

MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT AU PAS DE TEMPS JOURNALIER PAR LE MODELE GR3J

1. Introduction

Le développement des études sur les systèmes complexes naturels (bassins versants, nappes) ainsi que le développement de l'informatique a provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, vu que ces modèles aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques.

Un formidable effort de développement de modèles mathématiques a été réalisé, et la recherche en hydrologie s'est donc diversifiée en plusieurs axes, qu'on résume en :

La prédétermination : calcule la probabilité pour laquelle des événements se produisent au cours d'une période donnée. (ex : Prédétermination des crues).

La reconstitution : consiste à reproduire telle qu'elle est la série historique par le biais de modèles mathématiques. Dans ce cas, la représentation graphique des données, (qui est un critère de validation indispensable du modèle) doit être aussi meilleure que possible.

La prévision : c'est une estimation également statistique, elle définit comment évoluent les phénomènes dans un très proche avenir. (ex : Prévision des débits).

La simulation : consistent à reproduire par une formulation mathématique des séries synthétiques chronologiques plus ou moins longues à partir d'une série de données historiques [3].

2. Etude de modèles hydrologiques

Dans la littérature un grand nombre de classifications des modèles hydrologiques est disponible, dans le but de simplifier l'analyse des caractéristiques et dégager les champs d'application des modèles, nous proposons la classification suivante :

a/ Les modèles linéaires "boîtes noires" : considèrent un bassin versant comme une boîte noire, en le caractérisant par des paramètres et des fonctions sans grande signification physique [8].
b/ Les modèles pluie-débit : intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. Dans ces

modèles, on essaie de construire des structures empiriques censées reproduire les sorties du système (le débit) à partir des variables d'entrées (la pluie).

c/ Les modèles fondés physiquement : s'appuient sur les progrès récents de l'hydrodynamique et l'écophysologie. Ils font appel à des variables d'état, reliées entre elles en tout point par des relations d'état, des relations dynamiques, et des relations de conservation [1].

2.1 Etude de modèles pluie-débit

La transformation pluie-débit effectuée par un bassin versant résulte d'un ensemble très complexe de processus théoriquement connus, mais dont il est difficile de décrire les conditions aux limites.

Le développement de la modélisation en hydrologie a contribué à réduire la complexité de la relation pluie-débit et a ouvert la voie à plusieurs catégories de modèles capables de reproduire la réponse d'un bassin à l'exutoire.

Les modèles pluie-débit présentent des intérêts pratiques en hydrologie puisqu'ils peuvent être exploités dans :

- L'analyse et la correction des séries hydrométriques observées à partir des séries simulées ;
- L'extension des séries hydrométriques courtes ;
- L'amélioration de la gestion des ressources en eau ;
- La simulation des débits dans des endroits du bassins non-jaugés [3].

La plupart de ces modèles utilisent de nombreux paramètres pour décrire cette transformation. Certains de ces paramètres doivent être estimés sur le terrain à partir d'essais, ce qui constitue une contrainte dans l'application du modèle.

Les modèles pluie-débit peuvent être classés en trois catégories :

Les modèles "boîte noire" transforment l'entrée du système en une réponse du système par une formulation mathématique dépourvue de tout sens physique.

Les modèles de ruissellement transforment la relation pluie-débit par des traitements de séries chronologiques par des méthodes basées sur les fonctions de transfert comme celle de l'hydro-

T. BENKACI
INA Alger
N. DECHEMI
ENP Alger

RÉSUMÉ

L'étude de la relation pluie-débit au pas de temps journalier représente l'un des axes de recherche le plus exploité en hydrologie, du fait de l'importance de la connaissance des débits dans la gestion des ressources en eau, et dans la prévision des risques d'inondations. Pour cela plusieurs modèles ont été développés, pour reproduire le processus complexe pluie-débit. Ces modèles nécessitent généralement un nombre important de paramètres, dont la plupart sont estimés sur le terrain. Le modèle GR3j (modèle conceptuel global à trois paramètres seulement), est capable de simuler les débits d'un bassin versant à partir de deux variables d'entrées, pluie et évapotranspiration, et n'intègre aucun paramètre physique, ce qui constitue l'un des avantages de ce modèle. Son application sur un bassin versant algérien (la Cheffia à Annaba) a donné de bons résultats, sur le plan qualitatif et quantitatif, et a confirmé sa robustesse et sa validité dans le domaine de la modélisation pluie-débit au pas de temps journalier.

MOTS CLÉS

Modèle • pluie-débit • modèle conceptuel • GR3j • calage • Cheffia.

gramme unitaire, ou celui de la DPFT [4].

Les modèles à réservoirs sont les plus développés dans ces modèles, le cycle hydrologique est conceptualisé comme un réservoir qui joue le rôle de tampon emmagasinant la pluie pour la redistribuer par la suite ; ces modèles essaient de donner à chacun des réservoirs un sens physique.

Dans les modèles à réservoirs, la relation pluie-débit est traitée en deux parties : la transformation de la pluie brute en pluie nette (Fonction de production), destinée à s'écouler et la transformation en pluie nette-débit (Fonction de transfert) [3], [11].

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est introduite comme une variable d'entrée, qui dans certains modèles sera réduite en évapotranspiration réelle (ETR).

L'infiltration de l'eau vers les réservoirs inférieurs est souvent estimée par un paramètre soustractif (modèle Topmodel), et les pertes par infiltration peuvent contribuer à l'écoulement (modèle CREC) [10].

La fonction de transfert est représentée soit par un (des) réservoir(s) (modèle Stanford), soit par un hydrogramme unitaire.

Le remplissage et la vidange des réservoirs constituent des caractéristiques déterminantes du bon fonctionnement du modèle. Chaque loi de vidange relative à chaque réservoir est différente de l'autre, et sa formulation permet la différenciation entre chaque composante de l'écoulement décrite par le réservoir qui lui est associé. Dans un réservoir linéaire, la vidange dépend d'un coefficient de tarissement qui lui permet d'être plus ou moins rapide [11].

2.2 Etude des modèles GR

Contrairement aux modèles classiques, les modèles GR sont élaborés à partir d'une architecture simple et efficace, avec un niveau de complexité aussi minimal qu'il soit.

Ces modèles sont constitués de deux réservoirs, le réservoir sol dépendant d'un paramètre A [2], exprimant sa capacité maximale (modèle GR1j), et le réservoir eau gravitaire (réservoir de routage) régi par un paramètre B (modèles GR2j, GR3j, GR4j).

Selon Edijatno (1991) [6], les modèles GR1j et GR2j présentaient un problème de «délaiage», qui sépare l'entrée d'une pluie nette dans le réservoir eau gravitaire et la sortie du débit de la rivière consécutif à cette entrée, ainsi l'introduction d'un troisième paramètre était d'une nécessité absolue (modèle GR3j) [5].

Ceci est réalisée par un hydrogramme unitaire dont la fonction est de simuler un temps d'accès au réservoir eau gravitaire.

Ce troisième paramètre exprime la durée de délaiage entre l'apparition de la pluie brute et l'introduction de la pluie nette dans le réservoir R pour produire le débit Q.

Le modèle GR4j (1994) représente un complément de recherche dans la modélisation conceptuelle. Après analyse du comportement de divers bassins, il a été constaté que les modèles ne prennent pas en considération l'échange inter-bassin, et donc l'introduction d'un quatrième paramètre (D) était nécessaire pour simuler les gains (ou pertes), ce qui constitue une solution pour les bassins intermittents (ou sous-bassins) [9].

2.2.1 Le modèle GR3j* (1998)

C'est la version la plus récente du modèle GR3j, développée par Edijatno, Nascimento, Yang, Makhoul et Michel [7].

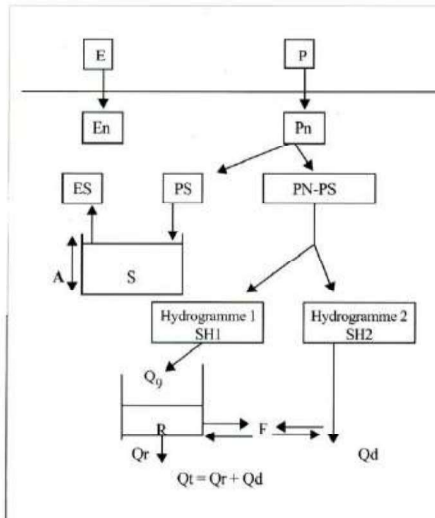
Ce modèle comporte trois réservoirs, le réservoir interception I, le réservoir sol S et le réservoir de routage R (Figure 1).

Les précipitations et les évapotranspirations sont en premier lieu transformées par le réservoir d'interception :

$$\text{Si } P \geq E \Rightarrow P_n = P - E \text{ et } E_n = 0 \quad (1)$$

$$\text{Si } E > P \Rightarrow P_n = 0 \text{ et } E_n = E - P \quad (2)$$

La deuxième opération dans ce modèle, se fait par le réservoir du sol S, avec une capacité maximale A de 330 mm. Ainsi le niveau du réservoir S augmente si les entrées P_s sont positives. De même que son niveau d'humidité diminue lorsque les flux E_s sont positifs.



Ps et Es représentent respectivement les entrées et sorties dans le réservoir S, et sont données par les expressions suivantes :

$$P_s = \frac{P_n(1 - (S/A)^2)}{1 + P_n/A(1 + S/A)} \quad (3)$$

$$E_s = \frac{E_n S/A(2 - (S/A))}{1 + (E_n/A)(2 - S/A)} \quad (4)$$

La différence entre $(P_n - P_s)$, constitue la fraction réelle de la pluie qui va générer des débits, cette fraction se divise en deux :

- Une première quantité qui représente 90% de $(P_n - P_s)$, sera transformée par le premier hydrogramme unitaire dont les fonctions sont :

$$\text{Si } 0 < j < X_3, \text{ on a : } SH1(j) = (j/X_3)^3 \quad (5)$$

$$\text{Si } j > X_3, \text{ on a : } SH1(j) = 1 \quad (6)$$

- La seconde part, soit 10% de $(P_n - P_s)$ transformée par le deuxième hydrogramme unitaire dérivée de la courbe $SH2(j, 2X_3)$, et dépend de la courbe $SH1(j, X_3)$ du paramètre X_3 :

$$\text{Si } 0 < j \leq X_3, \text{ on a : } SH2(j) = 1/2(j/X_3)^3 \quad (7)$$

$$\text{Si } X_3 < j \leq 2X_3, \text{ on a : } SH2(j) = 1 - 1/2(2 - j/X_3)^3 \quad (8)$$

$$\text{Si } j > 2X_3, \text{ on a : } SH2(j) = 1 \quad (9)$$

$SH2(j, 2X_3)$ est une fonction croissante jusqu'à X_3 , et décroissante jusqu'à $2X_3$, elle permet de traiter la montée et la décrue.

La première quantité traduite par l'hydrogramme unitaire $SH1(j, X_3)$, va directement constituer une entrée dans le réservoir de routage R, soit donc Q_r .

Figure 1 : Schéma d'ensemble du modèle GR3j* (1998)

Ce réservoir est soumis aux échanges de flux F, dépend du niveau d'humidité dans ce réservoir, et introduit par le paramètre X_1 (Figure 1).

Lorsque X_1 est positif, le flux F constitue une sortie du réservoir R, lorsque le paramètre X_1 est négatif, F représente une entrée pour le réservoir R.

La quantité F est donnée par la relation :

$$F = X_1 \left(\frac{R}{X_2} \right)^4 \quad (10)$$

F : Flux qui entre dans le réservoir R (mm) ;

R : Niveau du réservoir R (mm) ;

X_1, X_2 : Paramètres du modèle.

Ainsi le niveau du réservoir R^* sera la somme du niveau initial R, du flux F, et du débit traduit par l'hydrogramme $SH1(j, X_3)$.

$$R^* = \max(R + F + Q_r) \quad (11)$$

R^* : Niveau du réservoir R ;

F : Flux

Q_r : Débit routé par l'hydrogramme

$SH1(j, X_3)$.

Si cette somme est négative le niveau R est remis à zéro.

Dans le cas, où le flux F est négatif, il sera additionné au débit provoqué par l'hydrogramme unitaire $SH2(j, 2X_3)$ (10% de $(P_n - P_s)$, et donnera ainsi le débit Q_d .

De même que si ce résultat est négatif, le débit Q_d est remis à zéro.

Le réservoir R^* va provoquer un taux de flux Q_r , qui est égal à :

$$Q_r = R^* - (R^{*-4} + X_2^{-4})^{-1/4} \quad (12)$$

Le débit Q_r dépend du paramètre X_2 .

Le niveau du réservoir R sera :

$$R = R^* - Q_r \quad (13)$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Ambroise : "Hydrologie des petits bassins versants ruraux". Processus et modèles. Séminaire du conseil scientifique de l'INRA, pp 10-20, 1991.
- [2] A. Attou : "Etude comparative des modèles conceptuels pluie-débit au pas journalier". Thèse d'ingénieur ENP, Juin 1991.
- [3] T. Benkaci : "Contribution à la modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les réseaux de neurones". Thèse Magister, Institut national agronomique d'Alger, Janvier 2001.
- [4] H. Chambaz : "Contribution à l'étude de la méthode DPFT différence Première de la fonction transfert". Thèse de magister ENP, Juin 1990.
- [5] Edijatno & C. Michel : "Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres". La houille blanche n°2 pp.113-121, 1989.
- [6] Edijatno : "Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier". Thèse de doctorat, Cemagref (Anthony), Janvier 1991.

Le débit total calculé (mm) sera la somme des débits Q_r et Q_d :

$$Q_{\text{total}} = Q_r + Q_d \quad (14)$$

3. Données utilisées

L'aire d'étude est le bassin de la Cheffia ($S = 575 \text{ km}^2$), situé dans le Nord-Est algérien, il est alimenté par l'oued Bouna Moussa. Nous avons une série de données journalières de pluie, d'ETP et de débits observées de 1978 à 1989, soit au total un échantillon de douze ans. Les caractéristiques hydrologiques de notre bassin sont présentées dans le tableau 1.

Q moyen	4,0 m ³ /s
Q spécifique	6,9 m ³ /s
Lame écoulée	219,8 mm
C. d'écoulement	27%

Tableau 1 : Caractéristiques hydrologiques du bassin de la Cheffia

3.1 Critères de validation des modèles conceptuels mensuels

La validation du modèle est défini par une fonction critère, qui est une fonction scalaire des paramètres du modèle et qui mesure la différence entre les données simulées et celles observées [11].

3.1.1 Le critère de Nash (T)

Ce critère introduit par Nash et Stucclife (1970) est défini par :

$$T = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q} - \bar{Q})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{Q} - \bar{Q})^2} \right) \cdot 100 \quad (15)$$

$\hat{Q}$ et $\bar{Q}$ sont respectivement le débit observé et calculé durant la période de calage; $\bar{Q}$ est la moyenne des débits observés pendant la période de calage.

Le critère de Nash peut être interprété comme étant la proportion du débit observé expliqué par

le modèle. Si $T = 100\%$, l'ajustement est parfait, par contre si $T < 0$, le débit calculé par le modèle est une plus mauvaise estimation que le simple débit moyen. [12].

3.2 Calage des modèles

Dans toute modélisation conceptuelle, le calage est une étape très importante pour la validation du modèle. Vu que le critère de Nash représente un paramètre d'efficacité primordial et afin d'étudier l'influence de la durée du calage sur la validation du modèle, nous avons testé trois périodes de calage : 2 ans (1979 - 80), 4 ans (1979-82) et 8 ans (1979-86).

Pour notre part, nous avons décidé d'optimiser le modèle sur deux périodes ; la première période est utilisée pour le calage (Nash 1), et la deuxième pour la validation du modèle (Nash 2).

3.3 Initialisation du système

Un des problèmes des modèles conceptuels est l'initialisation du système, il rend pratiquement illusoire le fonctionnement par événement d'un tel modèle [6].

Pour les modèles GR, le problème d'initialisation est moins important, puisque seul le réservoir sol est à déterminer. Le réservoir R est déterminé par routage des débits. Dans notre cas, vu que le calage débute par l'année calendaire (janvier), et que le premier débit est relativement faible (0,3 m³/s), le réservoir sol est initialisé par une valeur de vingt (20) mm.

Pour une meilleure optimisation du modèle, le calage est réalisé à partir de la deuxième année (1979), la première année (1978) est prise pour la mise en route du modèle.

4. Résultats du modèle

D'après le tableau 2, les résultats obtenus par le modèle GR3j sont valides. En effet, pour une durée de calage de deux (2) ans nous avons obtenu une valeur du critère de Nash de près de 89%, pour une durée de quatre ans (4) l'efficacité de Nash donne une valeur de 80%; ces résultats confirment donc la robustesse de ce

Modèle GR3j	Période de calage (ans)		
	2 ans	4 ans	8 ans
Nash 1 (%)	88.7	79.6	59.9
Nash 2 (%)	54.7	54.6	58.7

Tableau 2 : Résultats du calage du modèle

Période de calage	Paramètres du modèle		
2 ans	X1 = -5.05	X2 / 62	X3 = 1.155
4 ans	X1 = -3.30	X2 / 61	X3 = 1.120
8 ans	X1 = -3.10	X2 / 92	X3 = 1.07

Tableau 3 : Paramètres optimisés du modèle

modèle.

Pour l'ensemble de la série simulée, les débits sont calculés de façon appréciée, certains débits maxima sont reproduits régulièrement. Les débits d'étiage sont reproduits de façon correcte (Figure 2). Nous avons aussi remarqué une

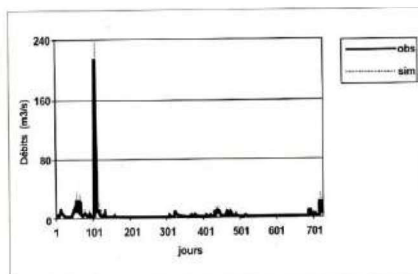


Figure 2 : Simulation par le modèle GR3j (années 1979-80)

meilleure reconstitution des débits moyens.

En période de validation, on signale un déclin de la modélisation, spécialement les débits de crue où les débits maxima observés sont largement supérieurs à ceux simulés. Ainsi pour une durée d'optimisation de quatre ans (4), le critère de Nash se détériore et passe de 80% à 54%.

Ce phénomène est remarqué pour la durée de deux (2) ans. Pour la durée d'optimisation de huit (8) ans, on remarque seulement une légère baisse du critère de Nash (2%), ceci s'explique par le fait que la durée de calage (8 ans) est plus élevée que la période de validation (2 ans).

En ce qui concerne les paramètres du modèle (tableau 3), les résultats optimisés montrent une moyenne de la valeur du paramètre C, de l'ordre de 1.1, ce qui confirme que notre aire d'étude est un petit bassin à réponse rapide.

5. Conclusion

Le modèle GR3j est un modèle conceptuel à trois paramètres, sa conception est simple, son application en Algérie dans le bassin de la Cheffia a donné de bons résultats, ce modèle est capable de reproduire le processus complexe de la relation pluie-débit et peut être exploité dans la gestion des ressources en eau. Son grand intérêt réside dans la correction des séries hydrométriques tronquées.

Ce modèle peut être exploité dans la prévisions des débits à court terme et long terme.

Ce modèle est jugé efficace dans la modélisation pluie-débit, néanmoins on peut l'améliorer en le rendant plus robuste, en introduisant d'autres opérateurs tels que la modélisation du tarissement de l'oued ■

●●●

[7] Edijatno, Nascimento, Yang, Makhlouf, Michel : GR3j "A daily watershed model with three free parameters". *Hydrological sciences journal*, n°2, pp.263-278. 1998.

[8] Kuarke-Leite & A. Nascimento : "Développement, utilisation et incertitudes des modèles conceptuels en hydrologie". *Séminaire : eaux et environnement*, pp.191-219, Paris 1993.

[9] Z. Makhlouf : "Compléments sur le modèle pluie-débit GR4j et essai d'estimation de ses paramètres". *Thèse de doctorat*, Univ. Paris-Sud Orsay, Cemagref Anthony, 1994.

[10] P. A. Roche : "Les divers types de modèles déterministes". *La houille blanche*, n°2 pp.111-129, 1971.

[11] Y. Rakem : "Reformulation, mathématique d'un modèle empirique". *Le modèle GR4j*. *Thèse de doctorat*, école nationale des ponts et chaussées, Novembre 1999.

[12] D. Xanthoulis : "Modélisation mathématique des débits d'étiage des cours d'eau". *Thèse de doctorat*, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Juin 1985.