

Chapitre 3

Étude du modèle GR3 à pas de temps fin

Résumé: Dans ce chapitre on présente le travail d'étude du modèle GR3 à un pas de temps proche de l'heure. On analyse tout d'abord la structure du modèle et la méthode d'optimisation utilisée dans le modèle. L'étude opérationnelle a été effectuée respectivement sur les données continues de 4 ans et sur les échantillons de crues individualisés.

NOTA: Ce chapitre concerne la version 1989 du modèle GR3, seule disponible au début de la thèse quand cette étape de validation a été abordée.

3.1 GÉNÉRALITÉS

Aucun modèle ne s'adapte parfaitement à la réalité. Un modèle hydrologique est quasiment un produit expérimental. Le modèle GR3 (Edijatno et Michel, 1989) l'est aussi et est établi et validé au niveau journalier. Pour commencer, une tâche à résoudre est donc l'adaptation de la version 1989 du modèle GR3 à un pas de temps de l'ordre de l'heure qui est généralement nécessaire en matière de prévision de crue. Il ne sera pas possible d'établir une version horaire ayant les mêmes garanties que sa version journalière car cela représenterait un travail préliminaire considérable. On se contentera de vérifier si le modèle est acceptable, et dans le cas d'une inadaptation flagrante on proposera une solution provisoire, dans le seul but d'avoir un modèle acceptable sur lequel on puisse conduire une réflexion sur les problèmes spécifiques à son utilisation en prévision de crue. Cela est le but principal de travail présenté dans ce chapitre.

Il est noté qu'un modèle proche du modèle GR3, le modèle GR2 (Loumagne et al., 1988) a déjà été utilisé au pas de temps d'un dixième de jour pour tester l'intérêt de mesures ponctuelles d'humidité des sols. GR2 a fait également l'objet d'une adaptation pour en faire un modèle continu, afin d'obtenir un modèle affranchi de tout pas de temps (Leviandier, 1988). Un test de ce modèle continu a été réalisée en marge de la comparaison inter-modèles entreprise par l'O.M.M. (Askew, 1989). Ces deux tentatives laissent à penser que le modèle GR3 présente probablement une structure assez générale pour supporter le changement drastique de pas de temps qui consiste à passer de 24 à 1 heure.

Costanza (1989) a indiqué que l'essentiel de la validation d'un modèle

hydrologique consiste à savoir à quel point le modèle marche bien (ou mal) selon un certain nombre de conditions et de critères. En pratique, il n'existe pas une procédure universellement agréée pour mesurer le niveau d'adaptation d'un modèle de simulation à la réalité. Thomman (1982) a suggéré trois sortes de validations d'un modèle de qualité des eaux: 1) validation technique, pour savoir si le modèle est solide scientifiquement; 2) validation opérationnelle, pour savoir si le modèle peut donner des calculs corrects et 3) validation dynamique, pour savoir si le modèle peut être transféré aux régions autres que celle où le modèle a été développé. En ce qui concerne les modèles hydrologiques, Klemes (1986) a suggéré de valider un modèle hydrologique pour un but opérationnel, sur différentes régions et avec la technique du double échantillon (calage-contrôle).

Le travail d'étude du modèle GR3 au pas de temps horaire a conduit à l'analyse de la structure du modèle pour reconnaître la robustesse théorique des hypothèses de base de ce modèle. On analyse aussi la méthode d'optimisation propre au modèle GR3. C'est le premier temps de ce travail de validation. Dans un deuxième temps, on examine le fonctionnement du modèle en simulation, sans adaptation. On fait la simulation d'une série continue de 4 années au pas de temps horaire. Puis on valide ce modèle sur un échantillon de contrôle, comportant un certain nombre de crues issues du Réal Collobrier. Cette validation a pour objectif de valider le modèle GR3 par crues et tester ainsi les problèmes propres au fonctionnement "par épisode" très fréquent en matière de prévision de crue. Selon les études antérieures (Loumagne, 1988; Edijatno, 1991), on peut penser que, sur les trois opérateurs principaux de modèle GR3, l'opérateur fondé sur le réservoir d'humidité du sol est le moins susceptible d'être modifié. C'est essentiellement la fonction de transfert qui pourrait se révéler défailante et tout particulièrement la loi de vidange du réservoir de routage. Une étude de simulation doit nous permettre de décider d'une forme acceptable pour la vidange de ce réservoir au niveau horaire. Une étude autour du réservoir eau-gravitaire du modèle GR3 sera présentée à la fin de ce chapitre comme troisième temps de ce travail de validation.

3.2 ANALYSE DE LA STRUCTURE DU MODÈLE GR3

3.2.1 Hypothèses générales du modèle GR3

Des hypothèses pour un modèle conceptuel concernent soit les mécanismes

physiques du phénomène hydrologique soit les présentations mathématiques sur ces mécanismes. Dans le modèle GR3, on peut indiquer 10 hypothèses intrinsèques comme il suit, qui ressortent à la fin de la phase de développement et qui sont:

Hypothèse 1: L'irrégularité des répartitions spatiales de la pluie et de l'évaporation n'est pas prise en compte, seules le sont la pluie moyenne et l'évaporation moyenne.

Hypothèse 2: On accepte une répartition de l'évaporation stationnaire d'une année sur l'autre. De ce fait, les valeurs moyennes interannuelles sont prises pour faire fonctionner le modèle. Cela simplifie la saisie des données d'entrée.

Hypothèse 3: On se contente d'une description globale de l'humidité dans le bassin versant. Ainsi, le modèle possède la caractéristique d'être global.

3.2.2 Hypothèses sur les fonctions de production et de transfert

En ce qui concerne le processus physique pluie-débit, il est divisé en deux parties: l'une statique appelée "production" donne la pluie nette; l'autre dynamique appelée "transfert" répartit temporellement la pluie nette en débits. Le modèle comprend deux composants: un réservoir-sol pour la production et un réservoir eau-gravitaire plus un hydrogramme unitaire pour le transfert.

Hypothèse 4: La production de la pluie nette est liée à l'humidité du sol et de l'évaporation moyenne interannuelle.

Hypothèse 5: L'évaporation du bassin versant est la seule perte en eau et elle est liée à l'humidité du sol. (Cette hypothèse disparaît dans le modèle GR4).

Hypothèse 6: Le rendement de la pluie nette (R_p) est croissant avec le niveau de la saturation du sol (S): $\frac{\partial R_p}{\partial S} > 0$.

Hypothèse 7: Le rendement de l'évaporation effective (R_e) est aussi croissant en fonction du niveau de la saturation du sol: $\frac{\partial R_e}{\partial S} > 0$.

Hypothèse 8: Les deux courbes de rendement $R_p(S)$ et $R_e(S)$ sont symétriques par rapport au $(\frac{S}{2A}, \frac{1}{2})$ avec A étant le niveau maximal du réservoir-sol (voir pour plus de détails Edijatno et Michel, 1989).

Le transfert se compose de deux parties successives correspondant respectivement à la montée et la descente d'une crue, ce qui est une caractéristique importante de ce modèle. On voit que l'hydrogramme unitaire du modèle GR3 exprimé par la figure 3-1 est une partie de courbe croissante parabolique concave sur la partie positive de l'axe des temps. Elle ne suit pas la forme traditionnelle de l'hydrogramme unitaire qui présente souvent une forme de courbe en cloche. On peut dire que ce n'est pas une courbe complète et, en fait, elle vise principalement la montée de crue. En revanche, la tâche de simuler la descente de crue est faite par un réservoir non linéaire, le réservoir eau-gravitaire. Ces deux opérateurs réalisent ensemble la mission du transfert des pluies en débits.

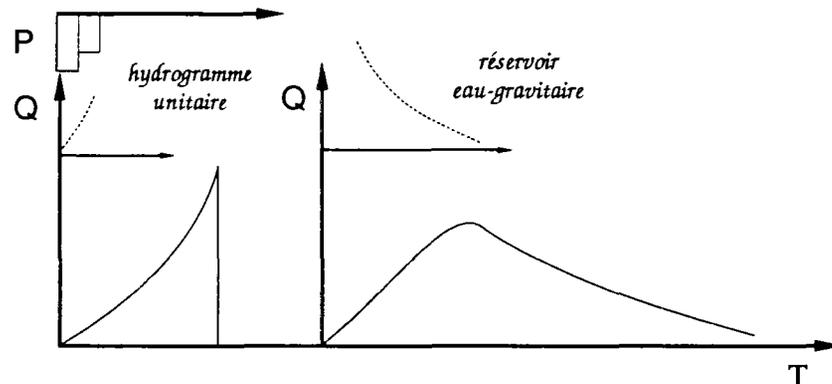


Figure 3-1 L'hydrogramme unitaire du GR3

Les hypothèses pour le transfert sont:

Hypothèse 9: La montée de crue est traitée indépendamment de la décrue et dépend d'une fonction monotone et concave;

Hypothèse 10: La descente de crue est conditionnée par la vidange d'un réservoir non-linéaire.

3.2.3 Considérations sur le modèle GR3

La fonction de production du modèle GR3 n'est pas exactement hortonienne. Cela est impliqué par l'hypothèse utilisée pour la production de pluie efficace dans l'hypothèse 6. Ces formules montrent que la production de pluie efficace

est une fonction de la quantité d'humidité du sol (S) et de l'intensité moyenne de la pluie. C'est justement la conception de la fonction de production d'écoulement superficiel par saturation qui est déterminée par le stock d'humidité. Ainsi, le principe utilisé dans le modèle GR3 n'est pas de celui de Horton mais plutôt celui de Dunne (1978) de l'hydrologie de versants. Par conséquent, on peut supposer que ce modèle est applicable pour les régions humides ou semi-humides.

La fonction de transfert utilisée dans ce modèle est assez empirique: un hydrogramme unitaire suivi d'un réservoir non-linéaire. On peut y trouver une ombre de l'idée du modèle Zoch (1934). Pourquoi sépare-t-on le transfert en deux parties? Imaginons des différences de formation entre la montée et la descente de crue. La montée de crue est fortement influencée par les conditions antérieures du sol et les conditions climatiques dans le bassin versant. Ces conditions ont une grande variabilité. En revanche, la descente de crue est relativement unique, parce qu'elle dépend principalement de la capacité d'évacuation du bassin versant. Dans ces conditions, que la montée et la descente soient simulées relativement séparément n'est pas une mauvaise idée.

On a noté que dans ce modèle la propagation de l'écoulement à surface libre n'est pas prise en compte isolément et que dans les 114 bassins versants utilisés pour développer ce modèle (Edijatno, 1991) il manque un nombre suffisant de grands bassins car seulement 2 bassins ont des superficies supérieures à 3000 km², 4 bassins à 2000 km². Il faut probablement tester son applicabilité à de très grands bassins.

En particulier, la caractéristique globale implique fortement une utilisation des pluies ayant un schéma de répartition spatiale peu variable.

On peut caractériser le modèle GR3 comme étant un modèle conceptuel, global, stationnaire, déterministe, non-linéaire et fonctionnant en continu.

3.3 ANALYSE DE LA MÉTHODE DE CALAGE DU MODÈLE GR3

3.3.1 Paramètres du modèle GR3

Les paramètres des modèles conceptuels hydrologiques peuvent être divisés généralement en deux types importants: les paramètres à fixer a priori et les

paramètres à optimiser. Le premier groupe rassemble ceux qui font partie de l'architecture du modèle. On peut les voir comme des constantes. Par contre, Les paramètres à optimiser sont ceux qui varient avec chaque bassin versant.

Le modèle GR3 a quatre coefficients fixes: 1) coefficient de la correction systématique de pluies égale à 1.05 pour tenir compte d'un défaut systématique de captation des pluviomètres; 2) coefficient d'écoulement direct égale à 0.1; 3) exposant de la loi de vidange du réservoir eau-gravitaire, β , est fixé à 2 et 4) exposant de la loi de l'hydrogramme unitaire égal à 2.

Il y a trois paramètres à optimiser dans le modèle GR3, qui sont: A = niveau maximal du réservoir-sol; B = niveau maximal à 1 jour du réservoir eau-gravitaire et C = nombre de pas de temps de l'hydrogramme unitaire. En pratique et surtout pour une démarche par épisode, on doit tenir compte de S_0 correspondant à l'état initial du réservoir-sol en début d'épisode.

3.3.2 Méthode d'optimisation et fonction objectif

Selon l'état actuel de la modélisation pluie-débit conceptuelle, Gupta et Sorooshian (1985) ont indiqué que la limite de la performance des modèles pluie-débit conceptuels n'est pas l'incapacité à développer des représentations complexes et sophistiquées pour les processus hydrologiques, mais l'inadéquation des méthodes d'optimisation utilisées pour l'estimation automatique des paramètres des modèles. L'optimisation des paramètres du modèle GR3 se base sur une recherche directe. Son principe est exposé ci-après dans le cas d'un seul paramètre:

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

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

$$\begin{cases} x_1^{(i+1)} = x^{(i)} - \Delta x_i \\ x_2^{(i+1)} = x^{(i)} + \Delta x_i \\ F^{(i+1)} = \text{Min}(F_1^{(i+1)}, F_2^{(i+1)}) \end{cases} \quad (3-1)$$

si $F^{(i+1)} < F^{(i)}$, on prend $x^{(i+1)} = x_j^{(i+1)}$; j correspondant à $\text{Min}(F_j, j=1,2)$, le pas d'auscultation peut également varier: Δx est doublé si l'on a obtenu 2 succès consécutifs (un succès correspond à l'obtention d'une nouvelle valeur pour le paramètre au cours d'une exploration avec Δx). Si $F^{(i+1)} \geq F^{(i)}$ le prochain pas de recherche sera diminué: $\Delta x_{i+1} = 0.5 \Delta x_i$, la condition de convergence porte sur Δx et non sur la fonction objectif: soit $\Delta x_n \leq \epsilon$ soit $n \geq N$ (ϵ = valeur minimale pour Δx ; N = nombre maximal d'essais pour l'optimisation).

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

$$F = \sum_{i=1}^m [q(i) - q_s(i)]^2 \quad (3-2)$$

où $q(i)$ et $q_s(i)$ sont respectivement le débit mesuré et le débit simulé à l'instant i , et m est le nombre total de pas de temps des données utilisées.

La méthode précédente est facilement étendue au cas de plusieurs paramètres. Soit NP le nombre de paramètres à optimiser. Au pas $i+1$, la recherche se fait successivement pour les NP paramètres. Si $F^{(i+1)} < F^{(i)}$ est satisfait au moins une fois pendant la recherche sur les NP paramètres, Δx n'est pas modifié. Si le succès est obtenu $2n$ fois de suite, on double Δx . Si au contraire on n'obtient aucune amélioration pour F , on divise Δx par 2. Si dans le processus Δx dépasse une valeur maximale choisie, on revient au plus faible Δx antérieur. Toutes les N itérations on peut décider d'arrêter la méthode. En pratique, on utilise les valeurs: $\Delta x_0 = 0.32$; $\epsilon = \text{Min}(\Delta x) = 0.01$; $\text{Max}(\Delta x) = 1.28$ et $N = 20 * NP$. Rappelons qu'en utilisant cette méthode d'optimisation, on transforme tous les paramètres à optimiser (généralement par la fonction logarithme).

3.3.3 Considérations sur la méthode d'optimisation utilisée

La méthode décrite précédemment est simple. Mais, son utilisation dans le cas de modèle GR3 journalier a montré son efficacité (Edijatno, 1991). C'est la raison pour laquelle on l'a utilisée dans cette étude. Nous pouvons faire les commentaires suivants:

- 1) Le pas de recherche sur chaque axe de paramètre est d'une même

longueur. Cela exige que les différents paramètres aient des effets similaires sur les sorties du modèle. Pour cela, les paramètres du modèle GR3 sont tous transformés par la fonction logarithme. Ce point semble nécessiter une étude confirmative.

2) Les valeurs de départ des paramètres à optimiser jouent un rôle important pendant l'optimisation parce que, avec une telle méthode d'optimisation, un optimum partiel ne peut pas être évité à coup sûr, bien que l'on n'ait pas été confronté à ce phénomène lors de l'utilisation du modèle au pas de temps journalier.

3.4 VALIDATION SUR LES DONNÉES CONTINUES

3.4.1 Critères d'évaluation

Avant de passer aux résultats nous allons présenter tout d'abord les critères utilisés dans cette partie de l'étude. Pour évaluer plus complètement la qualité du calage, on peut trouver un grand nombre de critères dans la littérature (Nash et Sutcliffe, 1970; Aitken, 1973; W.M.O., 1975; Green et Stephenson, 1986 et Martinec et Rango, 1989). On a retenu cinq critères d'évaluation.

Critère de Nash et Sutcliffe (NS): Nash et Sutcliffe (1970) ont proposé le critère non-dimensionnel suivant:

$$NS = \frac{N_0^2 - N^2}{N_0^2} \quad (3-3)$$

où $N^2 = \sum_{i=1}^n [q(i) - q_s(i)]^2$; $N_0^2 = \sum_{i=1}^n [q(i) - \bar{q}]^2$; $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q(i)$, q et q_s sont

respectivement les débits mesuré et simulé. Ils ont nommé le terme N^2 "l'indice de désaccord" et N_0^2 "la variance initiale". Ce coefficient a obtenu un large consensus et semble un choix raisonnable pour la mesure non-dimensionnelle du calage d'un modèle. Un avantage évident de ce coefficient est sa simplicité, sa valeur augmentant vers l'unité lorsque le calage s'améliore (Green et Stephenson, 1986). Il a été utilisé exclusivement pour juger un modèle fonctionnant par épisodes.

Erreur relative de Bilan (EB)

$$EB = \frac{\sum_{i=1}^n q(i) - \sum_{i=1}^n q_s(i)}{\sum_{i=1}^n q(i)} \quad (3-4)$$

Rapport des Durées (RD) où $q > 0.5 q_{\max}$

$$RD = \frac{D_s}{D} \quad (3-5)$$

où D_s et D sont respectivement les nombres de débits simulés et de débits mesurés qui sont plus grands que la moitié du débit maximal, selon le cas observé ou simulé, pendant la période donnée.

Erreur relative sur la pointe de la crue (EP)

$$EP = \frac{q_p - q_{sp}}{q_p} \quad (3-6)$$

où q_p et q_{sp} sont respectivement les valeurs de la pointe mesurée et de la pointe simulée, pendant la période donnée.

Erreur absolue du décalage de la pointe de crue (ED)

$$ED = t_p - t_{sp} \quad (3-7)$$

où t_p et t_{sp} sont respectivement les instants où la pointe de crue mesurée et celle simulée se produisent.

Critère T est utilisé par Edijatno et Michel (1989a) pour évaluer les chroniques journalières simulées.

$$T = \left(1 - \frac{U}{V}\right) \quad (3-8)$$

où

$$U = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [q(i) - q_s(i)]^2} \quad (3-9)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [p^2(i)]} \quad (3-10)$$

$p(i)$ est la pluie mesurée au pas de temps i . C'est un critère évoluant dans le même sens que NS qui ne présente pas d'intérêt additionnel par rapport à ce dernier.

3.4.2 Calage du modèle GR3 sur une chronique continue de quatre années

3.4.2.1 Résultats sur les deux bassins étudiés

Naturellement, le premier essai de cette étude concerne l'utilisation du modèle GR3 sans aucun changement. On a adopté ce modèle tel quel pour traiter des données horaires dans deux bassins versants: Réal Collobrier et Orgeval (cf. §2.3).

Dans le bassin versant du Réal Collobrier, on a pris les données de la période 1969 à 1972 pour le calage. Dans l'Orgeval, on a utilisé les 4 ans de données de 1974 à 1977. Ces deux séries de données ont permis un calage et le critère T s'élève respectivement à 80.2% et à 94.6%. Les résultats sont montrés dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1 Résultats du calage sur 4 ans

nom de bassin	période	T(%)	lnA	lnB	ln(C-0.5)
Réal Collobrier	1969-1972	80.2	5.95	7.05	-3.42
Orgeval	1974-1977	94.6	5.82	6.99	2.01

Selon ces premiers essais, on voit que les valeurs du critère sont assez proches de celles obtenues lors de l'utilisation du modèle journalier, respectivement 80 et 96% pour 3 ou 5 ans de données (Edijatno et Michel, 1989a). Les simulations représentent assez bien les débits mesurés si l'on en juge par les graphiques montrés à l'ANNEXE-I. Bien entendu, les résultats issus de 4 ans de données ne suffisent pas pour émettre une conclusion générale. Mais, on peut dire que le modèle GR3 est probablement acceptable pour la simulation à un pas de temps de l'ordre de l'heure.

En complément, on a utilisé les critères mentionnés dans le §3.4.1, donnés par les équations 3-3, 3-4, 3-5 et 3-6. Ces résultats peuvent être trouvés dans le tableau 3-2. Dans ce qui suit on gardera le critère NS plutôt que le critère T, du fait de son usage très répandu.

Tableau 3-2 Valeurs des critères d'appréciation sur le calage de GR3 (4 ans)

nom de bassin	période	NS(%)	EB(%)	EP(%)	RD(%)
Réal Collobrier	1969 - 1972	82.7	-8.8	77.8	120.7
Orgeval	1974 - 1977	70.2	-20.4	77.8	29.2

On remarque que le modèle GR3 rencontre un succès variable avec le bassin versant considéré. Cependant on doit noter que les caractéristiques hydrologiques de ces deux bassins versants sont assez différentes. Dans le cas du Réal Collobrier, les crues sont toujours abruptes et symétriques, le bassin réagit à la façon typique d'un bassin en région sèche: possibilité de non-réponse après une grande pluie. On pense que l'étude de ce bassin sera probablement plus difficile que celle de l'Orgeval.

3.4.2.2 Variabilité des paramètres d'une année à l'autre

On peut se poser la question de la stabilité des paramètres en fonction de la période utilisée pour leur calage. Pour ce faire, on a calé le modèle sur chacune des quatre années de la période utilisée précédemment. Les résultats du calage sont montrés dans les tableaux 3-3 et 3-4 respectivement pour le Réal Collobrier et l'Orgeval. Les dessins (un par mois) figurent en ANNEXE-II.

Tableau 3-3 Résultats du calage de GR3 sur le Réal Collobrier année par année

	NS (%)	EB(%)	EP (%)	RD (%)	lnA	lnB	ln(C-0.5)
1969	87.8	-9.0	72.7	90.2	5.64	7.92	-0.90
1970	81.9	-2.1	70.6	75.0	6.09	7.21	0.39
1971	84.0	4.9	64.0	62.5	6.22	7.06	0.35
1972	86.3	3.4	93.2	117.2	5.82	6.75	-8.98
moyenne	85.0	-0.7	75.1	86.2	5.93	7.24	-3.09
écart-type	2.2	5.5	10.9	20.4	0.23	0.43	3.90
calage global	82.7	-8.8	77.8	120.7	5.95	7.05	-3.42

Tableau 3-4 Résultats du calage de GR3 sur l'Orgeval année par année

	NS (%)	EB(%)	EP (%)	RD (%)	lnA	lnB	ln(C-0.5)
1974	74.0	-10.3	90.2	72.4	5.78	6.90	2.03
1975	70.3	-19.1	76.3	62.2	5.61	7.29	2.01
1976	68.5	-11.4	86.0	74.1	6.25	5.97	-3.06
1977	67.0	-46.0	69.7	52.1	5.55	6.87	2.02
moyenne	70.0	-21.7	80.6	65.2	5.80	6.76	0.75
écart-type	2.6	14.4	8.0	8.8	0.27	0.48	2.20
calage global	70.2	-20.4	77.8	29.2	5.82	6.99	2.01

D'après ces deux tableaux, on constate les faits suivants:

- 1) Il existe des différences assez importantes entre les valeurs des paramètres des différentes années du même bassin versant.
- 2) La valeur moyenne des NS issus du calage année par année est meilleure que celle issue du calage global sur les 4 ans. C'est normal puisque l'on

s'adapte mieux au régime de la rivière en disposant d'une plus grande souplesse (12 paramètres au lieu de 3).

3) La moyenne des paramètres $\ln A$ calés annuellement est proche de la valeur issue du calage sur les 4 ans ensemble.

4) Les valeurs annuelles de $\ln B$ et de $\ln C$ sont très différentes.

5) La simulation des pointes de crue, la simulation des volumes de crue et des durées à mi-crue donnent généralement des valeurs inférieures aux valeurs observées.

Ce qui est sans doute le plus surprenant est la forte variabilité des paramètres selon l'année de calage. On notera cependant que C est plus variable que B lui-même plus variable que A par rapport à leur moyenne. On peut avoir deux interprétations de ce phénomène de forte variabilité:

a) Le bassin versant n'est pas dans un état stationnaire et il évolue au cours du temps en fonction des cultures et du climat. Ainsi, une année plutôt sèche transforme le bassin versant d'une façon différente que l'aurait fait une année plutôt humide.

b) Du fait du caractère extrêmement sommaire du modèle GR3, chaque paramètre et la fonction où il figure recouvre toute une gamme de phénomènes qui sont activés différemment d'une année à l'autre. Un paramètre se calerait alors selon la valeur qui rend le mieux compte des phénomènes particuliers qui se sont produits une année donnée.

Par exemple, une année peu pluvieuse aura une grande partie de l'année des débits correspondant à des décrues lentes, qui seraient moins observables si l'année avait été plus riche en pluies. Le paramètre B se calerait alors pour mieux respecter les longues décrues alors que dans l'autre cas il correspondrait à une meilleure description des débits de décrue.

Selon que l'on choisit implicitement l'une ou l'autre de ces deux hypothèses la conception que l'on a de l'utilisation du modèle et de l'interprétation des erreurs va différer considérablement.

Compte tenu de l'importance de ce problème on y reviendra lors de l'étude du fonctionnement par épisodes.

3.5 ÉTUDE SUR DES ÉCHANTILLONS DE CONTRÔLE

Le modèle GR3 sera testé ici sur deux échantillons divisés issus du bassin versant de Réal Collobrier. Comme déjà précisé dans §2.3.2, l'échantillon-I contient 26 crues et l'échantillon-II contient 18 crues. Le test sur ces deux échantillons comporte trois étapes: 1) caler les paramètres du modèle GR3 sur l'échantillon-I et contrôler le calage sur l'échantillon-II; 2) inversement, caler les paramètres du modèle GR3 sur l'échantillon-II et contrôler le calage sur l'échantillon-I et 3) comparer les résultats des étapes précédentes. Avant de commencer ces tests, on évoque les problèmes liés au fonctionnement du modèle GR3 crue par crue.

3.5.1 Traitement des valeurs initiales

En général, le problème des valeurs initiales se traite de deux façons possibles:

Recours à une période de mise en route: on utilise une période de données avant la période de prévision, le modèle devra être démarré au début de cette période de mise en route afin d'arriver à un état opérationnel. Cette façon de procéder est raisonnable puisque les valeurs initiales dépendent des événements antérieurs de plus en plus faiblement au fur et à mesure que ces derniers s'éloignent dans le passé. Mais, un problème assez délicat est de décider quelle devrait être la durée de la période de mise en route, elle même probablement variable selon les périodes de l'année. Il faut noter que les données nécessaires à cette période de mise en route ne concernent que les données d'entrée du système et non les sorties (débits) puisque le calage ultérieur ne tiendrait pas compte des éventuelles erreurs de simulation produites pendant cette période.

Optimisation des conditions initiales du modèle: Cette optimisation est effectuée avec les informations présentes. Les techniques possibles sont les suivantes: 1) utilisation de relations entre les données initiales et des paramètres disponibles au début de la simulation; 2) addition de paramètres: les valeurs initiales sont traitées comme des paramètres du modèle et 3) choix de conditions initiales vraisemblables en fonction d'informations statistiques (liaison entre l'état de certains réservoirs et la date du début de l'épisode).

En vue de démarrer le fonctionnement d'un modèle, on doit fournir plusieurs données initiales qui sont soit des scalaires ou soit des vecteurs. Dans le modèle GR3, trois sortes des grandeurs doivent être initialisées: 1) R_0 = niveau initial du réservoir eau-gravitaire. Heureusement on dispose d'une relation entre Q et R représentés par l'équation 2-7 que l'on peut inverser pour estimer R_0 en fonction du débit initial Q_0 :

$$R_0 = \frac{1}{2} \left(Q_0 + \sqrt{Q_0^2 + 4BQ_0} \right) \quad (3-11)$$

2) $DP_0(.)$ = vecteur des pluies nettes antérieures. Il est généralement supposé nul. 3) S_0 = niveau initial du réservoir-sol. On peut soit en faire un nouveau paramètre soit le fixer statistiquement en fonction de la date de début de l'épisode. Dans ce qui suit, nous traiterons S_0 comme un quatrième paramètre, seule solution viable quand on fait fonctionner le modèle par épisodes.

3.5.2 Modèle GR3 pour un fonctionnement par épisode

Comme on l'a dit précédemment, le fonctionnement par crue permet de négliger la variable évaporation ce qui conduit à une légère simplification du modèle dont l'architecture apparaît en figure 3-2.

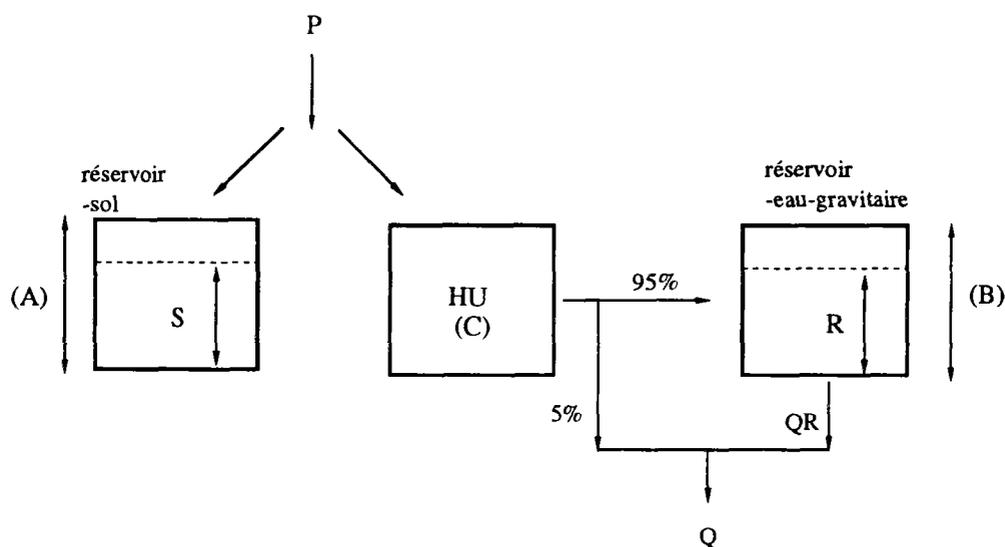


Figure 3-2 Architecture de modèle GR3 pour un fonctionnement par épisode

Nous avons calé le modèle sur les données de crues du Réal Collobrier, en mode "simulation". Nous avons utilisé pour cela un échantillon comportant un certain nombre d'épisodes de crue pour le calage. On recherche le jeu

optimal de paramètres A, B et C commun à ces crues. Cependant, pour chacune des crues, il faut optimiser le niveau initial du réservoir S, ce qui correspond à une étape d'optimisation à l'intérieur de l'étape générale comme l'indique la figure 3-3.

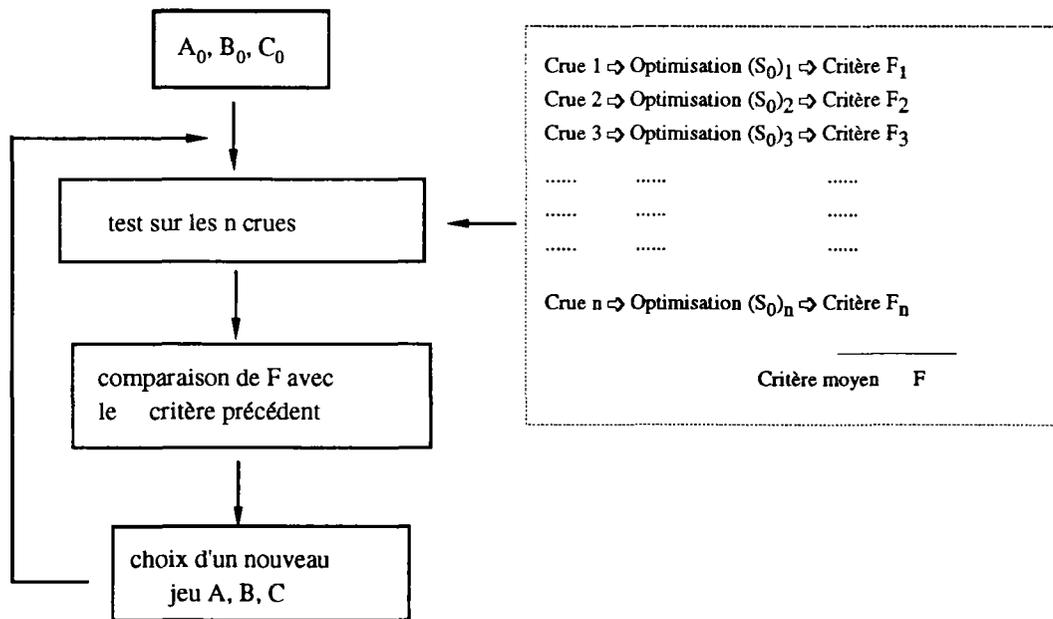


Figure 3-3 Optimisation des paramètres de GR3H sur un ensemble de crues

3.5.3 Calage sur l'échantillon-I et contrôle sur l'échantillon-II

A l'issue du calage sur l'échantillon-I, comprenant 26 épisodes du bassin versant du Réal Collobrier (cf. §2.3.2), on a trouvé les paramètres: $\ln A = 5.00$; $\ln B = 7.15$; $\ln(C-0.5) = 1.13$. Les 26 épisodes sont montrés dans le tableau 3-5 et les dessins de simulation apparaissent dans l'ANNEXE-III.

Tableau 3-5 Calage sur l'échantillon-I

ordre	codage	NS(%)	EB (%)	RD(%)	EP(%)	ED (pdt)
1	6601	68.5	-7.0	75.0	67.6	-2.0
2	6602	85.3	-0.9	80.0	78.4	2.0
3	6906	89.7	0.8	87.9	86.0	-2.0
4	6907	74.7	4.6	108.3	91.0	-2.0
5	6908	85.3	8.1	87.5	96.8	-6.0
6	6909	89.5	-11.6	109.1	78.6	-4.0
7	7011	85.0	-5.2	153.3	77.1	-1.0
8	7112	80.5	2.9	76.1	81.5	3.0
9	7216	85.3	0.2	77.8	89.9	1.0
10	7318	89.8	-8.0	111.1	69.0	0.0
11	7319	86.9	1.5	125.0	78.8	1.0
12	7320	61.3	-18.4	108.3	82.8	0.0
13	7422	87.2	-3.7	87.5	81.6	1.0
14	7426	41.5	-10.6	0.0	40.9	-1.0
15	7527	83.5	-13.9	195.5	91.1	-2.0
16	7630	92.5	-3.6	110.0	78.6	-2.0
17	7734	93.5	-6.5	108.3	96.3	1.0
18	7836	84.3	6.1	95.7	105.0	9.0
19	7837	90.7	0.4	91.7	98.4	-1.0
20	7938	96.5	1.3	95.1	87.3	1.0
21	8040	63.3	9.7	87.2	100.9	3.0
22	8041	12.3	-64.6	266.7	83.2	-7.0
23	8142	89.8	-10.2	133.3	83.8	1.0
24	8343	60.4	-14.1	110.5	67.8	-9.0
25	8344	58.6	-11.5	125.0	66.9	-2.0
26	8345	88.7	-9.7	111.8	88.0	0.0

Les critères présentés précédemment sont évalués épisode par épisode dans le tableau 3-5. On remarque tout d'abord que les crues 7426 et 8041 sont très mal simulées, la première est une crue assez particulière, abrupte et symétrique. Il apparaît deux problèmes systématiques: la pointe de crue calculée est toujours inférieure à la pointe réelle et la représentation de la décrue est défectueuse. Les simulations des petites crues sont moins bonnes que celles des grandes crues. Pour quelques rares crues la simulation est très mauvaise. Sur les crues multiples, on obtient des résultats satisfaisants.

Après le calage sur l'échantillon-I, une validation est effectuée sur l'échantillon-II comportant 18 crues. On prend les paramètres calés précédemment, c'est-à-dire $\ln A=5.00$, $\ln B=7.15$ et $\ln(C-0.5)=1.13$. On examine les différences entre la simulation et la validation. Bien entendu, les mêmes critères que ceux adoptés pour le calage ont été appliqués. Les résultats sont montrés dans le tableau 3-6 et les dessins sont reportés dans l'ANNEXE-III.

Tableau 3-6 Contrôle sur l'échantillon-II d'après le calage sur l'échantillon-I

ordre	codage	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (pdt)
1	6804	34.9	-27.3	50.0	54.2	0.0
2	7010	85.4	-2.0	107.0	82.4	0.0
3	7215	78.7	17.0	68.4	77.4	-1.0
4	7423	-62.2	12.4	107.7	63.7	-7.0
5	7632	88.9	9.6	77.5	74.4	-7.0
6	7835	50.6	27.3	25.8	61.9	0.0
7	7113	94.4	-3.8	93.5	83.4	-1.0
8	7423	85.9	13.2	88.2	94.5	0.0
9	7424	90.4	3.2	76.0	104.1	0.0
10	7631	92.8	0.1	100.0	103.5	-8.0
11	7449	95.4	-1.8	100.0	96.4	-1.0
12	7450	61.5	31.6	0.0	49.8	-1.0
13	7151	88.3	-6.8	100.0	94.1	3.0
14	7352	87.2	4.5	106.9	91.9	1.0
15	7253	80.0	1.6	83.3	92.1	1.0
16	6954	85.6	3.8	86.2	98.4	-2.0
17	7655	-38.1	9.6	73.4	99.6	3.0
18	7456	86.1	5.2	87.5	99.0	1.0

La crue 7423 est une crue possédant des pluies curieuses (cf. le dessin de cet épisode dans l'ANNEXE-III). La crue 7655 est une crue assez petite qui est également mal simulée. La crue 6804 ressemble à la crue 7426 de l'échantillon-I et elle est aussi mal simulée. Selon l'appréciation visuelle de la crue 7423, la très basse valeur du critère résulte probablement de la mauvaise simulation sur la partie en décrue. Selon ces résultats, on n'a pas trouvé de problèmes nouveaux par rapport à ceux rencontrés dans le calage. Le tableau 3-7 résulte d'une comparaison entre les tableaux 3-5 et 3-6. On y voit que les taux de succès obtenus pour la validation sur l'échantillon-II sont assez proches de ceux pour le calage sur l'échantillon-I.

Tableau 3-7 Pourcentage de crues satisfaisant à un critère minimal (1)

seuils	NS \geq 80%	EBI \leq 10%	RD-1 \leq 15%	EP-II \leq 20%	EDI \leq 2
éch.-I (calage)	69% (18/26)	69% (18/26)	62% (16/26)	62% (16/26)	73% (19/26)
éch.-II (contrôle)	67% (12/18)	67% (12/18)	56% (10/18)	67% (12/18)	72% (13/18)

3.5.4 Calage sur l'échantillon-II et contrôle sur l'échantillon-I

Dans ce paragraphe, on échange les rôles des deux échantillons. Du calage sur l'échantillon-II, on obtient les valeurs des paramètres: $\ln A=4.10$, $\ln B=7.08$ et $\ln(C-0.5)=0.76$. Les résultats des critères figurent dans le tableau 3-8 et les graphiques de simulation sont dans l'ANNEXE-III. On constate que de mauvaises simulations existent sur trois crues 6804, 7423 et 7655.

Tableau 3-8 Calage sur l'échantillon-II

ordre	codage	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (pdt)
1	6804	47.5	-37.1	75.0	61.2	1.0
2	7010	83.0	-4.0	109.3	95.2	0.0
3	7215	80.8	21.0	67.1	78.1	-1.0
4	7423	-63.6	12.0	115.4	62.5	-6.0
5	7632	90.8	10.6	87.5	81.0	1.0
6	7835	48.5	28.4	32.3	63.4	1.0
7	7113	93.2	-2.0	93.5	92.5	-2.0
8	7423	85.7	16.3	86.3	93.8	1.0
9	7424	90.9	5.0	76.0	107.9	1.0
10	7631	87.3	-4.0	106.9	122.0	-7.0
11	7449	93.9	1.0	94.7	95.7	0.0
12	7450	61.7	31.0	14.3	51.4	0.0
13	7151	85.8	-2.6	95.0	91.8	4.0
14	7352	85.2	6.5	100.0	90.5	2.0
15	7253	81.7	6.6	79.2	90.7	2.0
16	6954	79.4	5.3	79.3	97.7	-1.0
17	7655	-61.7	12.6	71.9	98.5	4.0
18	7456	84.5	7.6	87.5	101.1	1.0

Dans le tableau 3-9, on montre les résultats de la validation sur l'échantillon-I en utilisant les valeurs des paramètres calées sur l'échantillon-II. Les dessins correspondants sont dans l'ANNEXE-III. On peut voir que les crues 7011, 8041, 8343 et 8344 présentent de très mauvaises valeurs de NS mais pour la plupart des crues le critère NS peut arriver à des valeurs assez correctes.

Tableau 3-9 Contrôle sur l'échantillon-I d'après du calage sur l'échantillon-II

ordre	codage	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (pdt)
1	6601	72.6	-5.8	75.0	70.6	-2.0
2	6602	89.0	4.2	86.7	82.9	3.0
3	6906	93.0	3.1	81.8	96.9	-1.0
4	6907	84.0	6.0	77.1	101.4	-1.0
5	6908	85.0	10.2	82.5	98.4	-6.0
6	6909	38.2	-68.0	186.4	127.7	-3.0
7	7011	-53.0	-89.1	253.3	158.9	0.0
8	7112	81.5	-0.9	91.3	81.6	-52.0
9	7216	86.6	9.3	81.5	97.4	0.0
10	7318	89.6	-7.9	111.1	69.6	1.0
11	7319	87.6	6.1	116.7	79.2	2.0
12	7320	65.4	-21.3	116.7	87.9	0.0
13	7422	87.3	9.3	91.7	89.8	2.0
14	7426	48.6	-44.3	33.3	65.2	0.0
15	7527	64.7	-31.7	250.0	118.6	-1.0
16	7630	92.3	-3.4	110.0	81.6	-1.0
17	7734	86.7	-3.3	112.5	108.9	2.0
18	7836	80.4	7.5	88.6	105.6	10.0
19	7837	90.3	4.1	87.5	100.2	0.0
20	7938	97.0	1.5	93.4	95.3	1.0
21	8040	57.6	12.3	84.6	100.2	4.0
22	8041	-2667.1	-519.9	400.0	347.0	3.0
23	8142	91.2	-8.7	126.7	87.4	2.0
24	8343	-1.9	-48.4	321.1	94.7	-9.0
25	8344	-252.4	-170.8	425.0	179.3	0.0
26	8345	76.8	-16.0	147.1	104.7	0.0

En utilisant les mêmes seuils que ceux utilisés dans le tableau 3-7, on donne le tableau 3-10 pour une comparaison entre le calage et la validation. Selon ce tableau, on trouve que les taux de succès sont assez proches entre le calage et la validation sauf le taux de RD qui décrit la simulation des pointes de crues.

Tableau 3-10 Pourcentage de crues satisfaisant à un critère minimal (2)

seuils	NS \geq 80%	IEBI \leq 10%	IRD-1 \leq 15%	IEP-1 \leq 20%	IED \leq 2
éch.-II (calage)	67% (12/18)	56% (10/18)	50% (9/18)	67% (12/18)	78% (14/18)
éch.-I (contrôle)	62% (16/26)	58% (15/26)	35% (9/26)	65% (17/26)	69% (18/26)

3.5.5 Analyse comparative

Cette analyse vise en particulier le critère NS. Le tableau 3-11 rassemble les valeurs de NS de l'échantillon-I déjà présentées dans les tableaux 3-5 et 3-9, dans lequel la colonne "calage" donne les valeurs de NS en utilisant les valeurs des paramètres calées sur l'échantillon-I lui-même et la colonne "validation" donne les résultats de NS en utilisant les valeurs des paramètres calées sur l'échantillon-II. On y constate que les deux colonnes de valeurs de NS présentent un accord pour toutes les crues sauf pour les crues 6909, 7011, 8041, 8343 et 8344, les trois dernières ayant de mauvaises valeurs de NS à la fois pour le calage et pour la validation. On a rencontré des optimums secondaires lors du calage puisque dans ce tableau, 12 crues sur 26 ont les valeurs de NS issues de la validation plus élevées que celles issues du calage. Ces crues sont 6601, 6602, 6906, 6907, 7112, 7216, 7319, 7320, 7422, 7426, 7938 et 8142.

Tableau 3-11 Comparaison entre le calage et la validation (échantillon-I)

ordre	codage	Critère de NS (%)	
		calage	validation
1	6601	68.5	72.6
2	6602	85.3	89.0
3	6906	89.7	93.0
4	6907	74.7	84.0
5	6908	85.3	85.0
6	6909	89.5	38.2
7	7011	85.0	-53.0
8	7112	80.5	81.5
9	7216	85.3	86.6
10	7318	89.8	89.6
11	7319	86.9	87.6
12	7320	61.3	65.4
13	7422	87.2	87.3
14	7426	41.5	48.6
15	7527	83.5	64.7
16	7630	92.5	92.3
17	7734	93.5	86.7
18	7836	84.3	80.4
19	7837	90.7	90.3
20	7938	96.5	97.0
21	8040	63.3	57.6
22	8041	12.3	-2667.1
23	8142	89.8	91.2
24	8343	60.4	-1.9
25	8344	58.6	-252.4
26	8345	88.7	76.8

Il en est de même pour l'échantillon-II: on constate, dans le tableau 3-12, un accord entre les deux colonnes de critères NS, la colonne "calage" et la colonne "validation". On remarque également que 10 crues sur 18 possèdent les valeurs de NS issues de la validation supérieures à celles issues du calage. Ces crues sont 7010, 7835, 7113, 7423, 7631, 7449, 7115, 7352, 6954 et 7456.

Tableau 3-12 Comparaison entre le calage et la validation (échantillon-II)

ordre	codage	critère de NS (%)	
		calage	validation
1	6804	47.5	34.9
2	7010	83.0	85.4
3	7215	80.8	78.7
4	7423	-63.6	-62.2
5	7632	90.8	88.9
6	7835	48.5	50.6
7	7113	93.2	94.4
8	7423	85.7	85.9
9	7424	90.9	90.4
10	7631	87.3	92.8
11	7449	93.9	95.4
12	7450	61.7	61.5
13	7151	85.8	88.3
14	7352	85.2	87.2
15	7253	81.7	80.0
16	6954	79.4	85.6
17	7655	-61.7	-38.1
18	7456	84.5	86.1

Cet accord entre le calage et la validation pour le même échantillon est intéressant. Cela montre qu'il n'y a pas de décalage de précision entre le calage et la validation. Une comparaison des pourcentages satisfaisants entre les tableaux 3-7 et 3-10 est résumé dans le tableau 3-13.

Tableau 3-13 Analyse comparative des taux de succès

	critère de NS ($\geq 80\%$)	
	calage	validation
échantillon-I	69% (18/26)	62% (16/26)
échantillon-II	67% (12/18)	67% (12/18)

D'après ce tableau on constate que 1) les précisions globales des deux échantillons sont assez proches et 2) les précisions globales, pour un même échantillon entre le calage et la validation sont assez proches. On peut conclure que le modèle GR3 est assez robuste pour le pas de temps horaire au moins sur les données du Réal Collobrier.

Le fait que les valeurs des paramètres issues des calages des deux échantillons sont différentes ainsi que les valeurs de NS de chaque crue, montre qu'il est nécessaire de faire varier les paramètres crue par crue pour obtenir une bonne simulation.

3.5.6 Considérations sur l'applicabilité à la prévision d'un fonctionnement par épisodes

Il est traditionnel d'aborder le problème de la prévision par épisodes. Ainsi, la dernière comparaison inter-modèles de l'organisation mondiale de la météorologie (Askew, 1989) a porté sur des modèles fonctionnant sur des épisodes isolés.

Les modèles adaptés à des événements isolés sont utilisés en modélisation depuis les débuts de la science hydrologique. Leur premier avantage est d'économiser du temps en collecte des données. On peut considérer en effet que pendant un épisode de crue l'évaporation joue un rôle négligeable et que l'on peut donc omettre cette variable dans le fonctionnement par épisode, ce qui serait bien entendu impossible dans un fonctionnement en continu. Mais, il existe des défauts graves:

- 1) La séparation des crues est arbitraire.
- 2) Le traitement des conditions initiales peut donner une précision factice que l'on n'arrive pas à obtenir en continu parce que, en réalité, les crues ne sont pas indépendantes. Du point de vue de l'application, un large décalage existe entre un modèle de simulation par épisodes et un modèle opérant en continu. On peut craindre qu'un modèle fonctionnant bien en cas de crues séparées perde en précision en application continue sur des périodes continues de crues.
- 3) L'initialisation fait perdre un temps précieux.

Notre compréhension du fonctionnement d'un bassin versant devrait nous conduire à penser que le traitement par épisodes est très dommageable. En effet un bassin versant réagit en fonction de l'état dans lequel il se trouve au moment où une perturbation arrive. Si l'on procède par épisodes, une première partie plus ou moins longue de l'épisode sera gaspillée dans le seul but de retrouver par tâtonnement l'état initial du bassin versant. Ce n'est qu'après avoir tiré parti de ces premières informations que le modèle pourra probablement émettre ses premières prévisions valables. Dans ces conditions, nous considérons que la prévision doit disposer d'une longue série antérieure pour pouvoir fonctionner correctement. Une possibilité éventuelle est de faire fonctionner le modèle à un pas de temps assez grand

hors des périodes de crue et de recourir au pas de temps fin (de l'ordre de l'heure) à l'occasion des crues, lorsqu'une prévision doit être émise.

Cependant, on a encore utilisé ce type de fonctionnement crue par crue d'un modèle dans notre étude pour deux raisons principales: 1) Les problèmes posés par ce fonctionnement par événement méritent d'être étudiés; et 2) Un nombre important de modèles de prévision de crues fonctionnent par épisodes. Dans un but de comparaison, il faut pouvoir faire fonctionner de même un modèle que l'on propose aux utilisateurs potentiels. Ce problème sera discuté d'une façon détaillée dans le chapitre 6.

3.6 ÉTUDE SUR LE RÉSERVOIR EAU-GRAVITAIRE

3.6.1 Passage d'une loi continue à une loi discrète

On a choisi d'utiliser une loi puissance pour la vidange en valeurs instantanées, d'où la relation différentielle entre Q et R (où Q est le débit et R le stock de réservoir):

$$Q = -\frac{dR}{dt} = kR^\beta \quad \beta > 1 \quad (3-12)$$

$$-\frac{dR}{R^\beta} = k dt \quad (3-13)$$

On ne peut pas garder une relation telle que l'équation 3-12 pour des données sur un pas de temps horaire ou journalier, car on pourrait obtenir Q supérieur à R. Pour obtenir une relation valide sur un pas de temps donné, on intègre cette équation différentielle sur l'intervalle $[t_1, t_2]$ correspondant à $[R_1, R_2]$,

$$\int_{R_1}^{R_2} -\frac{dR}{R^\beta} = \int_{t_1}^{t_2} k dt \quad (3-14)$$

d'où,

$$\frac{1}{(\beta-1)R_2^{\beta-1}} - \frac{1}{(\beta-1)R_1^{\beta-1}} = k(t_2-t_1) \quad (3-15)$$

posons $k(\beta-1)(t_2-t_1) = \frac{1}{B^{\beta-1}}$ (B dépend implicitement du pas de temps), on obtient:

$$\frac{1}{R_2^{\beta-1}} - \frac{1}{R_1^{\beta-1}} = \frac{1}{B^{\beta-1}} \quad (3-16)$$

ce qui permet de calculer R_2 à partir de R_1 . Or, avec des valeurs de débit qui sont des lames d'eau sur un intervalle de temps, on a :

$$Q = R_1 - R_2 \quad (3-17)$$

C'est cet ensemble de deux relations qui permet donc de calculer le débit moyen sur un pas de temps donné. On peut également utiliser ces relations pour calculer inversement R_1 et R_2 à partir de Q . C'est ce dont on a besoin pour initialiser le réservoir R . En remplaçant R_1 par $R_2 + Q$ on obtient :

$$\frac{1}{R_2^{\beta-1}} = \frac{1}{(R_2 + Q)^{\beta-1}} + \frac{1}{B^{\beta-1}} \quad (3-18)$$

$$R_2 = \left[\frac{1}{(R_2 + Q)^{\beta-1}} + \frac{1}{B^{\beta-1}} \right]^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (3-19)$$

C'est cette relation qu'il faut utiliser pour calculer le niveau R_2 dans le réservoir eau-gravitaire, après qu'un débit Q ait été observé.

3.6.2 Initialisation du réservoir eau-gravitaire

Dans le cas du modèle GR3, l'initialisation du système se compose de la fixation des niveaux des réservoirs R et S et du vecteur des pluies nettes antérieures générées par l'hydrogramme unitaire. En général, les données disponibles débutent avec les premières pluies ce qui fait que les pluies nettes antérieures peuvent être considérées comme nulles. La totalité du débit initial provient de la vidange du réservoir R qui peut donc être initialisé par inversion de la loi de vidange précédemment établie. Essayons de déterminer R_2 à partir de Q . Dans les premiers essais, on s'est aperçu que l'initialisation de R était un peu délicate (non-convergence de l'algorithme) du fait de la valeur évoluée de l'exposant β . C'est la raison pour laquelle ce problème est traité ci-après de façon détaillée.

posons $r = R_2/B$ et $q = Q/B$, l'équation 3-18 devient :

$$\frac{1}{r^{\beta-1}} = \frac{1}{(r+q)^{\beta-1}} + 1 \quad (3-20)$$

qui peut s'écrire $r = \phi(r)$. Le calcul itératif converge si $\phi'(r) < 1$.

$$\phi'(r) = \frac{1}{\left[1+(r+q)^{\beta-1}\right] \frac{\beta}{\beta-1}} \quad (3-21)$$

Une solution est d'utiliser la méthode de NEWTON combinée avec l'interpolation linéaire avec la fonction $g(r)$. Posons:

$$g(r) = r^{1-\beta} - (r+q)^{1-\beta} - 1 \quad (3-22)$$

$$g'(r) = (1-\beta) \left[r^{-\beta} - (r+q)^{-\beta} \right] \quad (3-23)$$

$$g''(r) = \beta(\beta-1) \left[r^{-(\beta+1)} - (r+q)^{-(\beta+1)} \right] \quad (3-24)$$

La solution en r est entre 0 et 1. On voit les caractéristiques de la fonction g sur le demi-axe positif: elle est définie décroissante, monotone et convexe sur le domaine $(0, +\infty)$. Par ailleurs, on propose deux fonctions auxiliaires

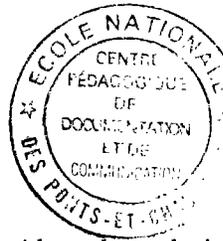
$$f(r) = r^{1-\beta} - q^{1-\beta} - 1 \quad (3-25)$$

$$h(r) = r^{1-\beta} - (1+q)^{1-\beta} - 1 \quad (3-26)$$

On a $f(r) < g(r) < h(r)$ sur le demi-axe positif. Avec ces deux fonctions supplémentaires, on peut obtenir deux zéros r_0 et r'_0 de ces deux fonctions.

$$r_0 = (1+q^{1-\beta})^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (3-27)$$

$$r'_0 = \left[1+(1+q)^{1-\beta}\right]^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (3-28)$$



Il est facile de vérifier que $g(r_0)g(r'_0) < 0$. Alors la solution de $g(r)$ se trouve entre ces deux valeurs. Lorsque $q > 0$, on conduit les calculs de la façon suivante jusqu'à $r_n - r'_n \leq \epsilon$ ($\epsilon =$ valeur de convergence).

$$\begin{aligned} r_1 &= r_0 - \frac{g(r_0)}{g'(r_0)} & r'_1 &= r'_0 - \frac{(r_0 - r'_0)g(r'_0)}{g(r_0) - g(r'_0)} \\ r_2 &= r_1 - \frac{g(r_1)}{g'(r_1)} & r'_2 &= r'_1 - \frac{(r_1 - r'_1)g(r'_1)}{g(r_1) - g(r'_1)} \\ & \dots & & \\ r_n &= r_{n-1} - \frac{g(r_{n-1})}{g'(r_{n-1})} & r'_n &= r'_{n-1} - \frac{(r_{n-1} - r'_{n-1})g(r'_{n-1})}{g(r_{n-1}) - g(r'_{n-1})} \end{aligned} \quad (3-29)$$

avec la solution cherchée appartenant à $[r_n, r'_n], \forall n$. La figure 3-4 nous

montre ce processus.

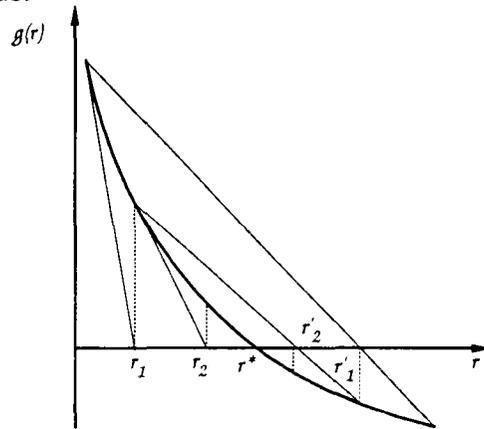


Figure 3-4 Calcul itératif du niveau du réservoir eau-gravitaire avec la méthode de Newton combinée avec l'interpolation linéaire

Le problème étant résolu, on peut initialiser convenablement le système et donc tester plusieurs valeurs de β .

3.6.3 Étude de la loi du réservoir eau-gravitaire β

Une valeur de β égale à 5 avait été établie pour le pas de temps journalier (Edijatno, 1991). Testons ici d'autres valeurs de β . Les résultats pour les différents critères correspondant à une gamme de β sont résumés dans le tableau 3-14. D'après ce tableau, la situation est complexe: la meilleure valeur de NS est obtenue pour de $\beta=4$, $\beta=4.5$ et $\beta=5$; mais $\beta=2.5$ nous donne la meilleure valeur de EB. Quant aux critères RD, EP et ED, $\beta=2.5$, $\beta=6$, $\beta=2.5$ et $\beta=3.5$ sont respectivement les meilleurs. On considère que le critère NS est le plus important parmi ces critères puisque nous l'utilisons pour l'optimisation du modèle. Donc, on retiendra $\beta = 5$ pour nous conformer au choix qui a été validé au pas de temps journalier sur plus de 114 bassins versants (Edijatno, 1991).

Tableau 3-14 Comparaison des effets de différentes valeurs de β

β	NS (%)	EB (%)	RD (%)	EP (%)	ED (%)
1.5	76.9	-5.6	105	79.2	-0.7
2.0	77.9	-6.3	108	82.6	-0.7
2.5	79.5	-4.6*	97.2*	81.7	-0.4*
3.0	79.8	-4.9	95.6	82.1	-0.6
3.5	80.0	-5.2	94.4	82.5	-0.4*
4.0	80.1 *	-5.2	92.9	82.2	-0.5
4.5	80.1 *	-5.4	93.2	83.1	-0.5
5.0	80.1 *	-5.2	91.7	83.7	-0.5
5.5	80.0	-5.0	90.6	83.9	-0.7
6.0	80.0	-5.0	89.6	84.1*	-0.7

* représente la valeur meilleure dans la colonne

3.7 CONCLUSION POUR L'ÉTUDE DU MODÈLE GR3 À PAS DE TEMPS FIN

- 1) Le modèle GR3 journalier peut être utilisé pour un pas de temps proche de l'heure sans changer son architecture. Une version simplifiée (évaporation négligeable) est utilisable en fonctionnement par épisodes.
- 2) La méthode d'optimisation du modèle reste efficace dans le cas d'un pas de temps plus court que le jour.
- 3) Il semble que les paramètres évoluent d'une année à l'autre. Ce problème a été considéré comme très important et nécessite un traitement particulier.
- 4) La qualité de la simulation est assez variable d'une crue à l'autre.