

La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues

A Stochastic Model of Hourly Rainfall with Rainfall-Runoff Transformation for Predicting Flood Frequency

P. Arnaud et J. Lavabre

Volume 13, numéro 4, 2000

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705402ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705402ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Arnaud, P. & Lavabre, J. (2000). La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 13(4), 441–462. <https://doi.org/10.7202/705402ar>

Résumé de l'article

Pour étudier les distributions de fréquences des variables hydrologiques (pluies et débits) au pas de temps horaire, une méthodologie associant un générateur de chroniques de pluies horaires et un modèle conceptuel global de transformation de la pluie en débit a été développée. Sur une période de simulation donnée, la méthode génère une collection de scénarios de crues vraisemblables utilisée en prédétermination des risques hydrologiques. Les distributions de fréquences des variables hydrologiques sont construites empiriquement à partir des événements de pluies et de crues générés. L'extrapolation des distributions de fréquences des variables hydrologiques vers les fréquences rares se fait de façon empirique en augmentant la période de simulation, et non plus sur l'ajustement direct des distributions observées. Le principe de cette méthode (appelée SHYPRE : Simulation d'HYdrogrammes pour la PRÉdétermination) est donc d'utiliser les observations pour décrire le phénomène, afin de le reproduire statistiquement et de s'affranchir ainsi du manque d'observation. Son utilisation permet une estimation originale des quantiles de crues de fréquences courantes à rares et présente l'intérêt d'obtenir une information temporelle complète sur ces crues. De plus, on montre que l'approche fournit une estimation de quantiles de crues bien plus robuste que les ajustements statistiques des distributions observées, même pour les événements de fréquences courantes. Cette robustesse provient d'une meilleure prise en compte de l'information pluviométrique et de la stabilité de la paramétrisation du modèle pluie-débit.

La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues

A stochastic model of hourly rainfall with rainfall-runoff transformation for predicting flood frequency

P. ARNAUD ^{*1}, J. LAVABRE ²

Reçu le 20 avril 2000, accepté le 10 janvier 2001**.

SUMMARY

A statistical approach was developed for the study of frequency distributions of hydrologic variables. The Simulated HYdrographs for flood PRobability Estimation (SHYPRE) method uses observed values to describe hydrological phenomena and successfully reproduces observed-values statistics. SHYPRE combines a stochastic model for generating hourly rainfall with a model that transforms rainfall runoff into discharge.

The rainfall generation model is a stochastic model that uses a geometric description of temporal rainfall signals, the so-called direct approach. The model assumes that a rainfall event is a random and intermittent process (series of dry and rainy events) describable by stochastic laws. Generation of a temporal rainfall signal has two stages. First, descriptive analysis of hyetographs indicates which variables best represent the internal temporal structure of observed hourly rainfall episodes; the model hypothesizes that each descriptive variable is independent and definable by a theoretical probability distribution fitted to observed values. Second, rainfall episodes are generated using descriptive variables derived randomly (using the Monte Carlo method) from their probability distributions.

The hydrological model is a lumped conceptual model with three parameters on an hourly time step. The model operates in event mode, which is to say it is calibrated for each independent flood event. Parameters are independent of rainfall for all observed floods. Parameter independence, which is also analysed, makes it possible to randomly generate flood events for any simulated rainfall event.

1. Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon, cc MSE, 34095 Montpellier cedex 5, France.

2. Cemagref, Le Tholonet BP 31, 13612 Aix-en-Provence, France.

* Correspondance. E-mail : parnaud@msem.univ-montp2.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 14 septembre 2001.

Parameters for each model are estimated from hourly rainfall and runoff information. Each simulated hyetograph is transformed into a flood by the hydrological model. Thus, numerous different flood events are simulated over a given period, an improvement over standard design floods that yields full hydrological temporal data and allows better evaluation of hydrologic risks.

The rainfall model was calibrated with 50 rain gauge stations located on the French Mediterranean seaboard and simulations were performed for each. Observed and calculated values were compared for means and different quantiles of test variables (maximum rainfall in 1 to 72-hour periods). Results were good throughout the study zone. At stations with significantly different rainfall, mean deviation of test variables was between -10% and $+10\%$. A good match was obtained between simulated and observed rainfall quantiles (with a fitted Gumbel probability distribution) in the observable frequency range up to the decennial return period. Simulated rainfall events were then transformed into hourly flow events. Maximum discharges of different duration were extracted from simulated hydrographs and compared with maximum observed discharges, and run by simple empirical transfer of simulation values. The entire frequency range required no new hypotheses about the probability distributions of discharges of different durations. The model reproduced flood discharge quantiles in the observed frequency range.

SHYPRE yields useful temporal data, namely hyetograph and flood shapes. For example, in hydraulic studies this information allows estimation of construction-site effects as well as the study of their downstream discharges. Moreover, temporal data generated by the model can replace single-design rainfall or floods. It allows better estimates of flood volume, a significant gain, for whereas peak discharges of exceptional floods can be estimated hydraulically (using flood high-water marks), runoff volume data are generally unavailable.

SHYPRE handles extreme-value samples with relative stability, a robustness arising from two features:

- The rainfall model examines hourly rainfall descriptors and temporal and quantitative rainfall data are reproduced by analysis of an average of several thousand storms per station. The large number of variables and values analysed ensures the accuracy of rainfall-model parametric calibration and reduces extreme-value sampling problems.
- The parametric independence of the rainfall-runoff model from rainfall allows it to produce results not especially influenced by severe flood observations. Thus, calibration is not affected by discharge sampling problems and is therefore much more stable than simple statistical operations on discharges (for which, moreover, extreme-flood observation is essential).

SHYPRE yields different estimations of flood quantiles of common to rare frequencies as well as complete temporal flood data. Moreover, it provides more stable estimates of flood quantiles than statistical distributions fitted on observed values, even for frequent events. The improvement stems from better use of rainfall data and from the parametric design stability of the rainfall model and rainfall-runoff model.

While the rainfall model is essential to SHYPRE, the rainfall runoff model is also important: it avoids certain weaknesses of existing methods that put extreme discharges and rainfall statistics in linear relationships (problematic with common and rare quantiles in particular), and it generates more realistic flood events.

Key-words: *stochastic model, rainfall-runoff model, hourly time step, flood frequency estimation, French Mediterranean seaboard.*

RÉSUMÉ

Pour étudier les distributions de fréquences des variables hydrologiques (pluies et débits) au pas de temps horaire, une méthodologie associant un générateur de chroniques de pluies horaires et un modèle conceptuel global de transformation de la pluie en débit a été développée. Sur une période de simulation donnée, la méthode génère une collection de scénarios de crues vraisemblables utilisée en prédétermination des risques hydrologiques. Les distributions de fréquences des variables hydrologiques sont construites empiriquement à partir des événements de pluies et de crues générés. L'extrapolation des distributions de fréquences des variables hydrologiques vers les fréquences rares se fait de façon empirique en augmentant la période de simulation, et non plus sur l'ajustement direct des distributions observées. Le principe de cette méthode (appelée SHYPRE : Simulation d'HYdrogrammes pour la PRÉdétermination) est donc d'utiliser les observations pour décrire le phénomène, afin de le reproduire statistiquement et de s'affranchir ainsi du manque d'observation. Son utilisation permet une estimation originale des quantiles de crues de fréquences courantes à rares et présente l'intérêt d'obtenir une information temporelle complète sur ces crues. De plus, on montre que l'approche fournit une estimation de quantiles de crues bien plus robuste que les ajustements statistiques des distributions observées, même pour les événements de fréquences courantes. Cette robustesse provient d'une meilleure prise en compte de l'information pluviométrique et de la stabilité de la paramétrisation du modèle pluie-débit.

Mots clés : *modèle stochastique, modèle hydrologique, pas de temps horaire, prédétermination des crues, pourtour méditerranéen français.*

1 – INTRODUCTION

Une des préoccupations des hydrologues est l'estimation du risque hydrologique. Elle est nécessaire dans l'aménagement du territoire rural ou urbain, pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de ponts, de voies de communication à proximité de cours d'eau, etc. Les études sur le risque hydrologique sont effectuées sur les bassins versants mis en cause. Elles passent essentiellement par l'analyse statistique des événements passés et visent à estimer la probabilité d'apparition d'un événement hydrologique donné. C'est ce que l'on appelle couramment la prédétermination des débits.

Cette prédétermination des débits peut être étudiée uniquement à partir de l'information des débits observés sur une certaine période. L'ajustement d'une loi statistique sur la distribution de fréquences empiriques d'une caractéristique hydrologique observée (par exemple le débit de pointe) permet d'obtenir une expression analytique. La valeur d'une caractéristique hydrologique se déduit alors soit analytiquement d'une probabilité ou d'une période de retour lorsque la loi ajustée est simplement inversible, soit par des techniques de simulation lorsque la loi ajustée est difficilement inversible. On trouve alors une multitude de lois de probabilité théoriques permettant l'ajustement d'une distribution de fréquences observées, répertoriées dans de nombreux ouvrages d'hydrologie (CHOW *et al.*, 1988 ; LLAMAS, 1993). Ces lois qui résument l'information sur les données observées par une formule analytique faiblement paramétrée (généra-

lement entre 1 et 3 paramètres) permettent l'interpolation, et dans une certaine mesure l'extrapolation, des différents quantiles. Si on admet généralement que la restitution des quantiles associés à des périodes de retour inférieures à la durée d'observation est correcte, de grandes incertitudes liées à l'échantillonnage apparaissent pour les quantiles de fréquences plus rares. De plus, pour un même échantillon des résultats différents peuvent apparaître suivant le comportement en extrapolation des différentes lois ajustées sur la distribution des valeurs observées. La fiabilité de l'ajustement étant fonction de la taille de l'échantillon, on procède alors à une augmentation de la taille de l'échantillon ou de sa représentativité, par différentes méthodes parmi lesquelles :

- la méthode du renouvellement initiée par COX (1962) puis SHANE et LYNN (1964) et BERNIER (1967) et adaptée à l'estimation des probabilités de crues par l'étude d'un échantillon composé de valeurs supérieures à un seuil, repose sur deux hypothèses : l'occurrence des valeurs suit une loi de Poisson et la loi de probabilité de ces valeurs est de type exponentiel. La loi résultante est une combinaison de ces deux lois ;
- la méthode des années-stations ou approche régionale utilise l'information de plusieurs stations pour réduire l'influence des erreurs sur les données locales et des valeurs exceptionnelles. Après « homogénéisation », les données de différentes stations de mesure sont agglomérées et étudiées de façon régionale. L'accroissement de l'effectif permet aussi l'utilisation de lois à 4 paramètres comme la loi TCEV présentée par ROSSI *et al.* (1984) ;
- la prise en compte statistique de l'information historique est réalisée par des méthodes bayésiennes (MIQUEL, 1983). Elle vise à consolider la distribution des valeurs observées vers les fréquences faibles (événements rares).

Malgré ces précautions, les méthodes de prédétermination des débits basées sur l'unique information débit métrique restent particulièrement soumises aux problèmes de l'échantillonnage. L'ajustement statistique reste très fortement sensible à la présence, ou à l'absence, des valeurs « exceptionnelles » dans l'échantillon des observations. Le poids de ces valeurs, souvent entachées d'une forte incertitude météorologique, est extrêmement important dans la détermination des quantiles rares. Bien entendu le choix de la loi de probabilité influe sur les estimations, et notamment lors d'une utilisation en extrapolation.

La prédétermination des débits peut aussi être approchée par l'étude statistique des pluies. Généralement, cette étude amène à la détermination d'une pluie de projet liée à une probabilité d'apparition. La pluie de projet peut être appréhendée de deux façons (CIGB, 1992) :

- par une approche probabiliste : la pluie de projet est liée à une probabilité d'apparition ou une période de retour. Son élaboration repose sur l'analyse statistique de divers éléments (hauteur, durée, forme) des événements pluvieux (SIGHOMNOU et DESBORDES, 1988) ;
- par une approche maximaliste ou d'événement maximal probable : la pluie de projet est alors définie comme la plus forte précipitation physiquement possible sur une surface donnée, pour un site et une époque donnés (COLLIER et HARDAKER, 1996 ; HERSHFIELD, 1961 ; KOUTSOYIANNIS, 1999).

La pluie de projet est transformée en crue de projet par une modélisation hydrologique simple. Cette crue de projet sert alors directement au dimensionnement des ouvrages. Divers problèmes apparaissent alors, comme le problème d'échantillonnage sous-jacent à l'étude statistique des pluies servant à l'élaboration de la pluie de projet (problème identique à l'étude statistique des débits seuls) ou le problème de l'affectation d'une fréquence à une pluie de projet synthétique, puis celui de l'affectation d'une fréquence à l'hydrogramme qui en résulte.

L'information fréquentielle des pluies peut aussi être utilisée directement pour renseigner le comportement des débits vers les fréquences rares. C'est le principe de la méthode du Gradex mise au point par GUILLOT et DUBAND (1967). L'extrapolation de la distribution de fréquences des débits est réalisée de façon parallèle à la distribution de fréquences des pluies, en faisant l'hypothèse de la saturation des sols pour les pluies de fréquences rares. Des variantes à la méthode du Gradex ont été développées faisant varier progressivement le comportement asymptotique des débits en fonction de la période de retour étudiée (MARGOUM *et al.*, 1994).

L'utilisation de l'information pluviométrique améliore la connaissance des quantiles de crues rares. Cependant, l'absence de chroniques suffisamment longues, les problèmes de métrologie lors de l'observation de forts événements (pluviomètres qui débordent, stations limnimétriques noyées ou emportées) et la difficulté d'attribuer une fréquence aux valeurs exceptionnelles observées, rendent les résultats de ces méthodes statistiques extrêmement sensibles à l'échantillonnage des valeurs fortes.

Les recherches en milieu non jaugé ont conduit certains chercheurs à introduire, dans l'estimation des quantiles de crues, l'utilisation de générateurs de pluie couplés à une transformation de la pluie en débit. Cette approche a été initiée par EAGLESON (1972) et utilisée dans de nombreuses autres études. La méthode est basée sur deux éléments principaux (CADAVID *et al.*, 1991) :

- un modèle probabiliste qui introduit une composante stochastique à travers un modèle de pluie ;
- un modèle de transformation de la pluie en débit qui fournit un débit de pointe et l'heure du débit de pointe pour une pluie efficace donnée.

Par la combinaison de ces deux éléments, on calcule la distribution de probabilité des débits de pointe. Différents modèles hydrologiques ont été utilisés : ceux basés sur la théorie de l'onde cinématique (CADAVID *et al.*, 1991 ; EAGLESON, 1972 ; SHEN *et al.*, 1990) comme ceux basés sur l'hydrogramme unitaire développé par RODRIGUEZ-ITURBE et VALDES (1979) (HEBSON et WOOD, 1982). Peu d'études ont cependant comparé les distributions générées aux distributions observées. On peut citer dans ce cas les travaux de BEVEN (1987) ou BLAZKOVA et BEVEN (1997) qui présentent un modèle stochastique de pluie utilisé avec TOPMODEL (BEVEN et KIRKBY, 1979).

C'est vers cette approche que nous avons mené nos recherches, à travers la méthode SHYPRE. Au préalable, un modèle stochastique de génération de hyétoigrammes au pas de temps horaire a été développé. Une fois couplé à une modélisation de la transformation de la pluie en débit, ce modèle permet la génération de multiples scénarios de crues de diverses formes qui remplacent les crues de projet classiques et fournissent une information temporelle com-

plète à l'aménageur pour dimensionner un ouvrage. Outre son utilisation pour la gestion des crues, l'étude de la pluie au pas de temps horaire et sa modélisation en scénarios de crues sur de longues périodes de simulation permet une autre approche de la prédétermination des pluies et des débits. L'objet de cet article est de présenter l'utilité de cette méthode pour la connaissance des quantiles de crues.

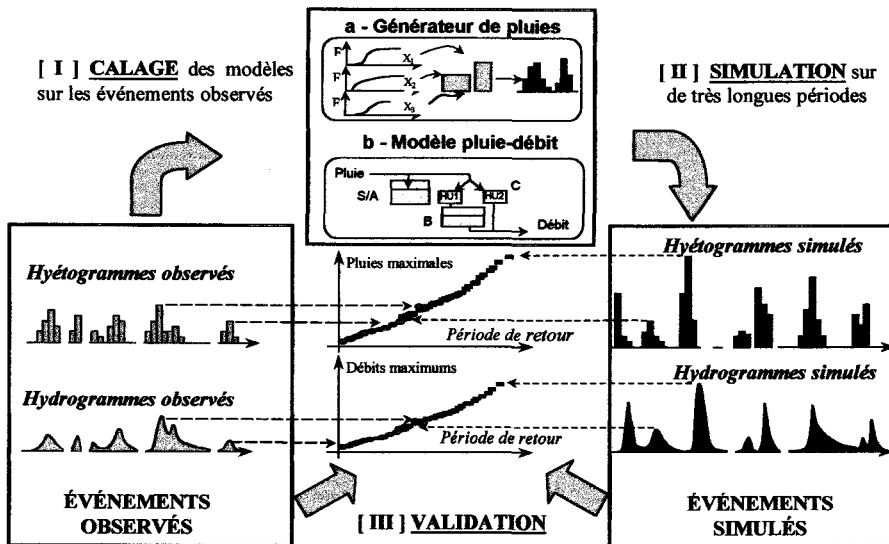


Figure 1 Principe de la méthode.
Principle of the method.

2 - MÉTHODOLOGIE

La méthode est basée sur deux modélisations : la modélisation stochastique de scénarios de pluies horaires et la modélisation de la transformation de la pluie en débit. Les paramètres de chaque modèle sont estimés à partir de l'information temporelle de pluies et de débits mesurés au pas de temps horaire (étape [I] de la figure 1). Ainsi le modèle de pluie peut générer des événements indépendants de pluies horaires (hyétoigrammes simulés) qui vont être transformés en événements de débits horaires (hydrogrammes simulés), et cela sur de longues périodes de simulations (étape [II] de la figure 1) liées aux périodes de retour maximales étudiées. Les hauteurs de pluie maximales et les débits moyens maximums, de différentes durées, des événements générés sont alors extraits et mis en fréquence. On peut alors comparer les distributions de fréquences empiriques des mêmes variables observées et simulées (étape [III] de la figure 1). C'est l'étape de validation des résultats de la modélisation. L'ensemble de la plage des fréquences est étudié sans faire d'hypothèses sur les distributions de fréquences des hauteurs de pluie maximales et des débits moyens maximums de différentes durées.

2.1 Génération des pluies horaires

Des chroniques de pluies synthétiques peuvent être générées au pas de temps horaire par un modèle de pluie. Il existe différents types de modèles de génération de pluie à pas de temps fin parmi lesquels on peut citer :

- les modèles basés sur une description adimensionnelle des hyéto-grammes (GARCIA-GAZMAN et ARANDA-OLIVIER, 1993 ; HUFF, 1967) ;
- les modèles basés sur une désagrégation de la pluie journalière (ECONO-POULY *et al.*, 1990 ; KOUTSOYIANNIS, 1994 ; WOODHISER et OSBORN, 1985) ;
- les modèles basés sur les processus d'agrégation résultant des études de LECAM (1961) (ACREMAN, 1990 ; COWPERTWAIT, 1991 ; ONOF *et al.*, 1995 ; RODRIGUEZ-ITURBE *et al.*, 1987 ; WAYMIRE et GUPTA, 1981).

Le modèle de génération de pluie développé dans la méthode SHYPRE appartient à la famille des modèles stochastiques dits à « approche directe », basés sur une description géométrique du signal temporel de pluies. Inspiré des travaux de TOURASSE (1981) puis LEBEL (1984), le modèle présenté ici a été développé par CERNESSON (1993) et ARNAUD (1997). Ce modèle part du principe que la pluie est un processus aléatoire et intermittent fait d'une succession d'états secs et pluvieux, dont l'évolution est décrite par des lois de nature stochastique. La génération du signal temporel de pluie est alors réalisée en deux étapes (ARNAUD *et al.*, 1999). La première étape est l'étude descriptive du phénomène. Elle amène au choix des variables qui vont représenter au mieux la structure temporelle interne des hyéto-grammes observés. Par hypothèse chaque variable descriptive sera indépendante des autres, et sera représentée par une loi de probabilité théorique ajustée sur les valeurs observées. La seconde étape est la restitution de chroniques de pluie par les variables descriptives générées de façon aléatoire par une méthode de Monte Carlo, après inversion de leur loi de probabilité.

Le calage du modèle porte sur l'analyse d'épisodes pluvieux au pas de temps horaire, identifiés par une succession de cumuls journaliers de pluie supérieurs à 4 mm et présentant un cumul journalier supérieur à 20 mm. On extrait alors de ces épisodes, les valeurs des huit variables servant à les décrire (CERNESSON *et al.*, 1996) : le nombre d'épisodes par année, le nombre de périodes pluvieuses (groupes d'averses sans période sèche) par épisode, le nombre d'averses (hyéto-gramme élémentaire ayant un seul maximum) par période pluvieuse et pour chaque averse sa durée, son intensité moyenne, la position relative de l'intensité maximale, le rapport entre l'intensité maximale et l'intensité moyenne, et enfin la durée sèche qui la sépare de l'averse suivante et qui vaut zéro pour deux averses groupées.

L'étude des données d'une cinquantaine de stations pluviographiques situées sur le pourtour méditerranéen français (*figure 2*), a permis de définir un type de loi de probabilité théorique pour chaque variable, qui caractérise au mieux leur distribution de fréquences (ARNAUD, 1997 ; CERNESSON, 1993 ; CERNESSON *et al.*, 1996) : la loi de Poisson est utilisée pour le nombre d'épisodes par an et la durée des averses ; la loi géométrique est utilisée pour le nombre de périodes pluvieuses, le nombre d'averses et la durée sèche ; la loi normale tronquée entre 0 et 1 est utilisée pour la position du maximum et la loi exponentielle est utilisée pour le rapport des intensités maximale et moyenne, et pour la variable intensité moyenne. Le même type de loi est donc utilisé pour

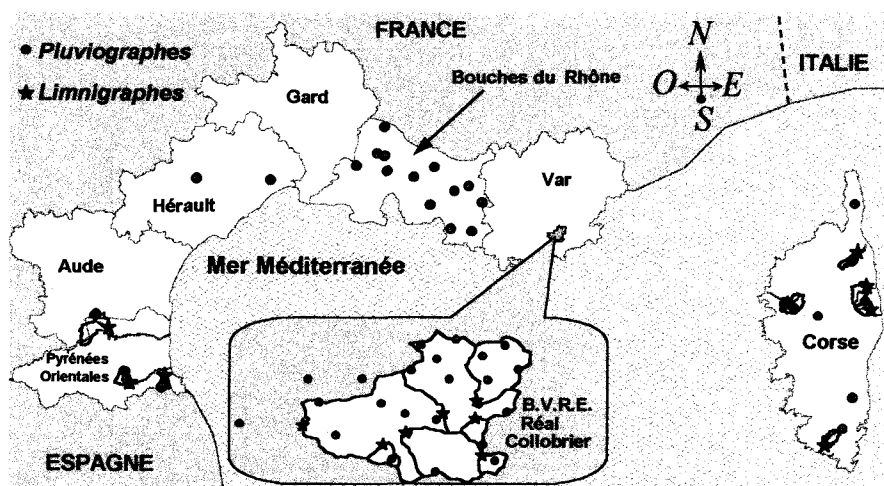


Figure 2 Localisation des pluviographes et des limnigraphes.
Location of rainfall and flow gauges.

une variable donnée, pour ajuster chaque échantillon de valeurs associées aux données d'un poste pluviographique.

L'ajustement de ces lois de probabilité est réalisé pour chaque variable et chaque poste. Au total, le modèle de génération de pluie horaire nécessite 21 paramètres déterminés à partir des chroniques de pluies horaires observées, pour les deux saisons considérées : l'hiver de décembre à mai et l'été de juin à novembre. Ce nombre de paramètres peut paraître important, mais une étude de sensibilité, réalisée en vue de régionaliser le modèle, a montré que seulement 5 paramètres suffisent pour couvrir la plage de variabilité pluviographique importante de la région méditerranéenne française (ARNAUD, 1997). Les autres paramètres peuvent être fixés à une valeur régionale soit parce qu'ils sont peu variables, soit parce que le modèle est peu sensible à leur fluctuation. Ces paramètres que l'on peut fixer dans le cadre d'une régionalisation sont surtout des paramètres influant sur la géométrie des hyétogrammes.

Les hyétogrammes horaires synthétiques sont ensuite construits à partir des variables descriptives générées par un tirage aléatoire dans leur loi de probabilité suivant une méthode de Monte Carlo et suivant un ordre précis. La génération des variables se fait indépendamment au fur et à mesure des besoins sauf en ce qui concerne la durée et l'intensité moyenne des averses. Ces deux variables sont alors générées de façon conditionnelle afin de respecter leur liaison (ARNAUD, *et al.*, 1999). On obtient ainsi de multiples scénarios de pluies horaires générés sur de très longues périodes de simulation.

2.2 Génération d'événements de crue

Cette phase vise la transformation des hyétogrammes générés par le modèle de pluie, en événements de crues grâce à un modèle de transformation de la pluie en débit. Il est clair que plusieurs types de modélisations de la transformation de la pluie en débit peuvent être utilisés. Cependant, le modèle

hydrologique retenu a été choisi pour sa simplicité et sa capacité à bien reproduire les crues malgré sa faible paramétrisation. Un modèle global nous a semblé suffisant pour une application sur de petits bassins versants (entre 1 et 100 km²) où l'utilisation d'une pluie ponctuelle comme pluie de bassin reste acceptable.

Le modèle hydrologique utilisé est un modèle conceptuel global à trois paramètres fonctionnant au pas de temps horaire. Il s'agit du modèle GR3H (YANG, 1993), dont la structure est identique à celle du modèle journalier GR3J présenté par EDIJATNO et MICHEL (1989). Notons que dans le cas de notre approche, le modèle GR3H sert à transformer des événements de pluie indépendants. Il est donc utilisé en mode événementiel et en période de crue, ce qui nous permet de négliger le phénomène d'évaporation. Ce modèle est composé de deux réservoirs et de deux hydrogrammes unitaires notés HU1 et HU2 (figure 1) :

- le premier réservoir, caractérisé par une capacité maximale A, fixée à 330 mm, gère la fonction de production. Il commande la répartition de la pluie brute $P(t)$ (où t est le temps) en deux composantes : $P_s(t)$ et $P_r(t)$. La quantité $P_s(t) = P(t)[1 - (S(t)/A)^2]$ sert au remplissage du réservoir A tant que celui-ci n'est pas plein et elle est perdue pour l'écoulement, $S(t)$ étant le niveau de remplissage du réservoir A. Le complément, $P_r(t) = P(t)[S(t)/A]^2$ va servir à l'écoulement en passant par le sous-modèle de routage ;
- le sous-modèle de routage comprend deux évacuations parallèles. La partie la plus importante, 90 % de $P_r(t)$, transite à travers le premier hydrogramme unitaire HU1 qui permet le remplissage du second réservoir de capacité maximale B en mm. La vidange de ce réservoir fournit la première partie du débit résultant : $Q_r(t) = R(t)^5/4B^4$ où $R(t)$ est le niveau de remplissage du réservoir B. Le reste de la pluie, 10 % de $P_r(t)$, transite au travers du second hydrogramme unitaire HU2 pour fournir la seconde partie du débit résultant : $Q_o(t)$. Les deux hydrogrammes unitaires sont caractérisés par leur temps de montée : le paramètre C en heure. Ils sont définis par les expressions analytiques suivantes :

si $0 < t < C$	si $C < t < 2C$	si $t < 2C$
$HU1(t) = 3t^2/C^3$	$HU1(t) = 0$	$HU1(t) = 0$
$HU2(t) = HU1(t)$	$HU2(t) = 3(2C - t)^2/2C^3$	$HU2(t) = 0$

Le modèle fonctionnant en mode événementiel, une initialisation du système doit être effectuée au début de chaque crue étudiée. Cette initialisation consiste à fixer les taux de remplissage initiaux de ses deux réservoirs, $S(0)/A$ et $R(0)/B$, dont dépend fortement la réponse du modèle. Le taux de remplissage initial du second réservoir, $R(0)/B$, est déterminé à partir de la valeur du débit observé au début de la crue, noté Q_0 (EDIJANO, 1991 ; YANG, 1993). Le taux de remplissage initial du premier réservoir, $S(0)/A$, doit être par contre optimisé pour chaque crue.

Les paramètres du modèle sont donc $S(0)/A$, B et C. Leurs valeurs sont alors optimisées numériquement, pour chaque événement de crue, selon une méthode s'apparentant aux techniques de gradient et suivant le critère d'adéquation de Nash (critère d'écart quadratique entre les débits observés et les débits calculés par le modèle). Le modèle reproduit parfaitement les écoule-

ments si le critère de Nash vaut 100 %. On considère que le calage est bon pour des valeurs du critère supérieures à 80 %.

Le calage du modèle GR3H sur un bassin versant, consiste donc à trouver le jeu optimum des paramètres ($S(0)/A$, B et C) pour chaque événement pluie-débit observé sur ce bassin versant. Les valeurs des paramètres obtenues pour chaque crue d'un même bassin sont ensuite utilisées pour ajuster les lois de probabilité qui serviront à générer les valeurs des paramètres nécessaires lors de la simulation. Comme pour le modèle de pluie, les paramètres de la modélisation pluie-débit sont calculés pour les deux saisons définies, ce qui permet de distinguer une certaine typologie de crues, avec les crues estivales (événements pluviométriques plutôt intenses sur sols secs) et les crues hivernales (événements pluviométriques plutôt longs sur sols humides).

Pour chaque événement de pluie simulé, on génère un jeu de paramètres, $S(0)/A$, B et C , par un tirage aléatoire dans leur loi de probabilité : la loi normale tronquée entre 0 et 1 pour $S(0)/A$ et la loi lognormale pour B et C . La valeur de Q_0 , servant à initialiser le réservoir B , est fixée à la valeur médiane observée sur les crues du bassin considéré. L'examen de l'indépendance des paramètres a aussi été réalisé. Les paramètres sont linéairement indépendants de la pluie (coefficients de corrélation négligeables), ce qui permet de les générer de façon aléatoire quel que soit l'événement de pluie généré. Le paramètre C est indépendant des deux autres paramètres, ce qui permet aussi de le générer aléatoirement. Une liaison linéaire a par contre été constatée entre les valeurs du logarithme népérien de B et les valeurs de $S(0)/A$. Cette liaison a alors été intégrée lors de la génération des paramètres B et $S(0)/A$ par l'intermédiaire du coefficient de détermination (r^2) de la régression entre $S(0)/A$ et $\ln(B)$ (ARNAUD, 1997). La valeur de $S(0)/A$ est générée de façon aléatoire, et la valeur de B en est déduite en tenant compte à la fois des paramètres de la régression entre $S(0)/A$ et $\ln(B)$ et de la dispersion observée autour de cette régression.

2.3 Remarques préalables

Avant de présenter des résultats, il est important de rappeler que la méthode utilise l'information hydrologique uniquement pour reproduire le phénomène et que les variables de validation présentées dans les résultats, sont des variables n'intervenant pas directement dans la modélisation. Notons aussi que les débits générés sont des débits dits « hydrologiques ». La modélisation ne prend pas explicitement en compte les aspects hydrauliques du routage des débits dans le lit majeur du cours d'eau et notamment des éventuels champs d'inondation et leur pouvoir écrêteur, bien que ces aspects puissent être pris en compte grâce à l'information temporelle complète des événements de crues générés. Les hydrogrammes peuvent être générés sur de très longues périodes de simulation, ce qui permet d'étudier les crues de fréquences très rares. Dans cet article on se limitera à des périodes de simulation de 100 ans qui permettent d'apprécier les résultats de la méthode dans la gamme des observations et en début d'extrapolation vers les fréquences rares.

Notons enfin qu'une simulation sur une période donnée reste sujette à des problèmes d'échantillonnage vers ses valeurs extrêmes, tout comme les observations. Pour étudier ce problème, on a généré l'équivalent de 1 000 périodes de 100 ans sur un même poste. On a ainsi pu étudier les distributions d'échantillonnage des différents quantiles d'une distribution représentant 100 ans de

simulation. On observe alors l'augmentation de la dispersion et de la dissymétrie (positive) des distributions d'échantillonnage vers les quantiles rares. On trouve par exemple que pour une simulation sur une période de 100 ans, le quantile associé à la plus forte valeur aura 90 % de chance d'avoir une valeur comprise entre + 60 et - 35 % de sa valeur moyennée sur un millier de périodes de 100 ans. De même le quantile associé au rang 50 (valeurs classées par ordre décroissant) aura 90 % de chance d'avoir une valeur comprise entre plus ou moins 10 % de sa valeur moyenne. Par cette approche basée sur la simulation, on arrive à la conclusion qu'il faut générer au minimum une centaine de fois la période choisie (ici 100 ans) pour calculer une distribution moyenne donc les quantiles les plus rares présenteront moins de 10 % d'erreur due à l'échantillonnage des simulations. Pour les quantiles plus courants, l'erreur d'échantillonnage diminue nettement. Cette distribution moyenne n'en reste pas moins soumise à l'incertitude des paramètres du modèle face à l'échantillonnage des observations.

3 – APPLICATION

La méthode a été développée en région méditerranéenne. Cette zone présente une spécificité hydrologique en grande partie imputable :

- à la climatologie : précipitations intenses réparties sur une faible période de l'année, alternance de périodes humides et sèches qui conditionnent fortement l'état hydrique des bassins et leur aptitude à l'écoulement en crue ;
- aux caractéristiques physiques des bassins versants : fortes pentes, réseau hydrographique bien développé, faible indice foliaire de la végétation, etc., autant de caractéristiques aggravant le phénomène des crues.

3.1 Résultats du modèle de pluie

Le modèle de pluie a été calé sur une cinquantaine de postes pluviographiques situés sur le pourtour méditerranéen français (*figure 2*). La pluviométrie annuelle moyenne varie de 500 à 2 000 mm pour des postes dont l'altitude varie de 4 à 1 500 m.

Les performances du modèle sont jugées sur sa capacité à reproduire des variables « tests » : les pluies maximales de 1 à 72 heures. Ces variables sont représentatives de la structure temporelle des pluies et n'ont pas servi à la simulation des hyétogrammes. On compare alors la distribution de fréquences moyenne des variables « tests » issues des hyétogrammes générés sur 100 périodes de 100 ans, avec la distribution de fréquences des variables « tests » observées. Ces simulations ont été faites pour l'ensemble des 50 postes pluviographiques de la zone d'étude (ARNAUD *et al.*, 1999). On observe alors une bonne adéquation entre les distributions observées et les distributions issues des pluies simulées. Le modèle restitue correctement les pluies maximales de différentes durées, gage du respect de l'information temporelle des hyétogrammes simulés. Si on compare alors les valeurs observées

et calculées des moyennes et de différents quantiles des variables « tests », les résultats du modèle sur l'ensemble de la zone d'étude sont tout à fait satisfaisants. Pour des postes dont la pluviométrie est sensiblement différente, les écarts sur les moyennes sont compris entre -10% et $+10\%$ pour l'ensemble des variables « tests ». On obtient aussi une bonne adéquation entre les quantiles des pluies simulées et les quantiles de pluies observées (issus d'un ajustement par la loi de Gumbel) sur la gamme des fréquences observables jusqu'à la période de retour décennale (*figure 3* pour les pluies maximales en 1 et 24 heures).

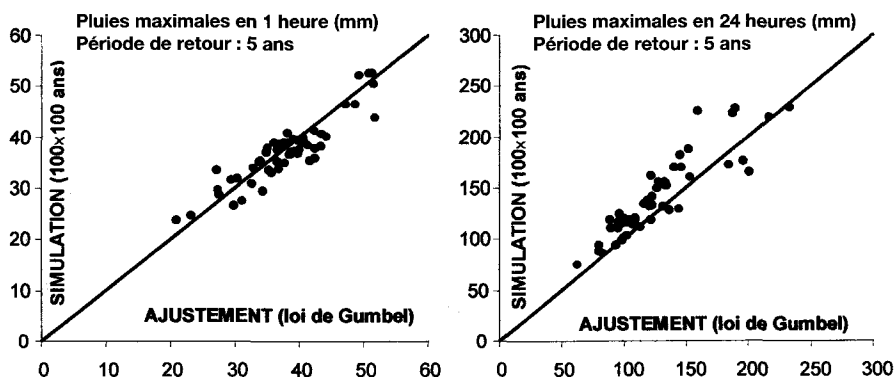


Figure 3 Quantiles quinquennaux des pluies maximales en 1 et 24 heures des 50 postes de la zone d'étude : comparaison des valeurs issues d'un ajustement de Gumbel sur les distributions observées et des valeurs issues de la simulation de hyétogrammes par la méthode SHYPRE.

Comparison of the 5-year quantiles of maximum rainfall over 1 and 24 hour periods for the 50 studied stations, estimated from an fitted Gumbel distribution and from hyetographs generated by SHYPRE method.

Le modèle restitue donc correctement les quantiles quinquennaux (et plus généralement toute la gamme des quantiles de fréquences courantes). Pour les quantiles de fréquences plus rares, on constate que la modélisation tend vers un comportement supérieur à celui d'une loi exponentielle. On arrive alors à des quantiles supérieurs à ceux donnés par l'extrapolation d'une loi, comme celle de Gumbel, ajustée sur les observations. Bien que l'analyse des quantiles extrêmes ne soient pas optimales pour les raisons d'échantillonnage évoquées dans le paragraphe 2.3, ce comportement est dû à une prise en compte appropriée du phénomène de persistance des averses dans une période pluvieuse (ARNAUD et LAVABRE, 1999).

3.2 Restitution des débits

Le calage du modèle pluie-débit a été effectué sur 15 bassins versants sélectionnés en fonction de la disponibilité en pluviographes et limnigraphes (*figure 2*) :

- 7 bassins versants appartenant au Bassin Versant de Recherches Expérimentales (BVRE) du Réal Collobrier (superficies allant de $1,5$ à $70,6 \text{ km}^2$) ;

- 5 bassins versants de Corse (superficies de 44,2 à 129 km²) ;
- 3 bassins versants des Pyrénées Orientales (superficies de 17,2 à 216 km²).

Sur ces bassins versants, on dispose d'un effectif moyen de 84 événements averses-crue par bassin, cet effectif variant de 40 à 116 crues suivant les bassins. Le critère de Nash médian, calculé sur l'ensemble des crues d'un bassin, varie de 87 à 94 % et demeure supérieur à 90 % pour 11 bassins. Le calage du modèle sur les différentes crues observées est donc très satisfaisant. Notons que la méthode est particulièrement adaptée aux bassins versants de moins de 100 km² où l'utilisation d'une pluie ponctuelle représentative du bassin est encore acceptable. L'introduction de l'abattement de la pluie en fonction de la surface doit être envisagée pour des bassins plus grands.

À partir des pluies simulées sur différents bassins que l'on transforme en débits, on obtient une multitude de scénarios de crues dont on extrait les variables « tests » : débits de pointe et débits moyens maximums sur 1 à 72 heures. On peut alors comparer les distributions de ces variables observées avec celles des variables issues de la simulation. Sur la *figure 4* on a reporté, pour les 15 bassins versants étudiés, les valeurs des quantiles bien-naux et quinquennaux des débits de pointe spécifiques observés (obtenus par l'ajustement d'une loi de Gumbel) et issus de la simulation (lus sur les distributions de fréquences moyennes établies par la simulation de 100 périodes de 100 ans).

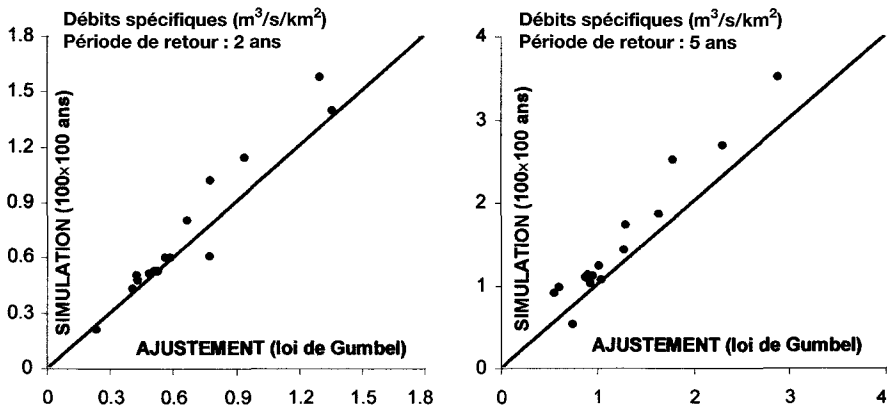


Figure 4 Quantiles biennaux et quinquennaux du débit de pointe spécifique des 15 bassins versants étudiés : valeurs issues d'un ajustement par la loi de GUMBEL et valeurs issues de la simulation par la méthode SHYPRE.

Comparison of the 2-year and 5-year quantiles of specific peak discharge for the 15 studied basins, estimated from an fitted GUMBEL distribution and from floods generated by SHYPRE method.

Comme pour les pluies, dans le domaine des observations (jusqu'à la fréquence décennale), le modèle restitue correctement les distributions de fréquences observées. Les résultats présentés sur la *figure 4* montrent la validité

de la méthode pour une large gamme de régimes hydrologiques : débits spécifiques allant d'un facteur de 1 à 7. Des divergences apparaissent pour les quantiles de fréquences plus rares, la méthode par simulation d'hydrogrammes donnant généralement des quantiles supérieurs à ceux estimés par l'ajustement d'une loi statistique.

La simulation permet donc de constituer un échantillon de taille variable d'événements de pluies et de débits, qui respecte les caractéristiques statistiques de l'échantillon des observations. La simulation sur des périodes plus longues que la période d'observation permet une extrapolation des distributions de fréquences des pluies et des débits au-delà des fréquences observables. Nous discutons au chapitre suivant, de l'intérêt de cette nouvelle approche de prédétermination des pluies et des débits, qui semble dans sa version locale, plus lourde à mettre en place qu'un simple ajustement des distributions de fréquences des valeurs observées.

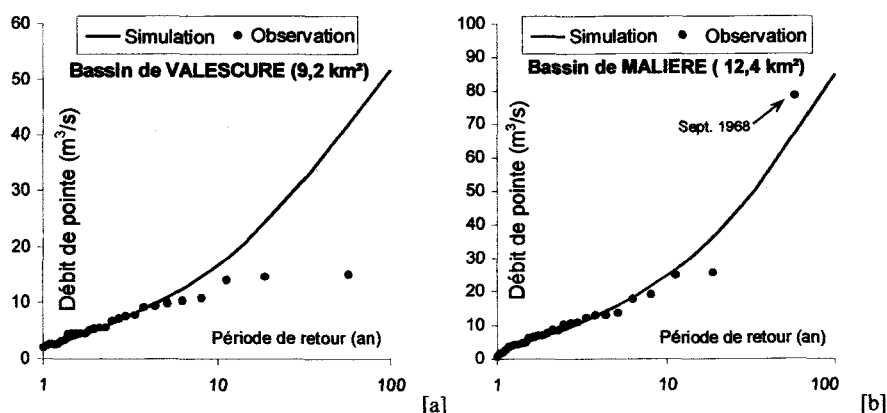


Figure 5 Distributions de fréquences des débits de pointe observée et issue de la simulation par la méthode SHYPRE, sur les bassins versants de Valescure et de Malière.

Peak discharge frequency distributions of observed floods and floods generated by SHYPRE method, for Valescure and Malière basins.

4 - DISCUSSION

Sur certains bassins, la méthode semble nettement surestimer les quantiles de crues de période de retour supérieure à 10 ans. Sur d'autres, elle semble par contre correctement les représenter, au sens d'une extrapolation de la distribution des observations. C'est ce que l'on observe par exemple sur la figure 5 pour deux bassins du BVRE Réal Collobrier, voisins et de taille similaire : le bassin de Valescure ($9,2 \text{ km}^2$) et bassin de Malière ($12,4 \text{ km}^2$).

Cet exemple illustre les problèmes d'échantillonnage. En effet, il faut savoir qu'en septembre 1968, une partie du BVRE Réal Collobrier a été touchée par un épisode pluvieux intense. Seuls deux bassins ont été touchés par cet évé-

nement, dont le bassin de Malière, provoquant ainsi la crue la plus importante de sa chronique d'observation.

La présence de cette crue dont le poids n'est pas négligeable donne alors toute sa signification à la distribution des débits de pointe issus de la simulation. On prend alors conscience de l'importance de l'échantillonnage. L'absence de cet épisode dans la chronique conduirait au même cas observé sur le graphique [a] de la figure 5. Inversement, si l'épisode pluvieux avait touché une plus grande partie du BVRE ou du moins le bassin versant de Valescure, les distributions issues de la simulation auraient sûrement été plus proches des distributions observées pour le bassin versant de Valescure.

L'examen graphique nous conduit à penser que les résultats de la méthode sont corrects pour le bassin de Malière car la récurrence du plus fort événement, obtenue par simulation, est en parfait accord avec son estimation empirique. Cependant, il ne faut pas oublier que l'estimation empirique de cette fréquence reste entachée d'une forte incertitude.

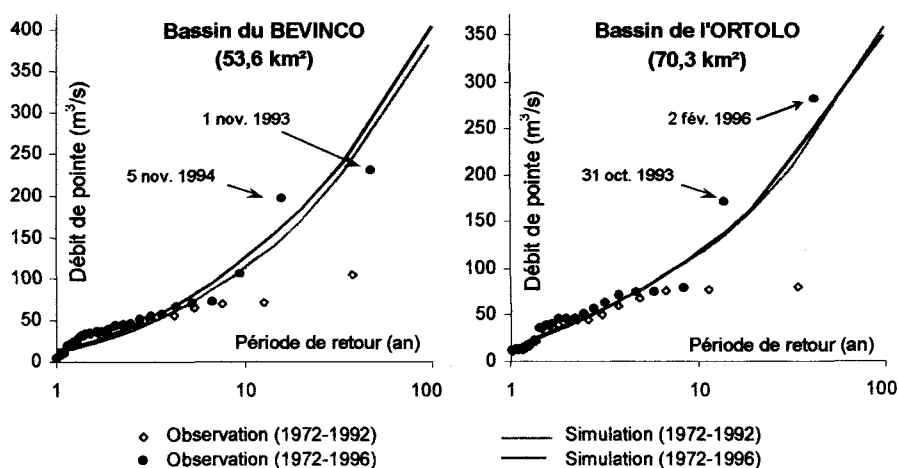


Figure 6 Distributions de fréquences des débits de pointe, observée et simulée par la méthode SHYPRE, sur deux périodes d'observation différentes.

Peak discharge frequency distributions of observed floods and floods generated by SHYPRE method, for Bevinco and Ortole basins, for two different observation periods.

Pour discuter de l'importance de l'échantillonnage sur l'estimation des quantiles de crues rares, on présente l'exemple des bassins versants de la Corse à travers les bassins du Bevinco ($53,6 \text{ km}^2$) et de l'Ortole ($70,3 \text{ km}^2$). Ces bassins, comme beaucoup de bassins de la Corse, ont été touchés depuis 1992 par de fortes crues. On a comparé les distributions de fréquences des débits de pointe de deux périodes d'observation : « période 1 » de 1972 à 1992 et « période 2 » de 1972 à 1996, c'est-à-dire que l'on rajoute quatre années d'observations à la période 1. Le modèle de pluie et le modèle pluie-débit ont été calés sur ces deux périodes d'observation. On a ensuite simulé des débits à partir des modèles calés sur la période 1 et des modèles calés sur la

période 2. Les distributions de fréquences des débits de pointe observés et issus de la simulation de crues, ont été tracées pour les deux périodes d'observation différentes (figure 6).

Les résultats sont extrêmement parlants. On observe d'une part la forte variabilité des distributions observées suivant les deux périodes. Cette variabilité provient de la présence, uniquement dans la seconde période, des deux crues importantes. D'autre part, on observe la grande stabilité des distributions de débits de pointe issus de la simulation, entre les deux périodes de calage. La simulation sur la première période surestime les débits de pointe dès la fréquence quinquennale, par rapport à la distribution observée sur cette même période. Par contre la distribution de fréquences observée sur la seconde période s'ajustent correctement sur la distribution issue de la simulation de la période 2, et valident ainsi les résultats du modèle calé sur la période 1.

Le tableau 1 présente l'estimation des débits décennaux des deux bassins, par l'ajustement d'une loi de Gumbel et par les résultats de la méthode SHYPRE.

Tableau 1 Débits décennaux des bassins du Bevinco et de l'Ortolo estimés sur deux périodes d'observation différentes par l'ajustement d'une loi de Gumbel et par la méthode SHYPRE.

Table 1 Estimation of 10-year quantiles of peak discharge of two corsican basins from fitted Gumbel distribution and simulated values, for two calibration periods.

Estimation des débits décennaux	Bassin de Bevinco		Bassin de l'Ortolo	
	Période 1972-1992	Période 1972-1996	Période 1972-1992	Période 1972-1996
Gumbel	80 m ³ /s	140 m ³ /s	80 m ³ /s	130 m ³ /s
Shypre	110 m ³ /s	120 m ³ /s	115 m ³ /s	115 m ³ /s

Les estimations faites sur chaque période par l'ajustement d'une loi statistique sont très différents, ce qui est normal puisque les deux échantillons sur lesquels la loi de Gumbel a été ajustée ont des caractéristiques différentes de par la présence ou non des crues fortes de 1993 et 1996. Les valeurs des débits décennaux trouvées sur la seconde période dépassent d'ailleurs les bornes de l'intervalle de confiance à 95 % de la distribution obtenue sur la première période. Ce résultat est généralisable à tout ajustement de ce type qui est directement conditionné par l'échantillon des observations. Ce n'est pas le cas de la méthode SHYPRE pour laquelle on observe une stabilité face aux problèmes d'échantillonnage liés à la présence ou non des valeurs extrêmes.

4.1 Stabilité face à l'échantillonnage

Cette stabilité s'explique par deux points qui justifient l'approche :

- au niveau de la génération des pluies : l'analyse porte sur des descripteurs de la pluie horaire. L'information temporelle et quantitative de la pluie est restituée grâce à l'analyse d'un millier d'averses par poste (en moyenne). L'importance de l'effectif des variables analysées est le gage d'une certaine robustesse pour le calage des paramètres du modèle de

pluie. De plus, les lois de probabilité utilisées pour décrire les variables du modèle ont été choisies de façon à être les moins sensibles à l'échantillonnage, à l'image de la loi exponentielle utilisée pour décrire les intensités des averses. Cette loi a été étudiée régionalement par la détermination d'une loi adimensionnelle par agglomération des valeurs des différents postes réduites par leur moyenne locale (ARNAUD *et al.*, 1999). D'autre part, la plupart des lois utilisées sont paramétrées par la moyenne de la variable, bien plus stable que l'écart-type.

- lors du passage de la pluie aux débits : l'analyse porte sur des événements averses-crue observés. L'exigence d'une information temporelle complète sur la pluie comme sur la crue, amène à un échantillon souvent dépourvu des plus grosses crues (défection des appareils). Malgré cette absence de données lors du calage du modèle pluie-débit, la méthode arrive à restituer correctement les distributions de fréquences des valeurs observées. En effet, on observe que les paramètres du modèle pluie-débit sont indépendants de la pluie. Ainsi, la paramétrisation du modèle pluie-débit n'est absolument pas conditionnée par les observations des fortes crues, ce qui rend son calage pratiquement indifférent aux problèmes d'échantillonnage des débits et rend la méthode beaucoup plus stable que de simples statistiques sur les débits.

À titre d'exemple, l'échantillon des événements pluie-débit observés ayant servi au calage du modèle hydrologique sur le Bevinco ne contient pas de crues dont le débit de pointe dépasse $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Des crues plus importantes pourtant reportées sur le graphique de la *figure 6*, sont des crues dont uniquement le débit de pointe a été reconstitué ou dont l'information pluviométrique n'est pas disponible. Ces événements n'ont donc pas été utilisés lors du calage du modèle hydrologique nécessaire à la méthode SHYPRE, mais ils ont bien sûr été reporté sur la distribution observée et ils ont été pris en compte lors de l'ajustement de la loi de Gumbel. Notons que nous n'avons pas reporté sur la *figure 6* une reconstitution de la crue du 25 octobre 1976 qui n'apparaît pas dans les banques de données et qui aurait atteint un débit de pointe de $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'intérêt évident de la méthode SHYPRE réside donc dans sa robustesse particulière face à l'échantillonnage des valeurs extrêmes. Cette stabilité permet d'avoir une estimation des quantiles courants plus fiable que celle obtenue par l'ajustement des distributions observées, comme le montre l'exemple des bassins du Bevinco ou de l'Ortolo dans le calcul du débit décennal.

4.2 Utilisation de l'information pluviométrique

Outre la stabilité dans le calage des deux modèles qui la compose, la méthode tire sa robustesse dans l'utilisation exclusive de l'information pluviométrique pour étudier les débits quelle que soit leur fréquence. En effet, les données sur les débits restent souvent moins fiables que les données pluviométriques (défection des appareils, problème de l'extrapolation des courbes de tarage...). Une méthode basée sur la pluviométrie permet d'éviter ces problèmes. Toutefois SHYPRE n'est pas la seule approche utilisant l'information pluviométrique en prédétermination des crues comme on l'a vu en introduction. Mais elle utilise cette information sans faire d'hypothèses sur l'extrapolation

des distributions des pluies puisque l'extrapolation est effectuée en augmentant la période de simulation. Elle n'utilise pas non plus d'information sur la distribution de fréquences des débits, car l'information débit métrique sert uniquement à paramétrer le modèle pluie-débit. Enfin, elle utilise l'information pluviographique pour toute la gamme des fréquences et pas uniquement pour les fréquences rares.

4.3 Information temporelle

Un autre intérêt de la méthode, réside dans l'obtention d'une information temporelle à travers la génération de hyétogrammes et d'hydrogramme. Ces événements, associés à une période de simulation, permettent une nouvelle approche des problèmes de dimensionnement d'ouvrage, évitant les pluies ou crues de projet uniques. Ils sont directement utilisés pour étudier les débits à l'aval des ouvrages.

À titre d'exemple, le *tableau 2* résume la diversité des pluies et des crues pouvant être associées à une caractéristique décennale donnée. Lors de la génération de hyétogrammes et d'hydrogrammes, on sélectionne pour une caractéristique décennale donnée une dizaine d'événements associés à cette caractéristique, et on regarde la variation des autres caractéristiques. Les résultats présentés dans le *tableau 2* proviennent du bassin de Malière (BVRE Réal Collobrier).

Tableau 2 Variabilité des formes de pluies et de crues générées liées à une caractéristique décennale : exemple du bassin de Malière.

Table 2 *Variability of generated rainfall and flood patterns for a given decennial characteristic: example of Malière basin.*

	Pluie maximale (mm)		Débit maximum (m ³ /s)	
	en 1 heure	en 24 heures	Instantané	moyen en 24 heures
Pluie en 1 heure décennale 50 mm	—	60 à 140	1 à 47	0,3 à 5,7
Pluie en 24 heures décennale 170 mm	15 à 60	—	10 à 40	4,3 à 10
Débit de pointe décennal 23 m³/s	15 à 50	80 à 190	—	2,8 à 15
Débit moyen maximum en 24 heures décennal : 8,6 m³/s	10 à 60	80 à 270	10 à 35	—

On observe bien l'impossibilité d'associer une période de retour à un événement uniquement à partir d'une caractéristique, même représentative. En effet, parler de période de retour d'un événement n'a pas de sens puisque la période de retour caractérise une fréquence relative à une variable aléatoire et qu'un événement n'est pas une variable aléatoire. De même il est impossible d'associer la même période de retour à une pluie et au débit qui en résulte, et à fortiori au débit à l'aval d'ouvrages hydrauliques, car cela supposerait non seu-

lement que la relation entre la pluie et le débit est monotone mais encore que le débit ne dépend que de la pluie.

L'information temporelle apportée par la méthode est aussi appréciable pour la connaissance des volumes de crue. En effet, si pour les fortes crues, les débits de pointe des crues exceptionnelles peuvent être estimés par l'hydraulique (grâce aux laisses de crues), on ne dispose souvent pas d'informations sur les volumes écoulés. La méthode présente donc plusieurs intérêts et une multiplicité de résultats.

5 – CONCLUSION

La prédétermination des débits en France est passée de méthodes d'ajustement strictement statistiques des distributions des débits, à l'utilisation de l'information pluviométrique (e.g. méthode du Gradex et ses dérivées) pour estimer les débits de fréquences rares. La méthode développée ici, utilise la modélisation de la pluie pour étudier les débits de fréquences courantes à rares. La méthode SHYPRE (Simulation d'HYdrogramme pour la PREdétermination des crues) est basée sur le couplage d'un modèle de génération stochastique de pluies horaires et d'un modèle simple de transformation de la pluie en débit. Elle permet la génération d'une multitude de scénarios de pluies et de crues sur de longues périodes de simulation. Ces événements simulés sont ensuite utilisés pour résoudre différents problèmes de prédétermination. Par rapport aux méthodes classiques de prédétermination, la méthode SHYPRE semble beaucoup moins sensible aux problèmes d'échantillonnage. La stabilité de la paramétrisation de ses deux modèles face à la présence d'événements extrêmes, ainsi que la large utilisation de l'information pluviométrique permettent d'expliquer cette robustesse. On a montré que la méthode est capable d'estimer correctement des débits de pointe de période de retour peu fréquentes même avec un échantillonnage d'événements ordinaires. Ce point particulièrement intéressant fait réaliser l'importance de l'échantillonnage dans l'estimation des quantiles par les méthodes classiques.

Un intérêt supplémentaire que présente la méthode réside dans l'information temporelle qu'elle fournit. Le modèle de pluie étant à la base de la méthode, la modélisation pluie-débit est nécessaire pour garder l'intérêt de l'information temporelle, en transformant les hyétoigrammes simulés en événements de crues « réalistes ». L'étude complète des débits à l'aval des ouvrages hydrauliques est alors possible évitant l'utilisation de pluie ou de crue de projet.

La méthode a été mise au point et testée sur la zone méditerranéenne. Cependant, la forte variabilité climatique du milieu méditerranéen est aussi présente sur les petits bassins versants du régime océanique tempéré. Elle peut alors rendre assez incertaine l'application de simples statistiques, facilement bouleversée par un simple événement. L'application de la méthode dans des zones climatiques différentes serait alors intéressante.

Nos recherches actuelles portent sur la régionalisation de cette méthode. La modélisation de la pluie est actuellement opérationnelle à partir d'une para-

métrisation portant uniquement sur l'information pluviométrique journalière. Par exemple, la cartographie des pluies décennales et centennales sur différentes durées (de 1 à 72 heures) a été réalisée sur le département de la Corse. Pour cela les 5 paramètres horaires les plus importants sont déterminés à partir des moyennes de 2 variables journalières : le nombre moyen d'événement par an et la moyenne des pluies journalières maximales des événements. Ces deux caractéristiques journalières sont cartographiées grâce à l'information d'une centaine de pluviomètres et en prenant en compte le relief. Des recherches sur la paramétrisation du modèle de transformation de la pluie en débit par une information uniquement journalière est aussi en cours. Une cartographie de cette paramétrisation est envisagée en essayant de s'appuyer sur des caractéristiques physiques du bassin versant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACREMAN M.C., 1990. A simple stochastic model of hourly rainfall for Farnborough. *Hydrological Sciences Journal*, 35(2), 119-148.
- ARNAUD P., 1997. Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation – Extension de sa zone de validité, paramétrisation horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps. Th. Doct. Univ., Montpellier II, 286 p.
- ARNAUD P., LAVABRE J., 1999. Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences Journal*, 44(3), 433-445.
- ARNAUD P., LAVABRE J., MASSON J.M., 1999. Amélioration des performances d'un modèle stochastique de génération de hyétoigrammes horaires : application au pourtour méditerranéen français. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12/2, 251-271.
- BERNIER J., 1967. Sur la théorie du renouvellement et son application en hydrologie. *Rapport EDF, HYD 67*, 10, 22.
- BEVEN K., 1987. Towards the use of catchment geomorphology in flood frequency predictions. *Earth Surf. Processes Landforms*, 12, 69-82.
- BEVEN K.J. et KIRKBY M.J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- BLAZKOVA S., BEVEN K., 1997. Flood frequency prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL. *J. Hydrol.*, 195, 256-278.
- CADAVID L., OBEYSEKERA J.T.B., SHEN H.W., 1991. Flood frequency derivation from kinematic wave. *J. Hydraulic Eng. ASCE*, 117(4), 489-510.
- CERNESSON F., 1993. Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courantes à rares sur petits bassins versants méditerranéens. Th. Doct. Univ., Montpellier II, 240 p.
- CERNESSON F., LAVABRE J., MASSON J.M., 1996. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research*, 42(1-4), 149-161.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill book compagny, 572 p.
- CIGB, 1992. Choix de la crue de projet. Méthodes actuelles. *Bulletin 82 de la Commission Internationale des Grands Barrages*, Paris, 233 p.
- COLLIER C.G., HARDAKER P.J., 1996. Estimating probable maximum precipitation using a storm model approach. *J. Hydrol.*, 183(3-4), 277-306.
- COWPERTWAIT P.S.P., 1991. Further developments of the Neyman-Scott clustered point process for modelling rainfall. *Water Resour. Res.*, 27(7), 1431-1438.

- COX D.R., 1962. Renewal theory. John Wiley and Sons, New York.
- EAGLESON P.S., 1972. Dynamics of flood frequency. *Water Resour. Res.*, 8(4), 878-898.
- ECONOPOULY T.W., DAVIS D.R., WOOLHISER D.A., 1990. Parameter transferability for a daily rainfall disaggregation model. *J. Hydrol.*, 118, 209-228.
- EDIJATNO, MICHEL C., 1989. Un modèle de pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2, 113-121.
- EDIJATNO., 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Th. Doct. Univ. Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de Mécanique des fluides. École Nationale des Ingénieurs des Travaux Sanitaires de Strasbourg, Cemagref Antony, 207 p.
- GARCIA-GAZMAN A., ARANDA-OLIVIER F., 1993. A stochastic model of dimensionless hyetograph. *Water Resour. Res.*, 29(7), 2363-2370.
- GUILLOT P., DUBAND D., 1967. La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *I.A.S.H., Publication*, 84.
- HEBSON C., WOOD E.F., 1982. A derived flood frequency distribution using Horton order ratios. *Water Resour. Res.*, 18(5), 1509-1518.
- HERSHFIELD, D.M., 1961. Estimating the Probable Maximum Precipitation. *Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Hydraulics Division*, 87, 99-106.
- HUFF F.A., 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resour. Res.*, 3(4), 1007-1019.
- KOUTSOYIANNIS D., 1994. A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. *J. Hydrol.*, 156, 193-225.
- KOUTSOYIANNIS D., 1999. A probabilistic view of hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water Resour. Res.*, 35(4), 1313-1322.
- LEBEL T., 1984. Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes. Th. Doct. Institut. National Polytechnique Grenoble, 350 p.
- LECAM L., 1961. A stochastic description of precipitation. Preprints: Fourth symp. on Mathematical Statistics and Probability, Univ. of California, Berkeley, 3, 165-186.
- LLAMAS J., 1993. Hydrologie générale principes et applications. 2^e édition, Gaëtan Morin éditeur, Paris, 527 p.
- MARGOUM M., OBERLIN G., LANG M., WEINGARTNER R., 1994. Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle AGREGEE. *Hydrologie Continentale*, 9(1), 85-100.
- MIQUEL J., 1983. Crue : un modèle d'estimation des probabilités des débits de crue. *La houille blanche*, 2, 95-103.
- ONOF C., CHANDLER R., KAKOU A., NORTHRUP P., 1995. Rainfall modelling using Poisson-cluster process. *Recueil de publications à l'International Conference in honour of Jacques BERNIER*, Chap. II, Paris, UNESCO.
- RODRIGUEZ-ITURBE I., VALDÉS J.B., 1979. The Geomorphologic structure of Hydrologic Response. *Water Resour. Res.*, 15(6) 1409-1420.
- RODRIGUEZ-ITURBE I., COX D.R., ISHAM V., 1987. Some models for rainfall based on stochastic point processes. *Proc. Royal Society London*, A410, 269-288.
- ROSSI F., FIORENTINO M., VERSACE P., 1984. Two component extreme value distribution for flood frequency analysis. *Water Resour. Res.*, 20(7), 847-856.
- SHANE R.M., LYNN W.R., 1964. Mathematical model for flood risk evaluation. *Journal of the Hydraulics division, Proc. of the Amer. Soc. of Civ. Eng.*, HY6, 1-20.
- SHEN H.W., KOCH G.J., OBEYSEKERA J.T.B., 1990. Physically based flood features and frequencies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 494-514.
- SIGHOMNOU D., DESBORDES M., 1988. Recherche d'un modèle de pluie de projet adapté aux précipitations de la zone tropicale africaine. *Hydrologie continentale*, 3(2), 131-139.
- TOURASSE P., 1981. Analyses spatiales et temporelles des précipitations et utilisation opérationnelle dans un système de prévision de crues. Application aux régions cévenoles. Th. Doct. IMG Univ. Scientifique et Médical, Inst. National Polytechnique de Grenoble, 190 p.

- WAYMIRE E., GUPTA V.K., 1981. The mathematical structure of rainfall representations: a review of the stochastic rainfall models. *Water Resour. Res.*, 17(5), 1261-1272.
- WOOLHISER D.A. et OSBORN H.B., 1985. A stochastic model of dimensionless thunderstorm rainfall. *Water Resour. Res.*, 21(4), 511-522.
- YANG X., 1993. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel. Th. Doct. École Nationale des Ponts et Chaussées, 205 p.