



Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)

Charles Perrin, Claude Michel, Vazken Andréassian

Juin 2007

Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés
Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex
Tel : 01 40 96 60 86, Fax : 01 40 96 61 99
Web : <http://www.cemagref.fr/webgr>

Sommaire

1	Introduction.....	3
1.1	Objectifs de développement.....	3
1.2	Mode de développement.....	3
1.3	Principales caractéristiques.....	3
2	Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	5
2.1	Introduction	5
2.2	Description mathématique.....	5
2.3	Paramètre	6
3	Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M	6
3.1	Introduction	6
3.2	Description mathématique.....	6
3.3	Paramètres.....	8
4	Description du modèle pluie-débit journalier GR4J	8
4.1	Introduction	8
4.2	Description mathématique.....	9
4.3	Paramètres.....	12
5	Applications des modèles.....	13
6	Conclusions et perspectives.....	14
7	Bibliographie.....	15

1 Introduction

Ce document présente un récapitulatif des modèles de simulation du Génie Rural fonctionnant aux pas de temps annuel, mensuel et journalier.

1.1 Objectifs de développement

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

1.2 Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- représentation globale du bassin versant,
- approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (voir par exemple (Andréassian *et al.*, 2006),
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

1.3 Principales caractéristiques

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une triple globalisation (triple considération de moyenne) du système bassin versant:

- au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;
- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité;
- au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles. Notons que le développement d'un modèle au pas de temps horaire est en cours (Mathevet, 2005) et actuellement, le modèle journalier est appliqué au pas de temps horaire. Le modèle GR3H (horaire) utilisé dans certaines applications développées au Cemagref d'Aix-en-Provence (Fourmigué et Lavabre, 2005) correspond au modèle proposé par Edijatno (1991) au pas de temps journalier.

La spécificité du pas de temps, bien que souvent négligée, est importante, une même structure de modèle n'étant pas également performante à tous les pas de temps. Globalement, les structures sont d'autant plus simples que le pas de temps est long.

Au cours de leur développement, les modèles GR ont tous été testés sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins, particulièrement en France mais également aux Etats-Unis, en Australie, au Brésil, au Mexique, en Algérie ou en Côte d'Ivoire. D'autres équipes de recherche, des bureaux d'études et des services opérationnels ont par la suite utilisé les modèles dans des conditions variées.

Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle, cette dernière pouvant être une courbe moyenne interannuelle (Oudin, 2004; Oudin *et al.*, 2004; Oudin *et al.*, 2005a; Oudin *et al.*, 2005b). Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse (Perrin *et al.*, 2001). Les paramètres doivent être déterminés par calage, en minimisant l'erreur du modèle sur une série de débits observés. Lorsque des données de débit ne sont pas disponibles pour le calage, l'estimation des paramètres peut se faire par des formules régionales liant les valeurs des paramètres à des descripteurs physiques du bassin, par l'utilisation de modèles calés sur des bassins voisins, ou mieux encore par l'exploitation de quelques mesures ponctuelles en périodes de hautes eaux (Rojas-Serna, 2005). Cependant, leur utilisation conduit souvent à des erreurs beaucoup plus fortes que lorsque l'on peut réaliser un véritable calage du modèle.

Le développement des modèles étant un processus de longue haleine, nous présentons ici succinctement les versions actuelles de trois modèles GR conçus respectivement pour les pas de temps annuel, mensuel et journalier. Ces modèles permettent de réaliser des simulations en continu. Des informations complémentaires sur les modèles GR sont disponibles sur le site <http://www.cemagref.fr/webgr/>. Pour

une application du modèle GR3H à pas de temps fin en mode événementiel, on pourra se reporter au site <http://www.aix.cemagref.fr/>.

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur journalière de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm). P est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment). E n'est pas nécessairement une donnée datée mais peut être issue d'une courbe de régime d'ETP moyenne interannuelle. Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm.

2 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

2.1 Introduction

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau.

La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006a).

2.2 Description mathématique

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . Le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad \text{Eq. 1}$$

où X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

2.3 Paramètre

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13; 3.5].

3 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

3.1 Introduction

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhoul (1994), Makhoul et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006b), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006b) qui paraît la plus performante.

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

3.2 Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure 1. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes:

- Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)} \quad \text{Eq. 2}$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P_1 , est donnée par :

$$P_1 = P - P_s' \quad \text{Eq. 3}$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad \text{Eq. 4}$$

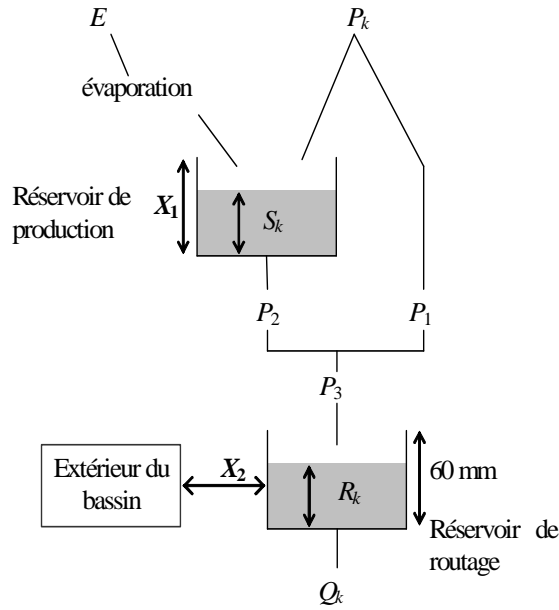


Figure 1 : Schéma de la structure du modèle GR2M

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad \text{Eq. 5}$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s \quad \text{Eq. 6}$$

- Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\} \quad \text{Eq. 7}$$

et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad \text{Eq. 8}$$

- Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique

La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad \text{Eq. 9}$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \quad \text{Eq. 10}$$

Un terme d'échange en eau souterrain F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1).R' \quad \text{Eq. 11}$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2.R' \quad \text{Eq. 12}$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad \text{Eq. 13}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k \quad \text{Eq. 14}$$

3.3 Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production	(mm)
X_2 : coefficient d'échanges souterrains	(-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau 1.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140 -- 2640
X_2 (-)	0.92	0.21 -- 1.31

Tableau 1 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants

4 Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

4.1 Introduction

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno et Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno *et al.* (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin *et al.* (2003) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin *et al.* (2003) qui est présentée ici.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin.

Le modèle GR4J a certaines fonctions communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel.

Remarquons que le modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005) utilisé au pas de temps horaire correspond à la version à trois paramètres proposée par Edijatno (1991). Le modèle GR3H est très similaire à la version du modèle décrite dans la section suivante, mais n'intègre ni fonction d'échange, ni fonction de percolation, les autres fonctions étant pratiquement identique.

4.2 Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure 2. P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

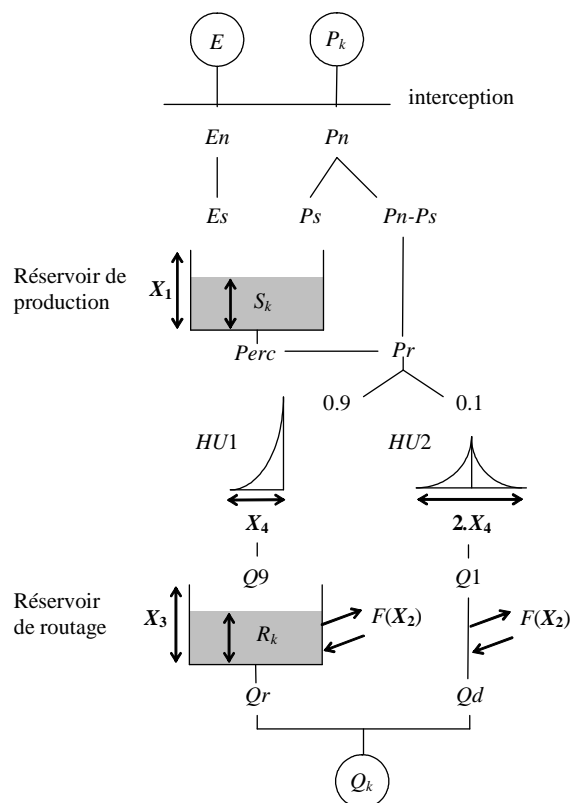


Figure 2 : Schéma de la structure du modèle GR4J

- Neutralisation

La première opération est la neutralisation de P_k par E pour déterminer une pluie nette Pn et une évapotranspiration nette En calculée par :

$$\text{Si } P_k \geq E, \quad \text{alors } Pn = P_k - E \quad \text{et} \quad En = 0 \quad \text{Eq. 15}$$

$$\text{Si } P_k < E, \quad \text{alors } Pn = 0 \quad \text{et} \quad En = E - P_k \quad \text{Eq. 16}$$

- Fonction de rendement

Dans le cas où Pn est différente de zéro, une partie Ps de Pn alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$Ps = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{Pn}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{Pn}{X_1}\right)} \quad \text{Eq. 17}$$

où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S_k le contenu du réservoir de production au début du jour k .

Dans le cas contraire, lorsque En est différent de zéro, une quantité d'évaporation Es est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$Es = \frac{S_k \cdot \left(2 - \frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{En}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{En}{X_1}\right)} \quad \text{Eq. 18}$$

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + Ps - Es \quad \text{Eq. 19}$$

- Percolation

Une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$Perc = S' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S'}{9 X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Eq. 20}$$

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad \text{Eq. 21}$$

et la quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$Pr = Perc + (Pn - Ps) \quad \text{Eq. 22}$$

- Hydrogrammes unitaires

Pr est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire $HU1$ et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique $HU2$. $HU1$ et $HU2$ dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de $HU1$ exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement $SH1$ et $SH2$, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. $SH1$ est définie en fonction du temps par:

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH1(t) = 0 \quad \text{Eq. 23}$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4, \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 24}$$

$$\text{Pour } t \geq X_4, \quad SH1(t) = 1 \quad \text{Eq. 25}$$

$SH2$ est définie de façon similaire par:

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH2(t) = 0 \quad \text{Eq. 26}$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X_4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 27}$$

$$\text{Pour } X_4 < t < 2.X_4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 28}$$

$$\text{Pour } t \geq 2.X_4, \quad SH2(t) = 1 \quad \text{Eq. 29}$$

Les ordonnées de $HU1$ et $HU2$ sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad \text{Eq. 30}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad \text{Eq. 31}$$

où j est un entier.

A chaque pas de temps k , les sorties $Q9$ et $Q1$ des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0,9 \cdot \sum_{j=1}^l UH1(j) \cdot Pr(k-j+1) \quad \text{Eq. 32}$$

$$Q1(k) = 0,1 \cdot \sum_{j=1}^m UH2(j) \cdot Pr(k-j+1) \quad \text{Eq. 33}$$

où $l = \text{int}(X_4)+1$ et $m = \text{int}(2.X_4)+1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

- Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \cdot \left(\frac{R_k}{X_3} \right)^{7/2} \quad \text{Eq. 34}$$

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

- Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie Q9 de l'hydrogramme *HU1* et F :

$$R' = \max (0 ; R_k + Q9(k) + F) \quad \text{Eq. 35}$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Qr = R' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Eq. 36}$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Qr \quad \text{Eq. 37}$$

- Ecoulement total

La sortie Q1 de l'hydrogramme *HU2* est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd :

$$Qd = \max (0 ; Q1(k) + F) \quad \text{Eq. 38}$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q_k = Qr + Qd \quad \text{Eq. 39}$$

4.3 Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler:

X_1 : capacité du réservoir de production	(mm)
X_2 : coefficient d'échanges souterrains	(mm)
X_3 : capacité à un jour du réservoir de routage	(mm)
X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire <i>HU1</i>	(j)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau 2.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X ₁ (mm)	350	100 à 1200
X ₂ (mm)	0	-5 à 3
X ₃ (mm)	90	20 à 300
X ₄ (jours)	1.7	1.1 à 2.9

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants

5 Applications des modèles

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau. A titre d'exemples, on peut citer :

- la reconstitution ou l'extension de séries de débit : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;
- la prédétermination : les séries de débit observé étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée) ;
- la prévision à court terme (quelques heures à quelques jours) : elle est particulièrement utile pour les événements de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions. Les travaux de Tangara (2005) ont par exemple permis de mettre au point un modèle continu (GR3P) dérivant du modèle GR4J et spécifiquement adapté à l'exercice de prévision à court terme ; voir également les travaux réalisés en mode événementiel avec le modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005) ;
- la prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois) : elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie ;
- la détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant (Andréassian, 2002; Andréassian *et al.*, 2003) ;
- la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien

d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage (Yang *et al.*, 1991).

6 Conclusions et perspectives

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètres à caler). Par suite, ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle. Cette simplicité, si elle n'est pas un objectif en soit, s'est imposée au cours de leur développement parce que de nombreuses hypothèses de fonctionnement, empruntées à l'arsenal des modèles conceptuels, étaient rejetées par des données observées lorsque de nombreux bassins étaient pris en compte et que le test en calage-contrôle était appliqué avec rigueur. C'est ainsi par exemple que les sous-modèles classiques d'infiltration n'ont pu être retenus dans les architectures finales. Notons également que les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin, absentes de la grande majorité des modèles conceptuels, sont apparues comme indispensables à tous les pas de temps.

Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, Côte d'Ivoire, etc.). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km². Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages, pour lesquelles le Cemagref développe des méthodologies spécifiques de mise en œuvre. Pour de simples objectifs de simulation, les modèles GR peuvent être appliqués aisément à partir d'un tableur (voir <http://www.cemagref.fr/webgr/>).

Comme tous les modèles hydrologiques actuels, ces modèles restent perfectibles, malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible. Les recherches continuent donc pour les faire progresser et améliorer ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant. La modélisation à pas de temps horaire, les interactions nappes-rivières, la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies ou d'informations hydrométriques amont, une meilleure représentation des fontes nivales, constituent les pistes explorées actuellement.

7 Bibliographie

- Andréassian, V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 pp.
- Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N. et Schaake, J., 2006. Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: V. Andréassian, A. Hall, N. Chahinian and J. Schaake (Editors), Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n°307, pp. 1-5.
- Andréassian, V., Parent, E. et Michel, C., 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water Resources Research* 39(9), 1252, doi:10.1029/2003WR002081.
- Edijatno, 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEEES, Strasbourg, 242 pp.
- Edijatno et Michel, C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*(2), 113-121.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. et Michel, C., 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44(2), 263-277.
- Fourmigué, P. et Lavabre, J., 2005. Préviation de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. *Revue des Sciences de l'Eau* 18(1), 87-102.
- Kabouya, M., 1990. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 pp.
- Kabouya, M. et Michel, C., 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau* 4(4), 569-587.
- Makhlof, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.
- Makhlof, Z. et Michel, C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318.
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- Michel, C., 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*(1), 39-44.
- Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006a. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006b. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.
- Nascimento, N.O., 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 pp.
- Oudin, L., 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 495 pp.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C. et Anctil, F., 2004. Locating the sources of low-pass behaviour within rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 40(11), W11101, doi:10.1029/2004WR003291.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. et Loumagne, C., 2005a. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.
- Oudin, L., Michel, C. et Anctil, F., 2005b. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology* 303(1-4), 275-289.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 pp.
- Perrin, C., 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*(6/7), 84-91.
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance ? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242(3-4), 275-301.
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279(1-4), 275-289.
- Rojas-Serna, C., 2005. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), ENGREF (Paris), France, 319 pp.
- Tangara, M., 2005. Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, EPHE, Paris, 374 pp.
- Turc, L., 1955. Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agr.* 6, 5-131.
- 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.