

---

# Simulation du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant

Application à la conception et à la gestion d'un barrage

**Patrick Arnaud et Jacques Lavabre**

---

**G**énéralement, dans le cadre d'une étude de conception de barrages, la gestion de la retenue d'eau et le dimensionnement des ouvrages évacuateurs de crues sont traités par deux approches différentes. La gestion de la retenue est basée sur l'étude statistique des apports mensuels ou journaliers selon la disponibilité des informations. Le dimensionnement des évacuateurs de crues est basé sur l'élaboration d'une crue de projet de forme unique, qui associe une probabilité d'apparition identique aux débits entrants et sortants de la retenue.

La méthodologie présentée ici, en cours de développement au Cemagref, vise à coupler l'étude en continu des apports et des crues. Elle est basée sur un processus de simulation de pluie couplé à une modélisation pluie-débit.

L'approche intégrée pour la gestion de la retenue est réalisée, en couplant la modélisation à différents pas de temps : le pas de temps journalier pour la gestion de la ressource et le pas de temps horaire pour l'étude du comportement de l'ouvrage en période de crue.

Cette méthode permet ainsi de générer différents scénarios de crues de diverses formes, plus réalistes qu'une crue de projet classique, et qui seront utilisés pour tester le comportement de l'ouvrage étudié. Le concepteur pourra ainsi choisir la crue la plus défavorable à l'aménagement et bénéficiera d'une bonne information pour effectuer des calculs d'hydraulique transitoire. Le traitement statistique des débits sortants, effectué indépendamment des débits entrants, permet le dimensionnement des ouvrages de régulation et de sécurité. Cette

méthode s'appuie sur les travaux de C. Michel (1989), qui a montré que cette approche est la seule à conduire à des estimations correctes de la fréquence des débits à l'aval d'un aménagement.

## Technique de simulation de la pluie

Deux modèles de simulation de pluie sont présentés : l'un simule des chroniques de pluies au pas de temps journalier, l'autre simule des événements pluvieux au pas de temps horaire.

### ■ Le principe des modèles

Ces modèles sont basés sur un même principe : la pluie peut être assimilée à un processus aléatoire et intermittent (succession d'états secs et pluvieux), dont l'évolution est décrite par des lois de probabilité. Ces modèles reposent en outre sur l'indépendance des variables descriptives du hétéogramme<sup>1</sup>.

La génération du signal de pluie comporte deux étapes :

1 – l'étude descriptive du phénomène, qui amène au choix des variables qui vont le caractériser, et à leur génération. Chaque variable descriptive devra être indépendante des autres, et sera représentée par une loi de probabilité ajustée sur les valeurs observées ;

2 – la restitution de la chronique de pluie par les variables descriptives tirées de façon aléatoire dans leur loi de répartition. De manière générale, si une variable aléatoire  $x$  a pour fonction de répartition  $F(x)$ , la génération de variables suivant la loi  $F(x)$  se fait en tirant de façon aléatoire la valeur de  $F(x)$

1. Hétéogramme : histogramme des hauteurs de pluies horaires en fonction du temps

**Patrick Arnaud  
et Jacques  
Lavabre**  
Cemagref  
Le Tholonet, BP 31  
13612 Aix-en-  
Provence Cedex

entre 0 et 1, puis en cherchant la valeur correspondante de  $x$ .

Tout le problème se résume donc à trouver les bonnes variables indépendantes décrivant le processus de pluie, et les lois de répartition qui les représentent le mieux.

### ■ *Modèle de simulation de pluies journalières*

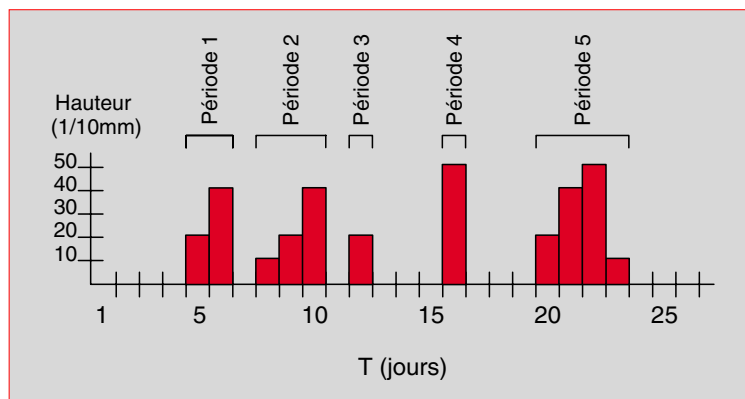
Le modèle (G. Dumont d'Ayot, 1993) crée des chroniques de pluies journalières mois par mois. Pour chaque mois on détermine, à partir d'une analyse des pluies journalières observées, les paramètres des lois décrivant les cinq variables du modèle. Ces cinq variables sont :

- la durée des périodes pluvieuses : DP, exprimée en jours ;
- la durée des périodes sèches : DS, exprimée en jours ;
- la hauteur de pluie journalière d'une averse isolée d'un jour : HI, exprimée en 1/10 mm ;
- la hauteur de pluie journalière aux extrémités d'une averse (de durée supérieure à un jour) : HE, exprimée en 1/10 mm ;
- la hauteur de pluie journalière au milieu d'une averse (de durée supérieure à deux jours) : HM, exprimée en 1/10 mm.

Par exemple pour le signal de la figure 1 :

- pour la période pluvieuse 1 : DS = 4 ; DP = 2 ; HE = 20 ; HM = 40 ;
- pour la période pluvieuse 2 : DS = 1 ; DP = 3 ; HE = 10 ; HM = 20 ; HE = 40 ;
- pour la période pluvieuse 3 : DS = 1 ; DP = 1 ; HI = 20 ;

Figure 1. – Exemple de signal de pluies journalières. ▼



- pour la période pluvieuse 4 : DS = 3 ; DP = 1 ; HI = 50 ;
- pour la période pluvieuse 5 : DS = 3 ; DP = 4 ; HE = 20 ; HM = 40 ; HM = 50 ; HE = 10.

La calibration du modèle consiste donc à ajuster au mieux les lois descriptives des cinq variables et cela pour chaque mois. Par souci de commodité, les lois de probabilité des cinq variables sont les mêmes d'un mois à l'autre : DS suit une loi binomiale négative tronquée ; DP suit une loi géométrique ; HI, HE, HM suivent une loi de Weibull.

Le modèle est structuré de la façon suivante :

- tirage de façon aléatoire de la nature de l'épisode d'origine : Prob(sec) = Prob(pluvieux) = 0,5 ;
- génération en continu des durées pluvieuses et des durées sèches alternativement, en tirant dans leurs lois de probabilité respectives. Lors d'une durée pluvieuse de durée DP, le modèle génère pour chaque jour de l'épisode la hauteur d'eau tombée en tirant dans les lois de probabilité de HI, HE ou HM suivant les cas.

La validation du modèle se fait sur des variables n'ayant pas servi à l'élaboration du modèle : la hauteur de pluie mensuelle et la hauteur de pluie journalière maximale dans le mois. On compare les caractéristiques statistiques de base (moyenne, écart-type, minimum, maximum et coefficient d'aplatissement et de dissymétrie) de ces variables sur les valeurs observées et sur les valeurs simulées.

### ■ *Modèle de simulation de pluies horaires*

Le modèle a été développé au Cemagref (P. Arnaud, 1995 ; F. Cernesson, 1993 ; S. Laborde, 1991 ; M.-F. Vulliet, 1993 ; E. Ribero, 1992). A la différence du modèle de pluie journalière, il ne fonctionne pas en continu mais en événementiel. Un événement pluvieux est défini comme un épisode ayant au moins une pluie journalière supérieure à 20 mm et limité dans le temps par une pluie journalière inférieure à 4 mm.

Ce modèle distingue deux saisons :

- l'été : de juin à novembre ;
- l'hiver : de décembre à mai.

Les variables retenues doivent permettre de rendre compte, d'une part du caractère discontinu de la pluie, et d'autre part de la structure de l'averse. Onze variables ont été ainsi retenues à la suite du

traitement d'une cinquantaine de postes pluviographiques situés sur le facade méditerranéenne française, ainsi que les lois de probabilité qui les décrivent au mieux.

*Définitions retenues dans le modèle :* un épisode pluvieux est une succession à l'échelle horaire, de périodes pluvieuses et sèches (figure 2). Une période pluvieuse comprend une ou plusieurs averses. Une averse est définie par une période pluvieuse ne possédant qu'un maximum relatif. L'averse principale est l'averse qui provoque la plus forte hauteur d'eau tombée au cours de l'épisode. Les averses ordinaires sont les autres averses de l'épisode (tableau 1).

Prenons l'exemple de l'épisode pluvieux de la figure 2 pour illustrer la détermination des variables du modèle. Cet épisode est composé de trois périodes pluvieuses, entrecoupées de deux périodes sèches. La seconde période pluvieuse comprend trois averses.

*Construction des hyétogrammes :* comme pour le modèle journalier, les hyétogrammes sont construits à partir des variables générées par un tirage aléatoire dans leur loi de répartition, et suivant des règles de répartition précises.

La hiérarchisation des tirages aléatoires est la suivante : le nombre d'événements pluvieux dans l'année, puis le nombre de périodes pluvieuses par événement pluvieux, puis le nombre d'averses par période pluvieuse ainsi que les durées sèches qui les séparent. Pour chaque averse on génère sa durée, la position du maximum, le rapport de l'intensité maximale sur l'intensité moyenne, et l'intensité moyenne. On place alors le maximum de l'averse et on répartit le reste de la pluie, en gardant une intensité moyenne égale de part et d'autre du maximum.

La validation du modèle se fait sur les pluies maximales en 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24, 48 et 72 heures. Ces variables n'ayant pas servi lors de la génération des hyétogrammes, leur bonne restitution lors de la simulation permettra de juger la capacité du modèle à reproduire la structure temporelle des hyétogrammes.

### ■ Principe du couplage des deux modèles de simulation de pluie

La méthode utilisée pour le couplage des deux modèles est simple : simulation d'une longue chro-

Nom	Définition	Loi de distribution
NE	Nombre d'épisode par an	Poisson
NG	Nombre de périodes pluvieuses par épisode	Géométrique
NA	Nombre d'averses par période pluvieuse	Géométrique
DIA	Durée sèche entre deux périodes pluvieuses	Géométrique tronquée
HMAP	Intensité moyenne de l'averse principale	Couplage d'exponentielles
HMAO	Intensité moyenne des averses ordinaires	Couplage d'exponentielles
DAP	Durée de l'averse principale	Poisson tronquée
DAO	Durée des averses ordinaires	Poisson tronquée
RX	Rapport de l'intensité maximum à l'intensité moyenne	Exponentielle
RPX	Position relative du maximum	Normale
TSE	Origine de l'épisode dans la journée	Géométrique

nique de pluies journalières avec le modèle de simulation de pluies journalières, et repérage des événements pluvieux ayant une pluie journalière supérieure à 20 mm. Pour chacun de ces événements pluvieux, on simule en parallèle un événement par le modèle de simulation de pluies horaires que l'on substitue à l'événement journalier.

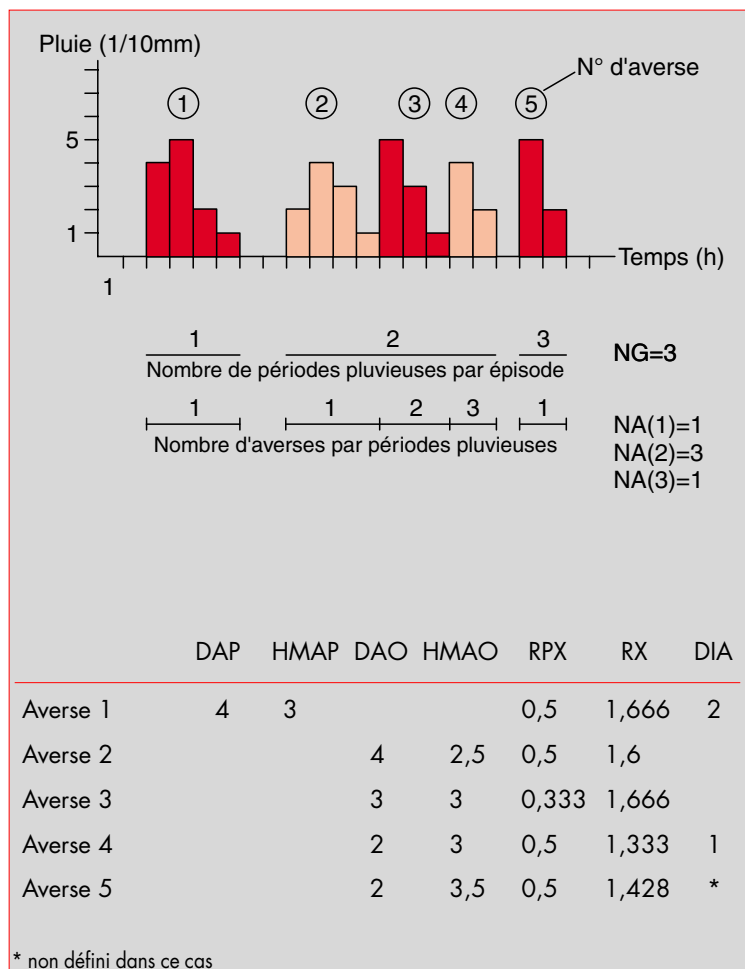
La validation de ce couplage consiste à calculer les variables tests du modèle de simulation de pluies journalières (la pluie mensuelle et la pluie journalière maximale du mois). Une bonne reconstitution de ces variables garantit que l'introduction du pas de temps horaire ne perturbe pas la simulation en continu au pas de temps journalier.

### Modélisation pluie-débit avec les modèles GR3J et GR3H

#### ■ Présentation des modèles

Les modèles utilisés sont des modèles conceptuels globaux à trois paramètres, (Michel 1989 et 1991 ; Edijatno 1991 ; Yang 1993 ; Nascimento 1994 ;

▲ Tableau 1. – Variables descriptives du modèle horaire.



▲ Figure 2. – Exemple d'épisode pluvieux horaire.

2. L'estimation de cette répartition repose sur le traitement de 120 bassins versants français.

Makhlouf, 1994). Dans ces modèles, le bassin versant est considéré comme une «boîte noire» dont le signal d'entrée est la pluie et le signal de sortie le débit. Que le pas de temps soit journalier ou horaire, les deux modèles ont la même structure (figure 3) :

– un premier réservoir gère la fonction de production. Il est caractérisé par un seul paramètre A représentant sa capacité maximale en mm. Il commande la répartition de la pluie brute entre lui-même et le sous-modèle de routage (pluie nette participant à l'écoulement).

– le sous-modèle de routage comprend deux évacuations parallèles. La partie la plus importante (90 % de la pluie nette<sup>2</sup>) transite à travers un premier hydrogramme unitaire qui permet le remplissage d'un second réservoir (réservoir-eau-

gravitaire) de capacité maximale B (en mm) qui se vidange pour donner un débit  $Q_{\text{réservoir}}$ . La seconde partie (10 % de la pluie nette<sup>2</sup>) transite au travers d'un second hydrogramme unitaire et se retrouve directement dans l'écoulement sous forme de débit  $Q_{\text{direct}}$ . Le troisième paramètre du modèle est un paramètre commun aux deux hydrogrammes unitaires : C. Il est exprimé en jours pour le modèle GR3J et en heures pour le modèle GR3H.

Les valeurs de A, B et C sont optimisées selon un critère d'écart entre les débits observés et les débits calculés par le modèle. Le critère retenu est celui de Nash qui s'exprime :

$$\text{Nash} = 100 - 100 \frac{\sum (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}})^2}{\sum (Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2}$$

où  $Q_{\text{obs}}$  et  $Q_{\text{cal}}$  représentent respectivement les débits observés et calculés et  $\bar{Q}_{\text{obs}}$  la moyenne des débits observés. Le modèle reproduit parfaitement les écoulements si le critère de Nash vaut 100 %. Les résultats sont considérés corrects jusqu'à des valeurs de Nash de 80 %.

### ■ Différence entre le modèle journalier et horaire

Une première différence apparaît dans la structure des deux modèles au niveau du réservoir-sol. Dans la version journalière, le réservoir-sol est régulé par l'évaporation. Au pas de temps horaire, le rôle de l'évaporation est négligé. Une autre différence intervient dans l'expression des paramètres du modèle. En effet, les équations des modèles sont intégrées sur le pas de temps étudié. « B » est théoriquement inversement proportionnel au pas de temps du modèle (Michel, 1989). Le paramètre « C », qui représente le temps de montée des hydrogrammes unitaires HU1 et HU2, s'exprime soit en heures, soit en jours. Les valeurs des paramètres ne sont donc pas transposables directement d'un pas de temps à l'autre.

### ■ Le couplage des deux modèles

Pour fonctionner, les modèles nécessitent la connaissance de l'état initial des réservoirs. Le modèle GR3J, qui fonctionne en continu, utilise une partie de la chronique (souvent une année entière) pour initialiser le niveau des réservoirs. Pour le modèle GR3H fonctionnant événement par événement, le niveau initial du réservoir  $S_0$  est considéré comme un quatrième paramètre à optimiser.

Comme indiqué dans la figure 4, le couplage des deux modèles permet d'utiliser l'information de l'état du réservoir du modèle journalier pour initialiser le modèle horaire.

### Application à un petit bassin versant méditerranéen

#### Le site d'étude

La méthodologie est appliquée sur les observations d'un bassin versant du bassin de recherche du Réal Collobrier géré par le Cemagref (Lavabre, 1996) : le bassin versant de Pont de Fer, d'une superficie de 70,6 km<sup>2</sup>. Le poste pluviographique représentatif du bassin versant est le poste de la Malière. La période d'observation en pluie et en débit est de 23 ans (1966-1988).

#### La simulation de la pluie

- Au pas de temps journalier

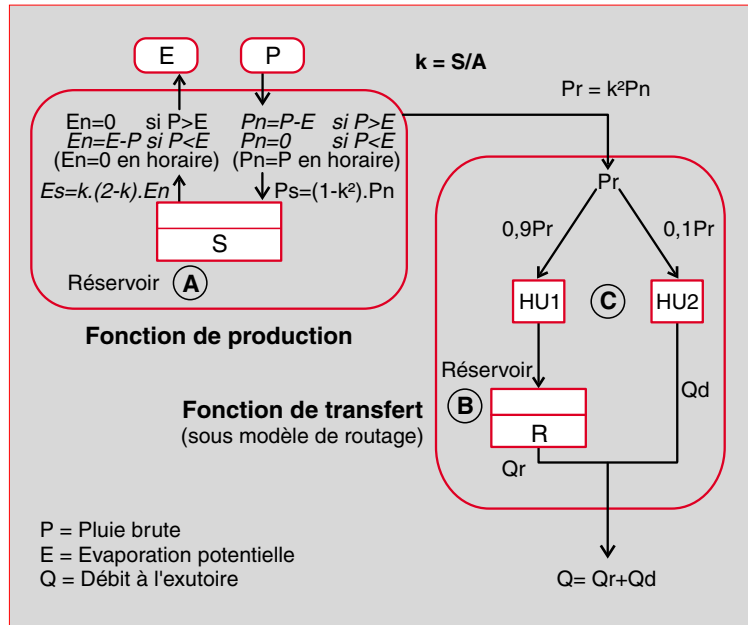
Après identification des paramètres sur la série observée, le modèle simule 1 000 années de pluies journalières. Une aussi longue période est nécessaire pour stabiliser les statistiques. La figure 5 compare les statistiques élémentaires des variables tests (pluie mensuelle et pluie journalière maximale) de chacun des mois.

On observe une bonne reconstitution de la moyenne et de l'écart-type des variables tests, quelle que soit la saison.

- Au pas de temps horaire

De même que pour le pas de temps journalier, on a simulé 1 000 ans d'événements pluvieux que l'on compare aux événements des 23 ans d'observation. Les variables tests servant à la validation sont les pluies maximales en 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24, 48 et 72 heures, ainsi que la durée totale des événements et la hauteur totale tombée lors des événements. Les moyennes de ces différentes variables sont bien reconstituées : erreur relative sur la moyenne de 0 à 4 % pour la saison hiver et de 5 à 28 % pour la saison été. L'écart-type des variables tests est plus difficile à retrouver : erreur relative sur l'écart-type des variables test de -18 à 11 % pour l'hiver et de 25 à 50 % pour l'été.

A titre d'exemple, la figure 6 présente la distribution de fréquence des pluies maximales en 4 et



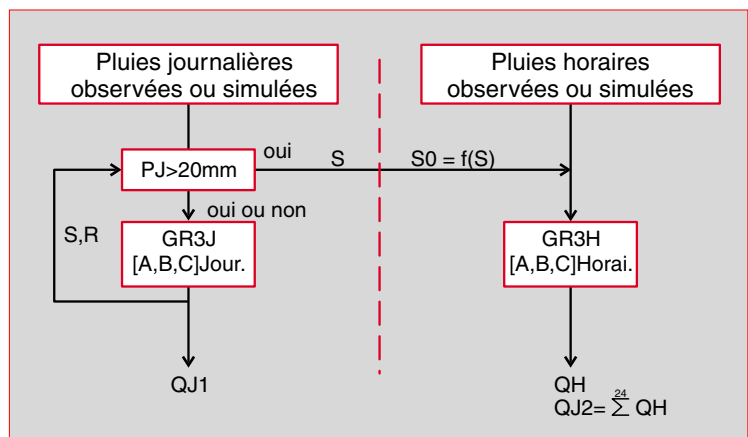
▲ Figure 3. – Structure du modèle pluie-débit.

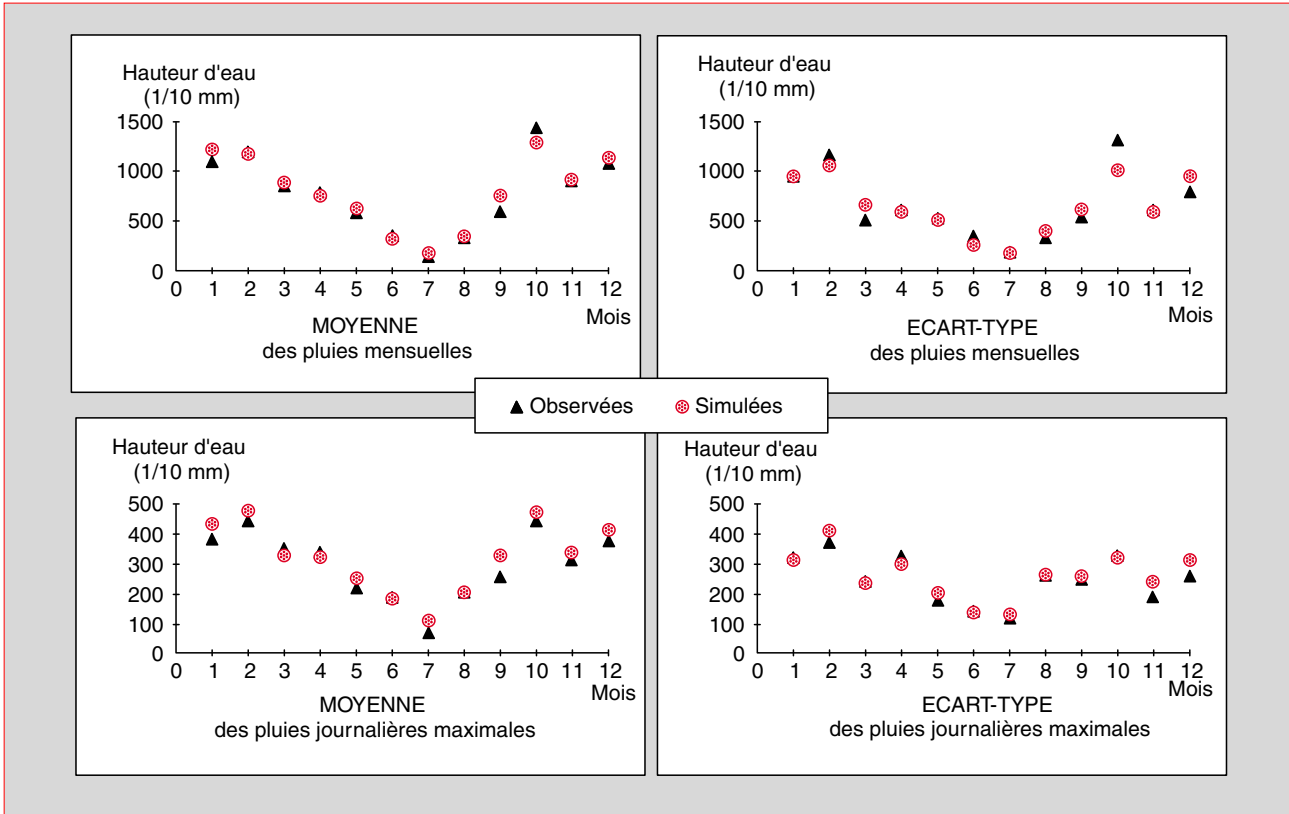
24 heures pour la saison hiver. Les périodes de retour « T » sont calculées à partir de la formule de Hazen, soit :  $T = N/(i-0,5)$ , où N est le nombre d'années (observées ou simulées) et i le rang de l'observation après classement par ordre décroissant.

- Résultats du couplage des deux modèles

La figure 7 compare moyennes et écart-types des pluies mensuelles et des pluies journalières maximales mensuelles générées par les modèles avant et après le couplage journalier horaire. Les pluies mensuelles sont correctement simulées, malgré une

Figure 4. – Fonctionnement couplé des deux modèles pluie-débit.





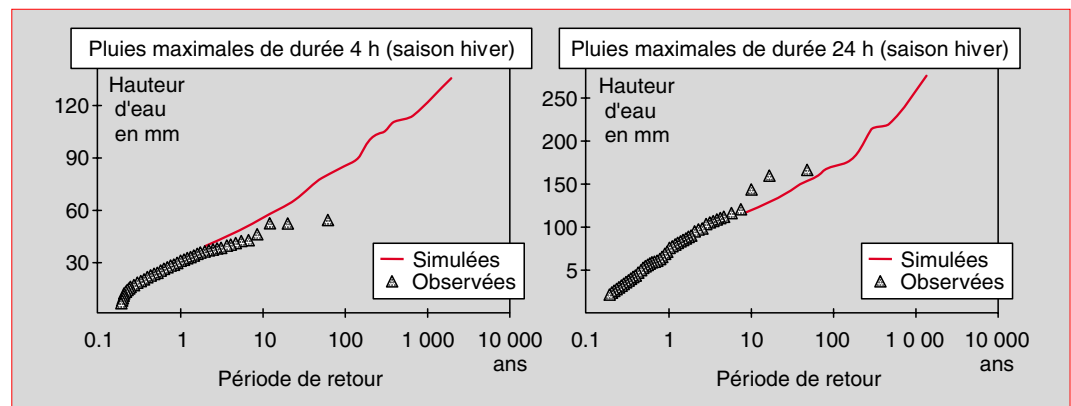
▲ Figure 5. – Comparaison des moyennes et écart-types des pluies mensuelles et des pluies journalières maximales des séries observées et simulées.

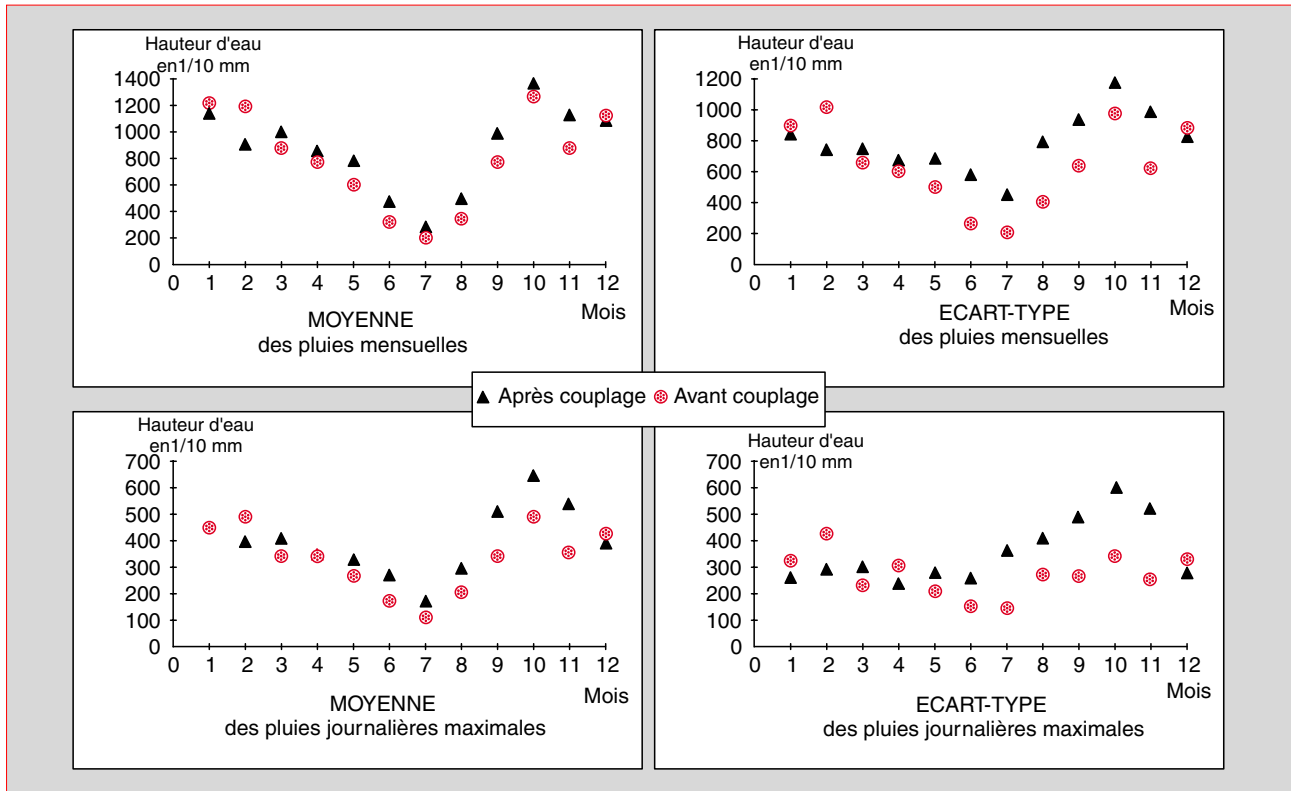
légère surestimation de l'écart-type des mois d'été. Cette surestimation est sensiblement plus marquée pour les écart-types des pluies journalières maximales mensuelles des mois d'été. Mais, il apparaît que ceci ne découle que du modèle horaire et que le couplage n'introduit pas de biais supplémentaire.

■ **La modélisation pluie-débit**  
– Au pas de temps journalier

Une chronique de pluies et de débits de 23 ans est disponible. Pour juger de la validité du modèle GR3J, l'optimisation des paramètres du modèle est effectuée dans un premier temps sur une chro-

Figure 6. – Comparaison des distributions fréquentielles des pluies maximales saisonnières de durée 4 h et 24 h.





▲ Figure 7. – Comparaison des moyennes et des écart-types des pluies mensuelles et des pluies journalières maximales générées par le modèle avant et après le couplage journalier-horaire.

nique de dix années ; la chronique suivante est utilisée en validation uniquement (tableau 2).

Les valeurs du critère de Nash et de l'erreur sur les volumes (Bilan) montrent que les débits sont bien reconstitués par le modèle. Notons que les performances du modèle sur le bilan pourraient être nettement améliorées par modification du critère d'optimisation. A titre d'exemple, la figure 8 présente les débits observés et calculés par le modèle pour l'année 1977.

– Au pas de temps horaire

La même méthodologie est utilisée pour le calage du modèle horaire. On remarque (tableau 3) que le modèle est plus performant pour la saison hiver que pour la saison été. Des valeurs de  $S_0$ , non reproduites ici, sont affectées à chacune des crues : s'il est relativement logique que les valeurs de B et C, qui sont fonction du pas de temps, varient du modèle journalier au modèle horaire, la forte variation observée sur les valeurs de A peut appar-

	Optimisation Années 1967-1976	Validation Années 1977-1988
A (mm)	372	372
B (mm)	81	81
C (jour)	1,1	1,1
NASH (%)	79,36	80
Bilan (%)	16,23	-9,3

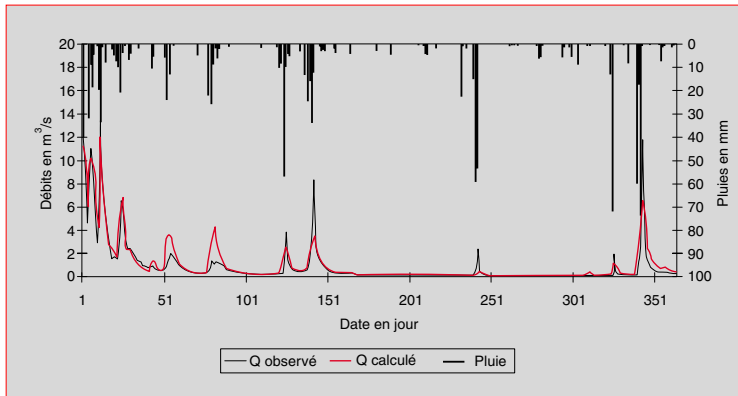
tre surprenante. D'autant que ceci entraîne (figure 9) des valeurs initiales plus fortes pour le modèle horaire que celles calculées par le modèle journalier. Une amélioration, non introduite dans cette note, consisterait à examiner les résultats obtenus en retenant une même valeur de A pour les deux modèles.

– Couplage des deux modèles GR3H et GR3J

Le modèle journalier gère les réservoirs en continu. Pour chaque épisode de crue, deux valeurs initiales de remplissage du réservoir A sont donc

▲ Tableau 2. – Paramètres et critères du modèle pluie-débit au pas journalier.





▲ Figure 8 . – Hydrogrammes journaliers observés et reconstitués pour l'année 1977.

disponibles : une générée en continu par le modèle journalier, l'autre optimisée par le modèle horaire. La figure 10 donne un aperçu de la relation qui lie ces deux valeurs. Le coefficient de corrélation  $r$  est de 0,67 ; il est relativement faible mais largement significatif.

Cette relation est utilisée lors du couplage des deux modèles. Une chronique de débits horaires est ainsi simulée lorsque la pluie journalière excède 20 mm. La mise en œuvre aboutit aux résultats du tableau 4. Les critères de Nash, calculés sur les débits journaliers de crue sont élevés, et les volumes sont très bien conservés.

Tableau 3. – Paramètres et critères du modèle pluie-débit au pas horaire. ▶

Période	A (mm)	B (mm)	C (heure)	NASH (%)	Erreur bilan (%)
Été	788	31	3	69,7	-1,6
Hiver	672	90	4,1	84,1	-2,2

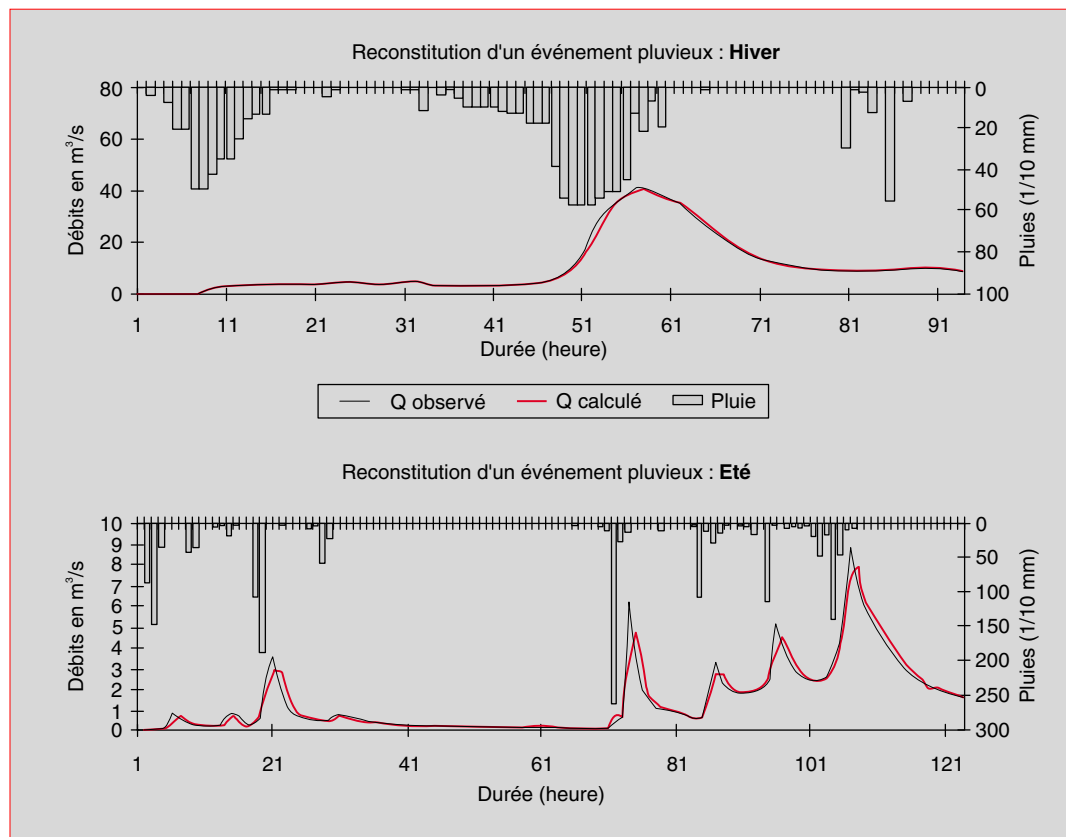


Figure 9. – Exemples d'hydrogrammes de crues observés et reconstitués. ▶



### Autres exemples d'applications partielles de la méthode

L'exemple précédent présente un cas d'application de la méthodologie totale sur un bassin versant bien instrumenté. La méthodologie peut aussi être adoptée pour un problème hydrologique spécifique et à partir d'informations fragmentaires. Deux exemples, parmi d'autres, sont exposés ci-après.

#### ■ *Le barrage du Salagou (département de l'Hérault)*

(P. Goettmann et J. Lavabre, 1996)

L'ouvrage de stockage est important : plan d'eau de 700 ha et volume de 100 millions de m<sup>3</sup> à la cote normale d'exploitation. Le bassin versant n'étant que de 70 km<sup>2</sup>, la retenue présente une forte capacité d'écêtement des crues.

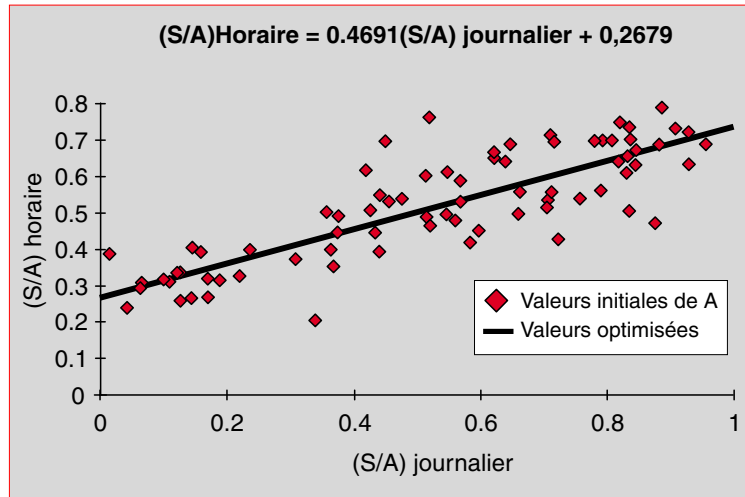
Le conseil général de l'Hérault, gestionnaire du barrage, a lancé une étude pour évaluer le volume journalier de crue de fréquence décennale et pour estimer les cotes atteintes par le plan d'eau selon différentes modalités de gestion de la retenue. Pour ce problème, la connaissance des débits maxima de crue ne présente pas d'intérêt. Par contre, l'obtention d'une chronique continue de débits journaliers permet d'aborder simplement le problème posé.

Le modèle de la simulation de pluies journalières a été calé sur un poste pluviométrique situé sur le bassin versant et jugé représentatif après une étude de sensibilité.

Après vérification des résultats (respect de la distribution de fréquence des pluies journalières maxima annuelles, respect des moyennes et écart-types des pluies mensuelles), une simulation de 100 000 ans a été effectuée.

Une courte chronique de débits journaliers était disponible avant la mise en service de la retenue. Elle a été utilisée pour caler les paramètres du modèle pluie-débit GR3J. Les résultats de la modélisation ont été comparés aux chroniques reconstituées par le gestionnaire durant la période de gestion de l'ouvrage (1970-1993). Quelques différences sont apparues. Elles restent toutefois dans l'incertitude de l'estimation de l'évaporation directe du plan d'eau.

Le modèle a donc pu être utilisé pour simuler une chronique de 100 000 ans de débits journaliers.



▲ Figure 10. – Relation entre les valeurs initiales de A générées par le modèle journalier et optimisées par le modèle horaire.

	<b>NASH (%)</b>	<b>Erreur bilan (%)</b>
Hiver	81,46	-2,35
Été	88,51	4,04

◀ Tableau 4. – Critère de comparaison des débits journaliers observés et simulés par le modèle horaire.

Cette chronique a permis d'estimer les volumes journaliers de fréquence exceptionnelle, de tester l'impact de différentes règles de gestion sur la fréquence de déversement par le déversoir de crue, d'établir des statistiques sur les cotes atteintes par le plan d'eau...

Dans ce cas, l'intérêt de la méthode est de disposer d'une très longue chronique de débits journaliers qui permet d'effectuer très facilement tous les calculs liés à la gestion d'un ouvrage.

#### ■ *Projet de réalisation d'une retenue d'écêtement des crues sur la rivière d'Agay à St-Raphaël*

(département du Var) (N. Folton et al., 1996)

Le projet consiste en l'étude de faisabilité de retenues pour limiter les débits à l'aval à des valeurs en accord avec les capacités d'évacuation du cours d'eau à la traversée de la zone péri-urbaine.

La méthode doit estimer les volumes stockables nécessaires pour limiter le débit centennal et calculer les débits de référence de crues pour le calcul des ouvrages évacuateurs.

L'obtention d'hydrogrammes de crue à pas de temps fin dans une grande plage de fréquence était nécessaire pour aborder le problème posé.

Une chronique de débits était disponible sur le bassin versant. Le pluviographe en exploitation sur le bassin n'a permis de récupérer que quelques couples averses-crues. Ces observations ont toutefois suffi à paramétrer le modèle de transformation pluie-débit au pas de temps horaire (GR3H).

Le modèle de génération de pluie horaire a été utilisé dans sa version régionalisée, avec un calage local grâce à l'information disponible des chroniques de pluie journalières.

Ceci a permis une simulation de 1 000 ans de pluie horaire, et des hydrogrammes de crues associés. L'ensemble des hydrogrammes a servi aux calculs d'hydraulique transitoire du stockage et déstockage des retenues. Les distributions de fréquence des débits sortants ont pu être aussi construites de manière empirique, pour différentes hypothèses de volume de retenue et de débit d'évacuation des ouvrages de fuite (figure 11).

On remarque, figure 11, qu'un débit de fuite de 30 m<sup>3</sup>/s lamine mieux le débit décennal que les autres options. Par contre, cette option conduit à un débit sortant de fréquence centennale bien plus élevé (saturation de la retenue et déversement par le déversoir de surface). La solution 40 m<sup>3</sup>/s aboutit

au débit sortant centennial le plus faible ; mais on note que la distribution de fréquence décroche brusquement au-delà de la fréquence centennale. La solution retenue est un débit de 50 m<sup>3</sup>/s, qui garantit un débit sortant inférieur à 50 m<sup>3</sup>/s jusqu'à pratiquement une période de retour de 200 ans. Notons aussi que les trois solutions ne sont d'aucun intérêt pour les crues de fréquences plus rares.

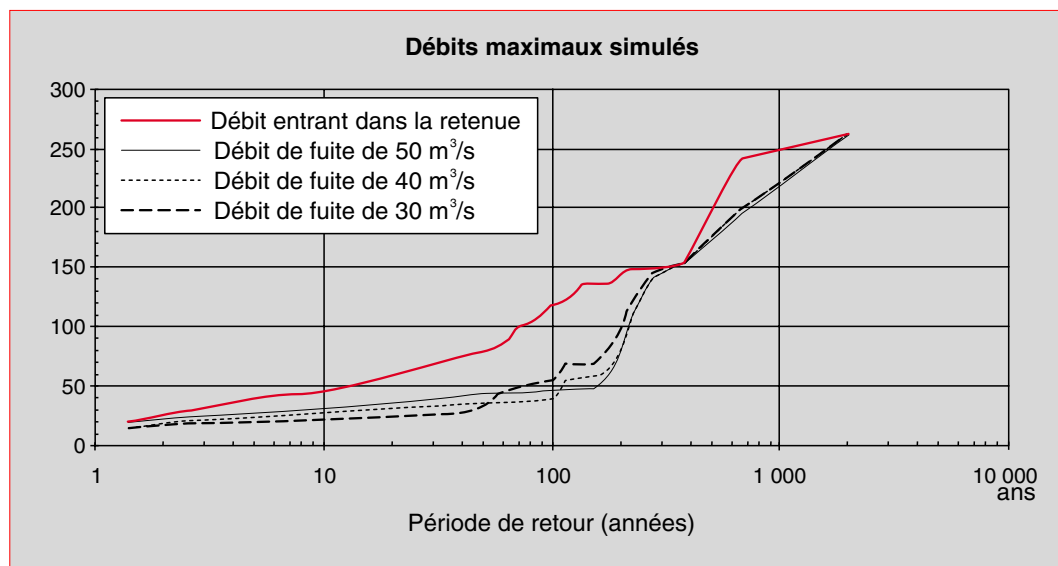
Ici aussi la méthode, bien adaptée au problème posé, a permis d'obtenir sans difficulté les statistiques des débits sortants.

Outre ces deux exemples, nous utilisons couramment cette méthode pour l'estimation de débits de référence de crue sur l'ensemble de la plage de fréquence (du décennal au décennal) pour différentes applications : estimation de courbes intensité-durée-fréquence de pluie, ouvrages de sécurité des barrages, aménagement de cours d'eau...

### Conclusion

L'application présentée sur un petit bassin versant méditerranéen montre que la méthodologie donne des résultats très corrects. Elle aboutit à un modèle intégré susceptible de générer de longues chroniques continues de débits journaliers, et à la simulation au pas de temps horaire des épisodes de hautes eaux. Le concepteur d'une retenue d'eau

Figure 11. – Simulation de 1000 ans de pluie horaire...



a ainsi à sa disposition une information hydrologique très complète, tant pour l'étude des apports que pour la conception des ouvrages d'évacuation des crues.

Dans son développement actuel, outre quelques améliorations légères, la méthode nécessite une information hydrologique relativement importante, qui n'est pas toujours disponible sur les sites à étudier. En France, l'information pluviométrique journalière est disponible et son transfert éventuel sur le bassin à étudier ne pose pas de problème particulier. Il n'en est pas de même pour l'information pluviométrique horaire. Ce constat conduit nos recherches actuelles à la régionalisation du modèle de simulation de pluies horaires grâce à la seule information journalière ; actuellement, cette régionalisation est pratiquement opé-

rationnelle sur la zone méditerranéenne française. La même remarque, avec quelques nuances, peut être faite pour les débits. Le calage du modèle pluie-débit au pas journalier peut être effectué sur de nombreux bassins versants et des essais de régionalisation des paramètres sont en cours. Par contre, le calage au pas horaire se heurte au manque de disponibilité des données pluviométriques horaires, ce qui implique d'aborder le transfert de l'information du modèle journalier de transformation de la pluie en débit, vers le modèle horaire.

Les exemples d'application présentés montrent toutefois que la méthode est applicable à partir de chroniques partielles d'information, pour apporter et tester différentes solutions aux problèmes de conception et de gestion des barrages. □

### Résumé

Le modèle hydrologique présenté se propose de simuler le fonctionnement en continu d'une retenue d'eau grâce à la génération d'une longue chronique de débit (1 000 ans par exemple). Ceci permet d'appréhender conjointement l'estimation des apports et la gestion des crues. La génération d'une information temporelle en continu présente *a priori* deux avantages principaux : - différentes règles de gestion de la retenue peuvent être testées ; le traitement statistique *a posteriori* des scénarios permet une expression en terme de défaillance ; - la crue de projet n'est pas unique et réduite à une forme synthétique, car une succession de crues, situées dans le contexte de remplissage de la retenue, sont à la disposition du concepteur pour tester le fonctionnement des ouvrages hydrauliques d'évacuation, et effectuer l'étude statistique des débits sortants de la retenue. Le principe de la méthode est basé sur deux modèles de simulation aléatoire des pluies. Les pluies journalières sont générées en continu ; le modèle de génération de pluies horaires est activé lorsque la pluie journalière excède 20 mm. Ces modèles sont couplés à une modélisation de la transformation de la pluie en débit qui fonctionne normalement au pas journalier et au pas horaire en période de crue. La note présente la méthode et les différents modèles utilisés, ainsi que des exemples d'application.

### Abstract

The hydrological model presented here is used to simulate the continuous operation of a dam, by generating flow data over a long period (1,000 years for example). This enables water volumes to be assessed as well as flood management. The generation of continuous real time information has two main advantages. Firstly, different dam management rules can be tested. Secondly, breakdowns can be analysed, after the event, by statistical processing of scenarios. The flood simulation is not a single event reduced to an artificial form: a series of floods, that build up behind the dam, are available to the designer to test the operation of the sluices and to carry out a statistical study of the flow leaving the dam. The method is based on two random rainfall generator models. Daily rainfall is generated continuously. The hourly rainfall generator model is activated when daily rainfall exceeds 20 mm. These models are linked to a model that converts rainfall into flow normally calculated on a daily basis but switching to an hourly basis during flooding. This paper presents the method and the various models used and also describes some examples.

## Bibliographie

- ARNAUD, P., LAVABRE, J., 1995. Couplage de modèles de simulation de hyétogrammes aux pas de temps journalier et horaire. Les modèles au Cemagref - *Séminaire inter-chercheurs*, Tome 1, p. 23-31.
- CERNESSON, F., 1994. Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens, *Thèse de doctorat* de l'université Montpellier II, 240 p + annexes, 1994.
- CERNESSON, F., LAVABRE, J., MASSON, J.-M., 1996. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *In Atmospheric Research*, n° 42, p. 149-161.
- DUMONT D'AYOT, G., 1993. Augmentation de la capacité des retenues, École nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble et Cemagref Aix-en-Provence, Division ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation, 35 p + annexes, 1993.
- EDIJATNO, 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier, *Rapport de thèse*, université Louis Pasteur de Strasbourg.
- FOLTON, N., LAVABRE, J., ROYET, P., 1996. Étude hydraulique pour l'aménagement de barrages écrêteurs de crue sur les bassins d'Agay. Commune de Saint-Raphaël, *Étude réalisée pour le SIVOM Fréjus St-Raphaël*, 20 p. + annexes.
- GOETTMANN, P., LAVABRE, J., 1996. Étude hydrologique du Salagou. *Étude réalisée pour le conseil général de l'Hérault*.
- LABORDE, S., 1991. Modèle stochastique de hyétogramme horaire, *Mémoire de stage* ISIM et Cemagref, Aix-en-Provence, division hydraulique et irrigation, 25 p.+ annexes, 1991.
- LAVABRE, J., ARNAUD, P., FOLTON, N., MICHEL, C. 1996. Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt, *Ingénieries - EAT*, n°7, sept 1996, p 21 à 30.
- MAKHLOUF, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres, *Thèse* de l'université Paris XI, 227 p + annexes, 1994.
- MICHEL, C., 1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux, Cemagref Antony, 530 p.
- MICHEL, C., EDIJATNO, LEVIANDIER, T., 1991. Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. *Rapport quadriennal* 1987-1990 pour la XXème Assemblée générale de l'union géodésique et géophysique internationale à Vienne, 11-24 août 1991. Publié avec le concours de l'Académie des Sciences de Paris, p. 219-222.
- NASCIMENTO, N.-O., 1994. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. *Rapport de thèse* de l'E.N.P.C.
- RIBERO, E., 1992. Eléments de régionalisation d'un modèle stochastique et simulation de hyétogrammes horaires, *Mémoire de stage* ENGREF et Cemagref, Aix-en-Provence, Division hydraulique et irrigation, 50 p. + annexes, 1992.
- VULLIET, M.-F., 1993. Analyse d'un modèle stochastique de simulation de hyétogrammes horaires, Institut des sciences de l'ingénieur de Montpellier et Cemagref Aix-en-Provence, Division ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation, 45 p + annexes.
- YANG, X., 1993. Utilisation d'un modèle global pluie-débit pour la prévision des crues, *Rapport de thèse* de l'E.N.P.C.