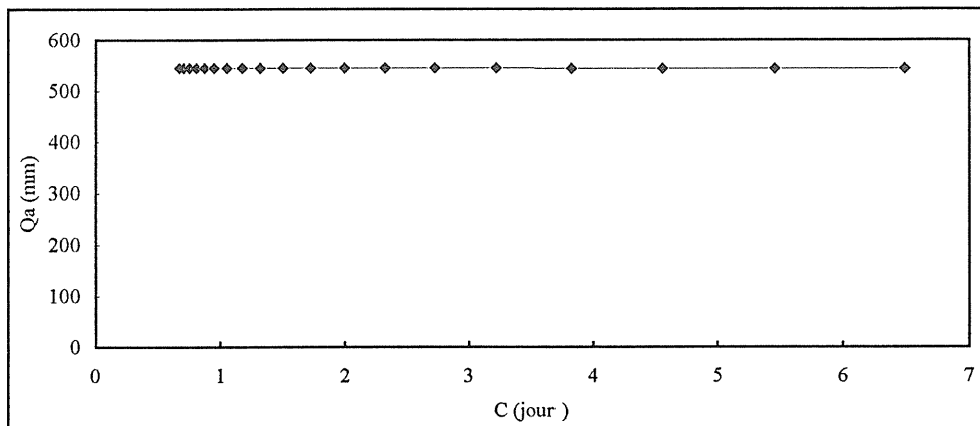
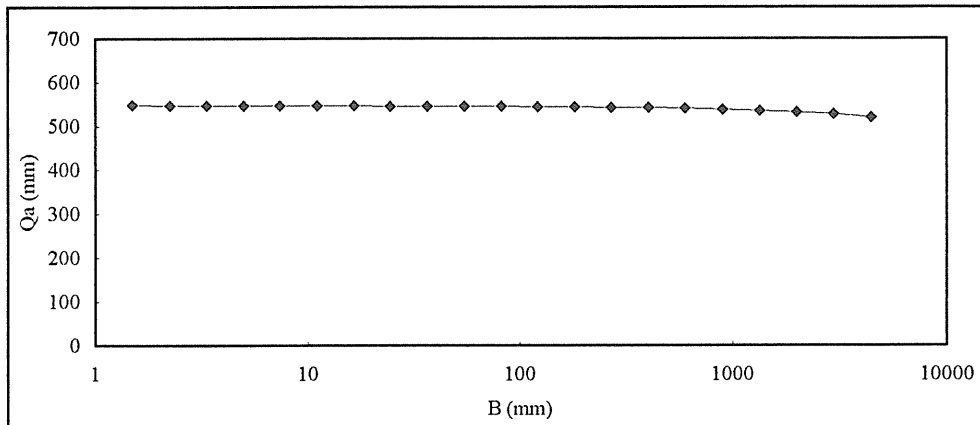
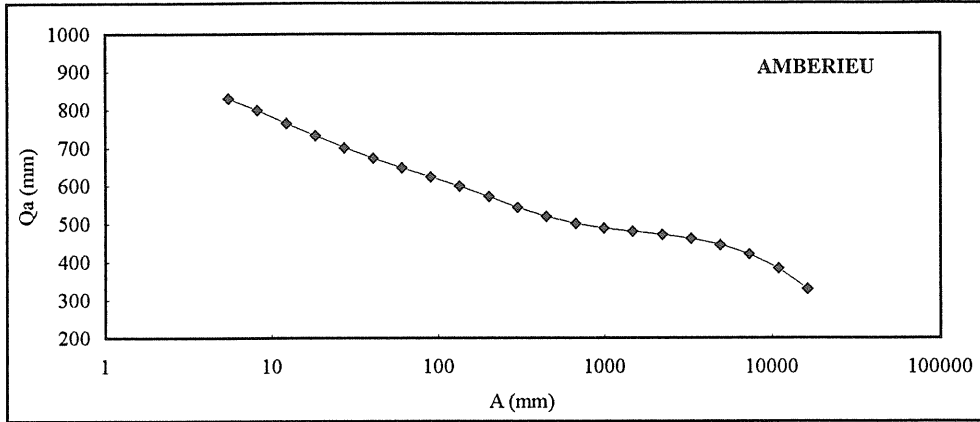
Annexe I

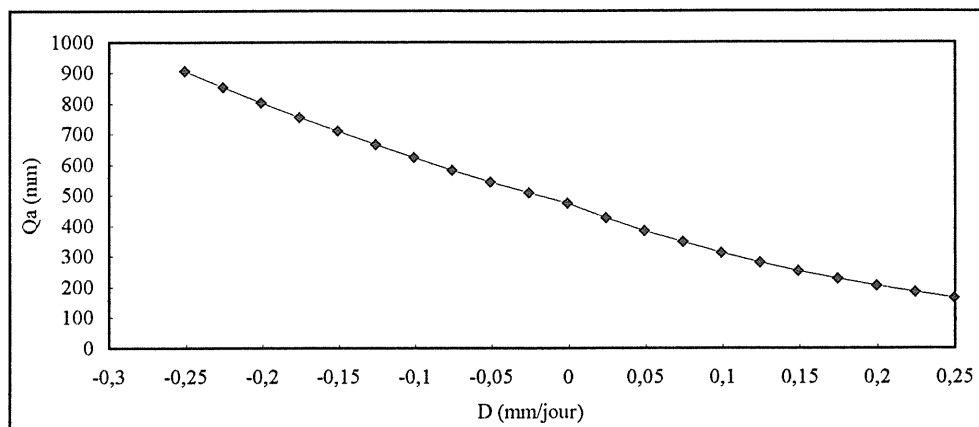
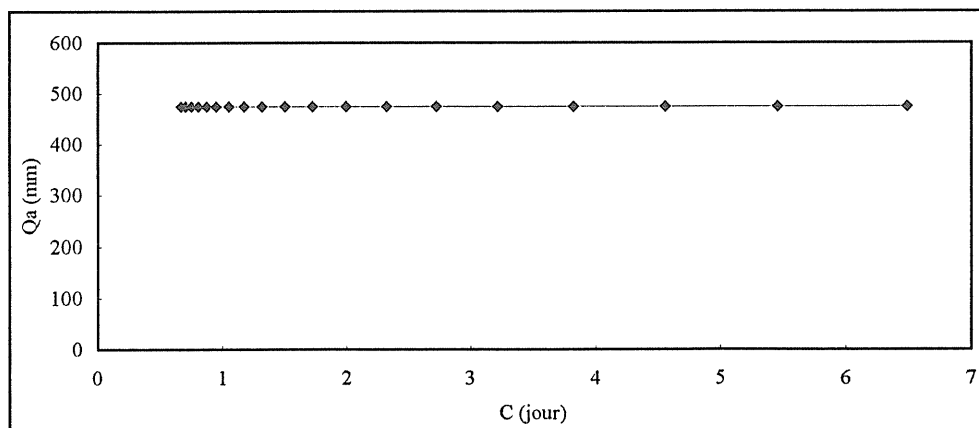
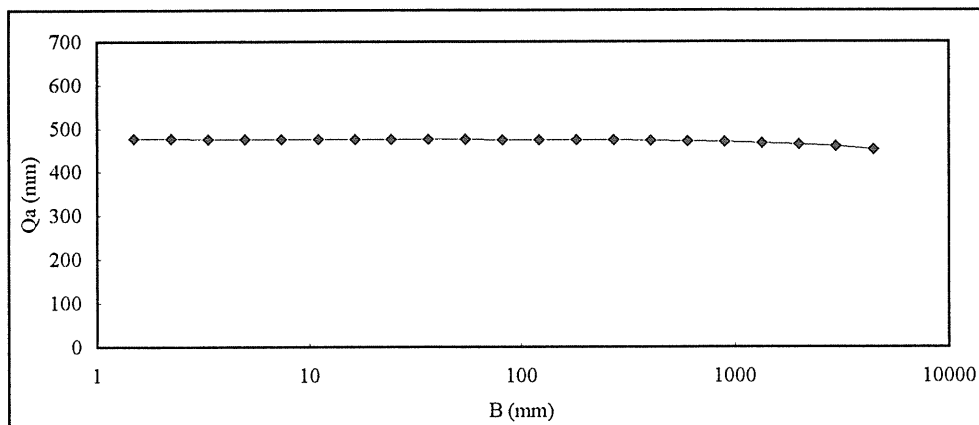
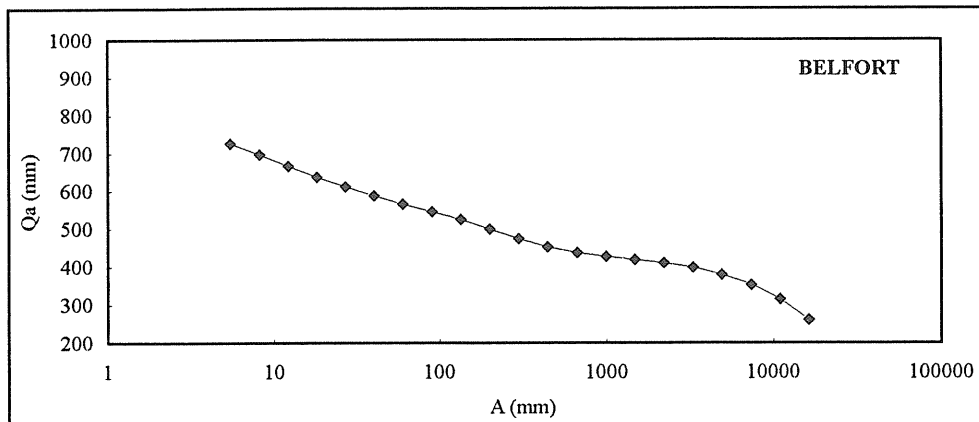
Annexe (I.1): Influence des paramètres sur les écoulements annuels.

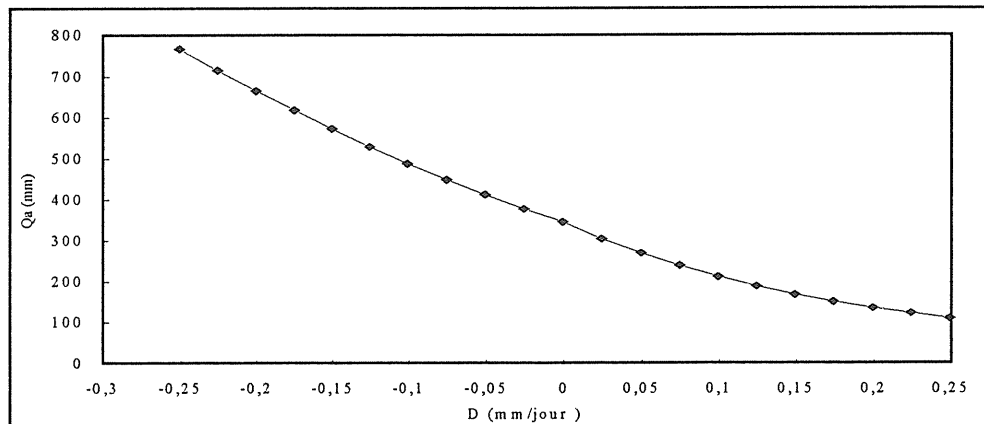
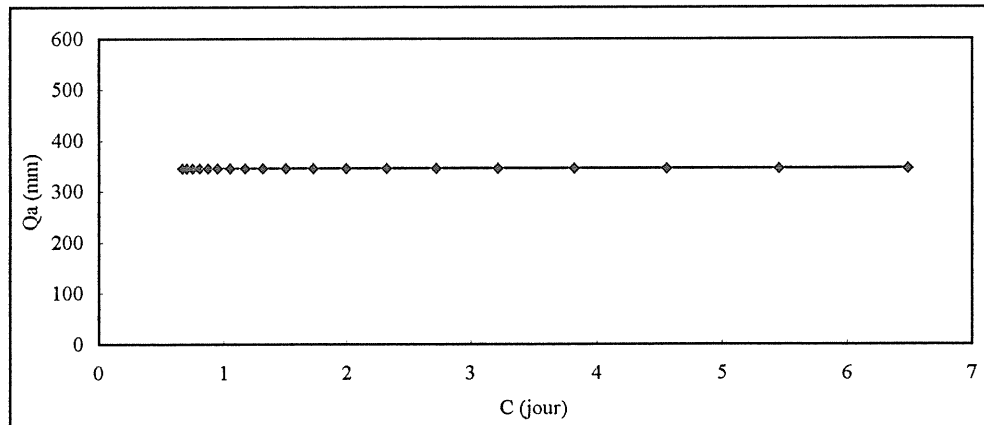
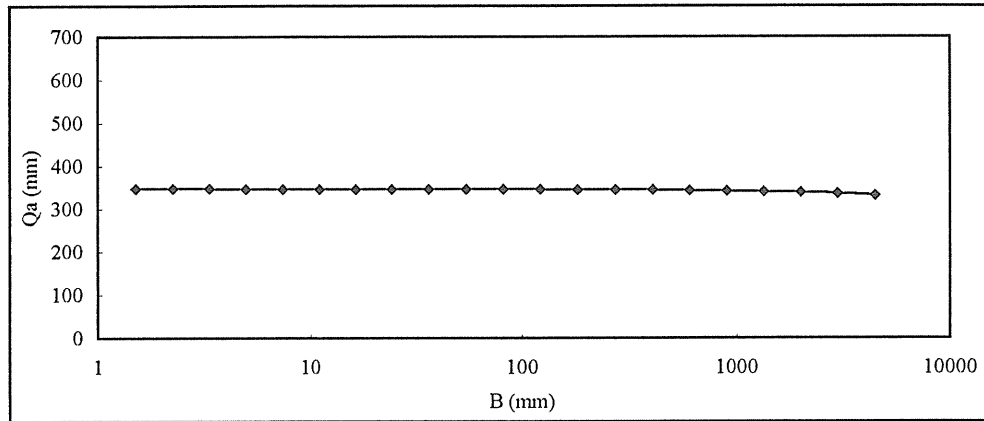
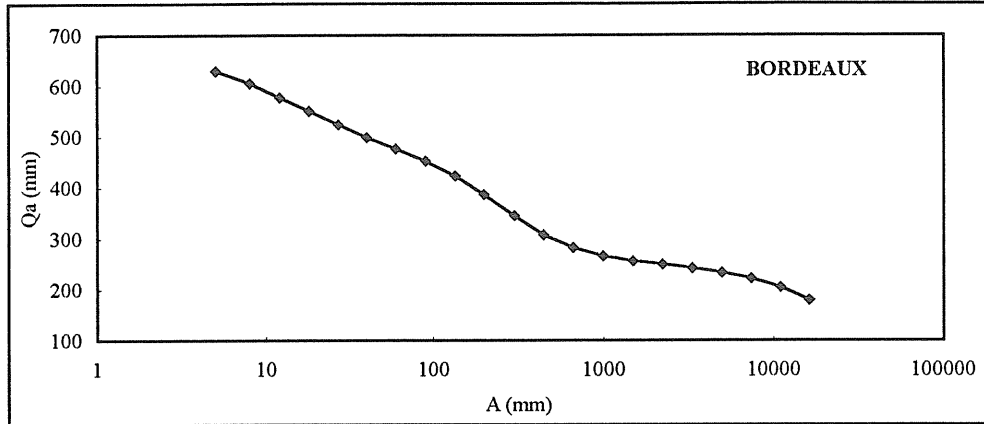
Annexe (I.2): Influence des paramètres sur les crues.

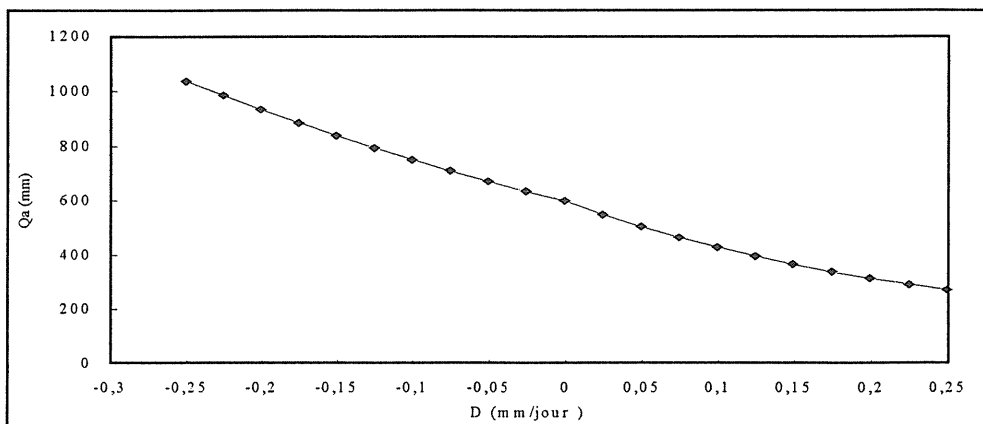
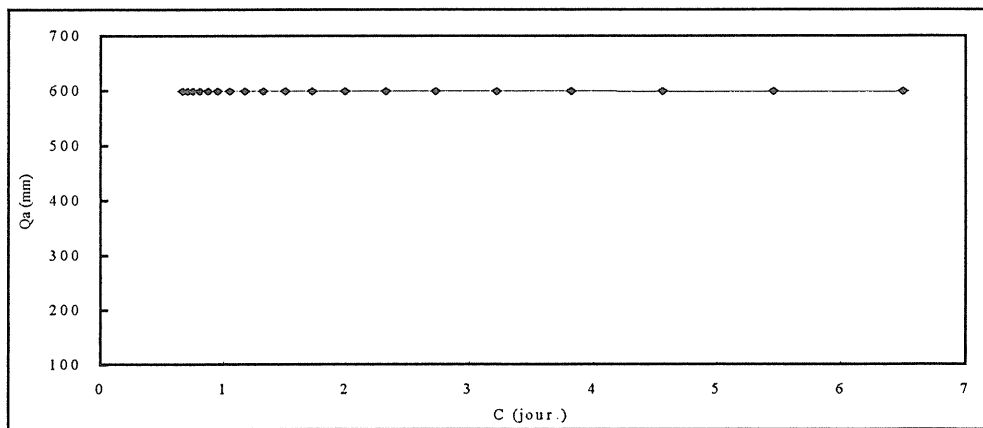
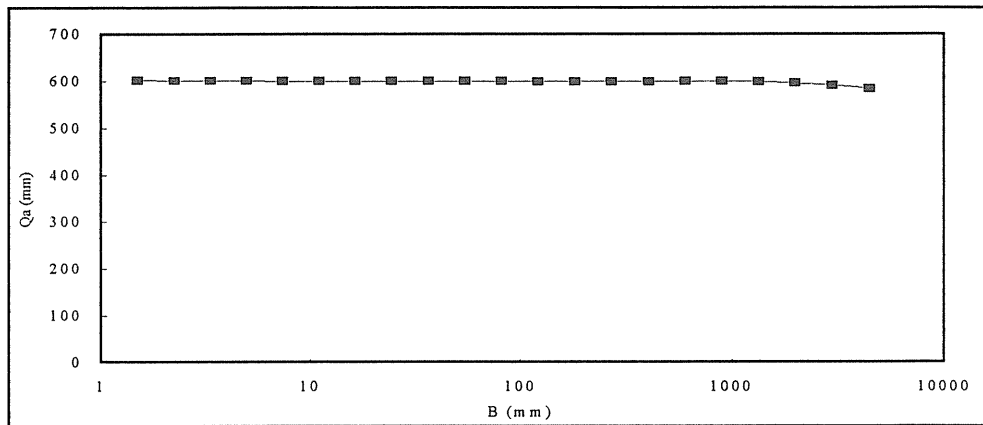
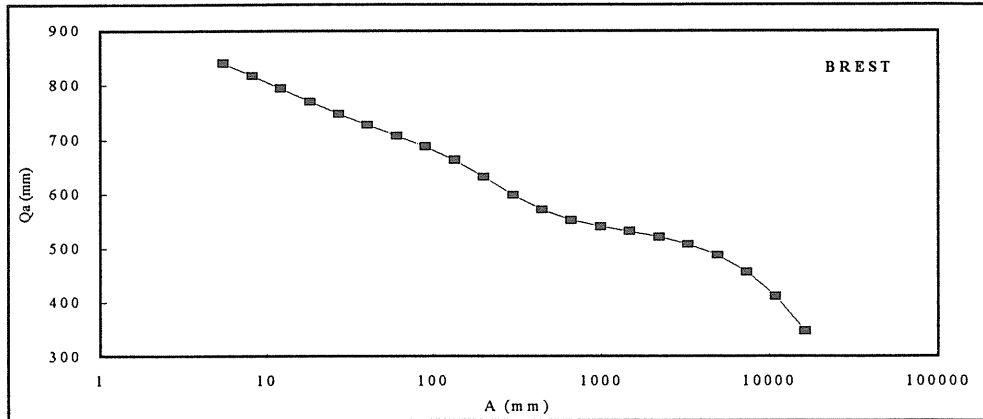
Annexe (I.3): Influence des paramètres sur les étiages.

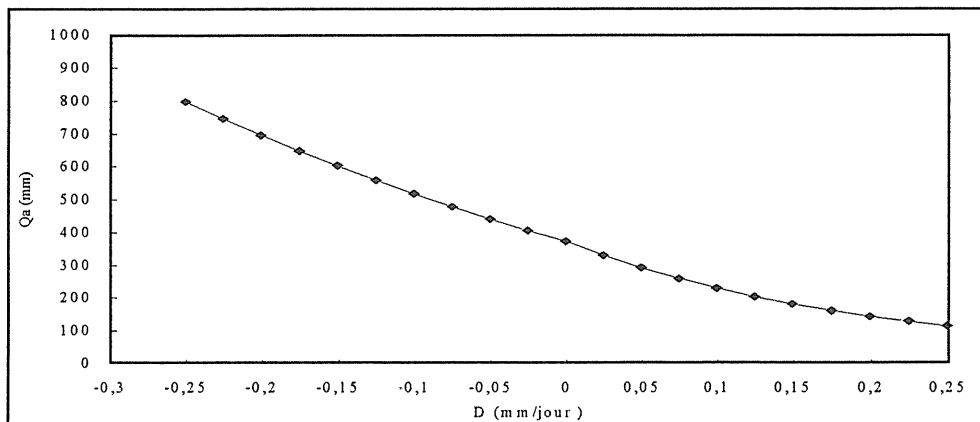
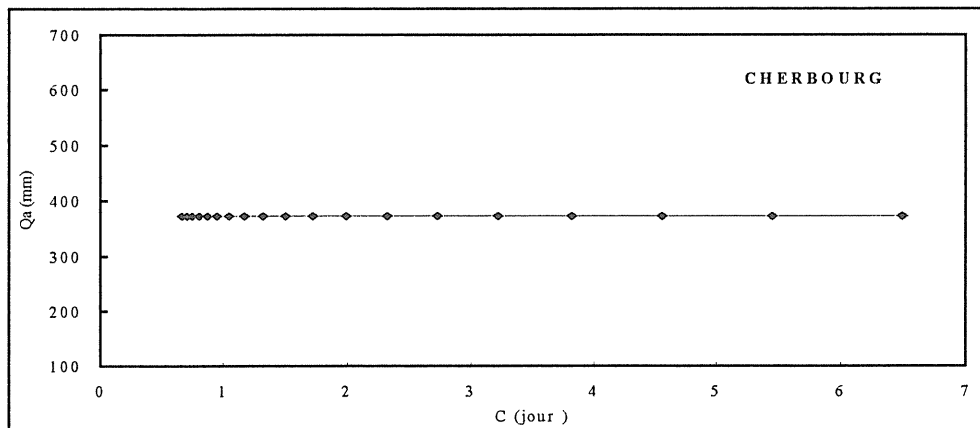
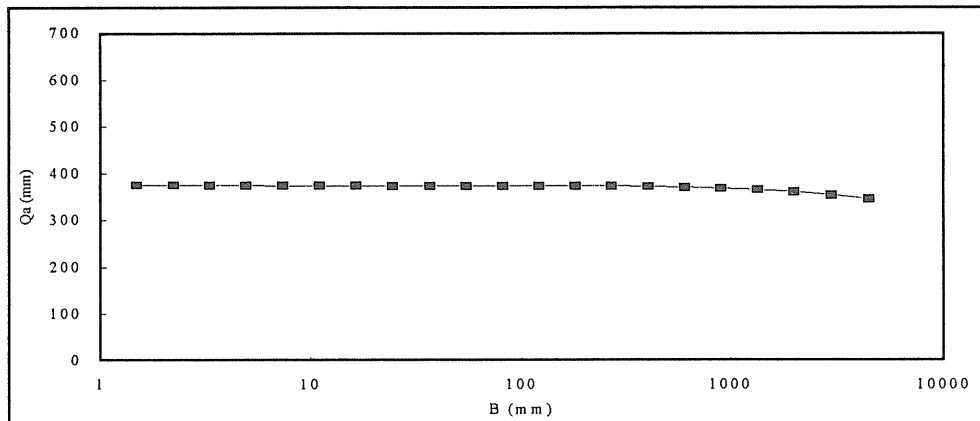
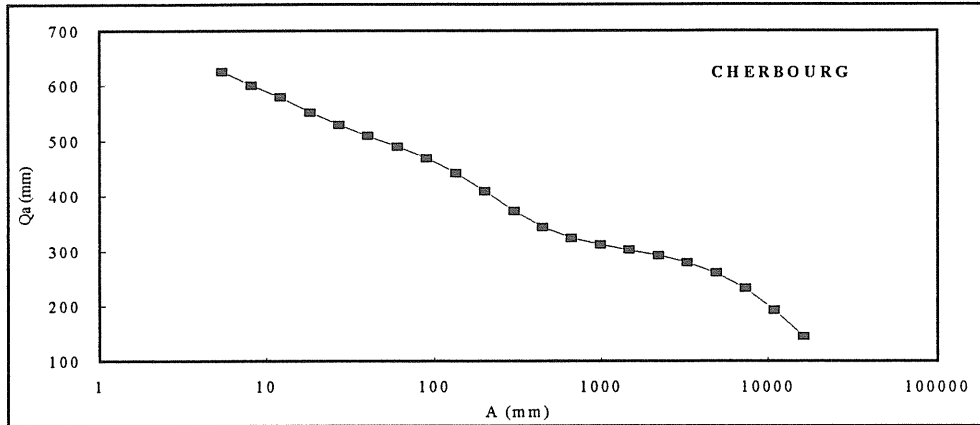
Annexe (I.1): Influence des paramètres sur les écoulements annuels.

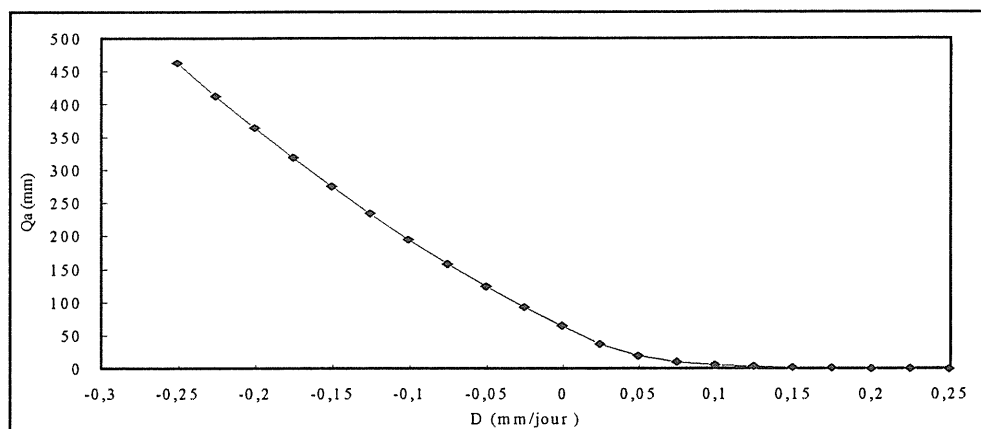
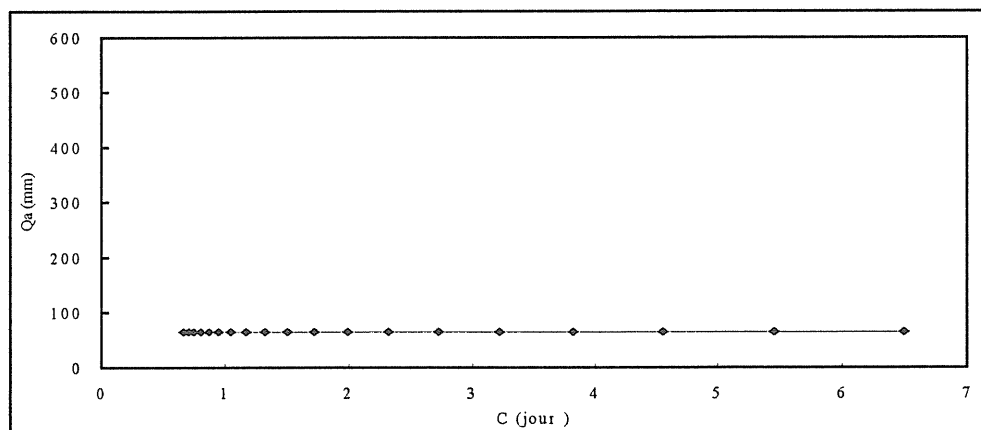
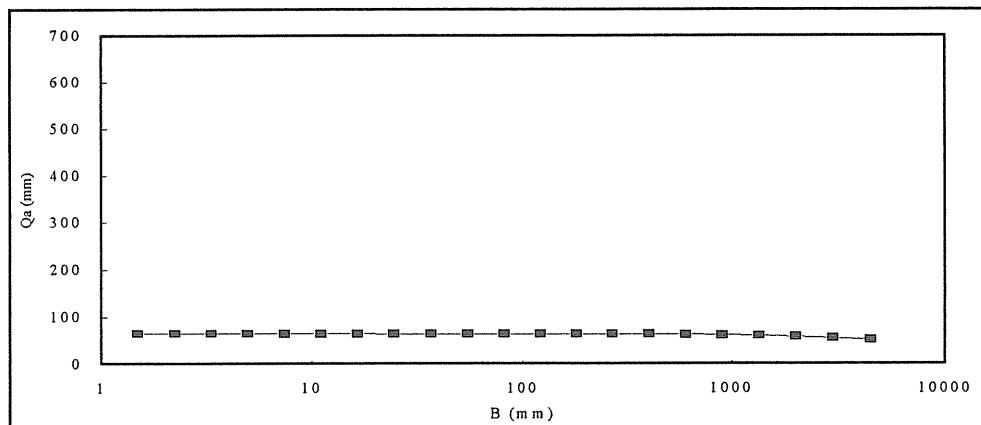
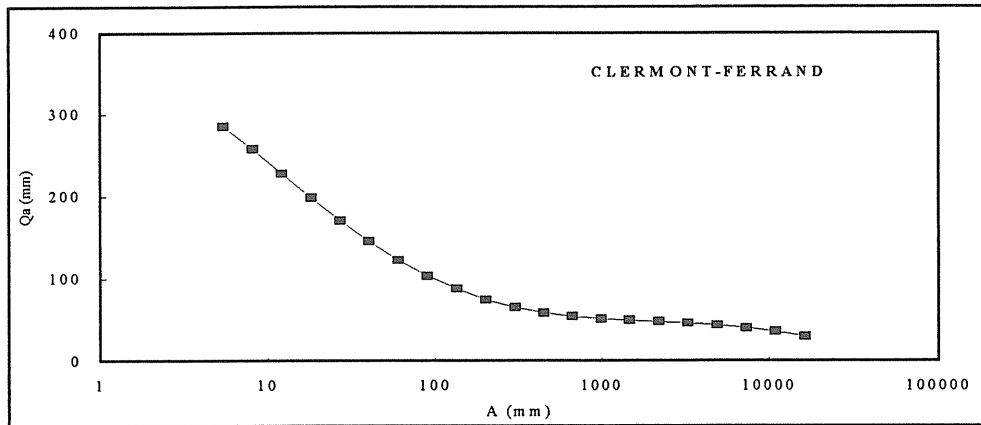


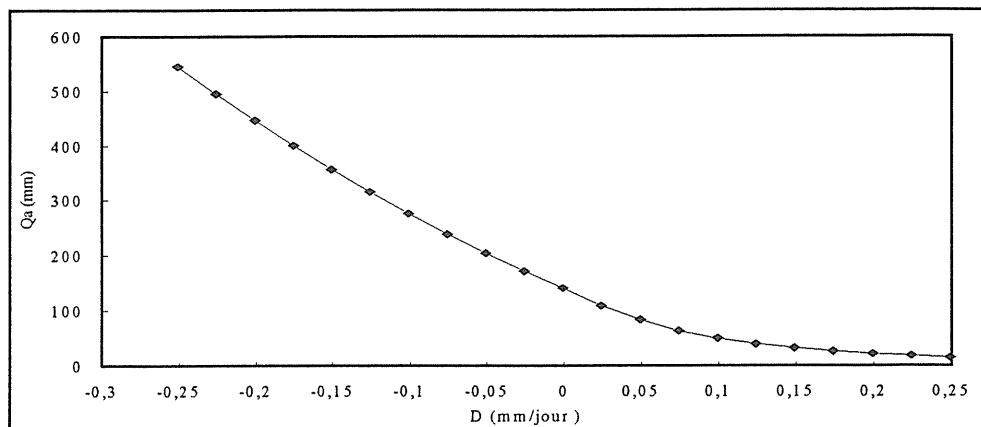
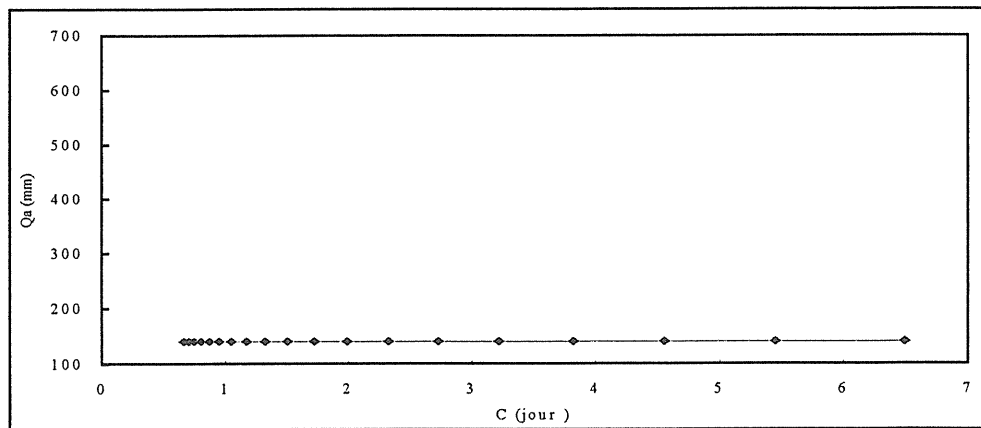
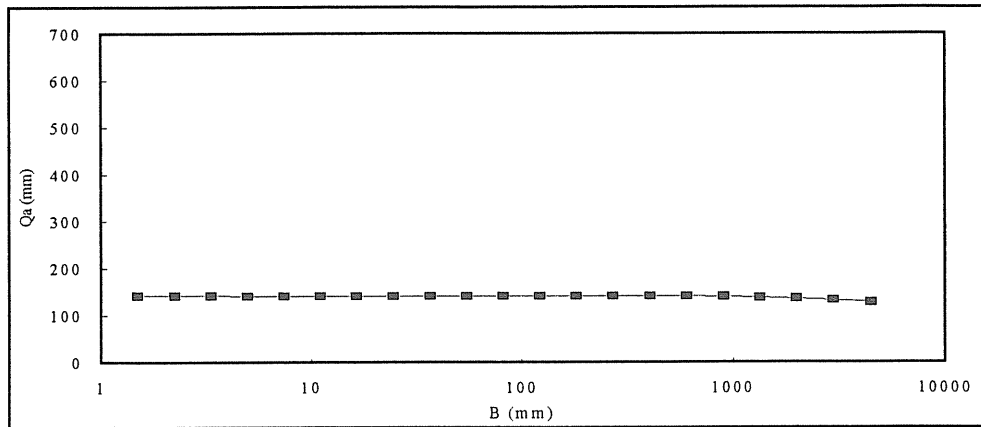
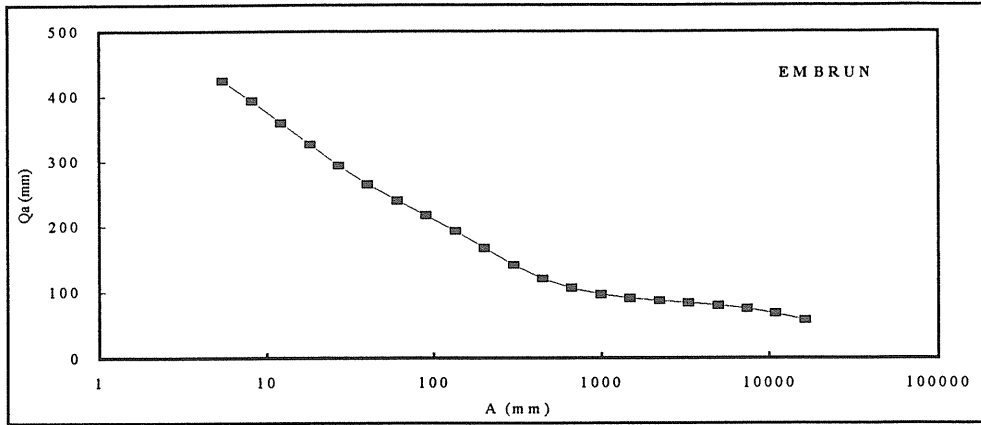


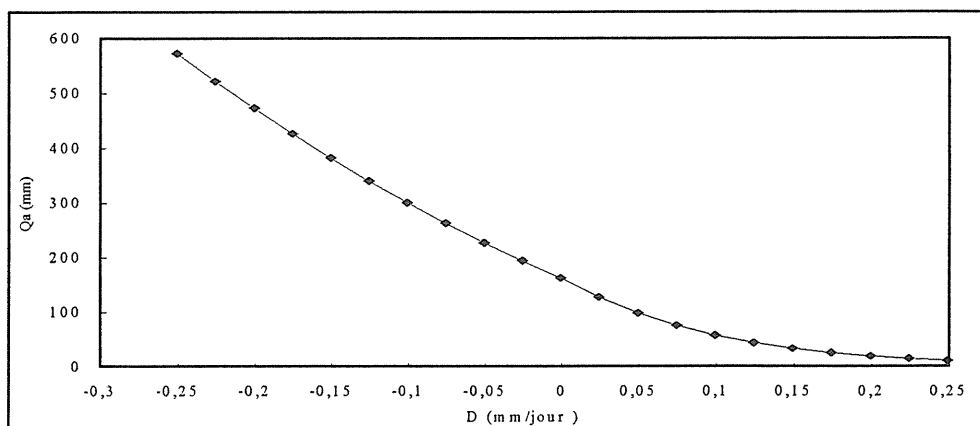
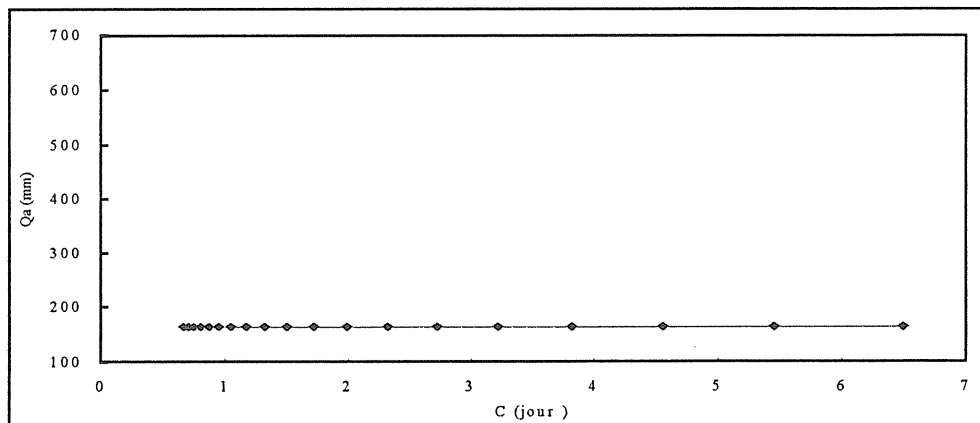
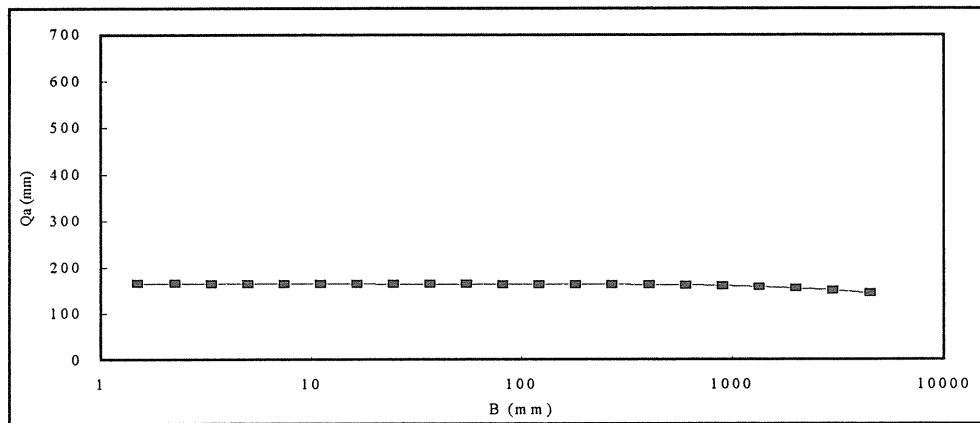
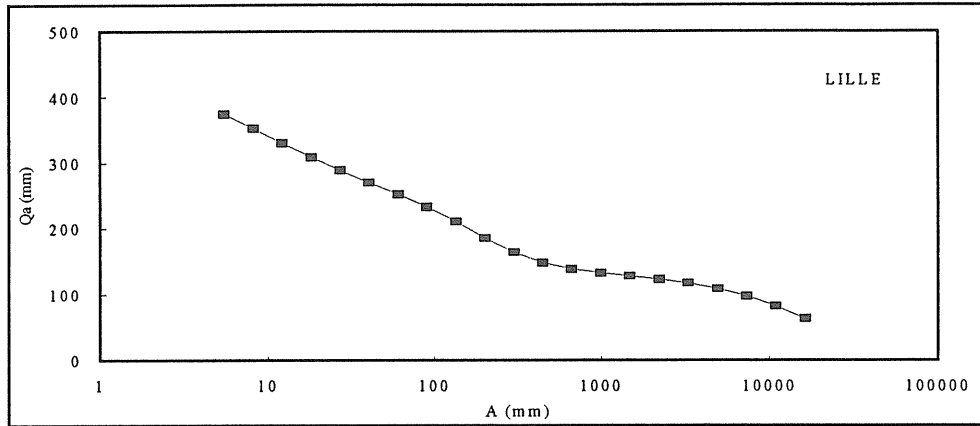


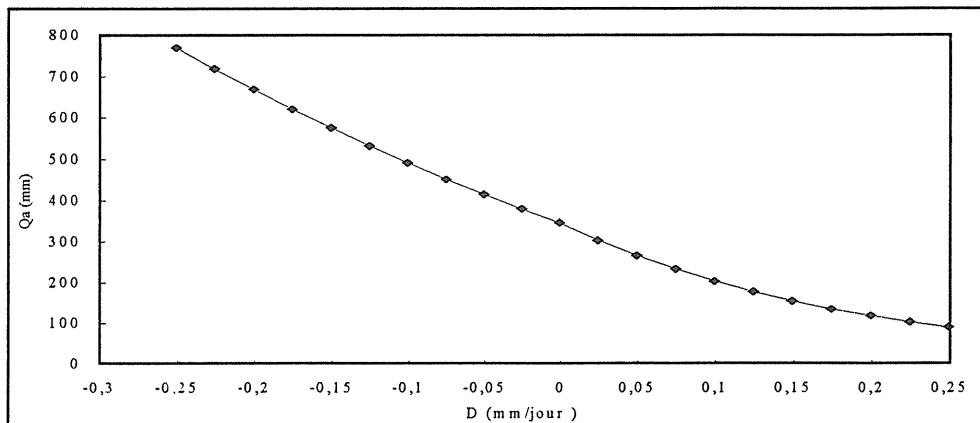
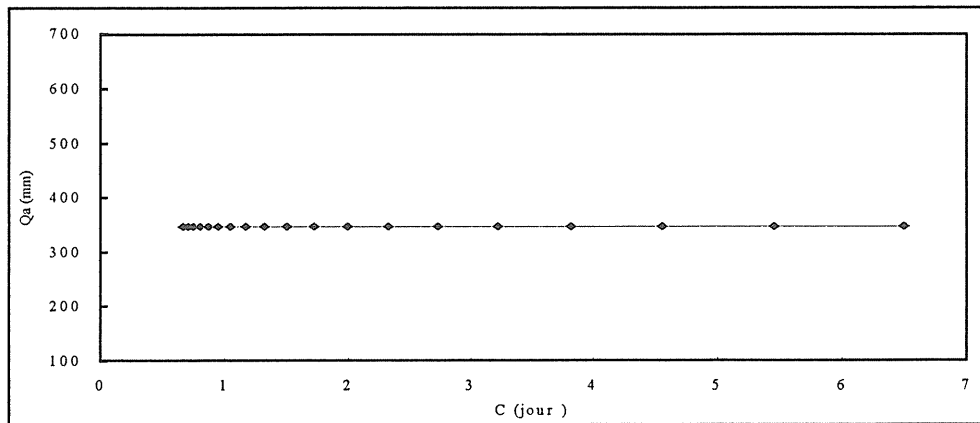
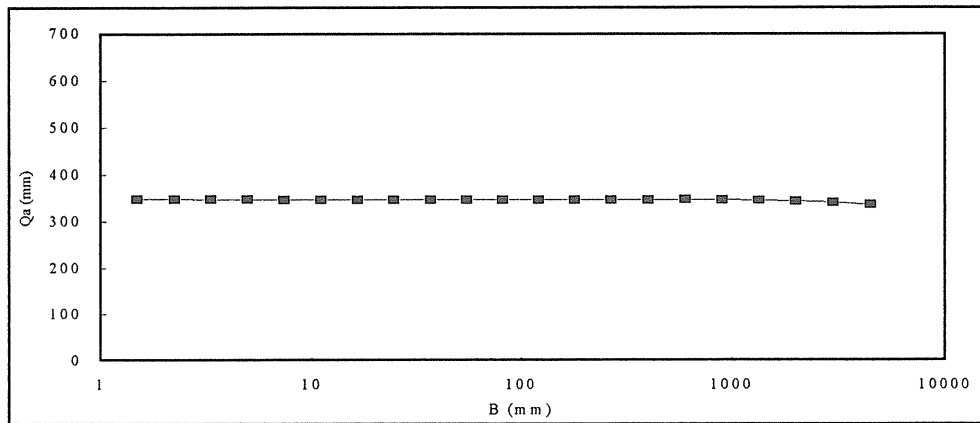
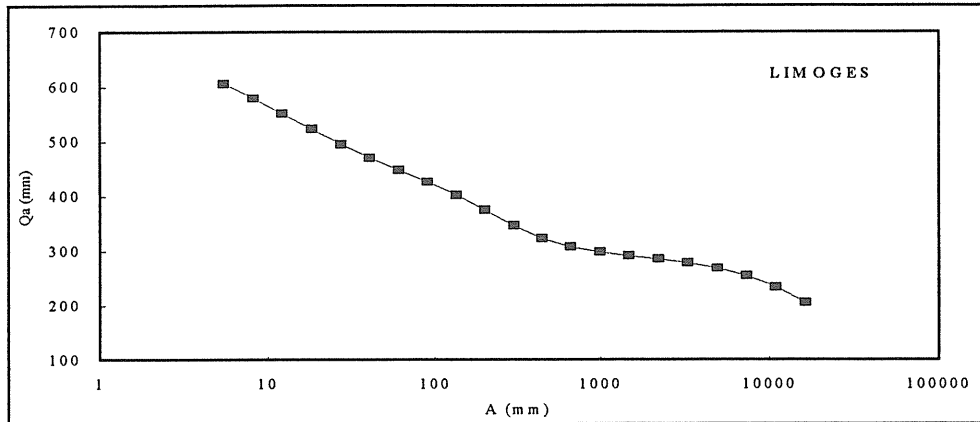


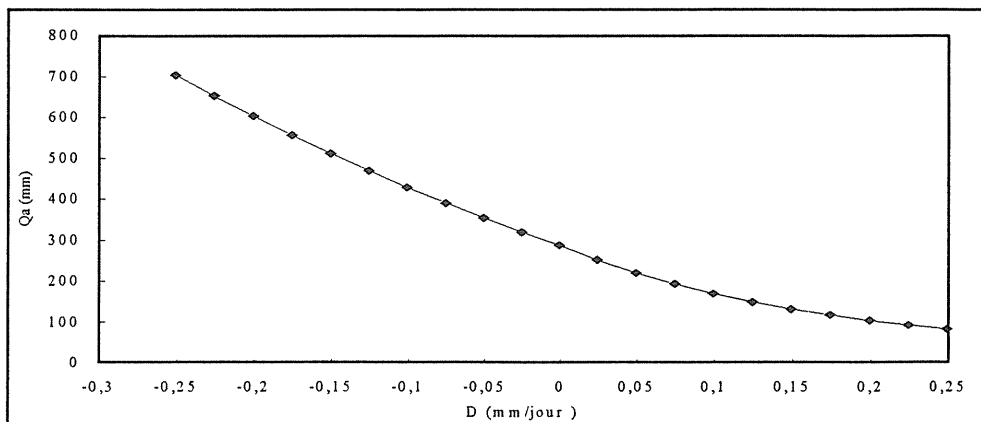
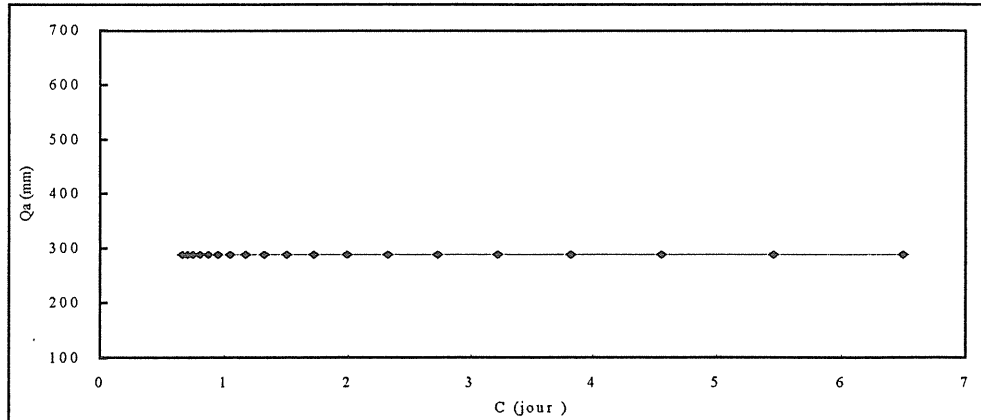
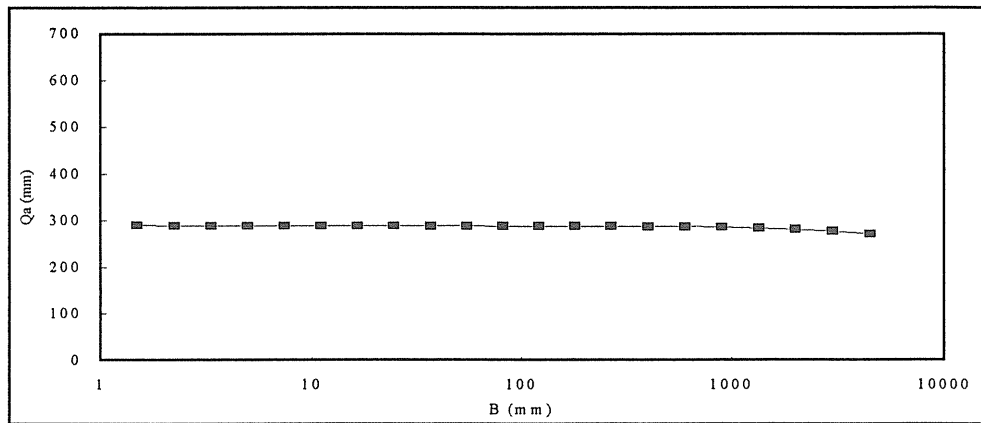
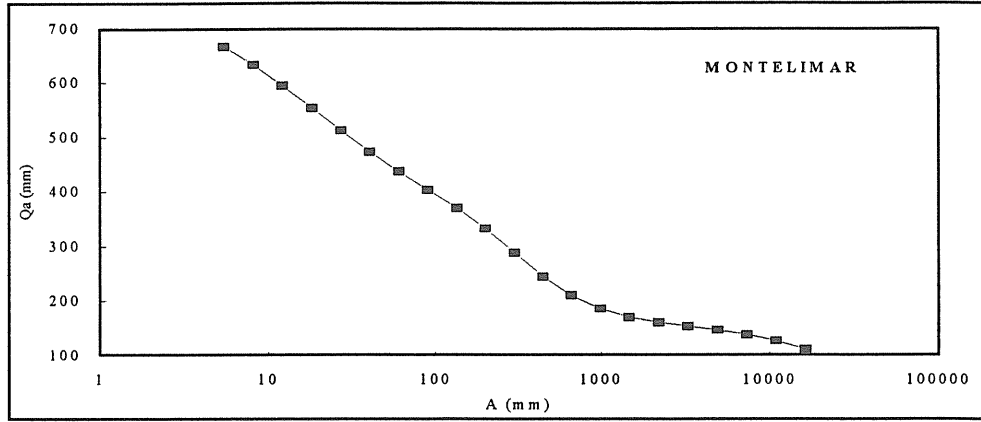


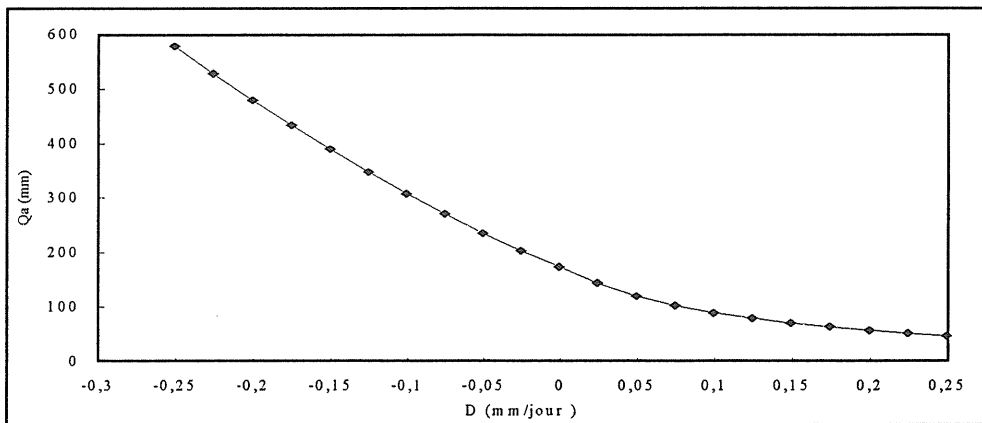
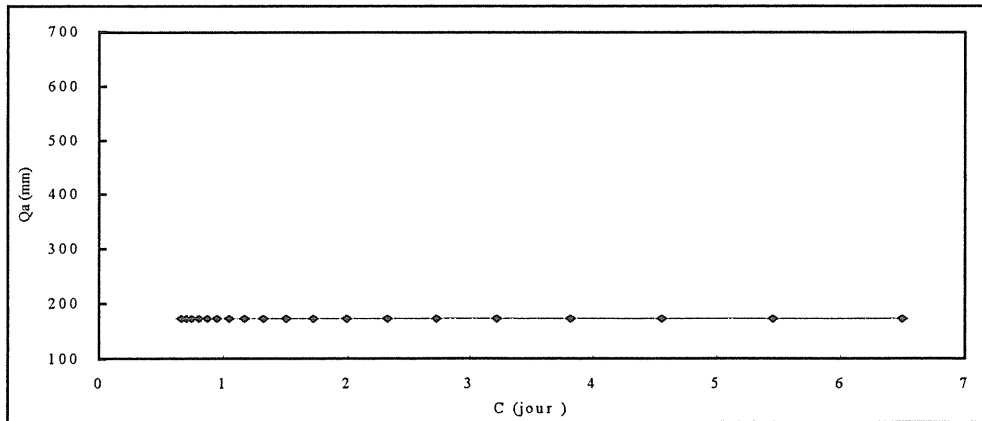
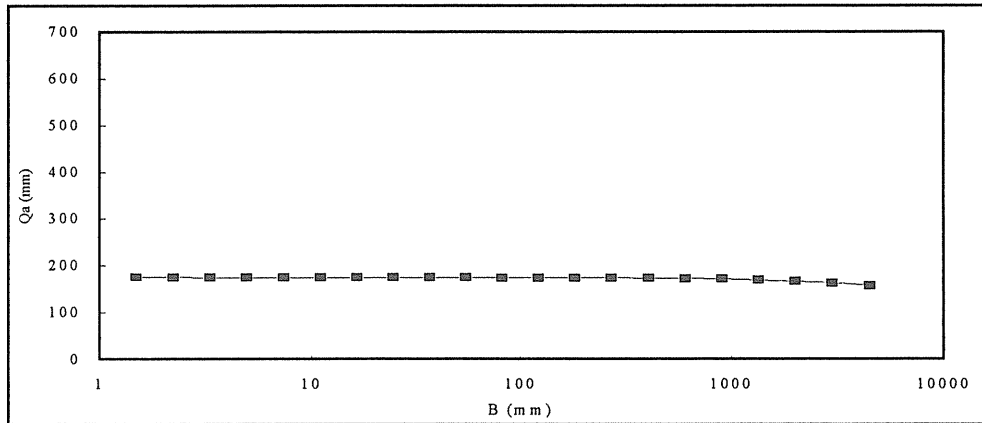
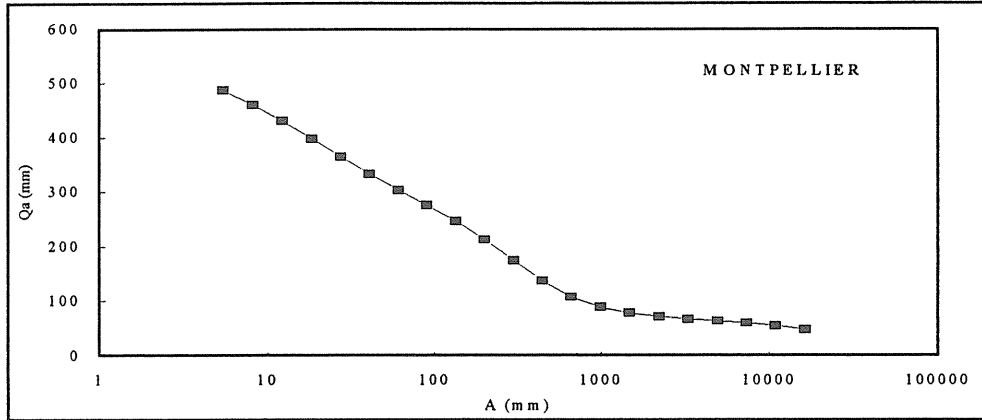


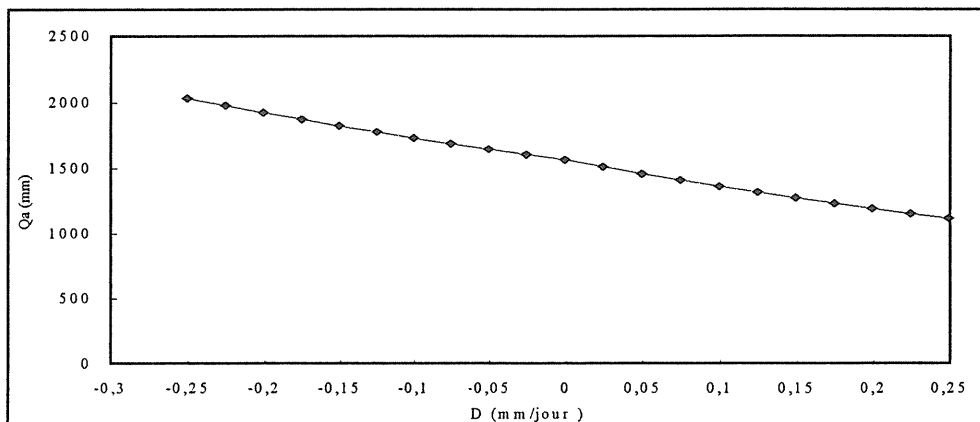
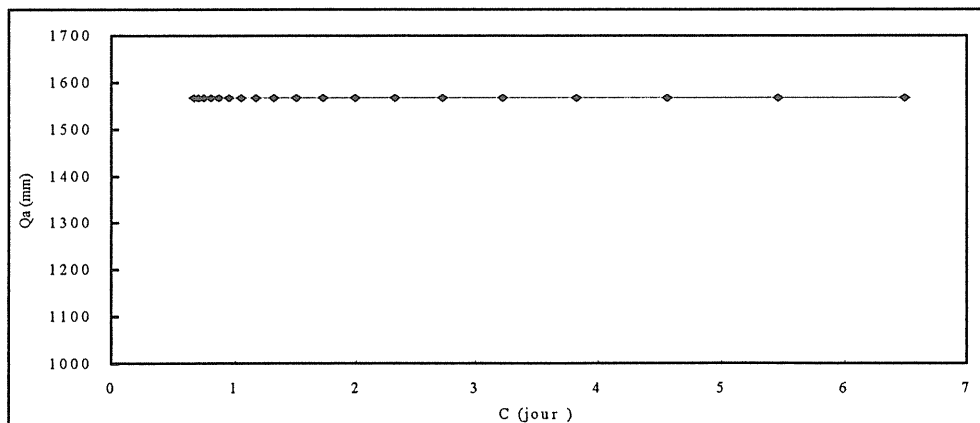
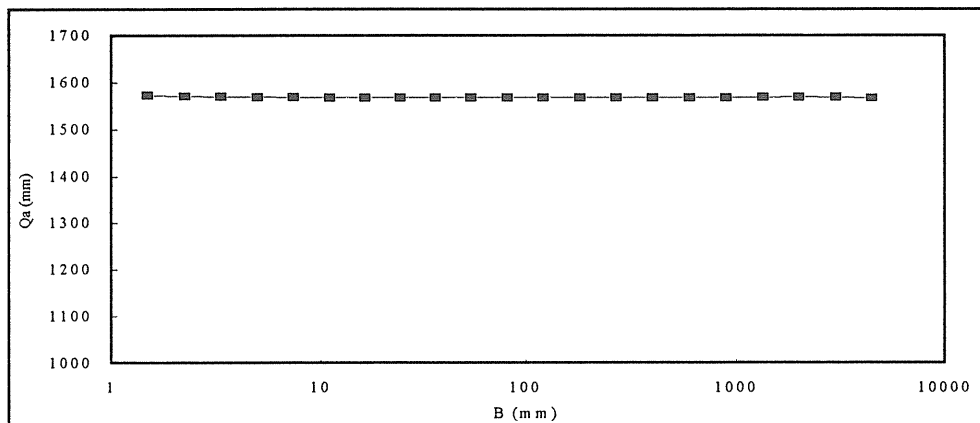
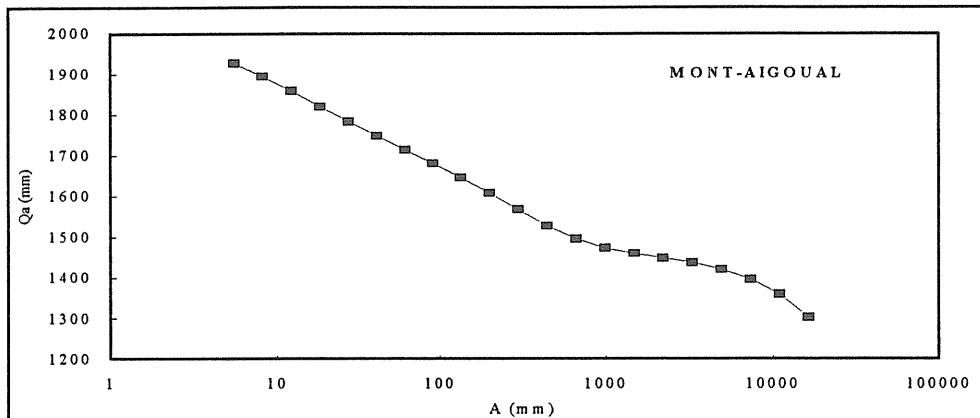


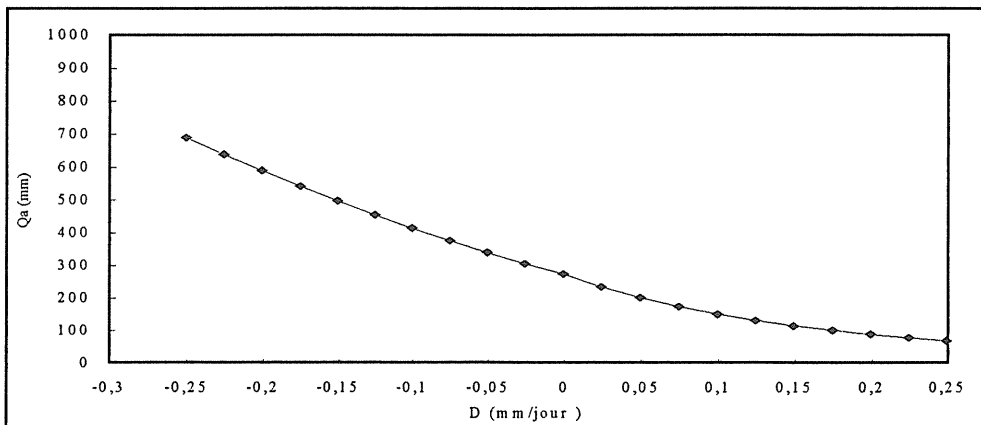
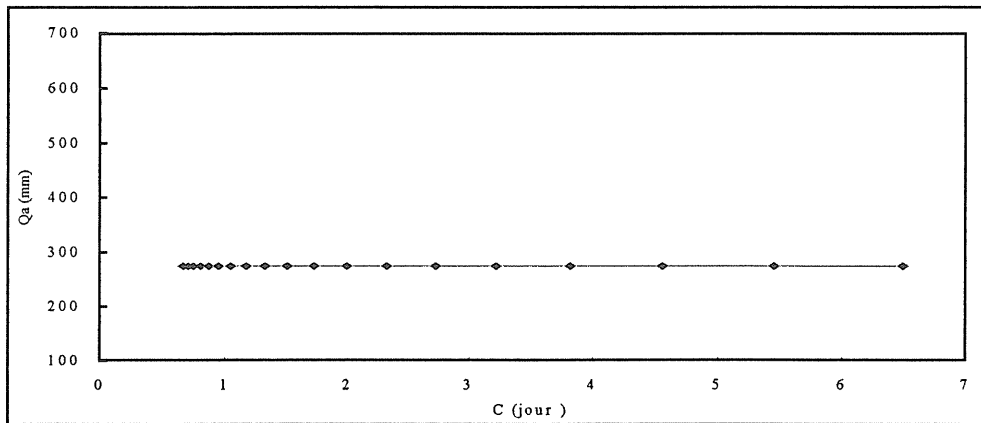
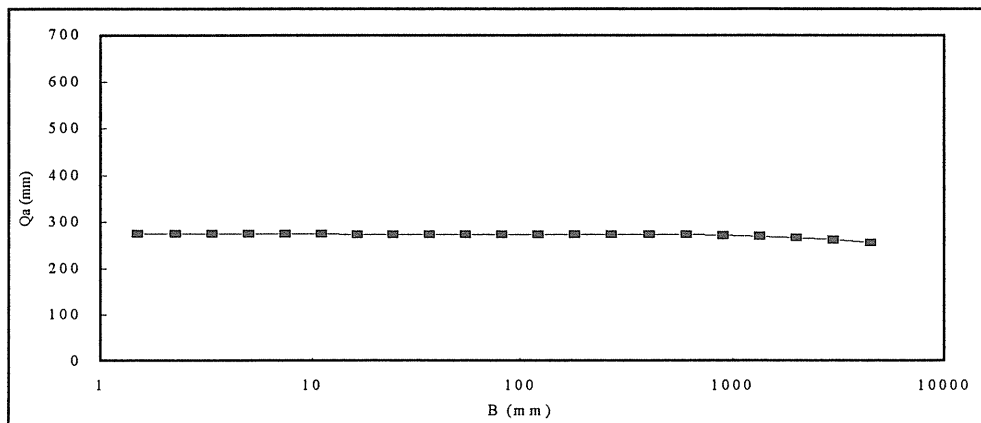
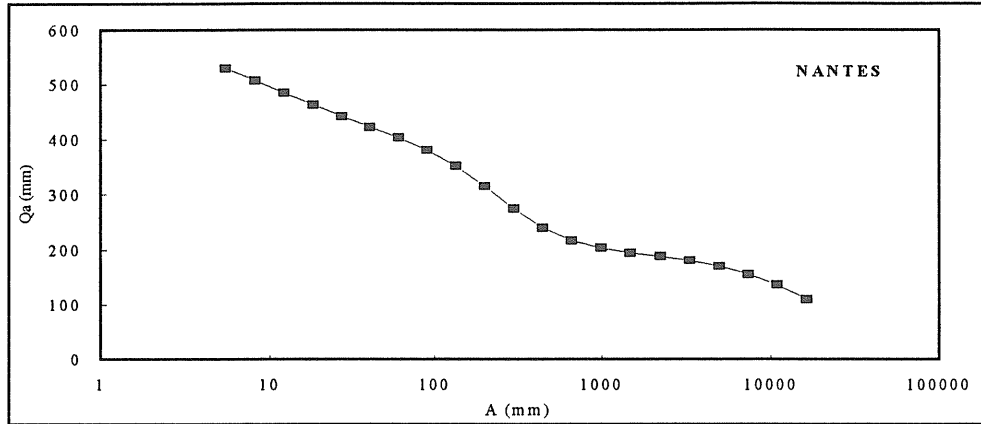


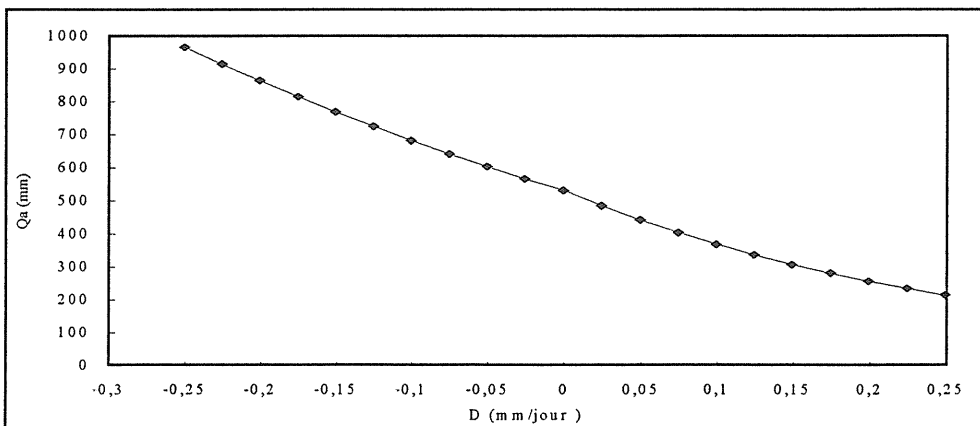
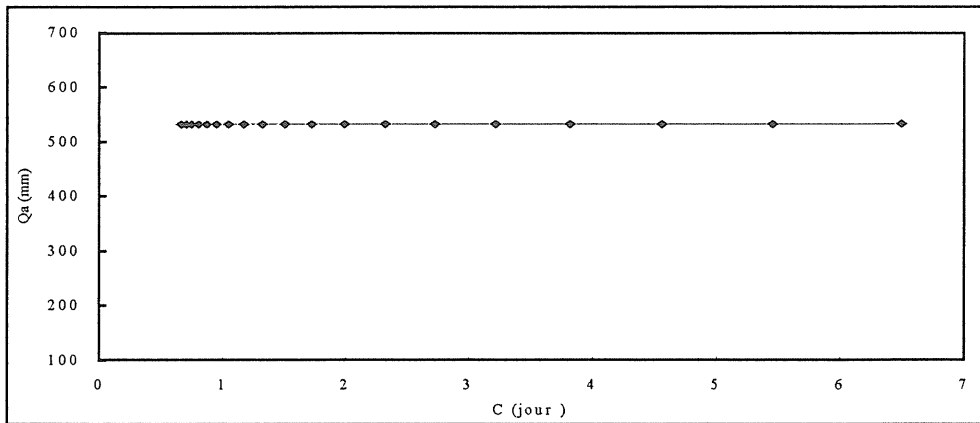
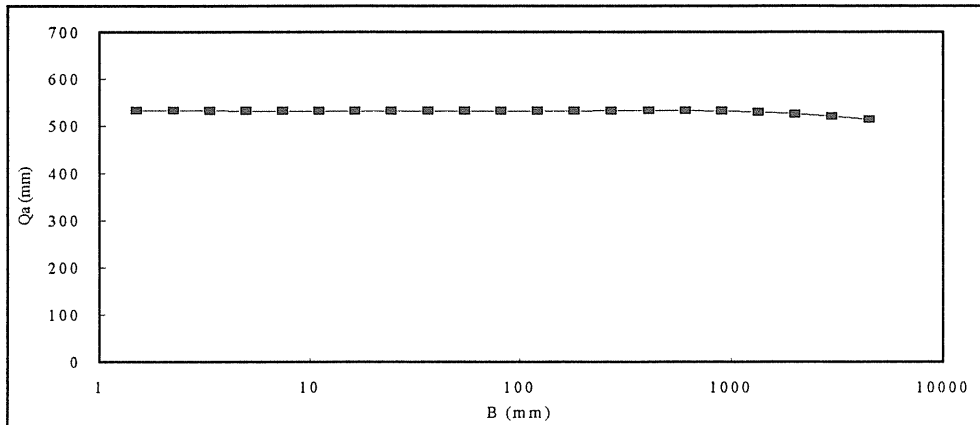
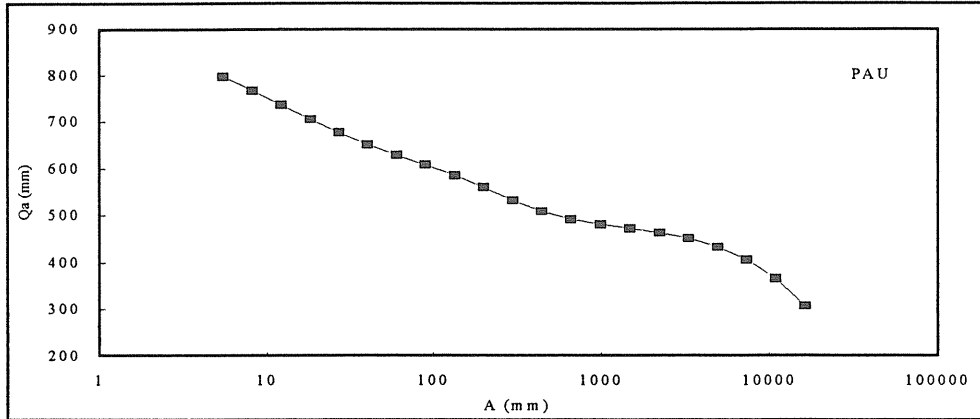


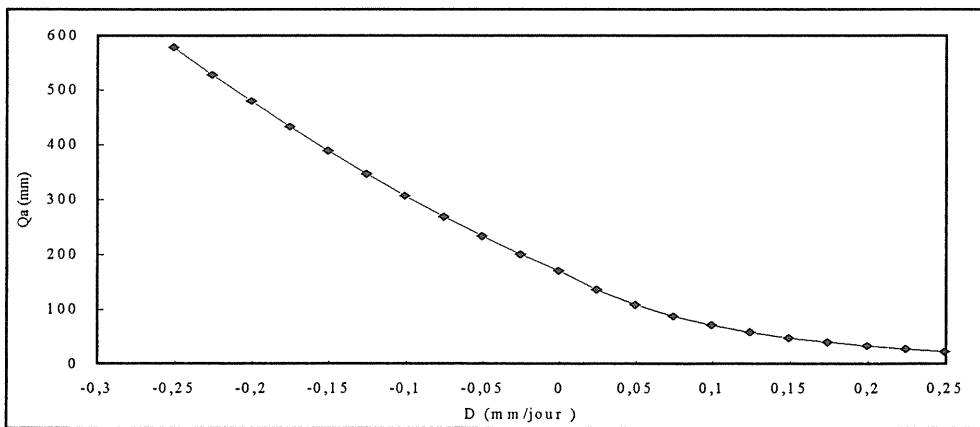
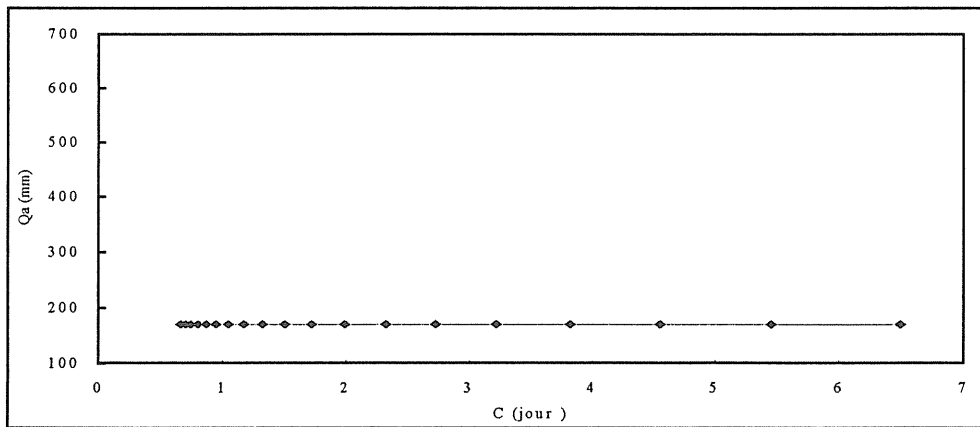
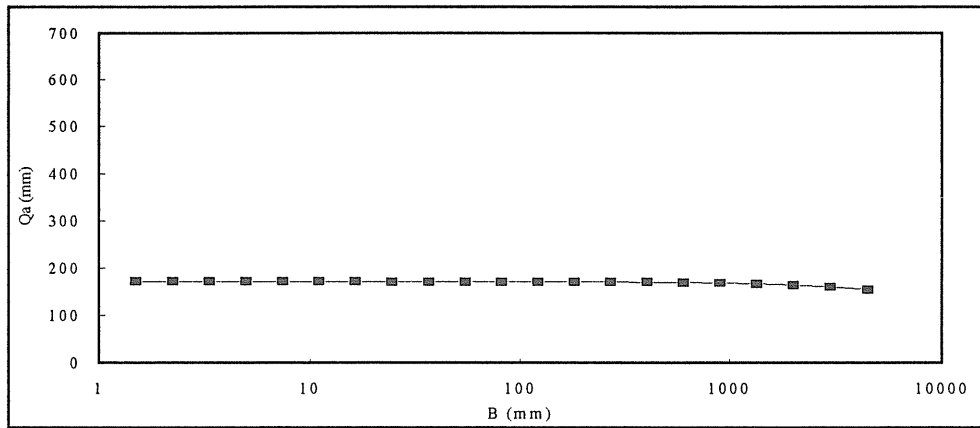
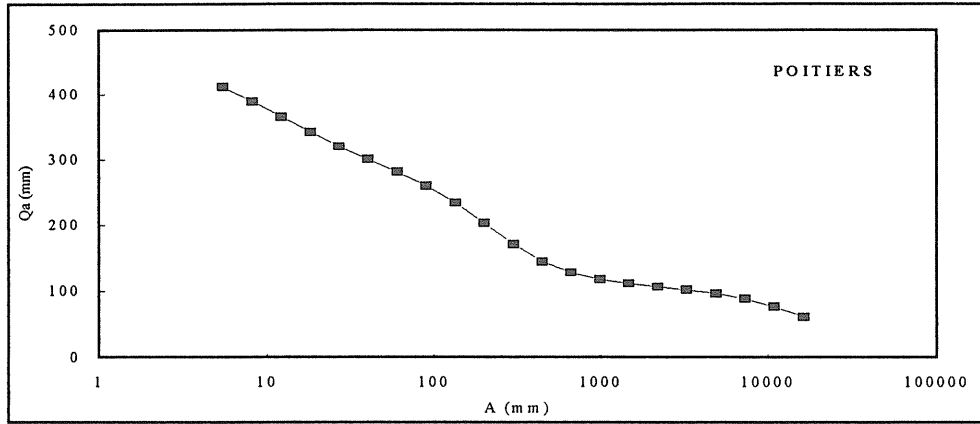


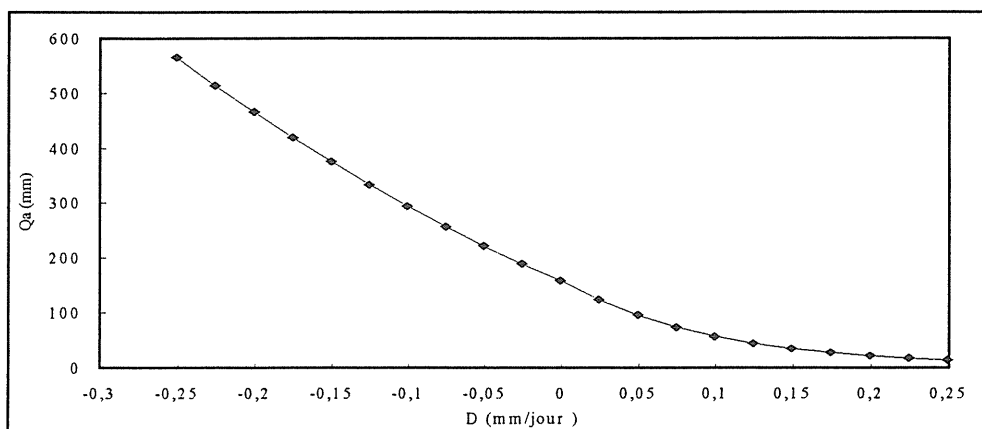
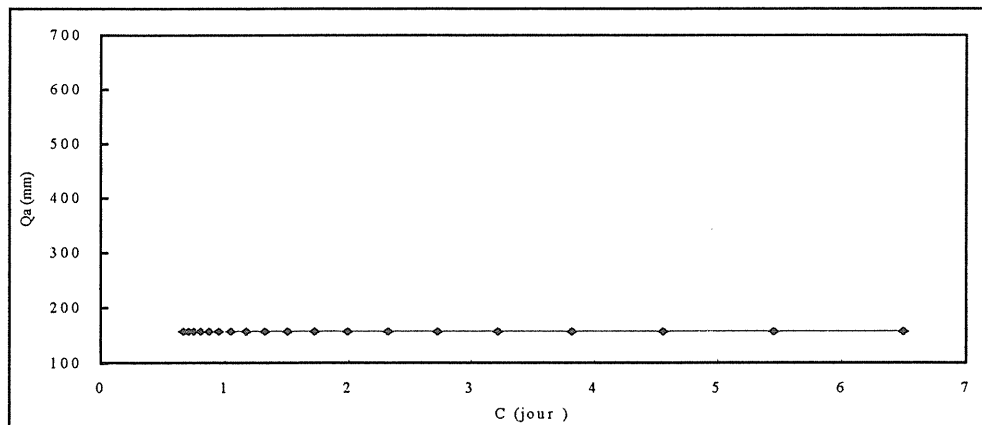
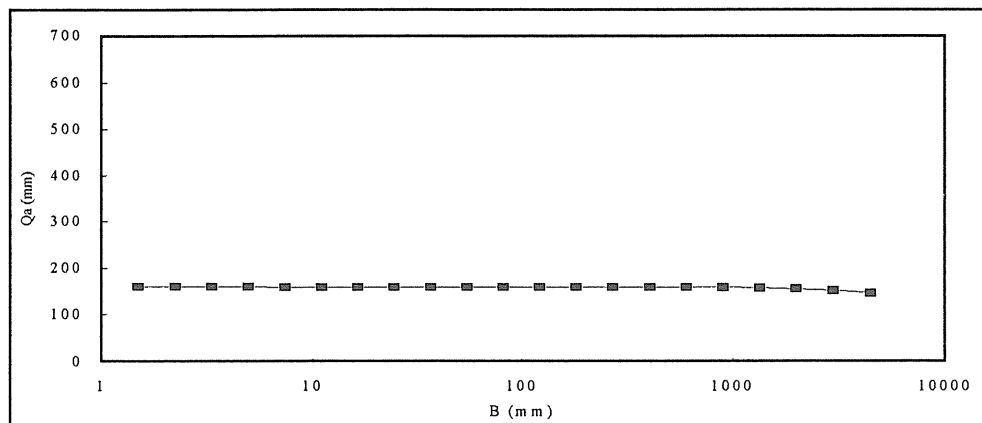
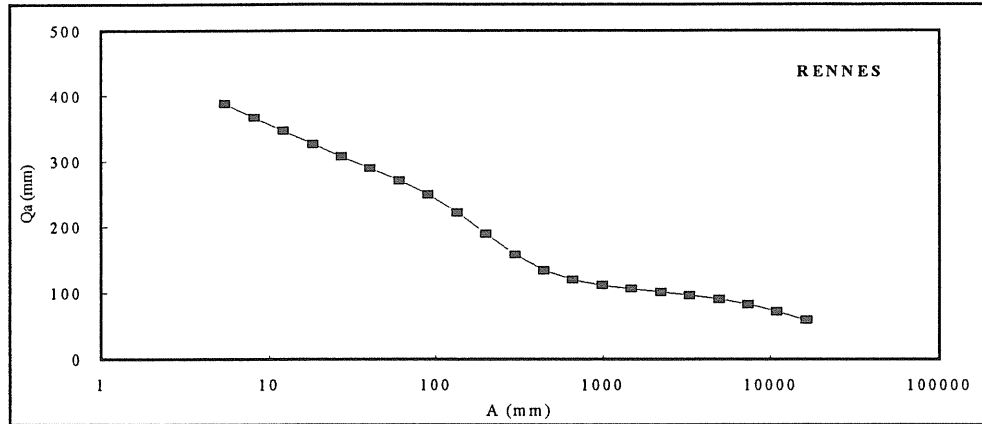


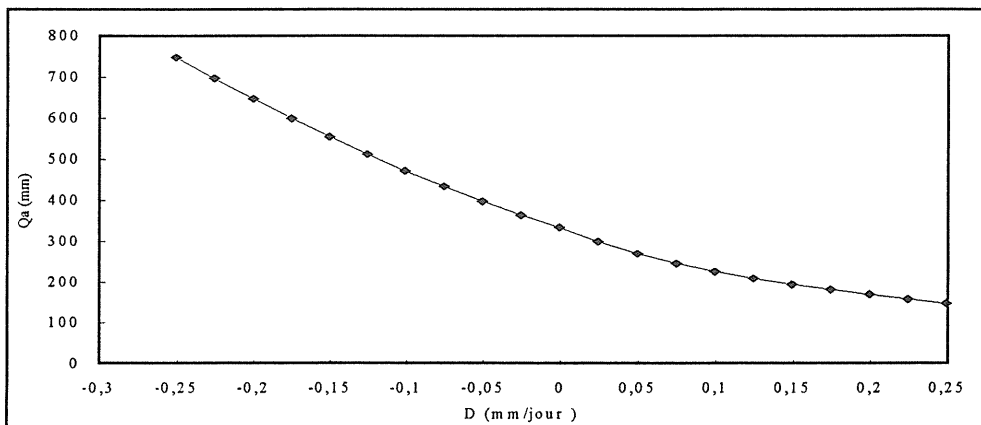
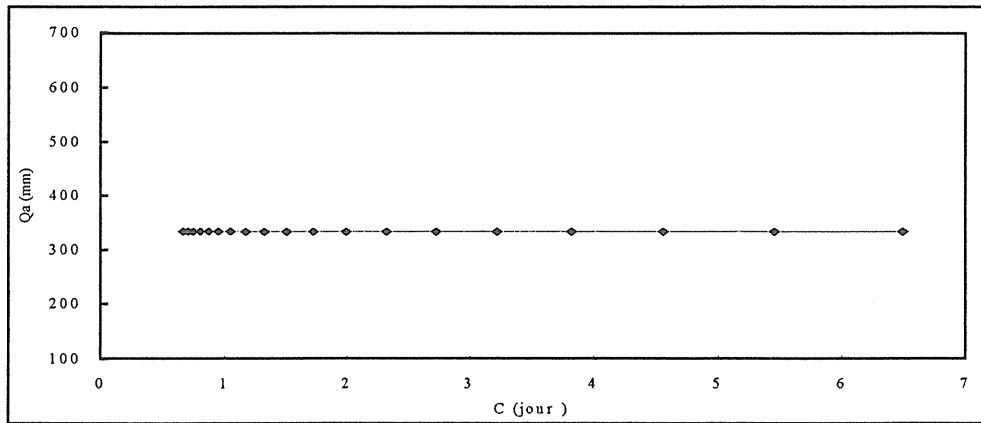
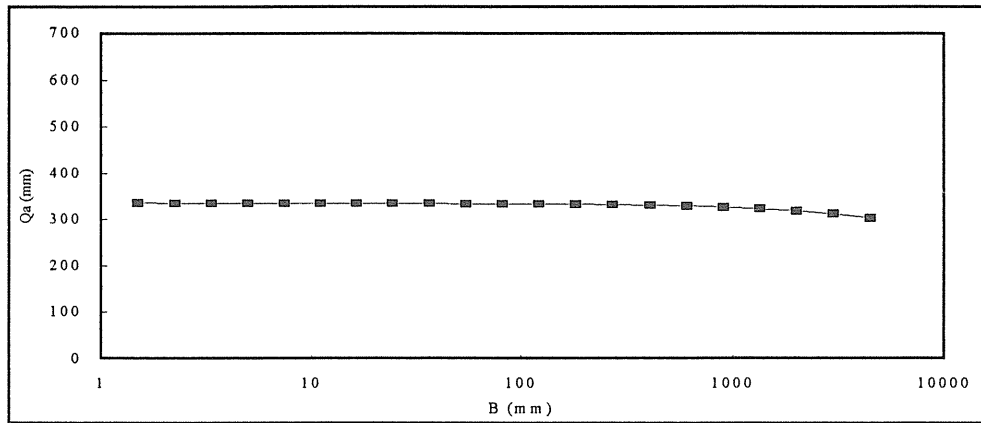
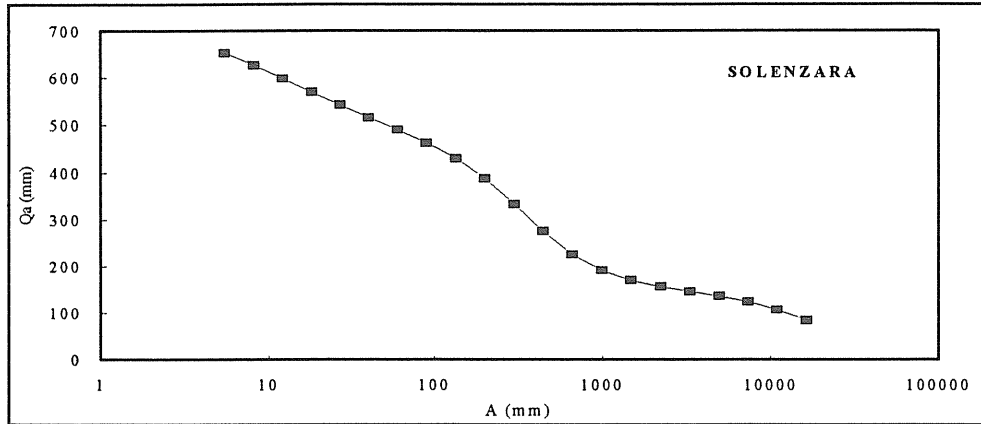


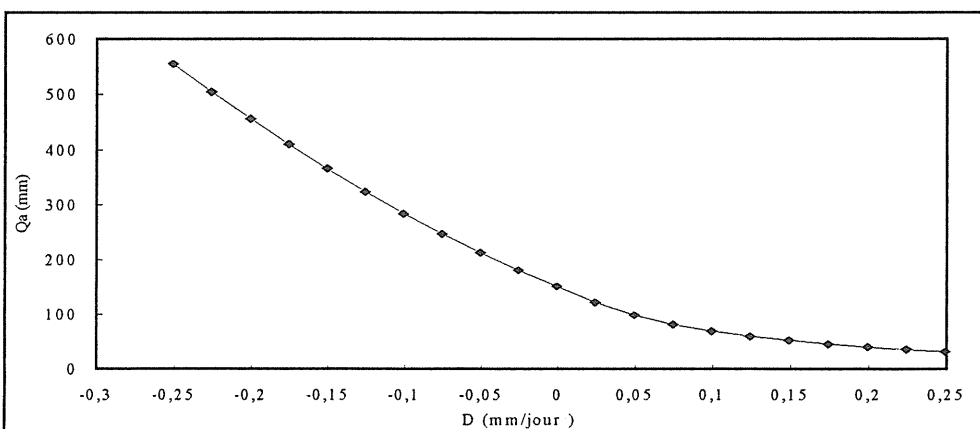
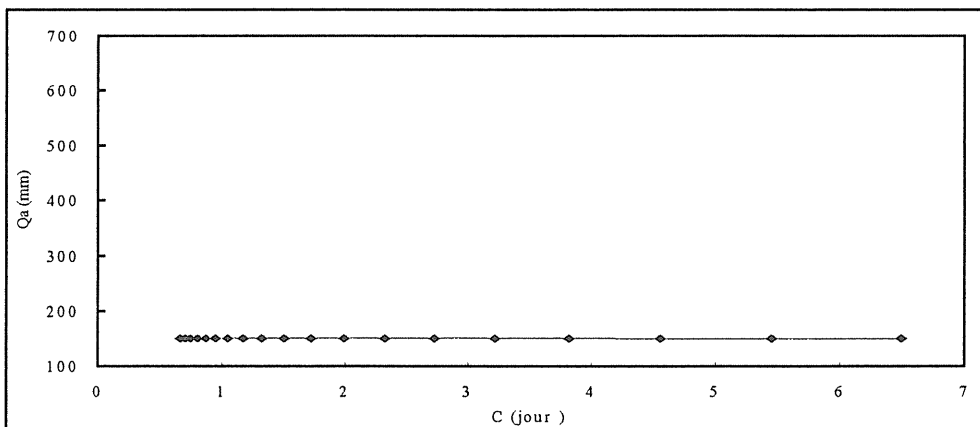
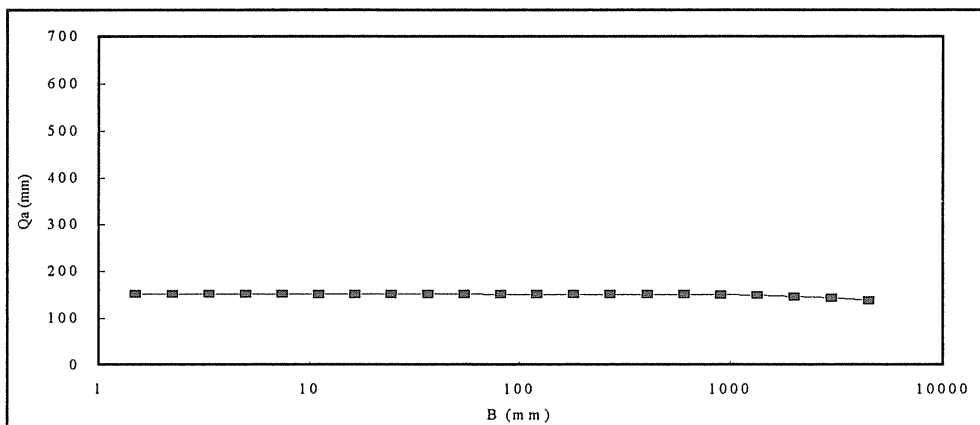
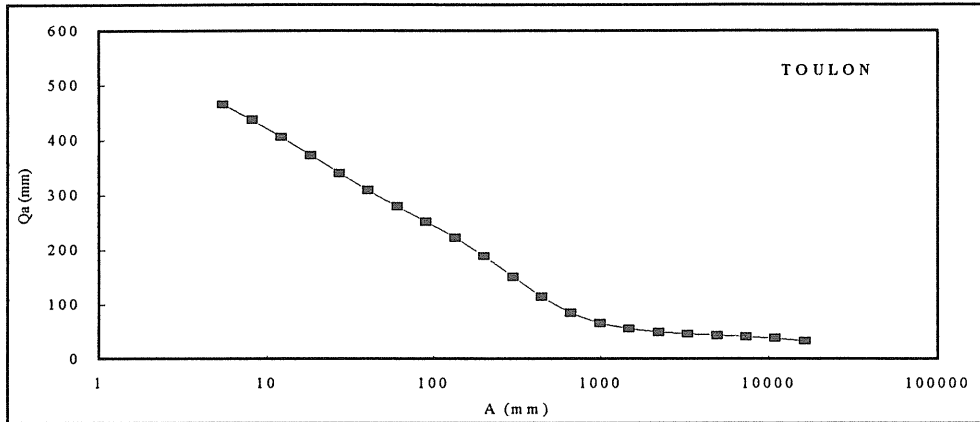


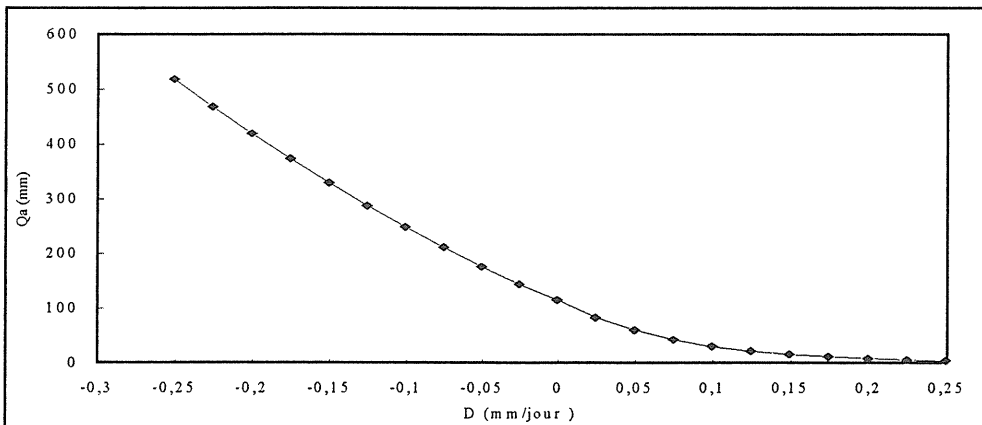
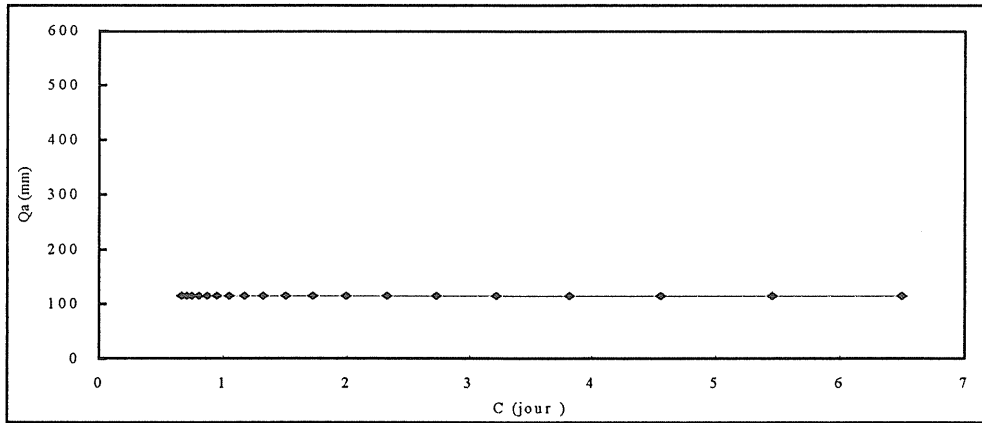
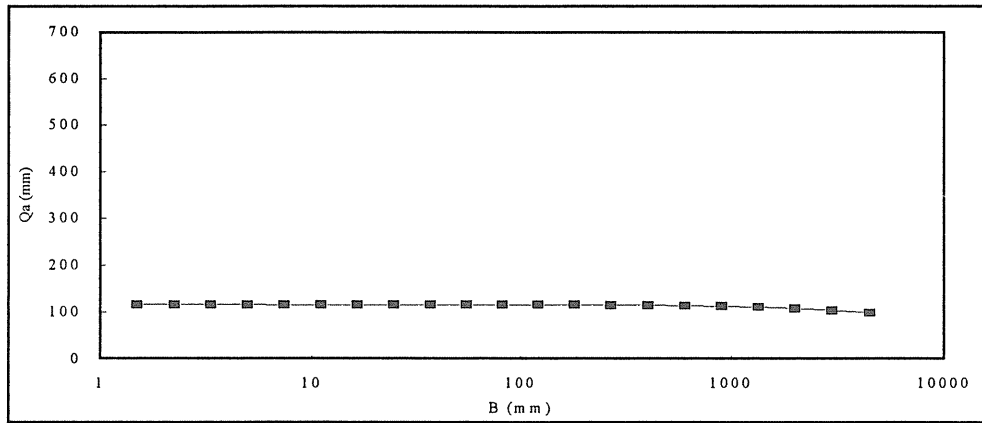
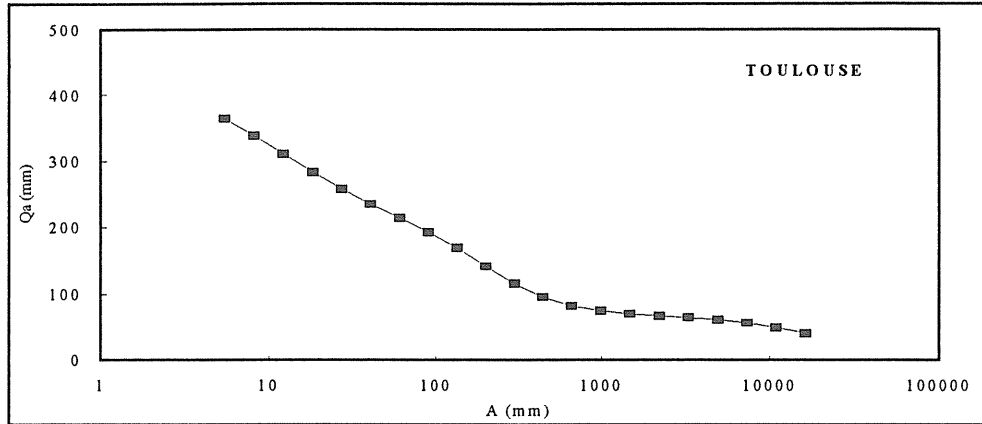




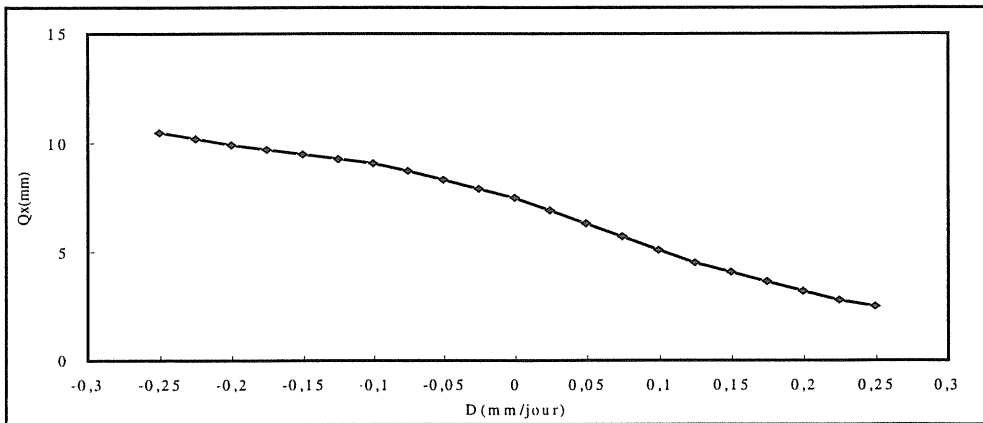
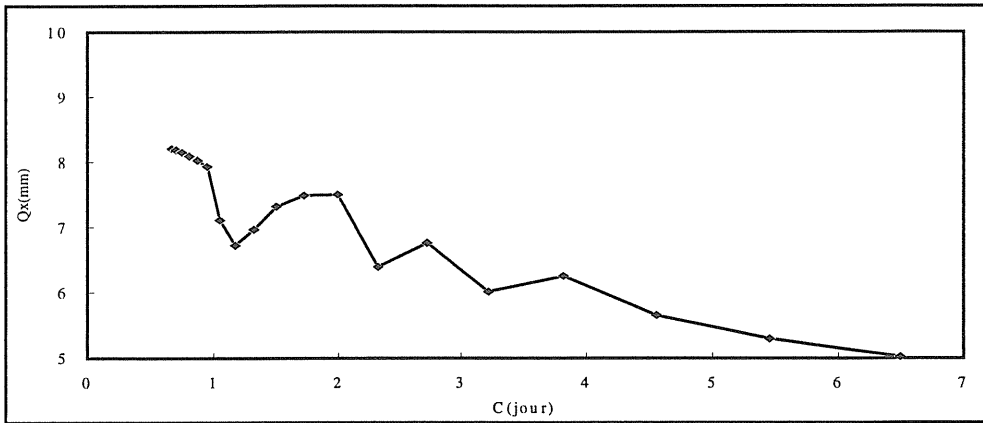
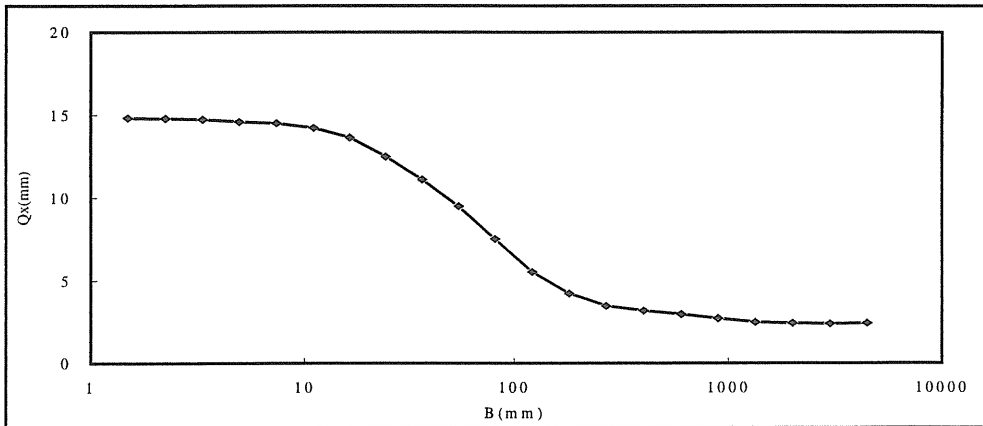
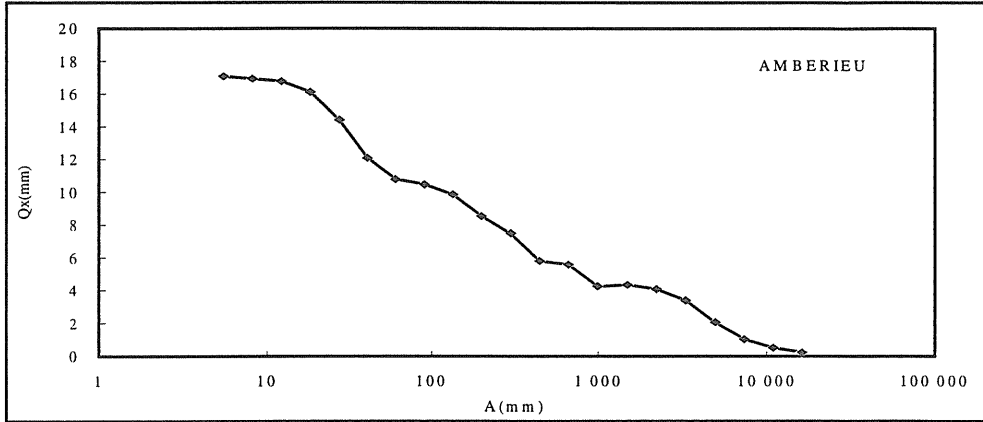


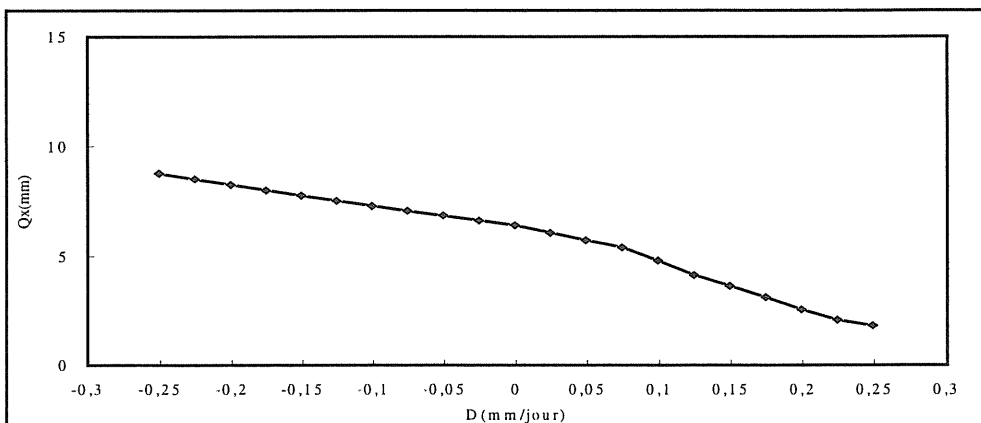
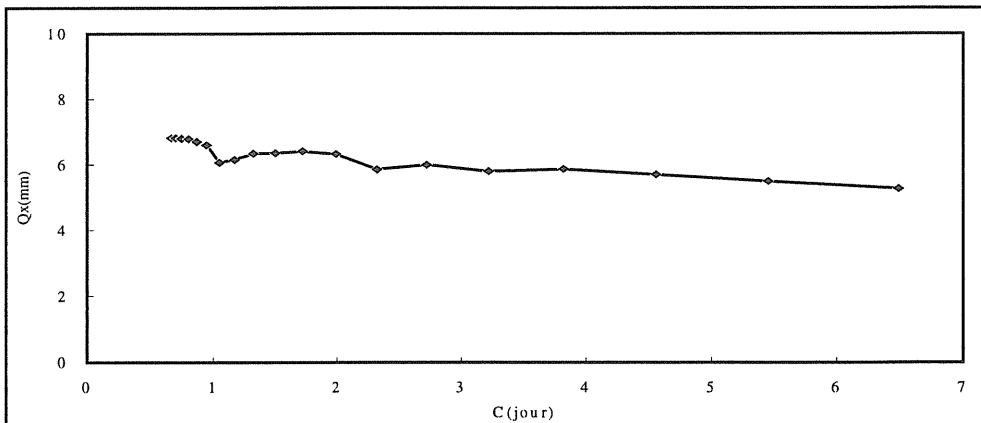
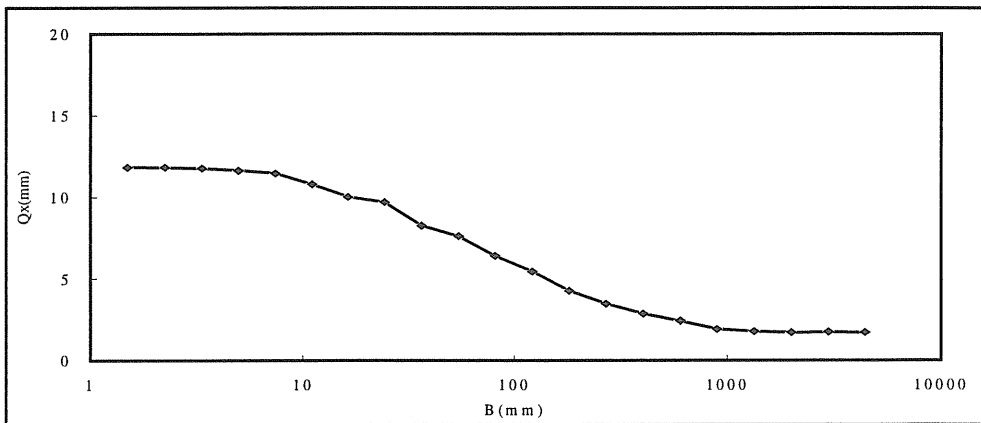
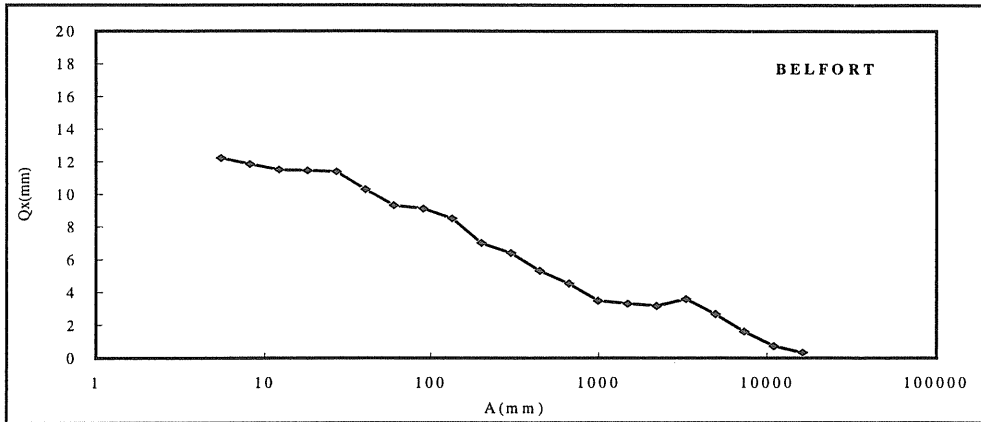


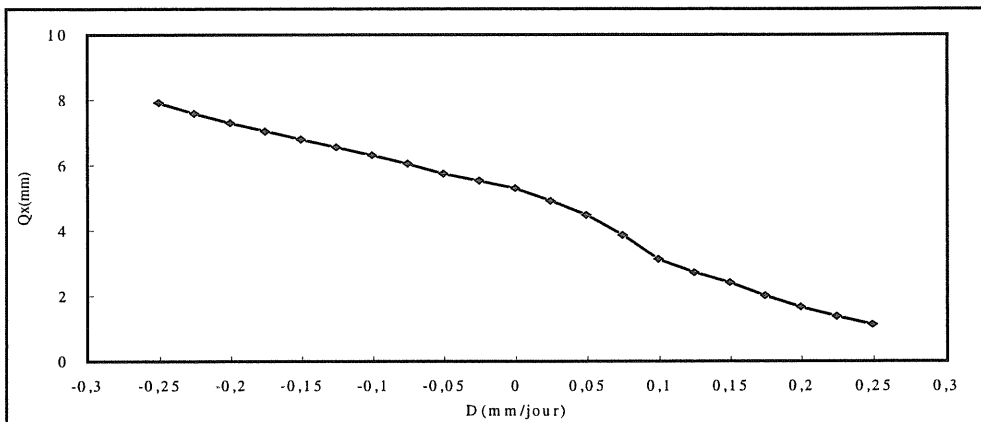
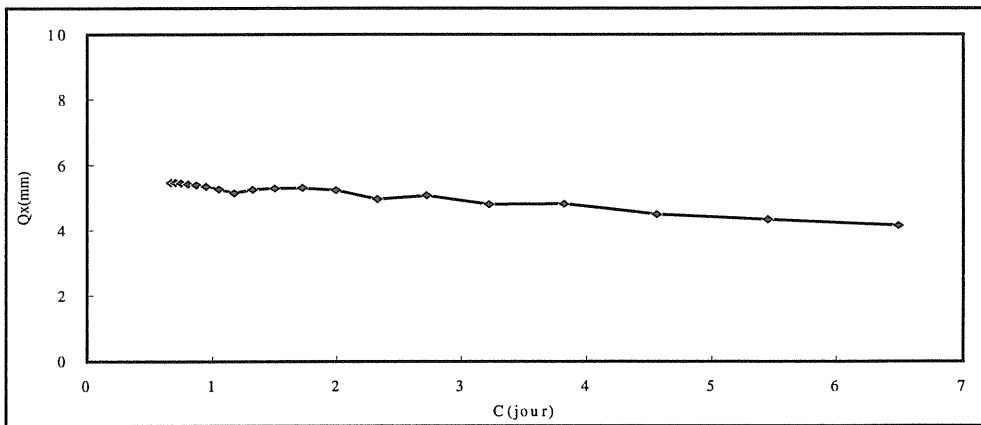
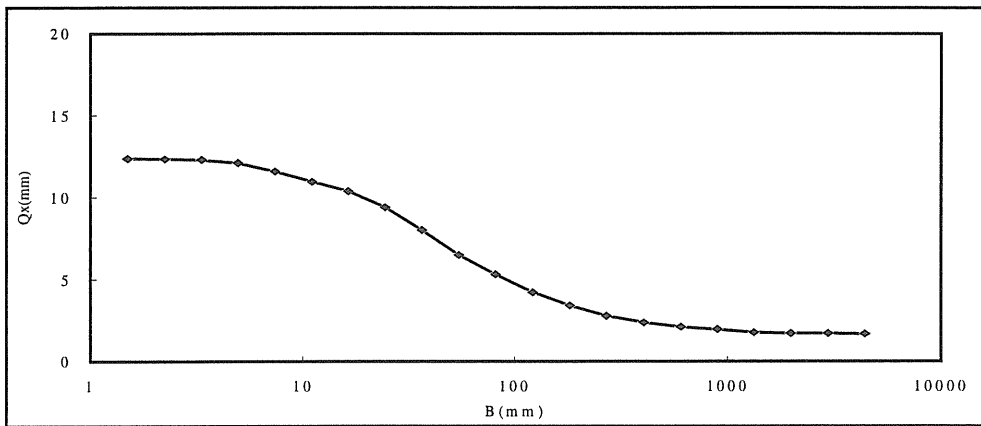
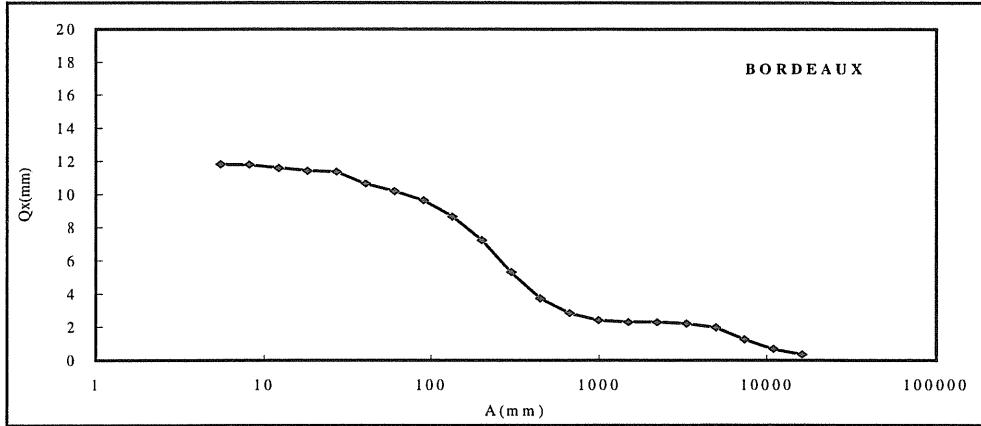


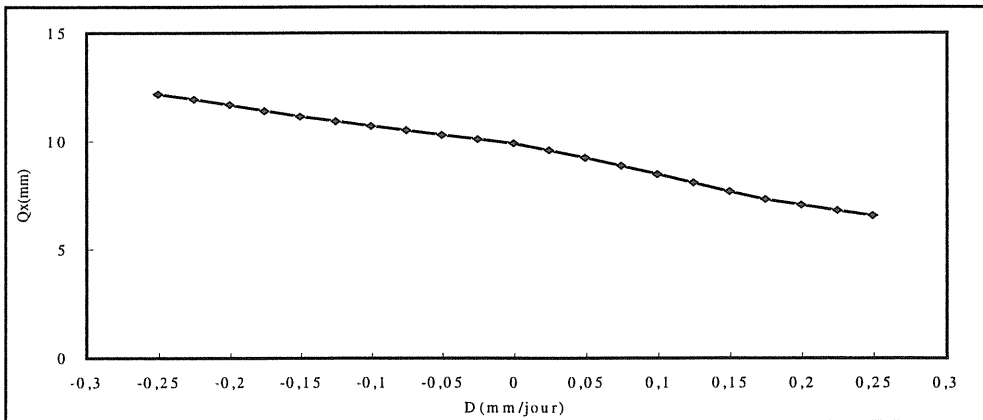
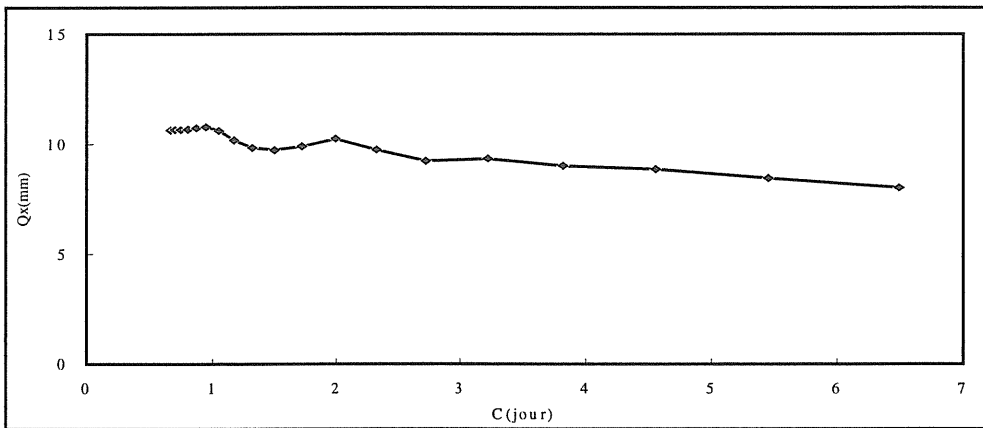
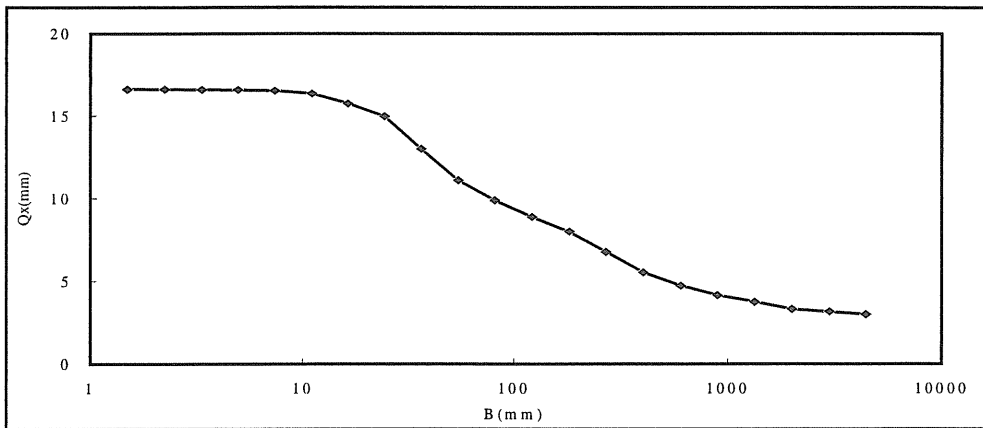
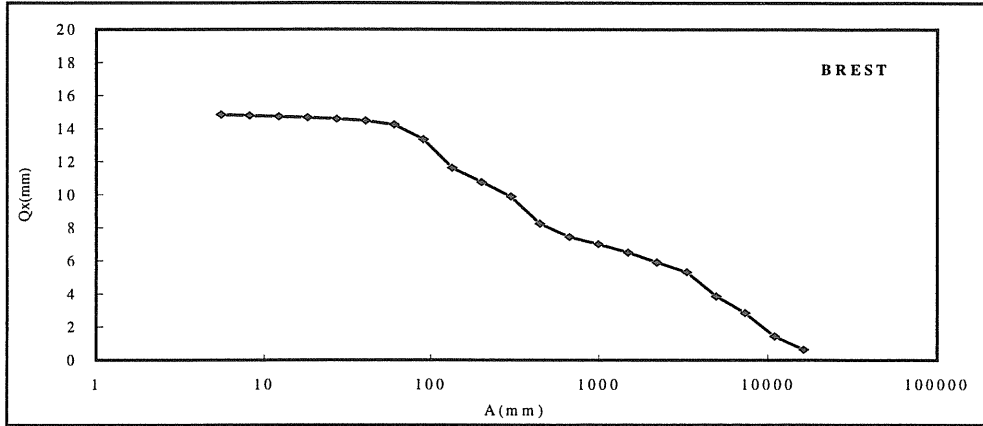


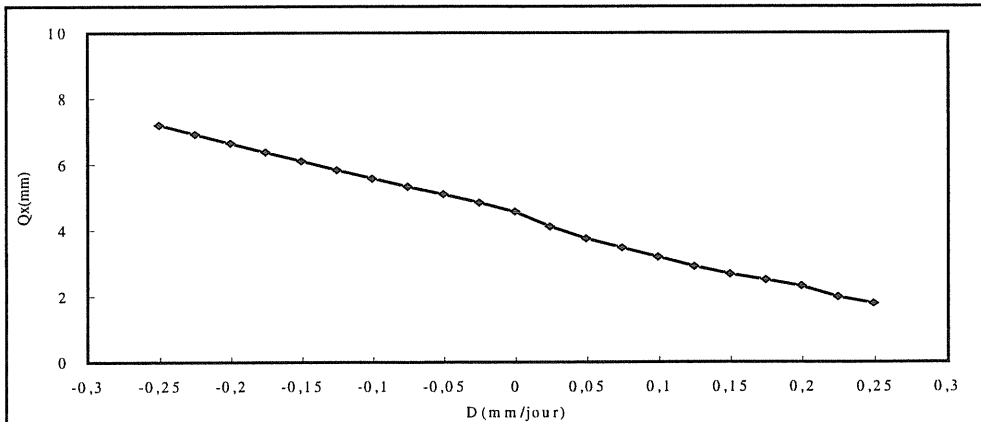
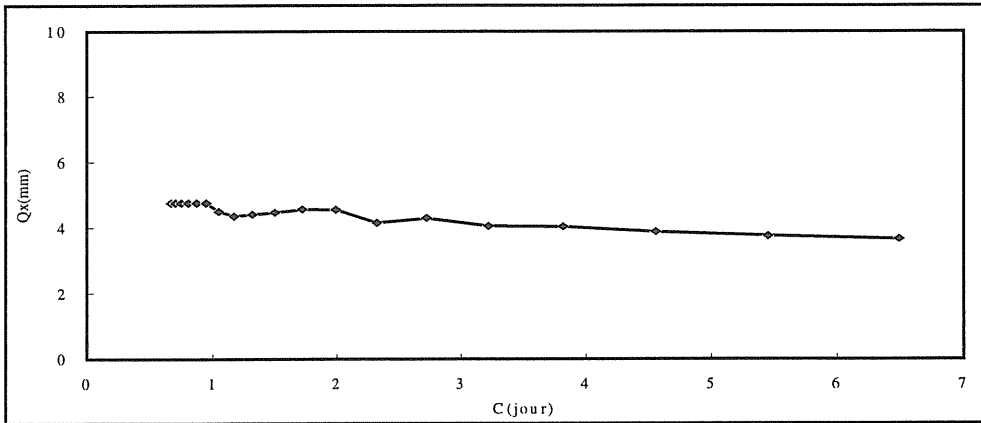
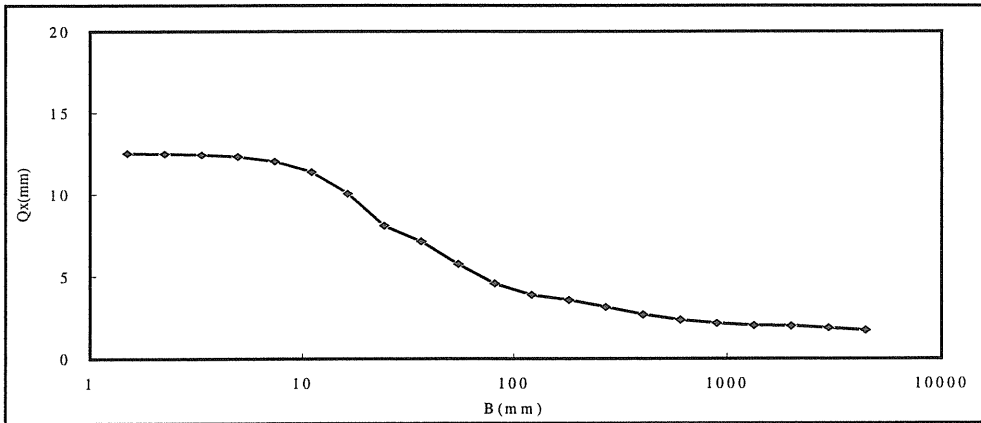
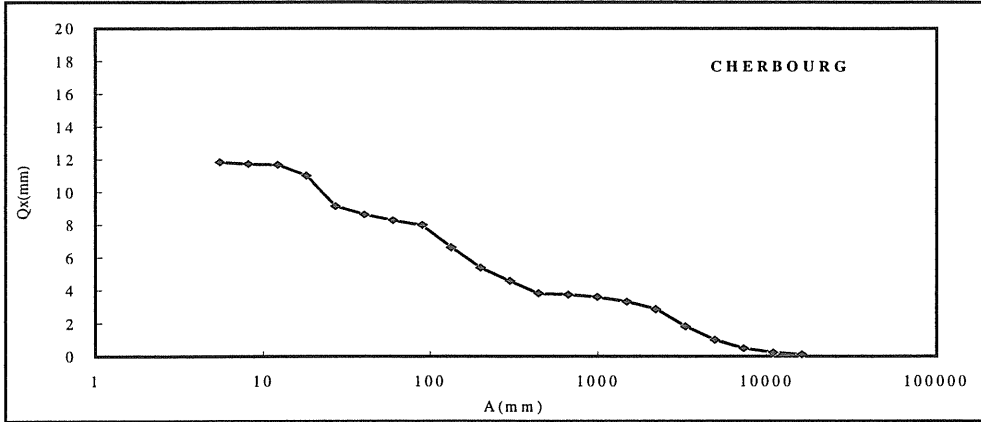
Annexe (I.2): Influence des paramètres sur les crues.

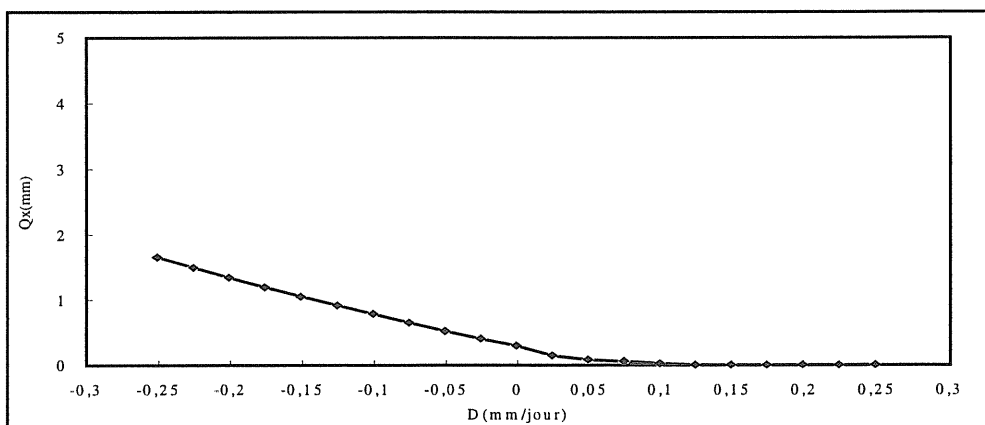
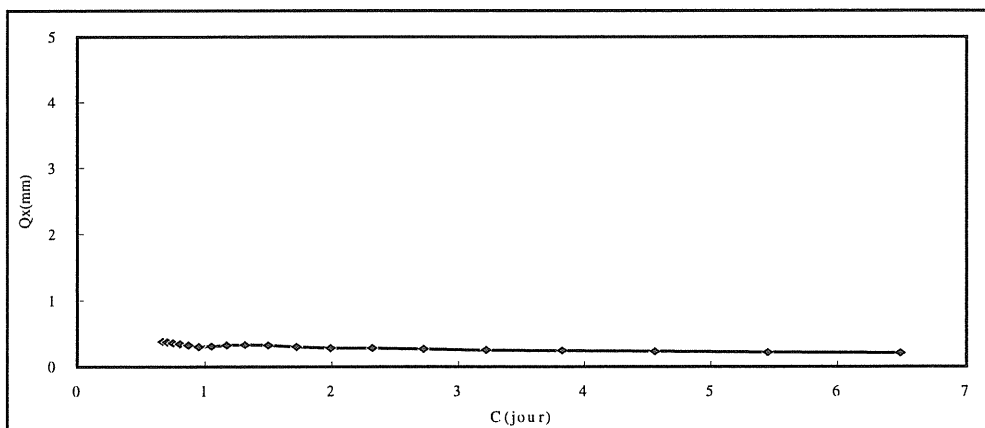
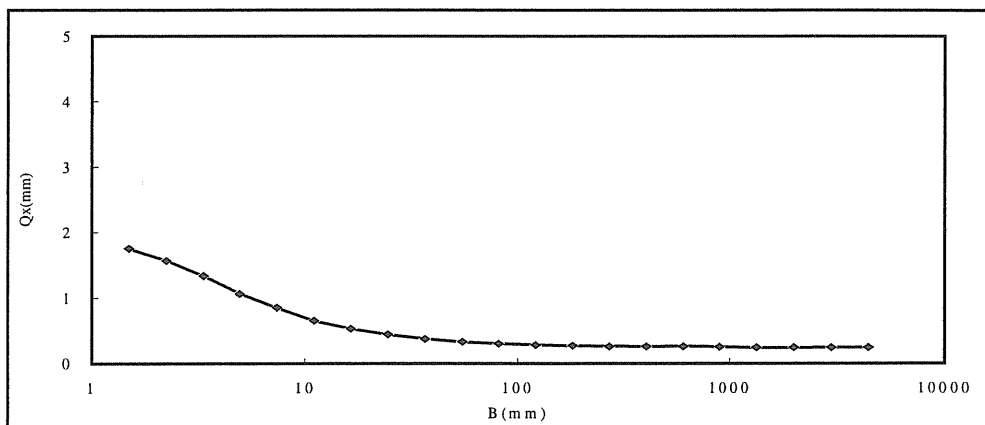
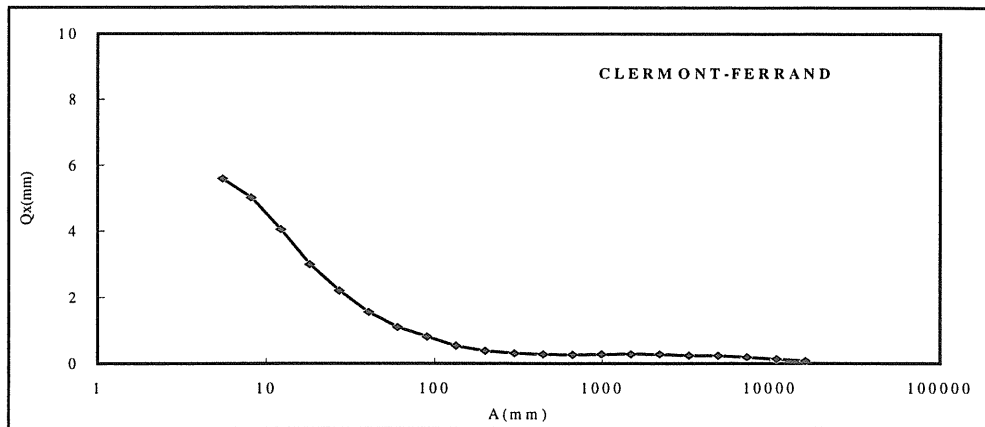


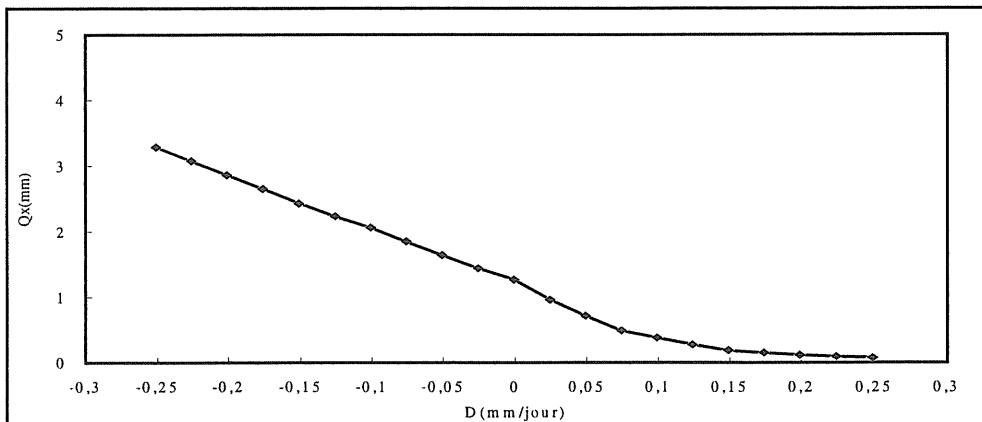
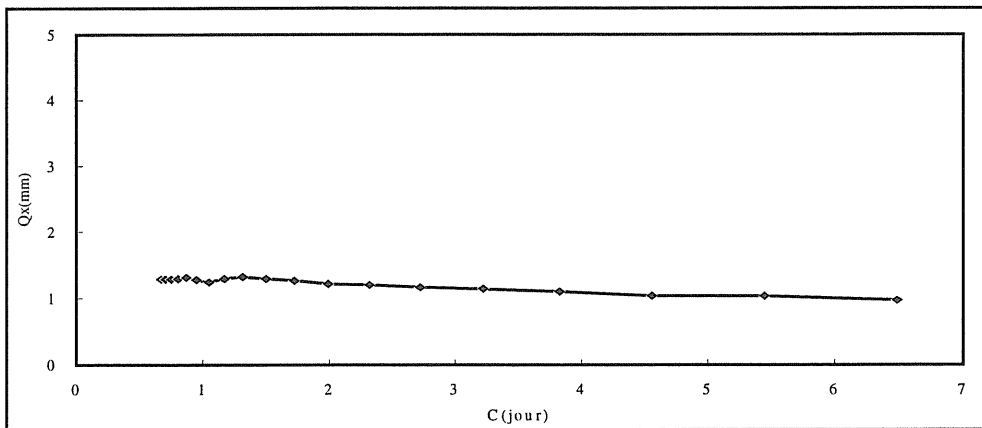
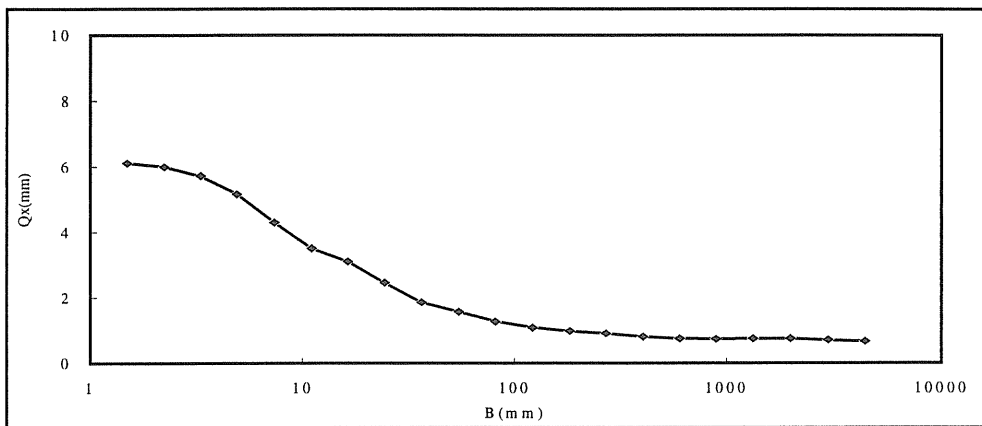
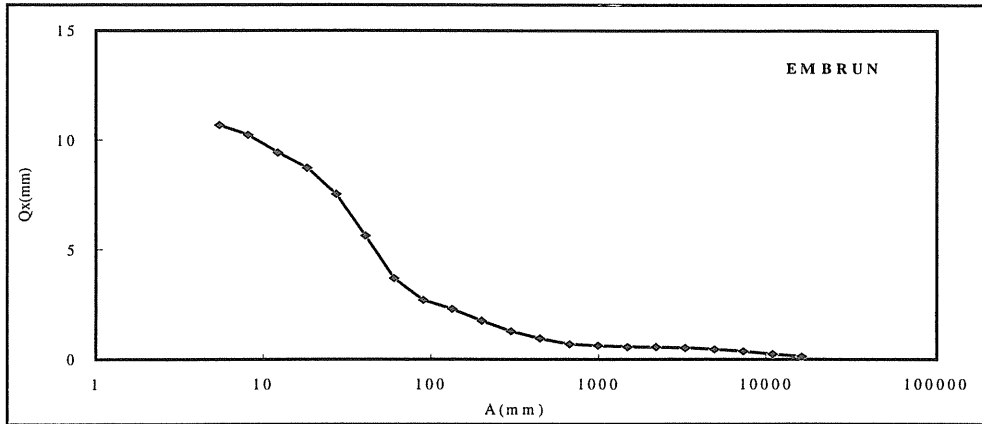


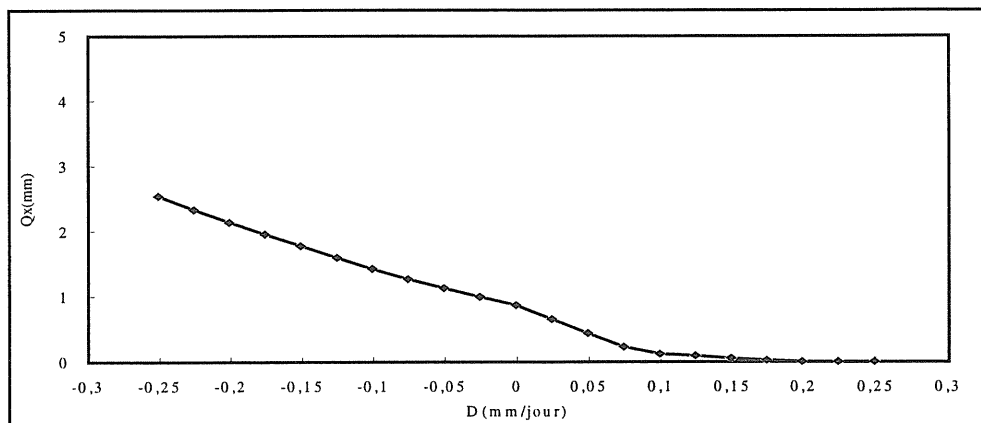
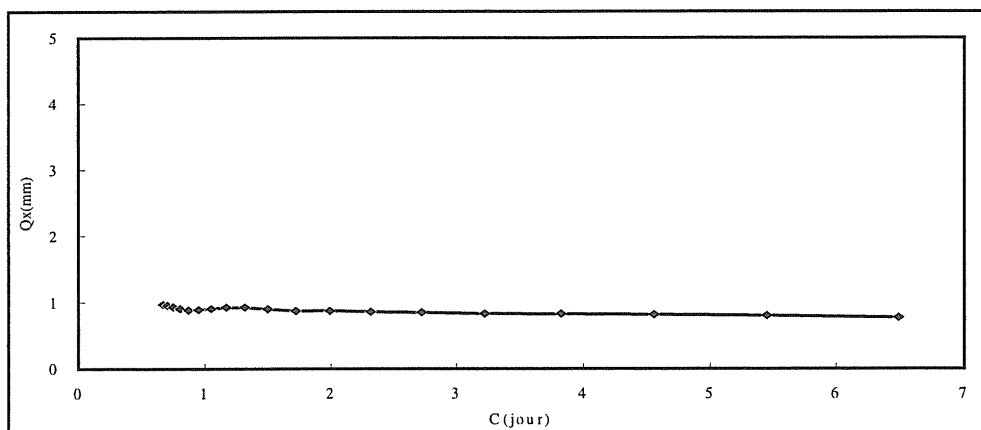
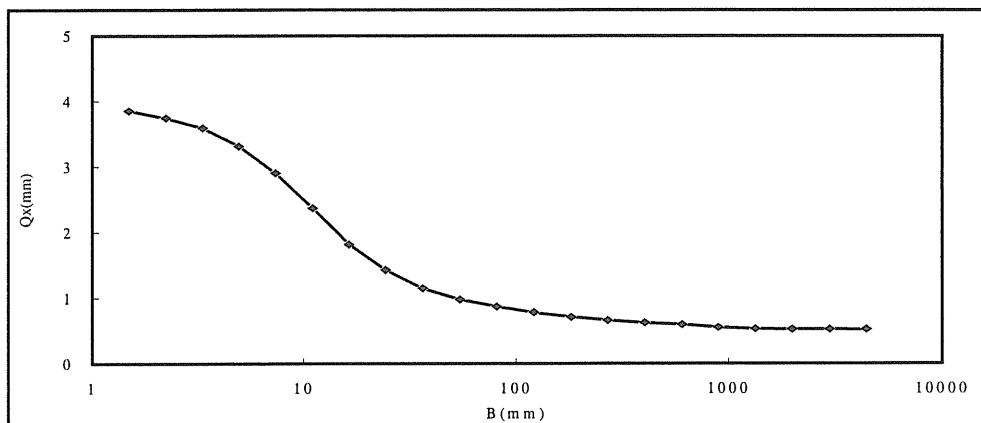
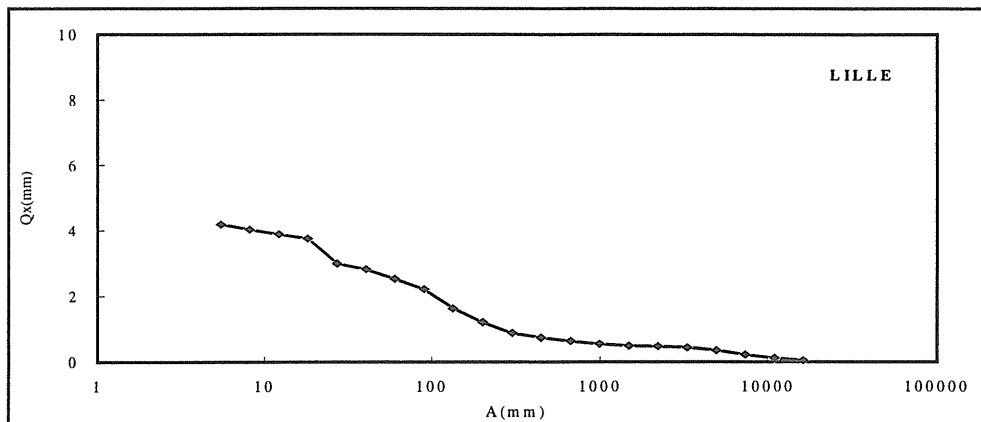


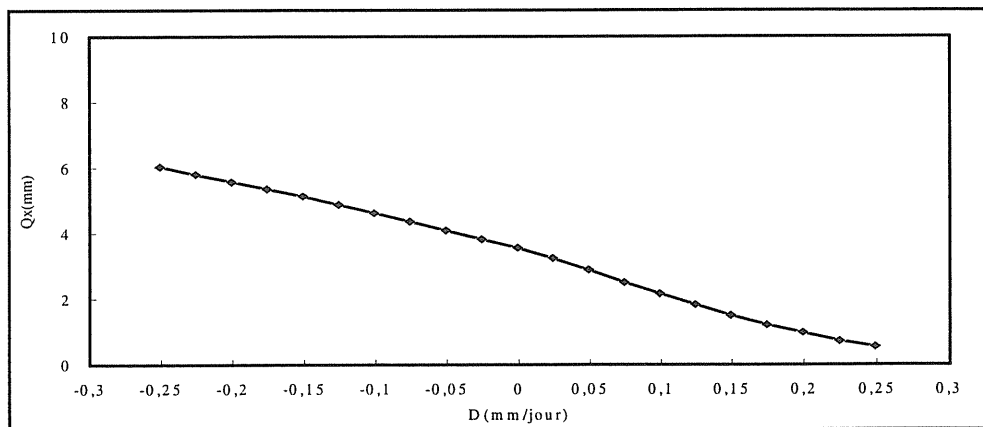
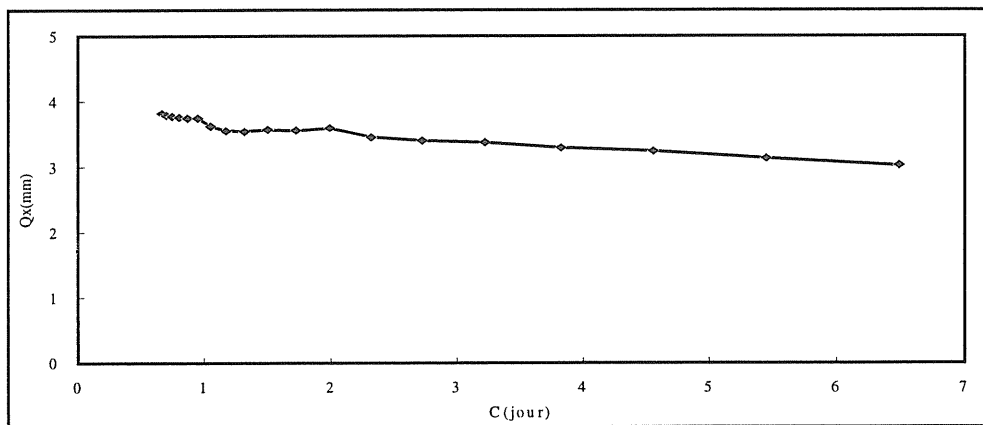
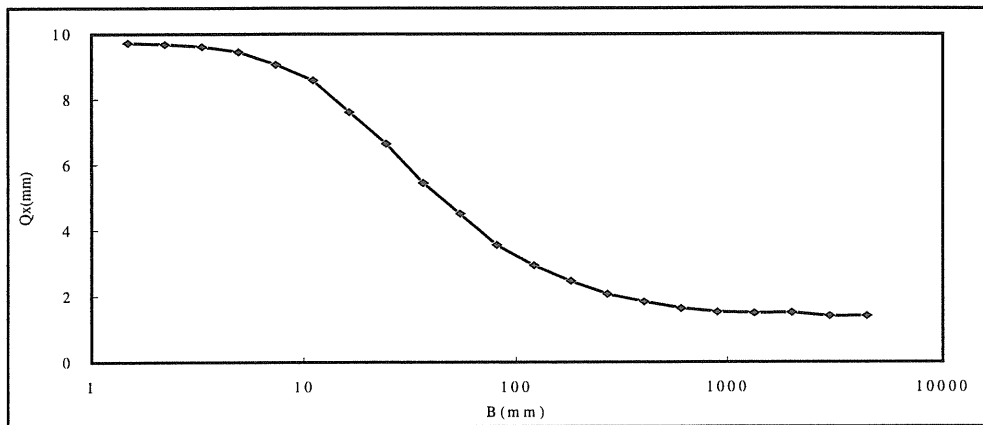
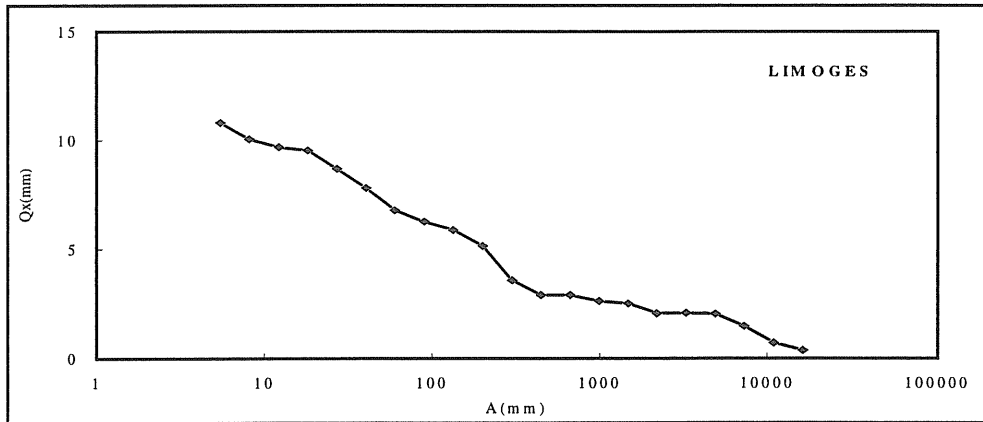


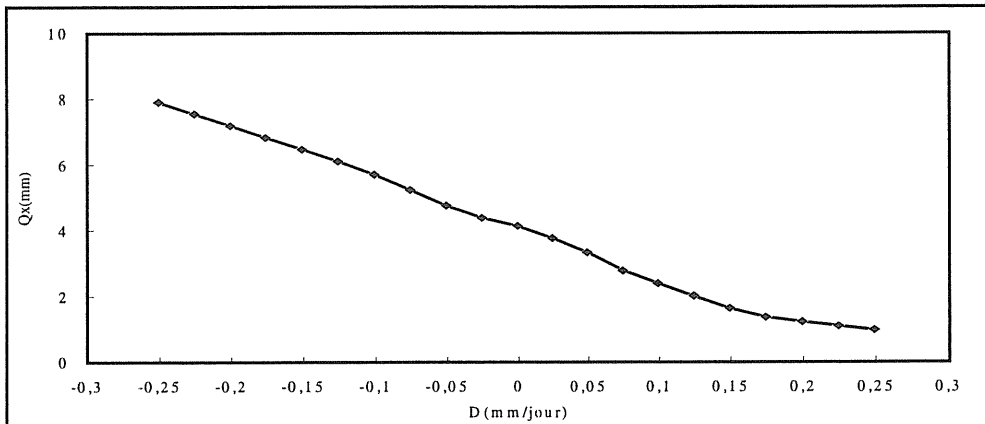
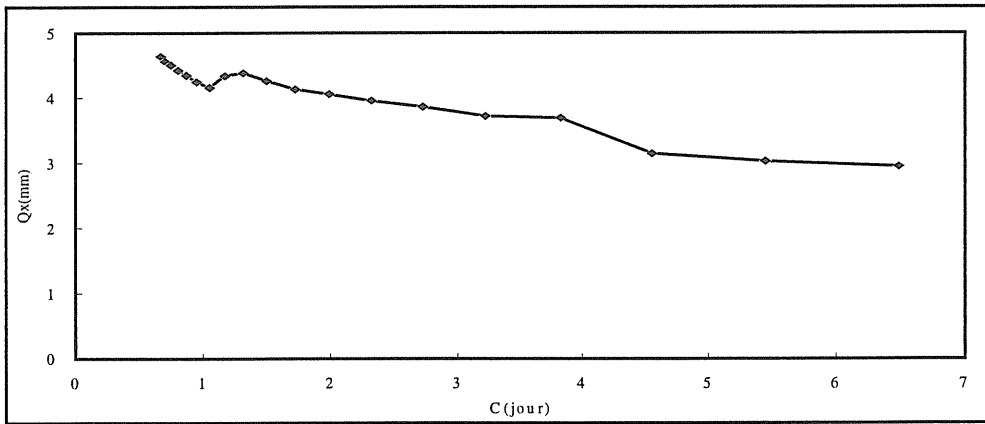
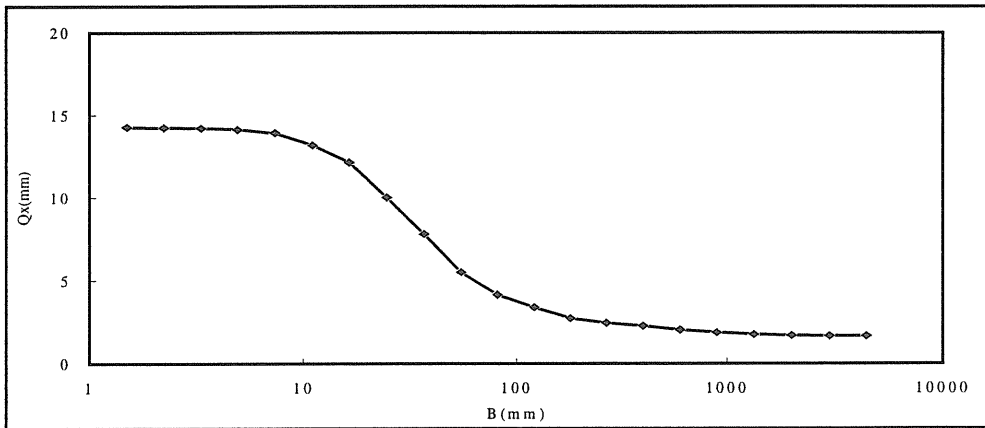
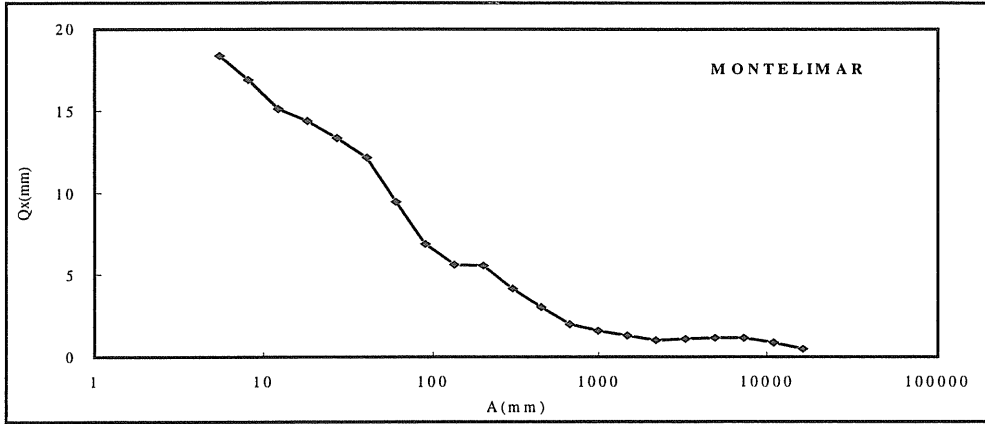


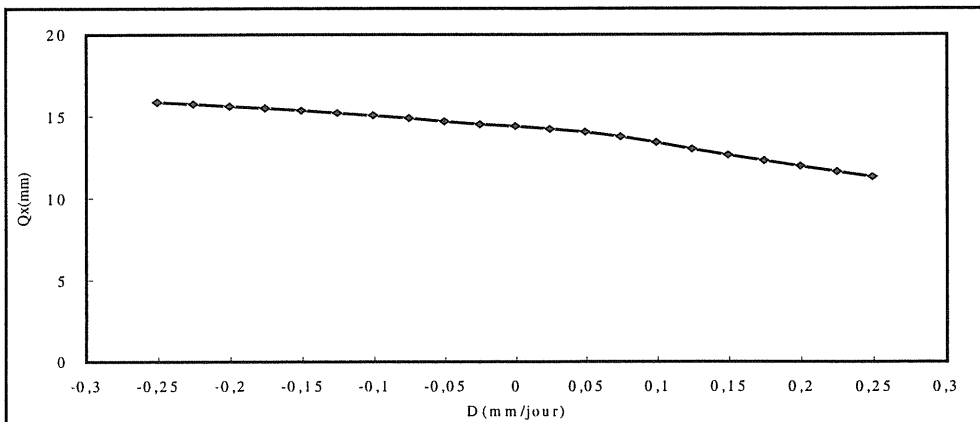
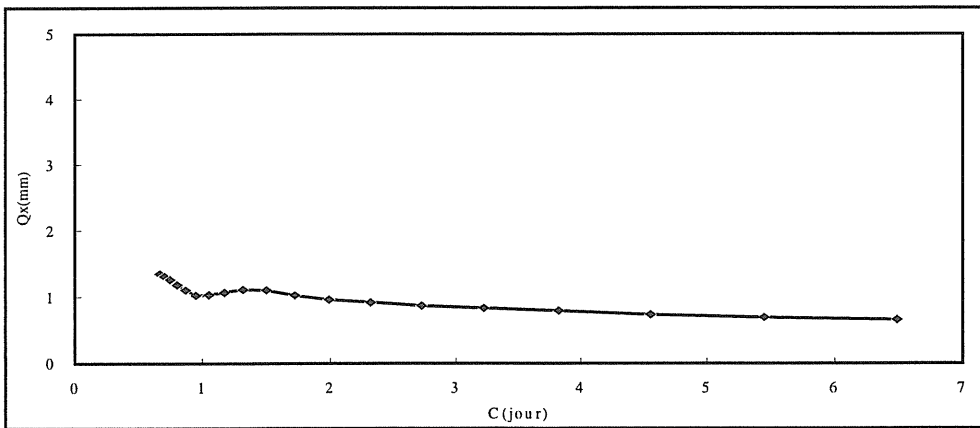
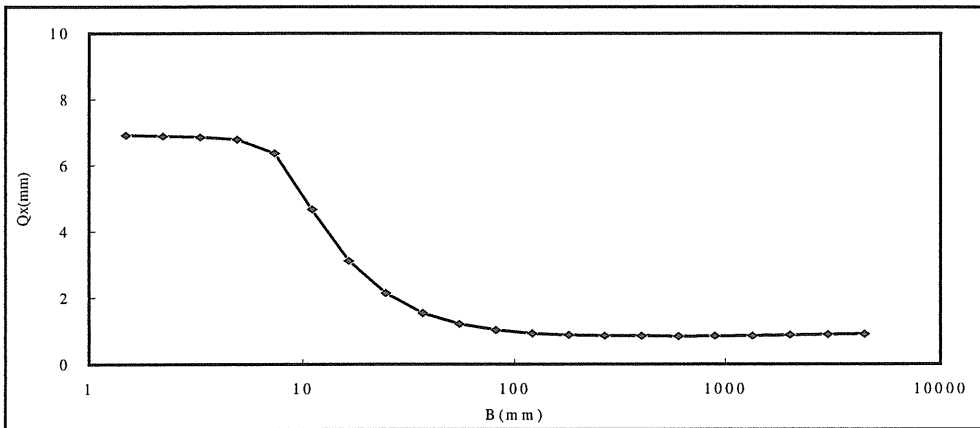
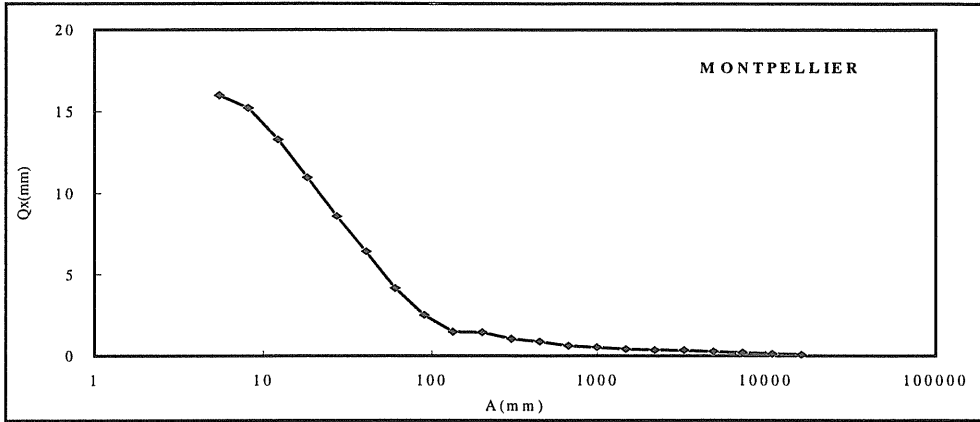


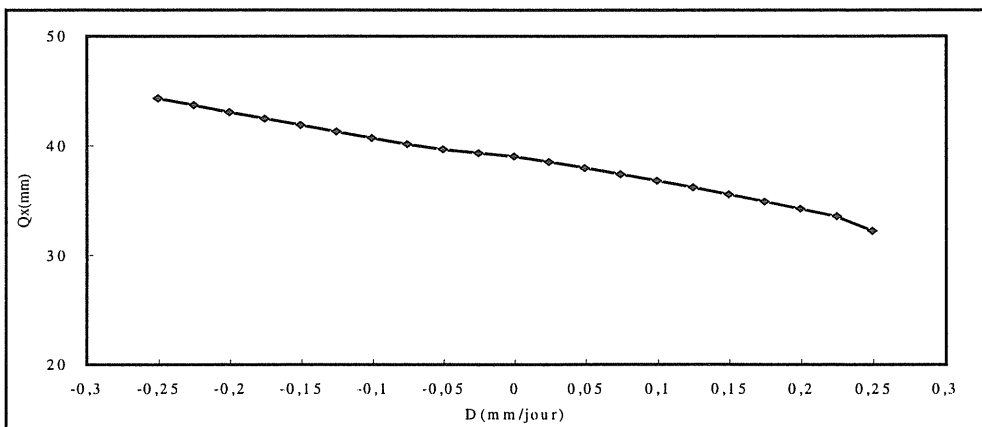
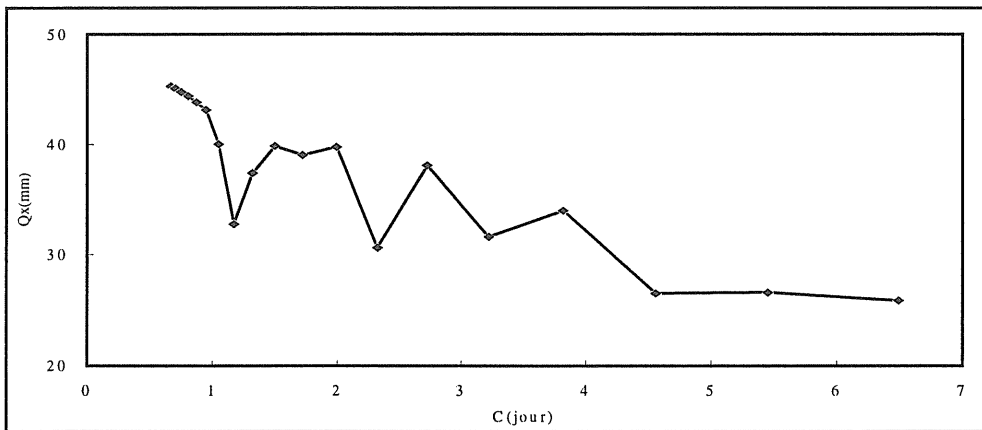
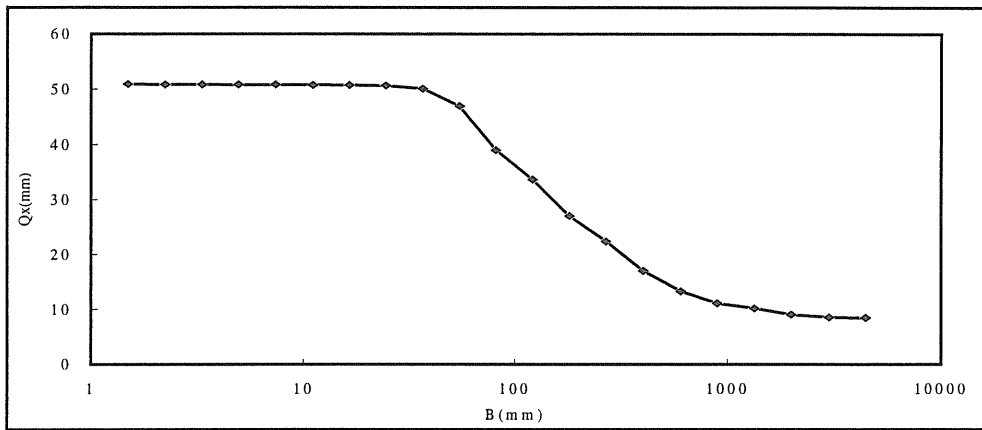
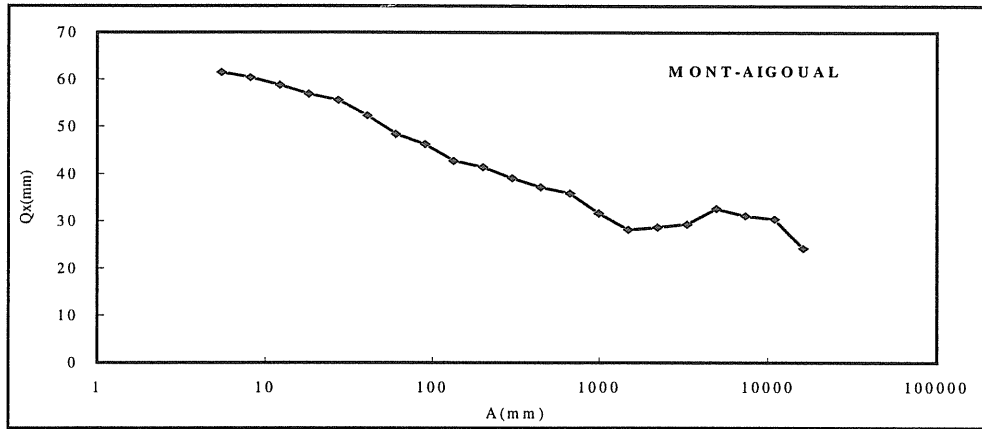


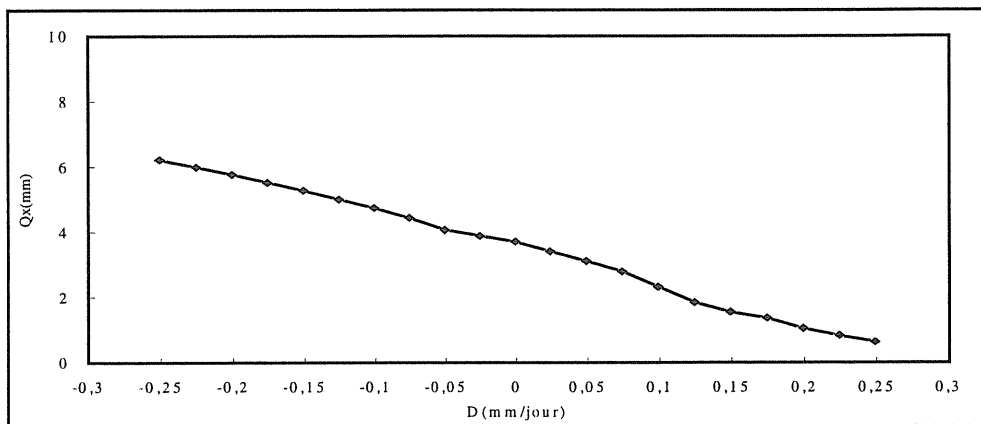
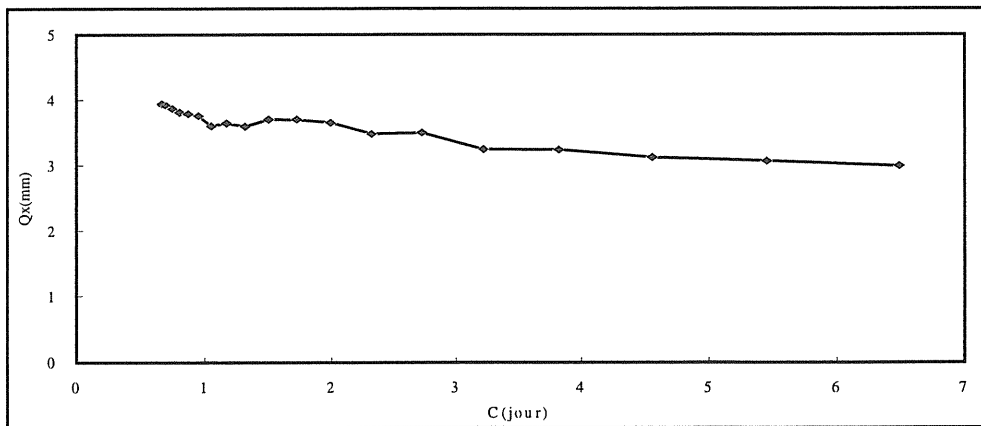
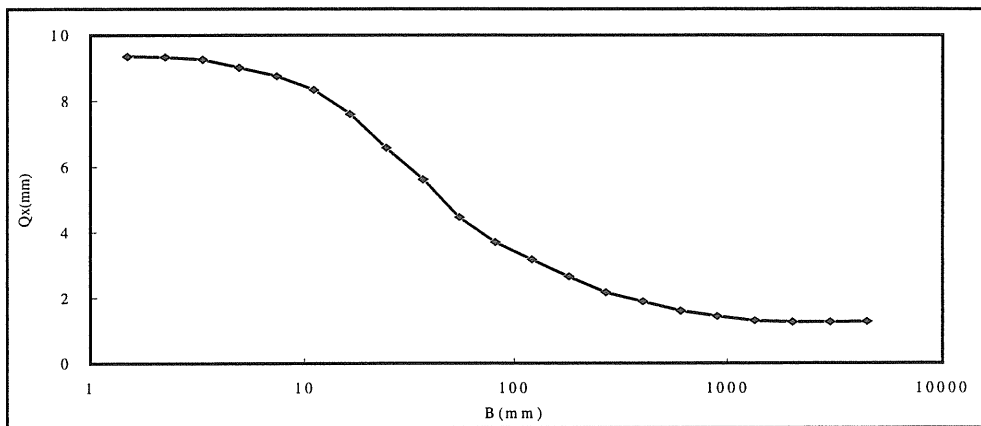
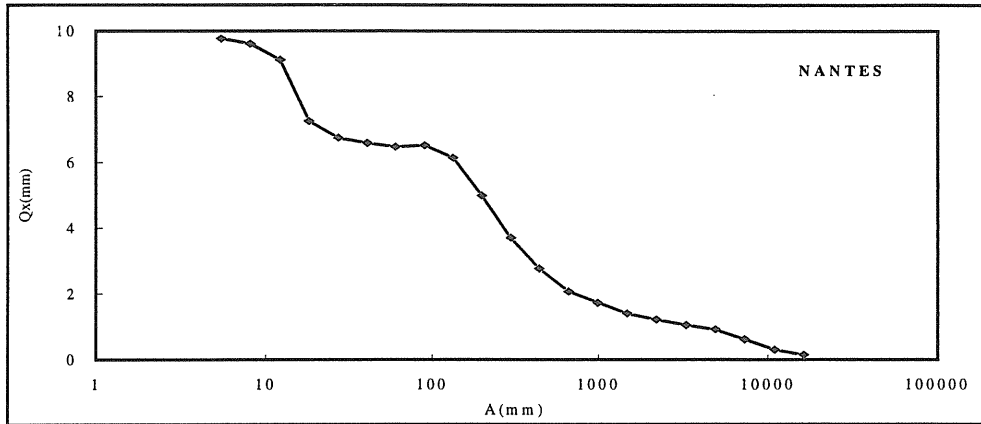


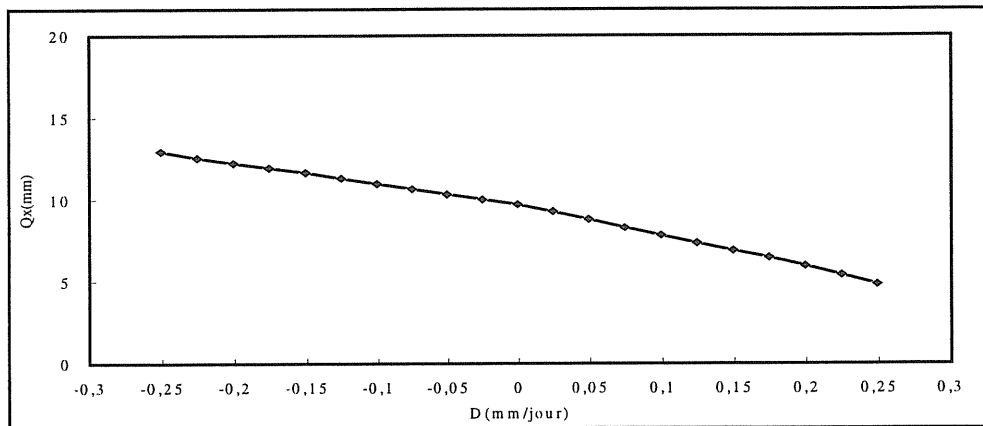
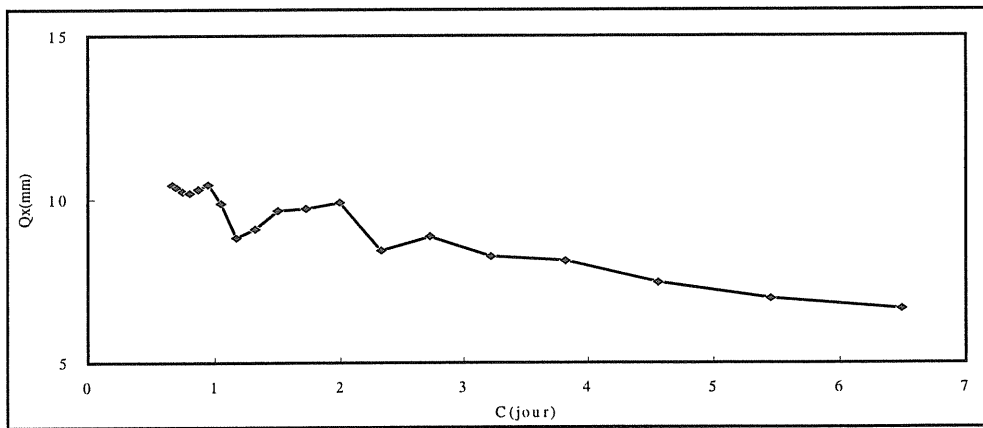
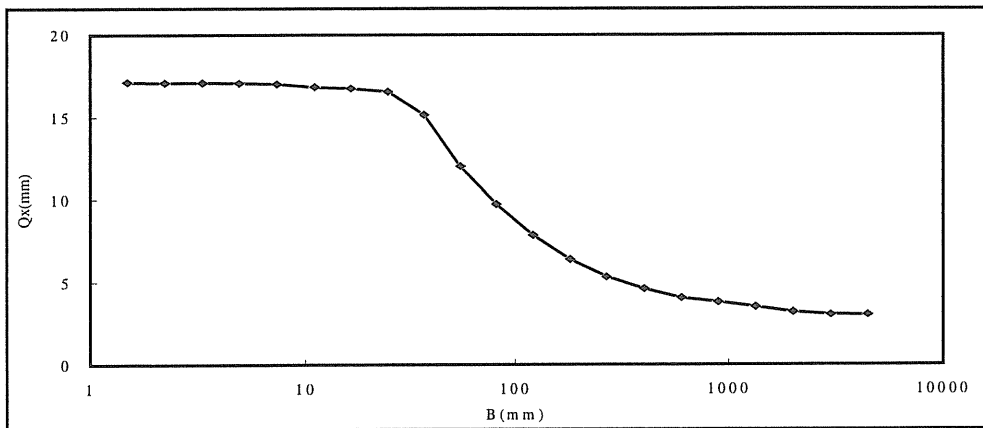
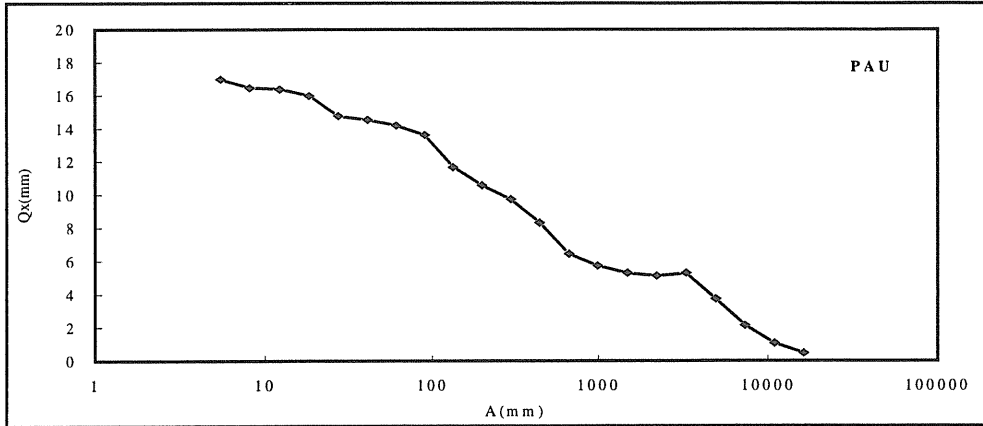


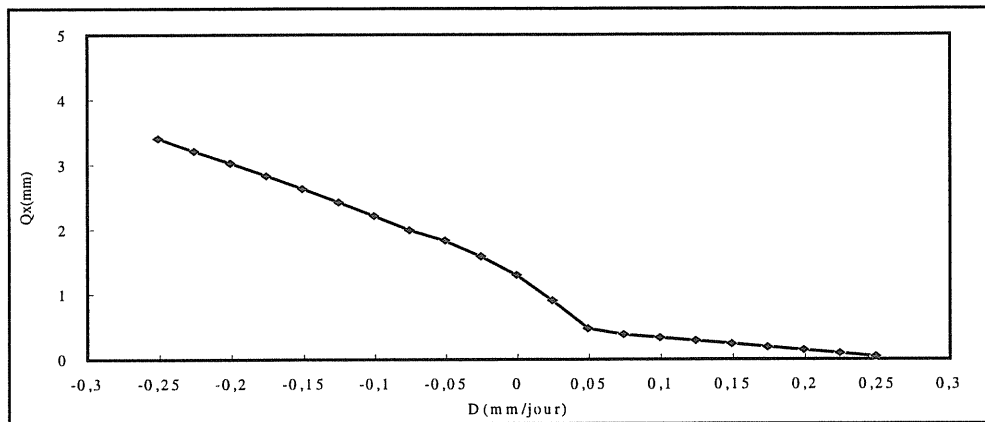
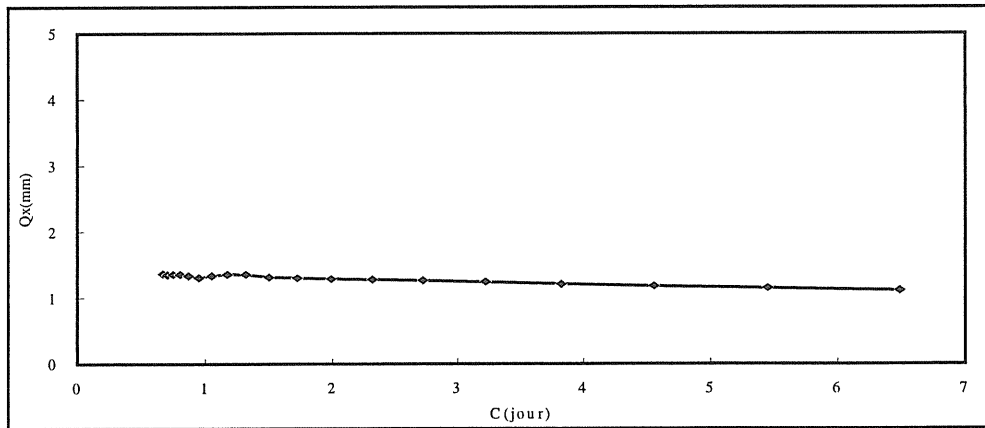
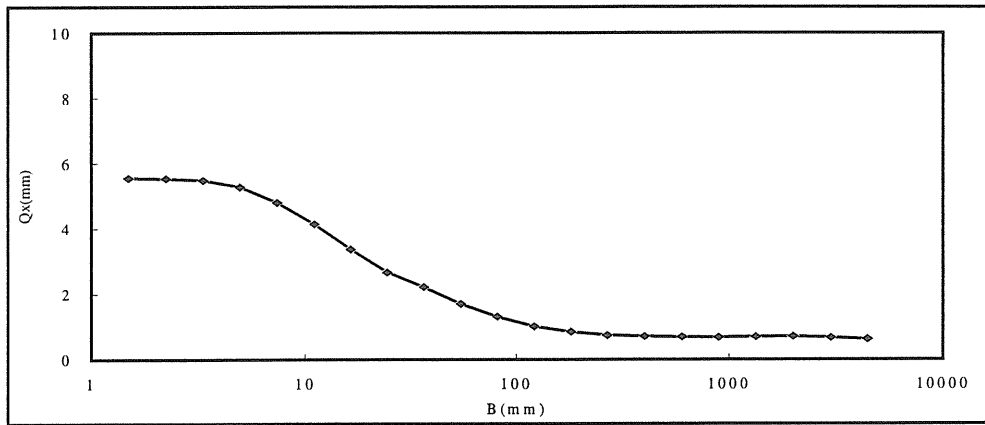
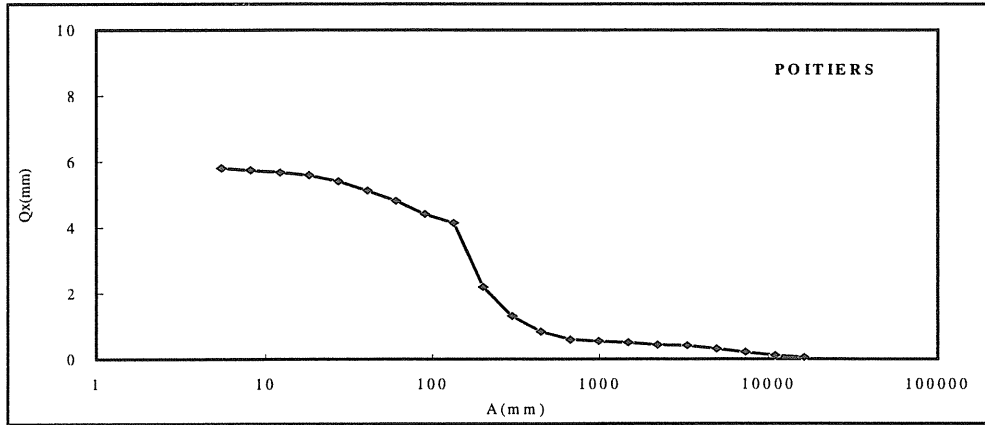


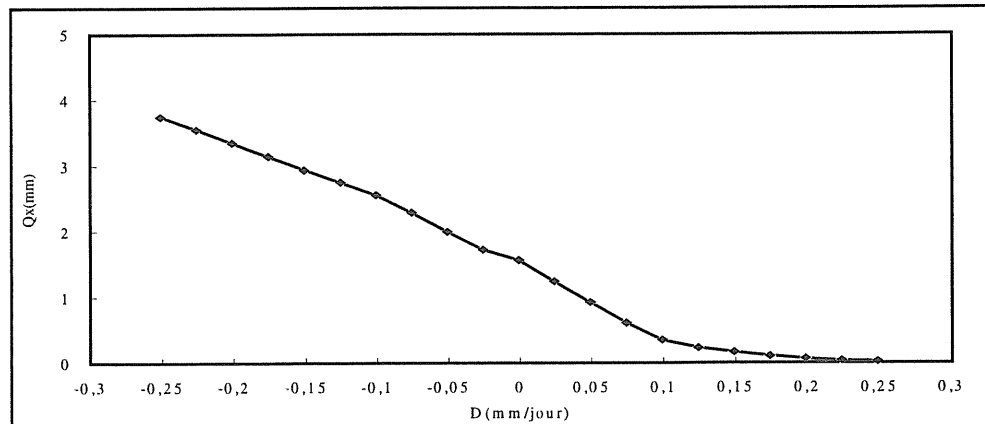
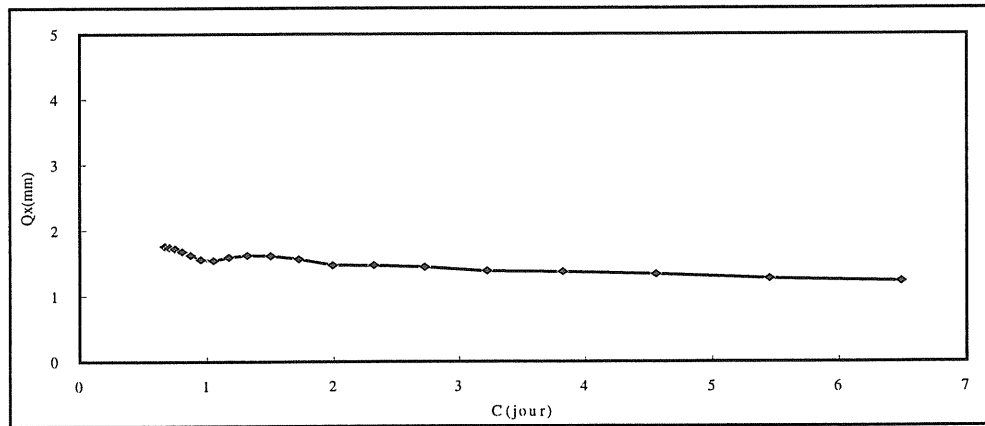
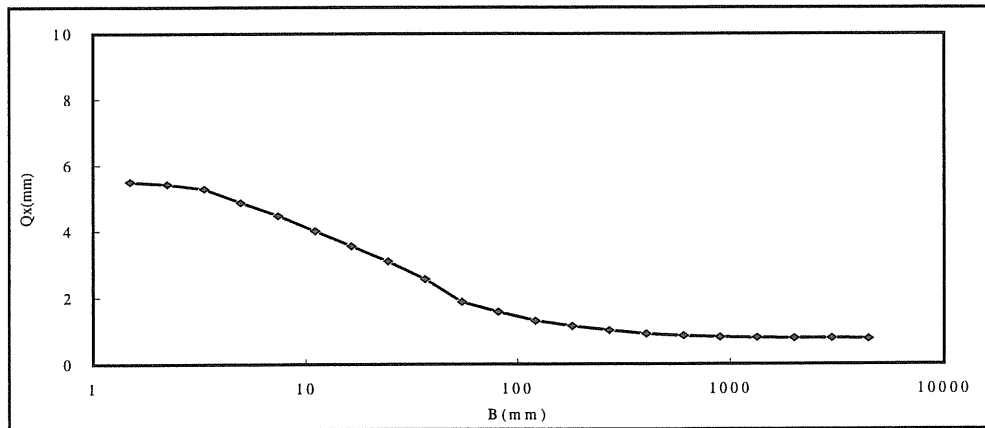
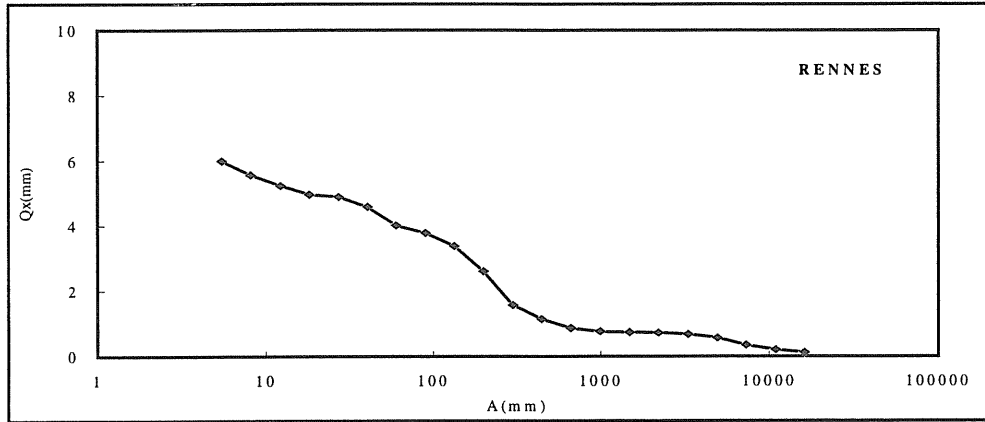


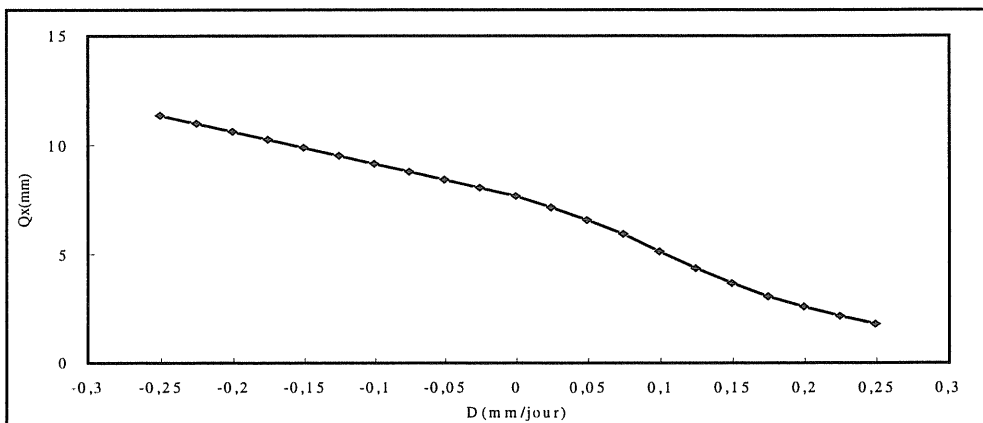
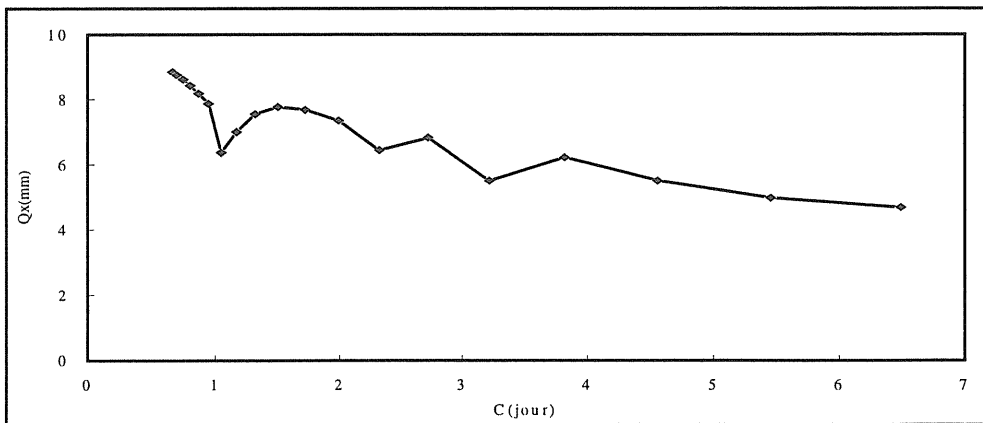
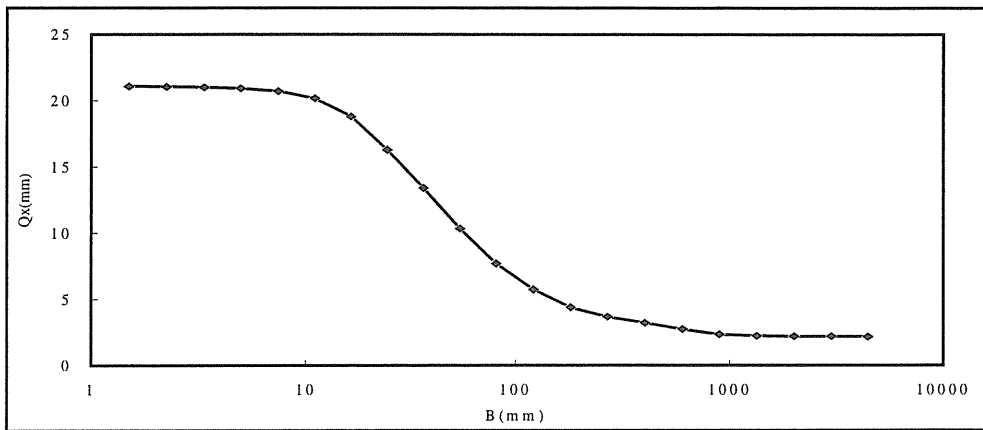
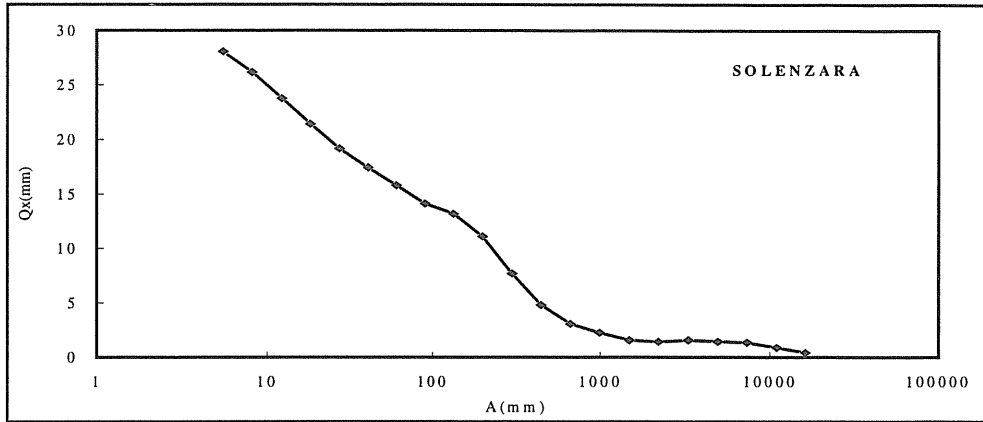


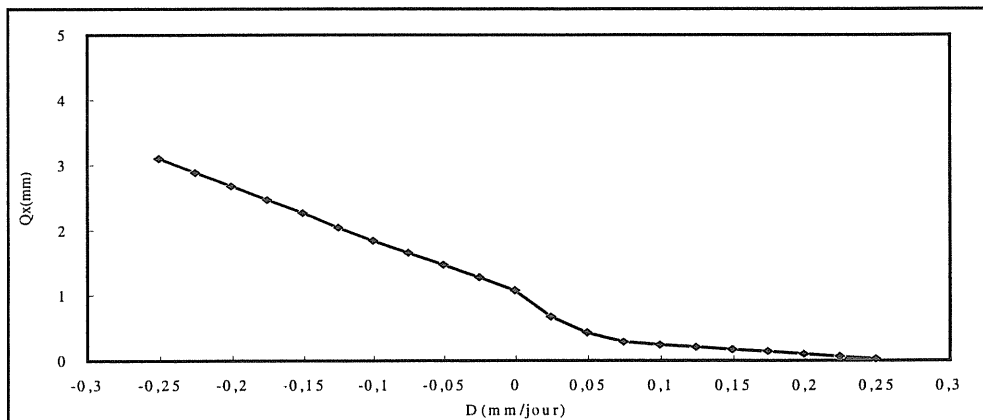
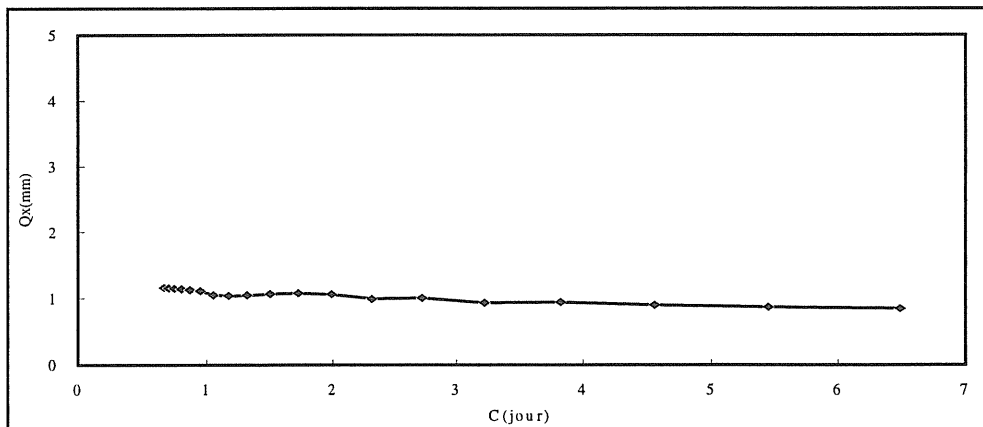
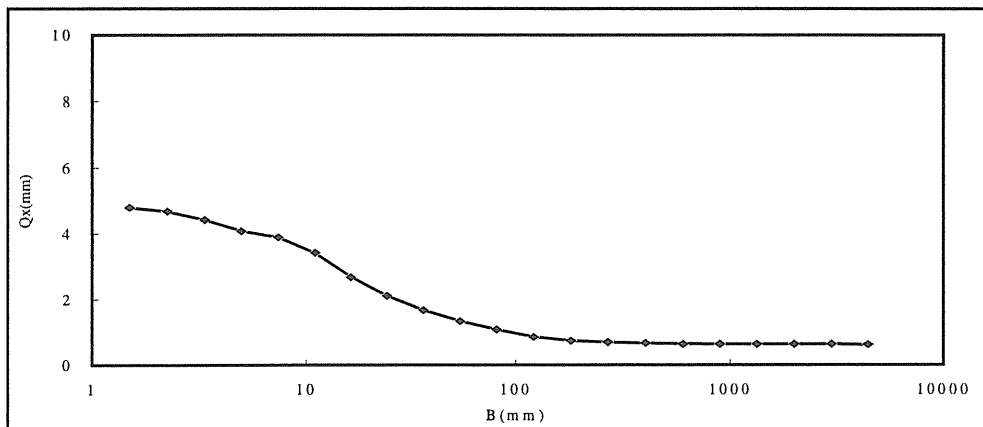
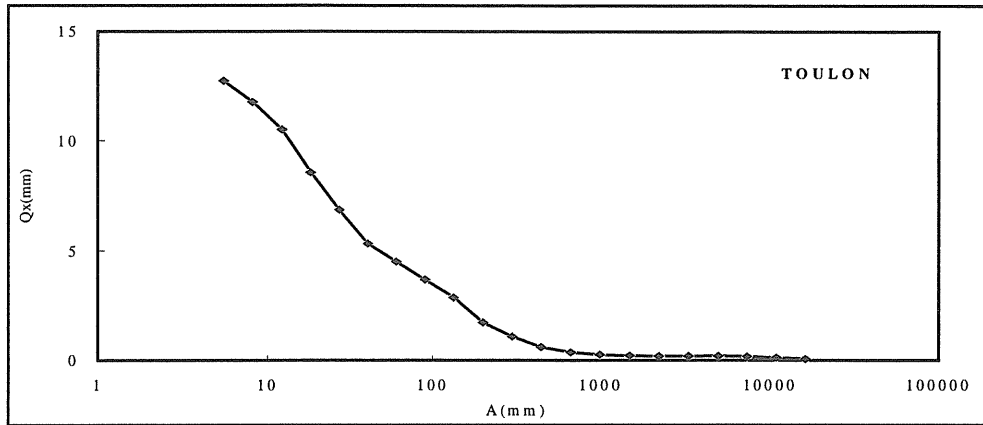


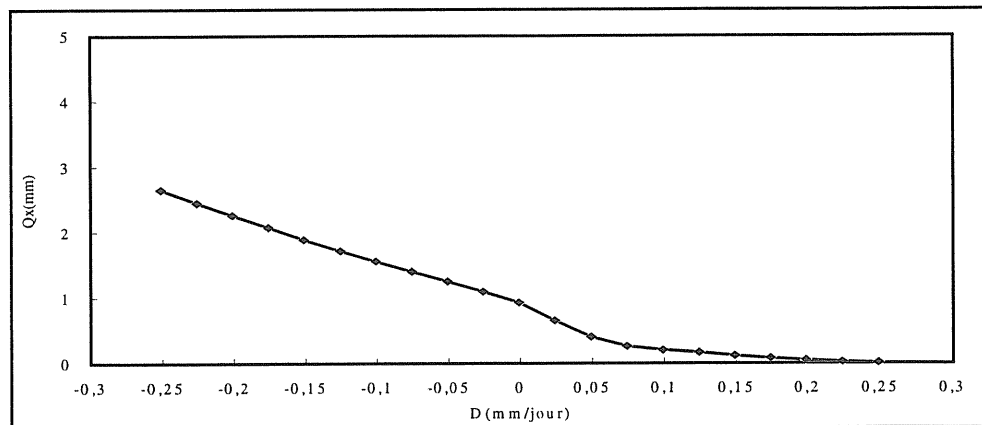
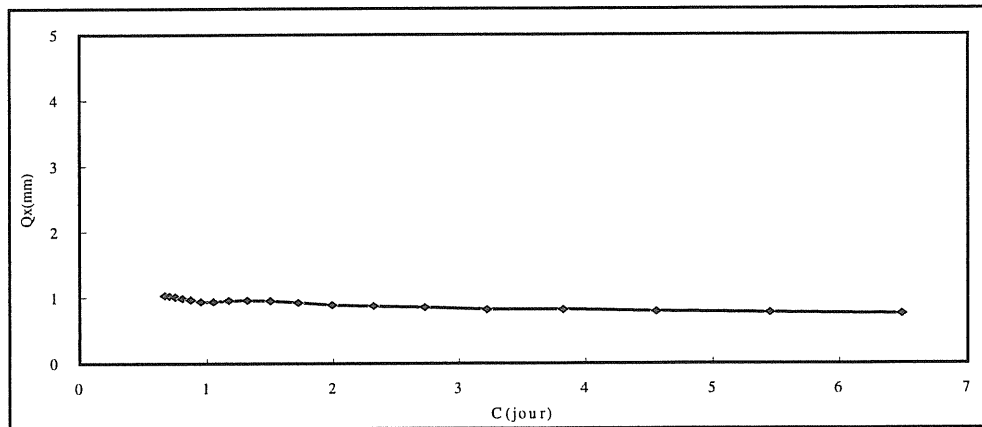
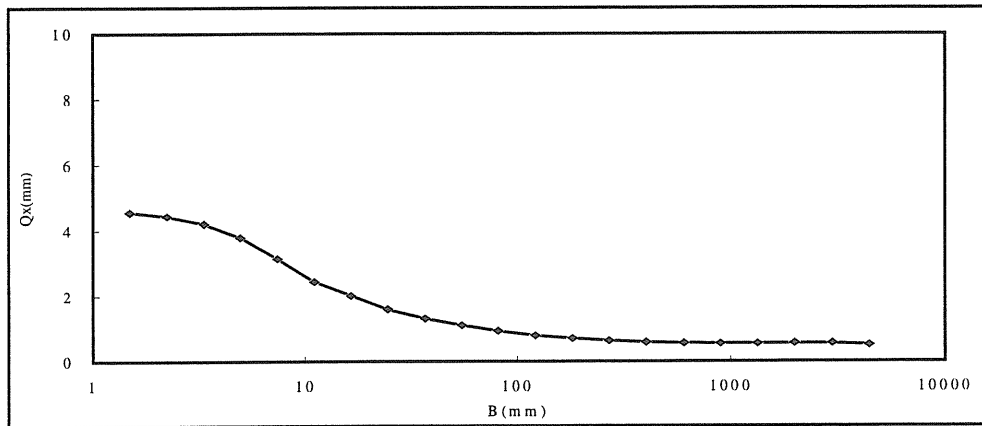
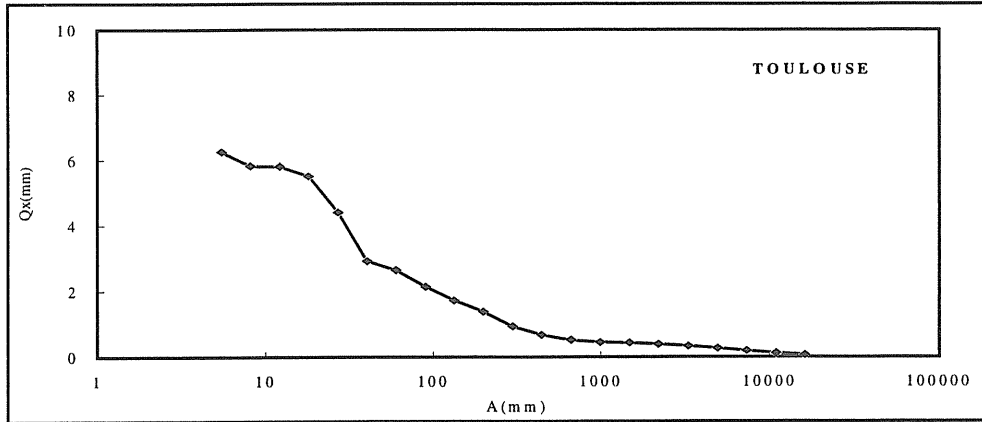




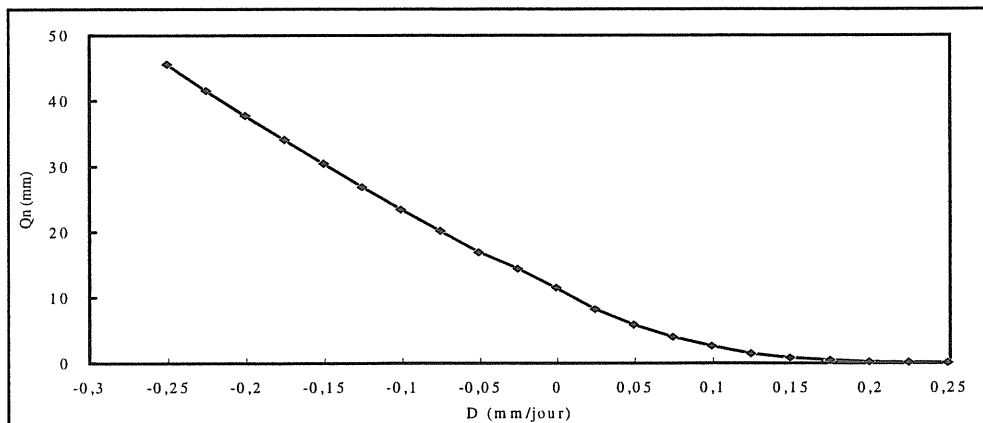
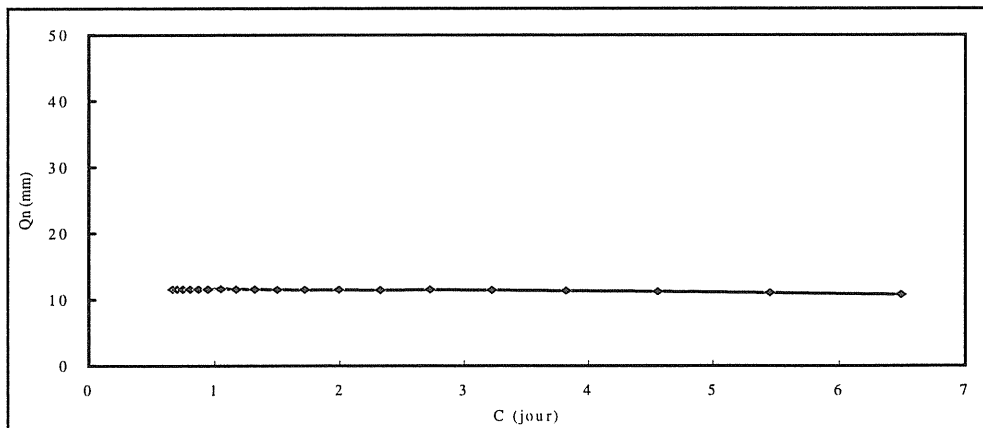
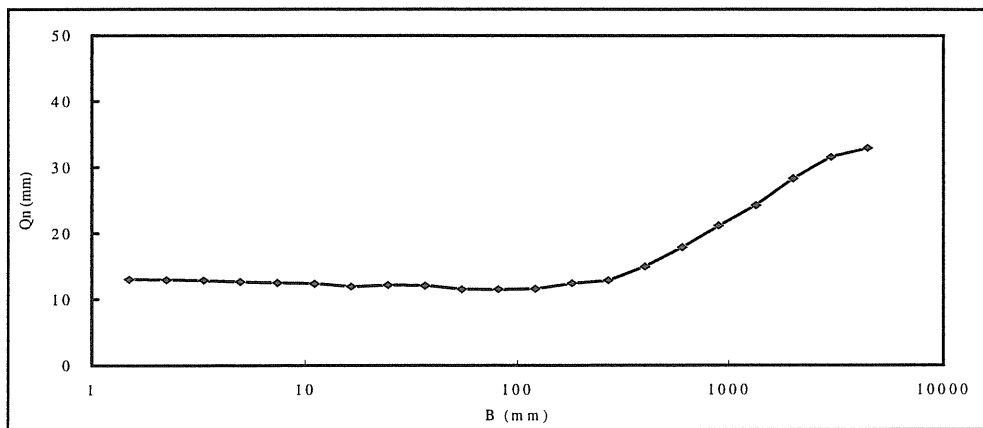
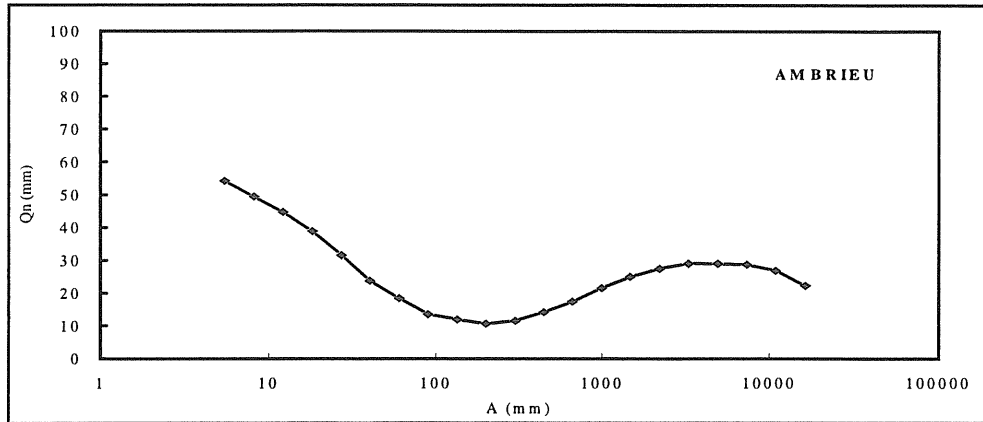


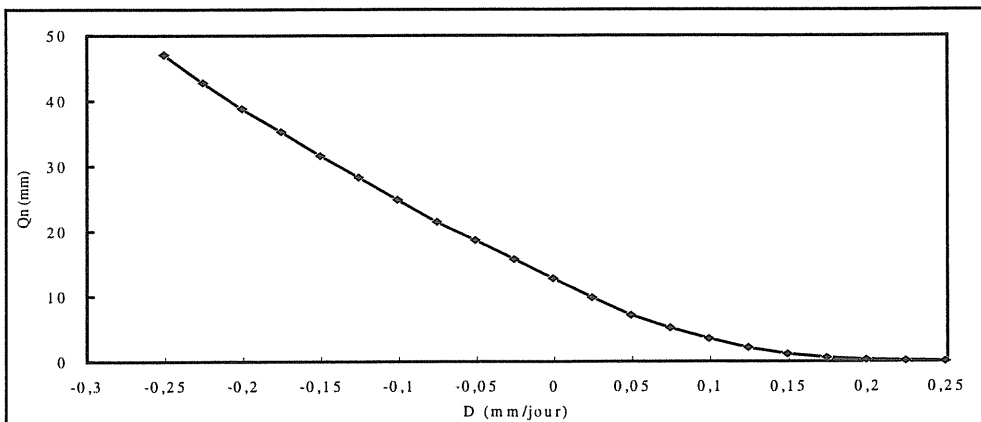
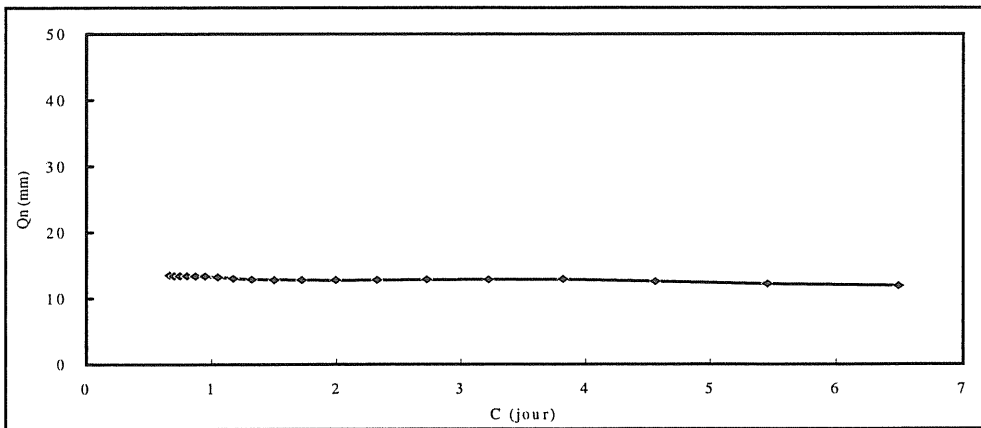
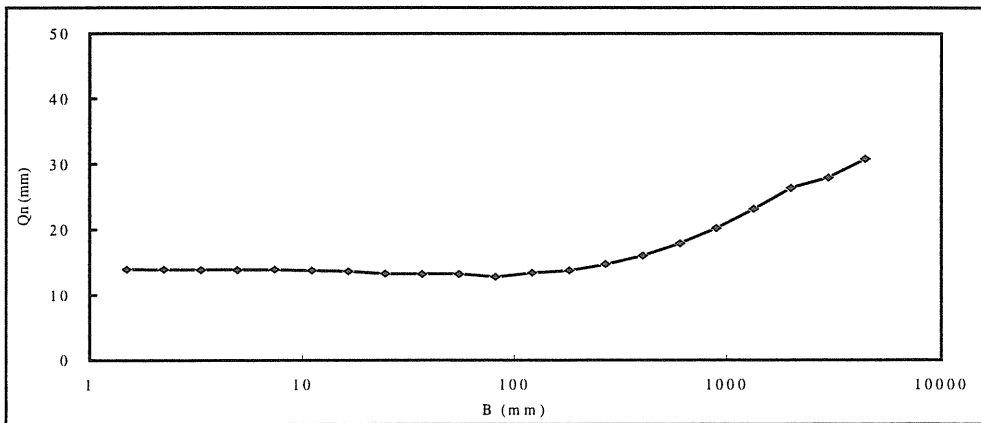
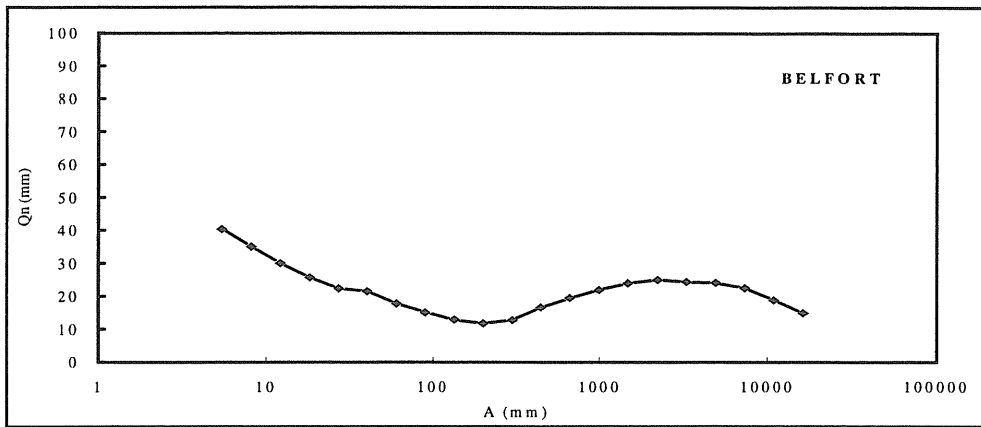


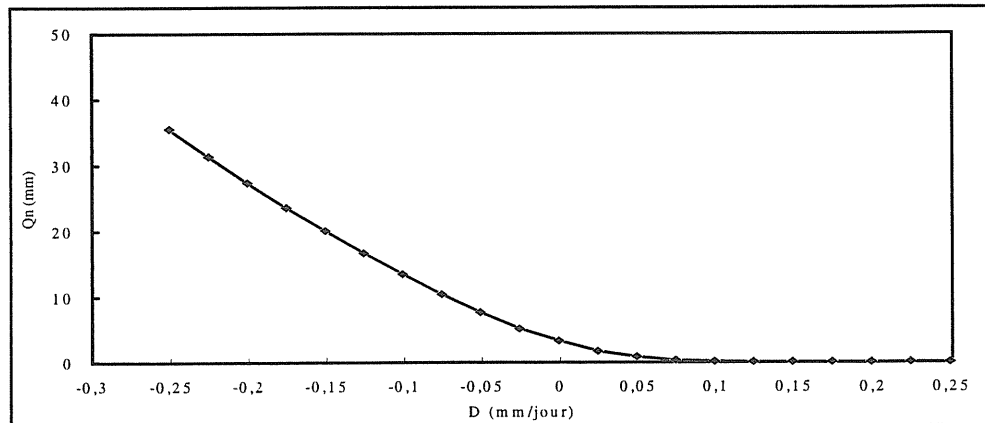
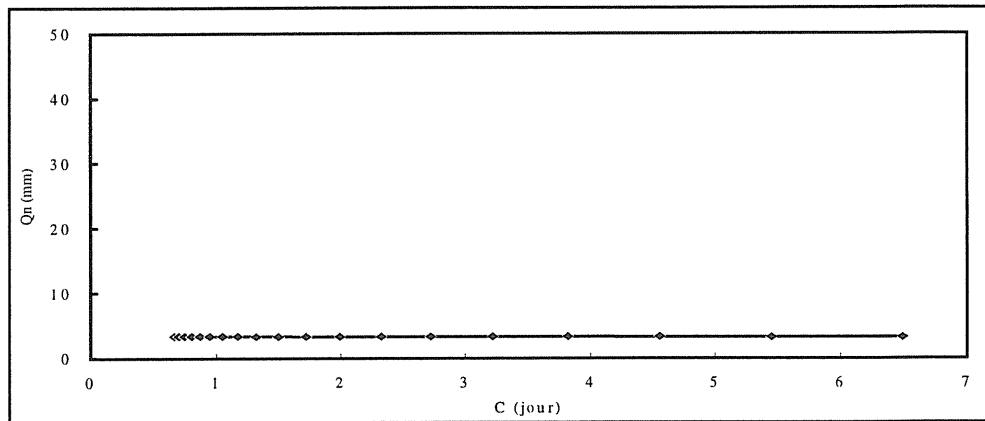
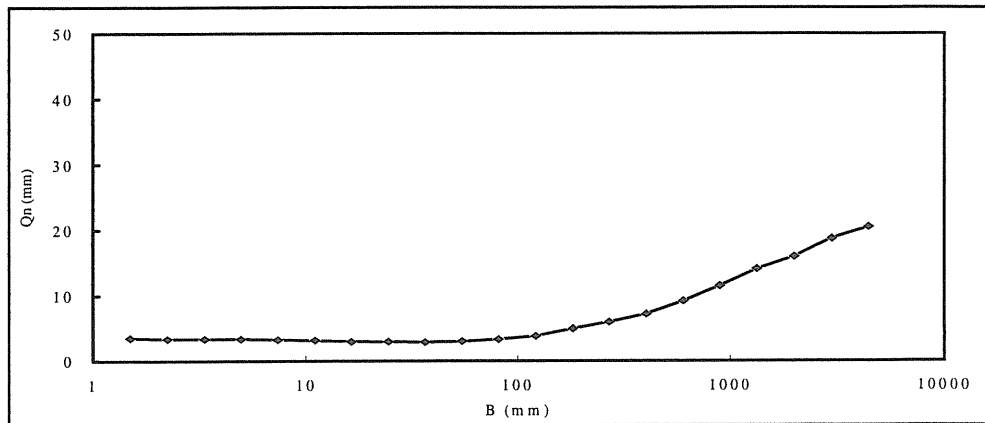
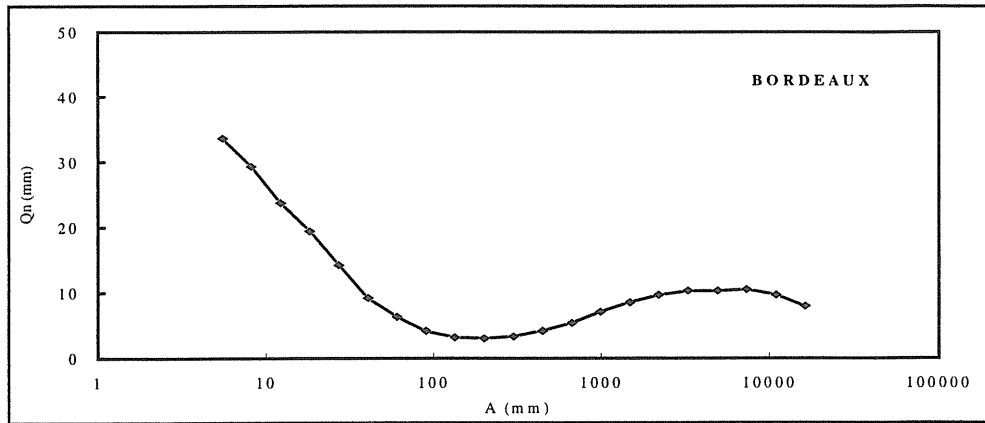


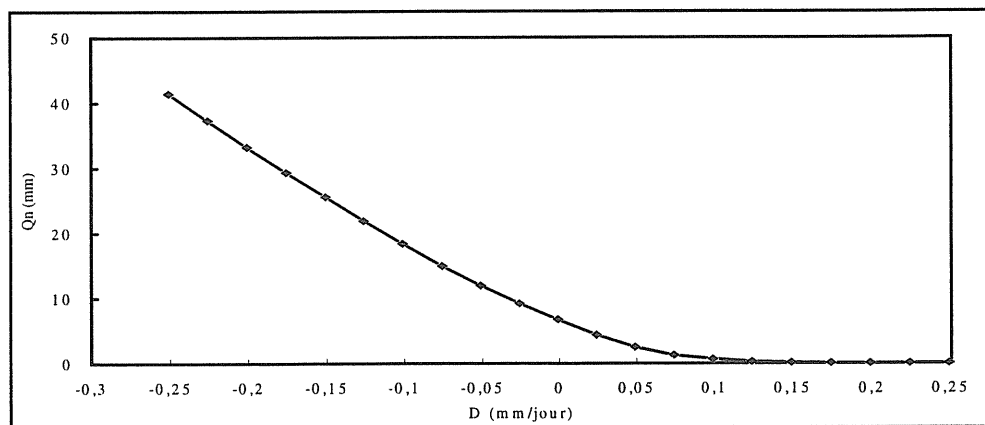
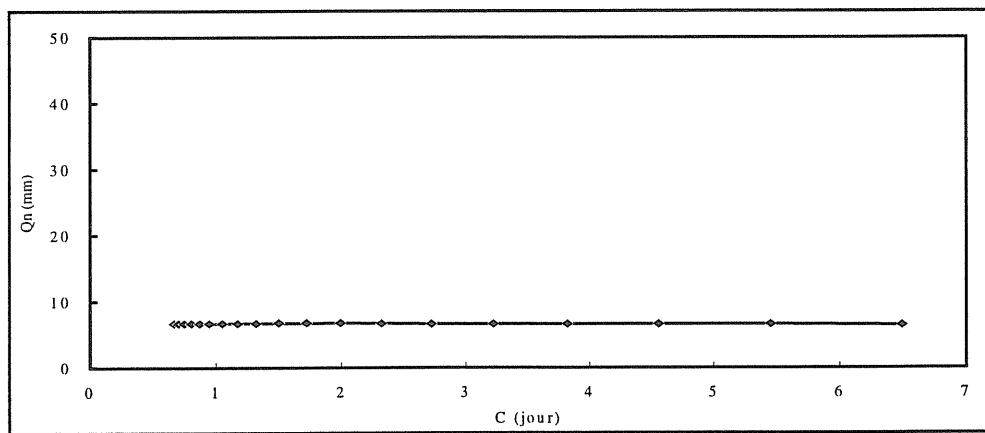
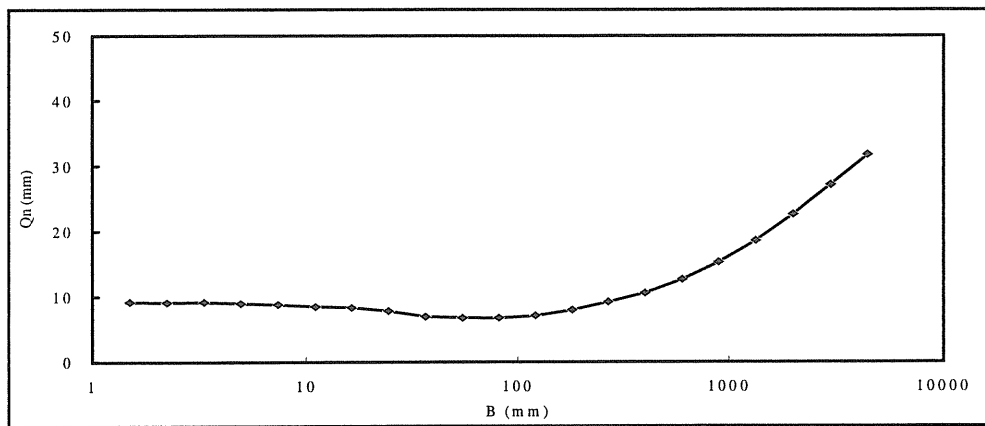
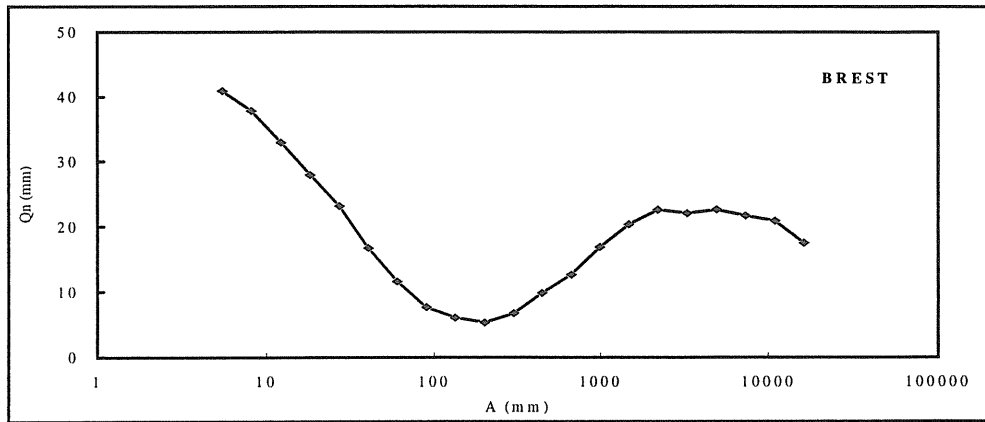


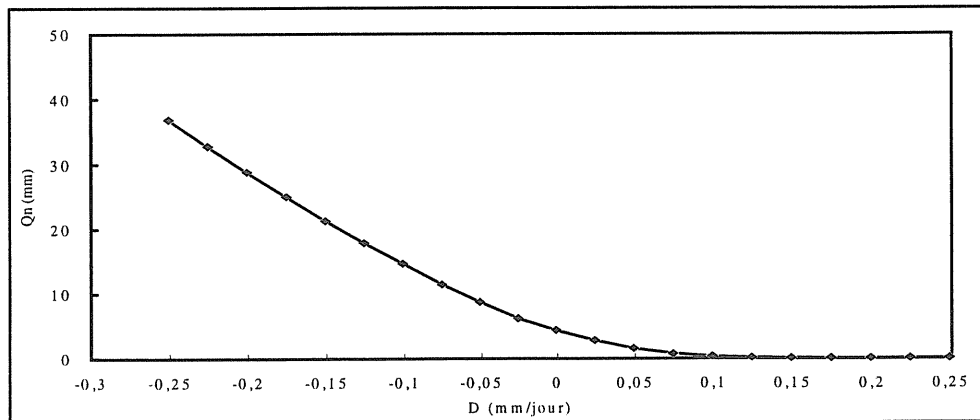
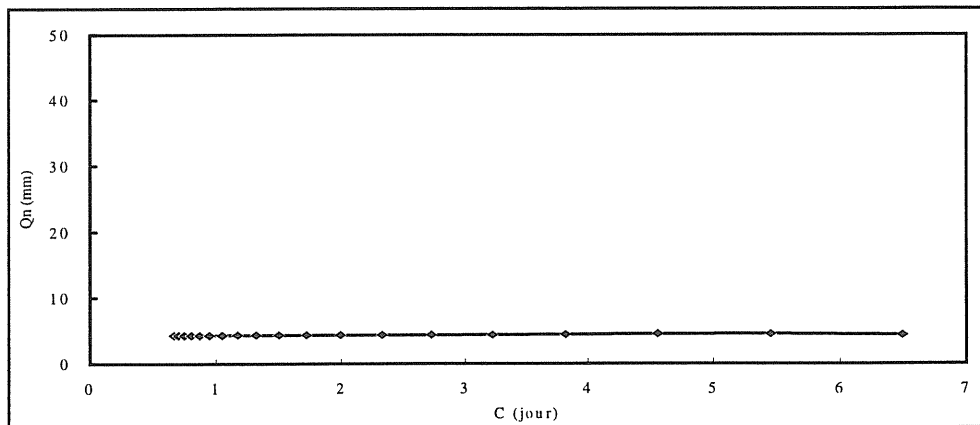
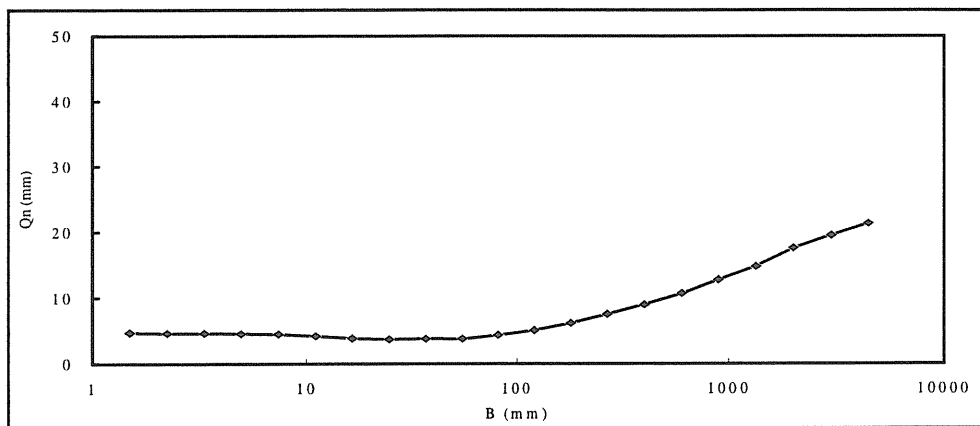
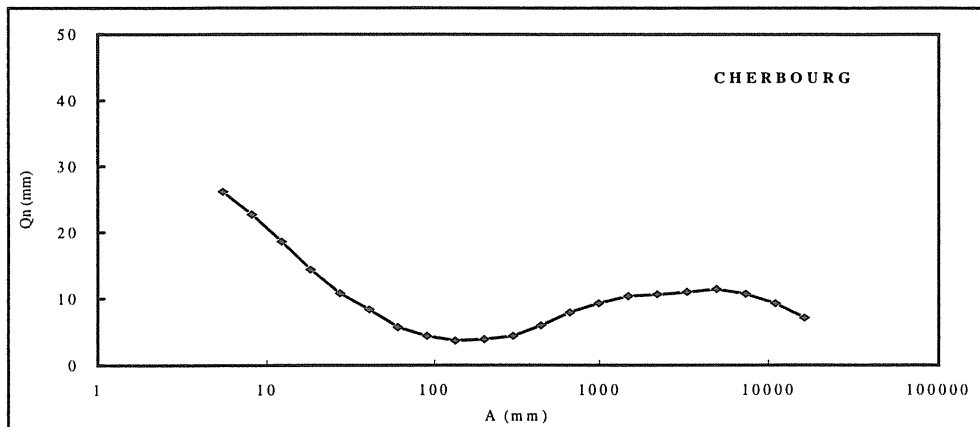
Annexe (I.3): Influence des paramètres sur les étiages.

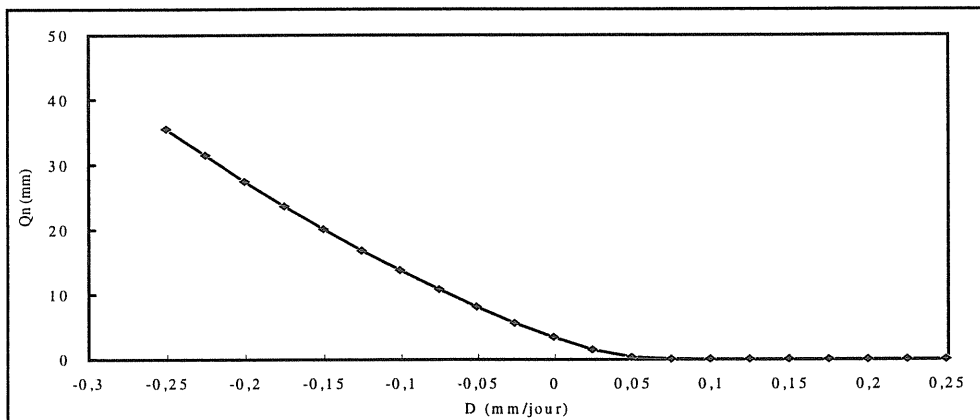
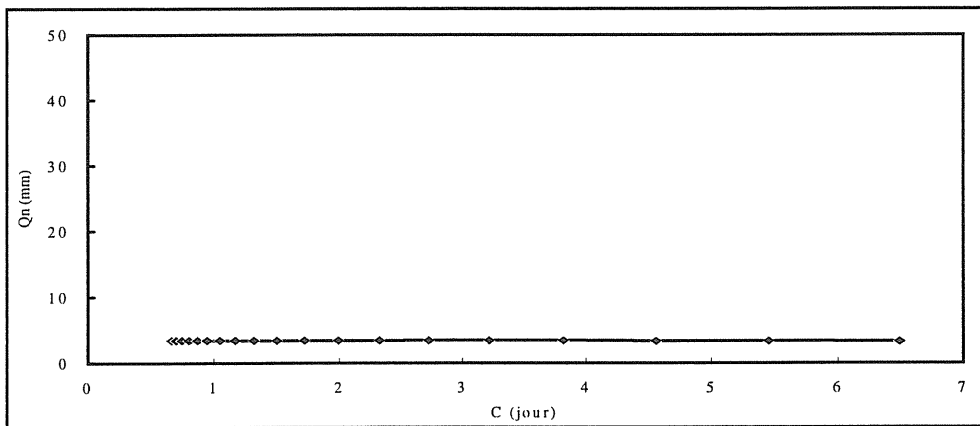
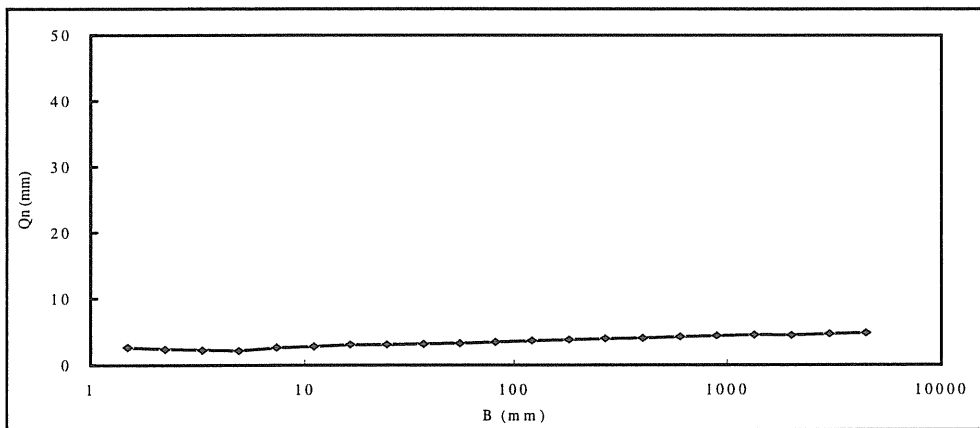
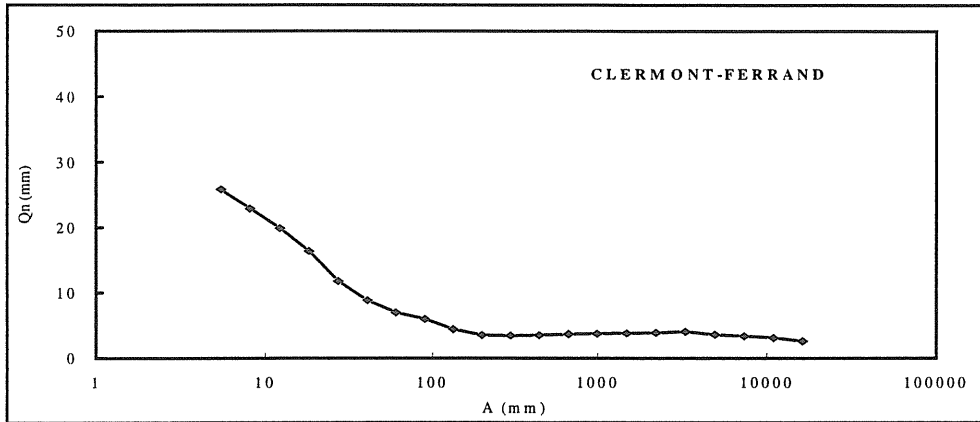


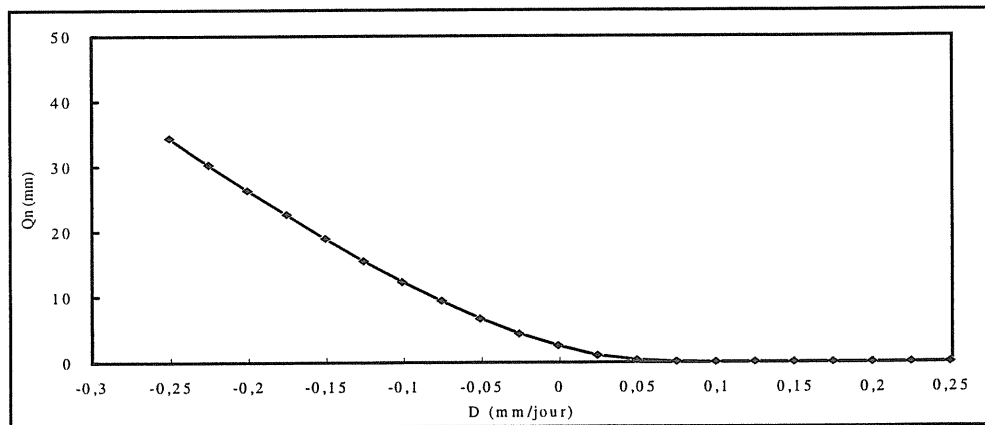
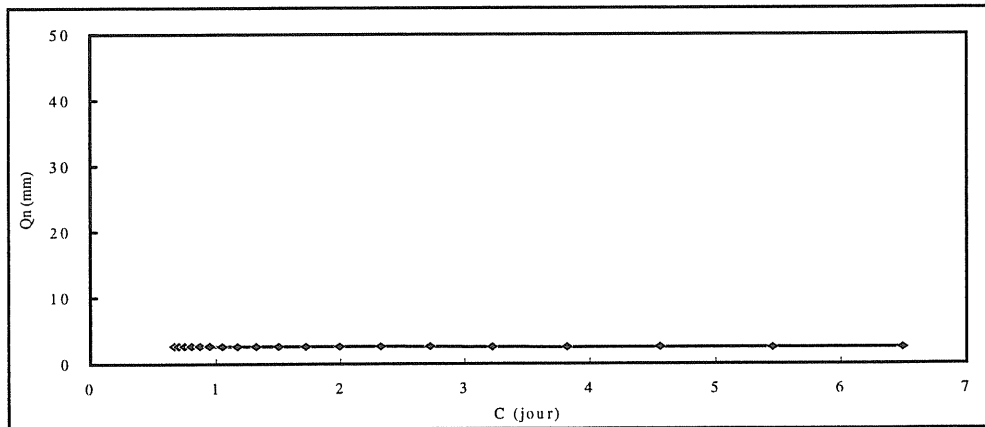
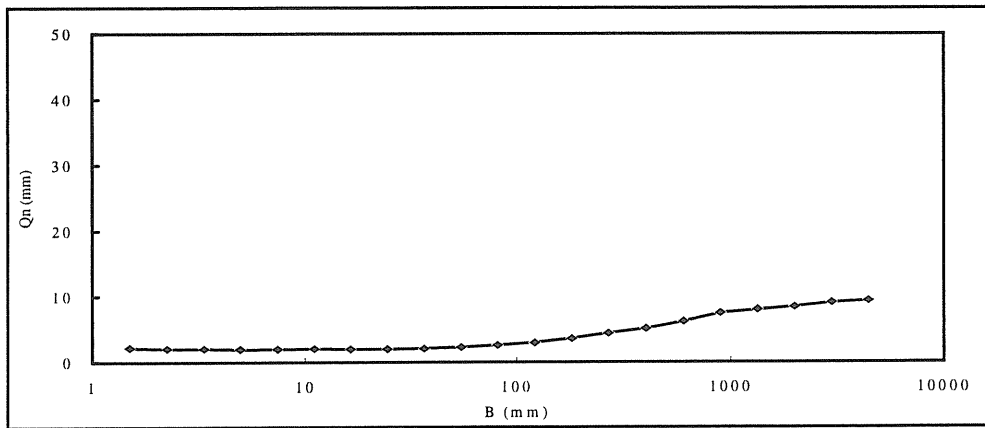
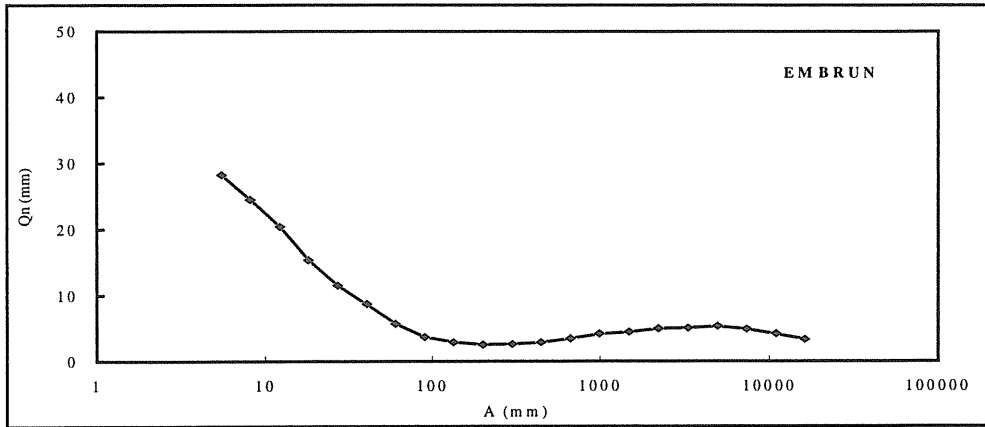


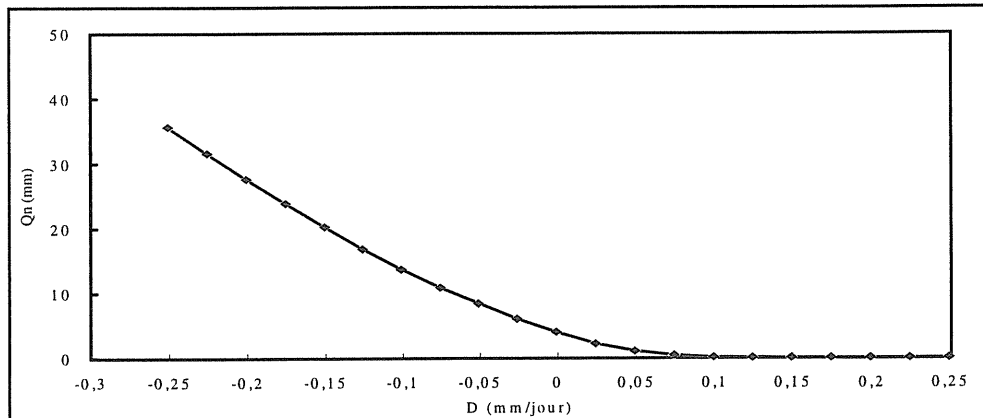
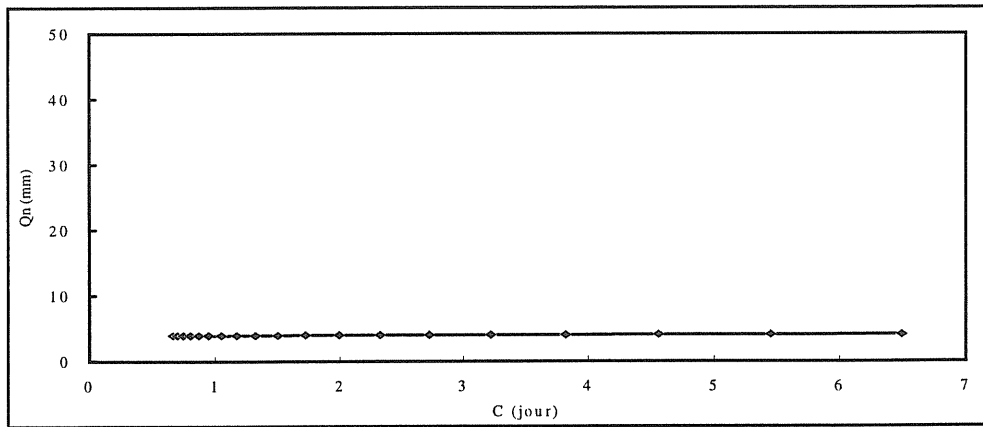
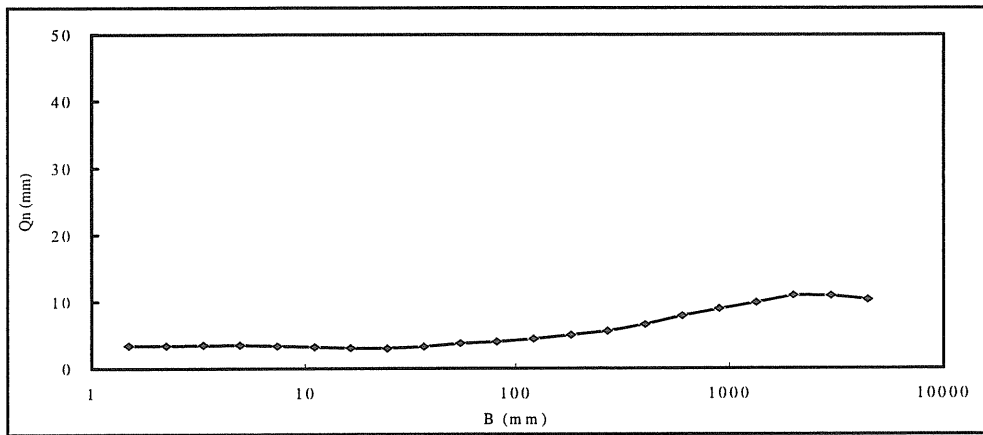
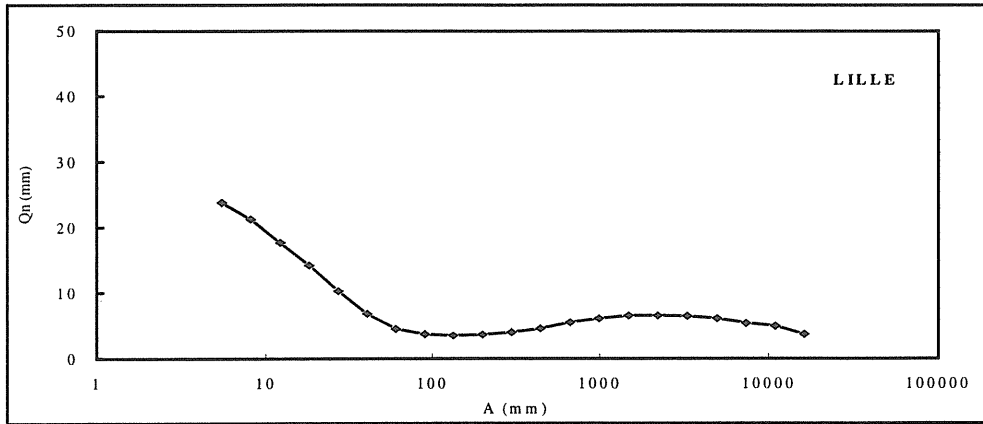


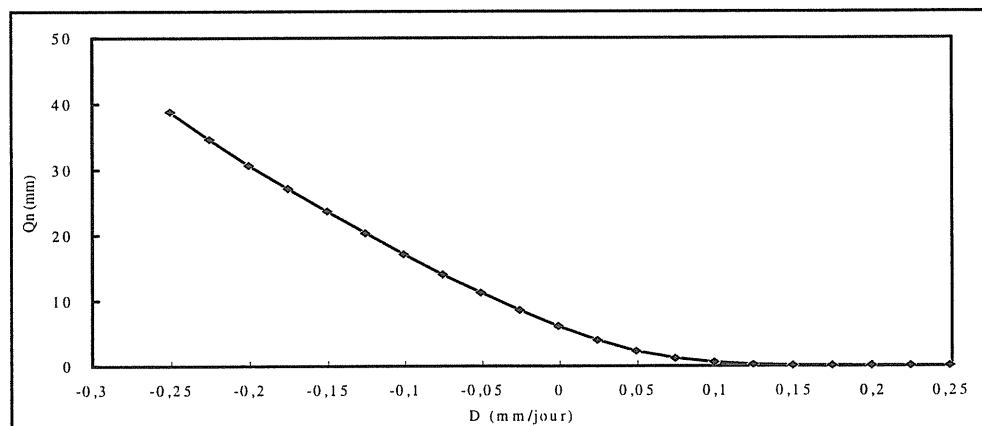
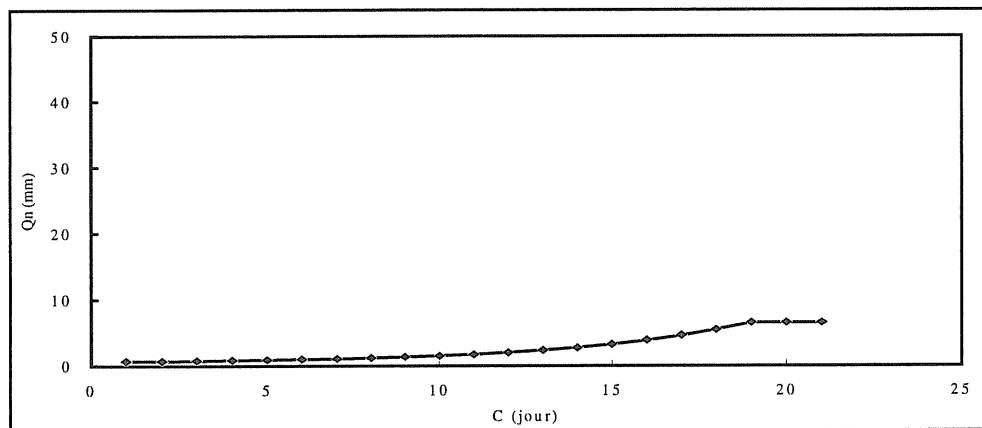
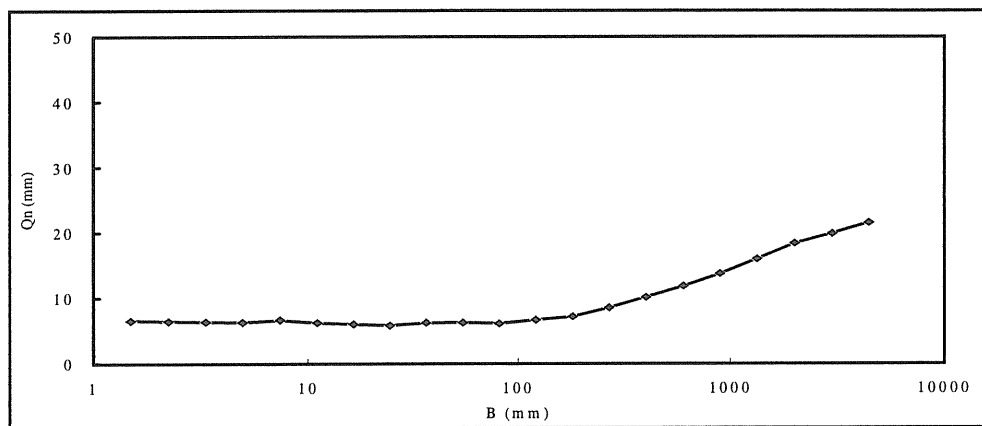
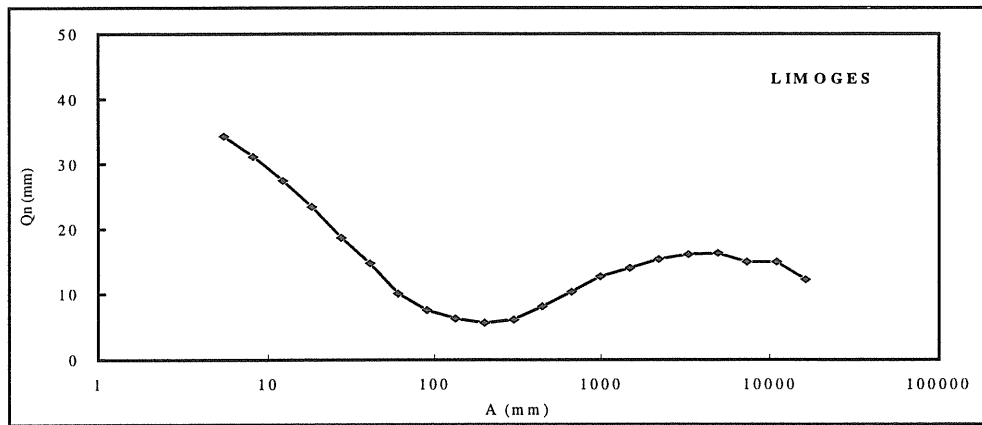


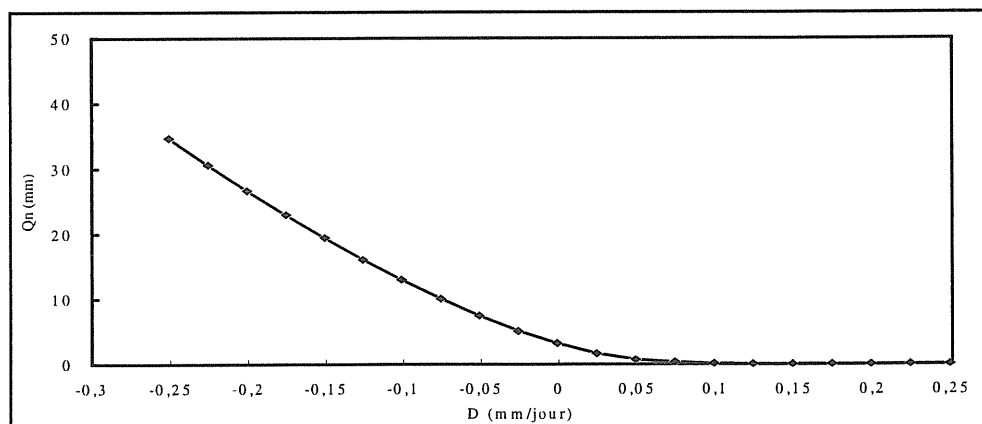
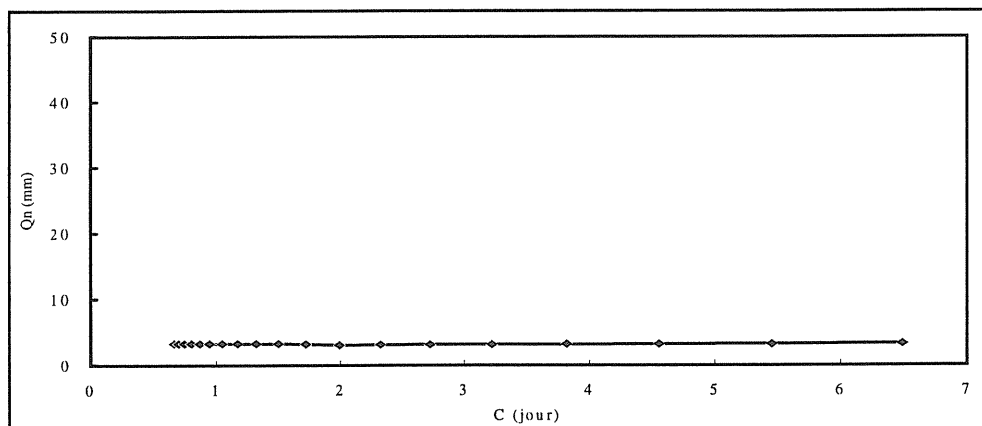
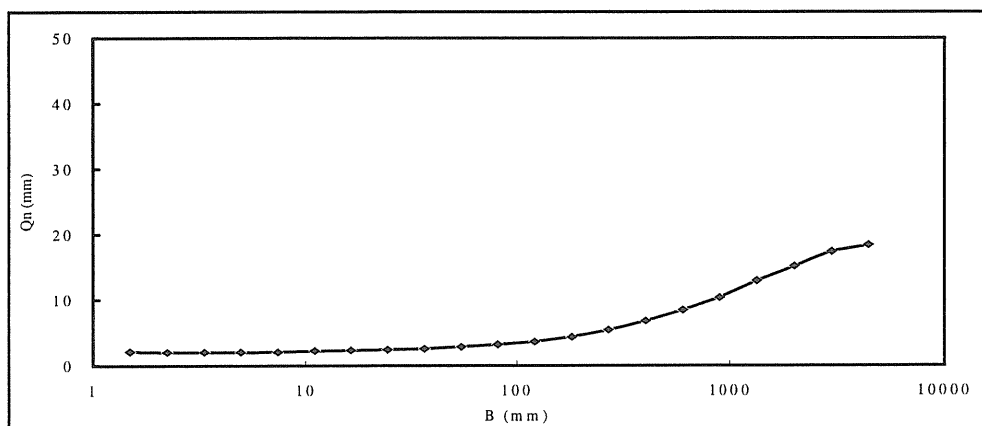
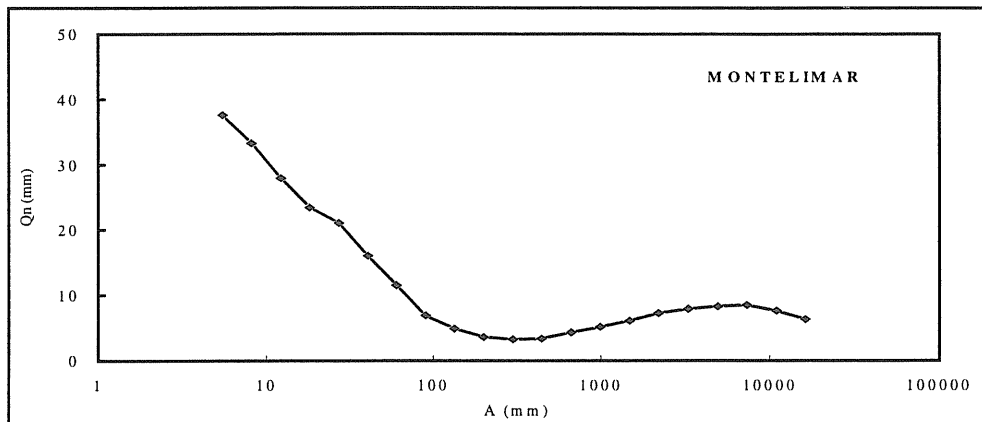


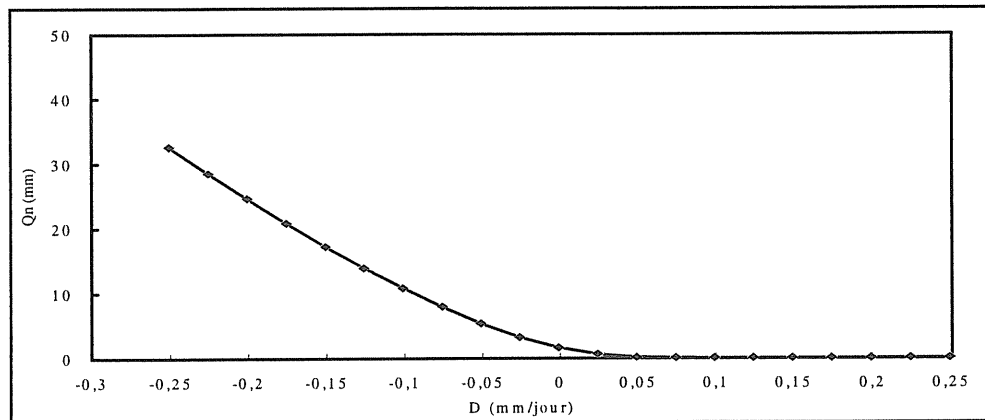
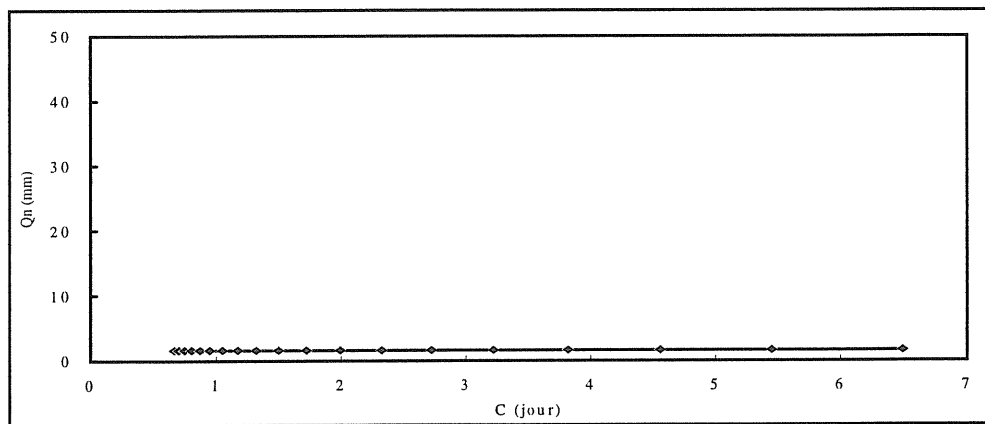
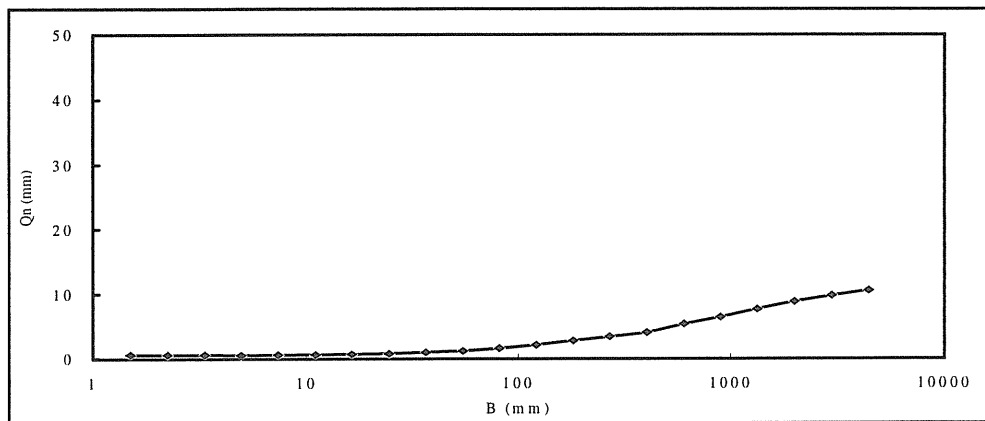
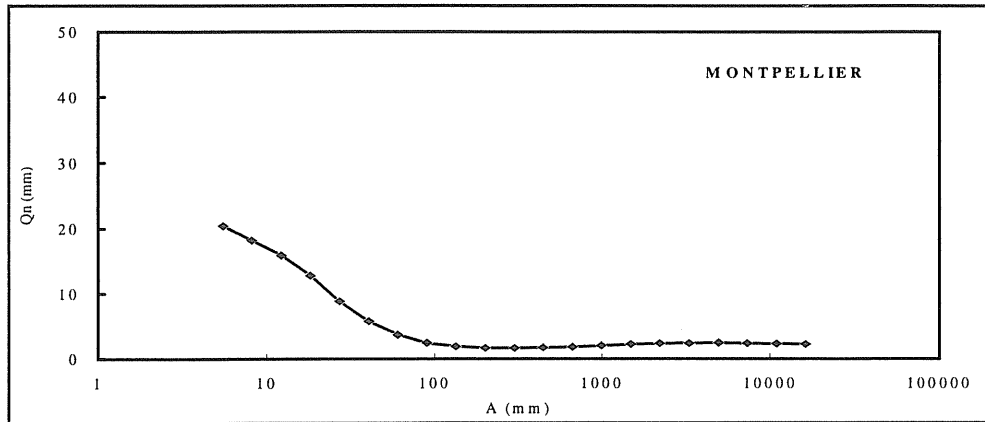


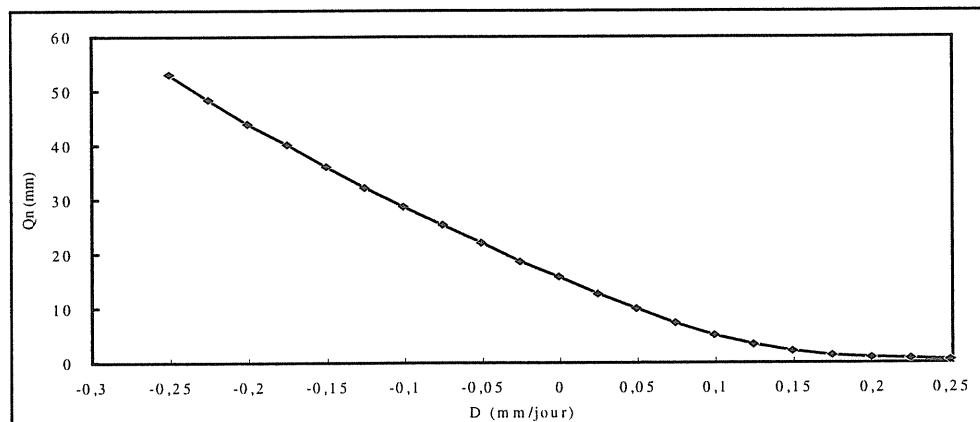
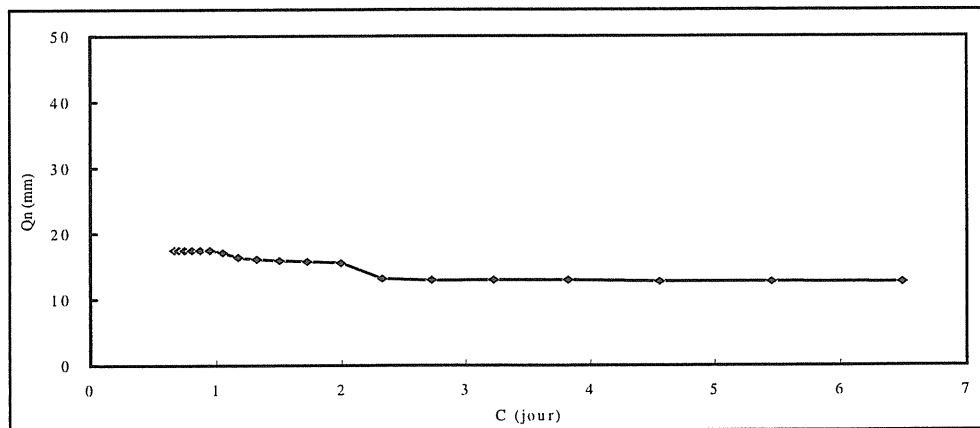
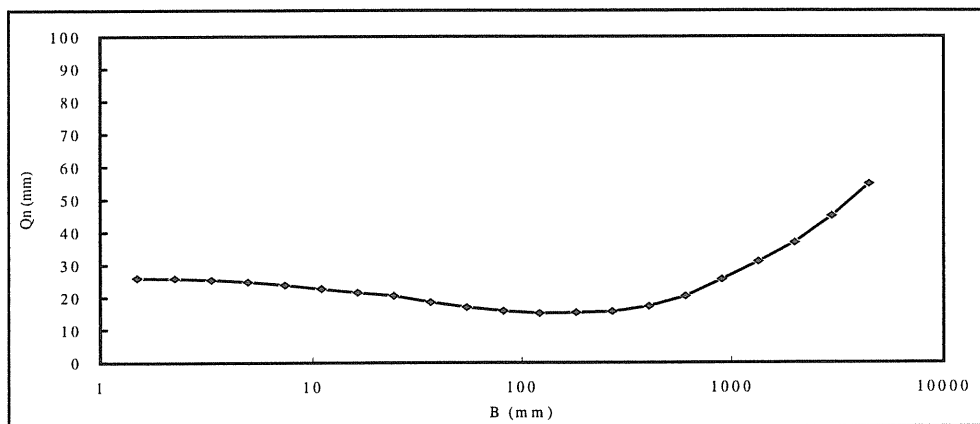
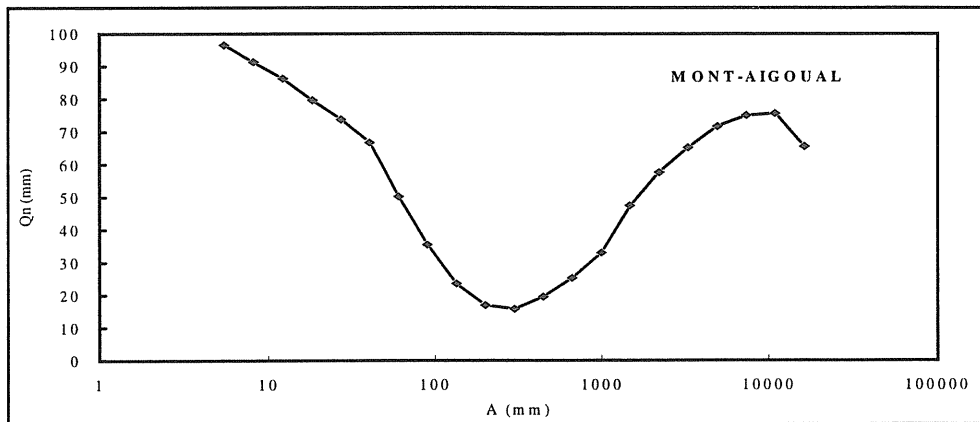


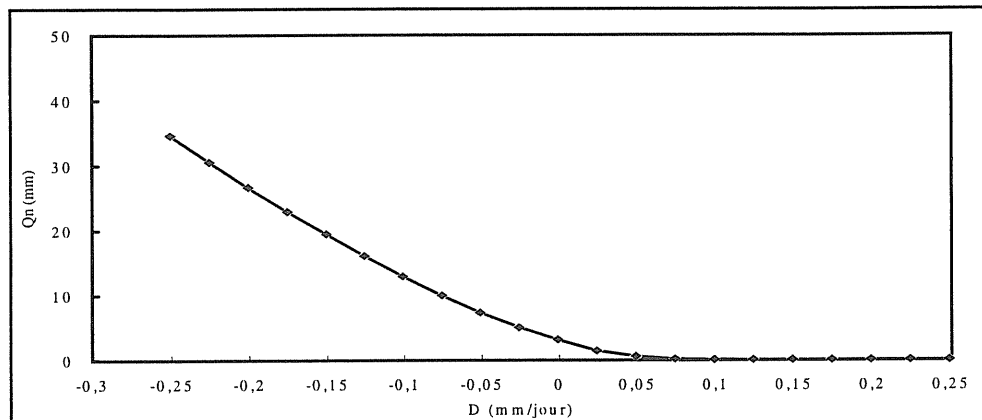
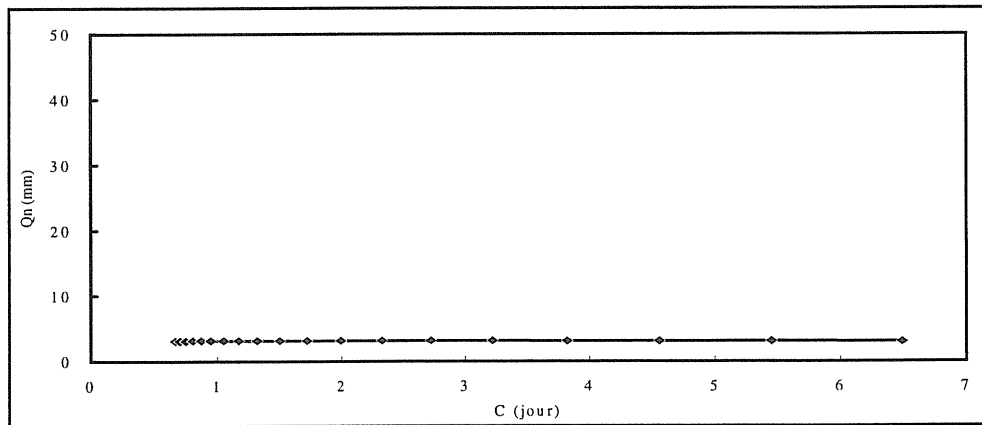
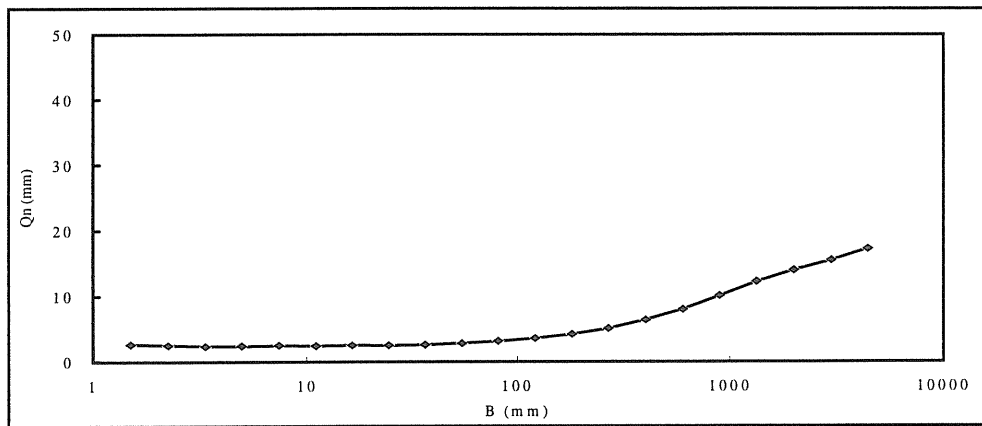
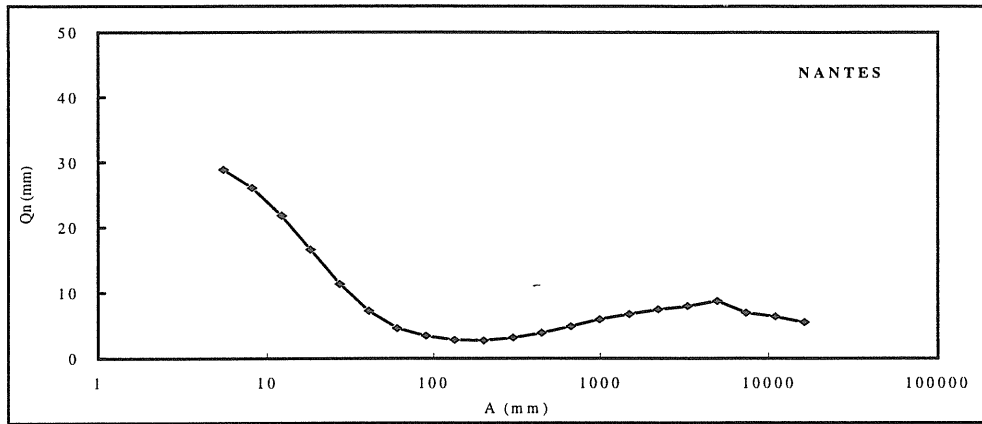


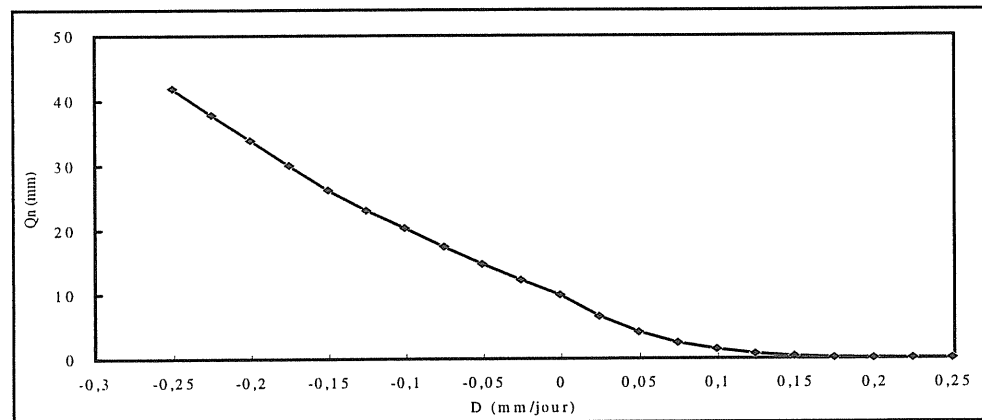
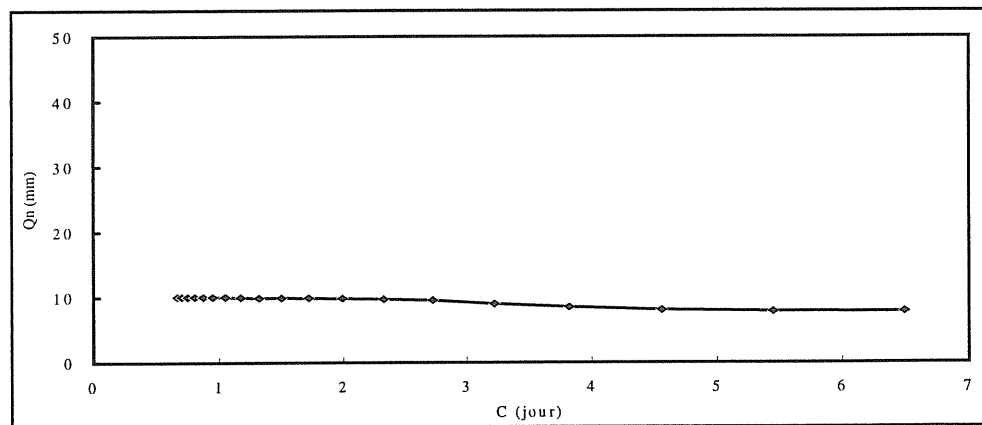
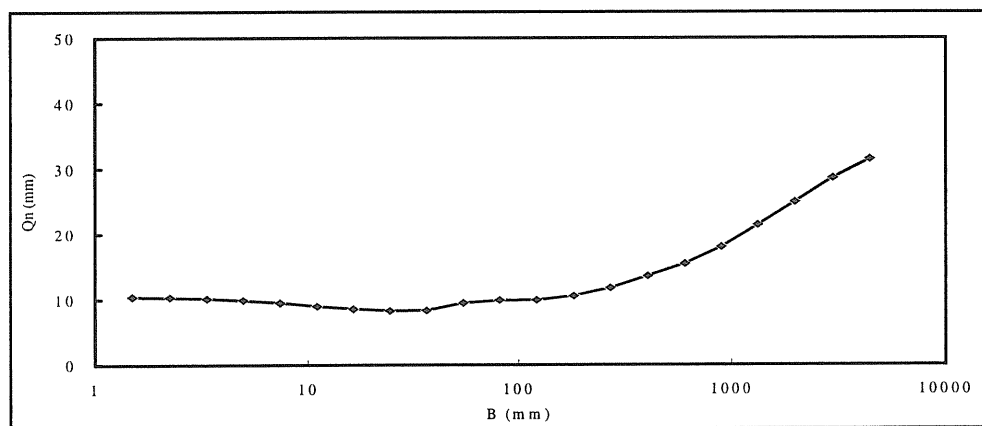
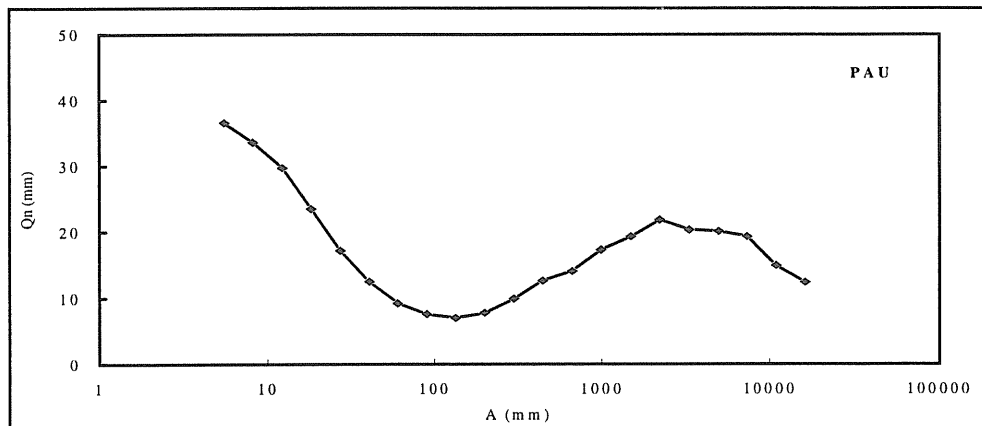


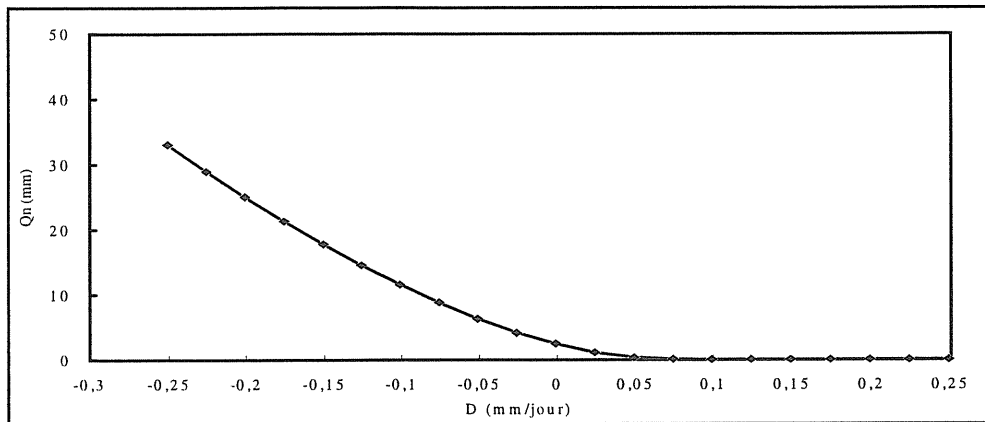
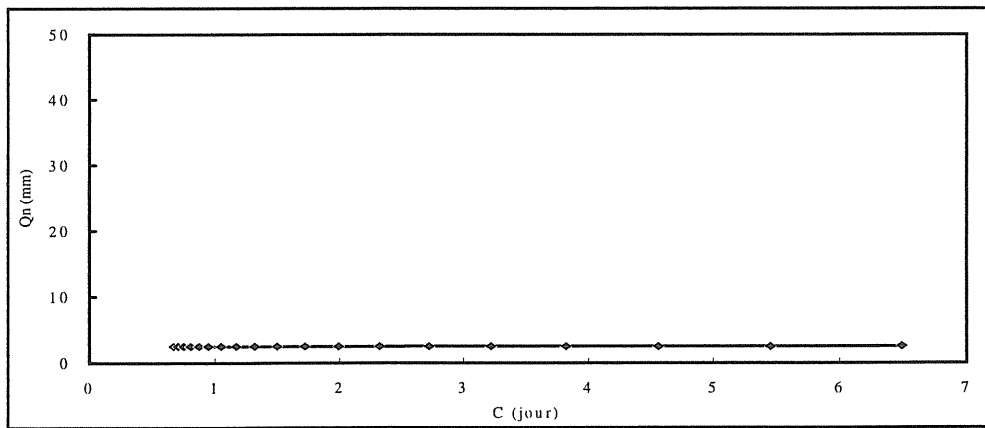
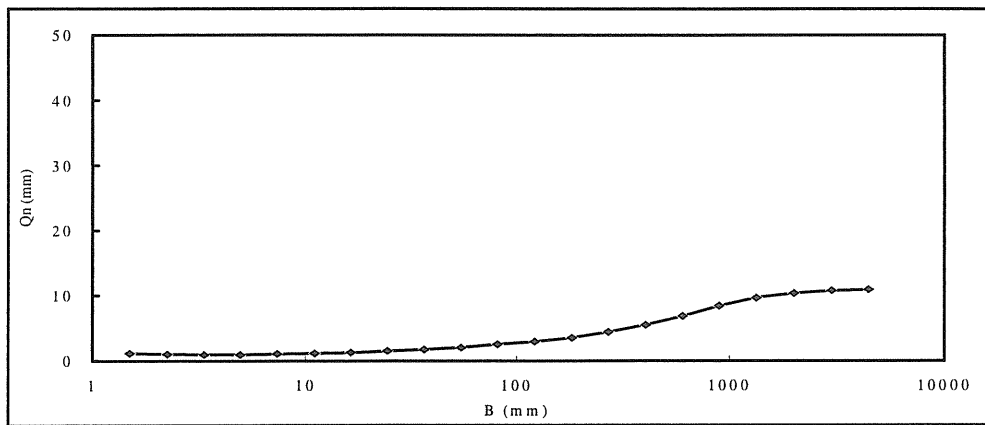
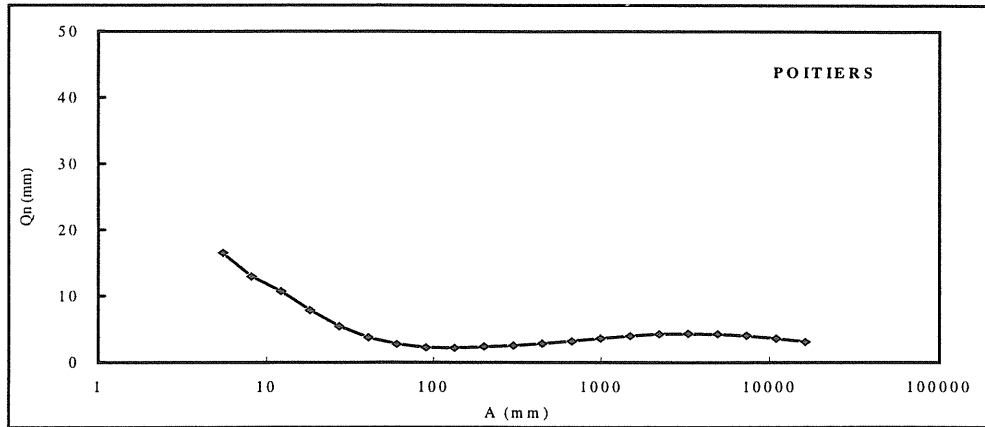


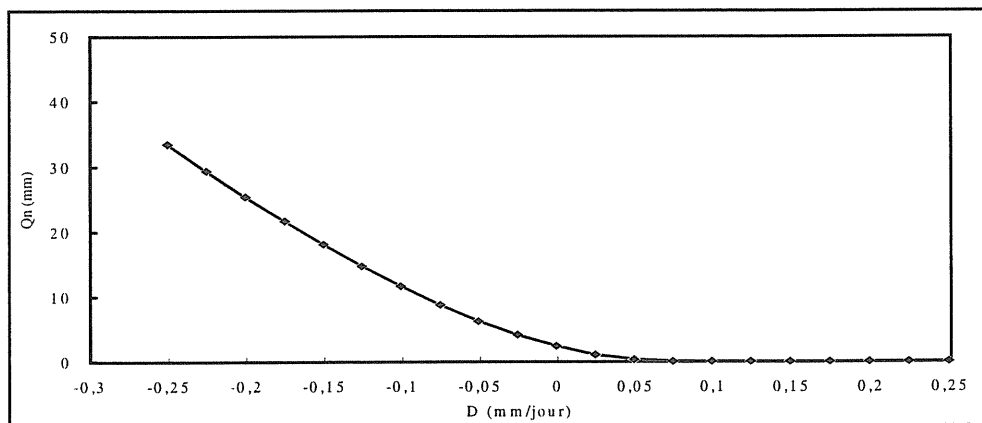
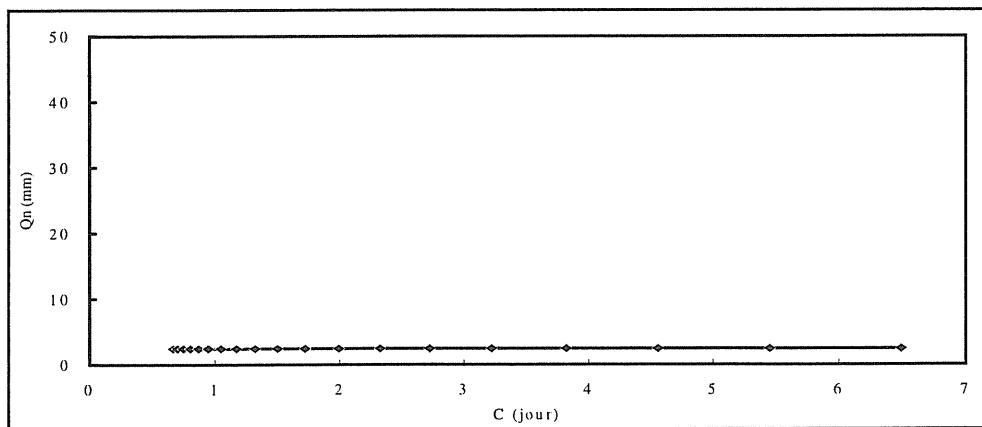
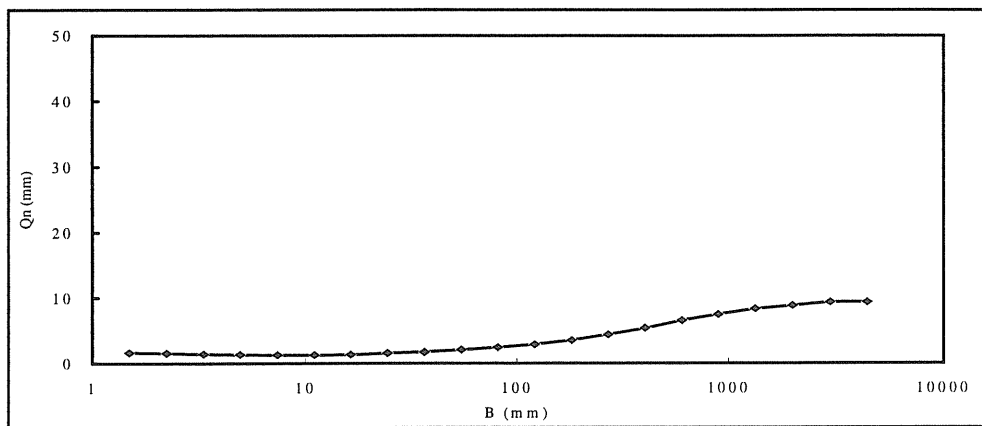
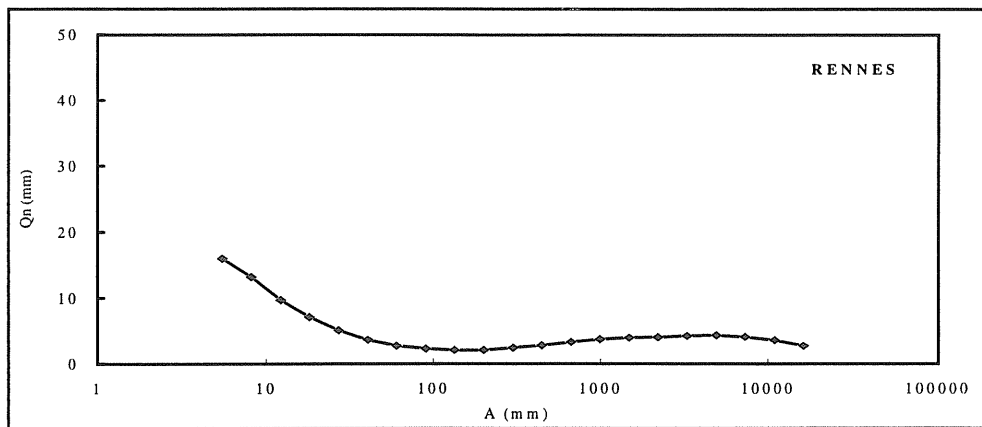


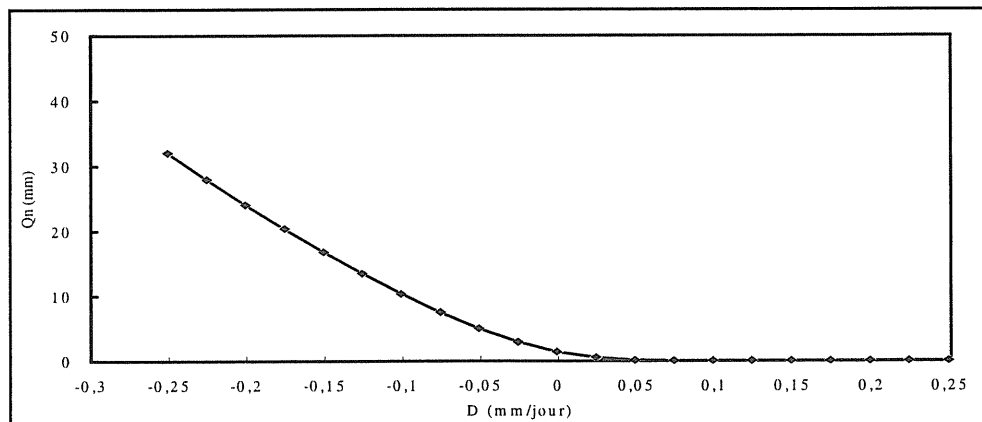
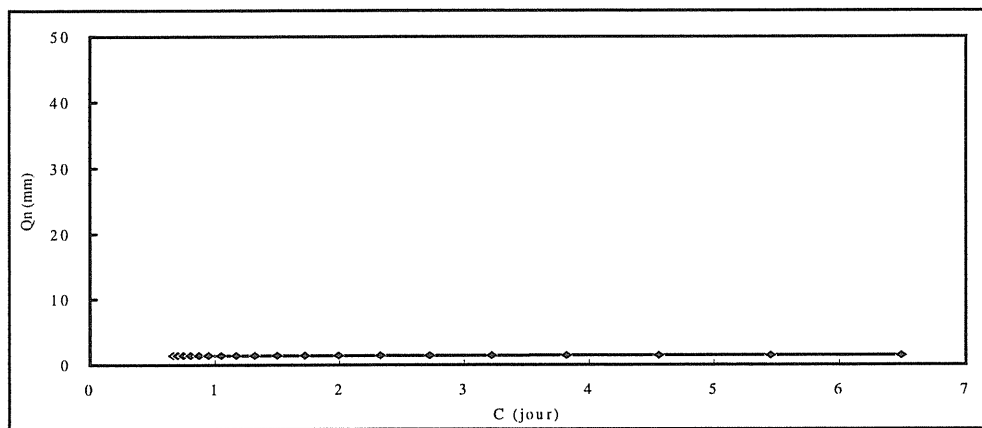
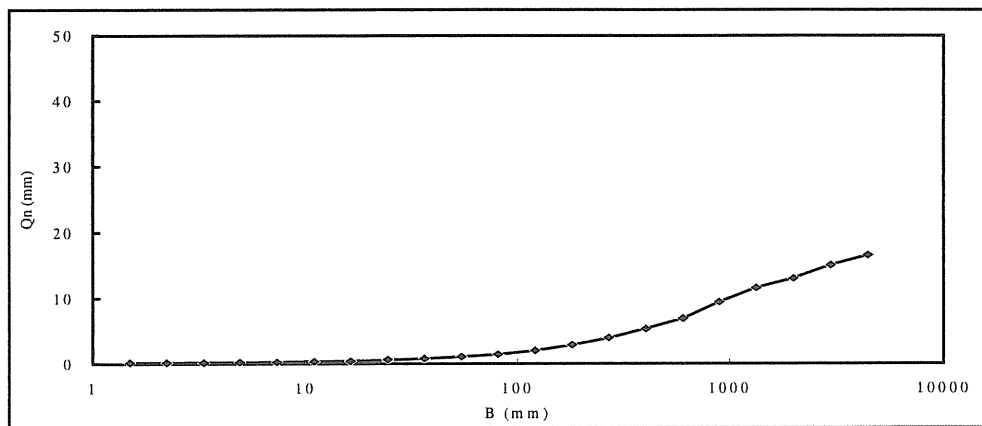
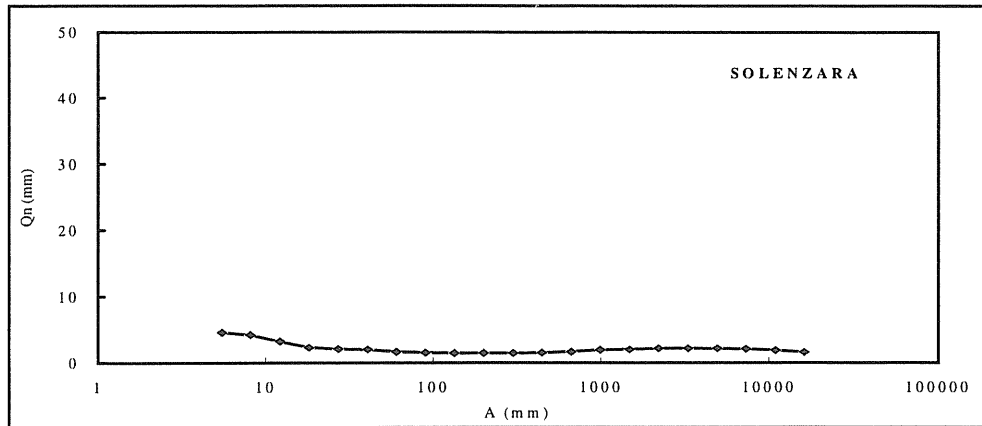


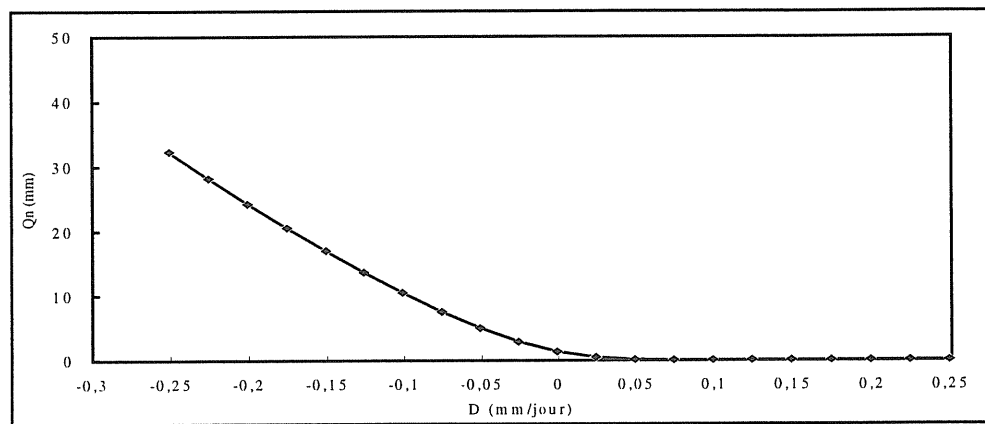
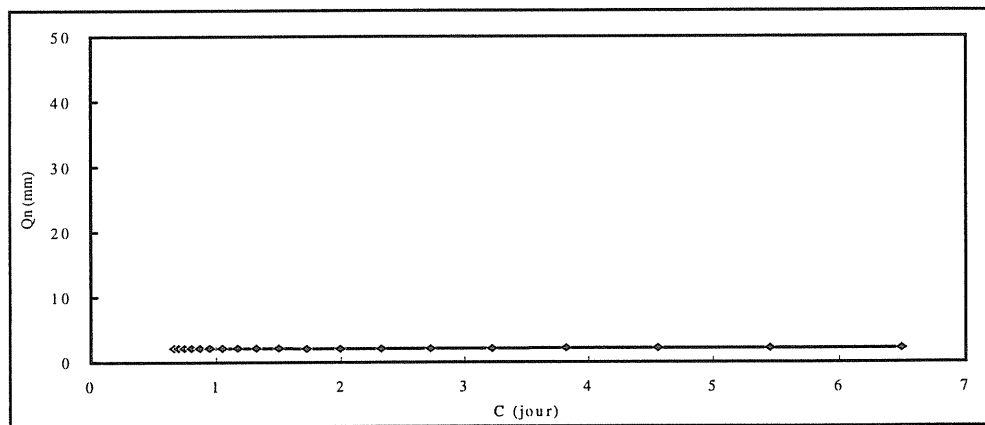
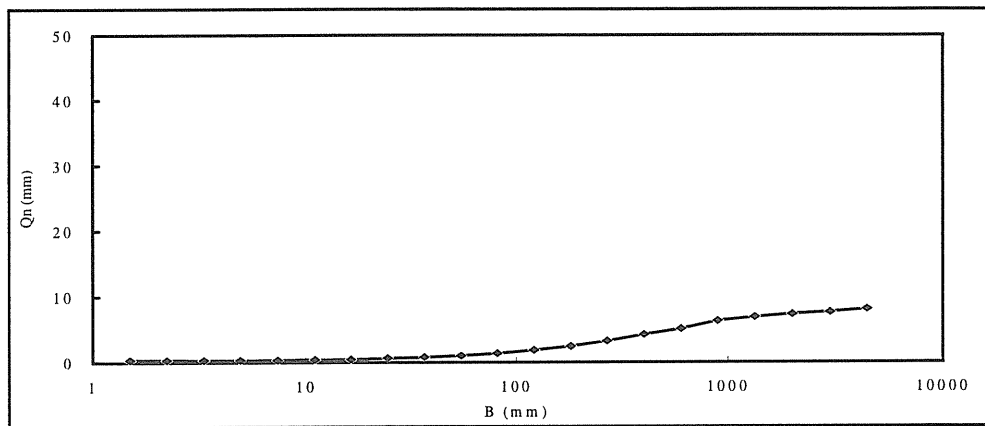
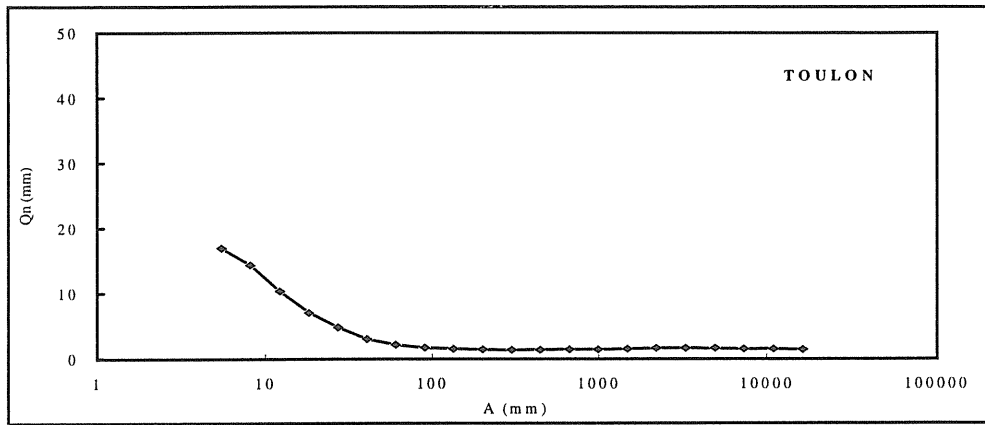


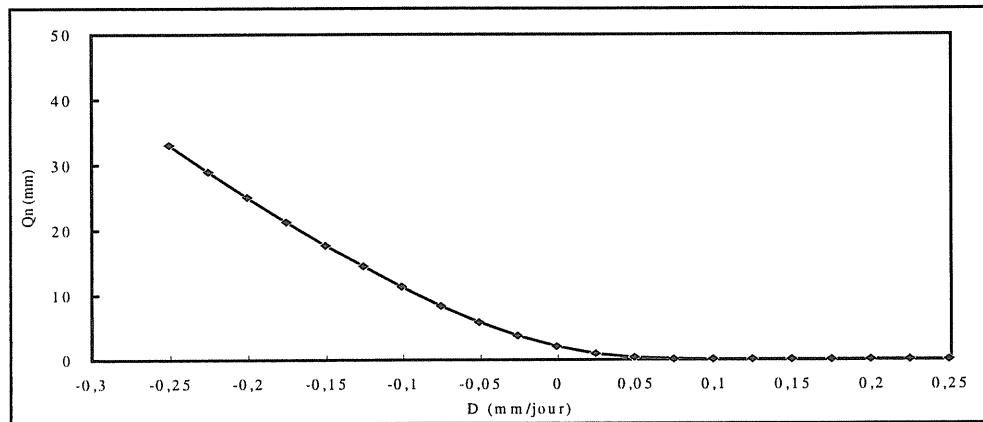
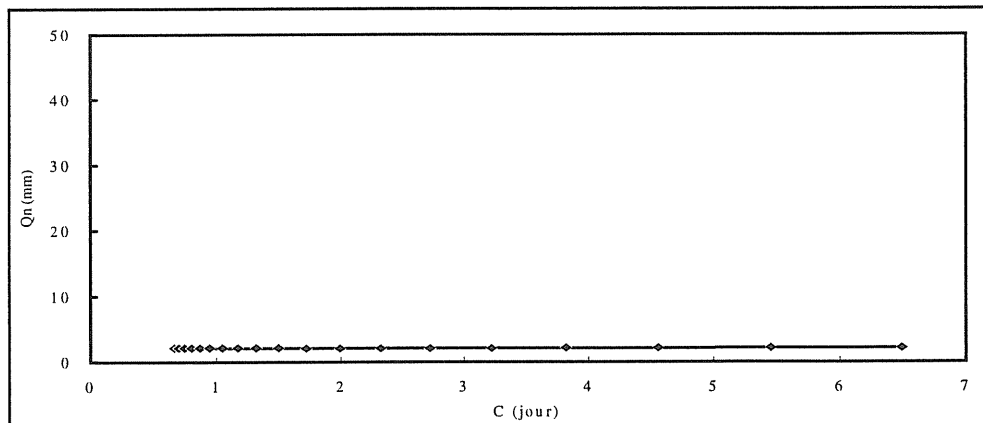
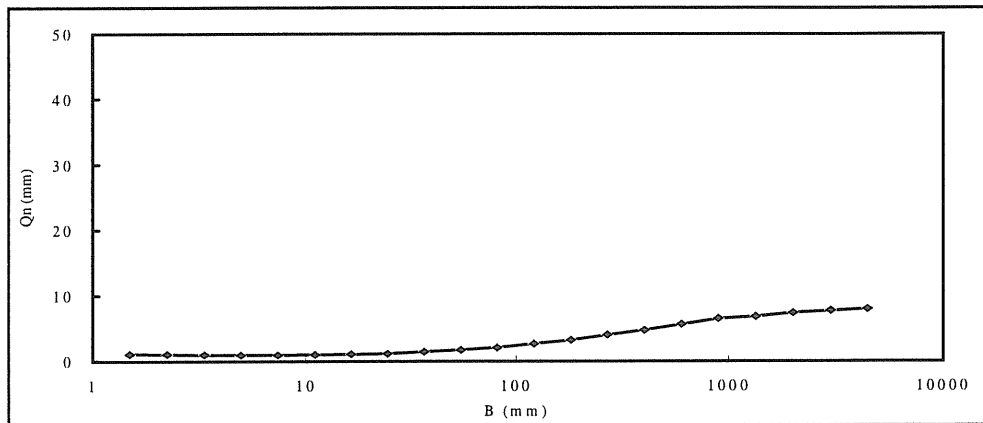
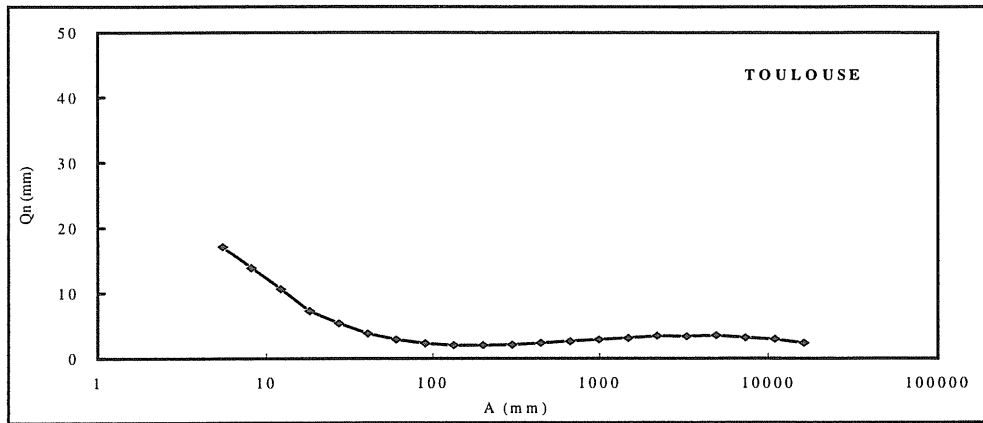








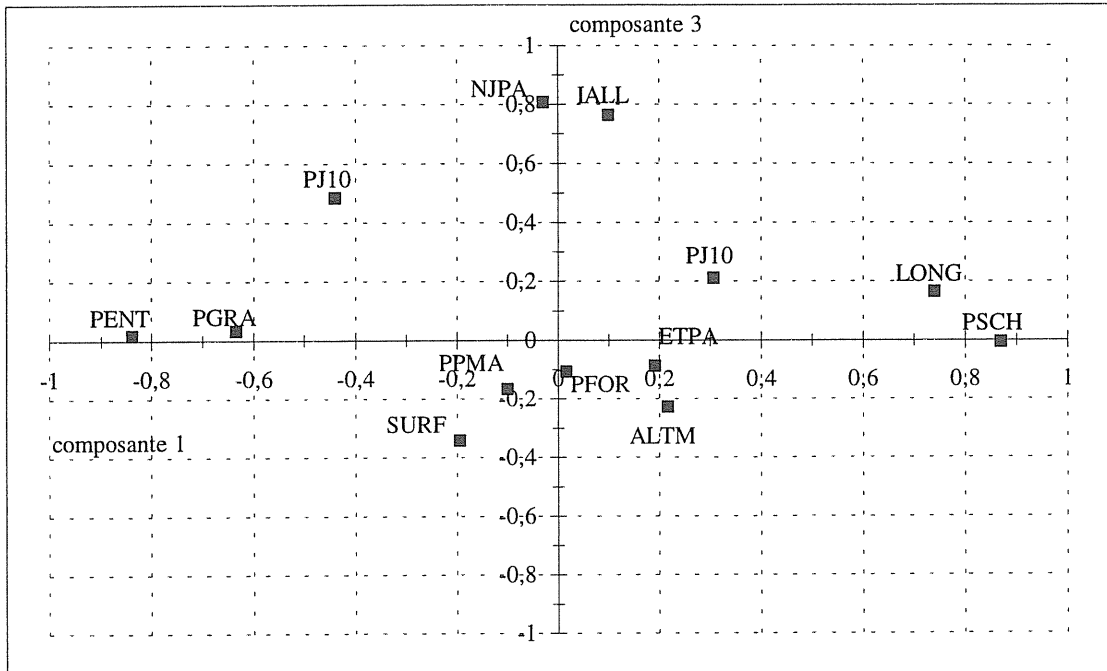




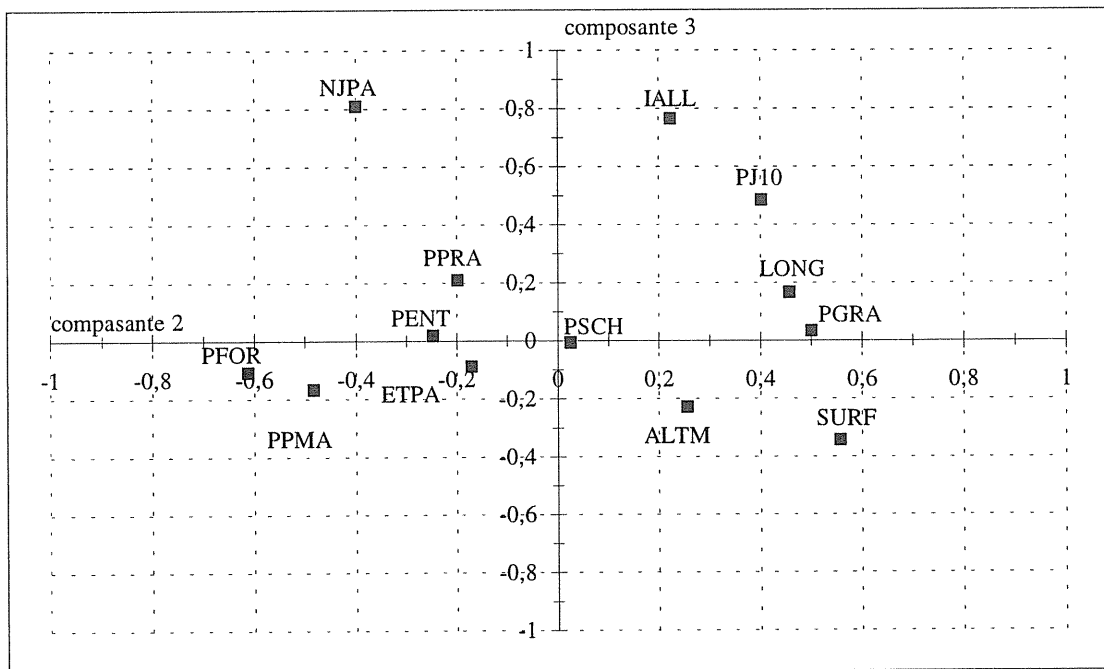
Annexe II

- Annexe (II.1): Analyses en composantes principales sur les 23 bassins versants bretons.
- Annexe (II.2): Résultats de simulation du modèle GR4J sur les 23 bassins versants bretons.
- Annexe (II.3): Résultats de simulation du modèle GR3J sur les 23 bassins versants bretons.
- Annexe (II.4): Description des deux modèles AMANDE et MARTINE.

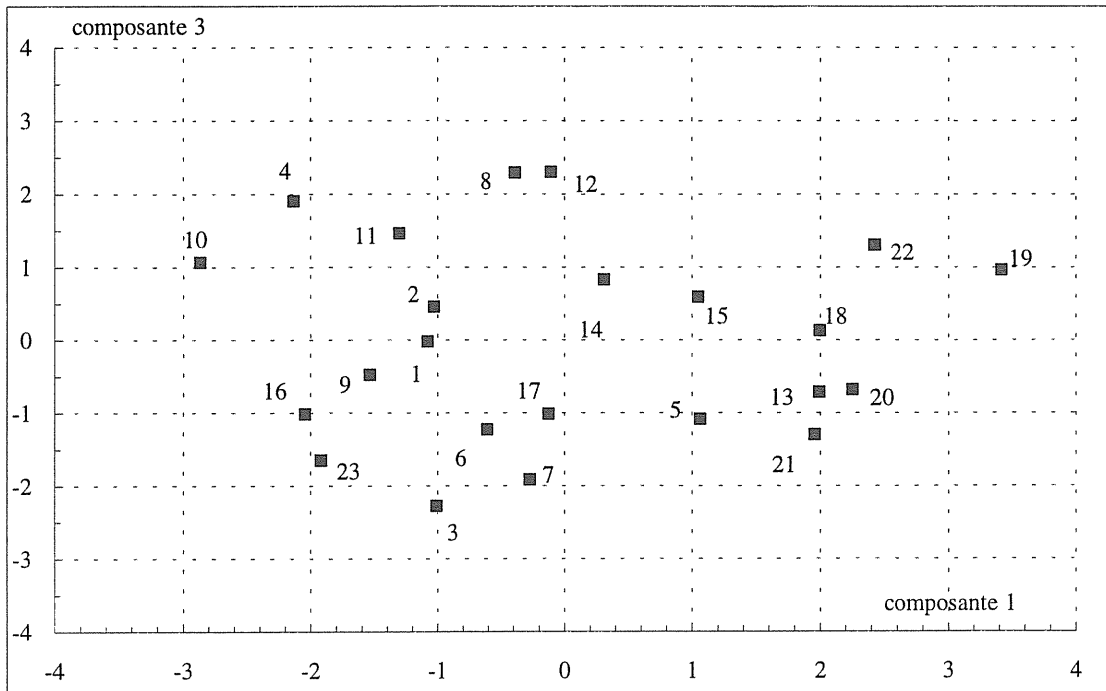
Annexe (II-1) : Analyse en composantes principales sur les 23 bassins bretons
et les 13 caractéristiques physico-climatiques.



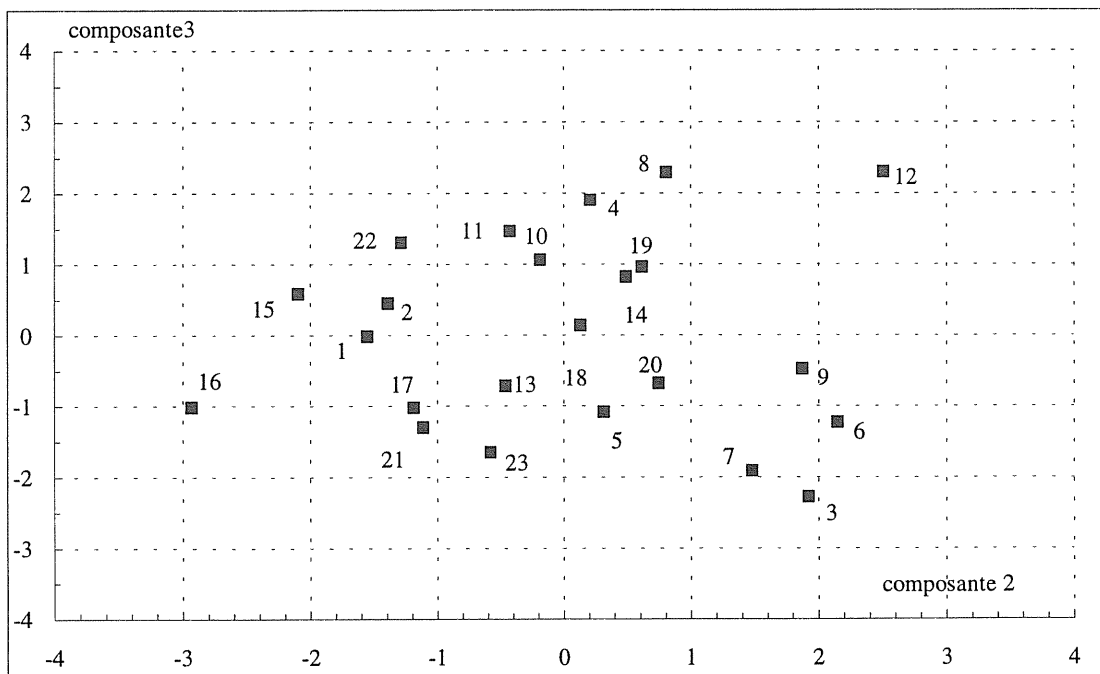
Corrélations des caractéristiques de bassin - composantes 1 et 3.



Corrélations des caractéristiques de bassin - composantes 2 et 3.



Projection des bassins dans le plan des composantes 1 et 3.



Projection des bassins dans le plan des composantes 2 et 3.

Annexe (II.2): Résultats de simulation du modèle GR4J sur les 23 bassins versants bretons.

BV 01 ABER EST (Ploudamel) 1970-1977 S=38 Pa=965 ta=11.8

valeurs des paramètres: 6.08 5.88 -1.10 -0.21
 écarts-types : .04 .06 .07 .13
 corrélations :

1.00 -1.13 -0.03 -0.33
 -1.13 1.00 -0.15 -0.73
 -0.03 -0.15 1.00 .06
 -0.33 -0.73 .06 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 90.6 %
 carré du coefficient de corrélation.: .90
 erreur de bilan (/module M): -8 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 86.08 %
 rapport des maximums maximumum: 89.25 %
 rapport des durées ou Q>4*M: 60/ 61
 rapport des durées ou Q<M/4: 156/ 418

BV 03 TRIEUX (Broc) 1971-1975 S= 376 Pa= 805 ta=11.5

valeurs des paramètres: 6.34 5.40 -0.03 -0.18
 écarts-types : .05 .09 .10 .14
 corrélations :

1.00 -1.13 -0.06 -0.17
 -1.13 1.00 -0.20 -0.73
 -0.06 -0.20 1.00 .08
 -0.17 -0.73 .08 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1975

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 88.0 %
 carré du coefficient de corrélation.: 880
 erreur de bilan (/module M): -7 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 83.41 %
 rapport des maximums maximumum: 111.58 %
 rapport des durées ou Q>4*M: 25/ 40
 rapport des durées ou Q<M/4: 11/ 181

BV 02 ABER OUEST (Drennec)1970-1977 S=24 Pa=965 ta=11.8

valeurs des paramètres: 5.78 6.27 .04 .06
 écarts-types : .11 .10 .12 .09
 corrélations :

1.00 -0.66 -0.03 -0.42
 -0.66 1.00 .01 -0.14
 -0.03 .01 1.00 -0.06
 -0.42 -0.14 -0.06 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 88.7 %
 carré du coefficient de corrélation.: .887
 erreur de bilan (/module M): .1 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 76.85 %
 rapport des maximums maximumum: 71.55 %
 rapport des durées ou Q>4*M: 58/ 71
 rapport des durées ou Q<M/4: 379/ 149

BV 04 BLAVET (Quintin) 1973-1975 S= 104 Pa=918 ta=11.5

valeurs des paramètres: 5.82 5.52 .37 -0.23
 écarts-types : .10 .15 .10 .29
 corrélations :

1.00 -0.34 -0.06 -0.24
 -0.34 1.00 -0.34 -0.59
 -0.06 -0.34 1.00 .08
 -0.24 -0.59 .08 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1975

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 89.8 %
 carré du coefficient de corrélation.: .899
 erreur de bilan (/module M): -1.8 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 86.70 %
 rapport des maximums maximumum: 89.82 %
 rapport des durées ou Q>4*M: 21/ 31
 rapport des durées ou Q<M/4: 77/ 278

BV 05 HYERES (Hernin)	1973-1975	S= 526	Pa= 982	ta=11.5
valeurs des paramètres:	5.15	5.37	.44	.17
écarts-types :	.10	.09	.04	.09
corrélations :	1.00	-.35	.06	-.61
	-.35	1.00	-.41	-.26
	.06	-.41	1.00	-.06
	-.61	-.26	-.06	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1975				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	93.1 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.939			
erreur de bilan (/module M)	1.4 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	77.92 %			
rapport des maximums maximum	74.66 %			
rapport des durées ou Q>4*M	39/ 39			
rapport des durées ou Q<M/4	350/ 345			

BV 07 ELLE (Nadan)	1970-1977	S= 580	Pa= 968	ta=11.5
valeurs des paramètres:	6.88	5.71	.38	.18
écarts-types :	.04	.04	.03	.04
corrélations :	1.00	.10	.24	-.27
	.10	1.00	.05	-.67
	.24	.05	1.00	-.18
	-.27	-.67	-.18	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	91.1 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.911			
erreur de bilan (/module M)	-.5 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	87.44 %			
rapport des maximums maximum	98.57 %			
rapport des durées ou Q>4*M	79/ 67			
rapport des durées ou Q<M/4	291/ 674			

BV 06 SCORFF (Kerlo)	1973-1978	S= 292	Pa= 967	ta=11.5
valeurs des paramètres:	6.46	5.72	.39	-.28
écarts-types :	.06	.11	.05	.20
corrélations :	1.00	-.09	-.27	-.07
	-.09	1.00	-.54	-.75
	-.27	-.54	1.00	.30
	-.07	-.75	.30	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1978				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	86.2 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.863			
erreur de bilan (/module M) .....	.7 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	85.03 %			
rapport des maximums maximum	53.00 %			
rapport des durées ou Q>4*M	46/ 34			
rapport des durées ou Q<M/4	170/ 357			

BV 08 ISOLE (Quimperlé)	1970-1977	S=225	Pa=1055	ta=12.0
valeurs des paramètres:	6.83	5.87	.21	-.13
écarts-types :	.04	.06	.06	.14
corrélations :	1.00	-.02	.02	-.14
	-.02	1.00	-.06	-.82
	.02	-.06	1.00	-.02
	-.14	-.82	-.02	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	85.4 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.855			
erreur de bilan (/module M) .....	.5 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	72.99 %			
rapport des maximums maximum	57.82 %			
rapport des durées ou Q>4*M	56/ 43			
rapport des durées ou Q<M/4	121/ 348			

BV 09	AVEN (Aven)	1970-1977	S= 184	Pa=1007	ta=12.0
valeurs des paramètres:	6.30	6.18	.18	-.34	
écarts-types	.03	.05	.05	.11	
corrélations	1.00	-.07	-.03	-.30	
	-.07	1.00	-.06	-.78	
	-.03	-.06	1.00	-.00	
	-.30	-.78	-.00	1.00	
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977					
durée de mise en route				365 jours	
critère de Nash(var. expliquée)				94.0 %	
carré du coefficient de corrélation.:				.940	
erreur de bilan (/module M)			-1.6 %		
rapport des crues annuelles moyennes:				96.55 %	
rapport des maximums maximumum				116.23 %	
rapport des durées ou Q>4*M				64/ 70	
rapport des durées ou Q<M/4				72/ 425	

BV 11	JET (Gaberic)	1970-1978	S= 107	Pa=974	ta=12.0
valeurs des paramètres:	6.52	6.30	.03	-.11	
écarts-types	.05	.06	.07	.19	
corrélations	1.00	-.14	-.01	-.13	
	-.14	1.00	-.09	-.79	
	-.01	-.09	1.00	.00	
	-.13	-.79	.00	1.00	
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1978					
durée de mise en route				365 jours	
critère de Nash(var. expliquée)				88.9 %	
carré du coefficient de corrélation.:				.890	
erreur de bilan (/module M)			-1.3 %		
rapport des crues annuelles moyennes:				106.46 %	
rapport des maximums maximumum				107.03 %	
rapport des durées ou Q>4*M				84/ 83	
rapport des durées ou Q<M/4				168/ 571	

BV 10	MOROS (Concarneau)	1971-1978	S= 20	Pa= 819	ta=12.0
valeurs des paramètres:	6.53	6.41	-.02.11		
écarts-types	.03	.04	.05	.05	
corrélations	1.00	-.36	.03	-.22	
	-.36	1.00	-.09	-.53	
	.03	-.09	1.00	-.10	
	-.22	-.53	-.10	1.00	
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1978					
durée de mise en route				365 jours	
critère de Nash(var. expliquée)				93.0 %	
carré du coefficient de corrélation.:				.931	
erreur de bilan (/module M)			-1.1 %		
rapport des crues annuelles moyennes:				110.53 %	
rapport des maximums maximumum				108.63 %	
rapport des durées ou Q>4*M				86/ 77	
rapport des durées ou Q<M/4				245/ 464	

BV 12	ODET (Tréodet)	1972-1977	S= 195	Pa=1104	ta=12.0
valeurs des paramètres:	5.50	6.19	.21	-.47	
écarts-types	.07	.05	.05	.17	
corrélations	1.00	-.17	-.17	-.69	
	-.17	1.00	-.08	-.47	
	-.17	-.08	1.00	.16	
	-.69	-.47	.16	1.00	
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1973-1977					
durée de mise en route				365 jours	
critère de Nash(var. expliquée)				93.5 %	
carré du coefficient de corrélation.:				.939	
erreur de bilan (/module M)			-7 %		
rapport des crues annuelles moyennes:				82.51 %	
rapport des maximums maximumum				87.40 %	
rapport des durées ou Q>4*M				49/ 61	
rapport des durées ou Q<M/4				266/ 622	

BV 13 EVEL (Guinin) 1970-1977 S=316 Pa=814ta=11.5

valeurs des paramètres:	5.91	5.47	.50	.08
écarts-types :	.03	.04	.02	.03
corrélations :	1.00	-.38	.22	-.43
	-.38	1.00	.06	-.40
	.22	.06	1.00	-.17
	-.43	-.40	-.17	1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977

durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	93.7 %
carré du coefficient de corrélation.:	.948
erreur de bilan (/module M)	-4.4 %
rappor des crues annuelles moyennes:	92.95 %
rappor des maximums maximorum	94.34 %
rappor des durées ou Q>4*M	117/ 142
rappor des durées ou Q<M/4	373/ 1113

BV 15 YVEL (Loyat) 1970-1977 S=315 Pa=690ta=11.5

valeurs des paramètres:	5.76	4.72	.62	-.05
écarts-types :	.03	.06	.03	.07
corrélations :	1.00	-.33	.32	-.44
	-.33	1.00	-.05	-.46
	.32	-.05	1.00	-.11
	-.44	-.46	-.11	1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977

durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	88.2 %
carré du coefficient de corrélation.:	.886
erreur de bilan (/module M)	-4.2 %
rappor des crues annuelles moyennes:	100.96 %
rappor des maximums maximorum	136.55 %
rappor des durées ou Q>4*M	113/ 141
rappor des durées ou Q<M/4	385/ 1130

BV 14 LIE (Fosse) 1970-1972 S=379 Pa=746 ta=11.5

valeurs des paramètres:	6.52	5.12	.20	-.04
écarts-types :	.09	.13	.13	.18
corrélations :	1.00	.11	.36	-.24
	.11	1.00	.29	-.74
	.36	.29	1.00	-.26
	-.24	-.74	-.26	1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1972

durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	83.7 %
carré du coefficient de corrélation.:	.837
erreur de bilan (/module M)	-1.1 %
rappor des crues annuelles moyennes:	111.78 %
rappor des maximums maximorum	139.34 %
rappor des durées ou Q>4*M	23/ 37
rappor des durées ou Q<M/4	34/ 203

BV 16 AFF SUPERIEUR (pnt secret)1977-1981 S=30 Pa=886 ta=11.5

valeurs des paramètres:	5.69	4.90	.16	.09
écarts-types :	.09	.15	.18	.08
corrélations :	1.00	-.37	-.03	-.48
	-.40	1.00	.00	-.34
	-.03	.00	1.00	.04
	-.48	-.34	.04	1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1978-1981

durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	91.9 %
carré du coefficient de corrélation.:	.921
erreur de bilan (/module M)	2.9 %
rappor des crues annuelles moyennes:	84.86 %
rappor des maximums maximorum	87.52 %
rappor des durées ou Q>4*M	50/ 50
rappor des durées ou Q<M/4	547/ 592

BV 17 CAREIL (Violais)	1973-1976	S=14	Pa=764	ta=11.5
valeurs des paramètres:	5.46	3.27	.17	.04
écarts-types :	.08	.18	.10	.08
corrélations :	1.00	-.53	-.05	-.36
	-.53	1.00	-.21	-.31
	-.05	-.21	1.00	.00
	-.36	-.31	.00	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1976				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	80.9 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.814			
erreur de bilan (/module M)	-6 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	84.92 %			
rapport des maximums maximorum	86.69 %			
rapport des durées ou Q>4*M	73/ 85			
rapport des durées ou Q<M/4	618/ 792			

BV 19 SEICHE (Bruz)	1970-1976	S=820	Pa=712	ta=11.5
valeurs des paramètres:	6.06	4.60	.96	.20
écarts-types :	.04	.06	.02	.03
corrélations :	1.00	-.19	.07	-.64
	-.19	1.00	-.47	-.43
	.07	-.47	1.00	.04
	-.64	-.43	.04	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1976				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	86.0 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.862			
erreur de bilan (/module M)	-6.3 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	106.83 %			
rapport des maximums maximorum	183.32 %			
rapport des durées ou Q>4*M	154/ 179			
rapport des durées ou Q<M/4	881/ 1242			

BV 18 MEU (Abbaye)	1971-1978	S=468	Pa=666	ta=11.5
valeurs des paramètres:	5.53	4.09	.59	-.05
écarts-types :	.04	.06	.03	.07
corrélations :	1.00	-.47	.51	-.47
	-.47	1.00	-.35	-.31
	.51	-.35	1.00	-.13
	-.47	-.31	-.13	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1978				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	84.3 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.845			
erreur de bilan (/module M)	-2.2 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	97.89 %			
rapport des maximums maximorum	113.53 %			
rapport des durées ou Q>4*M	125/ 165			
rapport des durées ou Q<M/4	754/ 1318			

BV 20 VILAINNE (Serven)	1974-1976	S=604	Pa=606	ta=11.5
valeurs des paramètres:	5.89	4.28	.59	.19
écarts-types :	.04	.08	.03	.04
corrélations :	1.00	-.32	.57	-.55
	-.32	1.00	.27	-.29
	.57	.27	1.00	-.46
	-.55	-.29	-.46	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1975-1976				
durée de mise en route	365 jours			
critère de Nash(var. expliquée)	93.2 %			
carré du coefficient de corrélation.:	.838			
erreur de bilan (/module M) .....	.2 %			
rapport des crues annuelles moyennes:	92.63 %			
rapport des maximums maximorum	89.24 %			
rapport des durées ou Q>4*M	64/ 63			
rapport des durées ou Q<M/4	470/ 553			

BV 21 CHEVRE (Bouexierre)	1970-1972	S=153	Pa= 647	ta=11.5
valeurs des paramètres:	5.46	3.60	.62	.08
écarts-types :	.10	.13	.04	.08
corrélations :				
	1.00	-.30	.39	-.46
	-.30	1.00	-.30	-.37
	.39	-.30	1.00	.01
	-.46	-.37	.01	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1972				
durée de mise en route			365 jours	
critère de Nash(var. expliquée)			83.8 %	
carré du coefficient de corrélation.:			.842	
erreur de bilan (/module M)			-2.9 %	
rappor des crues annuelles moyennes:			101.49 %	
rappor des maximums maximorum			119.03 %	
rappor des durées ou Q>4*M			67/ 67	
rappor des durées ou Q<M/4			376/ 528	

BV 23 NANCON (pnt ânes)	1971-1975	S=70	Pa=757	ta=11.5
valeurs des paramètres:	6.51	5.70	.01	-.26
écarts-types :	.06	.11	.10	.15
corrélations :				
	1.00	-.21	.00	-.16
	-.21	1.00	-.02	-.78
	.00	-.02	1.00	.09
	-.16	-.78	.09	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1975				
durée de mise en route			365 jours	
critère de Nash(var. expliquée)			79.9 %	
carré du coefficient de corrélation.:			.799	
erreur de bilan (/module M) .....			.2 %	
rappor des crues annuelles moyennes:			106.58 %	
rappor des maximums maximorum			130.63 %	
rappor des durées ou Q>4*M			9/ 8	
rappor des durées ou Q<M/4			0/ 0	

BV 22 COUESNON (RN 776)	1970-1977	S=510	Pa=729	ta=11.5
valeurs des paramètres:	6.15	4.89	.48	-.18
écarts-types :	.04	.09	.04	.12
corrélations :				
	1.00	-.30	.05	-.13
	-.30	1.00	-.38	-.72
	.05	-.38	1.00	.27
	-.13	-.72	.27	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1977				
durée de mise en route			365 jours	
critère de Nash(var. expliquée)			80.6 %	
carré du coefficient de corrélation.:			.806	
erreur de bilan (/module M)			-.3 %	
rappor des crues annuelles moyennes:			96.01 %	
rappor des maximums maximorum			113.23 %	
rappor des durées ou Q>4*M			63/ 60	
rappor des durées ou Q<M/4			145/ 773	

Annexe (II-3): Résultats de simulation du modèle GR3J sur les 23 bassins bretons.

BV 01**ABER EST**

valeurs optimales : a = 5.90 b = 5.98 c = -.10
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .05 x3: .07
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) : 90.0 %
 erreur de bilan (/module M) : 5.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes : 87.16 %
 rapport des durées ou Q>4*M : 61/ 61
 rapport des durées ou Q<M/4 : 469/ 418

BV 04**BLAVET**

valeurs optimales : a = 5.39 b = 5.82 c = .36
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .14 x2: .14 x3: .13
 critères de performance sur la période : 1974-1975
 critère de Nash(var. expliquée) : 89.3 %
 erreur de bilan (/module M) : 2.3 %
 rapport des crues annuelles moyennes : 85.43 %
 rapport des durées ou Q>4*M : 23/ 31
 rapport des durées ou Q<M/4 : 190/ 278

BV 02**ABER OUEST**

valeurs optimales : a = 5.87 b = 6.28 c = .05
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .06 x2: .06 x3: .07
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) : 88.2 %
 erreur de bilan (/module M) : -2.5 %
 rapport des crues annuelles moyennes : 79.64 %
 rapport des durées ou Q>4*M : 65/ 85
 rapport des durées ou Q<M/4 : 198/ 150

BV 05**HYESES**

valeurs optimales : a = 5.37 b = 5.31 c = .45
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .08 x2: .09 x3: .04
 critères de performance sur la période : 1974-1975
 critère de Nash(var. expliquée) : 92.7 %
 erreur de bilan (/module M) : -6.0 %
 rapport des crues annuelles moyennes : 78.77 %
 rapport des durées ou Q>4*M : 39/ 39
 rapport des durées ou Q<M/4 : 237/ 345

BV 03**TRIEUX**

valeurs optimales : a = 6.25 b = 5.42 c = -.03
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .05 x2: .06 x3: .10
 critères de performance sur la période : 1972-1975
 critère de Nash(var. expliquée) : 87.0 %
 erreur de bilan (/module M) : 8.1 %
 rapport des crues annuelles moyennes : 83.86 %
 rapport des durées ou Q>4*M : 23/ 40
 rapport des durées ou Q<M/4 : 220/ 181

BV 06**SCOREFF**

valeurs optimales : a = 6.29 b = 5.69 c = .38
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .07 x2: .09 x3: .07
 critères de performance sur la période : 1974-1978
 critère de Nash(var. expliquée) : 84.5 %
 erreur de bilan (/module M) : 14.0 %
 rapport des crues annuelles moyennes : 86.22 %
 rapport des durées ou Q>4*M : 35/ 21
 rapport des durées ou Q<M/4 : 495/ 329

BV 07	ELLE
-------	------

valeurs optimales : a = 6.94 b = 5.79 c = .38
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .03 x3: .03
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) 89.9 %
 erreur de bilan (/module M) -12.1 %
 rapport des crues annuelles moyennes 85.75 %
 rapport des durées ou Q>4*M 86/ 67
 rapport des durées ou Q<M/4 107/ 674

BV 08	ISOLE
-------	-------

valeurs optimales : a = 6.80 b = 5.84 c = .21
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .04 x3: .06
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) 85.1 %
 erreur de bilan (/module M) 5.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes 73.57 %
 rapport des durées ou Q>4*M 54/ 43
 rapport des durées ou Q<M/4 235/ 348

BV 10	MOROS
-------	-------

valeurs optimales : a = 6.61 b = 6.41 c = -.01
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .03 x2: .03 x3: .05
 critères de performance sur la période : 1972-1978
 critère de Nash(var. expliquée) 92.6 %
 erreur de bilan (/module M) -6.1 %
 rapport des crues annuelles moyennes 110.00 %
 rapport des durées ou Q>4*M 87/ 77
 rapport des durées ou Q<M/4 161/ 464

BV 11	JET
-------	-----

valeurs optimales : a = 6.48 b = 6.29 c = .03
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .05 x2: .04 x3: .07
 critères de performance sur la période : 1971-1978
 critère de Nash(var. expliquée) 88.8 %
 erreur de bilan (/module M) 1.9 %
 rapport des crues annuelles moyennes 106.86 %
 rapport des durées ou Q>4*M 84/ 83
 rapport des durées ou Q<M/4 259/ 571

BV 09	AVEN
-------	------

valeurs optimales : a = 5.53 b = 6.71 c = .20
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .06 x2: .05 x3: .05
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) 92.6 %
 erreur de bilan (/module M) .1 %
 rapport des crues annuelles moyennes 94.92 %
 rapport des durées ou Q>4*M 74/ 70
 rapport des durées ou Q<M/4 217/ 425

BV 12	L'ODET
-------	--------

valeurs optimales : a = 5.17 b = 6.26 c = .21
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .06 x2: .05 x3: .05
 critères de performance sur la période : 1973-1977
 critère de Nash(var. expliquée) 92.5 %
 erreur de bilan (/module M) 9.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes 79.57 %
 rapport des durées ou Q>4*M 45/ 61
 rapport des durées ou Q<M/4 698/ 622

BV 13	EVEL
--------------	-------------

valeurs optimales : a = 5.98 b = 5.45 c = .50
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .03 x2: .04 x3: .02
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) 93.4 %
 erreur de bilan (/module M) -11.0 %
 rapport des crues annuelles moyennes 92.42 %
 rapport des durées ou Q>4*M 119/ 142
 rapport des durées ou Q<M/4 182/ 1113

BV 14	LIE
--------------	------------

valeurs optimales : a = 6.52 b = 5.12 c = .20
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .09 x2: .09 x3: .12
 critères de performance sur la période : 1971-1972
 critère de Nash(var. expliquée) 83.6 %
 erreur de bilan (/module M) 1.1 %
 rapport des crues annuelles moyennes 112.03 %
 rapport des durées ou Q>4*M 23/ 37
 rapport des durées ou Q<M/4 64/ 203

BV 15	YVEL
--------------	-------------

valeurs optimales : a = 5.72 b = 4.75 c = .62
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .03 x2: .06 x3: .04
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) 88.1 %
 erreur de bilan (/module M) -.5 %
 rapport des crues annuelles moyennes 101.35 %
 rapport des durées ou Q>4*M 113/ 141
 rapport des durées ou Q<M/4 573/ 1130

BV 16	AFF SUPERIEUR
--------------	----------------------

valeurs optimales : a = 5.76 b = 4.21 c = .17
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .06 x3: .08
 critères de performance sur la période : 1978-1981
 critère de Nash(var. expliquée) 91.6 %
 erreur de bilan (/module M) -4.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes 83.53 %
 rapport des durées ou Q>4*M 56/ 50
 rapport des durées ou Q<M/4 472/ 592

BV 17	CAREIL
--------------	---------------

valeurs optimales : a = 5.50 b = 3.23 c = .19
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .07 x2: .17 x3: .11
 critères de performance sur la période : 1974-1976
 critère de Nash(var. expliquée) 80.9 %
 erreur de bilan (/module M) -5.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes 84.76 %
 rapport des durées ou Q>4*M 76/ 85
 rapport des durées ou Q<M/4 558/ 792

BV 18	MEU
--------------	------------

valeurs optimales : a = 5.49 b = 4.14 c = .59
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .06 x3: .03
 critères de performance sur la période : 1972-1978
 critère de Nash(var. expliquée) 84.2 %
 erreur de bilan (/module M) 1.9 %
 rapport des crues annuelles moyennes 97.61 %
 rapport des durées ou Q>4*M 125/ 165
 rapport des durées ou Q<M/4 890/ 1318

BV 19**SEICHE**

valeurs optimales : a = 6.32 b = 4.61 c = .96
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .06 x3: .03
 critères de performance sur la période : 1971-1976
 critère de Nash(var. expliquée) 80.9 %
 erreur de bilan (/module M) -39.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes 100.34 %
 rapport des durées ou Q>4*M 166/ 179
 rapport des durées ou Q<M/4 91/ 1242

BV 22**COUESNON**

valeurs optimales : a = 6.03 b = 4.92 c = .48
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .07 x3: .03
 critères de performance sur la période : 1971-1977
 critère de Nash(var. expliquée) 79.1 %
 erreur de bilan (/module M) 10.8 %
 rapport des crues annuelles moyennes 98.24 %
 rapport des durées ou Q>4*M 64/ 60
 rapport des durées ou Q<M/4 521/ 773

BV 20**VILAINE**

valeurs optimales : a = 6.05 b = 4.18 c = .61
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .08 x3: .03
 critères de performance sur la période : 1975-1976
 critère de Nash(var. expliquée) 91.6 %
 erreur de bilan (/module M) -18.3 %
 rapport des crues annuelles moyennes 89.50 %
 rapport des durées ou Q>4*M 71/ 63
 rapport des durées ou Q<M/4 251/ 553

BV 23**NANCON**

valeurs optimales : a = 5.53 b = 6.97 c = .16
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .04 x2: .07 x3: .25
 critères de performance sur la période : 1972-1975
 critère de Nash(var. expliquée) 76.8 %
 erreur de bilan (/module M) -2.5 %
 rapport des crues annuelles moyennes 65.49 %
 rapport des durées ou Q>4*M 6/ 8
 rapport des durées ou Q<M/4 0/ 0

BV 21**CHEVRE**

valeurs optimales : a = 5.54 b = 3.59 c = .62
 écarts-types des transformés des paramètres:
 x1: .09 x2: .12 x3: .04
 critères de performance sur la période : 1970-1972
 critère de Nash(var. expliquée) 83.4 %
 erreur de bilan (/module M) -12.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes 100.08 %
 rapport des durées ou Q>4*M 71/ 67
 rapport des durées ou Q<M/4 285/ 528

Annexe (II.4): Description des modèles: Modèle AMANDE Modèle MARTINE
(extrait de l'étude de Mazenc, 1981)

Les modèles décrits sont des modèles déterministes globaux du département Hydrogéologie du Bureau de Recherches Géologiques et Minières d'Orléans.

Ils permettent de calculer le débit d'un cours d'eau ou le niveau d'une nappe à partir des données suivantes :

- lame d'eau journalière représentative du bassin versant,
- valeurs mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP.),
- débits (ou niveaux) journaliers -pour caler les paramètres ou comparer les débits (ou les niveaux) calculés et observés.

Ce sont des modèles "à réservoirs" où les différents transferts d'eau sont simulés par des transferts successifs à travers des réservoirs.

1 - MODELE AMANDE

(Algorithme de Mero Appliqué à la simulation des Niveaux et des Débits)

Ce modèle fait intervenir un maximum de 14 paramètres :

- *UMAX* capacité de la réserve superficielle (mm),
- *SR* seuil de ruissellement (mm),
- *LMAX* capacité du réservoir intermédiaire (mm),
- *LFC* rétention du réservoir intermédiaire (mm),
- *TB1* constante de temps de tarissement de l'aquifère inférieur (ou de base) (jours),
- *TB2* constante de temps de tarissement de l'aquifère supérieur (jours),
- *THY* constante de temps de tarissement hypodermique ou superficiel différé (jours),
- *TSU* constante de temps de tarissement de l'écoulement superficiel (jours),
- *RP* retard de percolation (jours),
- *SEUIL* seuil de séparation des aquifères (mm),
- *EX* exposant de la loi d'évapotranspiration,
- *SHY* pourcentage de surface de la zone semi-perméable (%),
- *CR* coefficient de ruissellement,
- *TP* temps de percolation du réservoir intermédiaire au réservoir aquifère (jours).

Seuls huit paramètres (en italiques) furent optimisés.

Le calcul des débits, effectué à un pas de temps journalier, est composé de deux parties interdépendantes:

- la fonction production qui répartit la pluie en évapotranspiration et dans les différents types d'écoulements (superficiel, superficiel retardé, de base),

- la fonction transfert qui assure la vidange vers l'exutoire du bassin des différents réservoirs d'écoulements.

2 - MODELE MARTINE

(Modèle A Réservoir pour la simulation des Transferts par Infiltration à la Nappe et Ecoulement superficiel)

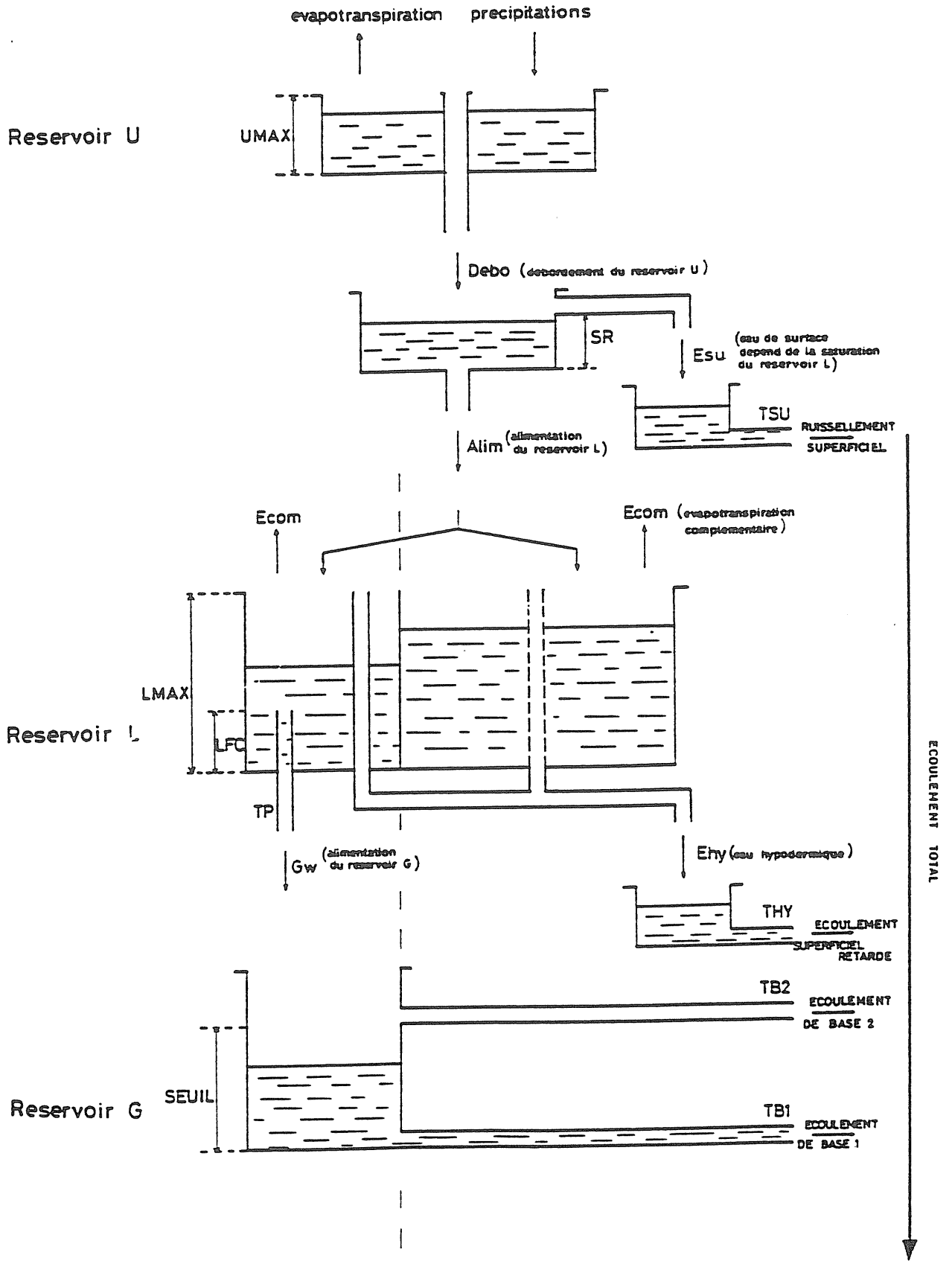
Ce modèle fait intervenir un nombre maximal de huit paramètres :

- *UMAX* capacité du réservoir superficiel (mm),
- *LMAX* capacité du réservoir intermédiaire (mm),
- *CRUIS* pourcentage de ruissellement (%),
- *TP* temps de percolation du réservoir intermédiaire au réservoir souterrain (jours),
- *TB* constante de temps de tarissement de base (écoulement lent) (jours),
- *RUIMAX* constante de tarissement superficiel (écoulement rapide) (mm/jour). C'est la hauteur d'eau telle qu'on observe une vidange total en 1 pas de temps
- *TR* constante de temps de concentration pour l'écoulement rapide (jour),
- *CETP* coefficient de correction de l'évapotranspiration potentiel.

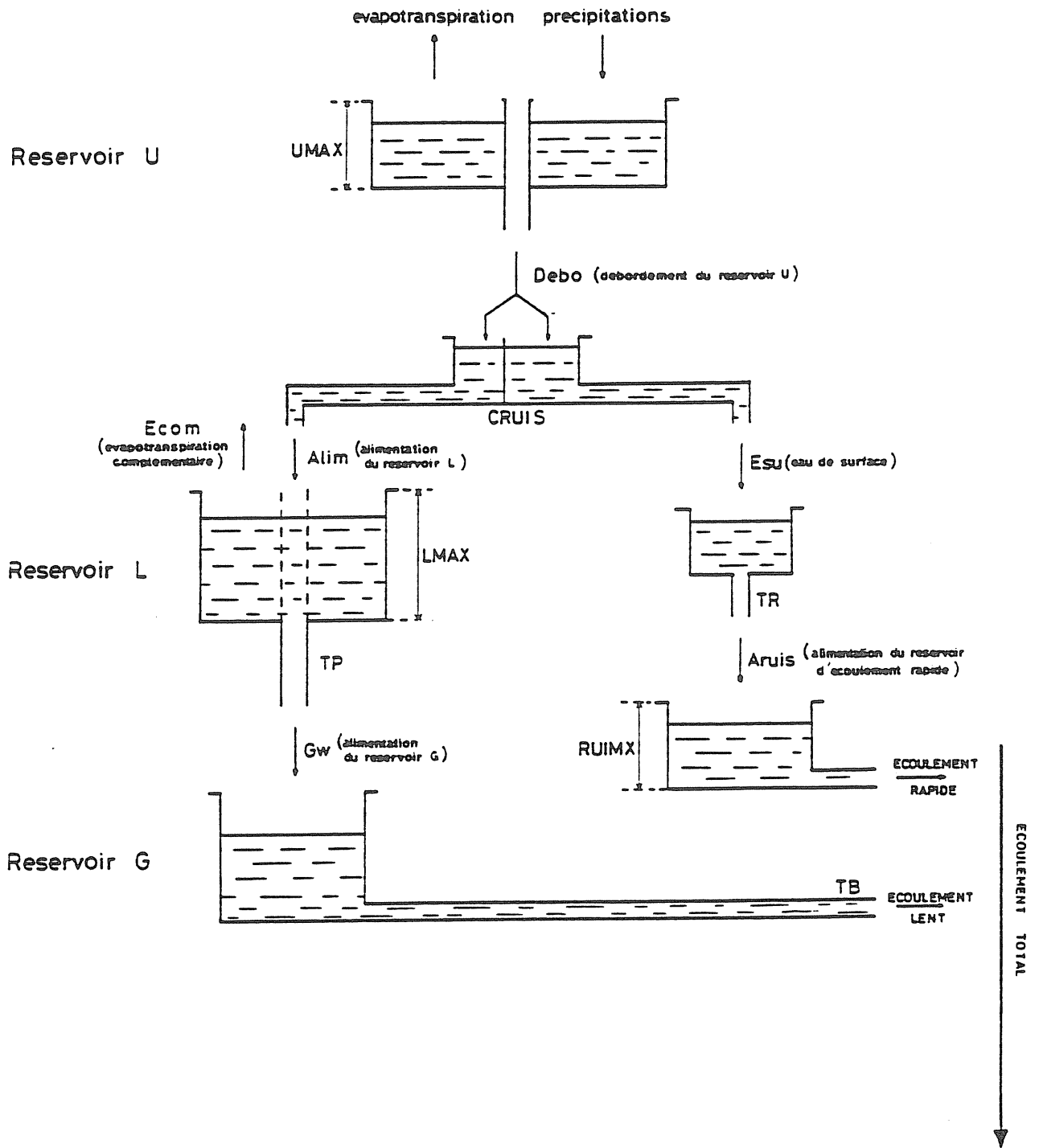
Seuls les six premiers paramètres (en italiques) furent optimisés.

Le calcul des débits est effectué à un pas de temps journalier et composé de deux parties interdépendantes:

- la fonction production qui répartit les précipitations en évapotranspiration et alimentation des deux réservoirs d'écoulement : rapide et lent,
- la fonction de transfert qui assure la vidange de ces deux réservoirs.



Modèle AMANDE



Modèle MARTINE

Annexe III

- Annexe (III.1): Résultats de simulation du modèle GR4J sur les 34 bassins de la Moselle.
Annexe (III.2): Analyses en composantes principales sur les 34 bassins de la Moselle.
Annexe (III.3): Cartes physiographiques u bassin de la Moselle.

Annexe (III.1): Résultats de simulations du modèle GR4J sur les 34 bassins de la Moselle.

BV 01 La Moselle Fresse (A4020610) 71-75 S=69 Pa=1397 ta=11.5

paramètres : 2.01 5.27 .06 -.11 .23
 écarts-types : .53 .08 .05 .05 .31
 corrélations :

1.00 -.23 .06 -.15
 -.23 1.00 -.05 -.56
 .06 -.05 1.00 -.13
 -.15 -.56 -.13 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1975

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 80.7 %
 carré du coefficient de corrélations.: .809
 erreur de bilan (/module M): 5.4 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 82.85 %
 rapport des maximums maximumum: 83.58 %
 rapport des durées où $Q > 4 * M$: 60/54
 rapport des durées où $Q < M/4$: 323/285

BV 03 Moselotte Zainvilliers (A4152010) 73-77 S=183 Pa=1404 ta=11.5

paramètres : 6.26 5.02 -.27 -.50
 écarts-types : .13 .10 .08 .31
 corrélations :

1.00 .10 -.29 -.46
 .10 1.00 -.41 -.53
 -.29 -.41 1.00 .10
 -.46 -.53 .10 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur lapériode : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 81.0 %
 carré du coefficient de corrélations.: .811
 erreur de bilan (/module M): -.8 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 80.68 %
 rapport des maximums maximumum: 70.10 %
 rapport des durées où $Q > 4 * M$: 36/47
 rapport des durées où $Q < M/4$: 29/240

BV 02 La Moselle Rupt (A4050620) 71-75 S=153 Pa=1410 ta=11.5

paramètres : 3.60 5.17 .15 -.16
 écarts-types : .35 .08 .08 .21
 corrélations :

1.00 -.53 -.01 -.14
 -.53 1.00 -.02 -.36
 -.01 -.02 1.00 -.08
 -.14 -.36 -.08 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur lapériode : 1972-1975

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 82.1 %
 carré du coefficient de corrélations.: .822
 erreur de bilan (/module M): 3.6 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 76.92 %
 rapport des maximums maximumum: 68.56 %
 rapport des durées où $Q > 4 * M$: 66/60
 rapport des durées où $Q < M/4$: 378/347

BV 04 Cleurie Cleurie (A4173010) 73-77 S= 66 Pa=1254 ta=11.5

paramètres : 6.43 5.44 -.37 -.28
 écarts-types : .12 .10 .07 .27
 corrélations :

1.00 .22 -.37 -.53
 .22 1.00 -.45 -.54
 -.37 -.45 1.00 .17
 -.53 -.54 .17 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 80.8 %
 carré du coefficient de corrélations.: .808
 erreur de bilan (/module M): -.9 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 87.87 %
 rapport des maximums maximumum: 102.39 %
 rapport des durées où $Q > 4 * M$: 30/34
 rapport des durées où $Q < M/4$: 60/187

BV 05 La Moselle Noir-Gueux (A4200630) 73-77 S=621 Pa=1386 ta=11.5

paramètres : 6.28 5.26 .12 -.17
 écarts-types : .11 .08 .10 .26
 corrélations :
 1.00 .12 -.24 -.47
 .12 1.00 -.30 -.51
 -.24 -.30 1.00 .02
 -.47 -.51 .02 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 85.7 %
 carré du coefficient de corrélations.: .857
 erreur de bilan (/module M): -6 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 82.37 %
 rapport des maximums maximumum: 73.00 %
 rapport des durées où Q>4*M: 52/50
 rapport des durées où Q<M/4: 114/300

BV 06 La Moselle Epinal (A4250640) 73-77 S= 1219 Pa=1403 ta=11.5

paramètres : 6.66 5.33 .16 -.13 9.77
 écarts-types : .10 .08 .10 .23 *
 corrélations :
 1.00 .31 -.16 -.47 -.04
 .31 1.00 -.21 -.63 -.05
 -.16 -.21 1.00 .02 .06
 -.47 -.63 .02 1.00 .11
 -.04 -.05 .06 .11 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 86.5 %
 carré du coefficient de corrélations.: .865
 erreur de bilan (/module M): -8 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 93.10 %
 rapport des maximums maximumum: 118.89 %
 rapport des durées où Q>4*M: 40/42
 rapport des durées où Q<M/4: 76/213

BV 07 Vologne Jarneil (A4362010) 73-77 S=369 Pa=1199 ta=11.5

paramètres : 6.87 5.61 -.05 -.08 9.71
 écarts-types : .09 .08 .09 .19 *
 corrélations :
 1.00 .39 -.04 -.49 -.03
 .39 1.00 -.11 -.70 -.10
 -.04 -.11 1.00 -.00 .12
 -.49 -.70 -.00 1.00 .11
 -.03 -.10 .12 .11 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 87.2 %
 carré du coefficient de corrélations.: .873
 erreur de bilan (/module M): -1.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 103.71 %
 rapport des maximums maximumum: 152.04 %
 rapport des durées où Q>4*M: 15/21
 rapport des durées où Q<M/4: 54/186

BV 08 Durbion Vaxoncourt (A4442010) 73-77 S=144 Pa=786 ta=11.5

paramètres : 6.65 3.45 .01 -.06 -.30
 écarts-types : .09 .10 .07 .13 .88
 corrélations :
 1.00 -.06 .05 -.35 .35
 -.06 1.00 -.08 -.54 .13
 .05 -.08 1.00 -.02 .07
 -.35 -.54 -.02 1.00 -.02
 .35 13 .07 -.02 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 80.3 %
 carré du coefficient de corrélations.: .803
 erreur de bilan (/module M): -1.0 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 93.71 %
 rapport des maximums maximumum: 161.51 %
 rapport des durées où Q>4*M: 54/68
 rapport des durées où Q<M/4: 237/362

BV 09 Avière Frizon-Basse (A4632010) 73-77 S=104 Pa=760 ta=11.5

paramètres : 6.72 3.38 -0.05 -0.03 -0.79
 écarts-types : .06 .08 .05 .08 .65
 corrélations :
 1.00 -0.03 -0.06 -0.30 .39
 -0.03 1.00 -0.11 -0.61 .05
 -0.06 -0.11 1.00 -0.00 .06
 -0.30 -0.61 -0.00 1.00 .11
 .39 .05 .060 .11 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 80.5 %
 carré du coefficient de corrélations.: .805
 erreur de bilan (/module M): 1.1 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 96.82 %
 rapport des maximums maximumum: 148.07 %
 rapport des durées où Q>4*M: 58/65
 rapport des durées où Q<M/4: 299/163

BV 11 Brenon Autry/Madon (A5422010) 73-77 S=142 Pa=643 ta=11.5

paramètres : 5.35 3.79 -0.08 .16
 écarts-types : .09 .12 .08 .10
 corrélations :

1.00 -0.21 -0.04 -0.64
 -0.21 1.00 -0.25 -0.31
 -0.04 -0.25 1.00 -0.08
 -0.64 -0.31 -0.08 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 79.8 %
 carré du coefficient de corrélations.: .798
 erreur de bilan (/module M): 1.4 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 81.61 %
 rapport des maximums maximumum: 105.38 %
 rapport des durées où Q>4*M: 79/74
 rapport des durées où Q<M/4: 635/725

BV 10 Madon Mirecourt (A5251010) 73-77 S=383 Pa=721 ta=11.5

paramètres : 5.86 3.75 .15 .06
 écarts-types : .04 .06 .06 .05
 corrélations :

1.00 -0.02 -0.16 -0.43
 -0.02 1.00 -0.15 -0.51
 -0.16 -0.15 1.00 -0.09
 -0.43 -0.51 -0.09 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 88.4 %
 carré du coefficient de corrélations.: .887
 erreur de bilan (/module M): 3.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 103.23 %
 rapport des maximums maximumum: 113.92 %
 rapport des durées où Q>4*M: 67/65
 rapport des durées où Q<M/4: 468/422

BV 12 Madon Pligny (A5431010)1973-1977 S=941 Pa=707 ta=11.5

paramètres : 5.75 3.60 .45 .19
 écarts-types : .05 .08 .02 .05
 corrélations :

1.00 .22 -0.30 -0.60
 .22 1.00 -0.66 -0.49
 -0.30 -0.66 1.00 .19
 -0.60 -0.49 .19 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 89.1 %
 carré du coefficient de corrélations.: .892
 erreur de bilan (/module M): 5.1 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 94.68 %
 rapport des maximums maximumum: 116.81 %
 rapport des durées où Q>4*M: 74/71
 rapport des durées où Q<M/4: 584/542

BV 13 La Moselle Toul (A5730610) 73-77S=3340 Pa=969 ta=11.5

paramètres : 6.20 4.82 .61 -.08
 écarts-types : .07 .07 .04 .11
 corrélations :

1.00 .07 .05 -.57
 .07 1.00 -.33 -.40
 .05 -.33 1.00 .04
 -.57 -.40 .04 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur lapériode : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 91.3 %
 carré du coefficient de corrélations: .914
 erreur de bilan (/module M): -1.5 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 97.75 %
 rapport des maximums maximumum: 137.84 %
 rapport des durées où Q>4*M: 32/37
 rapport des durées où Q<M/4: 137/273

BV 14 Terrouine Villy st Etienne (A5842010) 70-76 S=169 Pa=637 ta=11.5

paramètres : 5.94 3.32 .47 .22
 écarts-types : .06 .09 .03 .04
 corrélations :

1.00 -.05 .42 -.45
 -.05 1.00 -.48 -.59
 .42 -.48 1.00 .13
 -.45 -.59 .13 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1971-1976

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 70.8 %
 carré du coefficient de corrélations: .708
 erreur de bilan (/module M): -4.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 90.94 %
 rapport des maximums maximumum: 131.80 %
 rapport des durées où Q>4*M: 113/126
 rapport des durées où Q<M/4: 698/1120

BV 16 La Meurthe Saint-Die (A6051020) 73-77 S=369 Pa=1071 ta=11.5

paramètres : 6.77 5.29 .26 -.25 -9.97
 écarts-types : .06 .08 .09 .13
 corrélations :

1.00 .06 -.16 -.33
 .06 1.00 -.04 -.67
 -.16 -.04 1.00 -.05
 -.33 -.67 -.05 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée,e): 85.4 %
 carré du coefficient de corrélations: .854
 erreur de bilan (/module M): 1.4 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 96.26 %
 rapport des maximums maximumum: 99.40 %
 rapport des durées où Q>4*M: 32/36
 rapport des durées où Q<M/4: 105/161

BV 17 Meurthe Moyennouthier(A6142010)73-77 S=151 Pa=1086 ta=11.5

paramètres : 6.40 5.41 -.18 -.30
 écarts-types : .08 .07 .10 .14
 corrélations :

1.00 .14 -.14 -.65
 .14 1.00 -.17 -.43
 -.14 -.17 1.00 .07
 -.65 -.43 .07 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 82.2 %
 carré du coefficient de corrélations: .822
 erreur de bilan (/module M): -1.4 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 87.13 %
 rapport des maximums maximumum: 180.71 %
 rapport des durées où Q>4*M: 10/19
 rapport des durées où Q<M/4: 2/60

BV 18 Meurthe Damelevières (A6271010) 73-77 S=2288 Pa=1054 ta=11.3

paramètres : 6.17 4.90 .55 .09
 écarts-types : .04 .05 .03 .06
 corrélations :
 1.00 .09 .04 -0.42
 .09 1.00 -0.22 -0.66
 .04 -0.22 1.00 .04
 -0.42 -0.66 .04 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 92.4 %
 carré du coefficient de corrélations.: .925
 erreur de bilan (/module M): -.5 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 95.61 %
 rapport des maximums maximum: 134.29 %
 rapport des durées où Q>4*M: 42/39
 rapport des durées où Q<M/4: 168/205

BV 19 La Plaine Trouche (A6332010) 73-77 S=116 Pa=916 ta=11.5

paramètres : 6.36 5.38 .07 -0.22
 écarts-types : .07 .06 .10 .11
 corrélations :
 1.00 .13 -0.17 -0.64
 .13 1.00 -0.15 -0.45
 -0.17 -0.15 1.00 .11
 -0.64 -0.45 .11 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 85.2 %
 carré du coefficient de corrélations.: .852
 erreur de bilan (/module M): -.5 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 60.28 %
 rapport des maximums maximum: 130.53 %
 rapport des durées où Q>4*M: 8/19
 rapport des durées où Q<M/4: 17/95

BV 20 Vezouze Luneville (A6561110) 73-77 S=559 Pa=696 ta=11.5

paramètres : 5.51 3.59 .70 -0.12
 écarts-types : .05 .07 .04 .06
 corrélations :
 1.00 -0.37 .08 -0.56
 -0.37 1.00 -0.09 -0.04
 .08 -0.09 1.00 -0.06
 -0.56 -0.04 -0.06 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 85.3 %
 carré, du coefficient de corrélations.: .854
 erreur de bilan (/module M): 2.3 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 93.69 %
 rapport des maximums maximum: 116.11 %
 rapport des durées où Q>4*M: 43/53
 rapport des durées où Q<M/4: 262/220

BV 21 Mortagne Autry st Helène (A6621210) 73-77 S=98 Pa=907 ta=11.5

paramètres : 6.45 5.53 -0.11 -0.20 9.77
 écarts-types : .05 .06 .09 .08 *
 corrélations :
 1.00 .13 -0.03 -0.63 -0.09
 .13 1.00 -0.13 -0.44 .01
 -0.03 -0.13 1.00 .01 -0.04
 -0.63 -0.44 .01 1.00 .12
 -0.09 .01 -0.04 .12 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 87.2 %
 carré du coefficient de corrélations.: .872
 erreur de bilan (/module M): -2 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 36.71 %
 rapport des maximums maximum: 124.69 %
 rapport des durées où Q>4*M: 7/13
 rapport des durées où Q<M/4: 27/46

BV 22 Mortagne Gerbevillier (A6731220) 73-77 S= 495 Pa=807 ta=11.5

paramètres : 6.47 4.58 -0.09 .24
 écarts-types : .07 .09 .10 .09
 corrélations :
 1.00 .12 .06 -.42
 .12 1.00 .10 -.65
 .06 .10 1.00 -.27
 -.42 -.65 -.27 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 82.4 %
 carré du coefficient de corrélations.: .826
 erreur de bilan (/module M): 1.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 87.16 %
 rapport des maximums maximum: 143.24 %
 rapport des durées où Q>4*M: 41/54
 rapport des durées où Q<M/4: 242/235

BV 23 Sanon La Garde (A6812010) 73-77 S=72 Pa=730 ta=11.5

paramètres : 5.35 3.01 -1.10 -.04
 écarts-types : .06 .11 .05 .07
 corrélations :
 1.00 -.38 -.13 -.40
 -.38 1.00 -.29 -.24
 -.13 -.29 1.00 .06
 -.40 -.24 .06 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 79.1 %
 carré du coefficient de corrélations.: .795
 erreur de bilan (/module M): 7.0 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 84.48 %
 rapport des maximums maximum: 110.94 %
 rapport des durées où Q>4*M: 58/54
 rapport des durées où Q<M/4: 574/264

BV 25 Meurthe Malzeville (A6941010) 73-77 S=2914 Pa=823 ta=11.5

paramètres : 5.84 4.48 .70 -.07
 écarts-types : .03 .04 .03 .04
 corrélations, lations :
 1.00 -.18 -.02 -.58
 -.18 1.00 -.16 -.24
 -.02 -.16 1.00 .09
 -.58 -.24 .09 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 94.9 %
 carré du coefficient de corrélations.: .949
 erreur de bilan (/module M): 7.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 96.05 %
 rapport des maximums maximum: 108.11 %
 rapport des durées où Q>4*M: 35/39
 rapport des durées où Q<M/4: 134/211

BV 26 Amzule Lay St Christophe (A6953010) 73-77 S=85 Pa=613 ta=11.5

paramètres : 5.78 3.84 .02 .16
 écarts-types : .06 .11 .09 .07
 corrélations :
 1.00 .13 -.20 -.58
 .13 1.00 -.17 -.60
 -.20 -.17 1.00 .02
 -.58 -.60 .02 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 79.2 %
 carré du coefficient de corrélations.: .792
 erreur de bilan (/module M): 1.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 85.71 %
 rapport des maximums maximum: 104.06 %
 rapport des durées où Q>4*M: 61/89
 rapport des durées où Q<M/4: 407/612

BV 27 Esch Jezainville (A7122010) 73-77 S=229 Pa=631 ta=11.5

paramètres : 5.93 5.32 .43 .86
 écarts-types : .04 .06 .05 .05
 corrélations :

1.00 -.35 .14 -.56
 -.35 1.00 -.19 -.31
 .14 -.19 1.00 -.06
 -.56 -.31 -.06 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 84.3 %
 carré du coefficient de corrélations.: .844
 erreur de bilan (/module M): -3.6 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 90.99 %
 rapport des maximums maximumum: 147.20 %
 rapport des durées où Q>4*M: 43/74
 rapport des durées où Q<M/4: 342/554

BV 29 Pt de Seille Château Salin (A7642010)73-77 S=143 Pa=630 ta=11.5

paramètres : 6.02 4.25 .31 -.01
 écarts-types : .04 .08 .08 .05
 corrélations :

1.00 -.02 -.12 -.49
 -.02 1.00 -.24 -.53
 -.12 -.24 1.00 .01
 -.49 -.53 .01 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 88.3 %
 carré, du coefficient de corrélations.: .884
 erreur de bilan (/module M): -.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 96.65 %
 rapport des maximums maximumum: 97.61 %
 rapport des durées où Q>4*M: 29/42
 rapport des durées où Q<M/4: 176/148

BV 28 Rupt de Mad Onville (A7352010) 73-77 S=372 Pa=627 ta=11.5

paramètres : 5.89 4.83 .39 .43
 écarts-types : .04 .08 .04 .07
 corrélations :

1.00 -.07 -.16 -.50
 -.07 1.00 -.26 -.49
 -.16 -.26 1.00 .03
 -.50 -.49 .03 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

dur, e de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 83.0 %
 carré du coefficient de corrélations.: .834
 erreur de bilan (/module M): 1.5 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 77.37 %
 rapport des maximums maximumum: 101.85 %
 rapport des durées où Q>4*M: 41/57
 rapport des durées où Q<M/4: 403/362

BV 30 Seille Nomeny (A7821010) 73-77 S=923 Pa=614 ta=11.5

paramètres : 5.89 4.35 .68 .12
 écarts-types : .05 .10 .05 .06
 corrélations :

1.00 .14 .04 -.59
 .14 1.00 -.08 -.63
 .04 -.08 1.00 -.07
 -.59 -.63 -.07 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 85.7 %
 carré du coefficient de corrélations.: .858
 erreur de bilan (/module M): -2.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 118.35 %
 rapport des maximums maximumum: 137.59 %
 rapport des durées où Q>4*M: 37/69
 rapport des durées où Q<M/4: 241/304

BV 31 Seille Metz Pt de Loth (A7881010) 73-77 S=1269 Pa=614 ta=11.5

paramètres : 5.80 4.25 .64 .18
 écarts-types : .05 .09 .05 .06
 corrélations :

1.00 .18 .08 -.63
 .18 1.00 -.03 -.63
 .08 -.03 1.00 -.17
 -.63 -.63 -.17 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 86.6 %
 carré du coefficient de corrélations.: .866
 erreur de bilan (/module M): -2.2 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 104.08 %
 rapport des maximums maximum: 147.46 %
 rapport des durées où Q>4*M: 49/78
 rapport des durées où Q<M/4: 278/299

BV 32 Moselle Hauconcourt (A7930610) 73-77 S=9387 Pa=814 ta=11.5

paramètres : 6.34 4.81 .82 -.01
 écarts-types : .04 .05 .04 .06
 corrélations :

1.00 .19 .18 -.45
 .19 1.00 -.07 -.65
 .18 -.07 1.00 .04
 -.45 -.65 .04 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

dur de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 92.3 %
 carré du coefficient de corrélations.: .923
 erreur de bilan (/module M): -1.9 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 102.64 %
 rapport des maximums maximum: 148.80 %
 rapport des durées où Q>4*M: 28/39
 rapport des durées où Q<M/4: 125/235

BV 33 Yron Cartoucherie (A8122010) 73-77 S=337 Pa=629 ta=11.5

paramètres : 5.76 3.63 .37 .26
 écarts-types : .07 .13 .05 .08
 corrélations :

1.00 -.08 -.32 -.62
 -.08 1.00 -.72 -.39
 -.32 -.72 1.00 .43
 -.62 -.39 .43 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 86.5 %
 carré du coefficient de corrélations.: .868
 erreur de bilan (/module M): 9.9 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 88.21 %
 rapport des maximums maximum: 78.59 %
 rapport des durées où Q>4*M: 59/55
 rapport des durées où Q<M/4: 619/472

BV 34 Waigot Briey (A8322010) 73-77 S=76 Pa=705 ta=11.5

paramètres : 5.38 5.36 -.23 -.47
 écarts-types : .11 .18 .15 .09
 corrélations :

1.00 -.68 -.01 -.74
 -.68 1.00 -.35 .32
 -.01 -.35 1.00 .00
 -.74 .32 .00 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 76.7 %
 carré du coefficient de corrélations.: .769
 erreur de bilan (/module M): 1 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 37.33 %
 rapport des maximums maximum: 70.09 %
 rapport des durées où Q>4*M: 10/16
 rapport des durées où Q<M/4: 72/146

BV 35 L'Orne Rosselange (A8431010) 73-77 S=1226 Pa=680 ta=11.5

paramètres : 5.86 4.23 .45 .15
 écarts-types : .04 .07 .02 .05

corrélations :

1.00 .20 -.51 -.54
 .20 1.00 -.48 -.65
 -.51 -.48 1.00 .37
 -.54 -.65 .37 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la p.période : 1974-1977

dur, e de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée): 90.4 %
 carré du coefficient de corrélations.: .905
 erreur de bilan (/module M): 2.9 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 93.86 %
 rapport des maximums maximorum: 92.94 %
 rapport des durées où $Q > 4 * M$: 50/64
 rapport des durées où $Q < M/4$: 384/304

BV 36 Canner Koenigsmaker (A8732010) 73-77 S=110 Pa=652 ta=11.5

paramètres : 5.94 4.31 .31 .20
 écarts-types : .03 .06 .07 .04

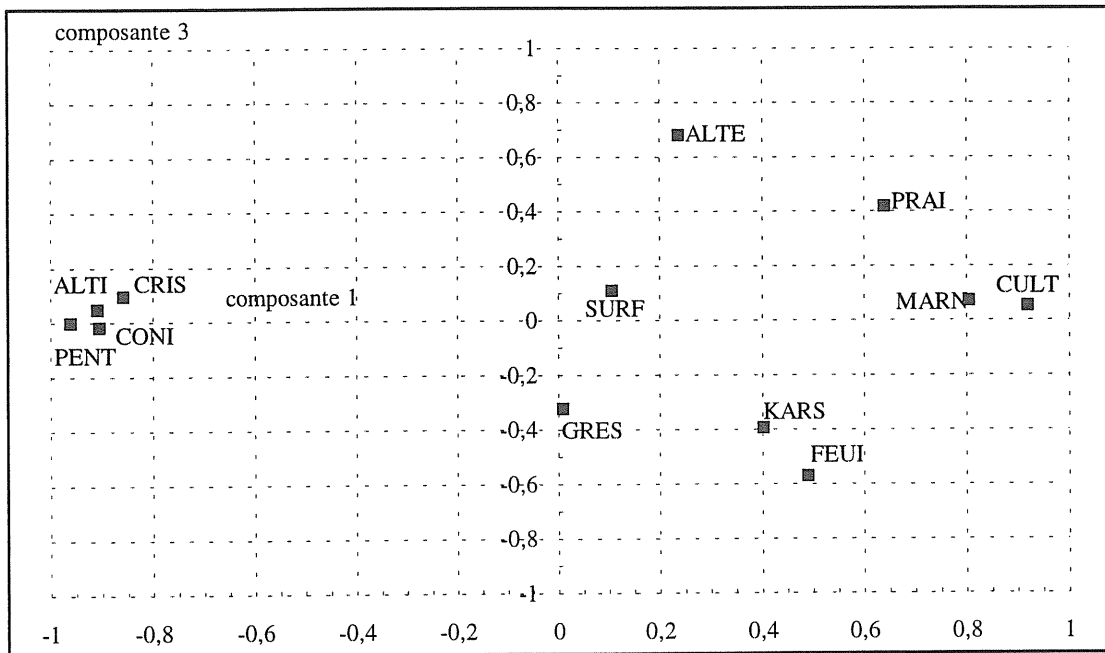
corrélations :

1.00 -.26 -.25 -.47
 -.26 1.00 -.33 -.33
 -.25 -.33 1.00 .08
 -.47 -.33 .08 1.00

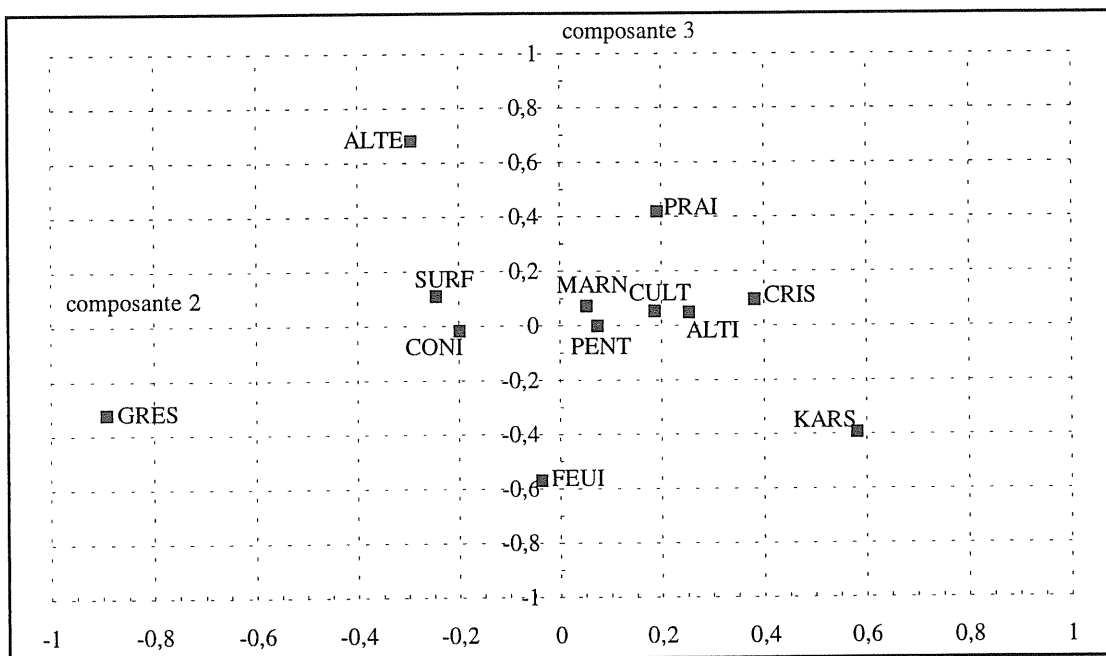
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977

durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée,e): 81.3 %
 carré du coefficient de corrélations.: .814
 erreur de bilan (/module M): 3.9 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 83.38 %
 rapport des maximums maximorum: 79.02 %
 rapport des durées où $Q > 4 * M$: 48/47
 rapport des durées où $Q < M/4$: 395/233

Annexe (III.2):Analyse en composantes principales sur les 34 bassins de la Moselle.

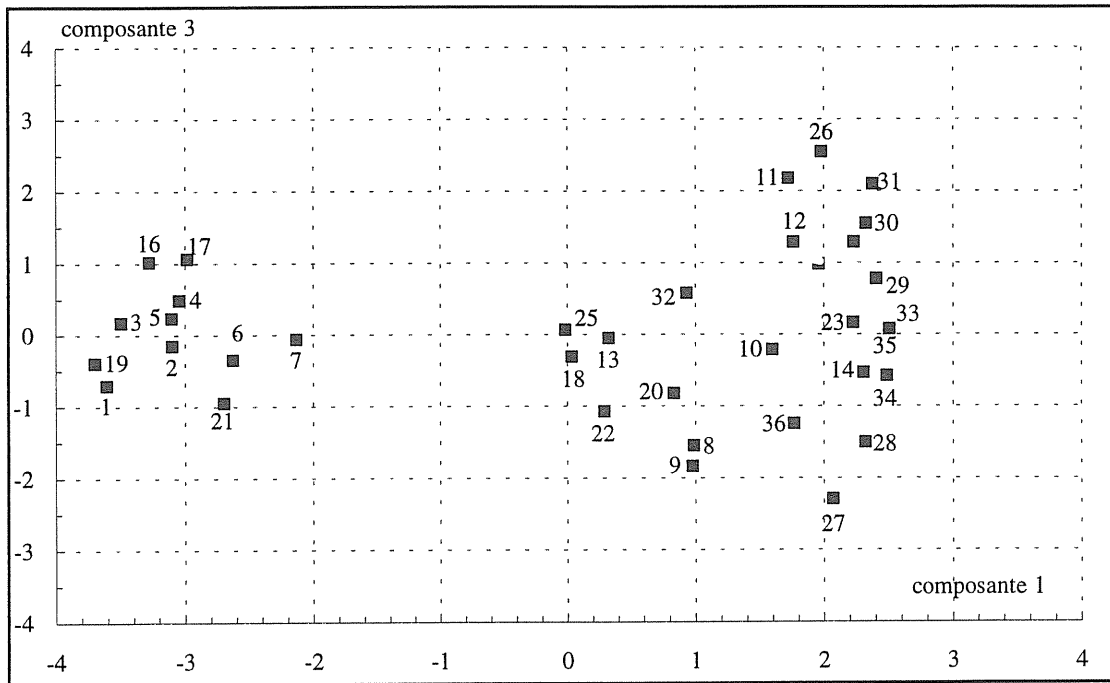


Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 1 et 3.

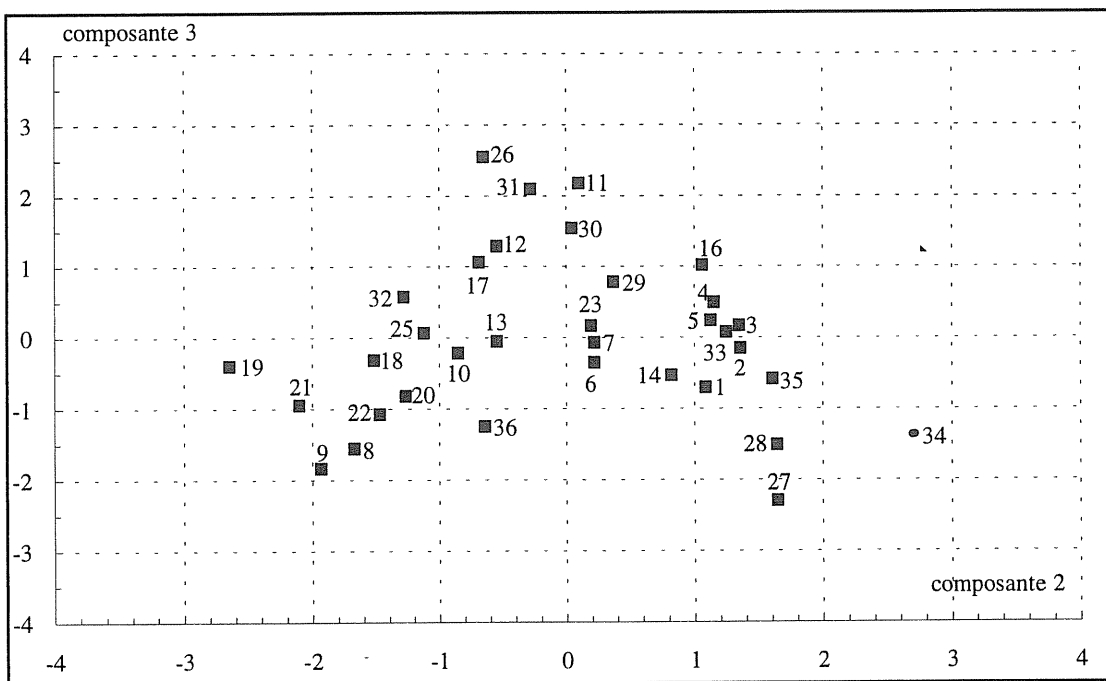


Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 2 et 3.

C

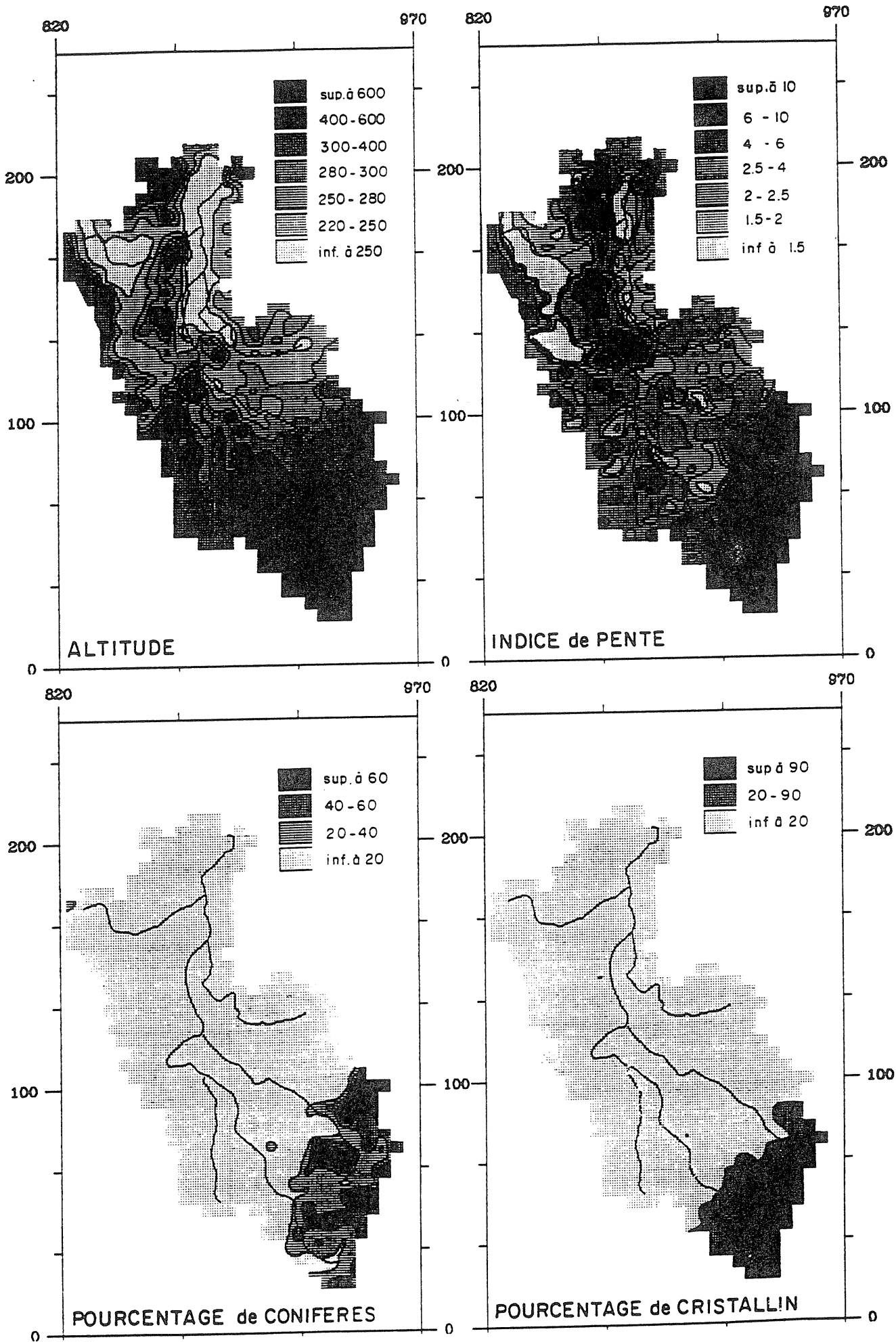


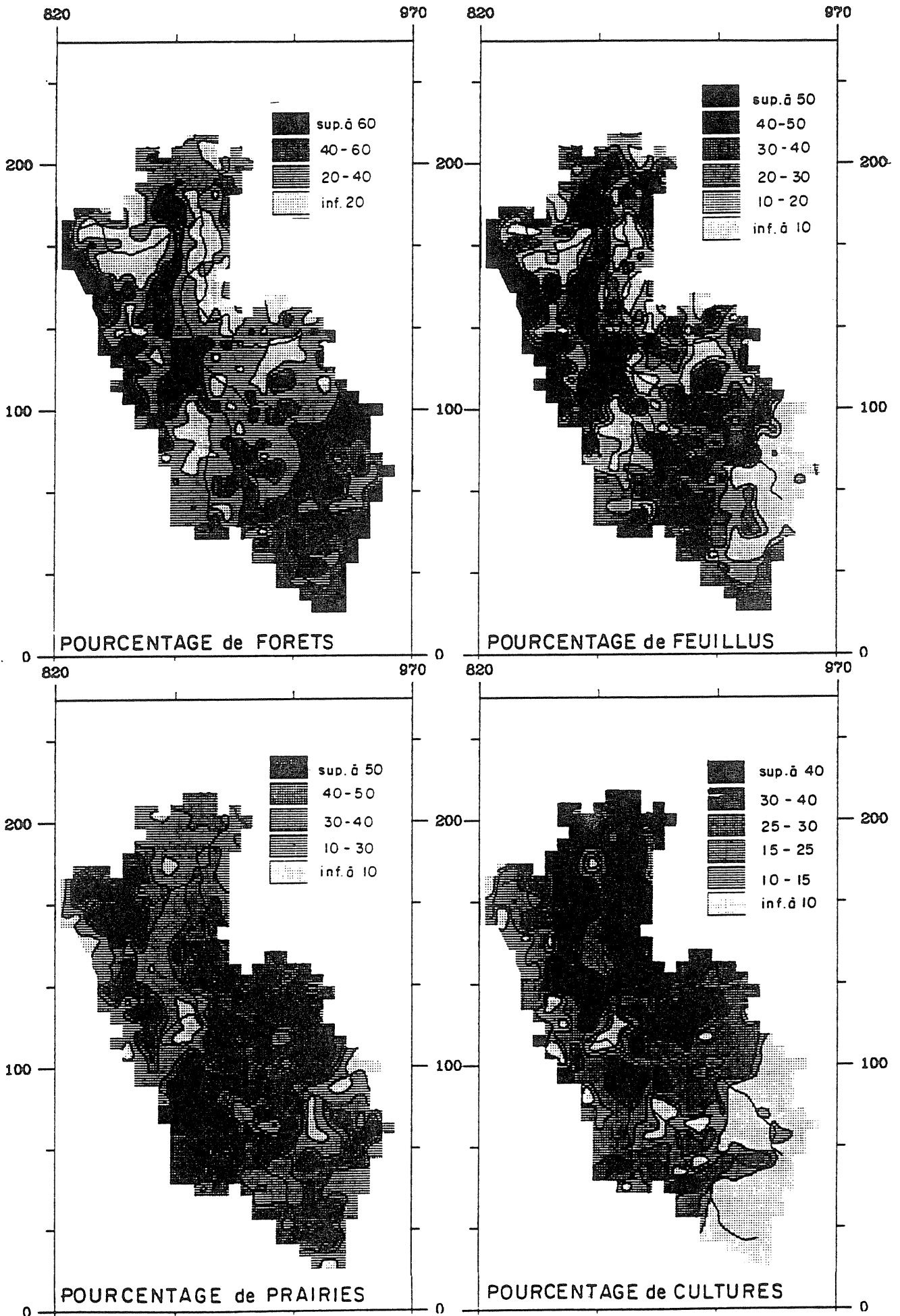
Projection des bassins dans le plan 1 et 3.

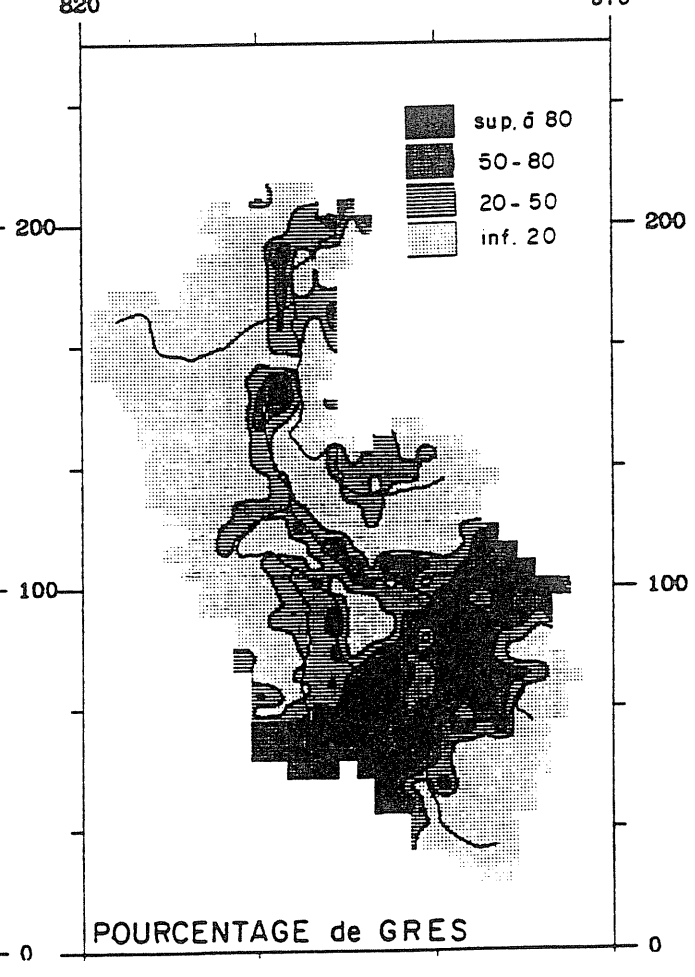
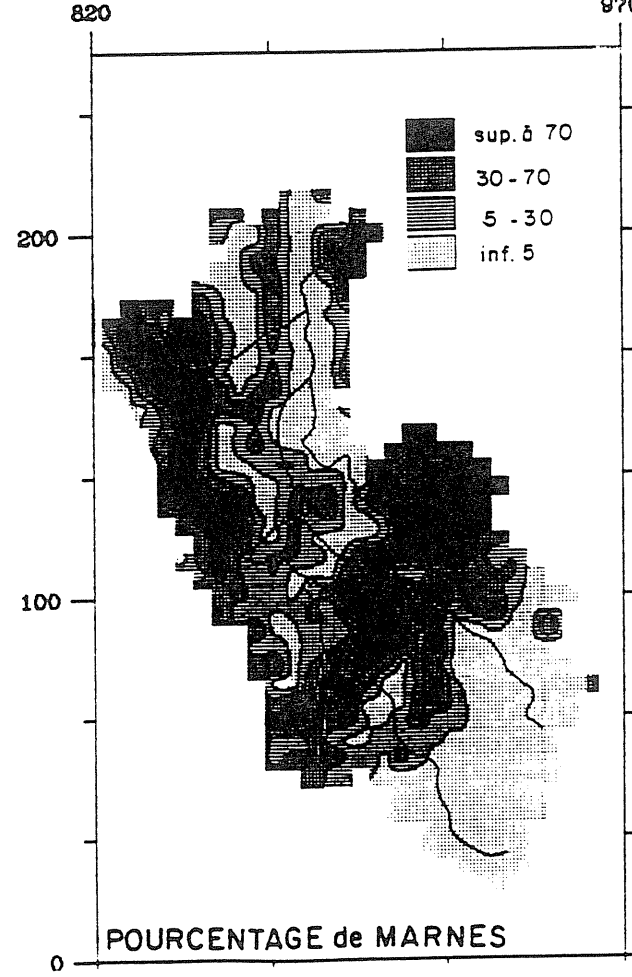
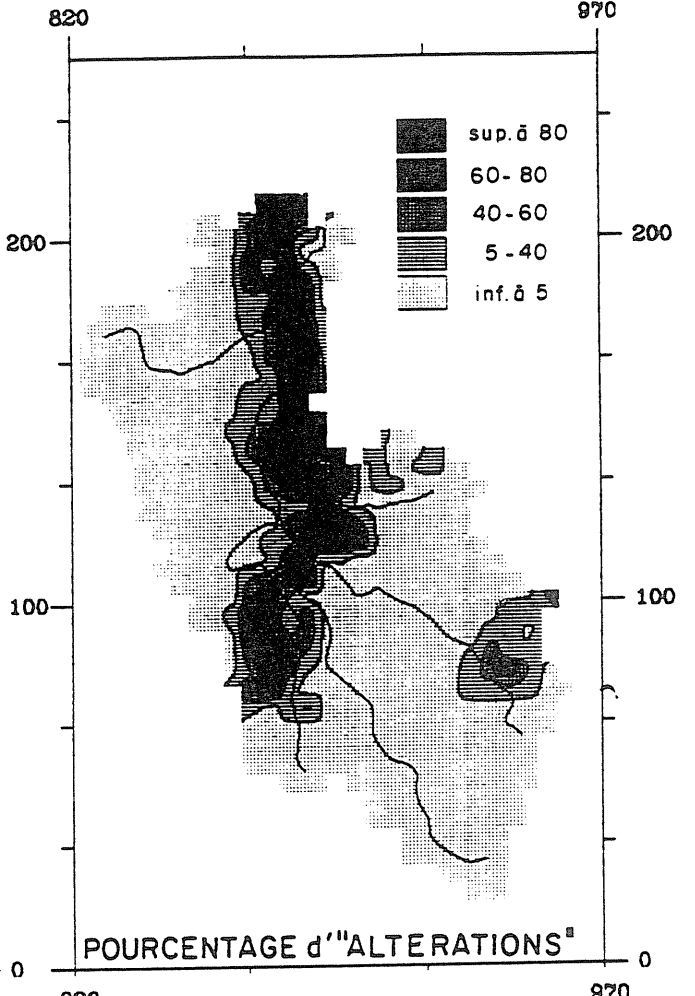
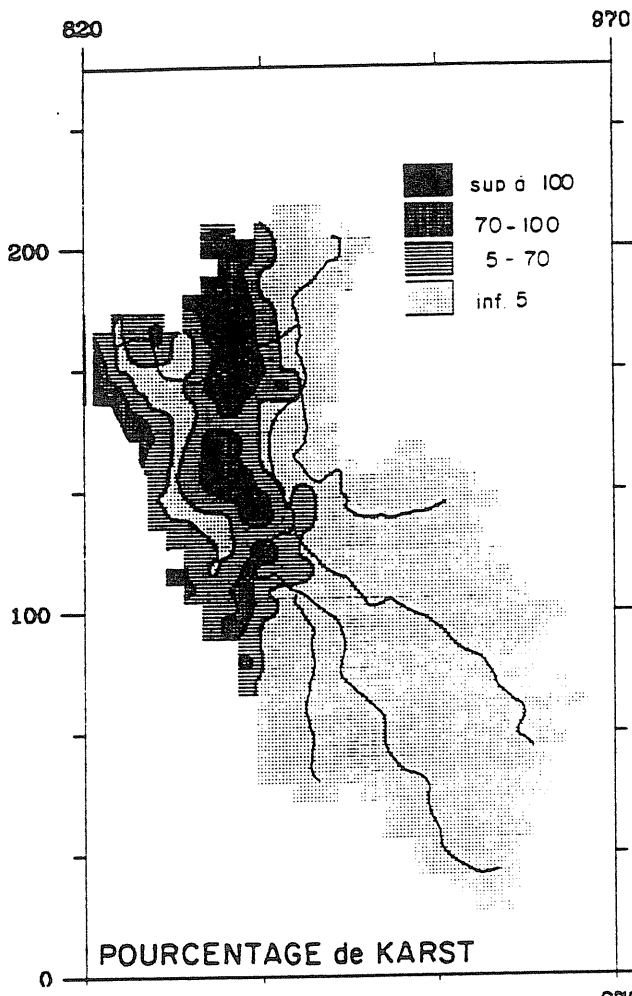


Projection des bassins dans le plan 2 et 3.

Annexe (III.3): Fichier physiographique du bassin de la Moselle







Annexe IV

Annexe (IV.1): Résultats de simulation du modèle GR4J sur les 34 bassins de la Moselle.

Annexe (IV.1): Résultats de simulation du modèle GR4J sur les 34 bassins de la Moselle.

BV 01 La Moselle à Fresse S=69					
paramètres :	.00	5.28	-15	1.44	.73
écarts-types :	1.80	.08	.04		.14
corrélations :					
	1.00	-.23	.16	-.20	-.08
	-.23	1.00	-.05	-.62	-.11
	.16	-.05	1.00	-.21	-.06
	-.20	-.62	-.21	1.00	.16
	-.08	-.11	-.06	.16	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1975					
durée de mise en route.....:					365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:					85.5 %
carré du coefficient de corrélation.:					.859
erreur de bilan (/module M)					6.8 %
rappor des crues annuelles moyennes:					85.09 %
rappor des maximums maximum					78.77 %
rappor des durées ou $Q>4^*M$:			63/54		
rappor des durées ou $Q<M/4$					475/285

BV 02 La Moselle à Rupt S=153					
paramètres :	.88	5.31	.09	1.28	.72
écarts-types :	.96	.07	.07	.16	.01
corrélations :					
	1.00	-.25	.06	-.18	-.10
	-.25	1.00	.07	-.61	-.07
	.06	.07	1.00	-.29	-.08
	-.18	-.61	-.29	1.00	.13
	-.10	-.07	-.08	.13	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1975					
durée de mise en route.....:					365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:					85.8 %
carré du coefficient de corrélation.:					.860
erreur de bilan (/module M)					3.5 %
rappor des crues annuelles moyennes:					76.19 %
rappor des maximums maximum					63.48 %
rappor des durées ou $Q>4^*M$:					66/60
rappor des durées ou $Q<M/4$					448/347

BV 03 Le Moselotte à Zainvilliers S=183					
paramètres :	7.69	5.18	-23	.00	.89
écarts-types :	.19	.08	.07	.23	.11
corrélations :					
	1.00	.19	.00	-.02	.22
	.19	1.00	-.22	-.43	.31
	.00	-.22	1.00	.02	.13
	-.02	-.43	.02	1.00	.01
	.22	.14	.14	.27	1.00
	.26	.31	.13	.01	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....:					365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:					86.7 %
carré du coefficient de corrélation.:					.868
erreur de bilan (/module M) .....					.5 %
rappor des crues annuelles moyennes:					76.78 %
rappor des maximums maximum.....:					65.05 %
rappor des durées ou $Q>4^*M$:			41/47		
rappor des durées ou $Q<M/4$					155/240

BV 04 Cleurie à Cleurie S=66					
paramètres :	8.42	5.69	-36	.51	.94
écarts-types :	.31	.09	.06	.21	.04
corrélations :					
	1.00	.39	.05	.23	-.14
	.39	1.00	-.18	-.33	.09
	.05	-.18	1.00	-.10	.03
	.23	-.33	-.10	1.00	.43
	-.14	.09	.03	.43	1.00
	.07	.06	.03	.10	.05
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....:					365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:					86.0 %
carré, du coefficient de corrélation.:					.861
erreur de bilan (/module M)					-.9 %
rappor des crues annuelles moyennes:					82.79 %
rappor des maximums maximum					86.41 %
rappor des durées ou $Q>4^*M$:			25/34		
rappor des durées ou $Q<M/4$					93/187

BV 05 La Moselle à Noir-Gueux S=621	
paramètres :	8.57 5.36 .19 .78 .93
écarts-types :	.27 .06 .08 .17 .03
corrélations :	
	1.00 .21 .07 .30 .03 .23
	.21 1.00 -.06 -.36 .07 .23
	.07 -.06 1.00 -.05 .18 .03
	.30 -.36 -.05 1.00 .53 .08
	.03 .07 .18 .53 1.00 -.09
	.23 .23 .03 .08 -.09 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée,e)	91.4 %
carré du coefficient de corrélation:	.914
erreur de bilan (/module M) .....	.6 %
rapport des crues annuelles moyennes:	81.60 %
rapport des maximums maximorum.....:	67.56 %
rapport des durées ou $Q>4*M$:	54/50
rapport des durées ou $Q<M/4$	228/300

BV 06 La Moselle à Epinal S=1219	
paramètres :	8.04 5.54 .18 .86 .96
écarts-types :	.17 .05 .08 .13 .05
corrélations :	
	1.00 .15 .13 .19 -.15 .28
	.15 1.00 -.01 -.52 -.03 .11
	.13 -.01 1.00 -.06 .14 .07
	.19 -.52 -.06 1.00 .43 .25
	-.15 -.03 .14 .43 1.00 .01
	.28 .11 .07 .25 .01 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route.....:	365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:	91.8 %
carré du coefficient de corrélation:	.919
erreur de bilan (/module M) .....	.2 %
rapport des crues annuelles moyennes:	93.16 %
rapport des maximums maximorum.....:	109.94 %
rapport des durées ou $Q>4*M$:	43/42
rapport des durées ou $Q<M/4$	183/213

BV 07 Vologne à Jarrenil S=369	
paramètres :	.64 7.58 5.81 .01 .28.91
écarts-types :	.02 .15 .08 .09 .14.05
corrélations :	
	1.00 .48 .13 -.03 -.18 .51
	.48 1.00 .12 -.51 -.01 .28
	.13 .12 1.00 -.21 .00 .02
	-.03 -.51 -.21 1.00 .29 .24
	-.18 -.01 .00 .29 1.00 -.18
	.51 .28 .02 .24 -.18 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route.....:	365 jours
critère de Nash(var. expliquée,e)	90.0 %
carré du coefficient de corrélation:	.900
erreur de bilan (/module M)	-1.8 %
rapport des crues annuelles moyennes:	102.37 %
rapport des maximums maximorum	151.58 %
rapport des durées ou $Q>4*M$:	22/21
rapport des durées ou $Q<M/4$	69/186

BV 08 Durbion à Vaxoncourt S=144	
paramètres :	6.79 3.54 -.03 .02 .53
écarts-types :	.10 .10 .07 .09 .17
corrélations :	
	1.00 -.06 .14 -.05 .26 .45
	-.06 1.00 -.08 -.49 .06 -.01
	.14 -.08 1.00 -.09 .05 .04
	-.05 -.49 1.00 .25 .38
	.26 .06 .05 .25 1.00 .12
	.45 -.01 .04 .38 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	80.3 %
carré du coefficient de corrélation:	.803
erreur de bilan (/module M)	2.0 %
rapport des crues annuelles moyennes:	92.70 %
rapport des maximums maximorum	163.32 %
rapport des durées ou $Q>4*M$:	55/68
rapport des durées ou $Q<M/4$	336/362

BV 09 Avière à Frizon-Basse S=104	
paramètres :	6.88 3.46 -0.05 .08 .37
écarts-types :	.08 .08 .05 .06 .12
corrélations :	
	1.00 -.01 .03 -.10 .39 .41
	-.01 1.00 -.11 -.52 .04 .03
	.03 -.11 1.00 -.10 .07 -.04
	-.10 -.52 1.00 .21 .33
	.39 .04 .07 .21 1.00 .07
	.41 .03 -.04 .33 .07 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	80.7 %
carré du coefficient de corrélation.:	.808
erreur de bilan (/module M)	3.7 %
rapport des crues annuelles moyennes:	97.17 %
rapport des maximums maximorum	140.80 %
rapport des durées où Q>4*M.....	55/65
rapport des durées où Q<M/4	385/163

BV 10 Madon à Mirecourt S=383	
paramètres :	5.86 3.75 .15 .06 .00
écarts-types :	.04 .06 .06 .06 .05
corrélations :	
	1.00 -.05 -.24 -.23 .38
	-.05 1.00 -.12 -.50 -.08
	-.24 -.12 1.00 -.16 -.23
	-.23 -.50 1.00 .37 1.00
	.38 -.08 -.23 .37 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	88.4 %
carré du coefficient de corrélation.:	.887
erreur de bilan (/module M)	3.7 %
rapport des crues annuelles moyennes:	103.23 %
rapport des maximums maximorum	113.92 %
rapport des durées où Q>4*M.....	67/65
rapport des durées où Q<M/4	468/422

BV 11 Brenon à Autry/Madon S=142	
paramètres :	5.35 3.79 -0.08 .16
écarts-types :	.08 .12 .07 .10
corrélations :	
	1.00 -.22 -.06 -.59 .16
	-.22 1.00 -.23 -.33 -.13
	-.06 -.23 1.00 -.10 -.10
	-.59 -.33 -.10 1.00 .20
	.16 -.13 -.10 .20 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....	79.8 %
carré du coefficient de corrélation.:	.798
erreur de bilan (/module M)	1.4 %
rapport des crues annuelles moyennes:	81.61 %
rapport des maximums maximorum	105.38 %
rapport des durées où Q>4*M.....	79/74
rapport des durées où Q<M/4	635/725

BV 12 Madon à Pilligny S=941	
paramètres :	5.90 3.63 .44 .26 .40
écarts-types :	.05 .09 .02 .05 .05
corrélations :	
	1.00 .36 -.26 -.47 .50
	.36 1.00 -.60 -.45 .38
	-.26 -.60 1.00 .18 .04
	-.47 -.45 1.00 .04
	.50 .38 .04 .04 1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977	
durée de mise en route	365 jours
critère de Nash(var. expliquée)	89.4 %
carré, du coefficient de corrélation.:	.895
erreur de bilan (/module M)	3.9 %
rapport des crues annuelles moyennes:	93.42 %
rapport des maximums maximorum	112.30 %
rapport des durées où Q>4*M.....	74/71
rapport des durées où Q<M/4	588/542

BV 13 La Moselle à Toul S=3340			
paramètres :	6.81	4.96	.61
écarts-types :	.09	.07	.04
corrélations :			
	1.00	.29	-.09
	.29	1.00	-.55
	-.03	-.34	1.00
	-.09	1.00	-.55
	.09	-.03	1.00
	.56	.23	1.00
		.15	.22
		-.03	-.07
		.25	1.00
		.22	-.07
		-.07	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977			
durée de mise en route.....:			365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:			93.3 %
carré du coefficient de corrélation.:			.933
erreur de bilan (/module M)			-.2 %
rappor des crues annuelles moyennes:			94.82 %
rappor des maximums maximorum.....:			121.71 %
rappor des durées où Q>4*M.....:		32/37	
rappor des durées où Q<M/4			219/273

BV 16 La Meurthe à Saint-Die S=369			
paramètres :	7.84	5.37	.23
écarts-types :	.10	.06	.07
corrélations :			
	1.00	.10	-.25
	.10	1.00	-.62
	.01	-.04	1.00
	-.25	-.62	1.00
	.74	.09	.07
	.18	-.01	1.00
		.08	.23
		-.01	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977			
durée de mise en route.....:			365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:		91.2 %	
carré du coefficient de corrélation.:			.912
erreur de bilan (/module M)			1.2 %
rappor des crues annuelles moyennes:			94.37 %
rappor des maximums maximorum.....:			107.44 %
rappor des durées où Q>4*M.....:		28/36	
rappor des durées où Q<M/4			201/161

BV 14 Le Terrouine à Villy st Etienne S=169			
paramètres :	6.01	3.28	.47
écarts-types :	.06	.09	.03
corrélations :			
	1.00	-.08	.42
	-.08	1.00	-.53
	.42	-.53	1.00
	-.28	1.00	.23
	.18	.00	1.00
		.04	.42
		.42	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1972-1976			
durée de mise en route.....:			365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:		73.1 %	
carré du coefficient de corrélation.:			.731
erreur de bilan (/module M)			-2.6 %
rappor des crues annuelles moyennes:			92.79 %
rappor des maximums maximorum.....:			124.54 %
rappor des durées où Q>4*M.....:		107/99	
rappor des durées où Q<M/4			777/910

BV 17 La Meurthe à Moyennouthier S=151			
paramètres :	6.40	5.41	-.18
écarts-types :	.08	.08	.10
corrélations :			
	1.00	.28	-.16
	.28	1.00	-.19
	-.16	-.19	1.00
	-.53	-.36	1.00
	.43	.37	1.00
		-.09	.11
		.11	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977			
durée de mise en route.....:			365 jours
critère de Nash(var. expliquée).....:		82.2 %	
carré du coefficient de corrélation.:			.822
erreur de bilan (/module M)			-1.4 %
rappor des crues annuelles moyennes:			87.13 %
rappor des maximums maximorum.....:			180.71 %
rappor des durées où Q>4*M.....:		10/19	
rappor des durées où Q<M/4			2/60

BV 18 La Meurthe à Damelevières S=2288			
paramètres :	6.18	4.89	.55
écarts-types :	.05	.06	.03
corrélations :			
	1.00	.25	-0.10
	.25	1.00	-0.27
	-0.10	-0.27	1.00
	-0.21	-0.55	-0.00
	.59	.31	-0.22
			1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977			
durée de mise en route			365 jours
critère de Nash(var. expliquée)			92.4 %
carré du coefficient de corr. corrélation.:			.925
erreur de bilan (/module M)			-4 %
rapport des crues annuelles moyennes:			95.32 %
rapport des maximums maximum			133.40 %
rapport des durées où Q>4*M.....:		42/39	
rapport des durées où Q<M/4			171/205

BV 20 Vezouze à Lunneville S=559			
paramètres :	5.53	3.57	.70
écarts-types :	.05	.08	.04
corrélations :			
	1.00	-0.29	.04
	-0.29	1.00	-0.03
	.04	-0.10	1.00
	-0.48	-0.03	-0.07
	.32	.12	-0.14
			1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977			
durée de mise en route			365 jours
critère de Nash(var. expliquée)		85.3 %	
carré du coefficient de corrélation.:			.854
erreur de bilan (/module M)			1.4 %
rapport des crues annuelles moyennes:			93.60 %
rapport des maximums maximum			115.74 %
rapport des durées où Q>4*M.....:		43/53	
rapport des durées où Q<M/4			242/220

BV 19 La Plaine à Trouche S=116			
paramètres :	6.65	5.49	.09
écarts-types :	.06	.06	.10
corrélations :			
	1.00	.05	-0.29
	.05	1.00	-0.19
	-0.29	-0.19	1.00
	-0.48	-0.16	.09
	.39	.34	-0.19
			1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977			
durée de mise en route			365 jours
critère de Nash(var. expliquée)			85.8 %
carré du coefficient de corrélation.:			.859
erreur de bilan (/module M)			-6 %
rapport des crues annuelles moyennes:			58.56 %
rapport des maximums maximum			126.56 %
rapport des durées où Q>4*M.....:		8/19	
rapport des durées où Q<M/4			7/95

BV 21 Mortagne à Autry st Hellène S= 98			
paramètres :	7.45	5.96	.01
écarts-types :	.14	.08	.09
corrélations :			
	1.00	.59	.22
	.59	1.00	.18
	.22	.18	1.00
	.07	-0.41	-0.14
	-0.63	-0.31	-0.18
	.64	.47	.18
			1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977			
durée de mise en route			365 jours
critère de Nash(var. expliquée)			87.8 %
carré du coefficient de corrélation.:			.879
erreur de bilan (/module M) .....			.3 %
rapport des crues annuelles moyennes:			30.17 %
rapport des maximums maximum			102.47 %
rapport des durées où Q>4*M.....:		7/13	
rapport des durées où Q<M/4			48/46

BV 22 Mortagne à Gerbevillier S=495					
paramètres :	6.47	4.58	-0.09	.24	.00
écarts-types :	.07	.09	.10	.09	.07
corrélations :	1.00	.16	.03	-.29	.30
	.16	1.00	.08	-.58	.14
	.03	.08	1.00	-.28	-.07
	-.29	-.58	-.28	1.00	.29
	.30	.14	-.07	.29	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route: 365 jours					
critère de Nash(var. expliquée).....: 82.4 %					
carré du coefficient de corrélation.: .826					
erreur de bilan (/module M): 1.2 %					
rapport des crues annuelles moyennes: 87.16 %					
rapport des maximums maximumum: 143.24 %					
rapport des durées où Q>4*M.....: 41/54					
rapport des durées où Q<M/4: 242/235					
BV 25 Meurthe à Malzeville S=2914					
paramètres :	5.88	4.49	-.06	-.41	.34
écarts-types :	.03	.04	-.18	-.22	.15
corrélations :	1.00	-.08	1.00	.04	-.14
	-.08	1.00	-.18	1.00	.30
	-.41	-.22	.04	1.00	.30
	.34	.15	-.14	.30	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....: 365 jours					
critère de Nash(var. expliquée).....: 94.8 %					
carré du coefficient de corrélation.: .949					
erreur de bilan (/module M): .2 %					
rapport des crues annuelles moyennes: 96.11 %					
rapport des maximums maximumum: 108.45 %					
rapport des durées où Q>4*M.....: 32/39					
rapport des durées où Q<M/4: 147/211					
BV 23 Sanon à La Garde S=72					
paramètres :	5.36	3.00	-0.19	-.26	.31
écarts-types :	.06	.10	-.29	-.17	.05
corrélations :	1.00	-.39	1.00	-.02	-.23
	-.39	1.00	-.29	1.00	-.02
	-.19	-.29	1.00	-.02	1.00
	-.26	-.17	-.02	1.00	.26
	.31	.05	-.23	.26	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....: 365 jours					
critère de Nash(var. expliquée).....: 79.1 %					
carré du coefficient de corrélation.: .795					
erreur de bilan (/module M): 5.8 %					
rapport des crues annuelles moyennes: 84.56 %					
rapport des maximums maximumum: 111.00 %					
rapport des durées où Q>4*M.....: 59/54					
rapport des durées où Q<M/4: 547/264					
BV 26 Amzule à Lay St Christophe S=85					
paramètres :	5.83	3.84	-.13	-.47	.43
écarts-types :	.06	.11	-.10	-.64	.17
corrélations :	1.00	.20	1.00	-.05	.02
	.20	1.00	-.10	1.00	.04
	-.13	-.10	1.00	-.05	1.00
	-.47	-.64	-.05	1.00	.04
	.43	.17	.02	.04	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....: 365 jours					
critère de Nash(var. expliquée).....: 79.6 %					
carré du coefficient de corrélation.: .797					
erreur de bilan (/module M): -1.9 %					
rapport des crues annuelles moyennes: 86.96 %					
rapport des maximums maximumum: 103.67 %					
rapport des durées où Q>4*M.....: 63/89					
rapport des durées où Q<M/4: 429/612					
BV 26 Amzule à Lay St Christophe S=85					
paramètres :	5.83	3.84	-.13	-.47	.43
écarts-types :	.06	.11	-.10	-.64	.17
corrélations :	1.00	.20	1.00	-.05	.02
	.20	1.00	-.10	1.00	.04
	-.13	-.10	1.00	-.05	1.00
	-.47	-.64	-.05	1.00	.04
	.43	.17	.02	.04	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....: 365 jours					
critère de Nash(var. expliquée).....: 79.6 %					
carré du coefficient de corrélation.: .797					
erreur de bilan (/module M): -1.9 %					
rapport des crues annuelles moyennes: 86.96 %					
rapport des maximums maximumum: 103.67 %					
rapport des durées où Q>4*M.....: 63/89					
rapport des durées où Q<M/4: 429/612					

BV 27 Esch à Jezainville (A7122010) S=229

paramètres : 6.01 5.29 .03 .39 .96 .55
 écarts-types : .04 .05 .30 .06 .05 .09
 corrélations :

1.00 -22 .03 -30 .39
 -22 1.00 -17 -31 .03
 .03 -17 1.00 .01 .04
 -30 -31 .01 1.00 .44
 .39 .03 .04 .44 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route.....: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée).....: 85.0 %
 carré, du coefficient de corrélation.: .851
 erreur de bilan (/module M): -2.8 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 87.98 %
 rapport des maximums maximumum: 145.72 %
 rapport des durées où Q>4*M.....: 39/74
 rapport des durées où Q<M/4: 383/554

BV 28 Rupt de Mad à Onville S=372

paramètres : 5.93 4.83 .35 .50 .33
 écarts-types : .05 .08 .09 .07 .06
 corrélations :

1.00 .00 -38 .42 .38
 .00 1.00 -08 -51 .14
 -38 -08 1.00 .04 -15
 -42 -51 .04 1.00 .08
 .38 .14 -15 .08 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée, e).....: 83.3 %
 carré du coefficient de corrélation.: 838
 erreur de bilan (/module M): 1.8 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 76.93 %
 rapport des maximums maximumum: 100.83 %
 rapport des durées où Q>4*M.....: 45/57
 rapport des durées où Q<M/4: 427/362

BV 29 Pont de Seille à Château Salin S=143

paramètres : 6.05 4.29 .30 .04 .20
 écarts-types : .04 .07 .07 .04 .03
 corrélations :

1.00 .06 -12 -38 .38
 .06 1.00 -19 -56 .21
 -12 -19 1.00 -04 -11
 -38 -56 -04 1.00 .07
 .38 .21 -11 .07 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route.....: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée).....: 88.8 %
 carré du coefficient de corrélation.: .889
 erreur de bilan (/module M): 1.6 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 95.06 %
 rapport des maximums maximumum: 96.71 %
 rapport des durées où Q>4*M.....: 29/42
 rapport des durées où Q<M/4: 232/148

BV 30 Seille à Nomeny S=923

paramètres : 5.93 4.37 .64 .18 .24
 écarts-types : .05 .10 .05 .06 .05
 corrélations :

1.00 .19 .05 -47 .35
 .19 1.00 -04 -61 .16
 .05 -04 1.00 -21 -09
 -47 -61 -21 1.00 .15
 .35 .16 -09 .15 1.00

critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977
 durée de mise en route: 365 jours
 critère de Nash(var. expliquée).....: 86.3 %
 carré, du coefficient de corrélation.: .864
 erreur de bilan (/module M): -1.7 %
 rapport des crues annuelles moyennes: 119.27 %
 rapport des maximums maximumum: 137.93 %
 rapport des durées où Q>4*M.....: 37/69
 rapport des durées où Q<M/4: 278/304

BV 31 Seille à Metz Pont de Loth S=1269					
paramètres :	5.90	4.23	.61	.27	.40
écarts-types :	.05	.08	.04	.06	.04
corrélations :					
	1.00	.17	.02	-.55	.28
	.17	1.00	-.14	-.63	-.03
	.02	-.14	1.00	-.09	.05
	-.55	-.63	-.09	1.00	.14
	.28	-.03	.05	.14	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route					365 jours
critère de Nash (var. expliquée,e).....					88.5 %
carré du coefficient de corrélation.:					.886
erreur de bilan (/module M)					-1.5 %
rapport des crues annuelles moyennes:					106.25 %
rapport des maximums maximorum.....:					143.68 %
rapport des durées où Q>4*M.....:		51/78			
rapport des durées où Q<M/4					351/299

BV 33 Yron à Cartoucherie S=337					
paramètres :	5.77	3.64	.37	.26	.04
écarts-types :	.07	.13	.05	.08	.11
corrélations :					
	1.00	-.06	-.33	-.52	.23
	-.06	1.00	-.72	-.36	.08
	-.33	-.72	1.00	.38	-.12
	-.52	-.36	.38	1.00	.26
	.23	.08	-.12	.26	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....					365 jours
critère de Nash (var. expliquée)		86.5 %			
carré du coefficient de corrélation.:					.867
erreur de bilan (/module M)					9.5 %
rapport des crues annuelles moyennes:					88.40 %
rapport des maximums maximorum.....:					78.46 %
rapport des durées où Q>4*M.....:					60/55
rapport des durées où Q<M/4					616/472

BV 32 La Moselle à Hauconcourt S=9387					
paramètres :	6.73	4.91	.83	.24	.88
écarts-types :	.06	.06	.04	.06	.06
corrélations :					
	1.00	.37	.12	-.21	.54
	.37	1.00	-.09	-.67	.01
	.12	-.09	1.00	.10	-.03
	-.21	-.67	.10	1.00	.23
	-.02	.01	-.03	.25	1.00
	.54	.13	.12	.23	-.04
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....					365 jours
critère de Nash (var. expliquée).....:					93.9 %
carré du coefficient de corrélation.:					.940
erreur de bilan (/module M)					-1.2 %
rapport des crues annuelles moyennes:					100.25 %
rapport des maximums maximorum.....:					137.50 %
rapport des durées où Q>4*M.....:		29/39			
rapport des durées où Q<M/4					139/235

BV 34 Waigot à Briey S=377					
paramètres :	5.35	5.49	-.22	-.42	.25
écarts-types :	.12	.17	.15	.10	
corrélations :					
	1.00	-.71	.00	-.72	-.16
	-.71	1.00	-.30	.36	.22
	.00	-.30	1.00	.03	.06
	-.72	.36	.03	1.00	.43
	-.16	.22	.06	.43	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route					365 jours
critère de Nash (var. expliquée).....:					76.9 %
carré du coefficient de corrélation.:					.770
erreur de bilan (/module M)					1.0 %
rapport des crues annuelles moyennes:					48.26 %
rapport des maximums maximorum.....:					68.25 %
rapport des durées où Q>4*M.....:		12/16			
rapport des durées où Q<M/4					77/146

BV 35 L'Orne à Rosselange S=1226					
paramètres :	5.91	4.30	.44	.20	.27
écarts-types :	.04	.07	.02	.05	.04
corrélations :					
	1.00	.23	-.53	-.47	.30
	.23	1.00	-.48	-.63	.08
	-.53	-.48	1.00	.32	-.18
	-.47	-.63	.32	1.00	.16
	.30	.08	-.18	.16	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route: 365 jours					
critère de Nash(var. expliquée).....: 90.3 %					
carré du coefficient de corrélation.: .904					
erreur de bilan (/module M): 2.9 %					
rapport des crues annuelles moyennes: 95.01 %					
rapport des maximums maximorum.....: 91.59 %					
rapport des durées où Q>4*M.....: 48/64					
rapport des durées où Q<M/4: 394/304					

BV 36 Canner à Koenigsmaker S=110					
paramètres :	5.98	4.35	.31	.25	.24
écarts-types :	.04	.06	.08	.05	.04
corrélations :					
	1.00	-.19	-.28	-.41	.31
	-.19	1.00	-.29	-.36	.04
	-.28	-.29	1.00	.08	-.03
	-.41	-.36	.08	1.00	.19
	.31	.04	-.03	.19	1.00
critères de performance du modèle GR4 sur la période : 1974-1977					
durée de mise en route.....: 365 jours					
critère de Nash(var. expliquée).....: 81.3 %					
carré du coefficient de corrélation.: .814					
erreur de bilan (/module M): 4.4 %					
rapport des crues annuelles moyennes: 84.47 %					
rapport des maximums maximorum: 77.05 %					
rapport des durées où Q>4*M.....: 52/47					
rapport des durées où Q<M/4: 425/233					

Annexe (V.1): Programmes Fortran des modèles mensuels.

MODELE DE PREVISION D'ETIAGE DE MICHEL (1989) 3 paramètres

```

SUBROUTINE GR3M(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
DIMENSION X(*),XV(6),JE(*),R0(12),S0(12)
DATA R0/.38,.42,.40,.40,.35,.33,.29,.25,.21,.20,.25,.29/
DATA S0/.80,.86,.82,.69,.53,.33,.21,.11,.11,.18,.40,.65/
IF(JE(3).EQ.-99)THEN
WRITE(2,(' GR3M : prévision d'étiage'))
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).EQ.-9)THEN
JE(5)=3
X(1)=5.
X(2)=5.4
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).GT.0)GOTO 1
IF(X(1).LT.0.)X(1)=0.
DO 2 I=1,3
XV(I)=EXP(X(I))
2 CONTINUE
XV(3)=1./(1.+1./XV(3))
S=S0(JE(14))*XV(1)
R=R0(JE(14))*XV(2)
RETURN
1 CONTINUE
P1=P*1.05
P2=MAX(0.,P1-XV(3)*E)
E2=E+P2-P1
IF(P2.LE.0.)THEN
PR=0.
S1=S
ELSE
W=TANH(P2/XV(1))
S1=(S+XV(1)*W)/(1.+S/XV(1)*W)
PR=P2+S-S1
ENDIF
W=TANH(E2/XV(1))
S=S1*(1.-W)/(1+(1.-S1/XV(1))*W)
R=R+PR
R2=R*XV(2)/(R+XV(2))
Q=MAX(0.,R-R2)
R=R2
TR=R/XV(2)
TS=S/XV(1)
END

```

MODELE DE NANJING (WOOD et al. (1989)

4 paramètres

```

SUBROUTINE NANJING(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
DIMENSION X(*),XV(6),JE(*),S0(12),S9(12)
DATA S9/.61,.56,.52,.50,.53,.61,.70,.82,.85,.81,.74,.68/
DATA S0/.86,.85,.81,.74,.68,.61,.54,.52,.56,.67,.76,.83/
100 FORMAT(/,' ~~~~~',/)
IF(JE(3).EQ.-99)THEN
WRITE(2,100)
WRITE(2,(' modèle de NANJING, 4 X'))
WRITE(*,(' exposant courbe ETR/ETP(< 0:OPTIM. >=0 :fixe) ? \'))
READ(*,*)EX
IF(EX.GE.0.)WRITE(2,(' exposant courbe ETR/ETP = ',F6.2))EX
WRITE(*,(' exposant courbe INF/PB (< 0:OPTIM. >=0 :fixe) ? \'))
READ(*,*)EY
IF(EY.GE.0.)WRITE(2,(' exposant courbe Inf/Plui= ',F6.2))EY
JE(5)=4
IF(EX.GE.0.)JE(5)=JE(5)-1
IF(EY.GE.0.)JE(5)=JE(5)-1
C WRITE(2,(' Comparison of an alternative land surface parameterization',
&/,'with the GFDL high resolution climate model'))
C WRITE(2,(' Eric F. Wood,Dennis P. Lettenmaier,James R.,Wallis',
C &/,' (AIHS,publ.no204,pp.53-64,1991)'))
WRITE(2,100)
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).EQ.-9)THEN
X(1)=6.
X(2)=3.
IF(EX.LT.0.)THEN
X(3)=-0.7
ELSE
X(3)=1.6
ENDIF
X(4)=1.6
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).gt.0)GOTO 1
IF(X(1).LT.0.)X(1)=0.
IF(X(2).LT.0.)X(2)=0.
DO 2 I=1,4
XV(I)=EXP(X(I))
2 CONTINUE
EXV=EX
IF(EX.LT.0.)EXV=XV(3)
EYV=1./(1.+EY)
IF(EY.LT.0.)THEN
IF(EX.LT.0.)THEN
EYV=1./(1.+XV(4))
ELSE
EYV=1./(1.+XV(3))
ENDIF
ENDIF
IF(JE(16).EQ.0)THEN
S=S0(JE(14))*XV(1)

```

```
ELSE
S=S9(JE(14))*XV(1)
ENDIF
RETURN
1 continue
P1=P*1.05
IF(S.GE.XV(1))THEN
ER=E
ELSE
ER=E*(1.-(1.-S/XV(1))**EXV)
ENDIF
QB=S/XV(2)
S=MAX(0.,S-ER-QB)
PS=P1/XV(1)*EYV
IF(S.GE.XV(1))THEN
SS=0.
ELSE
SS=(1.-S/XV(1))**EYV
ENDIF
IF(SS-PS.GT.0.)THEN
QD=P1-XV(1)+S+XV(1)*(SS-PS)**(1./EYV)
S=S+P1-QD
ELSE
QD=P1-XV(1)+S
S=XV(1)
ENDIF
Q=QB+QD
TS=S/XV(1)
TR=TS
END
```

MODELE DE MESSAOUDA KABOUYA (1990) 3 paramètres
--

```

SUBROUTINE MEK(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
DIMENSION X(*),XV(6),JE(*),R0(12),S0(12)
DATA R0/.38,.42,.40,.40,.35,.33,.29,.25,.21,.20,.25,.29/
DATA S0/.80,.86,.82,.69,.53,.33,.21,.11,.11,.18,.40,.65/
IF(JE(3).EQ.-99)THEN
WRITE(2,(' MEK:Messaouda Kabouya'))
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).EQ.-9)THEN
JE(5)=3
X(1)=5.
X(2)=5.
X(3)=0.
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).GT.0)GOTO 1
IF(X(1).LT.0.)X(1)=0.
DO 2 I=1,3
XV(I)=EXP(X(I))
2 CONTINUE
IF(XV(3).GE.1.)THEN
XV(3)=XV(3)-1.
ELSE
XV(3)=1.-1./XV(3)
ENDIF
S=S0(JE(14))*XV(1)
R=R0(JE(14))*XV(2)
RETURN
1 CONTINUE
PP=P*1.05
IF(XV(3).LT.0.)THEN
P1=MAX(0.,PP+XV(3))
E1=E
ELSE
P1=PP
E1=E-XV(3)
ENDIF
IF(E1*P1.LE.0.)THEN
Z=0.
ELSE
Z=P1*E1/(E1+P1)
ENDIF
P2=P1-Z
E2=E1-Z
IF(P2.LE.0.)THEN
PR=0.
S1=S
ELSE
W=TANH(P2/XV(1))
S1=(S+XV(1)*W)/(1.+S/XV(1)*W)
PR=P2+S-S1
ENDIF
W=TANH(E2/XV(1))

```

```
S=S1*(1.-W)/(1+(1.-S1/XV(1))*W)
R=R+PR/2.
R2=R*XV(2)/(R+XV(2))
Q=MAX(0.,R-R2)+PR/2.
R=R2
TR=R/XV(2)
TS=S/XV(1)
END
```

MODELE DE VANDEWIELE et al.(1991)

3 paramètres (variante N2)

```

SUBROUTINE VDW(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
  DIMENSION X(*),XV(6),JE(*),S0(12)
  DATA S0/.80,.86,.82,.69,.53,.33,.21,.11,.11,.18,.40,.65/
100 FORMAT(' ',I6,' E=',F5.1,' P=',F5.1,' Q=',F5.1,' R=',F6.1,' S=',F6 &.1)
  IF(JE(3).EQ.-99)THEN
write(2,(' VDW:var.2 des modèles de VANDEWIELE et al.))
  RETURN
  ENDIF
  IF(JE(3).EQ.-9)THEN
  JE(5)=3
  X(1)=6.
  X(2)=0.
  X(3)=1.5
  RETURN
  ENDIF
  IF(JE(3).GT.0)GOTO 1 IF(X(1).LT.0.)X(1)=0.
  DO 9 I=1,3
  XV(I)=EXP(X(I))
  9 CONTINUE
  XV(2)=1./(1.+1./XV(2)) S=S0(JE(14))*XV(1)
  RETURN
1 CONTINUE
  SP=MAX(0.,S)
  TS=S/XV(1)
  P1=P*1.05
  SPP=SP+P1
  IF(E.LE.0.)THEN
  E1=MIN(SPP,E)
  H=1.
  ELSE
  SSE=SPP/E IF(SSE.GT.100.)SSE=100.
  E1=MIN(SPP,E*(1.-XV(2)**SSE))
  PSE=P1/E
  IF(PSE.GT.30.)PSE=30.
  H=1.-EXP(-PSE)
  ENDIF
  Q=SP/XV(1)*(SP/XV(3)+P-E*H)
  S=S+P1-E1-Q
  END

```

MODELE ABCD DE THOMAS (1981) 4 paramètres
--

```

SUBROUTINE ABCD(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
DIMENSION X(*),XV(6),JE(*)
IF(JE(3).EQ.-99)THEN
WRITE(2,(' ABCD:modèle de THOMAS'))
WRITE(*,(' taux d'écoult.direct(-1:OPTIM. >=0 et <1:fixe) ? "\") READ(*,*)TED
WRITE(2,(' taux d'écoulement direct = ",F6.2)')TED IF(TED.LT.0.)then
JE(5)=4
ELSE
JE(5)=3
ENDIF
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).EQ.-9)THEN
X(1)=4.
X(2)=6.
X(3)=0.
X(4)=1.
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).gt.0)GOTO 1 IF(X(2).LT.0.)X(2)=0.
DO 2 I=1,4
XV(I)=EXP(X(I))
2 CONTINUE
XV(1)=1./(1.+1./XV(1)) XV(3)=1./(1.+1./XV(3))
XV(4)=1./(1.+1./XV(4))
S=XV(2)*0.9
H=0.
RETURN
1 CONTINUE
P1=P*1.05
W=S+P1
WB=W/XV(2)
WB1=WB+1.
Y=2.*W/(WB1+SQRT(WB1*WB1-4.*XV(1)*WB))
E2=E/XV(2)
IF(E2.GT.20.)E2=20.
S=Y/EXP(E2)
IF(TED.LT.0.)THEN
R=XV(4)*(W-Y)
ELSE
R=MIN(1.,TED)*(W-Y)
ENDIF
G=MAX(0.,W-Y-R)
H=H+G
QH=(1.-XV(3))*H
H=H-QH
Q=QH+R
TS=S/XV(2)
TR=H/XV(2)
END

```

MODELE T-alpha D'ALLEY et al. (1984)

3 paramètres

```

SUBROUTINE TAL(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
DIMENSION X(*),XV(6),JE(*),S0(12)
DATA S0/.80,.86,.82,.69,.53,.33,.21,.11,.11,.18,.40,.65/
IF(JE(3).EQ.-99)THEN
WRITE(2,(' TAL:Modèle T-alpha DE THORNTHTWAITE et MATHER'))
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).EQ.-9)THEN
JE(5)=3
X(1)=0.
X(2)=-2.
X(3)=5.
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).GT.0)GOTO 1
IF(X(3).LT.0.)X(1)=0.
DO 9 I=1,3
XV(I)=EXP(X(I))
9 CONTINUE
XV(1)=1./(1.+1./XV(1))
XV(2)=1./(1.+1./XV(2))
S=S0(JE(14))*XV(3)
R=0.
RETURN
1 CONTINUE
P1=P*1.05
QD=XV(2)*P1
PR=(1.-XV(2))*P1
IF(PR.GE.E)then
P2=PR-E
E2=0.
ELSE
P2=0.
E2=E-PR
ENDIF
S=S+P2
ESA=E2/XV(3)
IF(ESA.GT.30.)ESA=30.
S=S/EXP(ESA)
IF(S.GT.XV(3))THEN
QR=S-XV(3)
S=XV(3)
ELSE
QR=0.
ENDIF
R=R+QR
Q=QD+XV(1)*R
R=R-XV(1)*R
TS=S/XV(3)
TR=R/(XV(1)*XV(3))
END

```

MODELE GRM	2 paramètres
-------------------	---------------------

```

SUBROUTINE GRM(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
DIMENSION X(*),XV(6),JE(*),S0(12)
DATA S0/.80,.86,.82,.69,.53,.33,.21,.11,.11,.18,.40,.65/
IF(JE(3).EQ.-99)THEN
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).EQ.-9)THEN
JE(5)=2
X(1)=5.
X(2)=0.
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).GT.0)GOTO 1
DO 2 I=1,2
XV(I)=EXP(X(I))
2 CONTINUE
XV(2)=1./(1.+1./XV(2))
S=S0(JE(14))*XV(1)
R=0.
RETURN
1 CONTINUE
P1=P*1.05
E1=E
IF(E1*P1.LE.0.)THEN
Z=0.
ELSE
Z=P1*E1/(E1+P1)
ENDIF
P2=P1-Z
E2=E1-Z
IF(P2.LE.0.)THEN
PR=0.
S1=S
ELSE
W=TANH(P2/XV(1))
S1=(S+XV(1)*W)/(1.+S/XV(1)*W)
PR=P2+S-S1
ENDIF
W=TANH(E2/XV(1))
S=S1*(1.-W)/(1+(1.-S1/XV(1))*W)
R=R+PR*.8
QR=XV(2)*R
QD=PR*.2
Q=QR+QD
R=R-QR
TR=R/XV(1)
TS=S/XV(1)
END

```

MODELE GR2M	2 paramètres
--------------------	---------------------

```

SUBROUTINE GR2M(X,JE,P,E,Q,TR,TS)
DIMENSION X(*),XV(6),JE(*),S0(12)
DATA S0/.80,.86,.82,.69,.53,.33,.21,.11,.11,.18,.40,.65/
IF(JE(3).EQ.-99)THEN
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).EQ.-9)THEN
JE(5)=2
X(1)=5.
X(2)=0.
RETURN
ENDIF
IF(JE(3).GT.0)GOTO 1
XV(1)=EXP(5.298)
XPE=EXP(5.298-X(1))
XV(2)=EXP(X(2))
2 CONTINUE
XV(2)=1./(1.+1./XV(2))
S=S0(JE(14))*XV(1)
R=0.
RETURN
1 CONTINUE
P1=P*1.05*XPE
E1=E*XPE
IF(E1*P1.LE.0.)THEN
Z=0.
ELSE
Z=P1*E1/(E1**.5+P1**.5)**2.
ENDIF
P2=P1-Z
E2=E1-Z
IF(P2.LE.0.)THEN
PR=0.
S1=S
ELSE
W=TANH(P2/XV(1))
S1=(S+XV(1)*W)/(1.+S/XV(1)*W)
PR=P2+S-S1
ENDIF
W=TANH(E2/XV(1))
S=S1*(1.-W)/(1+(-S1/XV(1))*W)
R=R+PR*.8
QR=XV(2)*R
QD=PR*.2
Q=QR+QD
R=R-QR
TR=R/XV(1)
TS=S/XV(1)
END

```

Annexe (V.2): Liste des 91 bassins versants étudiés.

N°	COURS D'EAU	STATION DE JAUGEAGE	SURFACE (km ²)
01	LA SEILLE	NOMENY	925
02	LA NIED	BOUZONVILLE	1160
03	LA SEINE	BAR-SUR-SEINE	2340
04	L'ORNAIN	FAINS-LES-SOURCES	820
05	LA SUIPPE	ORAINVILLE	802
06	LE LEGUER	TERRAIN DE SPORTS B.ISLE	260
07	L'AURON	I'ORMEDIOT	553
08	LA SAULDRE	SALBRIS	1200
09	LE LAYON	PONT DE BEZIGON	920
10	LA SEVRE NANTAISE	TIFFAUGES-LA-MOULINETTE	814
11	LE Dadou	MONTDRAGON	597
12	LE CELE	AMIS-DU-CELE	1190
13	L' ADOUR	AIRE-SUR-ADOUR	2930
14	LA CHARENTE	CHENON	1070
15	L' OGNON	CHEVIGNEY	1710
16	LA TILLE	ARCELOT	708
17	L' AZERGUES	CHATILLON	336
18	L'ARDECHE	SAUZE-SAINT-MARTIN	2240
19	LA CEZE	LA-ROQUE-SUR-CEZE	1060
20	LA TET	PERPIGNAN	1300
21	L' OUVEZE	VAISON-LA-ROMAINE	586
22	L' HERAULT	LAROQUE	756
23	L' ARGENS	ARCS	1730
24	LE GOLO	BARCHETTA	930
25	ILL	DIDENHEIM	656
26	MODER	SCHWEIGENHOUSE	622
27	ZORN	WALTENHEIM	688
28	VEZOUZE	LUNEVILLE	559
29	LA CHIERS	CARIGNAN	1970
30	LA CANCHE	BRIMEUX	894
31	L'AVRE	MOREUIL	630
32	LA SOMME	ABBEVILLE	5560
33	L'OUTRE-AUBE	LONGCHAMP	657
34	LA VOIRE	LASSICOURT	896
35	L'OUANNE	GY-LES-NONAINS	883
36	L'ESSONNE	LA MOTHE	875
37	L'ORGE	MORSANG-SUR-ORGE	922
38	LE ROGNON	SAUCOURT-SUR-ROGNON	614
39	L' AISNE	GIVRY-SUR-AINE	2940

40	LA VESLES	CHALON-SUR-VESLES	828
41	LA SERRES	MORTIERS	733
42	LE THERAIN	MAYSEL	747
43	L'EPTÉ	FOURGES	1370
44	L'AVRE	MUZY	880
45	L'ITON	NORMANVILLE	1050
46	LA RISLE	PONT AUTHOU	1910
47	LA DIVES	BIEVILLE-EN-AUGE	659
48	LA SEICHE	CARCE-EN-BRUZ	820
49	L'ALENE	CERCY-LA-TOUR	338
50	LE NOHAIN	VILLIERS/NOHAIN	473
51	LA BOUZANNE	VELLES	434
52	ILACLAISE	GRAND-PRESSIGNY	897
53	L'ARGENTON	MOULIN-BERNARD	634
54	L'OUDON	MARCILLE	734
55	L'ERDRE	MOULIN DE VAUX	472
56	LA MAINE	REMOUILLE	597
57	L'ARIZE	RIEUX-VOLVESTRE	476
58	LA LOUGE	MURET	486
59	LE GIROU	CEPET	522
60	LE CEROU	MILHARS	503
61	LE LEMBOULAS	LUNEL	403
62	LA BARGUELONNE	FOURQUET	477
63	LA SEOUNE	ST-PIERRE-DE-CLAIRAC	463
64	LA COLAGNE	GARE-DU-MONASTIER	456
65	LE DOURDOU	CONQUES	464
66	LA LEDE	CASSENEUIL	411
67	LE GRAND-LEES	LANNUX	423
68	LA BOUTONNE	LE-VERT	523
69	LA LEYRE	SALLES	1650
70	LA SAONE	CENDRECOURT	1130
71	LA VINGEANNE	OISILLY	623
72	L'OUCHE	PLOMBIERES-LES-DIJON	655
73	LE CUSANCIN	BAUME-LES-DAMES	358
74	LA LOUE	CHAMPAGNE	1380
75	LA GROSNE	CLUNY	332
76	LA BOURBRE	JAMEYZIEU	703
77	LE DOUX	COLOMBIER-LE-VIEUX	378
78	LA DROME	SAILLANS	1150
79	L'ARDECHE	VOGUE	636
80	LE BUECH	SERRES	771
81	LE TECH	ST-PAUL/TECH	473
82	L'AGLY	PLANEZES	440

83	L'ORB	VIEUSSAN	905
84	LE VIDOURLE	MARSILLARGUES	798
85	LE GAPEAU	SAINTE-EULALIE	517
86	LE VAR	ENTREVAUX	676
87	L'ESTERON	LA CLOVE	451
88	L'EVEL	PONT GUININ	316
89	LA VILAINE	SERVON	604
90	LE LIE	PONT DE LA FOSSE	379
91	L'YVEL	LOYAT	315

Annexe (V.3) : Résultats du modèle *ABD*.
(Variante du modèle de Thomas)

E.P.D (%)	10	20	30	50	60	65	70
NASH.MOY.	68.5	70.3	71.9	75.3	76.3	76.4	76.3
QUANT. 0.3	66.7	68.4	71.2	73.4	74.9	74.7	74.9
NASH MIN.	-7.4	4.7	-15.	8.4	12.4	11.7	9.7
NASH MAX.	92.7	92.8	92.7	92.6	92.6	92.5	92.4

Annexe VI

Annexe (VI.1): Liste des 42 bassins versants bretons étudiés.

Annexe (VI.2): Analyse en composantes principales sur les 30 bassins versants bretons.

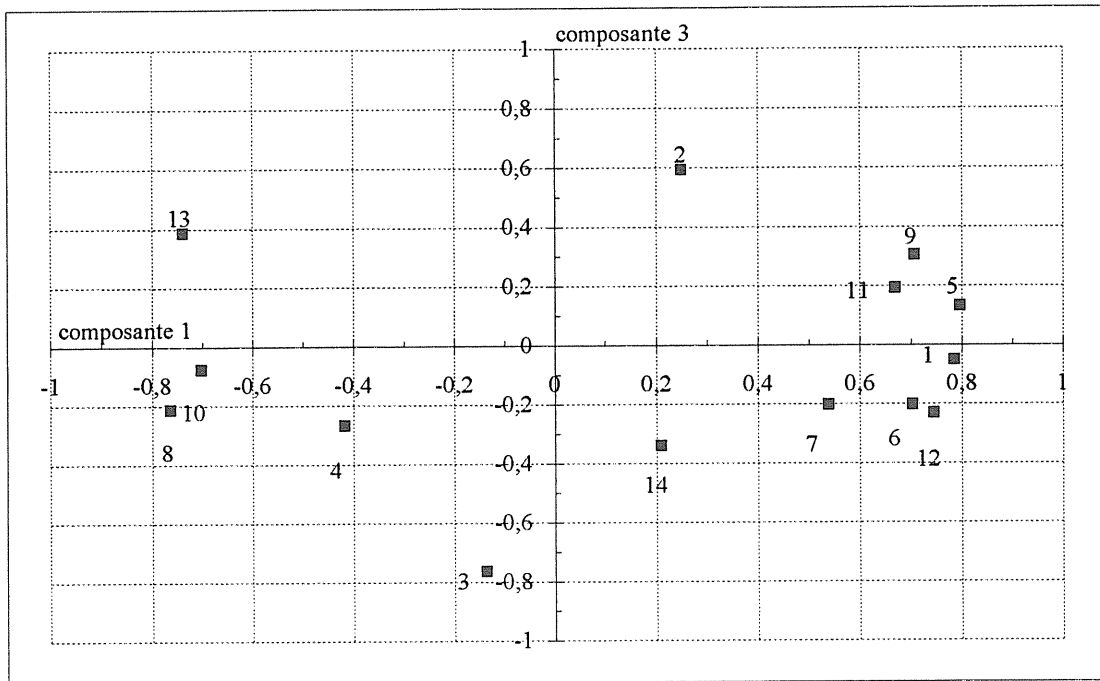
Annexe (VI.I) Liste des 42 bassins versants bretons utilisée

N°	Cours d'eau	Station de gaugage
01	AULNE	LE GOASK EN SCRIGNAC
02	CANTACHE	RABAUD CHAMPEAUX
03	CANUT	COLOMBEL,ST JUST
04	COET ORGAN	KERDEC EN QUISTINIC
05	DOUFFINE	KERBRIANT EN SEGAL
06	GOYEN	KERMARIA EN PONT CROIX
07	JARLOT	L'HERMITAGE PLOUGONVEN
08	LOYSANCE	MOULIN NEUF ST-OUEN LA ROUERIE
09	PONT L'ABBE	MOULIN NEUF PLOUNEOUR
10	QUEFFLEUTH	LESQUIFIU PLOURIN LES M.
11	ROHAN	MENIMUR EN VANNES
12	ROSETTE	PONT-NEUF,MEGRIT
13	SEMNON	ROCHEREUIL,BAIN-DE-BRETAGNE
14	SEREIN PONT D36	TREFFENDEL
15	STER-GOZ	TREBALAY,BANNALEC
16	VAUNOISE	VILLEBRIOUX ST GILLES
17	NEAL	PONT D220, MEDREAC
18	MEU	MONTFORT SUR MEU
19	ABER OUEST	LE DRENNEC
20	CHEVRE	AU DRUGEON
21	VILAINE	SERVON-SUR-VILAINE
22	YVEL	LOYAT
23	AFF SUPERIEUR	PAIMPONT (PONT DU SECRET)
24	AVEN	PONT AVEN (BOIS D'AMOUR)
25	CAREIL	MONTERFIL
26	EVEL	GUENIN
27	JET	ERGUE-GABERIT
28	LIE	PLUMIEUX
29	NANCON	LECOUSSE
30	SEICHE	BRUZ (CARCE)
31	GUYOULT	VIEUVILLE EPINIAC
32	HORN	PONT MILLIN MESPAL
33	LEGUER	BELLE-ISLE-EN-TERRE
34	ROHAN	GUERN EN SAINT-AVE
35	LEFF	COZOU (QUEMPER-GUEZENNEC)
36	ODET	TREODET
37	ABERT EST	PLOUARMEL
38	MOROS	CONCARNEAU
39	COUESNON	ROMAZY
40	ISOLE	QUIMPERLE
41	SCORFF	PLOUAY (PONT KERLO)
42	TRIEUX	TREGONNIEL

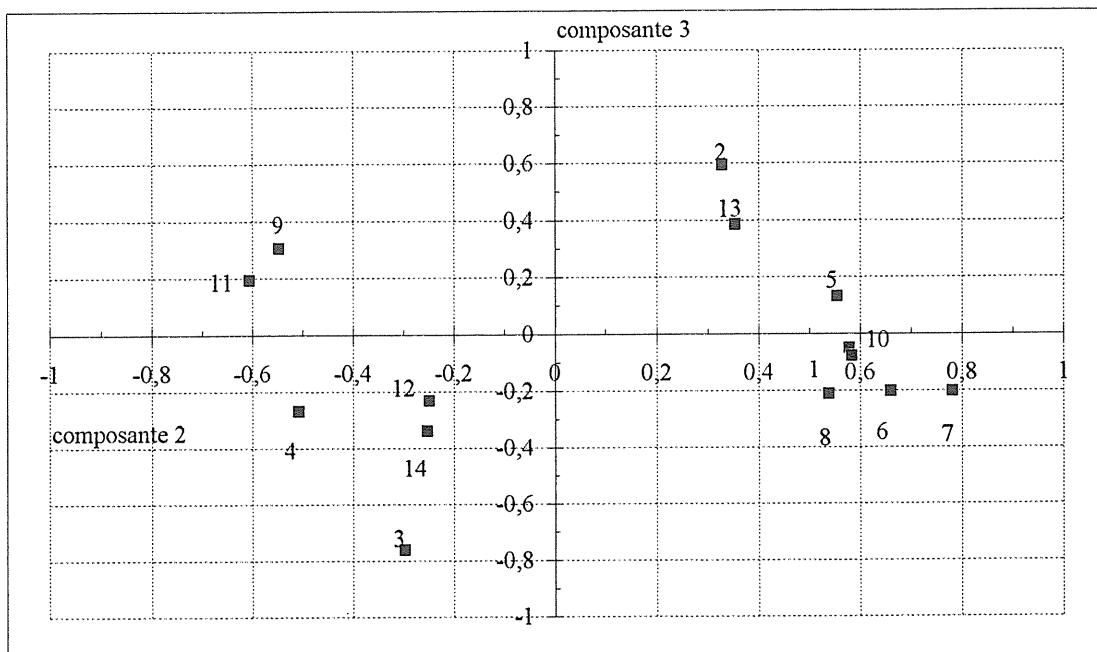
Annexe (VI.2) Analyse en composantes principales sur les 30 bassins bretons.

Résumé des caractéristiques physiques utilisées:

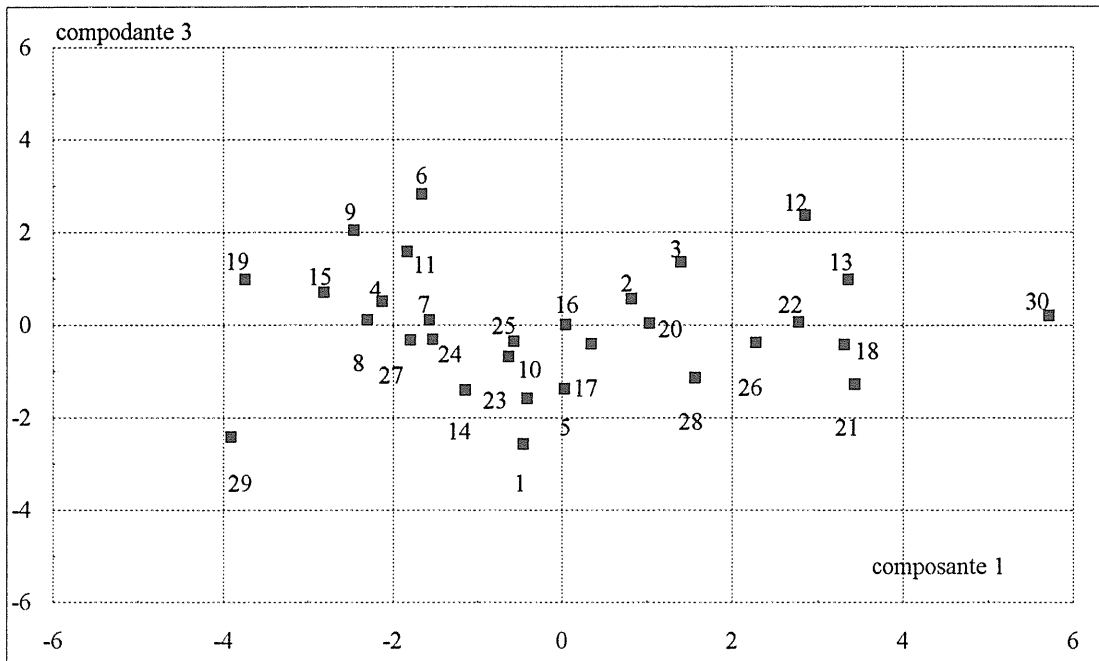
- 01 - **SURF** : Superficie du bassin versant (km²);
- 02 - **IALL** : Indice d'allongement du plus long cours d'eau;
- 03 - **ALTI** : Altitude moyenne estimée au milieu du plus long thalweg (m);
- 04 - **PENT** : Pente moyenne du plus long cours d'eau (°/100);
- 05 - **LONG** : Longueur du plus long thalweg (km);
- 06 - **LCHE** : Longueur totale du chevelu (km);
- 07 - **NBCO** : Nombre de cours d'eau du bassin versant (sans unité);
- 08 - **DEDR** : Densité de drainage du bassin versant (km⁻¹);
- 09- **SDRK** : Surface drainée par km de cours d'eau (km);
- 10 - **NBCK** : Nombre de cours d'eau par km² de bassin versant (km⁻²);
- 11 - **SDRE** : Surface drainée par cours d'eau (km²);
- 12 - **PSCH** : Pourcentage de superficie à affleurement de schiste (%).
- 13 - **PGRA** : Pourcentage de superficie à affleurement de granite (%);
- 14 - **PSED** : Pourcentage de superficie à affleurement de sédiment (%).



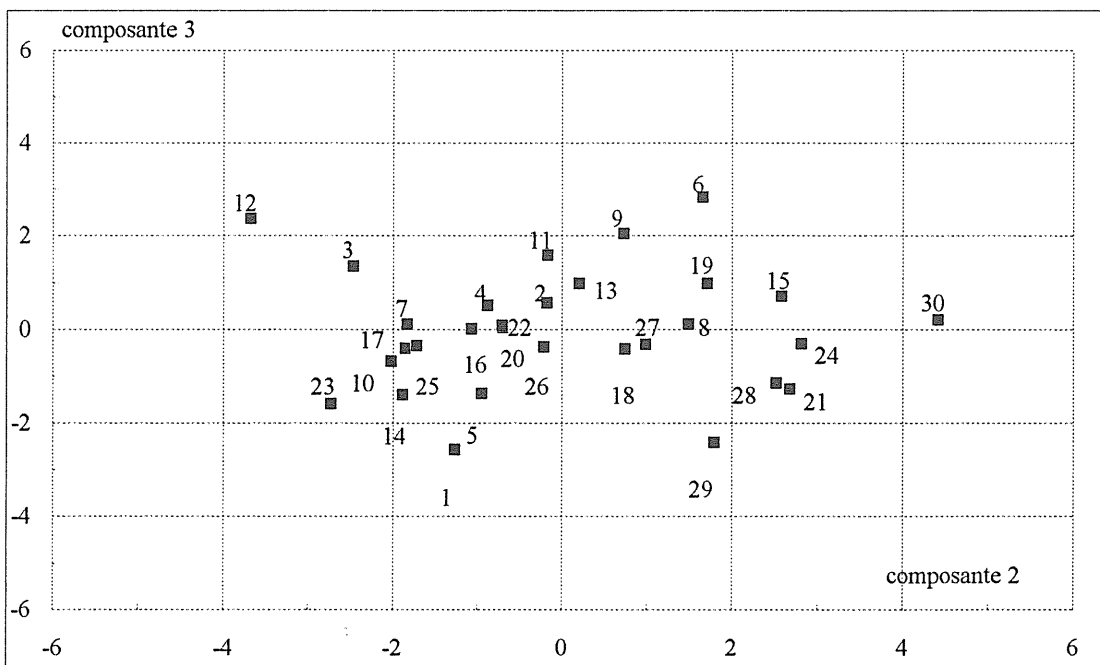
Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 1 et 3.



Corrélations des caractéristiques de bassin - composante 2 et 3.



Projection des bassins dans le plan 1 et 3.



Projection des bassins dans le plan 2 et 3.

Annexe VII

Annexe (VII.1): Liste des 60 bassins versants étudiés.
Annexe (VII.2): Liste des 349 bassins versants étudiés.

Annexe (VII.1): Liste des 60 bassins versants étudiés.

N°	B.V.	COURS D'EAU	STATION DE JAUGEAGE	SURF
01	02	LA MEURTHE	DAMELEVIERES	2404
02	03	LA MORTAGNE	GERBEVILLER	439
03	04	LA VEZOUZE	LUNEVILLE	559
04	05	LA MEURTHE	FRAIZE	69
05	06	LE RABODEAU	MOYENMOUTIER	153
06	14	CANNER	BETTELAINVILLE	33
07	15	ELVON	LEMUD	16
08	20	L'ETHELIN	CHATILLON-SUR-LOIRE	27
09	22	LE NE	ST.FORT-SUR-LE NE	529
10	24	LE LEZERT	LA BANCALIE	27
11	25	LA PETITE BARGUELONNE	MONTCUQ	62
12	26	CHAPOUILLET	CHASSIGNOLLES	67
13	28	L'OSSE	MIELAN-CASTEX	10
14	29	LE LAGOIN	ARESSY	76
15	30	LA COUZE	SOULIER	64
16	31	LA BRAME	LA PERRIERE	235
17	32	L'ARDOUR	FORGEFER	131
18	34	MORTAGNE	STE. HELENE	100
19	37	VERNISSON	NOGENT-SUR-VERNISSON	68
20	38	PUISEAUX	ST. HILAIRE	94
21	41	CHARENTONNE	FERRIERES ST.HILAIRE	257
22	43	SOULEUVRE	CARVILLE	115
23	46	COET ORGAN	KERDEC-EN-QUISTINIC	48
24	47	ARON	BERNADAIS GD FOUGERAY	119
25	50	TEYSSONNE	LA NOAILLERIE	23
26	51	DRAGNE	VANDENESSE	115
27	52	IXEURE	LA FERMETE	115
28	53	ANDOUX	MARINGUES	60
29	54	NERE	AUBIGNY-SUR-NERE	79
30	56	RHON	NOGENT LE ROTROU	79
31	57	ESCOTAIS	ST. PATERNE RACAN	76
32	58	DONNEAU	MESANGER	97
33	59	DIVATTE	LANDEMONT	60
34	61	CHAMBON	DONIA	61
35	62	VOLP	STE. CROIX-VOLVESTRE	91
36	63	BANDIAT	FEUILLADE	333
37	65	BAHUS	EUGENIE-LES-BAINS	49
38	66	MENDIALCU	HASPAREN	18
39	73	FURIEUSE	SALINS-LES-BAINS	43
40	75	VEYLE	LENT	34

41	76	REDON	MARGENCEL	31
42	79	JABRON	SOUSPIERRE	85
43	80	MONDONY	AMELIE-LES-BAINS	32
44	82	MOLE	DESTEL	44
45	84	GARDE	GRIMAUD	18
46	85	PETROSO	PONT-DE-BALA	53
47	87	HELPE MINEUR	MAROILLES	275
48	88	HELPE MAJEUR	LIESSIES	187
49	89	HELPE MAJEUR	TAISNIERES	320
50	91	QUEFFLEUTH	LESQUIPOU-PLOURIN L.M	88
51	94	SEUGNE	PONS	882
52	98	CHARENTE	SURIS	110
53	99	CHARENTE	ST. SAVIOL	492
54	a1	BONNIEURE	VILLEBETTE	203
55	a2	TARDOIRE	MONTBRON	389
56	a5	AUME	MARAIS 2	452
57	a6	CHARENTE	CHALONNES	3750
58	a7	TREZENCE	TOURNAY	75
59	a8	BOUTONNE	VERT	523
60	b0	HERAULT	MOULIN DE BERTRAND	1090

Annexe (VII.2): Liste des 349 bassins versants étudiés.

COD.HY.	SURF	a	b	c	d	NASH	QX	DN	G	PJ10	PA	TA	IG	R	COURS D'EAU	STATION HYDROMETRIQUE
A1202010	5.6	0.00	5.46	-0.18	1.82	76.7	86.4	80.7	192	123	1964	11.5	88	1.00	DOLLER	LERCHENMATT-AMONT
A1202020	8.9	0.46	5.43	-0.19	1.81	79.0	86.7	180.5	233	130	2108	11.5	75	1.00	DOLLER	LERCHENMATT-AVAL
A1204410	3.3	0.00	6.04	-0.45	2.14	69.7	82.2	122.8	312	137	2256	11.5	165	1.00	WAGENSTAHLBACH	LERCHENMATT
A1226910	13.0	1.00	5.08	-0.19	0.95	73.1	92.9	187.8	324	98	1487	11.5	108	1.00	BOURBACH	BOURBACH-LE-BAS
A1235010	3.5	4.77	3.61	-0.31	0.00	80.6	74.0	99.0	188	75	1050	11.3	34	1.00	MICHELBAACH	MICHELBAACH
A1515810	7.6	5.74	4.70	0.22	0.07	84.8	89.8	23.2	282	75	1050	11.5	120	1.00	MURBACH	BUHL
A2023010	5.6	5.81	5.33	-0.28	-0.37	72.7	79.8	100.0	355	101	1928	11.5	196	1.00	PETITE FECHT	STOSSWIHR-SOFFLAT
A2023020	15.4	3.68	5.91	-0.39	1.22	77.7	84.3	-	360	101	1785	11.5	122	1.00	PETITE FECHT	STOSSWIHR-GROSSMATT
A2327010	6.4	5.72	5.41	0.65	-0.04	69.1	80.8	0.0	345	70	1092	11.5	90	1.00	LIVERSEL	STE-MARIE-AUX-MINES
A2702010	39.0	7.53	5.64	-0.42	0.98	79.4	88.8	200.0	848	82	1180	11.5	30	1.00	BRUCHE	SAINT-BLAISE
A2713710	3.3	2.65	6.15	0.11	0.07	80.2	80.7	100.0	365	90	1255	11.5	88	1.00	CHERGOUTTE	BELMONT
A4020610	69.0	3.27	5.04	0.03	-0.15	79.5	96.8	71.4	-	-	1397	11.0	-	1.00	MOSELLE	FRESSE
A4050620	153.0	3.81	5.19	0.14	-0.08	82.2	77.0	95.1	-	-	1410	11.0	-	1.00	MOSELLE	RUPT
A4142010	183.0	6.23	5.14	-0.28	-0.19	81.0	79.8	2.5	-	-	1404	11.0	-	1.00	MOSELOTTE	ZAINVILLIERS
A4200630	66.0	6.34	5.55	-0.37	-0.12	80.9	87.6	23.0	319	81	1254	11.0	24	1.00	CLEURIE	CLEURIE
A4250640	621.0	5.79	5.27	0.07	-0.12	84.6	81.8	33.0	-	-	1386	11.0	-	1.00	MOSELLE	NOIR-GUEUX
A4362010	369.0	6.73	5.52	0.13	0.62	91.8	78.3	38.2	-	-	1403	11.0	-	1.00	MOSELLE	EPINAL
A4442010	144.0	6.65	3.40	0.13	-0.02	78.4	96.6	6.4	-	-	1199	11.0	-	1.00	VOLOGNE	JARMENIL
A4632010	104.0	6.23	4.75	-0.34	0.61	69.5	66.9	-	-	-	786	11.0	-	1.00	DURBION	VAXONCOURT
A5251010	383.0	5.80	3.74	0.19	0.00	88.7	101.1	102.4	-	-	721	11.0	-	1.00	AVIERE	FRISON-BASSE
A5422010	142.0	5.37	3.79	-0.08	0.02	79.9	81.8	87.3	-	-	643	11.0	-	1.00	MADON	MIRECOURT
A5431010	941.0	5.60	3.45	0.47	0.01	87.9	90.0	101.3	-	-	707	11.0	-	1.00	BRENON	AUTREY-SUR-MADON
A5730610	3340.0	5.86	4.99	0.67	0.09	88.8	90.4	100.0	-	-	969	11.0	-	1.00	MADON	PULIGNY
A5842010	169.0	5.78	3.92	0.36	0.04	79.3	90.1	75.1	-	-	637	11.0	-	1.00	MOSELLE	TOUL
A6001010	69.0	5.64	5.62	0.77	-0.58	70.6	137.0	21.0	-	56	1048	11.2	-	1.00	TERROUJIN	VILLEY-SAINT-ETIENNE
A6051020	369.0	6.76	5.35	0.23	0.05	84.3	94.7	78.9	-	-	1071	11.0	-	1.00	MEURTHE	FRAIZE
A6142010	153.0	5.93	5.46	0.80	-0.16	90.3	104.0	81.0	-	59	1086	11.2	-	1.00	MEURTHE	SAINT-DIE
A6201030	727.0	5.63	5.39	0.87	-0.14	89.2	112.0	43.0	-	55	1067	11.2	-	1.00	RABODEAU	MOYEN MOUTIER
A6271010	2404.0	6.24	4.86	1.04	0.13	92.4	96.0	74.0	-	49	1054	11.1	-	1.00	MEURTHE	RAON L'ETAPE
A6332010	116.0	6.13	5.46	0.16	-0.08	87.9	89.7	0.0	-	-	916	11.1	-	1.00	MEURTHE	DAMELEVIERES
A6443010	35.0	5.98	2.93	0.81	0.17	70.6	79.0	93.0	-	55	983	11.1	-	1.00	PLAINE	TROUCHE
A6561110	559.0	6.08	3.99	1.18	0.19	87.8	86.0	157.0	-	49	696	11.1	-	1.00	VACON	BARBAS
A6621210	100.0	6.03	5.51	0.00	-0.25	81.3	57.0	100.0	-	54	989	11.3	-	1.00	VEZOUZE	LUNEVILLE
A6731220	439.0	7.05	5.52	0.59	0.33	64.3	84.0	54.0	-	49	1085	11.2	11	1.00	MORTAGNE	STE HELENE
A6812010	72.0	5.38	3.03	-0.10	-0.02	79.3	84.1	175.0	-	-	730	11.1	-	1.00	MORTAGNE	GERBEVILLER
															SANON	LA GARDE

A6903810	21.0	6.24	3.68	-0.16	0.03	80.0	90.2	108.0	210	53	715	11.1	15	1.00	PETIT RHONE	SAINT-NICOLAS-DE-PORT
A6941010	2914.0	6.01	5.05	0.69	0.28	92.2	96.2	100.0	-	-	823	11.0	-	1.00	MEURTHE	MALZEVILLE
A6953010	85.0	5.76	3.87	-0.10	0.02	72.1	84.2	69.4	-	-	613	11.0	-	1.00	AMEZULE	LAY-SAIN-T-CHRISTOPHE
A7010610	6829.0	6.02	4.88	0.80	0.01	93.5	101.9	81.1	-	-	814	11.0	-	1.00	SELLE	CUSTINES
A7122010	229.0	4.31	6.00	0.38	0.23	78.4	81.7	115.8	-	-	631	11.0	-	1.00	ESCH	JEZAINVILLE
A7352010	372.0	5.90	4.83	0.39	0.06	82.7	77.8	117.7	-	-	627	11.0	-	1.00	RUPT-DE-MAD	ONVILLE
A7642010	143.0	6.41	4.19	0.33	-0.04	84.0	57.6	166.6	-	-	630	11.0	-	1.00	PETITE-SEILLE	CHATEAU-SALINS
A7821010	923.0	5.87	4.35	0.67	0.02	85.2	119.4	93.1	-	-	614	11.0	-	1.00	SEILLE	NOMENY
A7864310	17.0	4.90	3.57	-0.18	-0.26	78.2	84.0	41.0	-	47	706	10.9	-	1.00	CHERISEY	VERNY
A7881010	1269.0	5.83	4.26	0.62	0.03	86.2	103.9	111.0	-	-	614	11.0	-	1.00	SEILLE	PONT LOTH METZ
A7930610	9387.0	6.00	4.81	0.95	0.10	93.8	104.4	100.0	-	-	814	11.0	-	1.00	MOSELLE	HAUCONCOURT
A8122010	337.0	5.83	3.70	0.25	0.05	87.3	91.6	134.3	-	-	629	10.5	-	1.00	YRON	LA CARTOUCHERIE
A8322010	76.0	5.07	5.88	-0.10	-0.14	74.8	33.8	0.0	-	-	705	10.5	-	1.00	WOIGOT	BRIEY
A8431010	1226.0	5.87	4.23	0.45	0.02	90.4	93.8	125.0	-	-	680	10.5	-	1.00	ORNE	ROSSELANGE
A8712010	30.3	6.25	3.70	-0.11	0.24	61.4	67.5	103.6	313	37	650	10.5	13	1.00	CANNER	BETTELAINVILLE
A8712020	32.8	5.27	3.50	-0.39	-0.09	52.1	58.0	88.0	-	47	727	10.9	-	1.00	CANNER	NEUDELANGE
A8732010	110.0	6.20	4.42	0.07	0.01	76.5	76.5	98.8	-	-	652	10.7	-	1.00	CANNER	KOENIGSMACKER
A8853010	47.0	6.54	3.57	0.08	0.25	78.5	88.1	687.1	241	60	646	10.5	11	1.00	RU DE MONTENACH	SIERCK-LES-BAINS
A9737310	16.0	4.63	3.71	-0.45	0.18	66.5	79.0	184.0	-	47	706	10.9	-	1.00	ELVON	LEMUD
B3103010	61.0	4.16	4.87	-0.02	-0.29	78.3	84.0	185.0	563	40	700	10.8	5	1.00	ANDON	CLERY-GRAND
D0137010	175.0	5.81	4.06	0.26	-0.09	59.7	93.0	39.0	-	53	918	10.5	-	1.00	HELPE	MINEURE ETROEUNGT
D0137020	275.0	5.45	3.63	0.59	-0.19	67.9	94.0	33.0	-	53	889	10.5	-	1.00	HELPE	MINEURE MAROILLES
D0156510	187.0	5.43	4.27	0.71	-0.17	68.4	102.0	36.0	-	55	800	10.5	-	1.00	HELPE	MAJEURE LIESSIES
D0156520	320.0	5.36	4.31	1.03	-0.20	77.1	102.0	45.0	-	53	830	10.5	-	1.00	HELPE	MAJEURE TAINIERES
D02-----	1075.0	5.66	4.32	0.60	-0.22	69.4	113.0	23.0	-	52	835	10.5	-	1.00	SAMBRE	MAUBEUGE
D0206010	115.6	6.24	4.42	0.40	0.04	80.4	83.6	100.0	457	44	640	10.5	3	1.00	SOLRE	FERRIERE-LA-GRANDE
E4035710	392.0	5.78	7.67	0.25	0.35	86.4	67.0	100.0	-	-	700	10.0	-	1.00	AA	WIZERNES
E4905710	236.0	5.77	3.28	0.54	0.16	79.6	85.4	57.4	106	48	770	10.5	2	1.00	YSER	BAMBEQUE-ENGELSHOF
H0100020	704.0	5.72	5.19	1.44	-0.38	91.4	94.7	100.0	-	-	770	11.5	-	1.00	SEINE	PLAINES-SAINT-LANGE
H0122010	257.0	6.56	5.38	0.34	-0.01	62.0	44.0	420.0	230	48	726	10.8	4	1.00	CHARENTONNE	ERRIERES-ST-HILAIRE
H0203010	87.0	8.64	4.52	0.57	1.23	75.0	92.1	73.2	168	56	926	12.5	4	0.33	LAIGNES	CHAUMES-LES-BAIGNEUX
H0203020	614.0	6.70	5.19	0.99	0.70	91.7	113.1	22.7	-	-	750	11.5	-	1.00	LAIGNES	MOLESME
H0210010	1450.0	6.36	5.30	1.35	0.16	92.8	106.5	100.0	-	-	770	11.5	-	1.00	SEINE	POLISY
H0321030	548.0	5.73	4.89	1.05	0.13	91.5	114.9	38.4	-	-	750	11.5	-	1.00	OURCE	AUTRICOURT
H0400010	2340.0	5.78	4.78	1.42	-0.07	92.2	105.0	55.0	-	48	720	11.6	-	1.00	SEINE	BAR-SUR-SEINE
H2323810	7.0	4.94	3.80	-0.08	0.24	81.4	78.0	114.0	120	54	790	12.0	15	1.00	BORSIN	SAVIGNY
H3113310	6.0	5.57	2.94	0.91	0.45	89.3	75.0	96.0	-	50	371	11.8	-	1.00	FOUR	RONCHERES AV. DRAINAGE

H3113310	6.0	5.43	3.08	0.69	0.12	64.8	65.0	82.0	-	50	371	11.8	-	1.00	FOUR	RONCHERES APRES DRAINAGE
H3113320	2.5	5.63	2.96	0.03	0.32	80.8	90.0	74.0	-	50	371	11.8	-	1.00	FOUR	PERRIAUX
H3203110	67.5	6.17	4.31	0.51	0.45	88.8	98.0	100.0	243	44	653	11.6	3	1.00	VERNISSON	NOGENT-SUR-VERNISSON
H3203310	94.0	6.08	4.54	0.53	-0.02	88.2	85.0	85.0	239	44	653	11.7	3	1.00	PUISEAUX	ST-HILAIRE
H4103210	57.4	6.14	4.62	0.40	0.24	93.4	91.9	200.0	290	44	600	11.5	1	1.00	RU DES HAULDRES	TIGERY
H5102010	40.0	4.57	4.15	0.25	0.42	82.5	157.8	81.3	492	52	966	11.5	4	1.00	SAULX	PANCEY
H5123210	32.0	5.30	4.88	0.58	-0.18	78.3	100.2	15.6	873	58	951	11.5	8	1.00	RU DE MALVAL	NANCOIS-SUR-ORNAIN
H5723010	104.0	5.38	3.50	-0.01	0.07	84.1	95.0	57.0	215	47	661	11.0	2	1.00	ORGEVAL	THEIL
H5723020	46.0	5.58	3.25	0.08	-0.03	86.1	95.0	332.0	205	47	664	10.5	4	1.00	RU-DES AVENELLES	AVENELLES
H5723030	25.0	4.90	3.32	0.09	-0.05	84.1	92.2	980.0	154	47	659	10.5	6	1.00	LA GOUGE	
H5723210	7.0	4.63	2.53	-0.10	-0.03	79.5	88.0	89.0	154	45	661	11.0	6	1.00	RU DE FOSSE-ROGNON	MELARCHEZ
H5752010	770.0	6.70	4.97	0.41	-0.15	72.0	44.4	100.0	-	-	770	10.5	-	1.00	GRAND-MORIN	POMMEUSE
H5752020	1190.0	6.74	5.58	0.56	-0.04	72.3	49.4	100.0	-	-	670	10.5	-	1.00	GRAND-MORIN	MONTRY
H6053010	71.2	5.97	4.33	0.07	0.10	89.8	96.0	100.0	651	64	923	10.9	6	1.00	BIESME	LE CLAON
H6113010	166.0	4.61	5.11	0.10	0.06	89.1	105.0	91.0	-	56	997	10.9	-	1.00	COUSANCES	AUBREVILLE
H7913610	71.4	7.54	2.54	-0.32	-0.13	57.0	103.0	71.0	-	46	605	11.0	-	1.00	LIEUTEL	VICQ
H7914020	32.0	7.02	8.06	-0.11	0.17	43.1	30.5	100.0	391	45	591	10.5	7	0.33	RU DE MALDROIT	THIVALVAL
H8012010	246.0	6.13	4.23	0.45	0.39	84.0	87.0	175.8	278	45	742	10.5	4	1.00	EPTÉ	GOURNAY-EN-BRAY
H9033310	45.3	5.74	2.77	-0.34	1.01	81.9	97.0	105.0	237	46	578	11.1	7	1.00	COINON	MAVILLIERS
H9402010	414.0	6.00	3.23	0.98	1.11	68.8	93.6	353.5	218	52	622	10.5	2	1.00	ITON	MANTHELON
H9923010	208.0	6.20	9.00	1.87	0.84	82.0	80.3	100.0	232	44	855	10.5	4	0.33	AUSTREBERTHE	DUCLAIR
I0129910	11.6	5.76	2.65	0.19	1.58	71.5	83.0	168.0	223	45	734	10.8	3	1.00	GRANDCHAIN	GRANCHAIN
I1143020	52.0	5.00	8.79	0.07	0.16	69.3	0.0	100.0	314	45	785	10.7	7	1.00	CHAUSSEY	MANNEVILLE-LA-PIPARD
I5053010	115.0	5.44	4.37	0.51	0.16	88.0	107.0	71.0	243	53	1020	11.0	8	1.00	SOULEUVRE	CARVILLE
I7001010	19.2	6.41	5.96	-0.41	-0.10	89.8	94.7	100.0	251	57	1160	11.5	13	1.00	SIENNE	LA GUERMANDERIE
I7913610	72.0	3.68	6.64	0.08	-0.18	88.4	136.0	100.0	268	53	885	11.5	6	1.00	THAR	LEZEAU
J0014010	67.0	6.51	5.67	-0.05	-0.14	84.1	110.3	100.0	219	53	757	11.3	7	1.00	NANCON	LECOUSSE
J0121510	510.0	6.04	4.70	0.28	-0.04	84.8	79.2	100.0	-	-	729	11.3	-	1.00	COUESNON	ROMAZY
J0144010	82.0	6.50	5.31	-0.17	-0.21	78.3	82.6	100.0	-	-	800	11.5	-	1.00	LOYSANCE	MOULIN NEUF
J0323010	69.0	5.77	4.58	0.49	-0.04	86.7	95.1	3.5	-	-	700	11.5	-	1.00	GUYOULT	LA VIEUVILLE EPINIAE
J0611610	153.0	5.70	4.09	0.36	-0.12	86.9	86.7	25.4	-	-	801	11.5	-	1.00	RANCE	SAINTE JOUAN DE L'ISLE
J0626610	82.0	5.68	3.52	0.35	0.07	88.9	91.2	60.4	-	-	750	11.5	-	1.00	NEAL	PONT D220 MEDREAC
J1103010	104.0	5.86	5.04	0.24	-0.08	84.6	76.0	0.0	-	-	752	11.5	-	1.00	ARGUENON	BOIS-LEAR-JUGON
J1114010	102.0	5.76	4.31	0.62	-0.05	84.4	82.2	27.1	-	-	800	11.5	-	1.00	ROSETTE	PONT-NEUF MEGRIT
J1313010	242.0	6.95	4.10	0.51	0.44	85.1	83.6	124.7	-	-	711	11.5	-	1.00	GOUESSANT	QUINQUERET
J1324010	142.0	6.28	5.06	0.22	0.31	93.5	84.3	65.3	-	-	720	11.5	-	1.00	EVRON	LA RUE COETMIEUX
J1513010	138.0	6.70	5.82	-0.12	0.47	91.4	87.7	94.1	-	-	890	11.5	-	1.00	GOUET	LA SAUDRAIE SAINT-JULIEN

J1523010	180.0	4.87	5.84	0.10	-0.14	94.6	86.2	100.0	-	-	850	11.5	-	1.00	GOUET	PONT NOIR PLOUFRAGAN
J1711710	183.0	6.16	6.05	0.03	0.26	95.2	97.0	67.2	-	-	1019	11.6	-	1.00	TRIEUX	PONT LOCMINE SAINT PEVER
J1721710	376.0	6.25	5.33	-0.06	-0.04	90.4	80.1	0.0	-	-	860	11.7	-	1.00	TRIEUX	TREGONNIEL
J1813010	339.0	6.21	4.58	0.36	0.15	94.3	84.4	-	-	-	800	11.5	-	1.00	LEFF	COZOU QUEMPEL-GUEZENNEC
J2023010	164.0	6.23	4.54	-0.70	0.17	88.2	78.7	111.5	-	-	984	11.5	-	1.00	JAUDY	PEN AR CRECH MANTALLOT
J2233010	260.0	5.77	5.66	-0.14	-0.23	88.2	82.9	0.0	-	-	900	11.5	-	1.00	LEGUER	BELLE-ISLE-EN-TERRER
J2314910	59.0	6.95	6.28	0.08	0.18	91.5	84.9	36.8	-	-	919	11.5	-	1.00	YAR	PONT VEUZIT TREDUDER
J2604010	87.6	6.63	6.05	-0.25	0.54	81.3	65.0	92.0	-	47	1006	11.7	-	1.00	QUEFFLEUTH	LESQUIPOU-POURIN
J2605410	42.3	6.97	6.36	-0.24	0.47	89.2	69.9	100.0	-	-	1106	11.8	-	1.00	TROMORGANT	COMPAIZOU PLOUGONVEN
J2613010	44.0	6.47	6.11	-0.08	-0.02	95.1	89.5	100.0	194	54	1000	12.0	13	1.00	ARLOT	L'HERMITAGE PLOUGONVEN
J2614010	88.0	6.42	5.80	-0.20	0.06	93.1	77.9	100.0	-	-	1000	12.0	-	1.00	QUEFFLEUTH	LESQUIFIOU PLOURIN LES M.
J2723010	141.0	5.69	6.01	-0.01	-0.25	95.7	107.6	69.8	-	-	1022	12.0	-	1.00	PENZE	PENHOAT TAULE
J3014310	50.0	6.40	5.84	-0.22	-0.24	85.9	75.3	100.0	-	-	850	12.0	-	1.00	HORN	PONT MILIN MESPAUL
J3114010	27.0	6.23	5.76	-0.01	-0.03	89.5	84.4	0.0	-	-	900	12.0	-	1.00	QUILLMADEC	COATIGUINO PLOUIDER
J3204010	38.0	6.18	5.76	-0.04	-0.09	90.0	81.9	100.0	-	-	965	11.8	-	1.00	ABER EST.	PLOERMEL
J3205710	24.0	5.50	6.33	0.06	0.01	87.2	75.2	100.0	-	-	965	11.8	-	1.00	ABER OUEST	LE DRENNEC
J3213010	28.0	6.33	6.26	-0.22	-0.08	93.6	88.6	100.0	-	-	850	12.0	-	1.00	ABER-BENOIT	PONT LOC-MARIA PLABEN
J3313010	77.0	2.89	6.63	0.30	-0.15	72.2	74.3	0.0	-	-	850	12.0	-	1.00	ABER-ILDUT	LOCRONAN PLOARZEL
J3601810	117.0	5.19	5.23	-0.12	0.62	85.2	90.8	109.9	-	-	1000	11.5	-	1.00	AULNE	LE GOASK-EN-SCIGNAC
J3713010	257.0	5.29	5.46	0.18	-0.13	95.9	103.6	61.6	-	-	1006	11.5	-	1.00	HYERES	PONT NEUF EN TREBRIVAN
J3733090	526.0	5.15	5.29	0.48	0.23	91.0	79.8	115.2	-	-	982	11.8	-	1.00	HYERES	CLEDEN-POHER
J3834010	138.0	5.35	5.22	0.06	-0.08	94.4	91.4	68.6	-	-	1000	12.0	-	1.00	DOUFFINE	KERBRIANT-EN-SEGAL
J4014010	89.0	6.20	6.05	0.03	0.47	94.1	100.3	0.0	-	-	750	12.0	-	1.00	GOYEN	KERMARIA-EN-PONT-CROIF
J4124410	51.0	6.91	6.04	-0.10	0.74	92.9	105.9	100.0	-	-	900	12.0	-	1.00	PONT L'ABBE	MOULIN NEUF PLOUNEOUR
J4211990	205.0	5.15	6.18	0.17	-0.11	94.4	79.9	0.0	-	-	1104	11.0	-	1.00	ODET	TREODET
J4214510	6.0	4.50	6.11	-0.36	0.13	86.4	69.0	76.0	103	62	1136	11.9	21	1.00	LANGELIN	BRIEC DE L'ODET
J4224010	107.0	6.30	6.13	-0.01	-0.16	86.6	94.4	100.0	-	-	974	11.9	-	1.00	JET	ERGUE-GABERIT
J4514010	20.0	6.56	6.07	-0.18	0.30	93.4	100.7	100.0	-	-	819	12.0	-	1.00	MOROS	CONCARNEAU
J4614010	70.0	5.73	6.56	-0.01	-0.02	95.3	108.6	-	-	-	1000	12.0	-	1.00	STER-GOZ	TREBALAY BANNALEC
J4623010	184.0	5.92	6.24	0.07	-0.05	96.5	93.1	100.0	-	-	1007	12.0	-	1.00	AVEN	PONT-AVEN
J4712010	142.0	6.12	5.14	0.41	-0.30	90.2	90.5	30.9	-	-	1141	12.0	-	1.00	ELLE	GRAND PONT LE FAOUE
J4734010	118.0	6.32	5.91	-0.16	0.03	95.1	81.4	44.1	-	-	1139	12.0	-	1.00	INAM	LE FAOUE PONT BRIANT
J4742090	580.0	6.63	5.35	0.36	-0.05	89.9	92.0	35.0	-	60	963	11.9	-	1.00	ELLE	PONT-TY-NADAN
J4803010	97.3	5.82	5.11	-0.02	-0.45	88.5	76.0	60.5	-	-	1157	11.9	-	1.00	ISOLE	SCAER, STANG BOUJILIN
J4813090	224.0	6.81	5.72	0.21	0.14	82.1	70.2	0.0	-	-	1055	11.9	-	1.00	ISOLE	QUIMPERLE
J5102290	300.0	6.06	5.75	0.40	-0.02	86.6	86.8	0.0	-	-	967	11.8	-	1.00	SCORFF	PLOUAY
J5202110	21.0	6.18	5.98	0.02	-0.13	94.5	98.2	15.5	-	-	1144	11.7	-	1.00	BLAVET	KERLOUET EN KERJEN

J5212110	104.0	6.67	5.93	0.32	0.52	91.7	-	-	189	49	917	11.7	4	1.00	BLAVET	PLOUNEVEZ
J5606810	11.93	5.37	5.22	-0.66	-0.09	79.1	75.0	50.0	-	54	899	11.8	-	1.00	COET-DAN	NAIZIN
J5613010	316.0	5.62	5.44	0.52	-0.05	92.6	93.4	0.0	-	-	814	11.8	-	1.00	EVEL	GUENIN
J5704810	47.7	5.42	6.56	-0.10	0.08	89.9	85.0	58.0	221	55	950	11.9	3	1.00	COET ORGAN	KERDEC-EN-QUISTINIC
J6213010	179.0	5.39	5.72	0.39	0.37	89.5	147.5	60.4	-	-	750	12.0	-	1.00	LOCH	BRECH
J6407110	10.0	5.83	5.99	-0.20	0.40	92.5	107.2	84.6	-	-	800	12.0	-	1.00	ROHAN	GUERN-EN-SAINT-AVEN
J6407120	22.0	5.57	5.86	-0.10	0.00	94.6	98.1	0.0	-	-	800	12.0	-	1.00	ROHAN	MENIMUR-EN-VANNES
J7010610	122.0	5.64	4.41	0.30	-0.12	91.4	95.6	7.4	162	48	780	11.5	5	1.00	VILAINÉ	SAINTE-M'HERVE
J7053010	129.0	5.89	4.38	0.14	-0.07	85.9	82.1	0.0	-	-	800	11.5	-	1.00	CANTACHE	RABAUD CHAMPEAUX
J7060620	604.0	5.71	4.34	0.59	0.13	95.0	95.7	55.7	-	-	604	11.4	-	1.00	VILAINÉ	SERVON-SUR-VILAINÉ
J7083110	153.0	5.69	3.57	0.64	0.04	87.0	93.8	38.0	-	-	647	11.4	-	1.00	CHEVRE	LA BOUXIERE
J7214010	93.0	5.72	4.07	0.08	-0.07	82.1	67.1	50.0	-	-	610	11.5	-	1.00	FLUME	PACE PONT D231
J7353010	468.0	6.16	3.60	0.35	0.25	88.6	79.4	67.9	-	-	750	11.5	-	1.00	MEU	MONTFORT-SUR-LE-MEU
J7355010	14.0	5.55	4.05	-0.10	0.02	82.4	72.5	31.2	-	-	780	11.5	-	1.00	SEREIN	PONT D36 TREFFENDEL
J7356010	14.0	4.88	3.82	-0.03	0.24	90.2	66.4	94.1	-	-	764	11.5	-	1.00	CAREIL	MONTERFIL
J7373110	61.0	5.66	5.28	0.33	0.03	84.5	88.5	0.0	-	-	800	11.5	-	1.00	VAUNOISE	VILLEBRIOUX-ST-GILLES
J7483010	820.0	5.88	4.71	0.73	0.42	89.4	103.0	48.9	-	-	721	11.5	-	1.00	SEICHE	BRUZ
J7633010	383.0	5.38	3.73	0.52	0.06	89.9	85.4	61.5	-	-	750	11.5	-	1.00	SEMONN	ROCHEREUIL
J7824010	118.8	5.69	3.75	0.51	0.48	91.3	94.0	107.0	139	46	809	11.7	4	1.00	ARON	BERNADAIS GD FOUGERAY
J7973010	37.0	5.63	4.21	-0.12	-0.04	86.3	80.2	21.5	-	-	800	11.5	-	1.00	CANUT	COLOMBEL ST-JUST
J8023010	254.0	5.10	5.68	-0.17	0.51	90.6	89.6	151.0	-	-	891	11.5	-	1.00	OUST	HEMONSTOIR
J8133010	295.0	6.00	5.53	-0.08	-0.14	89.9	56.4	43.3	-	-	843	11.6	-	1.00	LIE	PONT DI LA PRENESSAYE
J8143010	379.0	5.88	5.73	0.07	0.29	81.2	92.1	-	-	-	746	11.7	-	1.00	LIE	PLUMIEUX
J8363110	315.0	6.09	4.54	0.65	-0.01	91.8	101.1	0.0	-	-	690	11.7	-	1.00	YVEL	LOYAT
J8413010	137.0	5.76	5.85	0.42	0.13	93.6	104.5	38.8	-	-	912	11.7	-	1.00	CLAIE	SAINTE JEAN BREVELAY
J8602410	30.2	5.70	4.19	0.16	0.09	91.9	85.0	100.0	201	47	886	11.7	14	1.00	AFF SUPERIEUR	PAIMPONT PONT DU SECRET
J8632410	334.0	5.62	4.38	0.54	0.03	89.3	78.2	98.8	-	45	800	12.0	-	1.00	AFF INFERIEUR	QUELNEUC
J8653010	103.0	5.54	3.79	0.22	0.05	91.2	86.2	74.5	-	-	800	12.0	-	1.00	COMBS	COMPESSE MAURE DE B.
K0323010	75.8	5.65	4.56	0.43	-0.38	59.6	52.0	3.0	225	75	800	13.0	7	1.00	ARZON	CHOMELIX
K0724510	11.2	5.36	3.93	0.36	0.04	75.5	83.3	12.4	228	61	590	12.5	27	1.00	CHARNASSON	LA RIVIERE
K1084010	23.0	5.68	4.60	0.65	-0.31	73.7	102.0	15.0	310	65	834	12.7	64	1.00	TEYSONNE	LA NOAILLERIE
K1263110	16.4	6.38	5.04	-0.04	-0.10	86.4	86.1	0.0	250	63	980	12.5	16	1.00	TERNIN	CHAMBOUX
K1724210	115.0	5.26	4.24	0.18	-0.13	90.7	85.0	116.0	308	57	1130	12.2	18	1.00	DRAGNE	VANDENESSE
K1775510	67.0	5.16	3.08	0.17	0.08	81.8	88.8	81.5	191	54	900	12.5	6	1.00	ANDARGE	LE PERAT
K1914510	115.0	5.59	3.97	0.26	0.10	89.4	115.0	84.0	189	54	912	12.2	11	1.00	IXEURE	LA FERMETE
K2365510	46.0	4.58	4.56	0.05	0.58	52.2	79.7	97.3	524	69	800	13.5	23	1.00	LIDENNES	COUTEUGES
K2544010	66.0	6.16	4.91	-0.33	0.12	44.1	75.2	0.4	268	69	800	13.5	22	1.00	ALLAGNONETTE	MASSIAC

K2644010	73.0	5.04	5.21	0.49	-0.30	55.4	88.8	0.0	280	73	630	13.5	18	1.00	AILLOUX	MANGLIEU
K2753010	109.0	4.80	4.79	0.05	-0.21	71.4	87.9	1.4	202	69	620	12.5	14	1.00	MORGE	MONTCEL
K2784510	60.0	5.49	4.21	0.35	0.14	86.3	96.0	33.0	216	67	700	12.9	4	1.00	ANDOUX	MARINGUES
K2884010	70.0	6.65	4.98	-0.16	-0.42	68.4	90.9	100.0	331	78	1121	12.5	40	1.00	FAYE	GIROUX
K2944010	75.0	6.67	4.33	0.13	-0.24	77.2	87.9	0.0	316	78	1121	12.5	38	1.00	COUZON	SALET
K3374710	71.0	6.25	4.26	0.27	0.53	64.3	85.3	82.4	133	63	700	12.5	16	1.00	BOUBLON	LAGEES FOURILLES
K4156510	27.0	5.48	2.89	0.06	-0.09	85.0	74.0	92.0	177	43	650	11.9	10	1.00	ETHELIN	CHATILLON-SUR-LOIRE
K4856020	63.0	7.20	5.41	0.25	0.09	61.1	14.6	100.0	197	50	635	11.5	2	1.00	RAMBERGE	POCE-SUR-CISSE
K6334010	79.0	6.05	4.47	0.09	-0.09	86.3	98.0	113.0	169	49	788	12.0	7	1.00	NERE	AUBIGNY-SUR-NERE
K6402510	1200.0	5.98	4.18	1.07	-0.12	91.7	98.0	53.0	-	48	772	11.8	-	1.00	SAULDRE	SALBRIS
K6544010	22.3	5.20	2.54	-0.13	0.52	73.6	69.0	149.0	-	48	688	12.0	-	1.00	POULAIN	POULAINES
K7424010	75.5	5.69	2.48	0.36	0.17	82.6	75.0	183.0	191	51	680	11.8	4	1.00	OLIVET	BEAUMONT-VILLAGE
K7529010	14.6	5.45	2.81	0.17	0.56	86.9	91.1	103.3	144	45	698	11.5	3	1.00	RU DE MONTISON	THILOUZE
L0010610	61.0	6.11	5.95	-0.04	-0.03	90.3	84.5	0.0	240	80	1181	12.5	11	0.67	VIENNE	SERVIERES
L0244510	62.0	7.10	4.83	-0.15	0.04	85.0	80.5	-	304	70	1004	12.5	11	0.67	LEYRENNE	MURAT
L2303010	19.0	5.53	2.99	0.03	0.46	84.8	69.0	104.0	-	-	759	12.0	-	0.67	CLOUERE	LE POUX
L5034010	131.0	6.21	5.19	0.00	-0.14	89.7	93.0	118.0	303	70	983	12.6	8	0.67	ARDOUR	FORGEFER
L5114010	20.0	5.37	5.75	-0.08	-0.22	90.1	99.8	0.0	272	65	991	12.5	23	0.67	COUZE	LE MAZEAUD
L5323010	235.0	5.34	4.68	-0.08	-0.08	67.6	79.0	76.0	-	55	854	12.4	-	1.00	BRAME	LA PERRIERE
L8114010	33.0	5.69	4.06	-0.15	0.36	83.4	97.1	125.4	153	57	879	12.5	5	1.75	VIETTE	PONT DE LA BORDE
L9203010	37.0	6.06	3.78	-0.07	-0.15	78.0	77.9	100.0	1104	45	675	11.5	2	1.00	COUASNON	PONTIGNE
L9214510	25.7	6.64	3.26	0.18	-0.14	81.0	88.6	100.0	533	45	675	11.5	6	1.00	TARY	GRUTEAU
M0365010	79.0	6.34	5.74	-0.10	-0.04	74.5	15.0	100.0	257	53	776	11.2	8	1.00	RHONE	NOGENT-LE-ROTRON
M1024810	122.0	5.35	2.91	0.28	1.51	86.1	89.9	126.8	190	50	614	11.5	3	1.00	VALLEE DE LA MALORNE	BOUVILLE
M1214010	85.0	5.40	3.70	-0.10	0.16	84.4	91.9	-	311	47	660	11.5	5	1.00	COUETRON	GLATIGNY
M1354020	67.0	5.76	3.34	0.16	0.08	90.1	80.0	333.0	265	45	691	11.7	3	1.00	ESCOTAIS	ST PATERNE RACAN
M5104310	33.0	5.19	3.40	-0.19	-0.01	74.4	83.0	72.0	-	-	620	12.0	-	1.75	GAUBRETIERE	LE MUREAU
M6204010	79.0	5.32	3.03	0.26	0.37	77.4	76.0	115.0	175	46	724	11.8	2	1.00	DONNEAU	MESANGER
M6214010	60.0	5.19	3.23	0.09	-0.09	67.0	76.0	111.0	174	46	734	11.9	2	1.75	DIVATTE	LANDEMONT
M6357010	32.0	5.72	3.57	0.39	-0.06	78.7	79.8	4.2	202	51	717	11.5	3	1.00	CENS	PONT D'ORVAULT
M8144010	130.0	5.40	3.37	0.08	0.09	75.4	78.0	91.0	-	-	800	12.0	-	1.33	LOGNE	LA ROUSSIERE
M8202610	193.0	5.51	3.48	0.00	0.09	70.6	74.0	89.0	-	-	800	12.0	-	1.33	BOULOGNE	LA VACHERIE
M8205020	147.0	5.66	3.36	0.40	-0.01	74.8	69.0	85.0	-	-	745	12.0	-	1.33	OGNON	VILLENEUVE-LES-SORNIERES
N0113010	31.0	5.32	3.06	-0.52	0.30	82.2	89.0	106.0	316	50	913	12.2	6	1.75	FALLERON	FALLERON-PONT-D35
N4104010	61.1	5.67	4.07	-0.17	0.27	83.1	79.0	112.0	155	61	905	12.2	5	1.75	CHAMBON	DONIA-MAUNAY
O0015310	38.0	6.63	6.11	-0.25	-1.05	45.1	72.9	0.0	208	85	1354	14.5	125	1.00	MAUDAN	FOS
O0302510	41.0	7.06	5.51	-0.36	-1.07	22.9	48.9	0.0	237	78	1310	14.5	235	1.00	SALAT	PHELIPS

O0355320	16.0	6.55	8.01	-0.65	0.81	46.2	100.0	0.0	189	83	1401	14.5	197	1.00	ARS	AULUS
O0355610	9.0	6.98	6.58	-0.47	0.34	44.1	71.9	0.0	259	83	1867	14.5	212	1.00	FOUILLET	AULUS 3
O0624010	91.0	6.07	3.28	0.00	-0.13	60.6	78.0	55.0	388	73	973	14.5	12	1.75	VOLP	STE-CROIX-VOLVESTRE
O1576910	6.0	5.76	3.82	-0.20	0.65	82.0	83.2	73.9	473	84	1004	14.5	40	1.75	RUISSEAU DES GOURDS	LIMBRASSAC
O1804050	13.5	4.78	3.33	-0.29	-0.10	84.8	90.6	107.3	647	84	1142	14.5	27	1.75	LEZE	SOUTEMBEL
O1814040	98.0	5.84	3.65	0.21	0.32	86.4	90.6	-	407	83	792	14.5	11	1.75	LEZE	ARTIGAT
O1847410	7.0	5.51	4.41	-0.21	0.07	76.5	65.0	82.0	-	-	763	14.5	-	1.75	VERMEIL	LEZAT
O2304020	108.0	5.26	4.53	0.27	0.34	83.6	81.8	73.6	220	75	780	14.5	3	1.00	GIROU	SCOPONT
O2703330	41.0	5.91	3.29	-0.19	-0.45	81.5	86.4	100.0	263	81	923	14.5	40	1.75	GIMONE	BOULOGNE-LUNAX
O2725010	36.0	5.79	3.14	-0.13	0.36	84.9	81.4	114.2	270	60	787	13.5	27	1.75	LAUZE	FAGET ABBATIAL
O2825010	19.7	6.07	2.87	0.01	0.12	84.5	83.0	97.3	213	69	663	13.5	11	1.00	PEST	COLOGNE
O2886210	1.4	5.16	2.09	-0.04	0.43	61.5	67.1	483.1	364	54	677	13.5	3	1.00	MARRES	CORDES TOLOSANNES
O3165010	36.0	5.94	5.05	-0.16	0.33	92.0	100.3	85.3	202	215	1133	14.5	9	1.00	BREZE	MEYRUEIS
O4704030	72.0	5.39	4.69	0.27	-0.11	89.1	88.4	5.5	175	90	1299	14.5	6	1.00	DADOU	ST-JEAN-DE-JEANNE
O4745610	26.5	6.23	4.40	0.20	-0.03	80.6	96.0	51.0	340	88	1039	14.5	9	1.00	LEZERT	BANCALIE
O6125010	62.0	4.86	4.56	0.03	-0.09	88.7	93.0	94.0	463	64	866	13.5	15	1.00	PETITE BARGUELONNE	MONTCUQ
O6475910	6.8	5.22	3.00	-0.44	0.42	91.2	89.2	260.9	262	51	662	13.5	17	1.00	LAMBRONNE	LAMONTJOIE
O6804630	10.2	5.22	3.35	-0.21	0.06	68.2	68.0	86.0	165	66	870	13.8	15	1.75	OSSE	MIELAN-CASTEX
O7145210	53.0	5.57	5.10	-0.39	-0.33	82.1	86.8	0.0	193	79	1160	13.5	14	1.00	BORALDE DE ST-CHELY	CASTELNAU-DE-MANDAILLES
O7155010	100.0	5.99	5.46	-0.44	-0.05	79.0	106.7	100.0	200	77	1126	13.5	8	1.00	BORALDE DE BONNEVAL	BONNEVAL
O7175010	41.0	5.86	4.07	-0.06	-0.06	80.8	76.8	100.0	207	76	1141	13.5	33	1.00	COUSSANNE	CABRESPINES
O7245010	67.0	5.61	4.43	-0.28	-0.33	62.8	70.0	5.0	240	85	830	13.6	15	1.00	CHAPOUILLET	CHASSIGNOLLES
O7265010	76.0	6.04	4.91	0.10	0.09	80.5	79.7	0.0	186	85	830	13.5	30	0.67	LIMAGNOLE	SAINTE-ALBAN
O7625210	37.0	5.74	5.40	-0.43	0.10	89.6	90.0	22.8	230	77	1253	13.5	24	1.00	ONDES	ONDES
O8133520	1190.0	5.33	4.25	0.64	-0.22	90.0	94.0	76.0	-	69	1022	13.5	-	1.00	CELE	LES AMIS DU CELE
O9196210	9.7	5.56	2.88	-0.09	1.20	79.3	93.4	1000.	1188	58	800	13.5	12	1.00	CADANNE	PONDAURAT
P0212510	39.0	6.14	5.27	-0.38	-0.48	82.5	78.8	0.0	246	88	1478	13.5	21	1.75	RHUE	EGLISENEUVE-D'ENTRAIGUES
P0924010	76.0	6.25	5.46	-0.06	-0.20	90.0	93.0	0.0	291	85	1300	13.5	11	0.67	TRIOUZOUNE	SAINTE-ANGEL
P1114010	82.0	5.20	6.07	-0.03	0.17	90.1	105.9	0.0	293	85	1300	13.5	23	0.67	LUZEGE	PONT-DE-MAUSSAC
P3322510	54.0	4.75	5.54	0.05	-0.02	87.6	86.8	92.2	249	84	1100	13.5	17	0.67	CORREZE	PONT-DE-LANOUR
P3614010	42.0	6.28	6.03	-0.14	0.21	89.0	94.6	0.0	260	84	1250	13.5	13	0.67	MONTANE	PONT-DU-JAY
P4105010	64.0	5.52	4.02	-0.03	-0.29	84.2	88.0	64.0	-	90	1046	13.1	-	0.67	COUZE	LE SOULIER
P5404010	73.5	5.76	3.63	0.17	-0.11	92.1	97.0	86.0	311	59	801	12.8	6	1.00	EYRAUD	BITAREL
P5715210	16.2	5.64	2.51	0.00	0.20	60.1	56.0	127.0	372	53	753	13.0	6	1.00	COURMERAN	BOISSONNEAU
Q1224010	48.6	5.48	3.68	-0.10	0.41	92.3	99.0	99.0	390	62	935	13.5	5	1.75	BAHUS	EUGENIE-LES-BAINS
Q2094310	111.0	6.00	3.47	0.19	0.25	88.5	99.9	197.0	358	50	893	13.5	3	1.00	IZAUTE	MONTLEZUN
Q5114010	76.0	6.59	4.08	0.14	0.12	86.8	86.0	636.0	228	73	1174	13.7	11	1.75	LAGOIN	ARESSY

Q6404020	26.3	8.27	5.22	-0.29	-0.24	71.09	87.7	100.0	579	80	2000	13.5	146	1.00	GAVE DE LOURDIOS	PONT DE LA MOULINE
Q8345910	17.9	6.46	3.58	-0.25	-0.42	81.6	77.0	148.0	175	125	1990	13.8	27	1.75	MENDIALCU	HASPAREN
R0020000	110.0	5.30	3.76	0.02	-0.26	90.4	84.0	64.0	-	57	895	12.5	-	0.82	CHARENTE	SURIS
R0110000	492.0	5.93	3.69	0.63	-0.17	90.4	86.0	105.0	-	56	855	12.3	-	1.00	CHARENTE	ST SAVIOL
R0220000	1071.0	6.10	4.82	0.76	-0.16	95.2	97.0	36.0	-	57	872	12.4	-	1.00	CHARENTE	CHENON
R1054000	203.2	6.19	4.67	0.75	0.08	92.1	98.0	76.0	-	57	912	12.4	-	1.00	BONNIEURE	VILLEBETTE
R1192500	389.0	6.11	4.73	0.33	-0.26	89.7	82.0	129.0	-	57	951	12.5	-	0.33	TARDOIRE	MONTBRON
R1264000	333.0	6.72	5.39	0.36	-0.14	83.9	86.0	131.0	-	58	941	12.6	-	0.33	BANDIAT	FEULLADE
R1302500	1200.0	6.82	4.82	0.70	0.97	90.2	86.0	123.0	-	57	926	12.5	-	0.33	TARDOIRE	COULGENS
R2020000	3000.0	6.34	4.85	1.01	0.19	95.3	87.0	103.0	-	57	897	12.5	-	1.00	CHARENTE	LUXE
R2104000	90.0	6.16	4.55	-0.06	0.08	90.1	89.0	113.0	-	57	871	12.4	-	1.00	AUME	LONGRE
R2134100	452.0	5.86	5.33	0.96	0.22	94.8	103.0	70.0	-	57	818	12.5	-	1.00	AUME	LES MARAIS
R2310000	3750.0	6.22	4.90	1.32	-0.02	95.7	98.0	88.0	-	57	878	12.5	-	1.00	CHARENTE	CHALONNES
R4122510	529.0	5.80	5.05	0.52	0.20	90.8	105.0	82.0	-	54	910	12.7	-	1.00	NE	ST-FORT-SUR-LE-NE
R5123400	881.6	6.25	4.93	0.81	0.21	95.2	87.0	120.0	-	52	920	12.8	-	1.00	SEUGNE	PONS
R6164600	75.0	5.20	5.33	-0.02	0.32	88.9	89.0	96.0	-	53	856	12.5	-	1.00	TREZENCE	TOURNAI
R6092900	523.0	5.34	5.38	0.75	-0.18	93.7	98.0	61.0	-	56	908	12.4	-	1.00	BOUTONNE	LE VERT
S2224610	108.0	6.11	5.08	0.43	0.24	96.7	98.3	86.8	410	56	950	13.5	2	0.50	GRAND ARRIOU	BIGANON
S2235610	36.0	6.58	5.75	0.46	0.41	85.3	83.3	100.0	532	56	931	13.5	3	0.50	BOURON	MOULIN-DU-MOINE
S4214010	60.0	7.27	7.81	0.34	0.19	78.2	98.5	100.0	2986	62	1280	13.5	3	0.50	MAGESCQ	MAGESCQ
U0005810	17.8	6.04	4.07	-0.30	0.06	86.4	86.1	25.7	574	45	879	11.5	29	1.00	RU DES THUILLERES	RELANGES
U0025410	8.6	5.55	3.91	-0.30	0.04	79.9	80.2	999.0	611	48	838	11.5	17	1.00	RU DES AILES	BLEURVILLE
U0415010	123.0	5.58	5.07	0.31	-0.21	81.7	84.0	43.0	349	91	1871	11.3	19	1.00	REUCHIN	LA PROISELIERE
U1004010	73.5	4.84	4.76	0.03	-0.74	82.4	70.0	42.0	382	108	1892	11.3	56	1.00	OGNON	FOURGUENONS
U1025010	33.0	5.03	4.73	-0.05	-1.00	84.0	84.0	28.0	351	112	2188	11.3	42	1.00	RAHIN	PLANCHER-BAS
U2022010	350.0	6.31	5.68	0.40	1.36	78.0	66.7	55.4	-	-	1300	11.5	-	1.00	DOUBS	PONTARLIER
U2142010	1240.0	6.25	5.31	0.65	0.77	79.5	89.1	0.0	-	-	1300	11.5	-	1.00	DOUBS	COURCLAVON
U2215020	560.0	6.41	4.36	0.48	0.57	81.1	100.6	182.4	-	-	1300	11.5	-	1.00	DESSOUBRE	SAINT-HIPPOLYTE
U2222010	2200.0	7.07	5.29	0.44	1.88	83.4	117.2	744.4	-	-	1300	11.5	-	1.00	DOUBS	MATHAY
U2305210	9.0	3.42	5.56	-0.17	1.29	91.1	72.2	70.9	-	-	1200	11.3	-	1.00	SAINT-NICOLAS	ROUGEMONT-LE-CHATEAU
U2345030	141.0	5.37	5.28	-0.03	1.01	88.5	87.1	77.3	-	-	1200	11.3	-	1.00	SAVOUREUSE	BELFORT
U2345810	25.0	5.21	5.08	-0.01	0.00	85.1	95.4	50.3	-	-	1200	11.3	-	1.00	ROSEMONTOISE	CHAUX
U2346010	7.48	5.36	5.44	0.04	-0.27	84.7	108.0	23.0	324	116	2012	11.4	143	1.00	ROSEMONTOISE	ROSEMONT
U2354010	1120.0	6.11	5.13	0.41	0.40	80.5	108.9	733.3	-	-	1200	11.3	-	1.00	ALLAN	COURCELLES
U2356610	42.2	4.53	4.59	0.06	0.00	73.1	105.0	82.0	426	52	1090	11.5	19	1.00	RUPT	DUNG
U2402010	3420.0	6.46	4.97	0.56	1.11	84.3	117.0	260.0	-	-	1200	11.5	-	1.00	DOUBS	VOUJEAUCOURT
U2635010	43.0	5.17	4.31	-0.20	-0.45	77.8	103.0	46.0	-	63	1353	11.7	-	0.50	FURIEUSE	SALINS-LES-BAINS

U3205210	31.0	5.55	4.76	-0.30	-0.10	92.5	103.1	0.0	300	80	1050	12.5	56	1.00	GROSNE	LESCHAMBOSES
U3415020	37.0	5.36	3.29	-0.20	0.17	79.6	89.0	104.0	734	54	1261	11.8	42	1.00	BRENNE	SELLIERES
U4204010	34.0	6.01	4.56	-0.05	0.20	90.5	89.0	121.0	199	69	958	12.2	3	1.00	VEYLE	LENT
U4505010	55.0	5.68	4.85	0.27	-0.01	87.0	93.6	100.0	306	66	990	12.5	8	1.00	ARDIERES	BEAUJEU
V0345210	30.5	6.55	5.43	-0.21	0.56	71.4	95.0	31.0	219	75	1200	12.0	116	1.00	REDON	MARGENCEL
V1235210	27.1	5.87	4.11	-0.33	-0.94	51.4	74.0	3.0	762	73	1200	12.6	162	1.00	IRE	DOUSSARD
V1454310	50.0	4.80	6.05	0.09	-0.42	91.6	92.1	0.0	2472	71	1100	12.5	-	1.00	FURANS	PONT-DU-MARTINET
V1525410	41.0	5.91	5.55	0.16	-0.37	77.8	87.7	100.0	396	85	1200	12.5	30	0.33	AINAN	ST-GEOIRE-EN-VALDAINE
V3015010	48.0	5.27	4.74	0.03	-0.03	87.7	93.8	2.5	259	67	800	12.5	39	1.00	YZERON	CRAPONNE
V4145210	71.0	5.37	5.32	-0.21	-0.68	83.0	113.0	29.0	65	165	1250	13.2	45	1.00	GLUEYRE	TISONECHE
V4455010	85.0	6.61	4.48	0.05	-0.29	80.2	90.0	23.0	533	99	930	13.5	33	1.00	JABRON	SOUSPIERRE
V5404020	79.7	6.27	5.69	-0.28	-0.06	91.4	97.5	15.6	278	188	1597	13.5	40	1.50	CEZE	ECHOLETTE
V5406010	34.4	4.51	5.55	-0.35	0.56	88.2	96.0	225.0	191	190	1672	13.5	73	1.50	HOMOL	ECHOLETTE
V5425210	55.3	5.25	4.41	0.12	-0.36	90.0	96.0	42.2	199	185	1349	13.5	52	1.50	GANIERE	BANNE-LE-PONTEIL
V6155610	38.5	5.73	5.87	-0.12	0.00	64.1	71.1	100.0	228	84	750	14.5	23	1.00	BREGOUX	AUBIGNAN
V7136610	1.4	5.20	5.52	-0.46	-0.34	88.6	88.1	34.9	195	180	1578	14.5	130	1.50	COULEGNE	COLOGNAC
-0426210	11.0	1.00	7.57	-0.48	-0.88	42.6	105.6	0.0	140	61	1100	14.5	166	1.00	TORRENT DE LA CLAPOUZE	RESTEFOND
-0716210	3.0	5.58	4.53	-0.45	-0.17	66.4	70.9	0.0	93	73	950	14.5	35	1.00	SYRIEX	LA MOTTE-DU-CAIRE
-1027010	15.6	2.72	4.61	-0.27	0.67	39.3	63.2	83.6	625	79	950	14.5	60	1.00	MARAIZE	LE SAIX
-1045820	16.0	6.92	4.76	0.08	0.27	80.2	85.6	2.2	190	77	950	14.5	101	1.00	RIOU	ST-GENIS-MILIEU
Y0115410	16.5	3.27	4.96	-0.35	-1.00	77.8	77.8	23.0	328	241	1000	15.5	118	1.50	MASSANE	MAS D'EN-TORRENT
Y0245210	32.3	5.14	3.55	-0.31	-0.9	60.0	86.0	20.0	332	299	800	15.5	35	1.50	MONDONY	AMELIE-LES-BAINS
Y0436420	60.2	1.00	5.14	-0.46	0.00	58.2	77.0	18.1	202	108	1000	15.5	158	1.50	CADY	VILLEFRANCHE DE CONFLENT
Y0455010	53.7	5.01	5.53	-0.64	0.96	71.2	83.2	119.0	163	149	1056	15.5	121	1.50	LENTILLA	FINISTRET
Y0466010	59.5	4.72	5.03	-0.53	-0.06	80.4	88.4	55.5	344	133	850	15.5	55	1.50	BOULES	CASEFABRE
Y0626410	41.4	6.57	5.77	-0.55	1.22	91.1	85.6	140.7	285	96	825	15.5	55	1.50	MATASSA	ALBAS
Y1514010	75.8	6.08	4.59	0.01	-0.01	87.5	80.0	15.6	656	105	1155	15.5	22	1.50	ORBIEU	MONTJOI
Y1605410	40.2	5.59	4.73	0.26	1.19	90.6	91.0	294.8	384	100	1034	14.5	36	1.50	BRIAN	MINERVE
Y2002010	46.0	5.00	5.28	-0.37	0.89	86.3	82.5	171.2	286	245	2273	14.5	96	1.50	HERAULT	VALLERAUGUE
Y2132010	1090.0	5.59	4.72	0.23	-0.29	87.7	100.0	97.0	-	-	1531	14.5	-	1.50	HERAULT	MOULIN BERTRAND
Y4002010	49.8	6.09	3.26	-0.35	0.36	72.9	81.1	122.4	546	92	800	15.1	22	1.00	ARC	POURRIERES
Y4225810	16.0	5.20	4.48	0.09	0.99	90.7	106.0	122.0	-	-	546	15.2	-	1.00	BONDON	MONTVALLON
Y4305610	7.4	5.47	5.32	0.42	0.34	72.2	75.5	9.8	400	112	650	15.3	41	1.00	GAUDRE	DE DAMPET MAUSSANE
Y4615610	70.6	5.72	4.36	-0.50	0.94	93.6	99.0	144.0	218	129	1138	15.5	25	1.00	REAL COLLOBRIER	ONT DE FER
Y4615810	9.4	5.70	4.96	-0.57	0.27	95.2	103.0	99.0	208	130	1279	15.5	95	1.00	VALESCURE	BOURDINS
Y4615820	29.0	5.88	3.95	0.01	-0.41	76.4	93.1	1.0	209	134	1189	15.5	41	1.00	REAL COLLOBRIER	COLLOBRIERES
Y4616010	8.6	5.77	5.03	-0.54	0.20	93.1	92.0	105.0	208	138	1176	15.5	64	1.00	MAURETS	BOURDINS

Y4616210	1.5	2.80	4.96	-0.58	0.47	84.2	83.0	91.0	210	157	1138	15.5	73	1.00	RIMBAUD	DESTEU
Y4616220	12.0	5.52	4.00	-0.26	-0.55	69.5	83.1	60.8	208	136	1136	15.5	113	1.00	MALIERE	GOUR DE L'ASTRE
Y4617610	6.0	6.34	4.28	0.50	0.86	85.8	84.2	140.4	209	110	926	15.5	77	1.00	MARAVAL	LA BASTIDE COGOLINS
Y4617620	10.0	6.49	4.19	0.48	1.11	91.8	86.8	156.1	204	111	899	15.5	48	1.00	MARAVAL	LES DAVIDS
Y4705410	4.0	5.47	4.47	-0.06	-0.11	82.9	88.5	40.7	204	163	950	15.5	220	1.00	MARAVENNE	VALCROS
Y4717810	1.5	5.43	4.76	-0.50	-0.18	92.7	90.1	97.0	210	128	1136	15.5	185	1.00	VAUBARNIER	REGUE DE BOYER
Y5105010	215.0	6.40	3.04	0.31	-0.38	83.9	97.9	100.0	-	150	1110	15.5	48	1.00	CARAMY	INS/CARAMY
Y5202010	1730.0	6.59	4.61	0.48	-0.20	76.7	75.0	17.0	-	124	854	15.6	-	1.00	ARGENS	LES ARCS
Y5405210	9.4	6.60	0.57	-0.24	-0.06	48.3	54.0	2.0	207	171	950	15.6	65	1.00	BATAILLER	LA VERRERIE
Y5435010	44.4	3.89	4.21	-0.32	-0.24	44.0	45.0	52.0	207	163	950	15.7	44	1.00	MOLE	LE DESTELMOSAS
Y5436210	38.0	7.44	3.18	-0.48	-0.42	68.3	63.0	3.0	357	149	950	15.8	46	1.00	VERNE	LES CABRIS
Y5445010	18.0	6.19	3.92	0.01	-0.45	63.4	70.0	22.0	190	185	950	15.8	38	1.00	GARDE	GRIMAUD
Y7315010	54.0	6.01	3.52	0.02	-0.72	48.0	67.9	0.0	159	80	1000	15.5	115	1.00	LURI	CAMPO
Y7505010	69.0	4.53	3.85	0.32	0.10	91.9	92.9	328.2	153	118	900	14.5	89	1.00	ALISO	MALPERGO
Y7615010	45.0	5.13	4.65	-0.05	-0.21	55.1	89.1	10.6	174	84	1100	14.5	44	1.00	REGINO	REGINO
Y9205010	44.0	5.86	5.58	-0.69	-0.67	75.7	81.8	100.0	189	199	800	14.5	139	1.00	ALESANI	PIETRA-DI-VERDE
Y9806210	53.3	5.35	4.20	-0.32	0.16	61.6	58.0	122.0	171	110	801	14.4	95	1.00	PETROSE	PONT DE BALA