

PRÉDÉTERMINATION DES CRUES PAR LA MÉTHODE GR4J. DES BASSINS VERSANTS DU MOYEN CHELLIF.

Mohamed REMAOUN*, Abderahmane ISSAADI et Claude MICHEL*****

RÉSUMÉ

Depuis le début des années 60, la simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des modèles mathématiques a connu un grand essor. Il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles parmi lesquels on peut citer les modèles conceptuels ou empiriques globaux qui permettent de représenter la relation pluie-débit à l'aide d'agencements variés de réservoirs.

Nous avons testé la structure du modèle GR4J sur un échantillon de trois bassins versants du moyen Chellif (Oued Ras, Ouahrane et Allala). L'objectif étant de pouvoir explorer le rôle du nombre de paramètres optimisables de débits et de tester ainsi une méthode de prédétermination de crues sur des bassins non jaugés. L'application sur le bassin versant de Oued Ras est proposée. Les hypothèses de base de cette méthode seront confirmées par les résultats de la modélisation.

Néanmoins, si cette structure qui contient quatre paramètres permet d'obtenir d'assez bons résultats, la méthode doit être testée à plus large échelle afin de dégager des conclusions mesurées et performantes.

Le modèle GR4J a été utilisé pour des observations d'une durée de 12 années, période certainement insuffisante mais qui peut avoir une réelle signification dans le cadre professionnel des applications hydrologiques.

Mots clés : Simulation - Modèles conceptuels - Prédétermination de crues - Bassin - Chellif.

* Faculté des Sciences de l'Ingénieur. Département d'Hydraulique. Université H.H.B –Chlef.

** FSTGAT/USTHB. BP. 32 El Alia – Bab Ezzouar – Alger.

*** CEMAGREF d'Antony-PARIS- FRANCE

- *Manuscrit déposé le 05 Octobre 2005, accepté après révision le 31 Mai 2006.*

PREDETERMINATION OF FLOODS BY GR4J METHOD OF WATERSHED OF MIDDLE OF CHELLIF

ABSTRACT

The simulation of the transformation of the rain into flow in the scale of the basin by mathematical models made strong great strides since the beginning of the Sixties, there is today a great number of models among which we find the model conceptual or empirical total which represent the bond between the rain and the flow by fitting varied from tanks.

The purpose of work established here is to test the structure of the model GR4J on a sample of 03 basins of the Middle Cheliff (Ras basin, Ouhrane et Allala), in order to be able to explore the role of the number of parameters optimisables of flows and to find a method of predetermination of floods on not measured basins (the case of Ras basin) is proposed. The basic assumptions of this method will be confirmed by the results of modeling.

Nevertheless this structure containing 04 parameters arrive to obtain rather good results, in our case in addition the structure of the model must be tested on broader scale in order to be able to release from the conclusions measured and especially powerful.

The model GR4J was used for a period of observation of 12 years, certainly insufficient period but has significance by considering applications close relations of the real use in the professional hydrological activity.

Key words: Simulation - Conceptual model - Predetermination of floods - Basin - Chellif.

I - PRÉSENTATION DU MODÈLE

1.1-Introduction

En 1965, RODIER et AUVRAY proposent une note de calcul des débits de crue décennale pour les petits bassins (superficiés inférieures à 200 Km²) de l'Afrique de l'Ouest; les débits décennaux sont calculés à partir des pluies décennales en utilisant la technique de l'hydrogramme unitaire. Cette étude encore très utilisée aujourd'hui, met en évidence l'extrême variabilité du ruissellement due aux perméabilités très différentes qui restent difficiles à évaluer.

Partant des observations contenues dans un recueil homogène des données de base des bassins représentatifs, Debreuil et al; (1972), Puech et

Chabi-Gonni, (1984) proposent une nouvelle note de calcul des débits de crues décennales fondée sur une approche beaucoup plus statistique que déterministe. Ces deux études comparables par leurs objectifs, soulèvent le même problème de l'estimation de l'aptitude au ruissellement d'un bassin versant. L'écoulement annuel au Maghreb, moins variable que les crues, a aussi fait l'objet d'une synthèse (Rodier, 1975).

1.2-Techniques d'homogénéisation, d'extension de série et de modélisation.

Mis à part le cas de quelques rares bassins de référence appelés « bench mark » par les anglo-saxons, les mesures n'intéressent que de courtes périodes et n'ont pas une grande signification

PRÉDÉTERMINATION DES CRUES PAR LA MÉTHODE GR4J
DES BASSINS VERSANTS DU MOYEN CHELLIF.

statistique, ceci est particulièrement vrai dans les zones arides où les écoulements sont très irréguliers. Une durée de dix ans d'observation est nettement insuffisante, une durée plus longue cinquante ou cent ans est prohibitive et justifie l'utilisation de techniques d'homogénéisation, d'extension de séries et de modélisation.

Ces techniques consistent à corriger les écoulements observés en fonction des caractéristiques spécifiques de la période qui leur a donné naissance. Ces corrections (ou homogénéisation) sont effectuées à l'aide d'un « modèle » calé sur une période observée, qui calcule les écoulements en fonction de la chronologie des pluies et d'autres paramètres climatiques. Ces modèles une fois calés, sont utilisés pour générer des séries fictives de longue durée à partir de données pluviométriques fiables et représentatives de la région. Les écoulements générés font l'objet d'une analyse fréquentielle, qui permet en principe, de s'affranchir de la période réellement observée. Il est évident que le type de modèle, son pas de temps et son mode de calage peuvent introduire un biais qu'il faudra s'efforcer de minimiser, contrôler et connaître le mieux possible pour interpréter les résultats et mieux évaluer la portée des conclusions que l'on en tirera.

1.3. Notion de représentativité, et nécessité de planification

L'estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes des crues est un des problèmes posés aux concepteurs d'aménagement. Pour cela, plusieurs procédés ont été conçus afin d'expliquer les valeurs des paramètres en fonction des caractéristiques morphoclimatiques des bassins versants.

Dans notre cas la connaissance exacte, dans l'espace et dans le temps, de tous les mécanismes qui génèrent le débit de crue n'est pas, et de loin, à la portée de nos moyens d'investigations.

Les conditions d'acquisition d'une série d'enregistrements fiables, les analyses de la régression multiple « variation du débit/pluies horaires » et les relations physiques permettront de répondre au besoin de l'annonce des crues.

Pour extrapoler aussi loin, une logique globale de bilan a plus de chance de nous éclairer que les modèles artificiellement détaillés et truffés d'hypothèses invérifiables (Franz et al; 1991). Le volume d'eau qui forme une crue est la différence de 02 grandeurs aléatoires :

- Le volume de l'averse génératrice.
- Le volume retenu par le bassin, qui tend vers une limite, liée à l'état initial du terrain et à la concentration spatio-temporelle de l'averse.

Nous avons tenté de comparer les résultats obtenus à l'aide des moyens classiques qu'utilise un hydrologue avec le modèle GR4J modèle établi par Charles Perrin en 2000 .

L'idée était de choisir certains sous bassins susceptibles de représenter un plus grand nombre de sous bassins et qui seraient représentatifs de la partie centrale du bassin du Moyen Chellif. Pour cela, nous avons adopté le concept de zone hydrologique homogène qui consiste à diviser toute la région représentée par le bassin versant du Chellif en zones, à l'intérieur desquelles les facteurs qui conditionnent les régimes hydrologiques ne présentent qu'une faible variation.

Cette technique de planification et de choix présente cependant deux inconvénients liés à la conception :

- D'abord, comment choisir les facteurs conditionnels des régimes hydrologiques et leurs limites pour effectuer le zonage alors que l'on ne connaît pas ces régimes !
- Ensuite, cette approche régionale ne prend pas en compte les variations des caractéristiques des sols et de

la végétation le long des versants. Car en suivant ce que l'on appelle une toposéquence, l'organisation et l'ordre d'apparition des différents sols dans ces toposéquences est un facteur déterminant des régimes.

1.4. Fiche analytique du modèle:

1. Nom du modèle : GR4J (modèle du Génie Rural à 04 paramètres Journalier).
2. Auteur : Charles Perrin (2004).
3. Institut – Pays : Cemagref, Antony, France.
4. Buts de modélisation et domaines d'application : Modélisation Pluie-Débit à peu de paramètres en vue d'utilisation sur des bassins versants non jaugés.
5. Description de la structure originale : La description de la version du modèle GR4J proposée par Nascimento (1995) est présentée ici (fig. 1-1), avec ensuite les modifications introduites par Edijatno et al., (1999) et enfin par Charles Perrin (2004).

Paramètres

Trois ou quatre paramètres sont optimisés :

- X_4 : capacité maximale du réservoir de production (fixée à 330 mm dans GR3j d'Edijatno et al., 1999).
- X_2 : capacité à un jour du réservoir de routage.
- X_3 : temps de base de l'hydrogramme unitaire.
- X_1 : paramètres d'échanges souterrains.

Neutralisation

La pluie brute subit l'évapotranspiration ETP. La pluie nette P_n est alors déterminée par :

- si $P = E$ alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$
- si $P < E$ alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P$

Réservoir de production

Lorsqu'il reste une pluie dP_n , la partie allant dans le réservoir sol est dP_s et l'autre partie dP_r transite vers l'exutoire :

$$dP_r = \left(\frac{S}{A} \right)^2 \cdot dP_n \quad (1)$$

$$dP_s = \left[1 - \left(\frac{S}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n \quad (2)$$

$$S_{k+1} = \frac{S_k + A \cdot \tanh(P_n / A)}{1 + (S_k / A) \cdot \tanh(P_n / A)} \quad (3)$$

Dans le cas où toute la pluie est consommée lors de l'interception, le restant E_n d'ETP sert à faire évaporer l'eau contenue dans le réservoir sol, à un taux commandé par une fonction du niveau dans le réservoir sol. La variation du niveau est :

$$dS = -dE_s$$

avec :

$$dE_s = (S/A) \cdot [2 - (S/A)] \cdot dE_n \quad (4)$$

Le niveau du réservoir est mis à jour suivant :

$$S_{k+1} = S_k \frac{1 - \tanh(E_n / A)}{1 + [1 - S_k / A] \cdot \tanh(E_n / A)} \quad (5)$$

Séparation des composantes de l'écoulement

La pluie est séparée en deux composantes. Un écoulement pseudo direct est routé par un hydrogramme unitaire et représente 10% de la pluie efficace; L'autre partie de la pluie efficace (90%) est routée par un hydrogramme unitaire et un réservoir de routage.

Hydrogramme unitaire

Les deux composantes de l'écoulement subissent tout d'abord un retard progressif par action d'un

PRÉDÉTERMINATION DES CRUES PAR LA MÉTHODE GR4J.
DES BASSINS VERSANTS DU MOYEN CIBELIF.

hydrogramme unitaire qui permet de simuler le temps de montée de l'hydrogramme. Ces hydrogrammes sont caractérisés par un temps de base C. L'écoulement transitant par le réservoir de routage est retardé par une fonction UH1 de la forme :

$$qt = \left[\frac{t}{C} \right]^3 \quad \text{Pour } 0 \leq t \leq C \quad (6)$$

$$q(t) = 1 \quad \text{Pour } t > C \quad (7)$$

Où t est le temps. L'écoulement pseudo direct est retardé par un hydrogramme UH2 du type :

$$q(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{T}{C} \right]^3 \quad \text{Pour } 0 \leq t \leq C \quad (8)$$

$$q(t) = 1 - \frac{1}{2} \left[2 - \frac{T}{C} \right]^3 \quad \text{Pour } C < t \leq 2C \quad (9)$$

$$q(t) = 1 \quad \text{Pour } t > 2C \quad (10)$$

Réservoir de routage

Après avoir été retardé par l'hydrogramme unitaire, la principale composante d'écoulement transite par un réservoir de routage non linéaire qui se vidange suivant une loi :

$$Q_r(t) = K.R(t)^5 \quad (11)$$

Où K est une constante et R le niveau dans le réservoir de routage. Le niveau du réservoir de routage est donc mis à jour d'après :

$$\frac{1}{R_k^4} = \frac{1}{R_{k-1}^4} + \frac{1}{B^4} \quad (12)$$

Où B est la capacité maximale du réservoir de routage. On a posé $\frac{1}{B^4} = 4.K \Delta t$, avec $\Delta t = 1$ jour, pas de temps de fonctionnement. Le débit du réservoir

est alors :

$$Q_r = R_{k-1} - R_k \quad (13)$$

Écoulement pseudo direct

Après le retard induit par l'hydrogramme unitaire, l'écoulement pseudo direct arrive directement à l'exutoire.

Terme d'échanges souterrains

Un terme T permet de tenir compte des infiltrations profondes ou des échanges d'eau souterrains. Il dépend d'un paramètre D (négatif ou positif).

Si D est négatif, il est exprimé par :

$$T = D \cdot \frac{S}{A} \quad (14)$$

Il est soustrait à l'écoulement direct Q_p et au niveau du réservoir de routage suivant (gain en eau pour le système) :

$$Q_p = \max(0, Q_p - T) \quad (15)$$

et

$$R = \max(\varepsilon, R - T)$$

où

ε a une valeur faible.

si

D est positif, on a alors :

$$T = D \cdot \frac{R}{B} \quad (16)$$

Qui est appliqué aux deux composantes de l'écoulement comme précédemment (perte en eau pour le système).

Dans la version d'Edijatno et al., (1999), deux modifications ont été réalisées : au niveau de la fonction de production et de la fonction d'échange. Dans cette version à trois paramètres, la capacité A du réservoir de production a été fixée à 330mm.

Réservoir de production

La partie de la pluie nette allant dans le réservoir sol est désormais donnée par :

$$P_s = \frac{P_n \left(1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right)}{1 + \left(\frac{P_n}{A}\right) \left(1 + \frac{S}{A}\right)} \quad (17)$$

Où S est le niveau dans le réservoir sol et A la capacité maximale de ce réservoir. Cette capacité maximale est fixée à 330mm. L'évapo transpiration est désormais déterminée par :

$$E_s = \frac{E_n \left(\frac{S}{A}\right) \left(2 - \frac{S}{A}\right)}{1 + \left(\frac{E_n}{A}\right) \left(2 - \frac{S}{A}\right)} \quad (18)$$

Terme d'échanges souterrains

Le terme d'échange ici est exprimé par :

$$\text{Pour } T = D \cdot \left(\frac{R}{B}\right)^4 \quad (19)$$

D positif ou négatif.

Où D est le paramètre d'échange et B la capacité du réservoir de routage.

Test du modèle et applications

Le modèle a été largement testé en France et en côte d'Ivoire par Servat et Dezetter (1991,1992). Il a également été testé en Grande-Bretagne par (Perrin, 1997). Le modèle a été utilisé par Nascimento (1995) et Lavabre et *al.*, (1993) pour la mise en évidence d'effets de changements environnementaux.

Yang et *al.*, (1991,1995) ont appliqué le modèle pour la gestion de barrage réservoir. Yang et Michel (2000) ont travaillé sur l'application d'une méthode variationnelle de prévision des débits appliquée à GR3. Yang (1993) enfin, avait mis cette méthode au point dans le cadre de la prévision horaire au pas de temps fin.

II - APPLICATION DU MODÈLE GR4J SUR LES BASSINS DE OUED OUAHRANE, ALLALA ET RAS.

Avant de procéder à l'application du modèle, nous donnons les principales caractéristiques du bassin versant du Chellif.

II.1. Divisions naturelles et conventions toponymiques.

Le bassin du Chellif occupe une superficie totale de 44.630 km² (tabl. 2-1 : Caractéristiques des bassins versants). Il est situé entre 34° et 36°30' de latitude Nord et 0° et 3°30' de longitude Est et affecte en gros la forme d'un fer de hache d'axe Nord-Sud.

Cette région correspond sensiblement au centre de ce que les géographes appellent le Maghreb et les divisions classiques de ce pays y sont particulièrement nettes. Cette région est en effet limitée au Nord par les crêtes de l'Atlas tellien littoral et occupe successivement et parallèlement du Nord au Sud la dépression inter-tellienne. La limite Sud coïncide avec les crêtes de l'Atlas saharien.

II.2. Historique des crues

M.Yacono (1955) qui a recueilli une documentation détaillée sur les crues du Chellif sur une centaine d'années, constate qu'en 1927 à Charon (Boukadir actuellement) le débit annuel de l'Oued Chellif était de 60 millions de m³,

soit un rapport de 1 à 22 entre deux années consécutives. Les variations au cours de l'année sont extrêmement marquées, l'étiage peut être de l'ordre du m³ tandis que les crues peuvent être considérables de l'ordre de 2000m³ à Chellif (ville). On a enregistré 4192 m³/seconde à Charon le 21 décembre 1930 (La Seine coulait à Paris en Janvier 1910 à 2500m³/seconde). Récemment, la régularisation du régime du Chellif et de ses affluents a été en partie obtenue par des barrages réservoirs réalisés en partie par la colonisation.

II.3. Application du modèle

II.3.1 Calage du modèle.

Le calage du modèle concerne les paramètres X1, X2, X3, X4. il est réalisé à l'aide de la méthode «pas à pas» en utilisant comme fonction objective le critère de Nash-Sutcliffe(1970) calculé sur les débits. Cette opération est faite automatiquement par le logiciel Excel, en utilisant la fonction «solveur».

L'opération de calage a été effectuée sur une période de 02 années (1987-1989).

1^{er} cas : application du modèle original avec la capacité du réservoir de production X1 fixée à 330mm. [Voir figure (2-2)].

2^{ème} cas : application du modèle avec changement de la capacité du réservoir de production (X1) fixée à 100 mm.[Voir figure (2-3)].

3^{ème} cas: application du modèle avec changement de la capacité du réservoir de production (X1) fixée à 100 mm: Ainsi P_r se divise en deux fractions 0.98 et 0.02. [Voir figure (2-4)].

Tableau 2-2 - Résultats du 1^{er} cas

Results of the first case

Bassin. Oued Allala			
Superficie du bassin (km ²)			287,5
Paramètres modèle	Transf.		Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	5,8		330,30
x2: Paramètre d'échange (mm)	-0,27		-0,27
x3: Capacité rés. routage (mm)	-0,16		0,85
x4: Délai (jours)	0,17		1,69
Valeurs initiales			
Taux de remplissage initial S0/x1			0,00
Taux de remplissage initial R0/x3			0,00
Moyenne des pluies observées (mm/j)			0,997
Moyenne des ETP observées (mm/j)			0,119
Moyenne des débits observés (mm/j)			0,000
Moyenne des racines des débits observés			0,096
Moyenne des log des débits observés			#NOMBRE!
Critères d'efficacité (%)			
Nash (Q)			50,1
Nash (VQ)			55,7
Nash (ln (Q))			#NOMBRE!
Bilan			101,0

Tableau 2-3 - Résultats des calculs pour le 2^{ème} cas (X1 = 100mm)

Results of the calculs for the second case

Bassin. Oued Allala			
Superficie du bassin (km ²)			287,50
Paramètres modèle	Transf.		Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	4,61		100,00
x2: Paramètre d'échange (mm)	-2,82		-8,40
x3: Capacité rés. routage (mm)	2,39		10,94
x4: Délai (jours)	-0,12		1,39
Valeurs initiales			
Taux de remplissage initial S0/x1			0,00
Taux de remplissage initial R0/x3			0,00
Moyenne des pluies observées (mm/j)			0,997
Moyenne des ETP observées (mm/j)			0,096
Moyenne des débits observés (mm/j)			0,000
Moyenne des racines des débits observés			0,096
Critères d'efficacité (%)			
Nash (Q)			79,8
Nash (VQ)			71,0
Bilan			98,3

PRÉDÉTERMINATION DES CRUES PAR LA MÉTHODE GR4J.
DES BASSINS VERSANTS DU MOYEN CHELLIF.

**Tableau 2-4 - Résultats des calculs pour le 3^{ème} cas
(X1 = 100mm)**

Results of calculs for the third case

cc			
Bassin. Oued Allala			
Superficie du bassin (km ²)			287,50
Paramètres modèle			Transf. Réels
x1: Capacité rés. production (mm)			4,61 100,00
x2: Paramètre d'échange (mm)			-2,75 -7,81
x3: Capacité rés. routage (mm)			2,35 10,49
x4: Délai (jours)			-0,15 1,36
Valeurs initiales			
Taux de remplissage initial S0/x1			0,00
Taux de remplissage initial R0/x3			0,00
Moyenne des pluies observées (mm/j)			1,00
Moyenne des ETP observées (mm/j)			0,10
Moyenne des débits observés (mm/j)			0,00
Moyenne des racines des débits observés			0,10
Critères d'efficacité (%)			
Nash (Q)			78,50
Nash (VQ)			69,10
Bilan			110,70

**Tableau 2-5 - Récapitulation des résultats
des différentes structures du modèle GR4J**

**Results recapitulation of different structures
of the GR4J model**

	1er cas	2eme cas	3eme cas
	version originale (PERRIN)	version modifiée X1 = 100mm	version modifiée X1 = 100mm. Pr = 0.98 et 0.02
Par X1	330,00	100,00	100,00
X2	-0,27	-8,40	-7,81
X3	0,85	10,94	10,49
X4	1,69	1,39	1,36
Taux de rempl initial S0/X1	0,00	0,00	0,00
Taux de rempl initial R0/X3	0,00	0,00	0,00
Nash (Q)	50,10	79,80	78,50
Nash (VQ)	55,70	71,00	69,10
Bilan	101,00	98,30	110,70
Coeff. de détermination R2	0,46	0,67	0,67
Coeff. de la régression	0,47	0,86	0,97

II.4 Commentaire

Les résultats obtenus représentés dans le tableau 2-2 et le graphe 01 relatifs au rapport des débits, donne un coefficient de corrélation assez faible ($R^2 = 0.46$) et ne peut donc être représentatif vu la faiblesse de la valeur de ce paramètre.

Avec les coefficients de corrélation obtenus dans le 2^{ème} cas (tabl. 2-3 et fig. 02) lors du changement de la capacité du réservoir de production fixée au préalable à 100mm au lieu de 330 mm à cause de la nature lithologique des bassins qui ne favorise pas une haute rétention, on obtient une nette amélioration du coefficient de détermination ($R^2 = 0,67$).

Enfin, pour le 3^{ème} cas (tabl. 2-4 et graphe 03) les résultats obtenus sont nettement meilleurs en fixant la capacité de production à 100 mm et en changeant le Pr dont la structure a été effectuée sur Pr = 0,98 et 0,02. Nous avons donc obtenus un meilleur résultat avec $R^2 = 0.67$ et $Y = 0.97x$.

Ce qui donne comme premier résultat concernant nos bassins une meilleure adaptation du modèle sur le bassin versant choisi comme exemple.

CONCLUSION

Nous avons présenté ici la méthodologie et les résultats qui nous ont conduits à la proposition d'une nouvelle structure du modèle du génie rural fonctionnant au pas de temps journalier.

Notre approche s'est appuyée sur les complémentarités mises en évidence au cours du travail comparatif. De nombreuses modifications de la structure à (04) paramètres ont ainsi pu être testées, exemple de (X1) (capacité du réservoir de production) la modification réelle fixe de la structure originale est de 330mm. Nous avons suggéré la valeur de 100mm (résultats obtenus à partir de nos calculs). Cette modification moyenne par rapport à la version GR4J de Perrin et l'optimisation de la capacité du réservoir de production a apporté une amélioration sensible des résultats notamment pour le 2^{ème} et 3^{ème} cas.

Cette valeur de 100mm a été fixée aléatoirement, étant donné que dans nos régions qui sont semi-arides à arides, les calculs de réservoir de capacité de sol commencent par cette valeur dans les bilans hydrauliques. Ceci est tributaire de la morphologie de nos sols et la capacité de rétention de ces derniers.

De meilleurs résultats ont été obtenus avec le changement dans le paramètre (Pr) valeur optimisée après plusieurs essais à 0.98 et 0.02, ainsi que sur le critère de Nash (Q) qui varie de 50.1 pour le premier cas à 78.5 pour le 3^{ème} cas. Ceci représente une meilleure adaptation de la structure et nous a apporté de meilleures améliorations dans les résultats notamment sur la simulation des étiages et la comparaison des débits observés et calculés qui nous donnent comme fonction de $Y = 0.97x + 0.01$ pour le 3^{ème} cas, valeur qui se rapprochent de 1.

On peut en déduire que cette version est plus robuste que la version antérieure, cependant même si les progrès réalisés permettent d'accroître la fiabilité du modèle, rien ne garantit que cette version corresponde à l'utilisation optimale de quatre degrés de liberté laissés au modèle. Nous pourrions donc mieux adapter notre modèle sur d'autres bassins versant de la région après calage des paramètres X_1 , X_2 , X_3 et X_4 .

BIBLIOGRAPHIE

- DUBREUIL, P., MENIER, M. ET BRAS, R.L., 1972.** Initialisation à l'analyse hydrogéologique. *Revue de Géo. alpine*, t. 71, 4, pp. 351-362.
- EDJATNO, J.P., 1991.** Mise au point d'un modèle élémentaire pluie débit au pas de temps journalier. *Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur/Strasbourg*, 242p.
- EDJATNO, J.P., 1999.** GR3J a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Journal*, 44(2), 263-277.
- FRANTZ, R., ANDREASSIAN, V AND DIVIER, J.E., 1995.** Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 122, 161-219.
- LAVABRE, J., SEMPERE TORRES, D. ET CERNESSON, E., 1993.** Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, 142, 273-299.
- MICHEL, C., 1989.** Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, *Cemagref, Antony*.
- NASCIMENTO, N.O., 1995.** Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action Anthropiques sur la relation pluie-debit à l'échelle du bassin versant. *Thèse de doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris*, 550p
- NASH, J.E. AND SUTCLIFF, J.V., 1970.** River flow forecasting through conceptual models. Part. I-a, discussion of principales. *Journal of hydrology*: 27 (3), 282-290.
- PERRIN, C., 1997.** Comparative assessment of two rainfall-runoff modelling approaches : GR4J and IHACRES. *Mémoire de DEA, ULP/ENGEES/Institute of Hydrology*, 153 p.
- PERRIN, C., 2000.** Comparative assessment of two rainfall-runoff modelling approaches : GR4J and IHACRES, Proceedings of the Prague conference (22-24 Septembre 1998). IHP-V, *Technical documents in hydrology, UNESCO, Paris*.
- PERRIN, C., 2004.** Comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of hydrology*, 7 (2), 44-58.

PRÉDÉTERMINATION DES CRUES PAR LA MÉTHODE GR4J
DES BASSINS VERSANTS DU MOYEN CHELLIF.

- RODIER, J. ET AUVREY, C., 1975.** Estimation des débits de crue décennale pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km en Afrique occidentale. *ORSTOM*.
- SERVAI, E. ET DEZETTER, A., 1991.** Selection of calibration objective function in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese Savannah area. *hydrological sciences journal*, 36 (4) 307-331.
- SERVAI, E. ET DEZETTER, A., 1992.** Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Hydrologie continentale*, 7 (2) 129-142.
- SERVAI, E. ET DEZETTER, A., 1993.** Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 148, 231-248.
- YACONO, X., 1955.** Géologie et morphologie des plaines du moyen de Chellif. *Thèse de Doctorat d'Etat, I.N.A. d'Alger*.
- YANG, X., PARENT, E., MICHEL, C. ET ROCHE, P.A., 1991.** Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits. *La houille blanche*, 6, 433-440.
- YANG, X., 1993.** «Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit Conceptuel pour la prévision des crues. *Thèse de doctorat d'état. ENPC/CERGRENE*.
- YANG, X., 1999.** Comparison of realtime reservoir-operation techniques. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 12 (15), 345-351.
- YANG, X. ET MICHEL, 2000.** Flood forecasting with a watershed model: a new method of parameter updating, *hydrological Sciences Journal in press*.

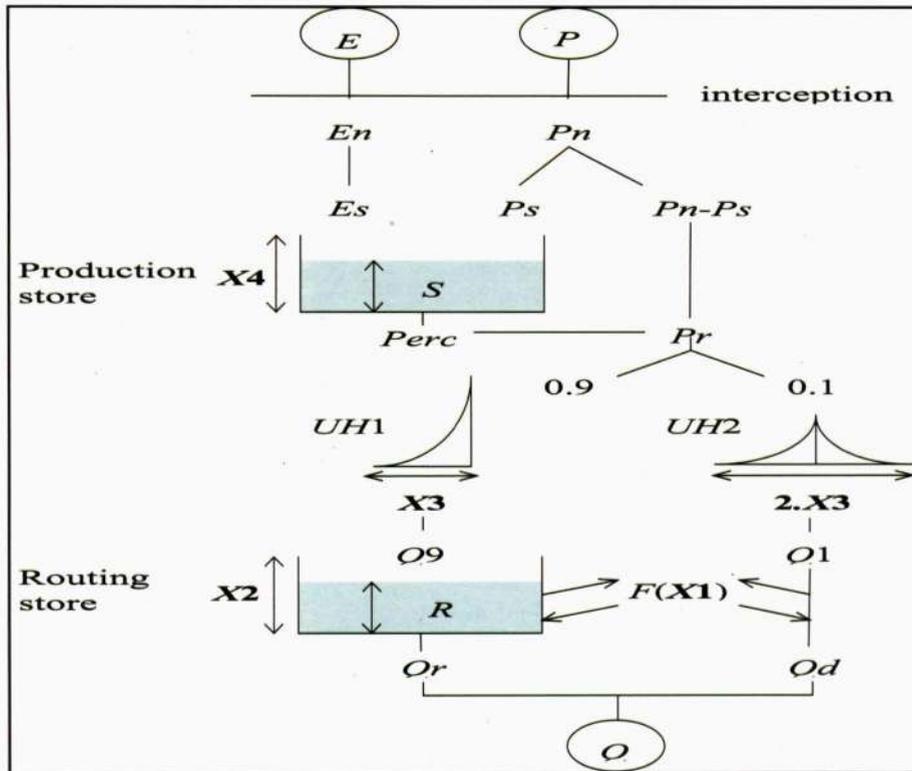


Fig. 1-1 - Schéma structurel de GR4J
Structural diagram of GR4J

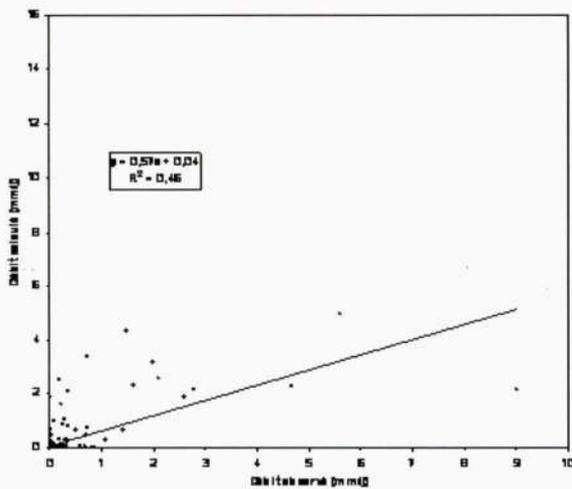


Fig. 2-2 - Comparaison entre les débits observés et calculés (1^{er} cas)
Comparison between observed flows and calculated flow (1st case)

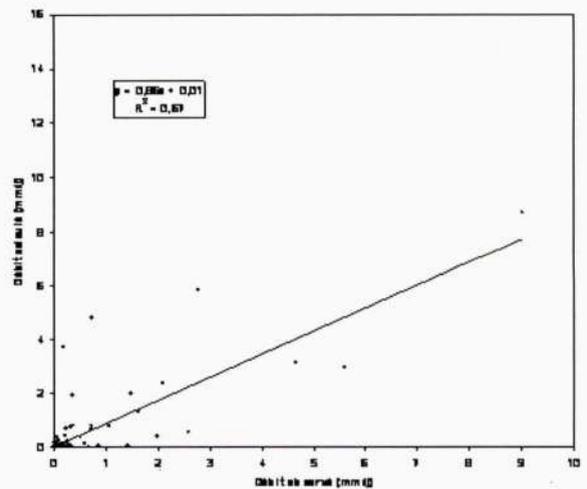


Fig. 2-3 - Comparaison entre les débits observés et calculés (2^{ème} cas)
Comparison between observed flows and calculated flow (2nd case)

PRÉDÉTERMINATION DES CRUES PAR LA MÉTHODE GR4J.
DES BASSINS VERSANTS DU MOYEN CHELLIF.

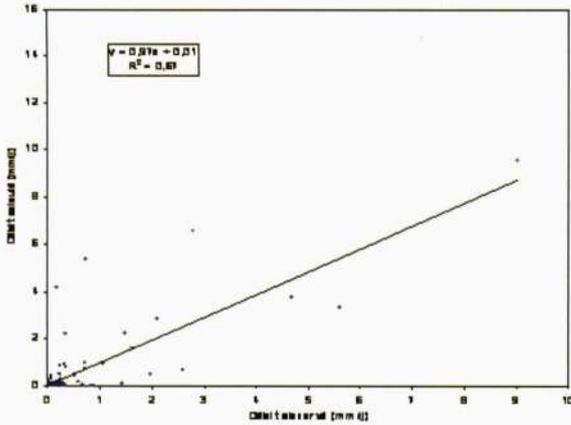


Fig. 2-4 - Comparaison entre les débits observés et calculés (3^{ème} cas)

Comparison between observed flows and calculated flow (3rd case)

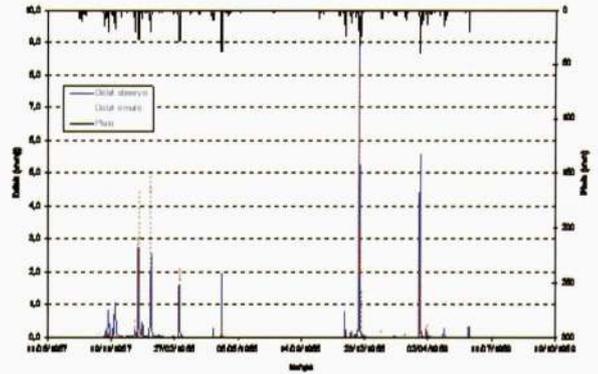


Fig. 2-6 - Débit simulé
Simulated flow

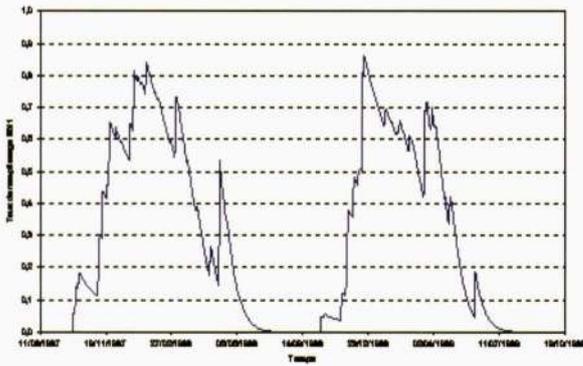


Fig. 2-5 - Taux de remplissage du réservoir de production

Filling rate of the production tank

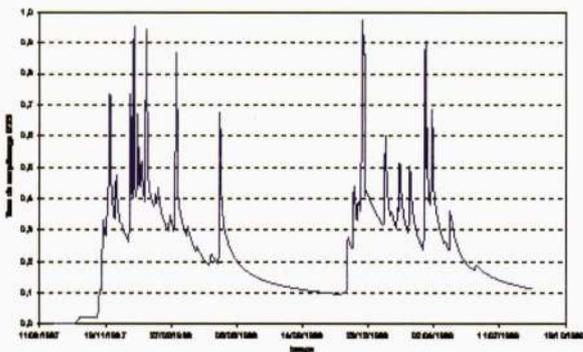


Fig. 2-6 - Taux de remplissage du réservoir de routage

Filling rate of the routing tank

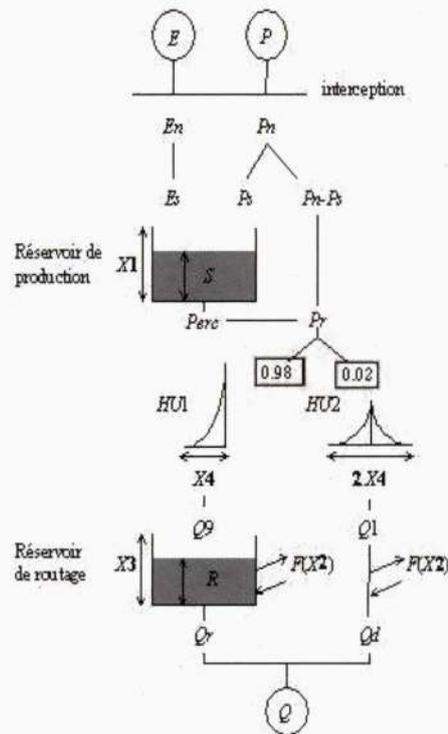


Fig. 2-8 - Structure modifiée du modèle GR4j
Modified structure of the GR4j model