

ACADEMIE DE MONTPELLIER  
UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES

DEA NATIONAL D'HYDROLOGIE  
OPTION : SCIENCES DE L'EAU ET AMENAGEMENT

**MODELE GLOBAL "ORSTOM 74"**

**Analyse des structures et du fonctionnement  
en vue d'une reformulation**

PAR

**Alain DEZETTER**

SOUTENU LE 30 SEPTEMBRE 1987

JURY :           MM.   C. BOCQUILLON  
                  F. MONIOD  
                  E. SERVAT  
                  A. DELACOURT

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer tous mes remerciements à M. E. Sénat, Chargé de Recherches à l'ORSTOM, pour l'encadrement et l'aide efficace dont il m'a fait bénéficier pour la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également aux autres membres du Jury :

Monsieur le Professeur C. BOQUILLON, Directeur du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, pour l'attention qu'il a portée à ce travail et les conseils avisés - qu'il nous a prodigués -

MM F. MONIOT et A. DELACOURT qui ont accepté de faire partie de ce jury.

## SOMMAIRE

	page
Introduction	3
Etude Bibliographique	5
Présentation du modèle global "ORSTOM 74"	31
Analyses de sensibilité	48
Fonction de transfert : analyse et reformulation	82
Exemples d'application	104
Conclusion	109
Bibliographie	112
Annexes.	118

## **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

Le travail, réalisé au sein du Laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM, constitue le mémoire de DEA national d'hydrologie.

Notre objectif étant l'analyse des structures et du fonctionnement du modèle global dit "ORSTOM 74" (MODGLO) élaboré par M. GIRARD, Directeur de Recherches à l'ORSTOM.

Differents aspects seront abordés ici, à partir de ce thème. Nous commencerons par une synthèse bibliographique concernant, d'une part, les méthodes d'optimisation utilisées en hydrologie, d'autre part, et principalement, les fonctions critères employées. Nous présenterons ensuite les concepts développés dans le modèle global "ORSTOM 74" de même que son fonctionnement.

Nous pourrons alors aborder l'analyse de sensibilité : méthodologie suivie et résultats obtenus.

A la lumière de ces résultats, nous proposerons quelques modifications en vue d'une utilisation simplifiée et "automatisée" (emploi d'une méthode d'optimisation) de ce modèle.

**ETUDE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

Les mécanismes intervenant dans la relation pluie-débit sont complexes et mal connus. On cherche cependant à simuler leur action à l'aide de modèles mathématiques. Ceux-ci nécessitent un certain nombre de données relatives au phénomène et à l'objet étudié (pluies, évaporation caractéristiques du bassin versant). Un algorithme constitué d'une série d'équations mathématiques vise ensuite à simuler les mécanismes liant pluies et débits afin de pouvoir reproduire et/ou générer ceux-ci.

Parmi les modèles mathématiques on distingue habituellement plusieurs catégories.

On parle généralement de modèles mathématiques "stochastiques" lorsque l'on utilise des variables aléatoires présentant une distribution de probabilités.

A l'inverse, le modèle est "déterministe" si les variables qu'il comprend ne sont pas sujettes à des variations aléatoires

La distinction que l'on fait généralement entre "conceptuel" et "empirique" est liée au fait que les équations du modèle prennent ou non en considération les processus physiques. Ce distinguo est malgré tout un peu artificiel puisque bon nombre de lois physiques présentent des constantes empiriques.

Un autre type de classification consiste à différencier les modèles à discrétilisation spatiale d'une part et les modèles globaux d'autre part. En ce qui concerne les premiers, le bassin versant y est découpé en surfaces élémentaires, chacune d'elles réagissant à sa manière et ayant ses propres fonctions

de production et de transfert. L'écoulement à l'escariorne du bassin versant est alors la résultante du comportement de chaîne des surfaces élémentaires. Avec les modèles globaux, par contre, on ne considère qu'une fonction de production et qu'une fonction de transfert, le bassin versant réagissant alors dans son ensemble.

Le modèle étudié ici est de type global conceptuel déterministe. Il fonctionne au pas de temps journalier.

La synthèse bibliographique ci-après est donc plus particulièrement orientée vers les méthodes applicables dans ces conditions.

Quel que soit le type de modèle on se trouve confronté à un problème qui est celui de la détermination d'un certain nombre de paramètres. Ceux-ci peuvent être

fonction de grands physiques mesurés (vitesse d'infiltration, perméabilité, ...) ou être des valeurs empiriques. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu naturel, tant au niveau des caractéristiques physiographiques qu'au niveau de la dispersion de la pluie, certains paramètres sont des intégrations de différentes variables. Cela est peut être encore plus marqué dans le cas des modèles globaux qui considèrent le bassin versant comme une entité.

On utilise généralement ces modèles en deux étapes :

### 1) le calage

A partir de données de pluies et d'évaporation enregistrées on essaie de reproduire le plus fidèlement possible une série de débits observés. Pour cela on agit sur les paramètres

du modèle afin de trouver leurs valeurs optimales.

À ce stade apparaît la nécessité de pouvoir caractériser l'adéquation du modèle. On utilise pour cela différents critères; nous présentons plus loin les plus courants. Afin d'obtenir un gain de temps et de précision, on peut avoir recours à un algorithme d'optimisation. Il existe de nombreux et nous y reviendrons ultérieurement.

## 2) La validation

A partir du jeu de paramètres déterminés au cours de la phase de calage, on essaie de reproduire une série de débits observés n'ayant pas servi au calage. On peut alors se rendre compte de l'adéquation du modèle par l'emploi des critères déjà utilisés lors du calage.

En résumé, la phase de calage permet de déterminer un jeu de paramètres caractéristique de la période envisagée et du bassin étudié, la phase de validation permet de déterminer si ce jeu de paramètres n'est valable que sur la période pour laquelle il a été déterminé ou s'il est caractéristique du comportement du bassin étudié. Si la validation est satisfaisante, on peut alors envisager de généraliser des débits sur de longues périodes pour lesquelles on ne dispose que de l'information pluviométrique.

Compte tenu de cette utilisation, l'importance du critère utilisé et de la méthode de calage paraît évidente.

Nous abordons tout d'abord la présentation des méthodes d'optimisation puis les fonctions critères envisageables.

## 1. Méthodes d'optimisation utilisées en hydrologie

Le choix d'une méthode d'optimisation applicable aux modèles hydrologiques a été argumenté par de nombreux chercheurs. [ IBitt et O'Donnell (1971), Guillot (1971), Johnston et Pilgrim (1976), Pickup (1977) ]. Ces méthodes ont été décrites en détail par leurs auteurs [ Rosenbrock (1960), Nelder et Mead (1965) ] ou reprises dans des ouvrages généraux comme "Applied non linear programming" ( Himmelblau (1972) ). Nous ne reviendrons pas sur ces points mais nous rappellerons les contraintes inhérentes à ces méthodes et les problèmes d'utilisation qu'elles posent.

La méthode de Rosenbrock, la méthode de

Powell et la méthode du simplexe de Nelder et Mead sont trois des méthodes les plus couramment utilisées en hydrologie. Elles ont en commun d'être des méthodes de recherche directe ("direct search"), itératives, ne nécessitant pas le calcul des dérivées de la fonction. Himmelblau (1972) les classe toutes trois parmi les méthodes d'optimisation non linéaire sans contraintes. En hydrologie cependant, on les utilise la plupart du temps en imposant des bornes aux paramètres des modèles. On introduit donc des contraintes que l'on prend en compte en modifiant artificiellement la forme de la fonction aux abords du domaine "interdit".

Il est impossible de dresser une liste exhaustive des cas d'utilisation des techniques

d'optimisation dans des modèles hydrologiques.

On trouve cependant dans la littérature certaines références, par exemple :

- le modèle CREC

Méthode de Rosenbrock (Combes (1985))

- le modèle de Bougthon (Bougthon (1966))

Méthode de Rosenbrock (Murray (1970))

Méthode de Nelder et Mead, méthode de Powell (Johnston et Pilgrim (1971))

Les difficultés rencontrées lors de l'optimisation ont été décrites et repertoriées par Ibbet et O'Donnell (1971) et par Johnston et Pilgrim (1976).

Parmi les plus caractéristiques on peut citer :

- .. l'interdépendance entre les paramètres

du modèle : les variations engendrées par un paramètre peuvent parfois se trouver compensées par l'action d'un ou plusieurs autres paramètres.

De nombreuses combinaisons peuvent alors aboutir à la même valeur du critère. La méthode d'optimisation progresse alors très lentement ou devient incapable de trouver l'optimum.

- la non-sensibilité de la fonction critique aux variations d'un paramètre.

On peut rencontrer ce problème si un paramètre est redondant ou si les données utilisées constituent en ces particulier qui l'inactive.

- la présence d'optimum local
- Ces optimum locaux sont des points de "l'hypersurface" où la valeur de la fonction est la plus faible au regard des points environnants, mais cette valeur peut être plus forte que pour des points situés dans une zone plus éloignée.

Les difficultés peuvent être aggravées ou supprimées par le choix de la fonction critère.

Nous en présentons ici quelques exemples.

## 2. La fonction critère

La fonction critère permet d'apprécier de façon numérique l'adéquation du modèle au cas étudié (bassin versant, pluviométric). Elle doit être adaptée à l'objectif visé lors de l'utilisation du modèle mais doit également être compatible avec la méthode d'optimisation employée.

De plus, pour comparer les performances de différents modèles, dans des conditions variées, il est important d'employer une fonction critère

adimensionnelle. En effet, un écart de 10 % sur un débit journalier n'a pas la même signification selon que le débit observé est de 20 l/s ou de  $2 m^3/s$ .

Nombreux sont les auteurs qui ont proposé leur propre fonction critère. Celle-ci est cependant toujours basée sur l'écart entre le débit observé et le débit calculé. Les différences consistent en fait à éléver cet écart au carré, à le pondérer, à le rendre adimensionnel.

Fortin, Charbonneau, Lefèvre et Girard (1971) ont analysé le comportement des sept critères adimensionnels suivants :

$$C_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_c)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

$$C_2 = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q_o - Q_c}{Q_o} \right)^2 \quad (2)$$

$$C_3 = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|Q_o - Q_c|}{\bar{Q}_o} \right) \quad (3)$$

$$C_4 = 1 - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left( \frac{|Q_0 - Q_c|}{Q_0} \right) \quad (4)$$

$$C_5 = 1 - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \left( \frac{Q_c - Q_0}{Q_0} \right) \left( \frac{Q_0 + |\bar{Q}_0 - Q_0|}{\bar{Q}_0} \right) \right| \quad (5)$$

$$C_6 = \frac{\sum_{t=1}^{N-1} q_0(t) - \sum_{t=1}^{N-1} |q_0(t) - q_c(t)|}{\sum_{t=1}^{N-1} q_0(t)} \quad (6)$$

$$C_7 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} \left( \frac{|q_0(t) - |q_0(t) - q_c(t)||}{q_0(t)} \right) \quad (7)$$

avec :

$Q_0$  débit observé

$Q_c$  débit calculé

$\bar{Q}_0$  débit observé moyen

$$q_0(t) = Q_0(t) + Q_0(t+1)$$

$$q_c(t) = Q_c(t) + Q_c(t+1)$$

Les débits moyens journaliers du bassin du réservoir Kénogami au Québec pour

l'année 1966 ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Différents cas d'événements susceptibles de se présenter dans la réalité ont été simulés et le comportement des courbes a été analysé sur quatre périodes de l'année correspondant à des périodes de crue ou d'étiage.

Quatre types d'événements ont été retenus :

- Hydrogramme simulé proportionnel à l'hydrogramme observé
- addition de variables aléatoires à l'hydrogramme observé
- addition de variables aléatoires à un hydrogramme simulé proportionnel à l'hydrogramme observé.
- déphasage de l'hydrogramme simulé par rapport à l'hydrogramme observé.

A titre d'exemple nous présentons les courbes obtenues pour le cas du déphasage.

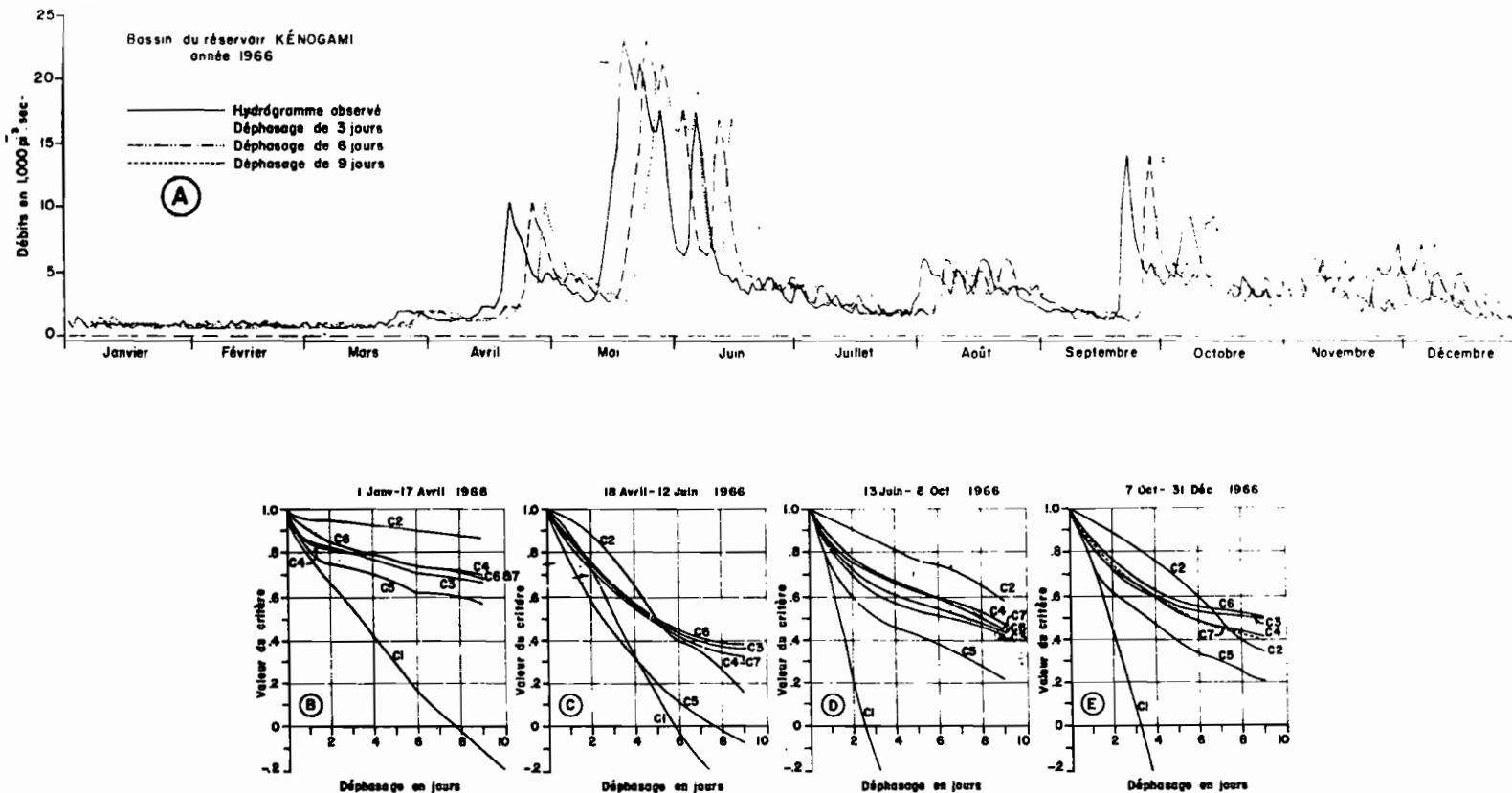


FIGURE 4. (A) Déphasage de l'hydrogramme simulé par rapport à l'hydrogramme observé. (B)–(E) Sensibilité des critères selon les périodes.

d'après Fortin et al (1971)

Cette analyse fait ressortir le critère  $C_5$  comme étant le plus sensible, quel que soit le type d'erreur envisagé. Elle souligne malgré tout que ce critère n'est pas "universel" et que l'on peut adapter le critère à l'objectif visé lors de la simulation. Par exemple, si le critère  $C_1$  est parfois plus performant que  $C_5$ , son comportement n'est cependant pas toujours homogène sur l'année.

Déslein et Simon (1977) proposent une procédure de sélection de la fonction critère en fonction du but de la simulation réalisée. Partant du fait que lors de l'utilisation d'un modèle "le choix de la fonction critère pour l'optimisation est une décision subjective qui influence le résultat (le jeu optimal de paramètres)"

ils exposent une procédure de sélection afin de rendre cette décision moins subjective. Cette procédure a été testée sur 12 fonctions critères, au regard de six applications possibles. Ces six applications diffèrent par le fait qu'elles s'intéressent soit aux apports annuels ou mensuels, soit aux étiages, soit aux crues, ... Les critères sont alors calculés en conséquence. A titre d'exemple, si on s'intéresse aux crues le critère n'est calculé que pour un débit observé supérieur à un seuil donné.

La procédure de sélection est la suivante:

- On optimise le modèle en utilisant successivement chaque critère. Si on a  $j$  critères on obtient  $j$  jeu de paramètres  $P_j$ .
- Pour chaque jeu de paramètres  $P_j$  on calcule alors la valeur des  $(j-1)$  autres critères.

Les  $(j-1)$  valeurs sont toutes supérieures à la valeur du critère  $F_j$  ayant servi à trouver  $P_j$ .

- On peut alors construire une matrice  $j \times j$  dans laquelle on place les rangs des valeurs des critères, la plus faible valeur a le rang 1 et la plus forte le rang  $j$ . On a la valeur 1 sur la diagonale de cette matrice.

Par ce système on établit une "notation" relative des critères les uns par rapport aux autres. On peut ainsi les classer; celui qui a la "note" la plus basse est celui qui convient le mieux. Le tableau ci-après donne un exemple de matrice -des rangs. Le total en bas de colonne indique donc le compactement général du critère. Le jeu de paramètres déterminé avec le critère 1 est

donc celui qui convient le mieux (Total 52).

Ranks derived from  $W_{jk}$  values given in Table III

	$j =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k =$	1	1	10	2	6	4	11	5	12	3	8	9	7
	2	8	1	7	4	11	2	12	3	10	9	6	5
	3	2	10	1	6	4	11	5	12	3	8	9	7
	4	3	9	2	1	4	10	6	12	5	8	11	7
	5	7	6	9	4	1	8	3	5	2	11	12	10
	6	8	2	6	4	11	1	12	3	10	9	7	5
	7	2	10	3	6	5	11	1	12	4	7	9	8
	8	7	3	6	5	10	4	11	1	9	12	8	2
	9	4	10	5	6	2	11	3	8	1	7	12	9
	10	2	11	5	7	4	12	6	8	3	1	10	9
	11	3	8	4	5	10	9	12	6	11	2	1	7
	12	5	6	3	4	9	7	10	2	8	12	11	1
Total		52	86	53	58	75	97	86	84	69	94	105	77

d'après Disbain et Simon (1977)

Disbain et Simon (1977) font cependant remarquer que le critère le plus communément utilisé est l'erreur au carré :  $\frac{1}{n} \sum (Q_0 - Q_i)^2$  ou SLS (Simple Least Square criterion).

En conclusion, les auteurs soulignent l'importance d'utiliser plusieurs critères car le mieux adapté d'entre eux ne peut être connu à l'avance. Ils notent également

l'inefficacité totale de la lame annuelle s'oublie en tant que critère d'optimisation.

Sorooshian et Dracup (1980) soulignent que le critère SLS, très utilisé, présuppose certaines caractéristiques des erreurs (on entend par erreur la différence débit observé - débit calculé). Selon la théorie du maximum de vraisemblance ces caractéristiques sont les suivantes :

- La distribution des erreurs, sur la période considérée, suit une loi normale de moyenne nulle
- les erreurs sont indépendantes les unes des autres : la matrice d'autocovariance des erreurs est de la forme  $\Omega = I \sigma^2$  où  $I$  est la matrice identité et  $\sigma^2$  la variance des erreurs.

Cette erreur supposée de variance constante et de moyenne nulle intègre les erreurs de mesure et les erreurs dues à l'inadéquation du modèle.

Aitken (1973) reconnaît la présence d'erreurs systématiques (donc corrélées) dues aux modèles, dans de nombreux cas étudiés. Il souligne que ces erreurs ne sont pas détectées par les critères habituellement utilisés (SLS notamment).

Sorooshian et Dracup (1980) proposent donc un critère d'optimisation (une fonction critique, permettant de tenir compte d'erreurs corrélées et d'erreurs de type hétéroscélastique (variance non constante)). Le critère est le suivant :

HMLE : Heteroscedastic Maximum Likelihood Estimator

$$\text{HMLE} = \left\{ \sum_{t=1}^n w_t \epsilon_t^2 \right\} \left\{ n \left[ \prod_{i=1}^n w_t \right]^{1/n} \right\}^{-1} \quad (8)$$

$$\text{où } w_t = Q_{obs}^{2(d-1)}$$

$$\varepsilon_t = (Q_{obs} - Q_{calc})_t$$

et  $d$  est donné par la résolution de l'équation :

$$(9) \quad \left[ \sum_{t=1}^n \ln(Q_{obs}) \right] \left[ \sum_{t=1}^n w_t \varepsilon_t^2 \right] - n \left[ \sum_{t=1}^n w_t \ln(Q_{obs}) \varepsilon_t^2 \right] = 0$$

Le critère a été testé (Sorooshian (1981), Sorooshian et Gupta (1983)) sur différents modèles en comparaison avec le critère SLS. Les conclusions de ces études sont à l'avantage du critère HMLE.

Les tests effectués sur le modèle HEC-1, modèle à quatre paramètres, à partir de données fictives générées par le modèle, ont montré :

- que l'utilisation du critère HMLE permet de retrouver des valeurs de paramètres proches des "vraies valeurs" lorsque l'on introduit

des erreurs sur les pluies, les débits ou sur les deus à la fois. Dans les mêmes conditions l'efficacité du critère SLS se révèle moindre.

- que l'hypersurface de la fonction HMLE est plus régulière. Elle engendre donc moins de problèmes d'optimisation.

Des essais effectués à l'aide du modèle "Soil Moisture Accounting model of the U.S National Weather Service's river forecast system" (SMA-NWSRFS) aboutissent aux mêmes conclusions. Le critère HMLE est également moins sensible à la longueur de la période de calage que le critère SLS. Il permet de trouver des valeurs acceptables des paramètres du modèle sur des périodes de calage courtes.

On peut noter à ce niveau qu'une mauvaise paramétrisation du modèle entraîne des perturbations dans l'optimisation et que l'influence de ces perturbations sur le résultat final peut être bien plus importante que celle due au critère utilisé.

On remarque également que lorsque  $\alpha = 1$  le critère HMLE est égal au critère SLS.

$$\text{HMLE} = \left\{ \sum_{t=1}^n w_t \epsilon_t^2 \right\} \left\{ n \left[ \prod_{i=1}^n w_t \right]^{1/n} \right\}^{-1}$$

$w_t = QBS$

$$\text{si } \alpha = 1 \quad w_t = 1 \quad \forall t$$

$$\Rightarrow \text{HMLE} = \left\{ \sum_{t=1}^n 1 \cdot \epsilon_t^2 \right\} \left\{ n \left[ \prod_{i=1}^n 1 \right]^{1/n} \right\}^{-1}$$

$$\Rightarrow \text{HMLE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \epsilon_t^2 = \text{SLS}$$

Le critère HMLE a l'inconvénient de

ne pas être adimensionnel ; sa dimension étant celle de  $Q^{\frac{2t}{2(t+1)}}$ . Il rend donc plus difficiles les comparaisons entre différentes applications.

Combes (1985) utilise, pour l'optimisation du modèle CREC, la fonction suivante :

$$FC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| 1 - \frac{Q_{\text{calc}}}{Q_{\text{obs}}} \right| \times \left| 1 - \frac{\bar{Q}_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right| \quad (10)$$

Cette formulation est assez proche du critère  $C_5$ , décrit par Fortin et al (1971), qui apparaissait comme le plus performant parmi les sept expressions étudiées. En effet :

$$C_5 = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \left( \frac{Q_{\text{calc}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right) \left( \frac{\bar{Q}_{\text{obs}} + |Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}}|}{\bar{Q}_{\text{obs}}} \right) \right|$$

$$C_5 = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{Q_{\text{calc}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right| \right) \left( \left| \frac{\bar{Q}_{\text{obs}} + |Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}}|}{\bar{Q}_{\text{obs}}} \right| \right)$$

$$C_5 = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{Q_{\text{calc}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right| \right) \left( 1 + \left| \frac{Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}}}{\bar{Q}_{\text{obs}}} \right| \right)$$

$$C_5 = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{Q_{\text{calc}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right| \right) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{\text{calc}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right| \times \left| \frac{\bar{Q}_{\text{obs}} - Q_{\text{obs}}}{\bar{Q}_{\text{obs}}} \right|$$

$$C_5 = C_4 - FC$$

On notera, pour finir, qu'un problème pratique ayant trait à l'utilisation de ces critères survient lorsqu'on utilise des données provenant de régions à saison sèche fortement marquée. On peut en effet avoir  $Q_{ols} = 0$  et il devient alors impossible de calculer le critère (division par zéro). On contourne généralement le problème en ne calculant le critère que sur la période où  $Q_{ols} \neq 0$ . Une telle utilisation des critères numériques conduit à négliger l'éventuelle inadéquation du modèle durant les périodes de débit nul qui, dans certaines zones climatiques, peuvent être fort longues.

**PRESENTATION**

**DU MODELE GLOBAL**

**"ORSTOM 74"**

L'auteur de ce modèle est G. Girard, Directeur de Recherches à l'ORSTOM. La version que nous présentons a été mise au point en 1974. Les concepts ayant servi à l'élaboration de ce modèle au pas de temps journalier sont proches de ceux utilisés pour le modèle à discrétilisation spatiale et pour le modèle à pas de temps horaire. "La fonction de production de ce modèle global dite "Gregoire" n'est pas très différente de celle dont elle est issue et qui a été décrite sous le nom de "Ghorfa horaire" par G. Girard (1975)" (Camus (1976)).

Le modèle au pas de temps journalier utilise des données de pluies journalières observées ou représentatives du bassin étudié. On doit également disposer de données journalières

d'évapotranspiration potentielle. (On utilise souvent des moyennes mensuelles journalières observées ou calculées par une formule de type PENMAN ou TURC). Pour le calage il est nécessaire d'avoir des séries observées de débits journaliers concomitants avec données de pluie.

A chaque pas de temps, à l'aide d'une fonction de production et de transfert, le modèle effectue une série d'opérations déterminant une lame d'eau écoulée. Ces opérations sont schématisées ci-après (fig II.1)

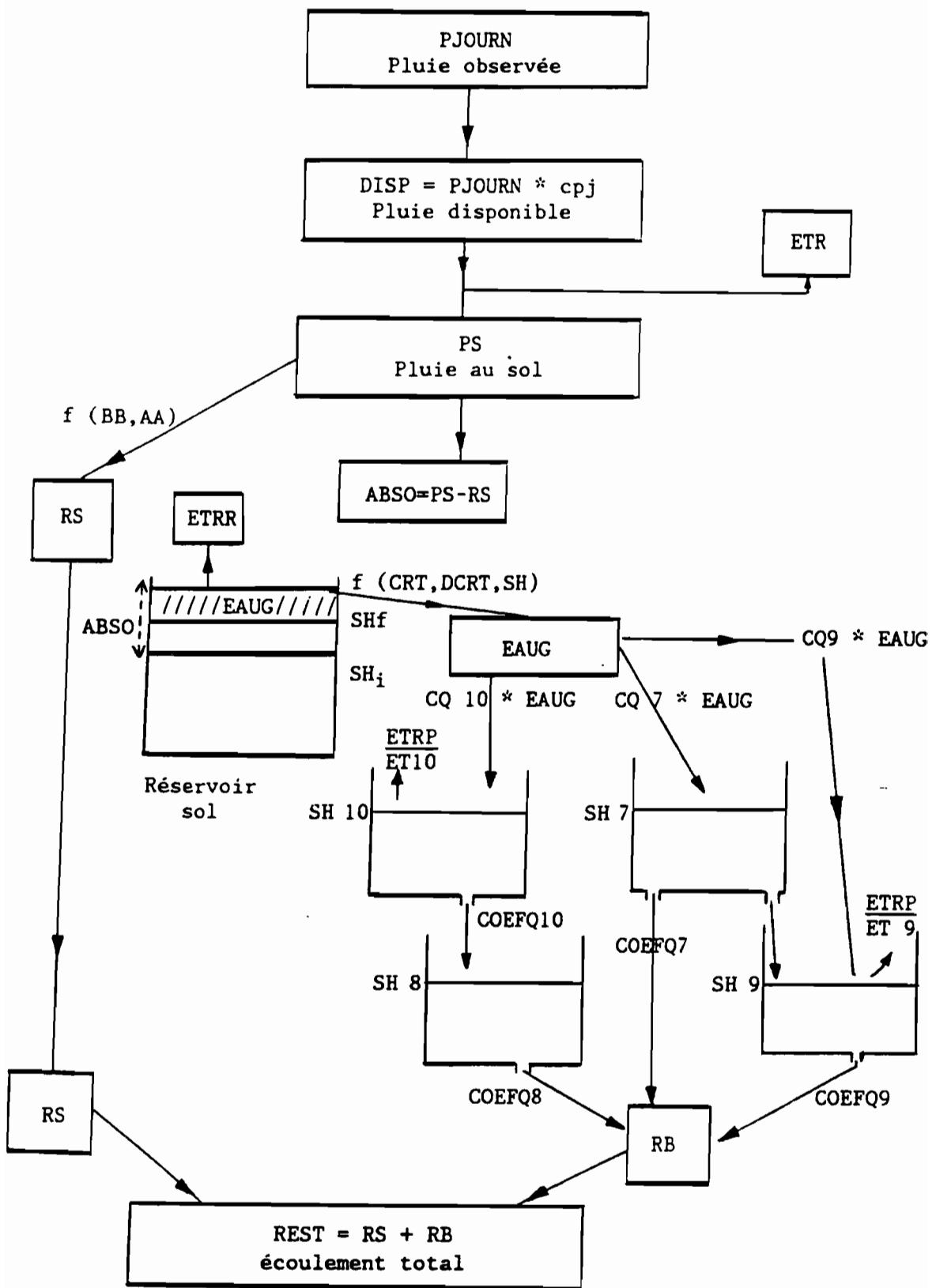


Figure II.1- Schéma général des fonctions de production et de transfert du modèle MODGLO  
(DEZETTER, 1986)

## 1) Fonction de production

Nous détaillerons ici les différentes opérations constituant la fonction de production et permettant de répartir la lame d'eau précipitée entre les différents termes du bilan hydrologique.

### 1.1 Calcul de la pluie moyenne journalière sur le bassin

La valeur de la pluie journalière sur le bassin utilisée par le modèle peut provenir d'un poste situé sur le bassin ou à proximité. Cette valeur, pour être représentative de la précipitation moyenne sur le bassin, est pondérée par un coefficient de correction,  $C_{PJ}$ , déterminé à partir des connaissances régionales sur la pluviométrie (isohyètes, gradients, etc...). On obtient alors la valeur  $DISP$  :  $DISP = PSOURN * C_{PJ}$

## 1.2 Calcul de l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière

L'ETP journalière, EVAS, est une donnée d'entrée calculée par une formule de type PENMAN ou TURC, par exemple, ou estimée à partir d'observations. Elle peut être pondérée globalement par un facteur constant CET. On obtient ainsi une valeur d'évapotranspiration potentielle moyenne journalière sur le bassin, ES.

$$ES = EVAS * CET$$

## 1.3 Détermination de la pluie au sol génératrice d'écoulement, PS, et des évapotranspirations réelles et potentielles.

On compare, ici, la pluie moyenne DISP à l'évapotranspiration moyenne ES, afin de calculer la pluie au sol génératrice d'écoulement, PS, l'évapotranspiration réelle ETR reprise immédiatement et l'évapotranspiration potentielle

residuelle ETRP qui pourra être reprise ultérieurement sur le réservoir sol ou sur les réservoirs d'étalement. Trois hypothèses peuvent se présenter:

$$a) \text{DISP} < \text{ES}$$

$$\text{avec } PS = 0$$

$$ETR = \text{DISP}$$

$$ETRP = ES - \text{DISP}$$

$$b) \text{DISP} = \text{ES}$$

$$\text{avec } PS = 0$$

$$ETR = \text{DISP}$$

$$ETRP = 0$$

$$c) \text{DISP} > \text{ES}$$

$$\text{avec } PS = \text{DISP} - ES$$

$$ETR = ES$$

$$ETRP = 0$$

1.4 Détermination du mouvement superficiel RS et du volume d'eau entrant dans le sol ABSO.

A ce niveau la pluie au sol PS est comparée à la capacité d'infiltration du sol  $\chi_{10}$ . Celle-ci est jugée maximale lorsque le sol est complètement sec. Elle décroit ensuite jusqu'à ce que le degré de saturation du sol atteigne la valeur de la capacité de rétention. Si on pose :

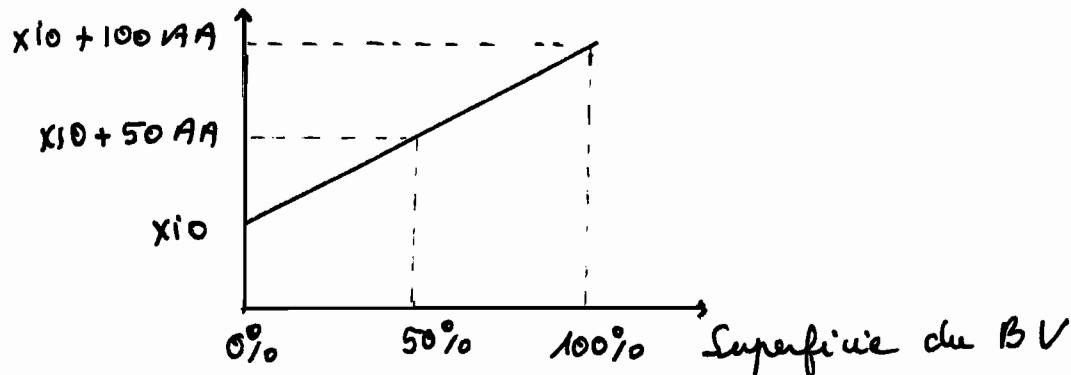
$SH$  : hauteur d'eau dans le réservoir sol

et  $CRT$  : capacité de rétention en eau du sol

$$\text{on a : } \chi_{10} = \chi_{IN} (A\chi_{IN} + 2 \exp(-\frac{SH}{CRT}))$$

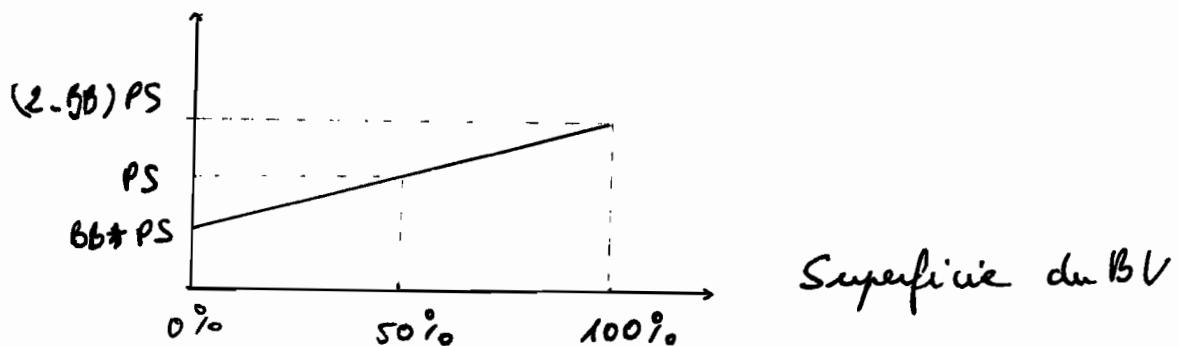
$x_{IN}$  et  $A_{IN}$  sont des paramètres du modèle.

D'après Girard, la valeur de  $x_{IO}$  ainsi calculée représente l'infiltration localement minimale sur le bassin. Pour tenir compte de l'hétérogénéité des sols il introduit alors un terme,  $AA$ , qui permet de tracer la fonction de répartition de l'infiltration en fonction de la superficie du bassin versant.



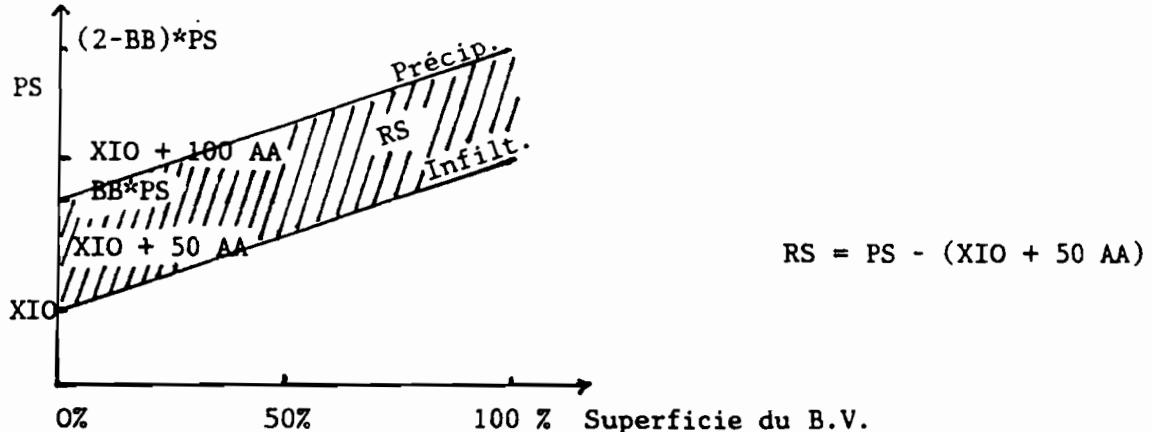
De même Girard associe à la pluie au sol PS, connue en moyenne sur le bassin, un facteur d'hétérogénéité  $BB$ , inférieur à 1 et déterminé en fonction de la surface du B.V., de son relief,

de son exposition, etc... On peut alors parallèlement tracer la fonction de répartition de la pluie locale.

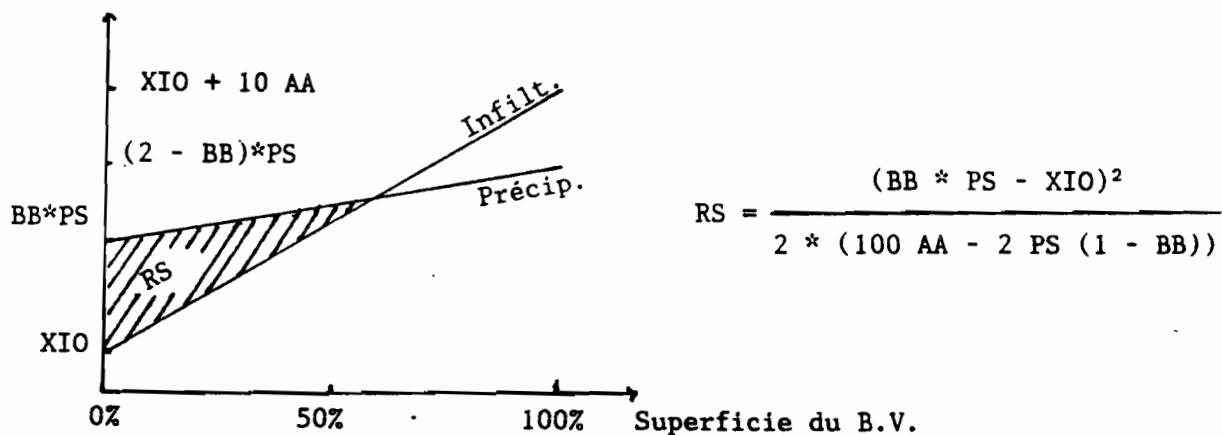


On considérera alors trois cas pour déterminer la valeur du ruissellement superficiel RS, obtenu en comparant les deux droites précédentes.

- a)  $BB*PS < x_{10}$  Girard fait alors l'hypothèse qu'il n'y a pas de ruissellement et  $RS = 0$
- b)  $BB*PS > x_{10}$  et  $(2-BB)*PS > x_{10} + 100 AA$



$$c) BB * PS > X10 \text{ et } (2 - BB) * PS < X10 + 100 AA$$



Dans chacun des cas de calcul de RS, on réalise l'hypothèse simplificatrice qui consiste à faire coïncider l'emplacement du bassin le moins arrosé avec le moins imperméable. RS est la quantité d'eau livrée directement à l'escarpe, celle entrant dans le sol s'écrit  $ABSO = PS - RS$

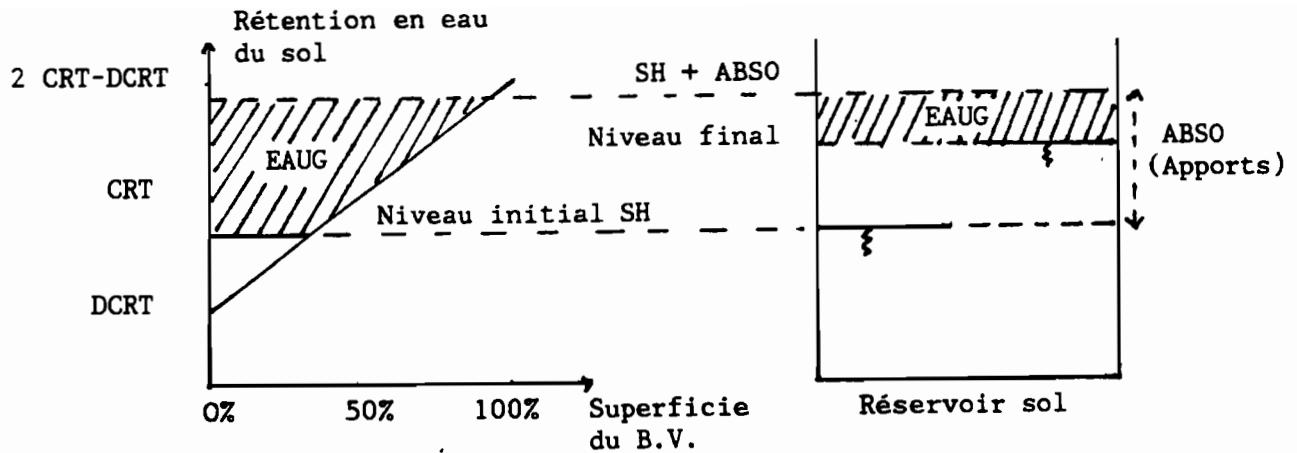
### 1.5 Calcul de l'eau gravifique EAVG

Le volume d'eau ABSO entre dans le réservoir sol. Une partie de cette eau fournit

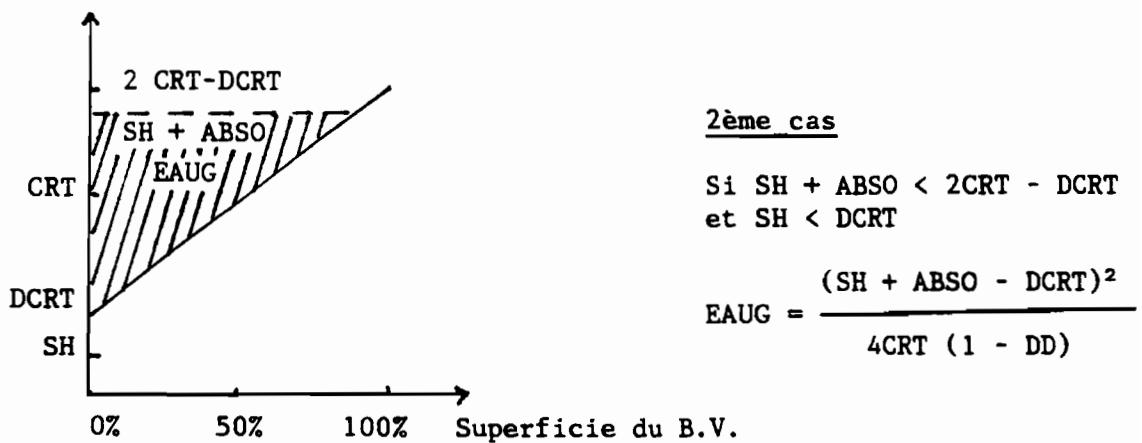
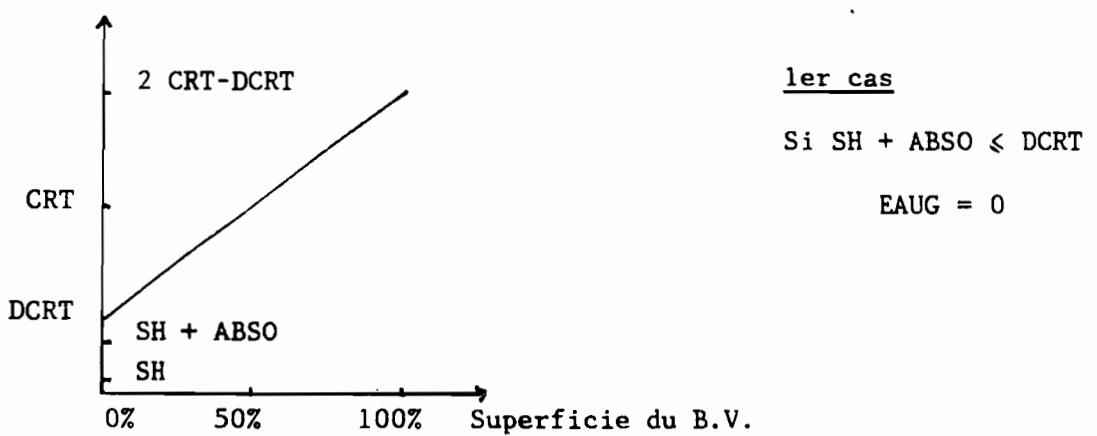
l'eau gravifique EAUG qui sera livré à l'écoulement par le biais de la fonction de transfert. Le terme EAUG dépend du niveau dans le réservoir sol SH et de la capacité de rétention des sols CRT.

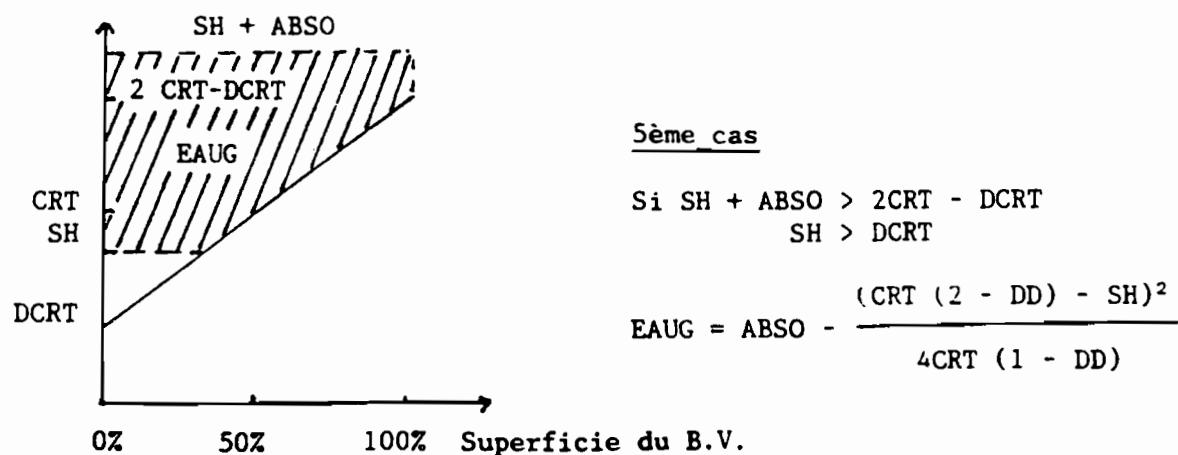
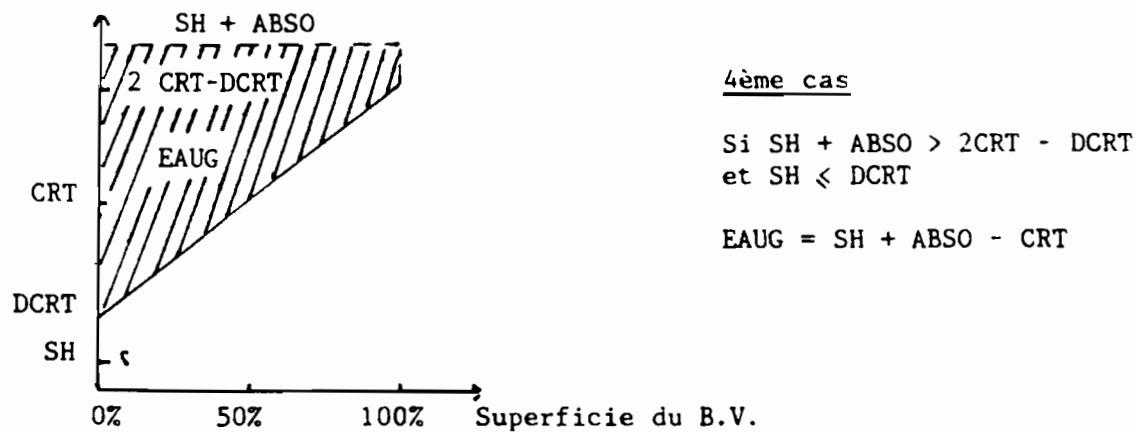
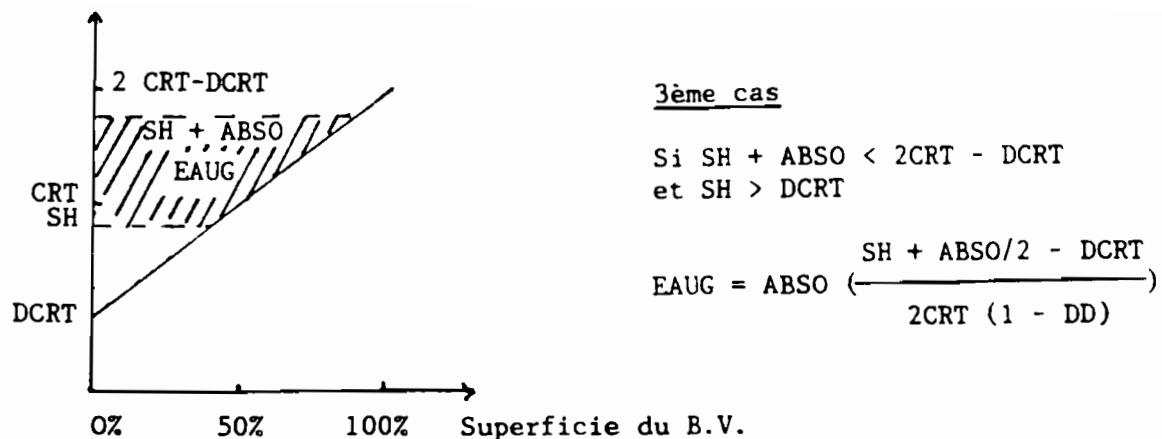
On définit la capacité de rétention en eau des sols à l'aide de deux paramètres : CRT qui est la valeur moyenne sur le B.V. et DCRT qui permet d'introduire une hétérogénéité de la rétention en eau des sols.

A l'aide du schéma suivant, permettant la comparaison entre le niveau dans le réservoir sol et la capacité de rétention en eau des sols, on peut alors déterminer la valeur prise par EAUG



Selon les valeurs prises, respectivement, par ABSO, SH, CRT, DCRT, plusieurs cas peuvent se présenter pour le calcul de EAUG. Ces différentes possibilités sont décrites dans les schémas qui suivent.





1.6 Calcul de la nouvelle hauteur d'eau dans le réservoir sol et de l'évaporation dans le réservoir sol.

EAUG ayant été déterminé, il est alors possible de calculer la nouvelle valeur de la hauteur dans le réservoir sol :

$$SH = SH_{initial} + ABSO - EAUG$$

Si la contrainte évapotranspiration n'a pas été pleinement satisfait précédemment, on évaluera la reprise éventuelle par évaporation sur le réservoir sol. ETRR.

$$ETRR = \text{MIN}(ETRP, SH)$$

Après reprise par évaporation, la hauteur d'eau SH devient :

$$SH = SH - ETRR$$

l'évapotranspiration potentielle résiduelle éventuelle est :

$$ETRP = ES - ETR - ETRR$$

## 2) Fonction de transfert

La quantité d'eau représentée par le terme EAUG va se répartir l'émissaire par le biais d'une fonction de transfert ou d'étalement constituée par quatre réservoirs (numéros 7, 8, 9, 10) (voir fig III-1).

Le débit de chaque réservoir est proportionnel à sa charge (SH 7, 8, 9 et 10) et à son coefficient de débit (COEFQ 7, 8, 9, 10) selon la forme  $Q = SH * COEFQ$ .

EAUG est répartie dans trois des quatre réservoirs (7, 9 et 10) par 3 coefficients de partage ( $CQ7$ ,  $CQ9$ ,  $CQ10$ ). Le quatrième réservoir (8) est alimenté par le réservoir 10. Il faut noter que le réservoir 9 est également alimenté par une des deux sorties du réservoir 7.

Le modèle a été utilisé à plusieurs reprises, notamment en zone sahélienne. On ne trouve malheureusement pas beaucoup de traces bibliographiques de ces utilisations. On peut cependant citer le cas du bassin de Kollogo (Camus et al (1976)) d'une superficie de 3,62 km<sup>2</sup>. Après calage le modèle a servi à la reconstitution de 35 années de débits journaliers à partir des séries pluviométriques observées disponibles.

Afin de pouvoir réaliser l'analyse de sensibilité de ce modèle sans se heurter à des problèmes informatiques, un important travail de restructuration et de reprogrammation a été effectué. Ce travail a aboutit à la définition d'une organisation modulaire des

modèles "pluvie-débit" applicable à tout algorithme au pas de temps journalier. Cette organisation est présentée ci-après (fig III.2)

Suivant ce schéma d'organisation on dispose de sous-programmes généraux d'entrées-sorties et d'optimisation. Pour passer d'un modèle à un autre il suffit de changer la lecture des paramètres et le module de calcul des débits au pas de temps journalier qui contient la fonction de production et de transfert du modèle.

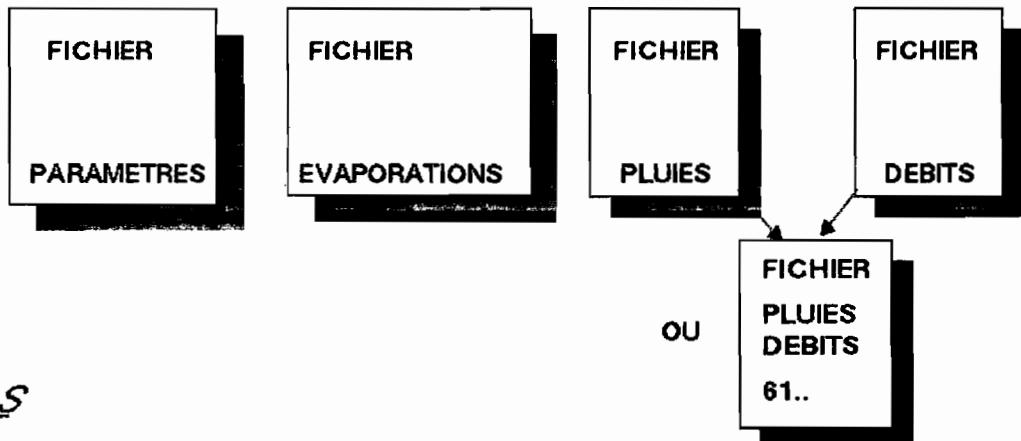
Tous ces programmes ont été écrits en Fortran 77 et fonctionnent sur micro-ordinateur.

Pour les besoins de l'analyse de sensibilité le modèle a été implanté sur un mini ordinateur Apollo (processeur 32 bits 68020) pour bénéficier d'une vitesse de calcul plus élevée.

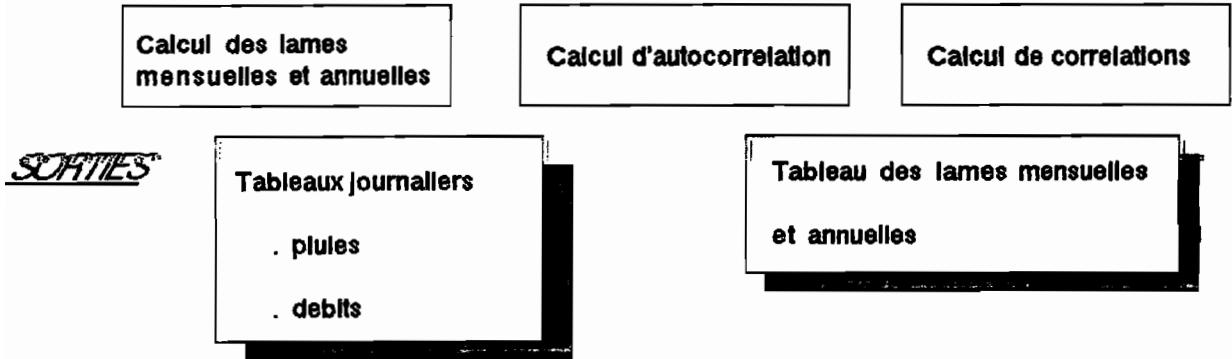
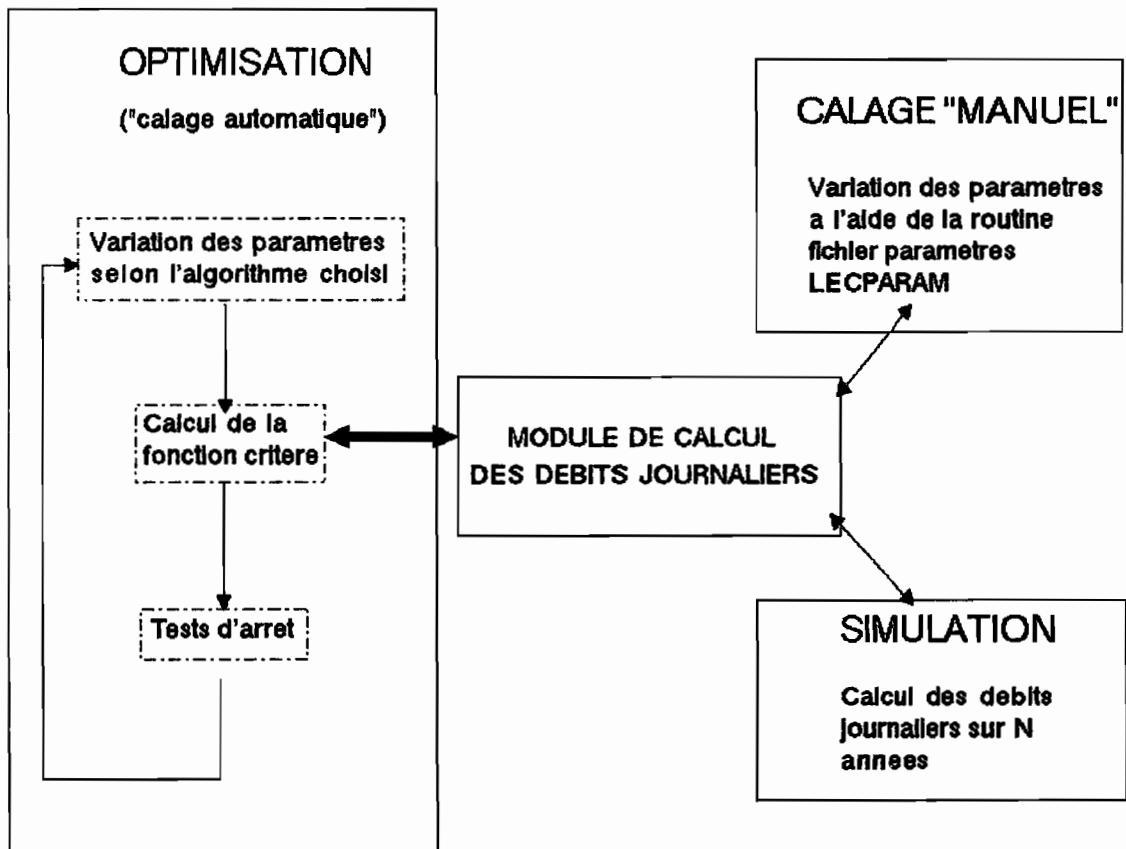
Figure III . 2

## ORGANISATION MODULAIRE DES PROGRAMMES

### ENTREES



### CALCULS



## **ANALYSE DE SENSIBILITE**

L'objectif de ce travail étant l'analyse des structures et du fonctionnement du modèle, nous avons procédé selon la méthodologie que nous exposons ici.

Il existe dans la littérature de nombreux articles traitant de l'analyse de tel ou tel modèle, de la reformulation ou transfert de la production (Mein et Brown (1978), Soroshian et Afifi (1982), Gupta et Soroshian (1983), Combes (1985), Rogers et al (1985), ...) mais il n'existe pas, à notre connaissance, d'ouvrage général définissant une méthodologie pour une telle approche. Chaque étude se révèle pratiquement comme étant un cas particulier. En effet, les concepts utilisés dans les modèles diffèrent d'un auteur à l'autre, l'influence des données prises en

compte pour l'étude n'est pas négligeable, le nombre de paramètres du modèle et la longueur de la série observée sont autant de facteurs dont les effets sont imbriqués et parfois indissociables.

Afin de s'affranchir le plus possible de l'influence des séries observées enregistrées, on se place généralement dans un "domaine fictif" en générant ces données de débit à l'aide du modèle (Combes (1985), Sorochkina et al (1982)). Cette façon de procéder permet d'éclairer le problème des erreurs de mesure sur les données et offre l'avantage de la connaissance des "valeurs vraies" des paramètres du modèle au regard de ces données.

Nous disposons, pour l'étude, de quatre années de données (pluies, évaporation, débits) sur le bassin "AVAL" (Sidi Ben Naceur, Tunisie).

A partir des données de pluies nous avons générés quatre années de débits journaliers à l'aide de MODGEO en prenant les valeurs de paramètres suivantes :

## PARAMETRES DE CALAGE DU MODÈLE

## PARAMETRES DE LA FONCTION DE PRODUCTION :

## PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT :

Coefficients de répartition de EAUG dans les réservoirs :  
CQ7 : .300 CQ9 : .300 CQ10: .400

Coefficients de débit des réservoirs d'étalement :

coefficients de debit des basses vallées détaillément :

Coefficients de reprise de l'évaporation réservoirs 9 et 10

coefficients de reprise de l'évapotranspiration : ET8 : 1000 000 ET10 : 1000 000

Niveau dépassé dans les exercices d'entraînement au départ :

Niveau d'eau dans les réservoirs d'étalement au départ : SU2 : 10 000 SU8 : 10 000 SH2 : 10 000 SH8 : 10 000

On considérera ensuite ces débits générés comme des débits observés. Afin de juger de l'influence des paramètres on procède alors de la façon suivante pour chacun d'entre eux :

- On attribue au paramètre à étudier une valeur différente de la valeur vraie en choisissant parmi 7 valeurs préalablement fixées dans un intervalle de variation pré-défini.
- on procède ensuite à l'optimisation de l'ensemble des autres paramètres et on retient la valeur du critère obtenu. Si le critère numérique utilisé est bas c'est que le modèle réussit à compenser l'erreur sur la valeur du paramètre étudié grâce aux variations des autres paramètres. Si le critère reste élevé c'est que pour cette fausse valeur de paramètre on ne parvient pas à converger vers une solution intéressante.

On peut tracer pour chaque paramètre la valeur du critère après optimisation (VAF) en fonction de la valeur du paramètre étudié.

Dans le cas qui nous concerne, on obtient l'ensemble des courbes qui suit (figures III.1 à III.20).

Si le critère, après optimisation, croît de façon importante dès qu'on s'éloigne de la valeur vraie du paramètre étudié, ce paramètre est important en terme de calage. Si par contre le critère reste inchangé quelle que soit la valeur du paramètre, celui-ci a peu d'influence.

Pour l'ensemble de ces essais nous avons utilisé la méthode d'optimisation de Rosenbrock en utilisant 50 itérations par paramètre à optimiser. Le critère retenu est celui -du

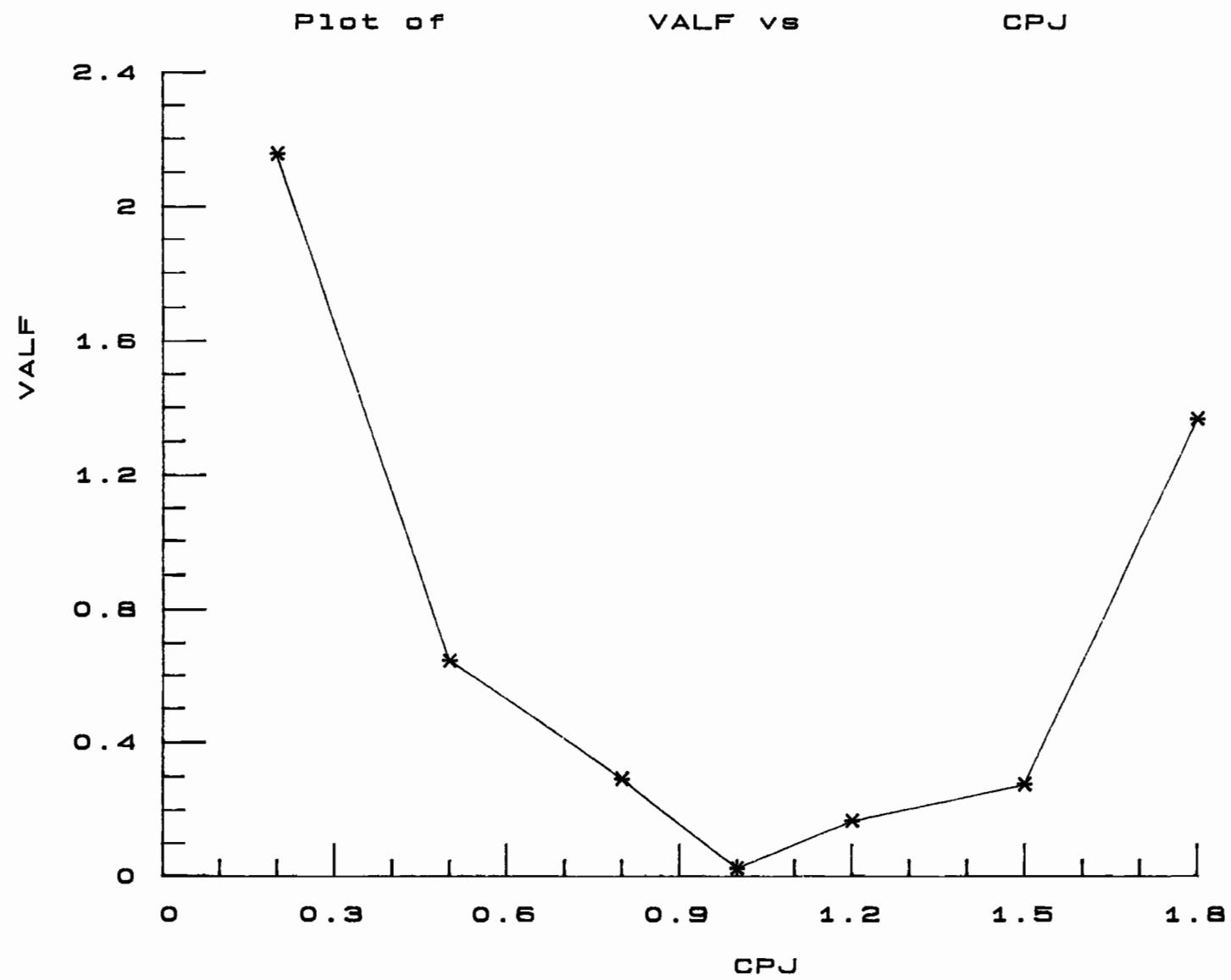


Figure III.1

75

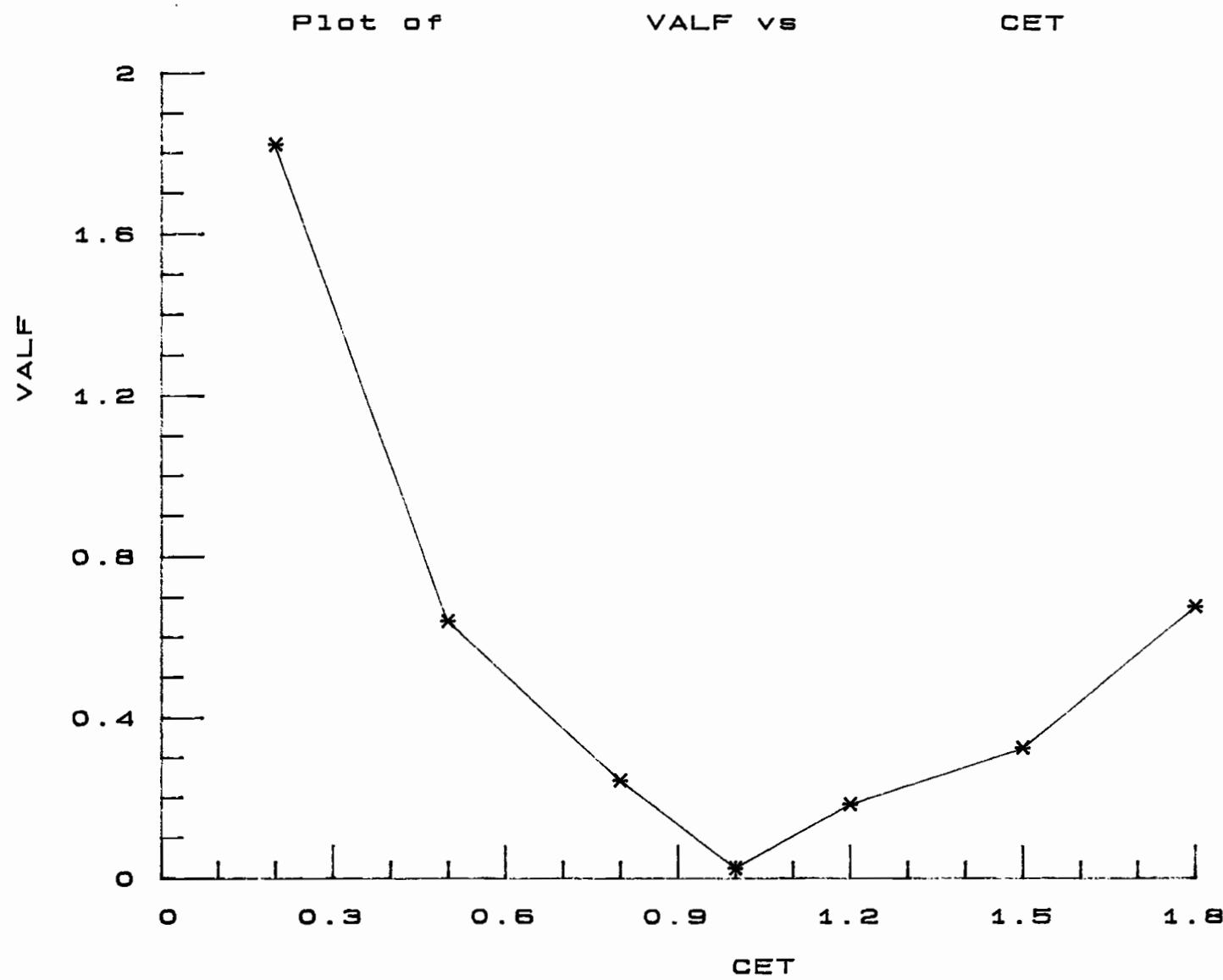


Figure III-2

55

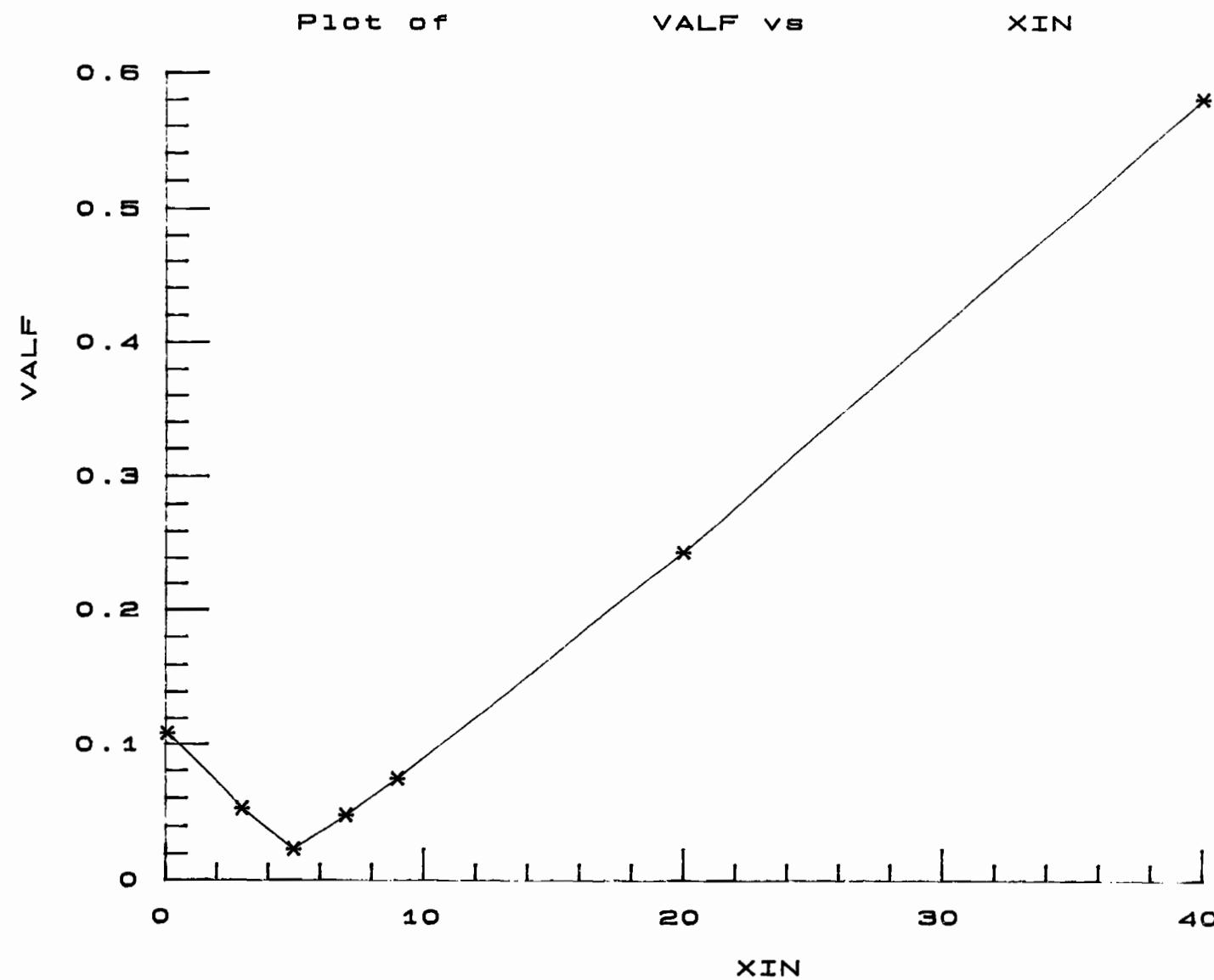


Figure III-3

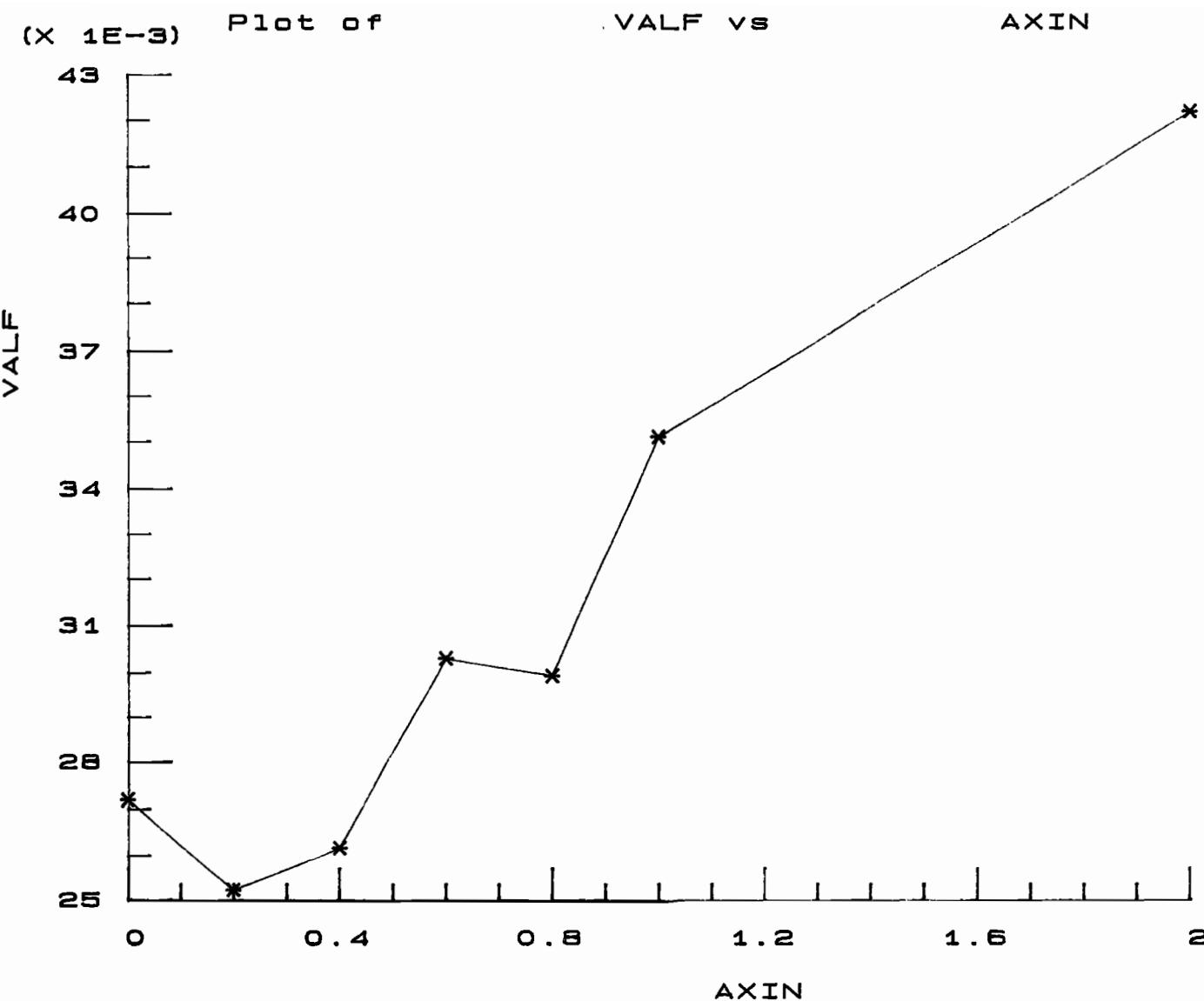


Figure III-4

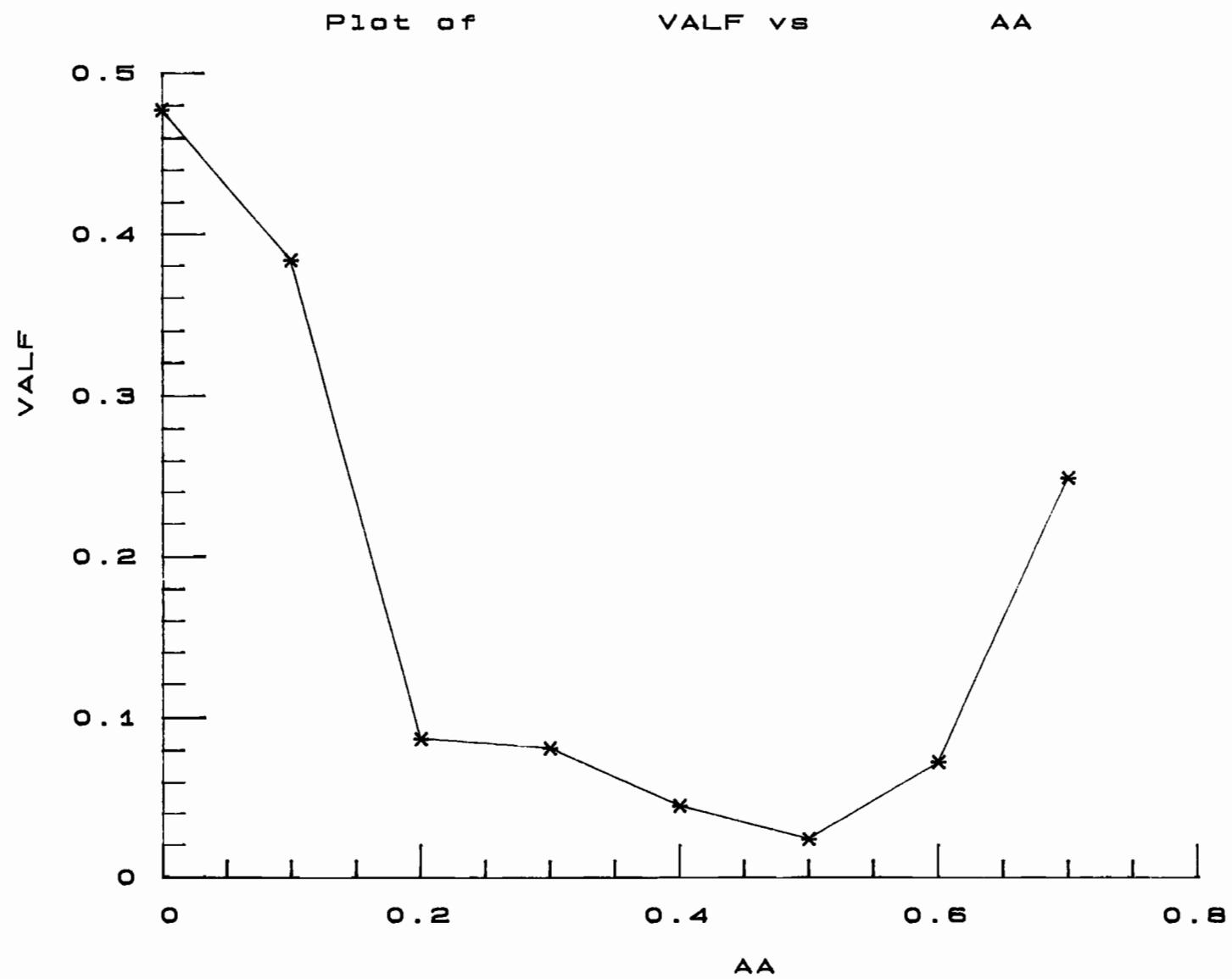


Figure III-5

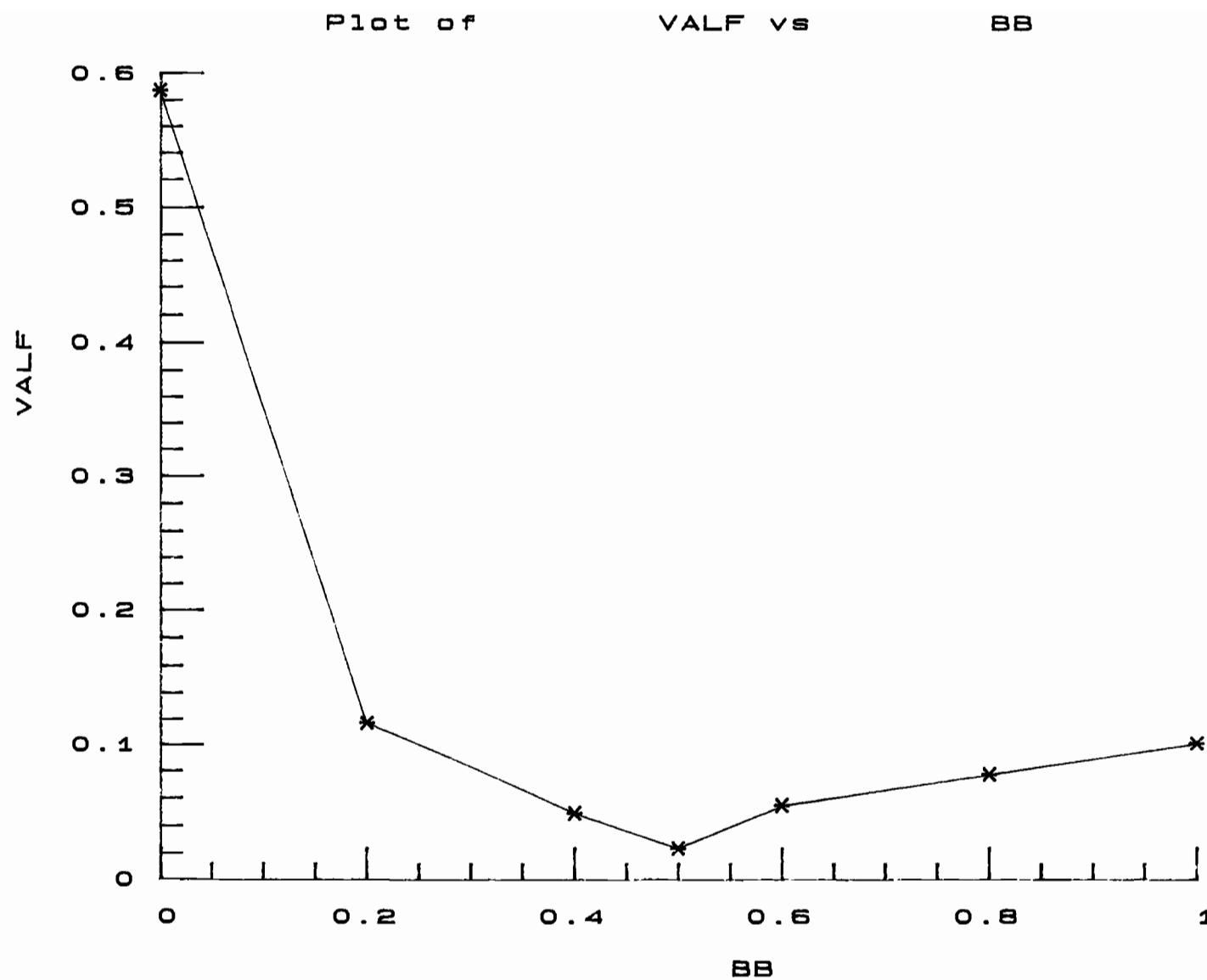


Figure III-6

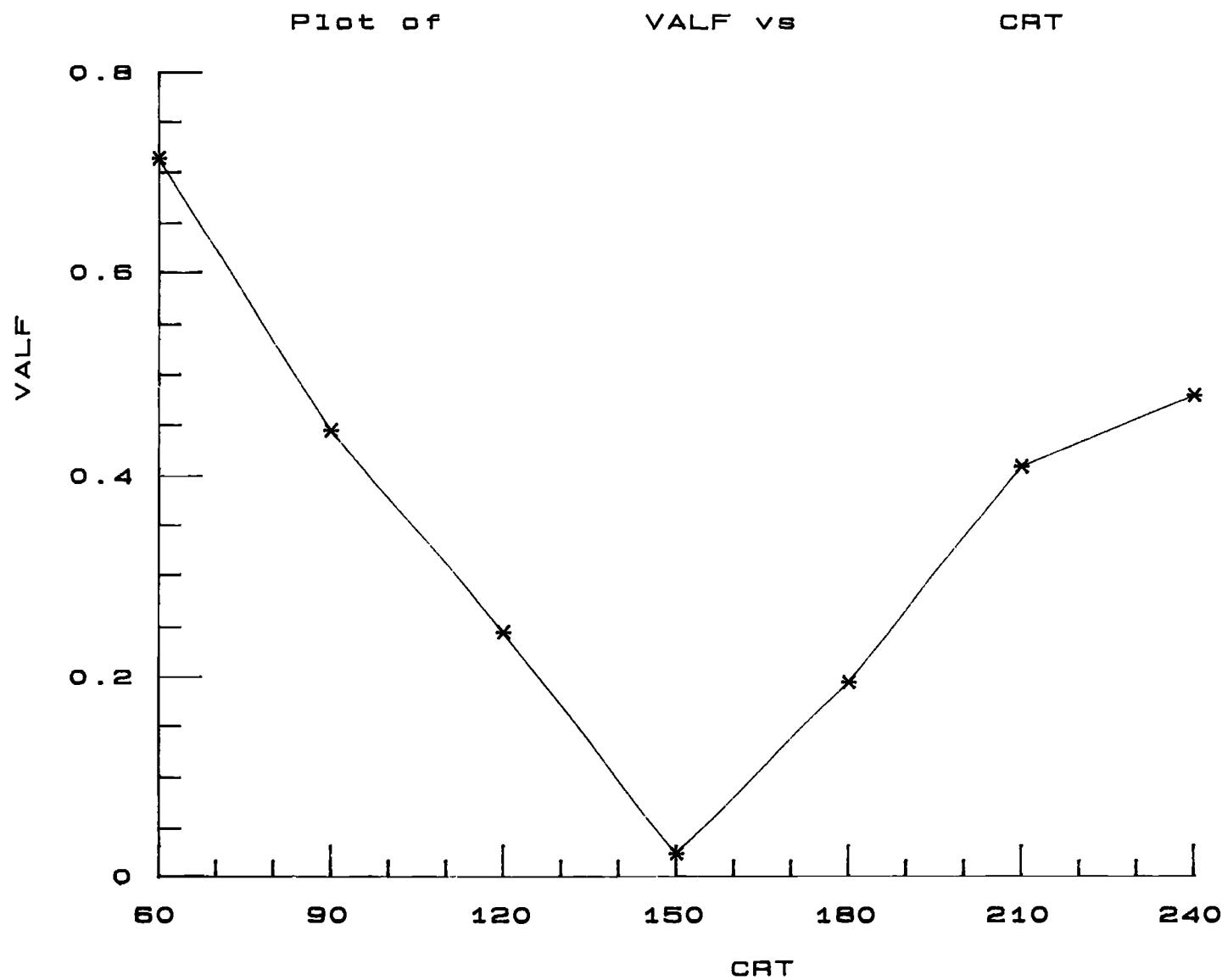


Figure III-7

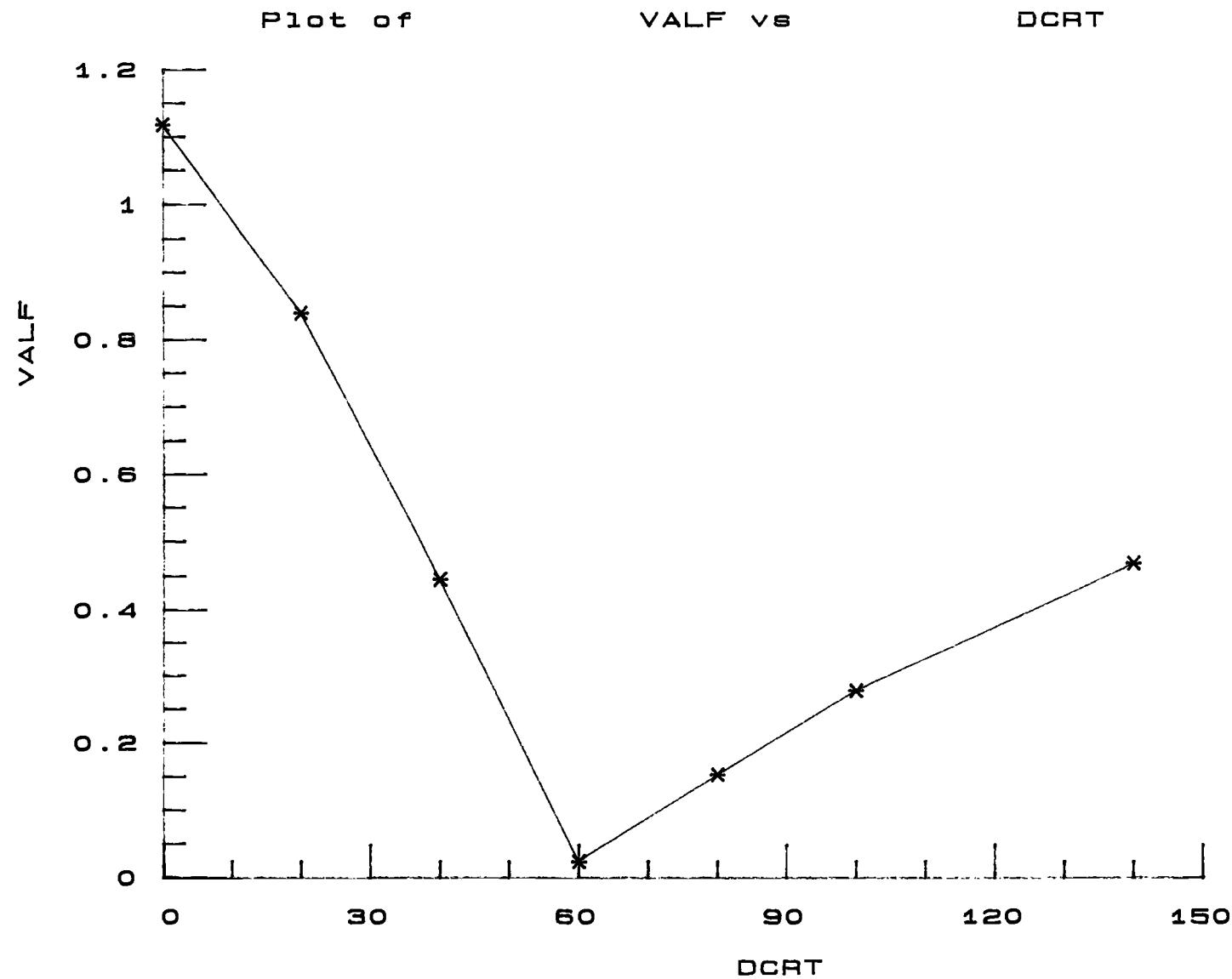


Figure III - 8

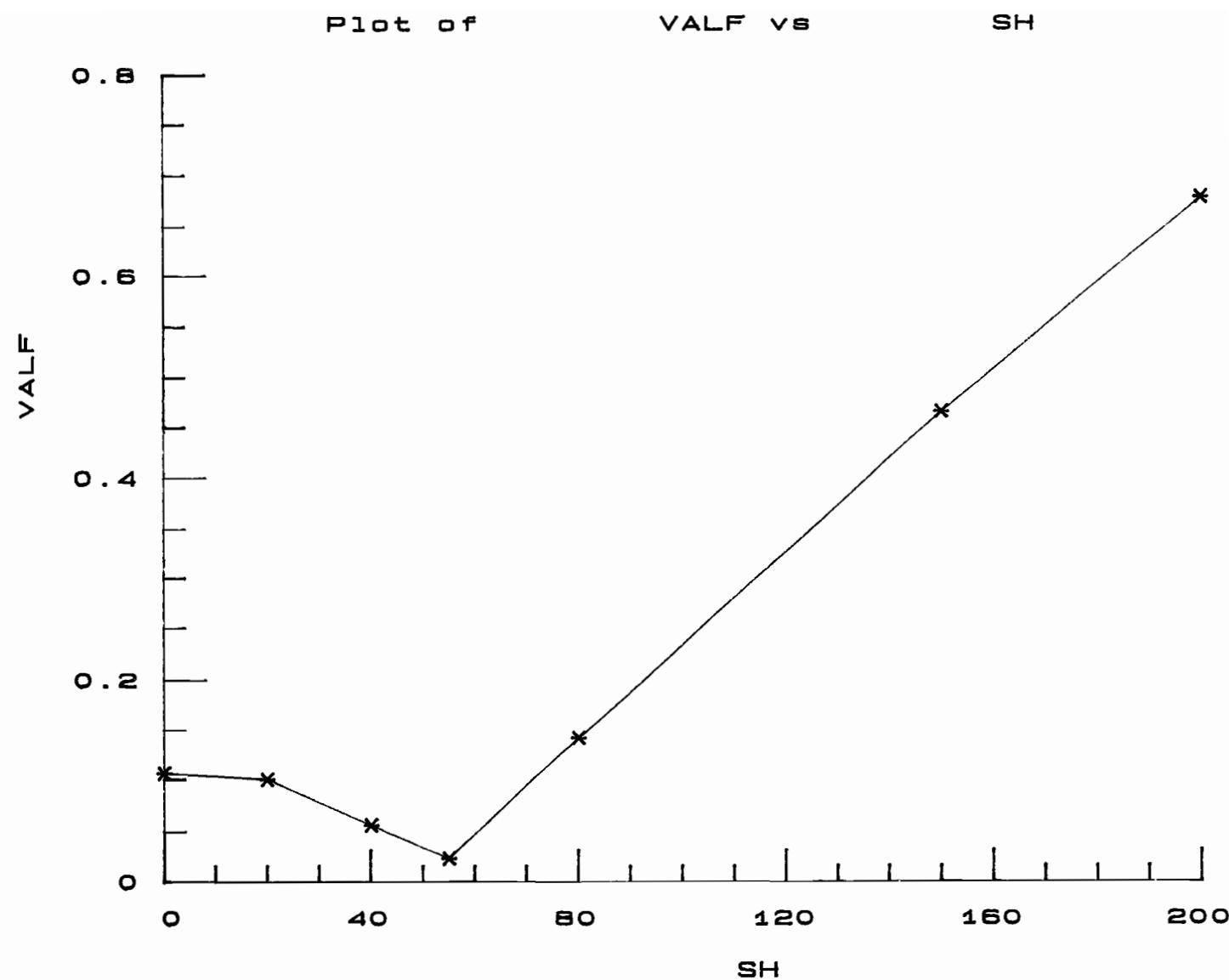


Figure III - 9

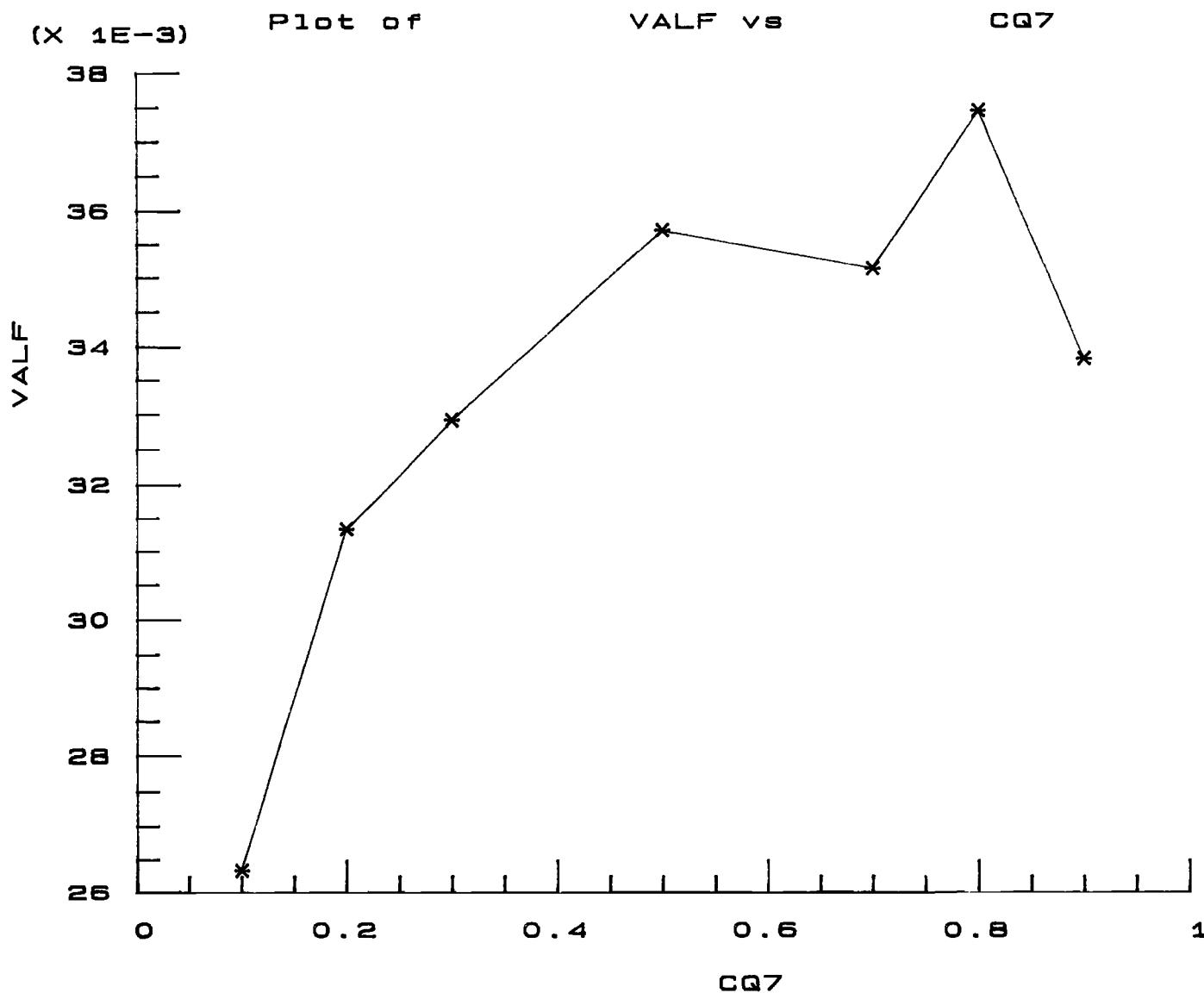


Figure III-10

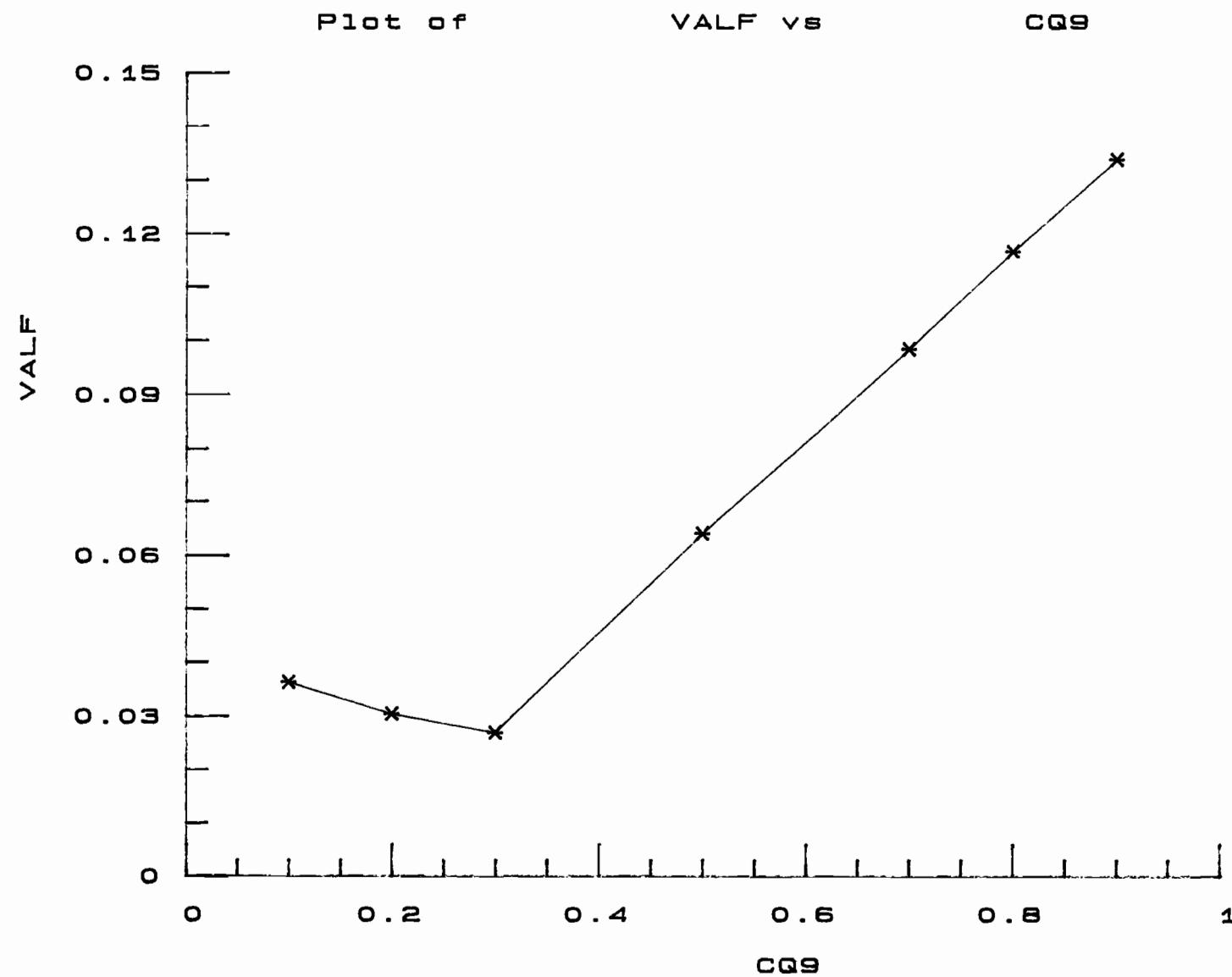


Figure III-11

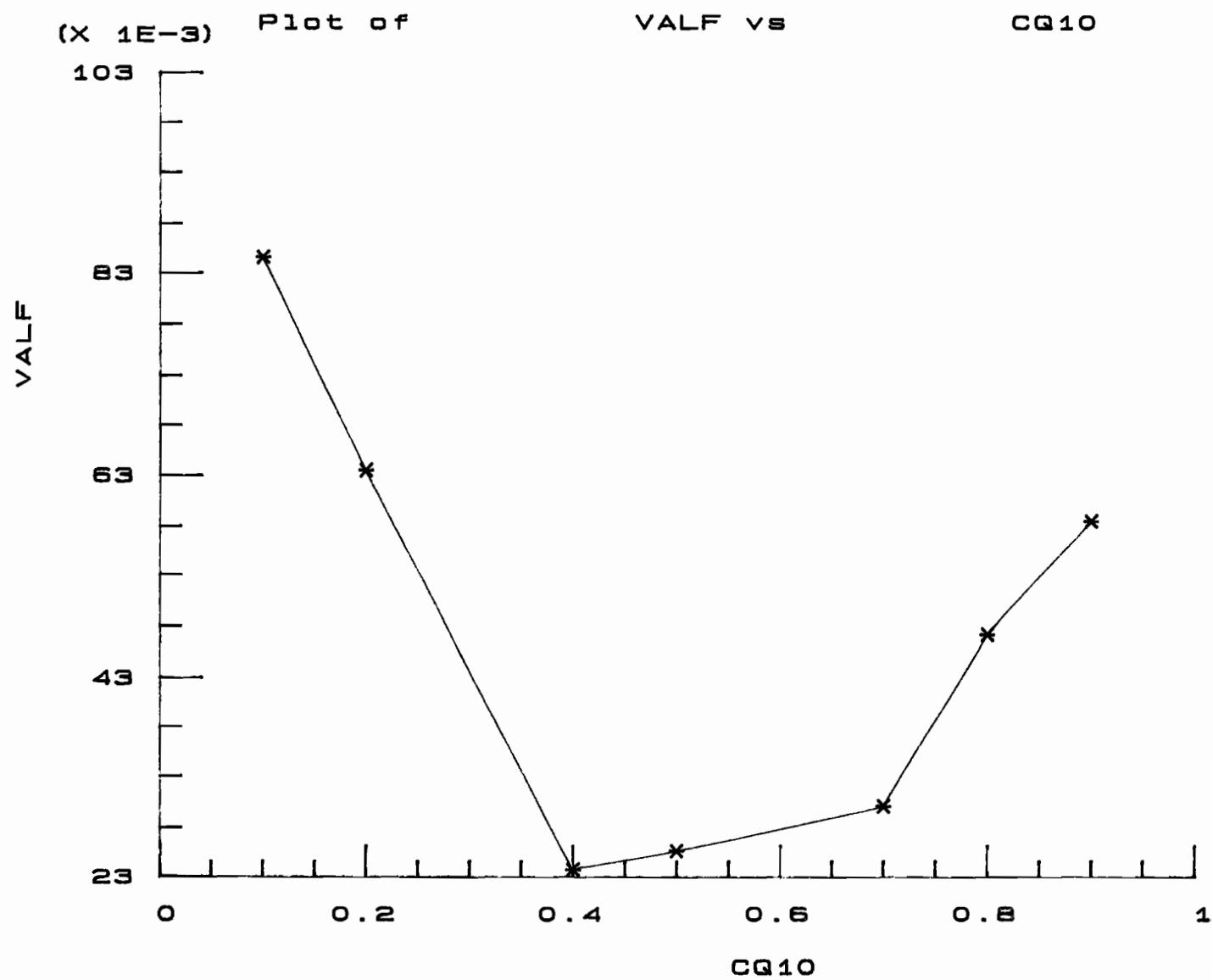


Figure III-12

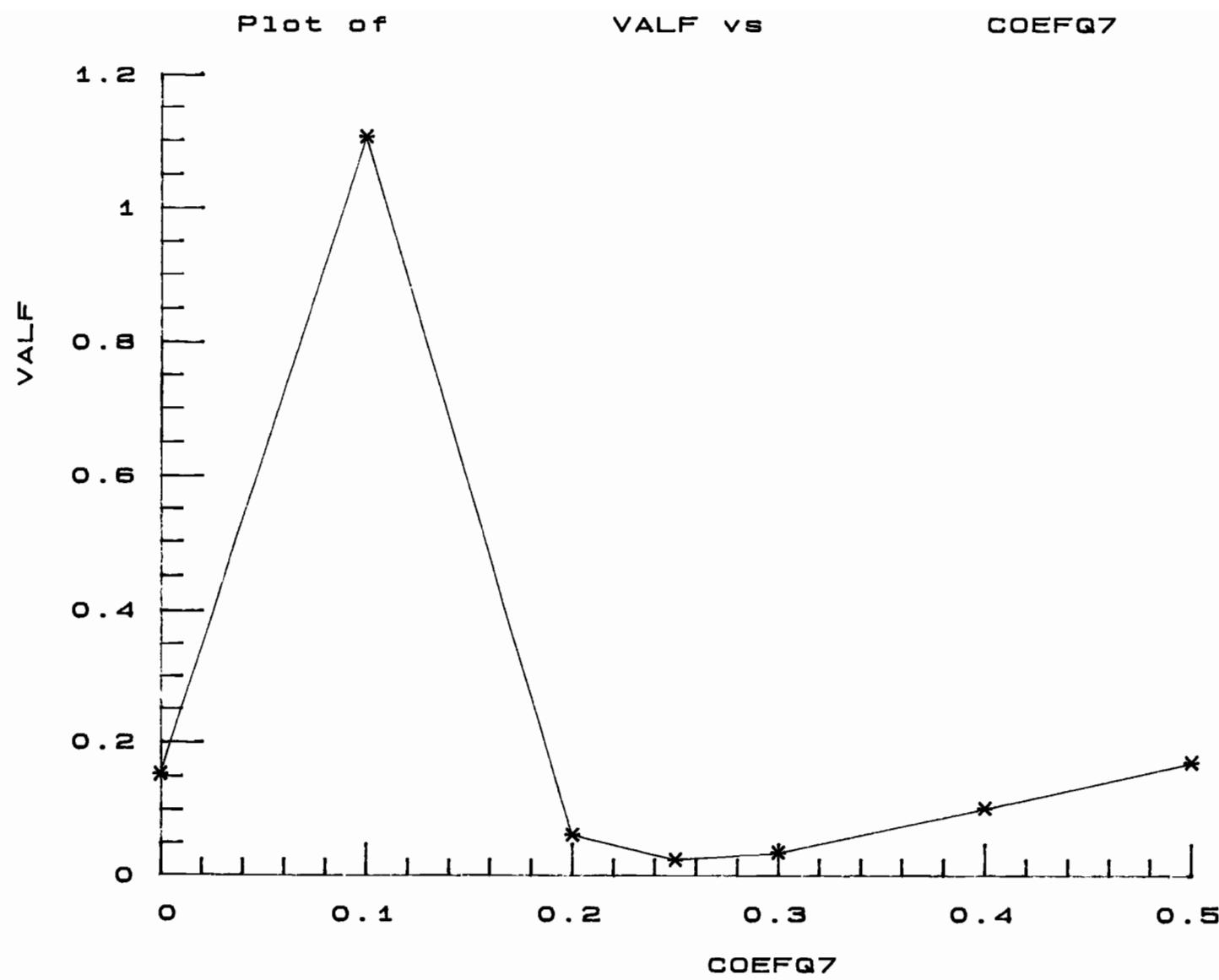


Figure III-13

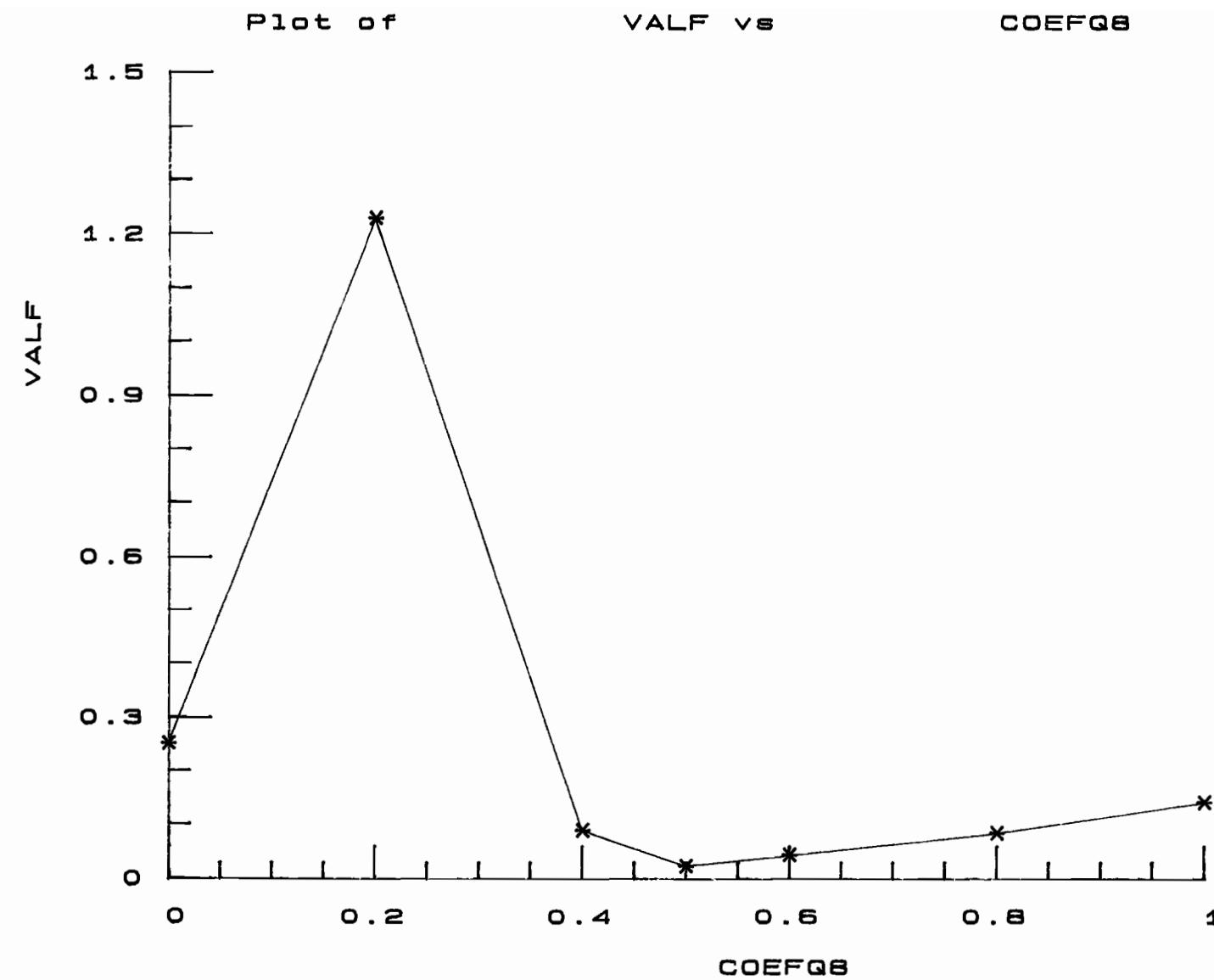


Figure III - 14

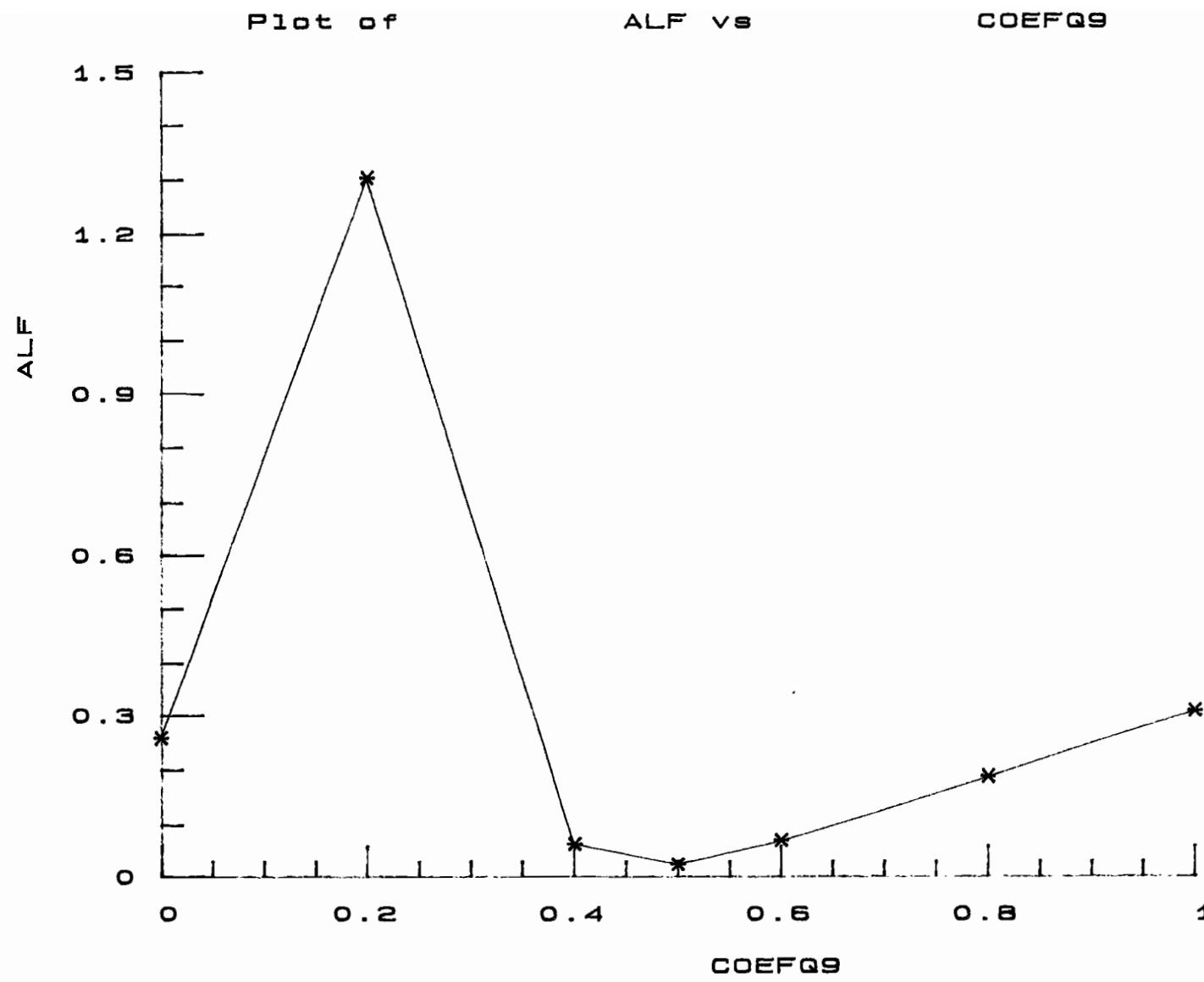


Figure III -15

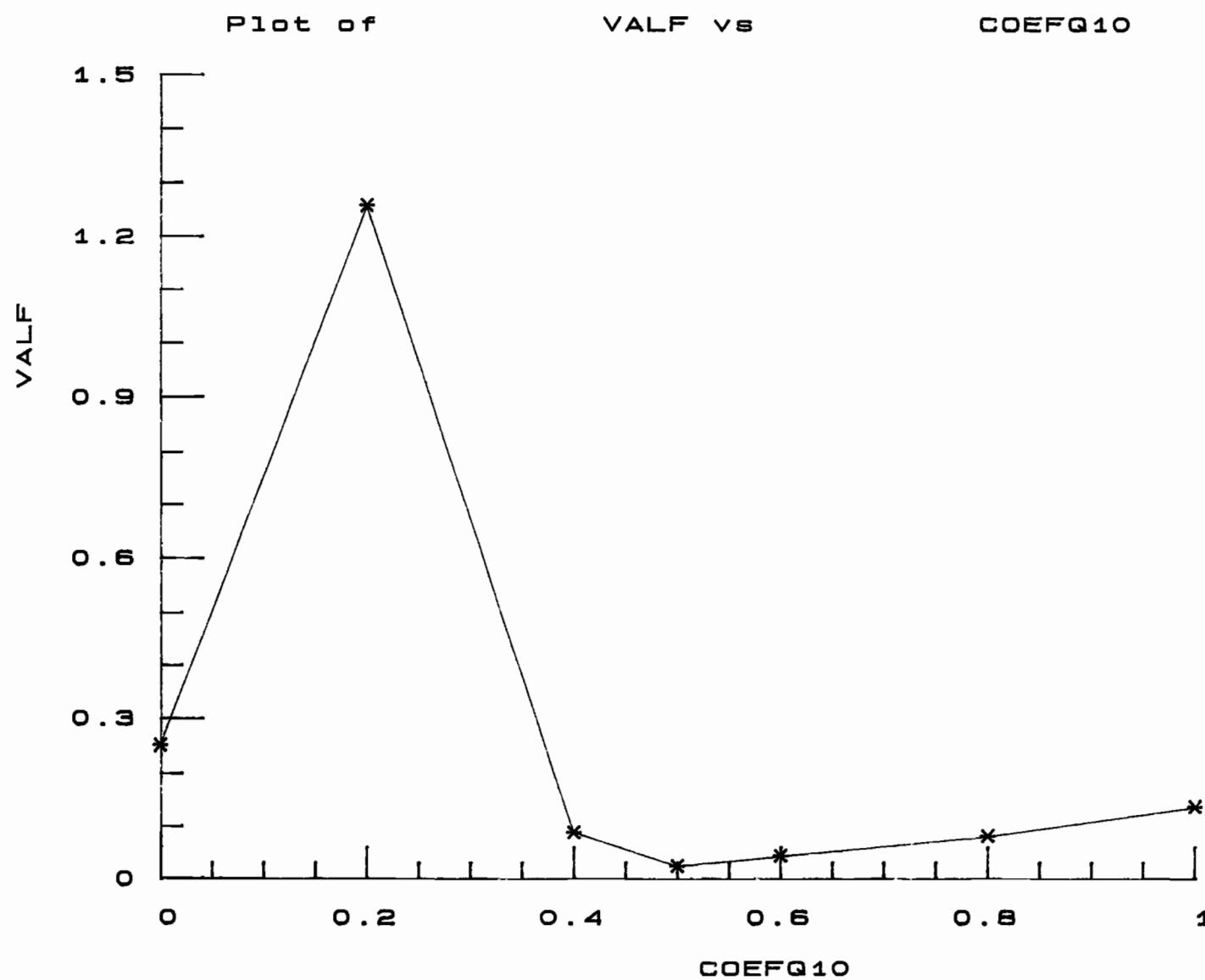


Figure III-16

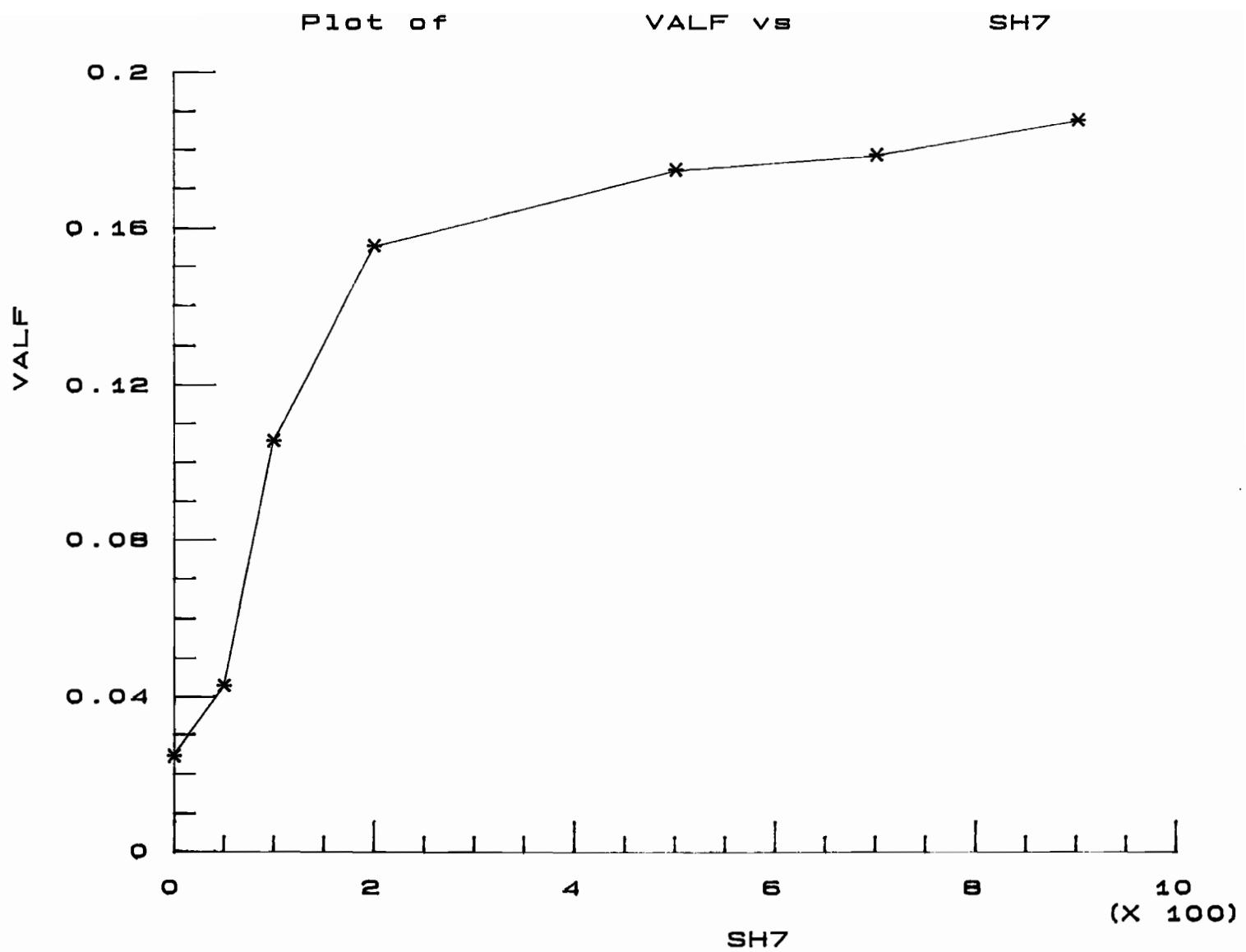


Figure III-17

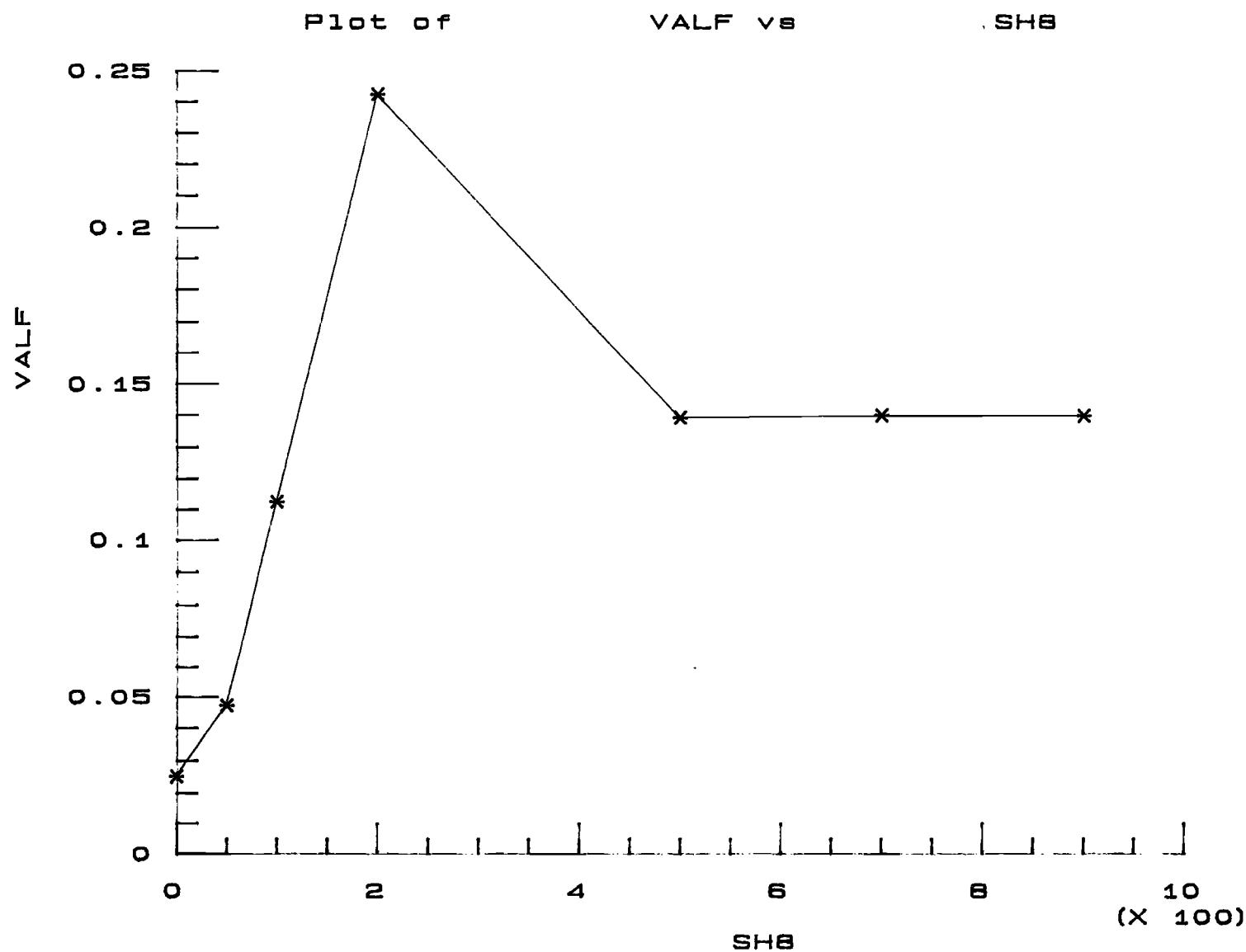


Figure III-18

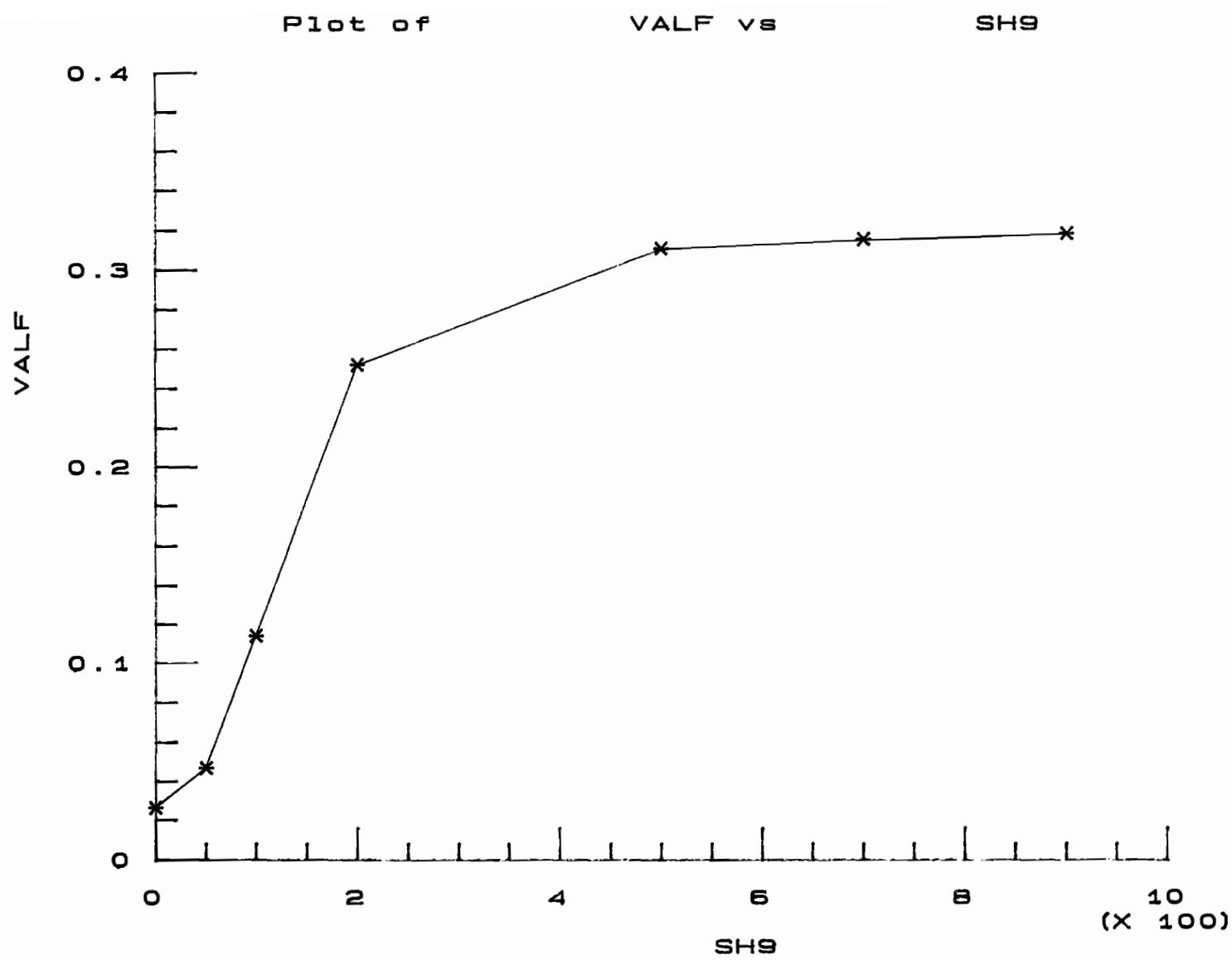


Figure III-19

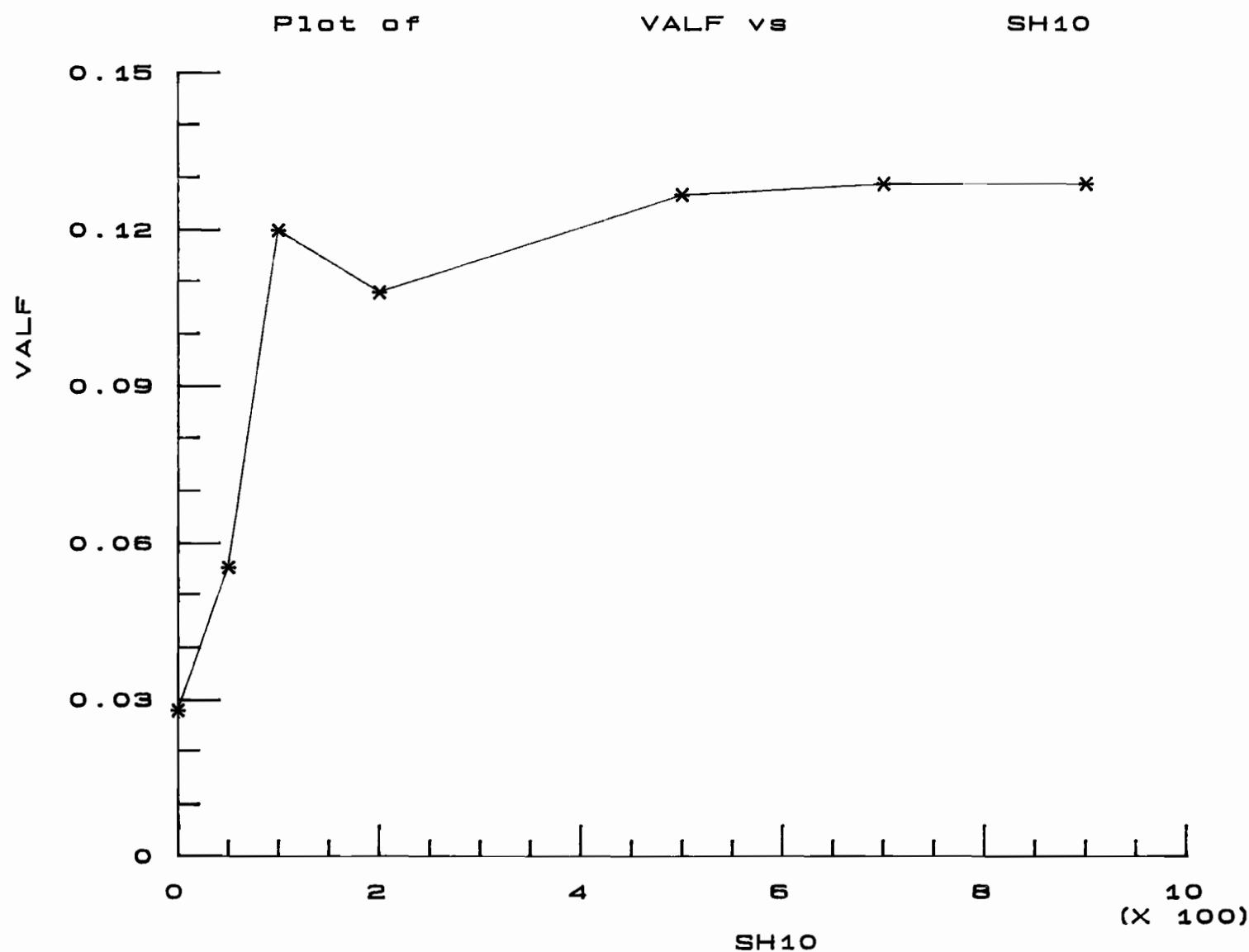


Figure III-20

modèle CREC (Combes (1985)):

$$FC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{\text{calc}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right| + \left| \frac{\bar{Q}_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{calc}}}{\bar{Q}_{\text{obs}}} \right|$$

Il faut préciser que pour l'ensemble de ces encais les paramètres CQ7, CQ9 et CQ10, qui répartissent le volume EAUG vers les réservoirs de transfert, n'ont jamais été optimisés du fait des problèmes de définition de contraintes. Leur somme doit en effet être égale à 1 si on ne veut pas fausser le bilan. Les seules contraintes prises en compte par la méthode d'optimisation étant la définition de bornes, il était impossible de prendre cette contrainte (somme égale à 1) en compte avec la formulation retenue dans le modèle. Pour les cas où l'on étudiait un paramètre autre que CQ7, CQ9 ou CQ10, on les a fixés à leur vraie valeur, respectivement 0,3 ; 0,3 et 0,4.

## Interprétation des résultats.

### • Paramètres de production

- CPS (fig III-1)

Le paramètre agit directement sur les données de pluie, son influence est donc forte.

- CET (fig III-2)

Le paramètre joue le même rôle, sur les données d'évaporation, que CPS sur les pluies. Son influence est donc forte également.

- $x_{IN}$ ,  $Ax_{IN}$  (fig III-3 et III-4)

Ces deux paramètres interviennent dans la détermination de l'infiltration journalière par l'intermédiaire de la relation :

$$x_{IO} = x_{IN} (Ax_{IN} + 2 \exp\left(-\frac{54}{CRT}\right))$$

Le rôle de  $x_{IN}$  est important puisque dès que sa valeur est différente de 5 (valeur vraie)

le critère augmente. La valeur maximale de VALF est de 0,6 contre 2,2 et 1,8 pour CPT et CET. Son importance est donc relativement plus faible.

Par contre,  $A_{XIN}$ , qui détermine l'infiltration minimale ( $XIW * A_{XIN}$ ), a peu d'influence. La valeur maximale de VALF est de 0,04.

On peut à ce niveau préciser que lorsque l'on calcule le critère VALF alors que tous les paramètres sont fixés à leur valeur vraie, on obtient  $VALF=0,03$ . Ceci est du aux troncatures qui se produisent lors du stockage des débits journaliers dans le fichier de données. Ces débits sont en effet stockés en l/s.

- AA, BB (fig. III-5 et III-6)

Les paramètres d'hétérogénéité de l'infiltration (AA) et de la pluie (BB) présentent

des courbes similaires. On remarque une large zone, autour de la moie valeur, pour laquelle les variations de  $\Delta ALF$  sont faibles. Ces paramètres semblent mal déterminés, au moins au sens du critère employé.

#### - CRT, DCRT (fig III-7 et III-8)

Avec des valeurs maximales de critère de 0,9 et 1,1, ces paramètres ont une influence presqu'aussi forte que CPJ et CET. De plus la forme en V de la courbe indique une bonne détermination de ces paramètres.

#### - SH (fig. III-9)

En tant que niveau initial du réservoir sol, ce paramètre, selon les valeurs de CRT et DCRT, influence les 2 ou 3 premiers mois de simulation. Si sa valeur est trop forte, des débits importants seront observés au début

de simulation et entraîneront des valeurs de surface élevées.

- Paramètres de transfert

- CQ7, CQ9 et CQ10 (fig III-10 à III-12)

Les paramètres répartissent le volume EAUG entre les différents réservoirs. Les trois valeurs -dans notre cas- sont respectivement 0,3; 0,3 et 0,4.

A l'étude des courbes on s'aperçoit que ces paramètres sont relativement mal déterminés, notamment en ce qui concerne CQ7, et que leur influence est faible.

Quand leur valeur est nulle, ce qui revient à supprimer un réservoir, ils agissent de façon plus marquée.

La faible influence de ces paramètres

est sans doute due à ces phénomènes de compensation ou nivelle les coefficients de débit des réservoirs ( $\text{COEFQ}_7$ ,  $\text{COEFQ}_8$ ,  $\text{COEFQ}_9$  et  $\text{COEFQ}_{10}$ ).

-  $\text{COEFQ}_7, 8, 9$  et  $10$  (fig. III-13 à III-16)

On remarque que les courbes obtenues pour ces quatre coefficients de débit sont similaires. Leur importance n'est pas négligeable (valeur maximale de UALF: 1,2) mais ils apparaissent comme relativement mal déterminés quand ils s'approchent de la valeur 1.

En fait, ces coefficients sont assimilables à l'inverse d'un temps de transfert. Si  $\text{coeff} = 1$  le temps de transfert est de 1 jour, si  $\text{coeff} = 0,5$  le temps de transfert est de 2 jours, si  $\text{coeff} = 0,1$  le temps de transfert est de 10 jours.

On comprend que les valeurs du critère augmentent

quand on s'approche de 0.

La faible valeur du critère pour  $\text{coeff} = 0$  signifie qu'on a supprimé le réservoir (rien n'en sort). On fausse donc le bilan, et l'influence est plus faible que celle d'un réservoir ayant un temps de transfert de 10juns par exemple.

On peut, à ce niveau, entrevoir une partie de l'influence des données. En effet si l'on a des périodes assez longues pendant lesquelles le débit est nul, un réservoir avec un temps de transfert assez long peut alors fausser toute la période d'étiage, ce qui ne serait peut-être pas le cas avec des données ne présentant pas d'amét de l'écoulement.

- SH 8, 9 et 10 (fig III-17 a III-20)

Les valeurs représentent les niveaux initiaux des réservoirs de transfert. Leur

influence s'étend donc, selon les valeurs des coefficients de débit, sur quelques mois au plus.

Si bien sûr on s'éloigne d'une valeur plausible, ils fausseront la simulation.

Differents points semblent donc ressortir de cette analyse:

- Long terme (le nombre élevé de paramètres étudiés (20) on a parfois du mal à identifier clairement leur rôle. On remarque néanmoins qu'en ce qui concerne la production, AA, BB et AXIN ont une importance moindre que celle des autres paramètres. Dans le cas de la fonction de transfert, on ne peut isoler de paramètre présentant une influence prédominante.

• il faut noter que le nombre de paramètres à étudier a entraîné des temps de calcul importants qui seraient devenus prohibitifs si les calculs avaient été effectués sur micro-ordinateur.

Les résultats obtenus au niveau des paramètres de transfert nous ont amené à réaliser une étude plus poussée de cette partie de l'algorithme que nous présentons dans le chapitre suivant.

## **FONCTION DE TRANSFERT**

## **ANALYSE ET REFORMULATION**

Si on se réfère au schéma général des fonctions de production et de transfert (fig. II-1) on voit que le volume EAUG est transféré à l'escouriole par l'intermédiaire de trois branches de réservoirs en parallèle. La première est constituée de deux réservoirs en série (8 et 10) et reçoit le volume  $(Q10 * EAUG)$ , la seconde comprend un seul réservoir (9) et reçoit  $(Q9 * EAUG + 5H7 * COEFQ7)$  et la troisième reçoit  $Q7 * EAUG$  dans un seul réservoir (7) qui communique avec la branche précédente.

Au sens de l'analyse des systèmes, on se trouve face à une fonction présentant une certaine complexité et à des conditions initiales changeant à chaque pas de temps.

Bien que l'on sache, à partir de conditions

initiales données, écrire la loi de vidange d'un ou plusieurs réservoirs en parallèle ou en série (par les transformées de Laplace par exemple), il devient presque impossible d'écrire la loi de vidange d'un tel système.

Pour tenter de simplifier cette fonction de transfert on a procédé à différents essais ayant pour but de déterminer dans quelle mesure on pouvait remplacer

- deux réservoirs en série par un seul
- deux réservoirs en parallèle par un seul

Afin d'être en mesure de comparer ces résultats avec ceux de l'analyse de sensibilité, on a procédé par optimisation à l'aide de la méthode de Rosenbrock et en utilisant le même critère.

Dans les deux cas, on a utilisé la

série de données journalières EAUG provenant du tracément de la série pluviométrique par la fonction de production. A partir de cette chronique EAUG on a générée une chronique - de sortie d'une fonction de transfert composée, soit de deux réservoirs en parallèle, soit de deux réservoirs en série. On a ensuite cherché à "caler" un seul réservoir sur la chronique de sortie. La chronique d'entrée dans ce réservoir est la chronique EAUG. Partant de là et en se basant sur la chronique de sortie générée dans le cas de deux réservoirs en série ou en parallèle, et pour différent cas de fonctionnement, on tente d'identifier par optimisation les paramètres de ce réservoir unique.

## 1) Réservoirs en parallèle

A partir de la chronique d'entrée EAUG, on veut savoir dans quels cas de fonctionnement on peut remplacer le schéma (I) par le schéma (II)

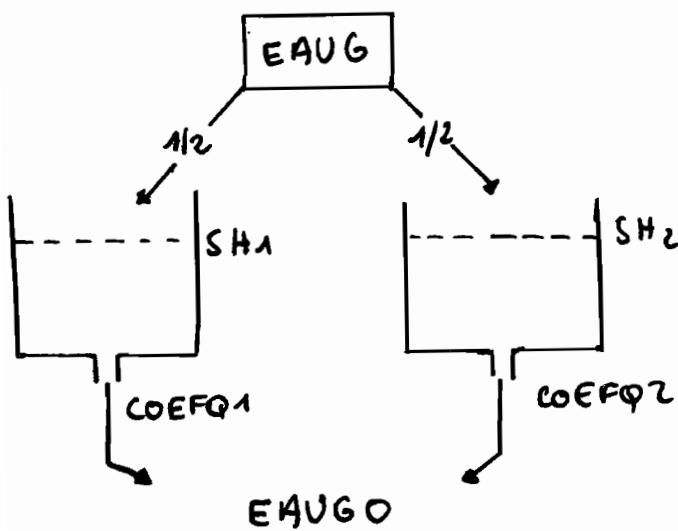


Schéma (I)

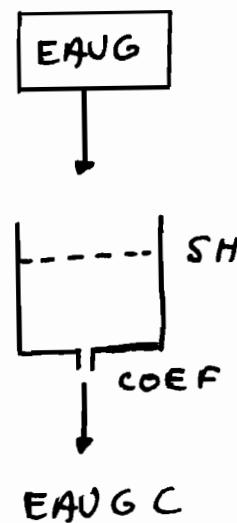


Schéma II

Plusieurs cas de fonctionnement ont été envisagés en fixant différents volumes à COEFQ<sub>1</sub>, COEFQ<sub>2</sub>, SH<sub>1</sub>, SH<sub>2</sub>; 6 volumes ont été retenus pour COEFQ<sub>1</sub> et COEFQ<sub>2</sub>, 3 pour SH<sub>1</sub> et SH<sub>2</sub>.

et sont :

COEFQ1	0,002	0,005	0,01	0,1	0,5	0,9
COEFQ2	0,002	0,005	0,01	0,1	0,5	0,9
SH1	10	200	500			
SH2	10	200	500			

L'ensemble des combinaisons possibles correspond donc à  $6 \times 6 \times 3 \times 3 = 324$  cas de fonctionnement.

Dans chaque cas, on calcule la chronique EAUGO, puis par optimisation à l'aide de la méthode de Rosenbrock et du ~~intervalle~~

$$FC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{EAUGC_i - EAUGO_i}{EAUGO_i} \right| \times \left| \frac{EAUGO_i - EAUGO_0}{EAUGO_0} \right|, \text{ on}$$

essaie de trouver les valeurs optimales de SH et COEF qui permettent de donner la chronique EAUGC la plus proche de EAUGO. On retient (VALF) la valeur de ~~intervalle~~ à la fin des 100 itérations effectuées.

On peut alors tracer la courbe des fréquences

des valeurs de la variable  $VALF$  et la courbe des fréquences cumulées relatives (fig IV-1 et IV-2)

On remarque sur la figure IV-2 qu'environ 50% des cas envisagés donnent un critère final inférieur à 0,65. En regardant en détail les résultats, on s'aperçoit qu'on obtient des faibles valeurs de critère quand  $COEFQ_1$  et  $COEFQ_2$  sont égaux. Il est en effet assez logique de pouvoir remplacer deux réservoirs identiques par un seul !.

Globalement le remplacement de deux réservoirs en parallèle par un seul, ne paraît pas envisageable.

## 2) Réservoirs en série

Nous avons procédé de la même manière

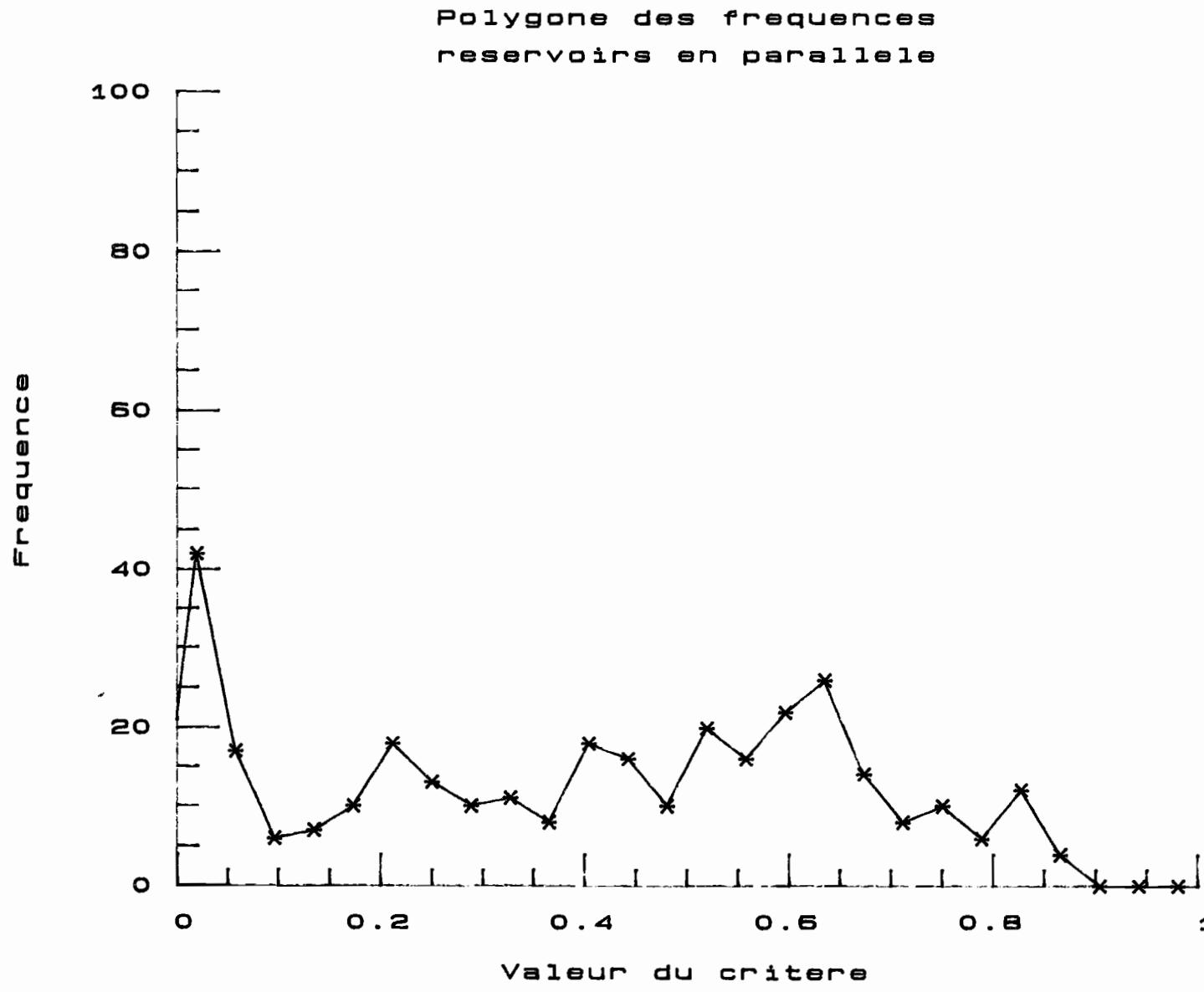


Figure IV-1

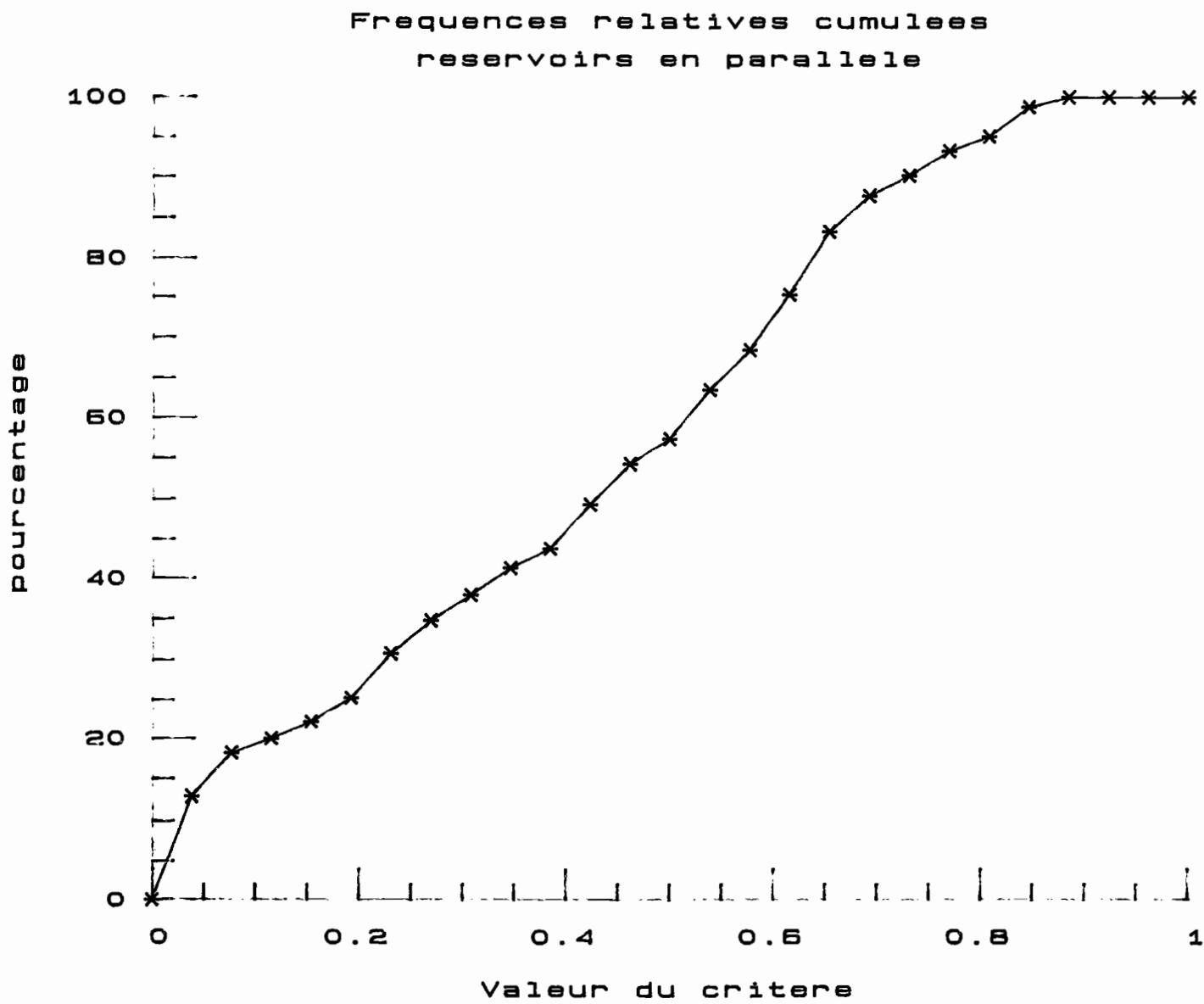
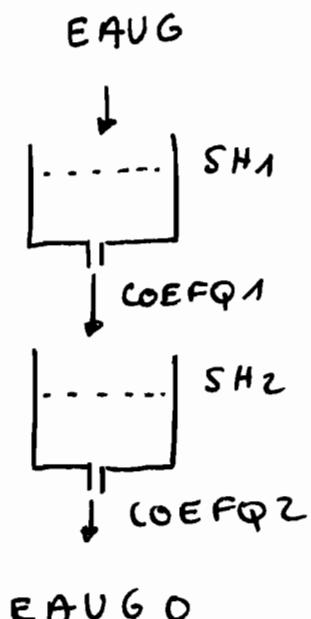


Figure III-2

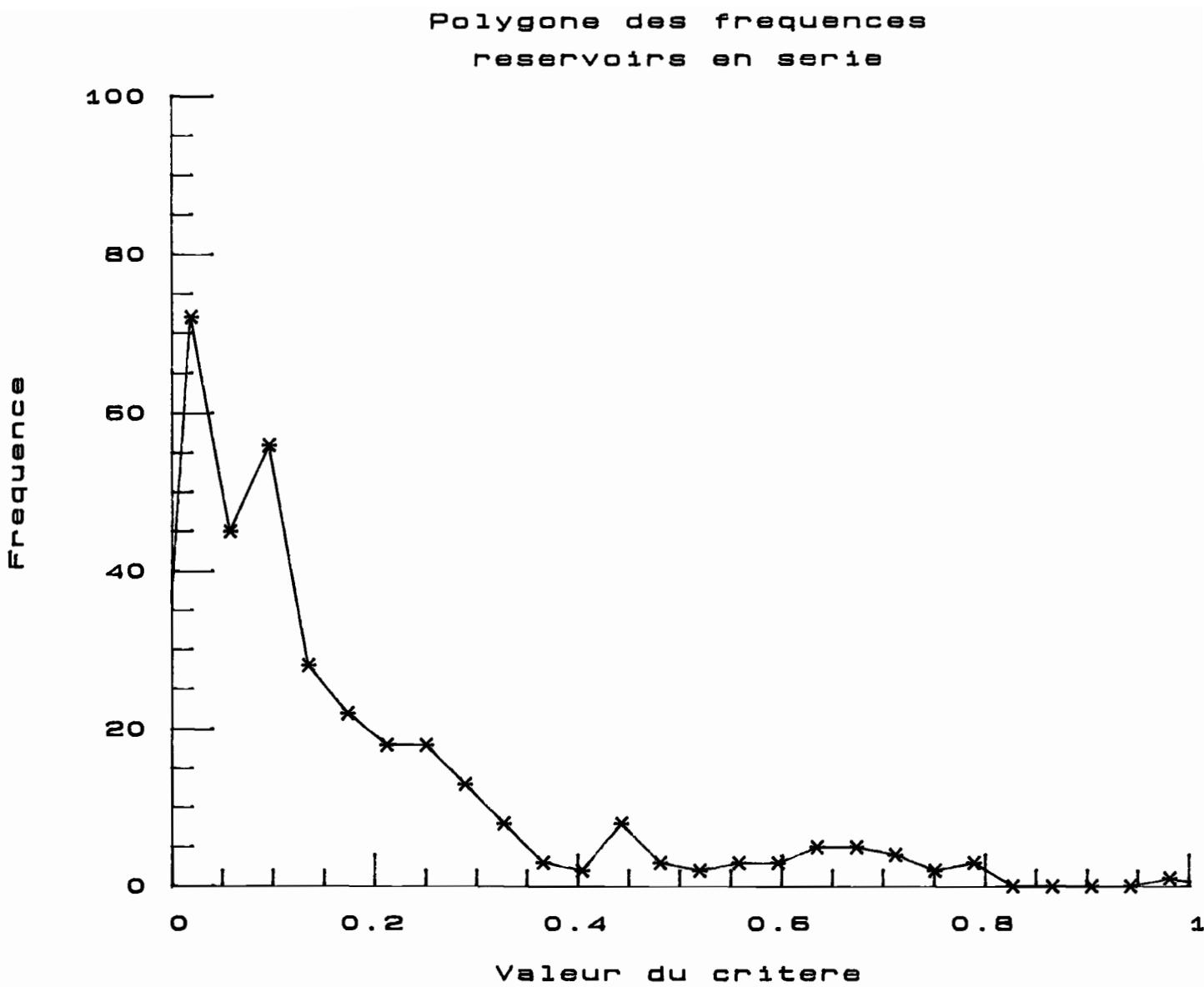
que pour le cas précédent ; nous avons essayé de remplacer le schéma (III) par le schéma (II) (un seul réservoir)



### Schéma (III)

Les combes des fréquences des valeurs de la variable VALF pour les 324 essais (mêmes valeurs de coefficient que pour le cas en parallèle) sont présentées ci-après (fig III-3 et IV-4).

On observe ici (fig IV-4) que 90% des cas correspondent à une valeur de cotière inférieure à 0,45.



Figue IV-3

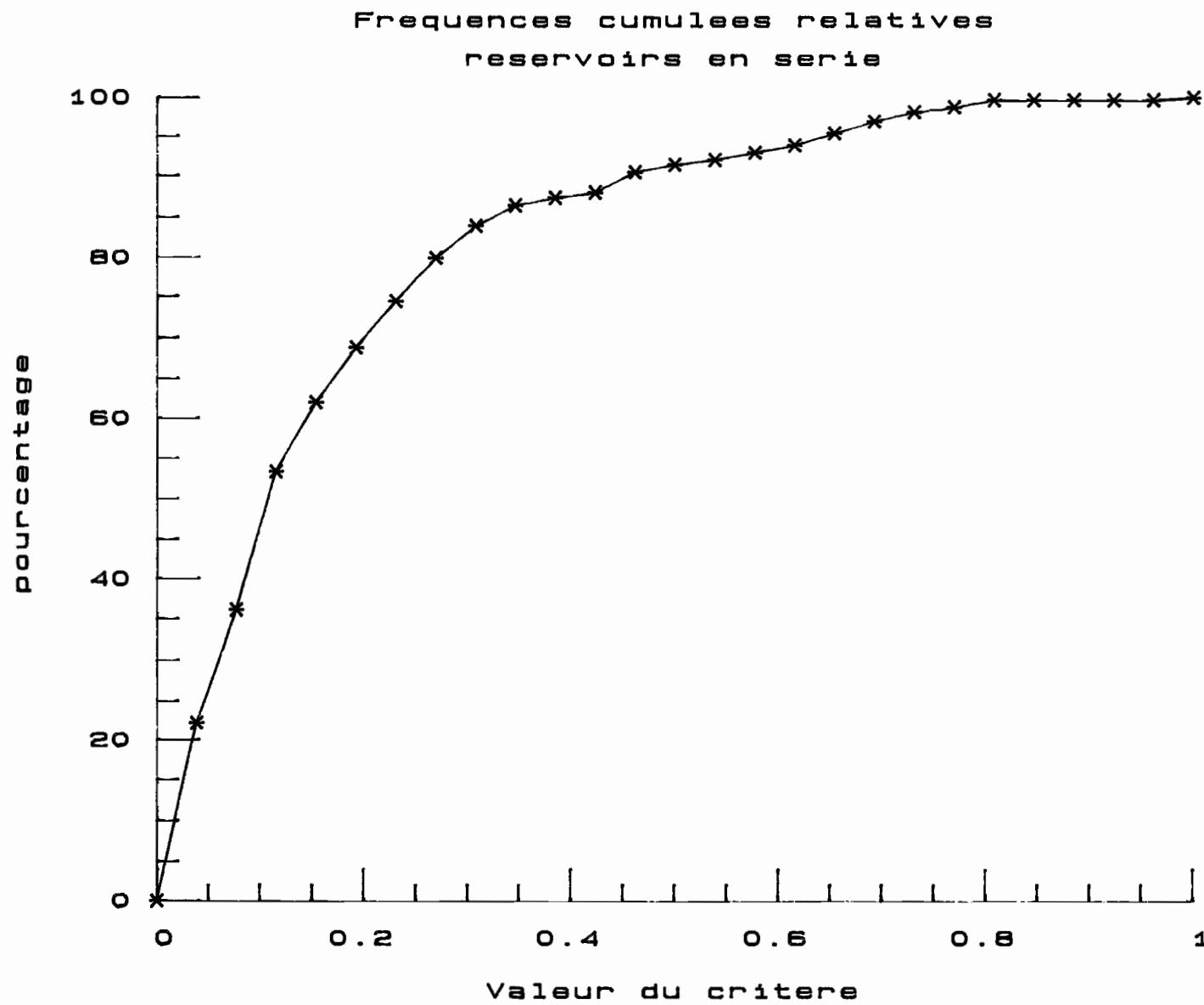


Figure IV-4

En analysant en détail les cas pour lesquels le centre reste élevé on s'aperçoit qu'il s'agit de deux types de fonctionnement :

1) Les coefficients COEFQ1 et COEFQ2 sont égaux et élevés. Les hydrogrammes calculés et observés (EAUGC et EAUGO) correspondent à deux des 10 plus forte valeurs du centre sont représentés par les figures IV-5 et IV-6

• fig IV-5 on avait

$$SH_1 = 10 \quad SH_2 = 10 \quad COEFQ1 = 0,5 \quad COEFQ2 = 0,5$$

valeur du centre 0,71

$$SH = 12,4 \quad COEF = 0,483$$

• fig IV-6 on avait

$$SH_1 = 200 \quad SH_2 = 10 \quad COEFQ1 = 0,5 \quad COEFQ2 = 0,5$$

valeur du centre 0,74

$$SH = 113,82 \quad COEF = 0,484$$

94

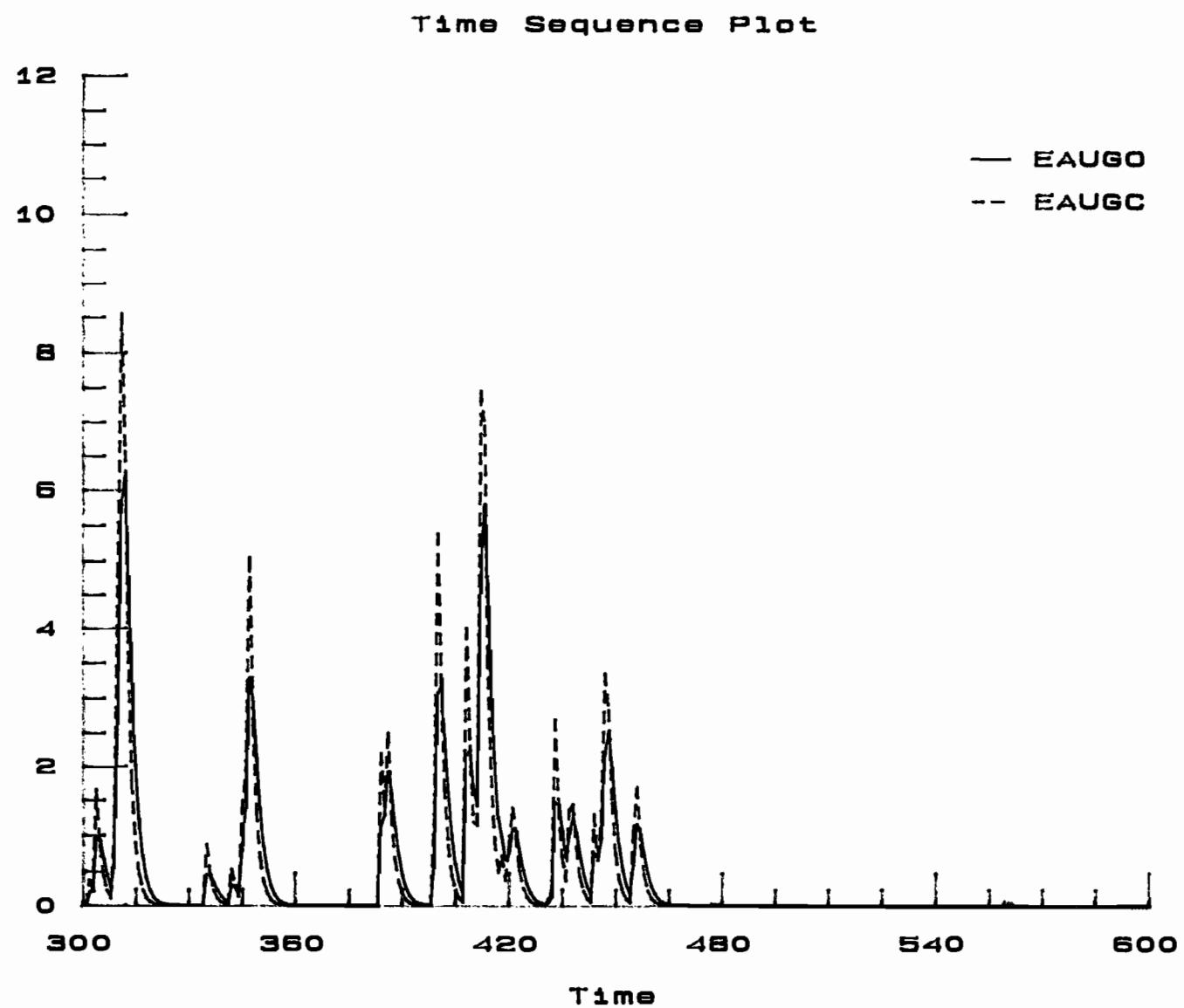


Figure IV-5

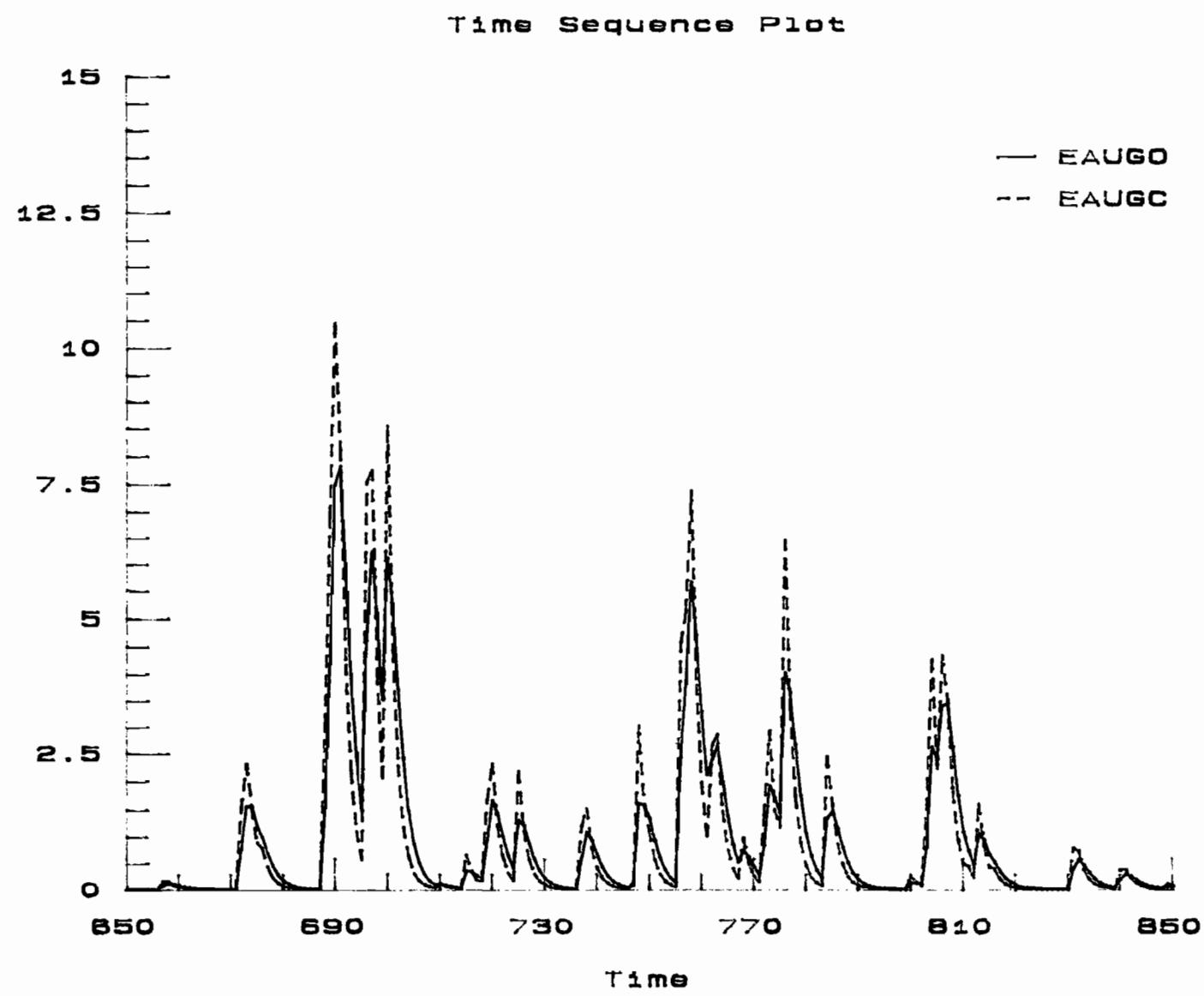


Figure IV-6

Dans ces deux éventualités, pour lesquelles la valeur du critère semble indiquer qu'on ne peut pas remplacer deux réservoirs en série par un seul, l'observation des hydrogrammes montre une surestimation des débits élevés.

2) On se trouve en présence d'un cas de figure non hydrologiquement réaliste (fig IV-7) pour lequel on avait

$$SH_1 = 10 \quad SH_2 = 500 \quad COEFQ_1 = 0,002 \quad COEFQ_2 = 0,1$$

valeur du critère 0,978

$$SH = 501,9 \quad COEF = 0,0997$$

Le cas de fonctionnement n'est, en effet, pas réaliste en hydrologie car l'hydrogramme observé (EAUGO) sur 6 ans de données présente une très forte valeur en débit (la simulation) puis un débit constant, quasi-nul, sur le reste de la période.

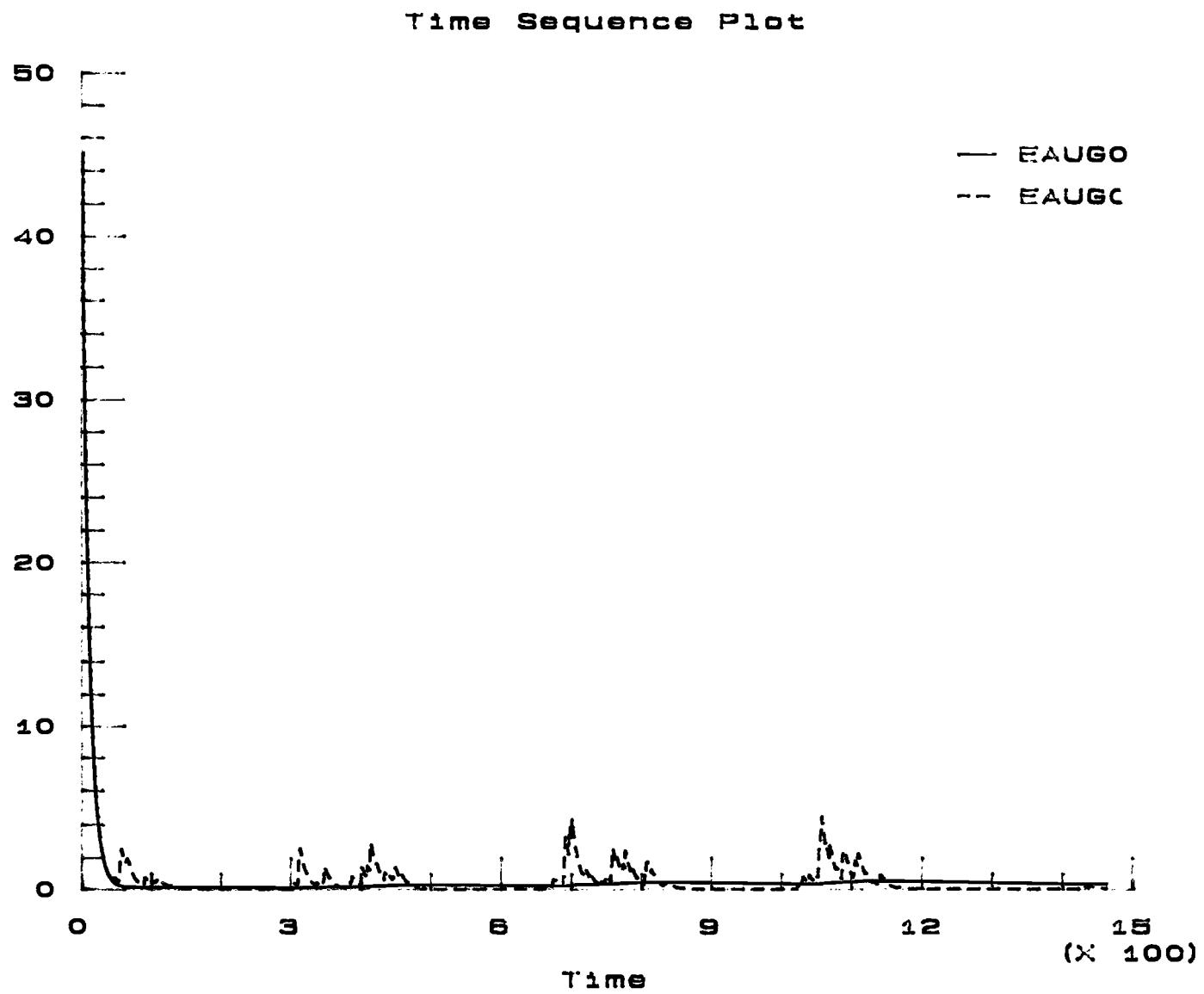


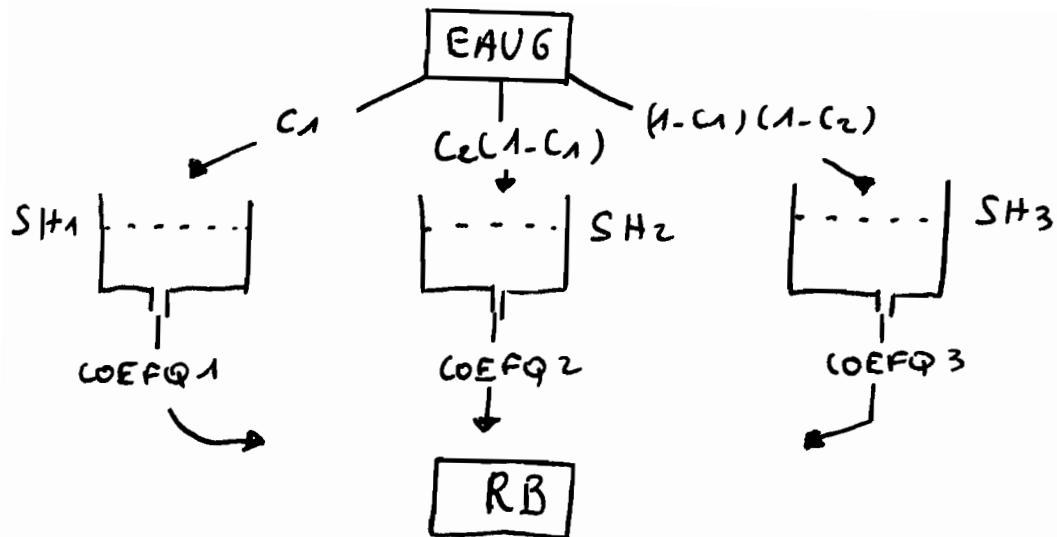
Figure IV-7

En conclusion de cette analyse du transfert on peut avancer que :

- Il est difficile de remplacer deux réservoirs en parallèle par un seul excepté si les coefficients de débit sont égaux
- Il est possible de remplacer, dans la plupart des cas, deux réservoirs en série par un seul, mis à part l'éventualité où les deux coefficients de débit sont égaux.

### 3) Proposition de reformulation du transfert

Suite à ces différents essais nous proposons la configuration suivante qui devrait se révéler équivalente au schéma initial dans la plupart des cas.



Dans ce schéma, deux coefficients,  $c_1$  et  $c_2$  répartissent le volume EAUG dans les trois branches. Cette écriture, dans laquelle  $c_1$  et  $c_2$  représentent le pourcentage du volume restant à partager dirigé vers une branche, permet l'optimisation de  $c_1$  et  $c_2$  en imposant uniquement qu'ils soient compris entre 0 et 1 sans risques de flouter le bilan. En effet, on a :  $c_1 + (1-c_1)c_2 + (1-c_1)(1-c_2) = 1$  quel que soient  $c_1$  et  $c_2$ .

En procédant de la même façon que précédemment nous avons testé le remplacement de l'ancienne formulation par la nouvelle pour plusieurs cas de fonctionnement, en menant :

pour  $CQ7, CQ9, CQ10$  9 jeux de valeurs.

0,1 0,45 0,45

0,5 0,25 0,25

0,9 0,05 0,05

0,45 0,1 0,45

0,25 0,5 0,15

0,05 0,9 0,05

0,45 0,45 0,1

0,25 0,25 0,5

0,05 0,05 0,9

pour  $COEFQ8, COEFQ10, SH8, SH10$  4 jeux de valeurs.

0,005 0,5 10 10

0,5 0,005 500 500

0,5 0,5 200 200

0,05 0,5 10 10

pour  $COEFQ7, SH7$  4 jeux de valeurs

0,0025 10

0,025 200

0,25 500

0,4 10

et pour COEFQG, SHG      4 jeux de valeurs

0,005	10
0,05	200
0,5	500
0,9	10

En prenant l'ensemble des combinaisons  
on a obtenu  $9 \times 4 \times 4 \times 4 = 448$  fonctionnements.

Les résultats obtenus sont représentés ci-après  
(fig IV-8 et IV-9).

On s'aperçoit que ce nouveau schéma  
est équivalent à l'ancien dans la plupart des  
cas envisagés.

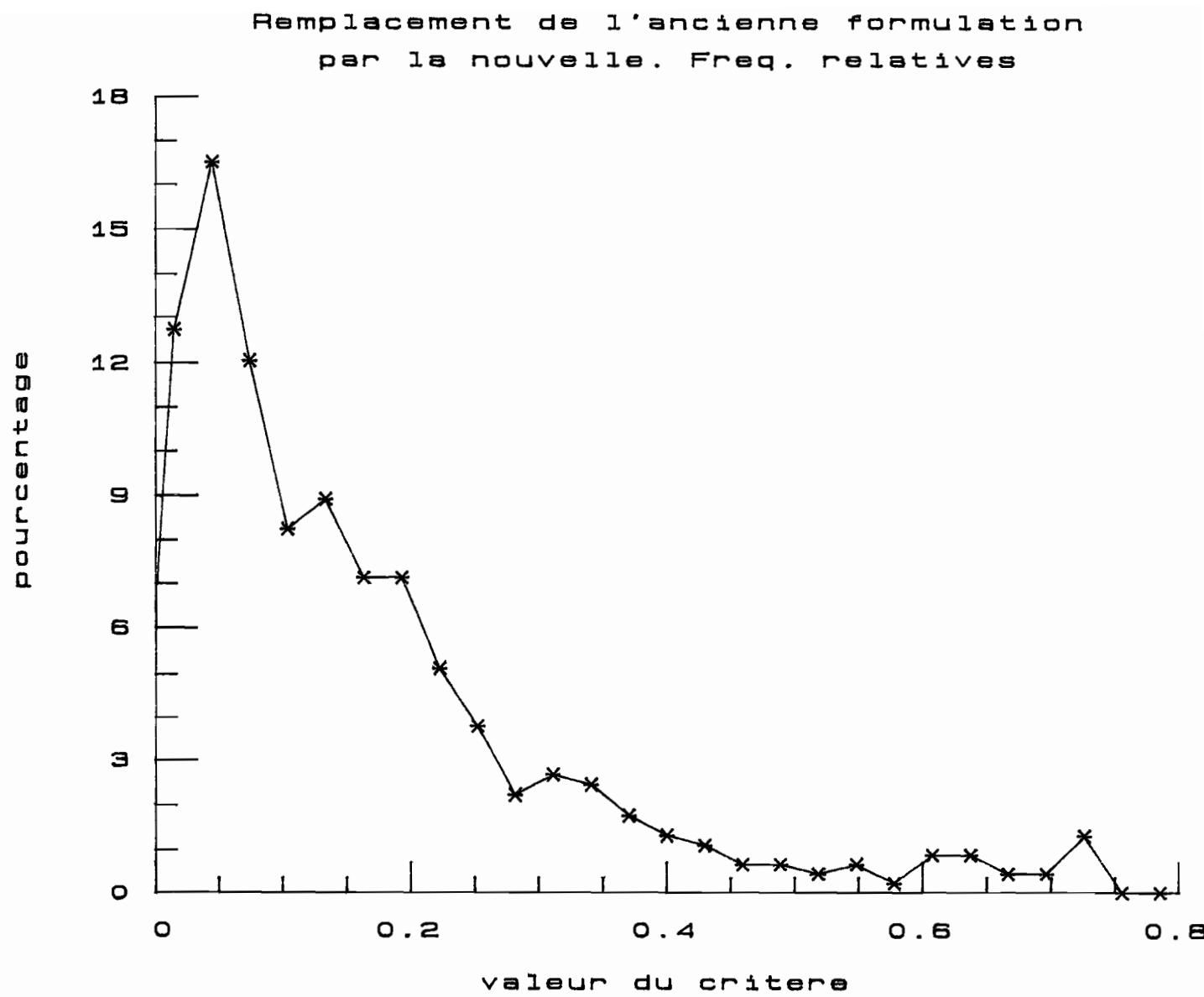


Figure IV-8

Remplacement de l'ancienne formulation  
par la nouvelle. Freq. cumulées relat.

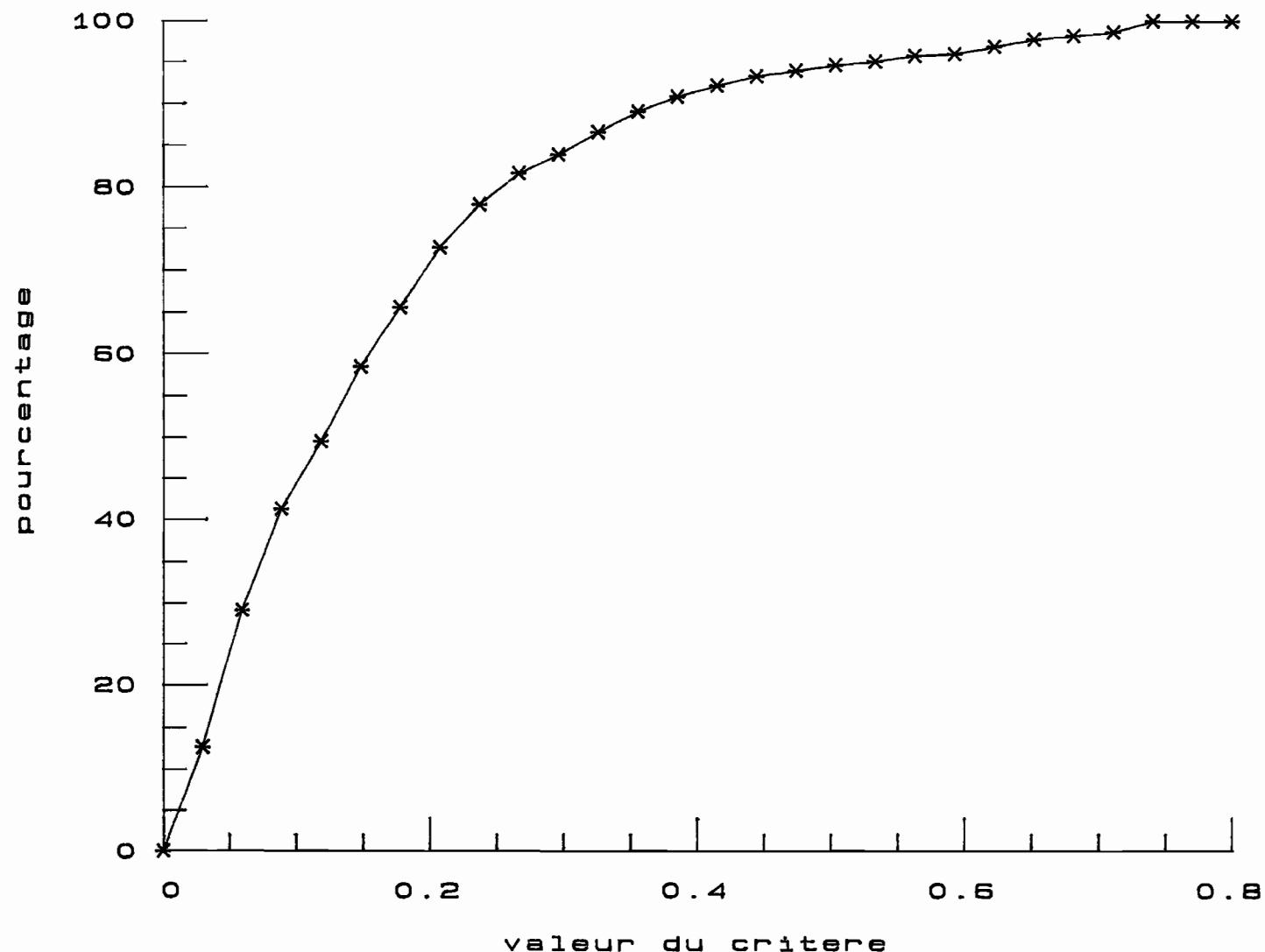


Figure IV-9

## **EXEMPLES D'APPLICATION**

Suite à l'analyse effectuée ci-dessus nous proposons une version reformulée du modèle global dans laquelle la fonction de transfert n'est autre que celle élaborée précédemment. Au niveau de la production, on a vu que les paramètres AA et BB présentaient une influence relativement plus faible que les autres. La nouvelle version ne comporte donc plus ces paramètres. Le calcul de RS se fait par la seule comparaison de PS et de XIO; si  $PS > XIO$  alors  $RS = PS - XIO$  sinon  $RS = 0$

Plusieurs essais de la nouvelle et de l'ancienne version, avec ou sans optimisation des paramètres, sont analysés ci-dessous. Pour les résultats détaillés, on se reportera aux annexes correspondantes.

1) Essais de la nouvelle version sur les données fictives ayant servi au cours de cette étude  
(Annexes A)

#### 1.1 Calage manuel (Annexe A:1)

Connaissant les volumes vus de l'ancienne version ayant servi à générer les données, quelques essais furent suffisants pour fixer les volumes avec nouveaux paramètres. On reproduit de façon à peu près correcte les lames annuelles éculées sauf pour la première année.

Année	Lame Observée	Lame Calculée
1974	156,4	100,7
1975	275,0	263,4
1976	268,7	236,8
1977	47,2	43,2

#### 1.2 Calage avec optimisation

La méthode d'optimisation est la méthode de Rosenbrock, le même celui qui a été utilisé au cours de cette étude (utilisé du modèle REC).

- optimisation de  $x_{IN}$ ,  $S_4$ ,  $CRT$ ,  $DCRT$ ,  $c_1, c_2$ ,  $COEFQ_1$ ,  
 $COEFQ_2$ ,  $COEFQ_3$ ,  $S_{H1}$ ,  $S_{H2}$ ,  $S_{H3}$  (Annexe A-2)

On obtient des résultats moins bons que ceux du calage manuel. On observe de plus une anomalie au niveau de la détermination de  $CRT$  et  $DCRT$ . On obtient en effet une valeur de  $DCRT$  supérieure à celle de  $CRT$  ce qui est impossible par construction.

- optimisation de  $x_{IN}$ ,  $S_4$ ,  $CRT$ ,  $DCRT$

On obtient là encore des résultats moins bons et on observe toujours la même anomalie au niveau des valeurs de  $(CRT + DCRT)$ .

- optimisation de  $x_{IN}$ ,  $S_4$ ,  $CRT$ ,  $DCRT$  avec un critère différent ( $\frac{1}{n} \sum \text{ABS}(Q_{\text{obs}} - Q_{\text{calc}})$ )

Les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus précédemment mais on observe plus d'anomalie au niveau de  $CRT$  et  $DCRT$ .

2) Essais de deux versions sur les données réelles  
du bassin "AVAL" (Annexe B)

### 2.1 Calage manuel (Annexe B-1, B-2)

En lames annuelles on obtient les résultats suivant :

Année	Lame observée (mm)	Lame calculée Anc. Version (B-1)	Lame calculée Nov. Version (B-2)
1974	178,7	165,2	165,1
1975	278,6	297,6	296,9
1976	288,4	267,5	266,4
1977	40,1	44,1	45,9

Les deux versions donnent des résultats parfaitement similaires.

### 2.2 Calage avec optimisation

Quoique l'on optimise l'ensemble des paramètres de production et de transfert, avec l'ancienne version ou la nouvelle, on obtient des

résultats équivalents et de moins bonne qualité qu'avec le collage manuel. On note également la même anomalies que précédemment en ce qui concerne CRT et DCRT. ( $DCRT > CRT$ )

Par manque de temps les essais n'ont pas été poussés plus loin. Il aurait été intéressant de tester ces deux versions sur plusieurs bassins et avec de nombreux critères d'optimisation.

Le nombre, malgré tout encore élevé, de paramètres au rôle plus ou moins bien défini constitue un handicap pour l'emploi des techniques d'optimisation. Il serait intéressant de tester un collage par optimisation séparée de la production et du transfert avec peut-être des critères différents dans chacun des cas.

## **CONCLUSION**

Arrivés au terme de cette étude, il est possible d'en tirer un certain nombre d'enseignements.

L'étude bibliographique a montré que s'il existe de nombreuses techniques d'optimisation certaines semblent plus utilisées que d'autres en modélisation hydrologique. Des méthodes de Rosenbrock, de Nelder et Mead ou encore de Powell s'imposent en effet largement chez les hydrologues.

On retiendra également la grande diversité des outils numériques. Il n'existe pas de critère universel utilisable en toutes circonstances (cette, étiage, apports sur des pas de temps importants, etc..). Le fait d'avoir recours à plusieurs formulations différentes en cours de calage apparaît comme nécessaire.

L'analyse des structures et du fonctionnement de MODGLO montre que le rôle d'un grand nombre de paramètres du modèle n'est pas clairement identifié. Il a quindi même été possible de proposer une reformulation de l'algorithme qui se traduit par une simplification de la fonction de production et l'élaboration d'une nouvelle fonction de transfert. Celle-ci s'appuie sur un ensemble de résultats montrant que deux réservoirs en série peuvent généralement être assimilés à un seul mis à part certains cas particuliers. Cette équivalence n'est pas vérifiée dans le cas de deux réservoirs en parallèle.

Les différents essais effectués, quant à eux, confortent les conclusions auxquelles nous avions abouti concernant l'importance des autres

et la mauvaise identification du rôle des paramètres. L'intérêt de tester plusieurs critères numériques s'impose donc a priori.

Enfin, il est raisonnable que les données utilisées dans le cadre de cette analyse ont eu une influence sur les résultats. L'utilisation de données ne présentant pas de périodes caractérisées par un amitié de l'écartement aurait peut-être permis de distinguer d'autres spécificités dans le fonctionnement de ce modèle global.

## **BIBLIOGRAPHIE**

## Bibliographie.

- Bouglan (1966)

A mathematical model for relating runoff to rainfall with daily data. Civil Eng. Trans. Inst. Eng. Aust., CE8(1), p 83-97

- Burnash et al (1973)

A generalized streamflow system : conceptual modeling for digital computer, report, Sacramento

- Camus H., Chaperon P., Girard G., Molinier M. (1976)

Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korkogo 1962-1972

Travaux et Documents de l'ORSTOM n°52, 77p.

- Combès V. (1985)

Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration.

l'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC., Thèse de Docteur-Ingénieur, 202 p.

- Chapman T.G (1970)

Optimization of a R-R model for an arid zone catchment. AISH , Colloque de Wellington, p 126-144

- Diodice et Simon (1972)

A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models , S.H. 34 (1977)

p 129-149

- Fortin J.P, Charbonneau R., Lemerre I., Girard G. (1971)

Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. AISH Pub. n° 101 Vol 2 Actes du colloque de Varsovie Juillet 1971

p 548-557.

- Giraud G. (1975a)

Application du modèle à discrétilisation  
spatiale au bassin versant de l'oued Ghalfa  
(Marocaine) (ch. de l'ORSTOM, ser. hydro., Vol XII

n° 3

- Giraud G. (1975b)

Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de  
la lame écoulée en zone saharienne et leurs contraintes  
(ch. de l'ORSTOM, ser. hydro., Vol XII, n° 3)

- Guillet A. (1971)

Processus d'optimisation en quatre étapes  
appliquée à la recherche des paramètres des  
modèles déterministes, Laboratoire d'Hydrologie  
Mathématique, USTL, note LHM 16/1971

- Himmelblau D. (1972)

Applied Non linear programming, Mac Graw Hill  
480 p.

- Igitt, O'Donnell (1971)  
Designing conceptual catchment models for automatic fitting methods. AISH Pub. no 101 Vol 2  
Actes du colloque de Vassivière Juillet 1971, p 461-475
- Johnston, Pilgrim (1976)  
Parameter optimization for watershed Models  
WRR Vol 12 (3) 1976 p 477-486
- Meim, Brown (1978)  
Sensitivity of Optimized Parameters in Watershed Models, WRR Vol 14 (2), April 78, p 299-303
- Pickup (1977)  
Testing the efficiency of algorithms and strategies for automatic calibration of R-R models  
Bulletin des Sciences Hydrologiques XXII, 2 6/1977
- Rogers, Boven, Morris, Anderson (1985)  
Sensitivity analysis, calibration and predictive uncertainty of the institute of hydrology distributed

model, JH 81(1985) p 179-191

- Sorooshian, Dracup (1980)

Stochastic Parameter Estimation Procedures for  
Hydrologic R-R Models : Correlated and Heteroscedastic  
Error cases., WRR Vol 16(2) p 430-442, April 1980

- Sorooshian S. (1981)

Parameter estimation of Rainfall - Runoff models  
with heteroscedastic streamflow errors. The  
non informative data case, JH 52(1981)  
p 127 - 138

- Sorooshian, Gupta, Fulton (1983)

Evaluation of the Maximum Likelihood  
Parameter Estimation Techniques for Conceptual  
Rainfall Runoff models : Influence of Calibration  
Data Variability and Length on Model's Predictability.  
WRR Vol 13, n°1 p 251-259, Feb. 1983

- Seneat E. (1985)

Description et utilisation du modèle de production global type "ORSTOM74" Note interne ORSTOM.

- Seneat E. (1986)

Présentation de 3 modèles globaux conceptuels déterministes : CRIC5, MODGCO et MODIBI.

Note interne ORSTOM Nov 1986

## **ANNEXES**

*Annese* A-1

## PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE

-----  
PARAMETRES DE LA FONCTION DE PRODUCTION :

Surface du bassin versant km2 SURFBV : 70.000  
Coefficient de passage pluie brute-pluie au sol CPJ : 1.000  
Paramètres de l'infiltration XIN : 25.000 AXIN : .270  
Hauteur d'eau dans le réservoir sol au départ SH : 10.000  
Capacité de rétention en eau du sol CRT : 160.000  
Hétérogénéité DCRT : 80.000  
Coefficient de pondération de l'évaporation mesurée(EVAS) CET : 1.000

## PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT :

Coefficients de répartition de EAUG dans les réservoirs :

C1 : .300 C2 : .600

Coefficients de débit des réservoirs d'étalement :

COEFQ1: .500 COEFQ2: .500 COEFQ3: .500

Niveau d'eau dans les réservoirs d'étalement au départ :

SH1 : 10.000 SH2: 10.000 SH3: 10.000

Voulez-vous corriger un ou plusieurs de ces paramètres ? O/N

=====
\* Tableau des lames mensuelles et annuelles
\* Année : 1974
\* Station : 6100
=====

Unités : mm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBR	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	42.7	188.6	85.0	86.6	22.6	3.7	1.4	.0	27.0	174.8	128.5	61.3	822.2
E Obs	20.2	34.7	17.8	12.2	.9	.0	.0	.0	.0	3.0	49.2	16.5	154.4
E Calc	15.0	10.2	10.7	6.2	.0	.0	.0	.0	.0	.9	43.5	14.3	100.7

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 822.20                    NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = 18.61                    EAU GRAVITAIREE= 67.09  
 EVAPORATION ETR= 634.97                LAME MAXIMUM CALCULEE= 17.25  
 NIVEAU MAXIMUM= .00                    TOTAL ECOULEMENT=100.70  
 PLUIE MAXIMALE= 44.80

=====  
\* Tableau des lames mensuelles et annuelles \*  
\* Année : 1975 \*  
\* Station : 6100 \*  
=====

Unités : mT

LAME	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	61.0	174.7	106.4	9.2	54.1	.9	.0	48.9	5.2	110.0	339.4	38.2	948.0
E Obs	10.8	70.1	24.8	2.4	.0	.0	.0	.0	.0	6.9	135.8	24.2	275.0
E Calc	7.7	71.9	25.1	1.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	135.6	21.3	263.4

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j

TOTAL PLUIE = 948.00 NOMBRE DE PLUIES INDSERVEES 6  
 RUISSELEMENT = 87.51 EAU GRAVITAIRES= 175.96  
 EVAPORATION ETR= 642.46 LAME MAXIMUM CALCULEE= 28.81  
 NIVEAU MAXIMUM=.00 TOTAL ECOULEMENT=263.41  
 PLUIE MAXIMALE= 64.90

=====
\*                 Tableau des lames mensuelles et annuelles               \*
\*                 Année : 1976   \*
\*                 Station :       6100   \*
=====

Unités : mm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN	*
Pluie	109.9	84.1	82.0	53.6	59.6	29.9	33.0	26.0	24.1	226.8	196.6	91.5	1017.1	*
E Obs	37.8	35.3	24.1	3.7	.0	.0	.0	.0	.0	30.3	73.3	44.2	248.7	*
E Calc	38.5	34.4	23.6	2.6	.0	.0	.0	.0	.0	14.0	77.7	46.0	236.8	*

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE =1017.10   NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES      0  
 RUISSELEMENT = 9.70   EAU GRAVITAIREE= 227.17  
 EVAPORATION ETR= 765.34   LAME MAXIMUM CALCULEE= 13.85  
 NIVEAU MAXIMUM= .00   TOTAL ECOULEMENT=236.83  
 PLUIE MAXIMALE= 55.40

```
=====
*          Tableau des lames mensuelles et annuelles
*          Année : 1977
*          Station : 6100
=====
```

Unités : mm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBR	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	77.2	35.1	23.8	59.8	29.2	12.8	.2	18.9	6.9	17.3	145.6	18.1	444.9
E Obs	31.1	10.7	.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	2.6	2.2	47.2
E Calc	31.4	10.6	.4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.4	43.2

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 444.90                    NOMBRE DE PLUIES INDESSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = .00                        EAU GRAVITAIRES= 43.07  
 EVAPORATION ETR= 517.30                LAME MAXIMUM CALCULEE= 5.42  
 NIVEAU MAXIMUM=.00                        TOTAL ECOULEMENT= 43.18  
 PLUIE MAXIMALE= 19.00

Annex A-2

## PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE

-----  
PARAMETRES DE LA FONCTION DE PRODUCTION :

Surface du bassin versant km2 SURFBV : 70.000  
Coefficient de passage pluie brute-pluie au sol CPJ : 1.000  
Paramètres de l'infiltration XIN : 22.980 AXIN : .270  
Hauteur d'eau dans le réservoir sol au départ SH : 56.220  
Capacité de rétention en eau du sol CRT : 159.800  
Hétérogénéité DCRT : 166.600  
Coefficient de pondération de l'évaporation mesurée(EVAS) CET : 1.000

## PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT :

Coefficients de répartition de EAUG dans les réservoirs :  
C1 : .370 C2 : .000  
Coefficients de débit des réservoirs d'étalement :  
COEFQ1: .460 COEFQ2: .410 COEFQ3: .440  
Niveau d'eau dans les réservoirs d'étalement au départ :  
SH1 : 12.240 SH2: 15.230 SH3: 8.680  
Voulez-vous corriger un ou plusieurs de ces paramètres ? O/N

=====
\*                   Tableau des lames mensuelles et annuelles                   \*
\*                   Année : 1974    \*
\*                   Station :         6100                                    \*
=====

Unités : mm

	LAME	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
*														*
Pluie		42.7	188.6	85.0	86.6	22.6	3.7	1.4	.0	27.0	174.8	128.5	61.3	822.2
E Obs		20.2	34.7	17.8	12.2	.9	.0	.0	.0	.0	3.0	49.2	16.5	154.4
E Calc		20.5	18.1	8.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	33.2	.0	80.4
*														*

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 822.20                    NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = 24.95                    EAU GRAVITAIRE= 34.97  
 EVAPORATION ETR= 681.50                    LAME MAXIMUM CALCULEE= 12.95  
 NIVEAU MAXIMUM= .00                    TOTAL ECOULEMENT= 80.38  
 PLUIE MAXIMALE= 44.80

=====
\*                 Tableau des lames mensuelles et annuelles
\*                 Année : 1975
\*                 Station : 6100
=====

Unités : mm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	61.0	174.7	106.4	9.2	54.1	.9	.0	48.9	5.2	110.0	339.4	38.2	948.0
E Obs	10.8	70.1	24.8	2.4	.0	.0	.0	.0	.0	6.9	135.8	24.2	275.0
E Calc	2.4	100.6	10.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	149.5	14.1	277.5

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 948.00                    NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = 115.69                    EAU GRAVITAIRE= 161.81  
 EVAPORATION ETR= 660.50                LAME MAXIMUM CALCULEE= 28.21  
 NIVEAU MAXIMUM= .00                    TOTAL ECOULEMENT=277.50  
 PLUIE MAXIMALE= 64.90

```
=====
*          Tableau des lames mensuelles et annuelles
*          Année : 1976
*          Station : 6100
=====
```

Unités : mm

	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE	T AN
Pluie	109.9	84.1	82.0	53.6	59.6	29.9	33.0	26.0	24.1	226.8	196.6	91.5	1017.1
E Obs	37.8	35.3	24.1	3.7	.0	.0	.0	.0	.0	30.3	73.3	44.2	148.7
E Calc	34.7	38.5	8.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	5.1	103.5	46.1	236.0

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8    2.0    2.9    3.5    3.7    4.2    4.8    4.8    3.5    3.1    2.2    1.7

TOTAL PLUIE = 1017.10	NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0
RUISSELEMENT = 19.17	EAU GRAVITAIRES = 217.13
EVAPORATION ETR= 776.50	LAME MAXIMUM CALCULEE= 22.85
NIVEAU MAXIMUM= .00	TOTAL ECOULEMENT= 236.01
PLUIE MAXIMALE= 55.40	

=====
\* Tableau des lames mensuelles et annuelles \*
\* Année : 1977 \*
\* Station : 6100 \*
=====

Unités : mm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	77.2	35.1	23.8	59.8	29.2	12.8	.2	18.9	6.9	17.3	145.6	18.1	444.9
E Obs	31.1	10.7	.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	2.6	2.2	47.2
E Calc	23.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	23.0

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 444.90      NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = .00      EAU GRAVITAIRES= 22.70  
 EVAPORATION ETR= 519.70      LAME MAXIMUM CALCULEE= 7.19  
 NIVEAU MAXIMUM=.00      TOTAL ECOULEMENT= 22.99  
 PLUIE MAXIMALE= 19.00

Annexe B.1

## PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE

## PARAMETRES DE LA FONCTION DE PRODUCTION :

## PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT :

Coefficients de répartition de EAUG dans les réservoirs :  
    CQ7 : .300 CQ9 : .350 CQ10: .350  
Coefficients de débit des réservoirs d'étalement :  
    COEFQ7: .500 COEFQ8: .600 COEFQ9: .400 COEFQ10: .400  
Coefficients de reprise de l'évaporation réservoirs 9 et 10  
    ET9 : 1000.000 ET10: 1000.000  
Niveau d'eau dans les réservoirs d'étalement au départ :  
    SH7 : .000 SH8: .000 SH9: .000 SH10: .000  
Voulez-vous corriger un ou plusieurs de ces paramètres ? O/N

=====
\*                         Tableau des lames mensuelles et annuelles
\*                         Année : 1974
\*                         Station : 6100
=====

Unités : mm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
*													*
Pluie	42.7	188.6	85.0	86.6	22.6	3.7	1.4	.0	27.0	174.8	128.5	61.3	822.2
E Obs	2.3	87.7	21.9	10.7	.6	.0	.0	.0	.0	1.3	40.3	13.8	178.7
E Calc	2.4	56.3	24.0	11.9	.1	.0	.0	.0	.0	1.2	50.8	18.6	165.2

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 822.20                    NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = .00                        EAU GRAVITAIRE= 165.22  
 EVAPORATION ETR= 642.33                LAME MAXIMUM CALCULEE= 14.45  
 NIVEAU MAXIMUM= 17.77                    TOTAL ECOULEMENT=165.22  
 PLUIE MAXIMALE= 44.80

Valeurs des hauteurs d'eau dans les réservoirs à la fin de l'année  
 SH : 99.545 SH7 : .000 SH8 : .001 SH9 : .001 SH10 : .000

Tableau des lames mensuelles et annuelles  
Année : 1975  
Station : 6100

Unités : cm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	61.0	174.7	106.4	9.2	54.1	.9	.0	48.9	5.2	110.0	339.4	38.2	946.0
E Obs	9.8	92.0	29.1	1.5	.3	.0	.0	.0	.0	1.1	122.2	22.5	278.6
E Calc	7.2	78.3	27.8	2.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	152.0	30.1	297.6

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j

TOTAL PLUIE = 948.00 NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES 0  
 RUISSELEMENT = .00 EAU GRAVITAIRES= 297.91  
 EVAPORATION ETR= 621.46 LAME MAXIMUM CALCULEE= 22.80  
 NIVEAU MAXIMUM= 28.94 TOTAL ECOULEMENT=297.64  
 PLUIE MAXIMALE= 64.90

Valeurs des hauteurs d'eau dans les réservoirs à la fin de l'année  
SH : 128.277 SH7 : .000 SH8 : .158 SH9 : .205 SH10 : .144

=====
\*                         Tableau des lames mensuelles et annuelles
\*                         Année : 1976
\*                         Station : 6100
=====
\*

Unités : mm

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	109.9	84.1	82.0	53.6	59.6	29.9	33.0	26.0	24.1	226.8	196.6	91.5	1017.1
E Obs	40.3	41.5	34.6	2.5	3.1	.7	.0	.0	.0	13.1	104.2	48.3	288.4
E Calc	39.2	38.6	21.4	.1	.0	.0	.0	.0	.0	19.6	98.0	50.6	267.5

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 1017.10                            NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = .00                                EAU GRAVITAIRE= 267.65  
 EVAPORATION ETR= 740.08                        LAME MAXIMUM CALCULEE= 12.65  
 NIVEAU MAXIMUM= 15.51                            TOTAL ECOULEMENT=267.47  
 PLUIE MAXIMALE= 55.40

Valeurs des hauteurs d'eau dans les réservoirs à la fin de l'année  
 SH : 137.648 SH7 : .000 SH8 : .268 SH9 : .342 SH10 : .239

=====
\* Tableau des lames mensuelles et annuelles \*
\* Année : 1977 \*
\* Station : 6100 \*
=====

Unités : mm

	LAME	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBR	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie		77.2	35.1	23.8	59.8	29.2	12.8	.2	18.9	6.9	17.3	145.6	18.1	444.9
E Obs		33.2	4.9	.4	1.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.5	.2	40.1
E Calc		33.4	9.4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.5	.7	44.1

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8    2.0    2.9    3.5    3.7    4.2    4.8    4.8    3.5    3.1    2.2    1.7

TOTAL PLUIE = 444.90      NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0  
 RUISSELEMENT = .00      EAU GRAVITAIRE= 43.60  
 EVAPORATION ETR= 486.36      LAME MAXIMUM CALCULEE= 5.42  
 NIVEAU MAXIMUM= 6.28      TOTAL ECOULEMENT= 44.05  
 PLUIE MAXIMALE= 19.00

Valeurs des hauteurs d'eau dans les réservoirs à la fin de l'année  
 SH : 52.594 SH7 : .000 SH8 : .000 SH9 : .000 SH10 : .000

Amnesia B - 2

## PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE

-----  
PARAMETRES DE LA FONCTION DE PRODUCTION :

Surface du bassin versant km<sup>2</sup> SURFBV : 13.900  
Coefficient de passage pluie brute-pluie au sol CPJ : 1.000  
Paramètres de l'infiltration XIN : 50.000 AXIN : .270  
Hauteur d'eau dans le réservoir sol au départ SH : 85.000  
Capacité de rétention en eau du sol CRT : 130.000  
Hétérogénéité DCRT : 80.000  
Coefficient de pondération de l'évaporation mesurée(EVAS) CET : 1.000

## PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT :

Coefficients de répartition de EAUG dans les réservoirs :  
C1 : .300 C2 : .200  
Coefficients de débit des réservoirs d'étalement :  
COEFQ1: .700 COEFQ2: .400 COEFQ3: .200  
Niveau d'eau dans les réservoirs d'étalement au départ :  
SH1 : .000 SH2: .000 SH3: .000  
Voulez-vous corriger un ou plusieurs de ces paramètres ? O/N

```
=====
*          Tableau des lames mensuelles et annuelles      *
*          Année : 1974                                *
*          Station : 6100                            *
=====
```

Unités : mm

	LAME	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie		42.7	188.6	85.0	86.6	22.6	3.7	1.4	.0	27.0	174.8	128.5	61.3	822.2
E Cos		2.3	87.7	21.9	10.7	.6	.0	.0	.0	.0	1.3	40.3	13.8	178.7
E Calc		2.4	51.5	28.3	12.3	.2	.0	.0	.0	.0	1.0	50.8	18.6	165.1

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/i  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 822.20	NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES = 0
RUISSELEMENT = .00	EAU GRAVITAIRES= 165.22
EVAPORATION ETR= 842.33	LAME MAXIMUM CALCULEE= 12.74
NIVEAU MAXIMUM=.00	TOTAL ECOULEMENT=165.10
PLUIE MAXIMALE= 44.80	

\*\*\*\*\*  
\* Tableau des lames mensuelles et annuelles \*  
\* Année : 1975 \*  
\* Station : 6100 \*  
\*\*\*\*\*

United States

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBR	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	61.0	174.7	106.4	9.2	54.1	.9	.0	48.9	5.2	110.0	339.4	38.2	948.0
E Obs	9.8	92.0	29.1	1.5	.3	.0	.0	.0	.0	1.1	122.2	22.5	278.6
E Calc	7.1	76.8	28.5	3.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	143.3	37.9	296.9

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j

TOTAL PLUIE = 948.00 NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES 0  
 RUISSELEMENT = .00 EAU GRAVITAIRES= 297.91  
 EVAPORATION ETR= 621.46 LAME MAXIMUM CALCULEE= 20.13  
 NIVEAU MAXIMUM=.00 TOTAL ECOULEMENT=296.93  
 PLUIE MAXIMALE= 64.90

=====
\* Tableau des lames mensuelles et annuelles
\* Année : 1975
\* Station : 6100
=====

Unités : mm

	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	109.9	84.1	82.0	53.6	59.6	29.9	33.0	26.0	24.1	226.8	196.6	91.5	1017.1
E Obs	40.3	41.5	34.6	2.5	3.1	.7	.0	.0	.0	13.1	104.2	48.3	288.4
E Calc	36.9	41.0	21.8	.4	.0	.0	.0	.0	.0	18.6	95.8	52.0	266.4

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j  
 1.8      2.0      2.9      3.5      3.7      4.2      4.8      3.5      3.1      2.2      1.7

TOTAL PLUIE = 1017.10      NOMBRE DE PLUIES INDESERVÉES = 0  
 RUISSELEMENT = .00      EAU GRAVITAIRES= 287.65  
 EVAPORATION ETR= 740.08      LAME MAXIMUM CALCULEE= 11.25  
 NIVEAU MAXIMUM= .00      TOTAL ECOULEMENT= 266.42  
 PLUIE MAXIMALE= 55.40

-----  
Tableau des lames mensuelles et annuelles  
Année : 1877

**ANNÉES MENSUELLES ET ANNUELLES**

Annex : 177

### Unités : m

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	T AN
Pluie	77.2	35.1	23.8	59.8	29.2	12.8	.2	18.9	6.9	17.3	145.6	18.1	444.9
E Obs	33.2	4.9	.4	1.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.5	.2	40.1
E Calc	35.1	9.6	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.8	45.9

Evaporations moyennes mensuelles journalières en mm/j

TOTAL PLUIE = 444.90	NOMBRE DE PLUIES INOBSERVEES 0
RUISSELEMENT = .00	EAU GRAVITAIRES= 43.60
EVAPORATION ETR= 486.36	LAME MAXIMUM CALCULEE= 4.89
NIVEAU MAXIMUM= .00	TOTAL ECOULEMENT= 45.94
PLUIE MAXIMALE= 19.00	