

## Caractérisation du régime des hautes eaux en débit-durée-fréquence Application au contexte algérien<sup>1</sup>

*Describing the flow regime by the Flood-Duration-Frequency approach  
An application to the Saf-Saf river basin, Algeria*

Eric Sauquet, Gilles Galéa

Cemagref Lyon, Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique,  
3bis, quai Chauveau CP220, 69336 Lyon cedex 09, France

Mohamed Bessenasse

Université SAAD Dahleb (Blida), B.P 26 D, Hadjout, W. Tipaza, 42200 Algérie

*This paper presents a Flood Frequency Analysis (FFA), which takes into account the notion of duration : the flood-duration-frequency (QdF) method. QdF analysis is similar to the intensity-duration-frequency analysis commonly used for rainfall. The first part describes the analytical formulations. An application to the Saf-Saf River is performed. QdF curves are fitted. Synthetic Mono-Frequency Hydrographs (SMFHs) are then derived. The main advantage of these hydrographs is that all the characteristics of the SMFHs are related to the same return period. These design flood hydrographs are inputs for hydraulics modelling and simulation of sedimentation in Zardezas reservoir (Algeria).*

### I ■ INTRODUCTION

La caractérisation du régime hydrologique d'une rivière pour les besoins cognitifs ou opérationnels requiert la mise en œuvre de méthodes qui synthétisent une information riche mais parfois inextricable contenue dans les chroniques de débit. Pour les pluies, une des représentations la plus communément utilisée est donnée par les courbes IdF, Intensité-durée-Fréquence. Ce type d'approche est généralisable à d'autres variables, en hydrologie mais également dans d'autres domaines. Ainsi, Sobey et Orloff [1] adaptent le concept d'analyse en Intensité-durée-Fréquence à la houle.

La démarche QdF ( $Q$ : débit,  $d$ : durée,  $F$ : fréquence) s'inscrit dans une démarche de quantification probabiliste de l'aléa hydrologique de façon analogue à l'approche IdF. On s'intéresse non plus uniquement aux statistiques des valeurs maximales instantanées mais on étend l'analyse aux caractéristiques relatives à différentes durées pour affecter à un volume ou une intensité moyenne une fréquence ou période de retour. Cette représentation a été initiée par l'Institut

d'Hydrologie de Wallingford [2] pour les crues et a connu depuis des développements multiples au Cemagref : l'approche par bassin de référence en crue [3] et en étiage [4] et récemment le modèle convergent [5, 6, 7]. Les courbes QdF peuvent être exploitées pour construire des hydrogrammes de projet qui présentent des caractéristiques en débit homogènes en fréquence.

L'objectif de cette communication est de présenter les derniers développements de l'analyse QdF et d'illustrer la méthode par une application au contexte algérien : l'oued Saf-Saf

### II ■ L'APPROCHE DÉBIT-DURÉE-FRÉQUENCE

L'analyse QdF fournit une description fréquentielle théorique multi-durée des quantiles de crue ou d'étiage. Elle s'intéresse à deux variables hydrologiques représentatives du régime des hautes eaux et extraites de la chronique brute de débit :

— le débit-seuil dépassé en continu pendant la durée  $d$ , maximal sur l'épisode de crue, noté  $Qd$  (fig. 1.a) ;

1. Ce texte a été présenté lors du colloque : « Gestion du risque Eau en pays semi-aride », SHF, ADENIT, ENIT, INAT, Tunis, 20-22 mai 2003.

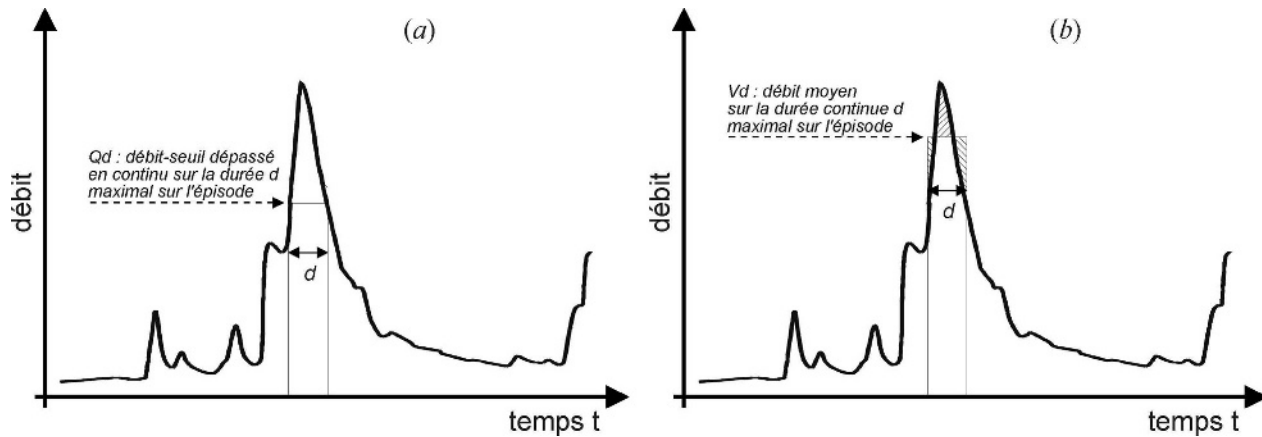


Figure 1 : Définition des variables hydrologiques.

— le débit moyen, moyenne glissante calculée sur la durée continue  $d$ , maximal sur l'épisode de crue, noté  $Vd$  (fig. 1.b).

Lorsque  $d = 0$ , les deux variables sont égales au débit instantané maximal  $QIX$ .

Les résultats se présentent généralement sous la forme d'un faisceau de courbes paramétrées par la durée  $d$  dans le plan  $(Q, T)$  ou transformé  $(Q, \ln(T))$ . Les courbes QdF décrivent les variations de  $Vd$  et  $Qd$  en fonction de la durée  $d$  et de la période de retour  $T$ .

Lorsque l'on dispose d'une série suffisamment longue, l'analyse se décline en deux phases :

- échantillonnage multidurée de valeurs supérieures à un seuil : on prendra soin de sélectionner des événements indépendants et de se rapprocher d'un processus d'occurrence stationnaire de type Poisson (principes de la méthode du renouvellement) ;
- ajustements d'une loi de probabilité permettant de définir la fréquence théorique de chaque épisode, exprimée en terme de période de retour  $T$  sur les échantillons.

### ● II.1 Crues observables ( $0,5 \leq T$ (an) $\leq 10$ )

L'ajustement d'un modèle probabiliste peut être effectué :

- individuellement pour chaque durée  $d$  ; on privilégie la distribution exponentielle dans le cas d'un échantillonnage par valeur supérieure à un seuil :

$$Vd(T) = aq_d \ln(T) + x_{0,d} \quad (1)$$

avec :

- $aq_d$  : gradex des débits ou encore paramètre d'échelle de la loi ;
- $x_{0,d}$  : paramètre de position de la loi ;

ou :

- simultanément sur l'ensemble des durées par ajustement d'une fonction mathématique  $V(d, T)$  et/ou  $Q(d, T)$  sur les échantillons.

Une première manière d'aboutir à  $V(d, T)$  et/ou  $Q(d, T)$  consiste alors à utiliser les expressions mathématiques d'un modèle bibliothèque adimensionnel dit « de référence » [3]. Il s'agit de choisir le meilleur modèle parmi trois disponibles selon des critères hydro-météorologiques et de dénormer les formulations à l'aide de deux caractéristiques une en débit et l'autre en durée, toutes deux obtenues au site d'intérêt.

La seconde possibilité est d'appliquer le modèle QdF « convergent » [5]. Cette formulation repose sur une propriété observée sur un grand nombre de chroniques hydrologiques traitées : les ajustements  $Vd(T)$  tendent à se croiser en un même point vers les très faibles périodes de retour et sur une propriété d'affinité orthogonale des lois de probabilité théoriques des quantiles relatifs à différentes durées [6]. Le modèle QdF convergent permet de synthétiser dans une formulation analytique unique les quantiles de crue relatifs à différentes durées, indépendamment des lois de probabilité retenues :

$$V(d, T) = \frac{V(0, T)}{1 + d/\Delta} \quad (2)$$

avec :

- $V(0, T)$  : distribution théorique des débits de pointe ( $QIX$ ) consolidée par modélisation ;
- $\Delta$  : paramètre à caler, homogène à un temps et relié à la dynamique de crue.

On parle d'ajustement consolidé  $V(0, T)$  car toutes les durées participent à l'estimation des paramètres de la distribution théorique. Les distributions de durée  $d$  (2) se déduisent de la distribution modélisée des débits de pointe  $V(0, T)$ , connaissant  $\Delta$ .

Plusieurs approches peuvent être envisagées pour estimer  $\Delta$  et obtenir simultanément une distribution consolidée  $V(0, T)$  [5, 8, 9, 10]. La procédure privilégiée fait intervenir un processus de calage de  $\Delta$  par itérations successives sur le principe des moindres carrés. Elle présente l'avantage d'être simple d'application et économe en hypothèses.

De l'expression (2), et compte tenu de la propriété suivante :

$$V(d, T) = \frac{1}{d} \int_0^d Q(\delta, T) d\delta \quad (3)$$

on déduit une formulation pour l'estimation des quantiles de débits seuils  $Q(d, T)$  :

$$Q(d, T) = \frac{V(0, T)}{(1 + d/\Delta)^2} \quad (4)$$

Dans le cas d'un ajustement  $V(0, T)$  à la loi exponentielle, il vient :

$$V(d, T) = \frac{x_0 + a_0 \ln(T)}{1 + d/\Delta} \quad (5)$$

et

$$Q(d, T) = \frac{x_0 + a_0 \ln(T)}{(1 + d/\Delta)^2} \quad (6)$$

— où les paramètres  $a_0$ ,  $x_0$  et  $\Delta$  sont à déterminer.

## ● II.2 Extrapolation aux grandes périodes de retour ( $10 < T$ (an) $\leq 1\ 000$ )

Pour prédéterminer les quantiles de fréquence rare, on introduit une information pluviométrique qui prend progressivement le relais pour l'estimation des quantiles à partir de  $T = 10$  ans, seuil fréquentiel d'extrapolation. Le modèle d'extrapolation des distributions choisis est une variante du modèle du gradex esthétique [11] :

$$V(d, T) = V(d, 10) + C(d) \cdot \ln\left(1 + \frac{A(d)}{C(d)} \cdot \frac{T - 10}{10}\right) \cdot QIXA10 \quad (7)$$

avec :

- $V(d, 10)$  : donné par (5) ;
- $QIXA10$  : débit de pointe décennal égal à  $V(0, 10)$  ;
- $A(d)$  : gradex implicite des débits relatifs à la durée  $d$  fourni par (5), cf. ultérieurement ;
- $C(d)$  : gradex des pluies maximales implicite d'un modèle QdF de référence [3].

## III ■ APPLICATION

### ● III.1 Présentation du bassin-versant

L'analyse QdF présentée ici s'inscrit dans une étude de la sédimentation dans la retenue de Zardezas de la région de Skikda (Algérie) [12]. Elle a pour objectif de fournir les données d'entrée sous la forme d'hydrogrammes de projet à une modélisation numérique pour prédire la formation et l'évolution des dépôts de sédiments à l'amont du barrage de Zardezas.

À l'amont immédiat de la retenue, une station hydrométrique a mesuré les débits moyens journaliers sur la période entre 1968 et 1993 et fournit certains hydrogrammes de crues parmi les plus fortes de manière plus précise. Le bassin versant contrôlé par la station a une surface de 345 km<sup>2</sup> (fig. 2).

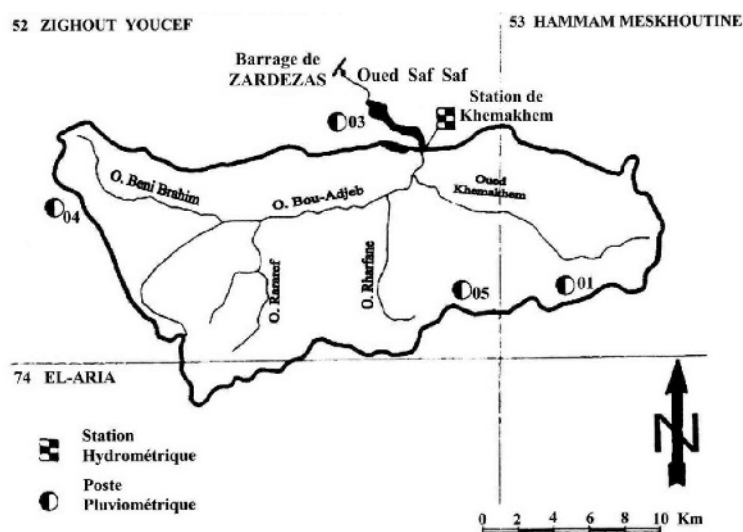


Figure 2 : Bassin versant alimentant l'oued Saf-Saf.

La méthode du GRADEX [13] sera la méthode de référence pour l'estimation des quantiles de grande période de retour. Elle requiert une information pluviométrique. Les seules données de pluie disponibles sont fournies par un poste situé à l'exutoire du bassin versant (n° 3 en fig. 2). Le poste pluviométrique situé à l'exutoire du bassin versant n'est pas du meilleur choix mais le seul possible consenti par le service d'exploitation de la retenue et dont le gradex annuel des pluies maximales de 24 h ( $Gp_{24h} = 24,7$  mm) a été porté à notre connaissance.

### ● III.2 Distributions modélisées et quantiles de crue selon l'approche convergente

Les trois paramètres,  $a_0$ ,  $x_0$  et  $\Delta$  sont ajustés sur l'ensemble des quantiles expérimentaux relatifs aux durées  $d$  étudiées. Pour le bassin du Saf-Saf, nous obtenons les expressions suivantes :

$$V(d, T) = \frac{110 \ln T + 109}{1 + d/15,8} \quad (8)$$

et, s'en déduit :

$$Q(d, T) = \frac{110 \ln T + 109}{(1 + d/15,8)^2} \quad (9)$$

Pour l'extrapolation aux quantiles rares, le gradex implicite des débits s'obtient à partir de (8) :

$$A(d) = \frac{110}{QIX \cdot 10 \cdot (1 + d/15,8)} \quad (10)$$

et le gradex implicite des pluies est celui du modèle de référence le plus adapté aux bassins rapides :

$$C(d) = \frac{1}{0,569 \frac{d}{D} + 0,69} + 0,046 \quad (11)$$

avec  $D$  : durée de SOCOSE [14].

La durée caractéristique de crue  $D$  du bassin versant du Saf-Saf estimée à partir des quelques crues observées disponibles, est voisine de 4 h ( $D = 4$  h). Diverses études de régionalisation des crues, sous différents climats, ont montré une forte liaison entre  $\Delta$  et  $D$ . Le rapport  $\Delta/D$  est relativement constant (de l'ordre de 3,5) [15]. Pour le bassin du Saf-Saf, le ratio est de 3,95, ce qui confirme la valeur estimée  $D$ .

La figure 3 représente les échantillons observés et les ajustements obtenus par modélisation QdF pour les crues, de faible (5) ou de grande (7) période de retour. Sont reportés également les échantillons des crues extrapolées déterminées à partir du gradex des pluies maximales connu ( $Gp_{24h} = 24,7$  mm).

Deux événements exceptionnels en pointe de période de retour théorique proche de la centennale ont été mesurés. Leurs volumes sur 24 h excèdent  $V(24 h, 100)$ . Ils ont une fréquence beaucoup plus rare que la centennale, voire très rare pour l'un d'eux. Pour le pas de temps de 24 h, l'extrapolation décrite par (7) vérifie les quantiles rares expérimentaux estimés à partir du gradex des pluies maximales observées de 24 h et est ainsi validée.

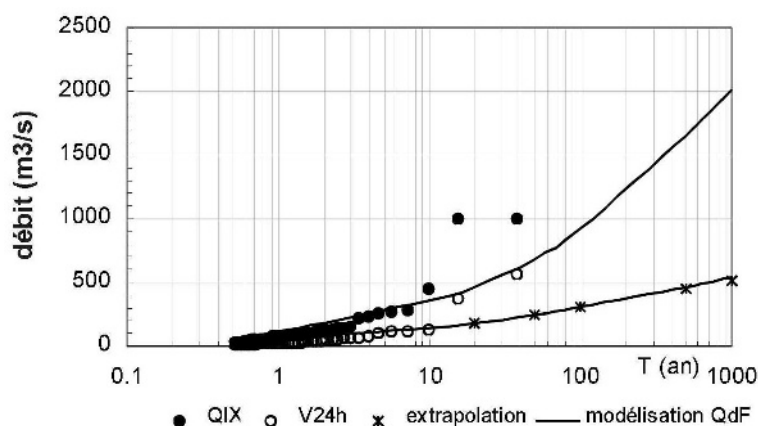


Figure 3 : Modélisation QdF du régime des crues.

La forme d'extrapolation esthétique au regard des deux valeurs extrêmes de débit quotidien mesurées est critiquable. Un choix objectif entre gradex esthétique et gradex brut [13] nécessiterait une étude régionale des régimes de crues et des pluies associées. Ce contexte d'étude n'est pas l'objet de notre propos et l'approche hydrologique du bassin du Saf-Saf présentée est essentiellement un premier exemple d'application en climat semi-aride du concept QdF convergent développé en climat tempéré. Le choix du gradex esthétique (7) pour le bassin du Saf-Saf nous a permis de donner une estimation des quantiles rares en tenant compte d'un indice de saturation du sol selon le ratio  $A(d)/C(d)$ . Pour la durée  $d$  de 24 h ce ratio est de 0,44, ce qui est relativement éloigné de 1, valeur pour laquelle le modèle d'extrapolation (7) est équivalent à celui du GRADEX d'EDF-DTG [13]. A défaut de toute information régionale, la valeur de l'indice

de saturation de 0,44 peut apporter une certaine justification au choix du gradex esthétique. Ceci peut être aussi rapproché du coefficient d'écoulement inter-annuel relativement faible. En effet, pour une hauteur de précipitation moyenne de 940 mm/an l'apport moyen inter-annuel à la retenue est de 45 millions de  $m^3$  (3 ou 4 plus fortes crues annuelles), soit un coefficient d'écoulement inter-annuel de 14 % [12]. Par ailleurs, l'information pluviométrique dont nous disposons ne nous permettait pas de caler une forme d'extrapolation généralisée avec la durée  $d$  et nous avons donc utilisé  $C(d)$  du modèle de référence [3] dont la typologie des crues intègre un gradex esthétique implicite qui vérifie les quantiles rares de 24 h (fig. 3).

Les valeurs des débits moyens  $V(d, T)$  et débits seuils  $Q(d, T)$ , issues de l'ajustement aux modèles analytiques, sont respectivement reportées dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Quantiles de crues de débit moyen modélisés.

Quantiles $V(d,T)$ (m <sup>3</sup> /s)										
$d$ (h)	$T$ (an)									
	0,5	1	2	5	10	20	50	100	500	1000
0	32,8	109	185	286	362	462	684	925	1658	2013
4	26,2	87,0	148	228	289	366	523	679	1116	1320
6	23,8	79,1	134	207	263	332	469	602	968	1137
12	18,6	62,0	105	163	206	259	359	453	702	816
24	13,0	43,3	73,7	114	144	181	247	307	465	537
48	8,1	27,0	46,0	71,0	89,9	113	154	191	289	333

Tableau 2. Quantiles de crues de débit seuil dépassé modélisés.

Quantiles $Q(d, T)$ (m <sup>3</sup> /s)										
$d$ (h)	$T$ (an)									
	0,5	1	2	5	10	20	50	100	500	1000
0	32,8	109	185	286	362	462	684	925	1658	2013
4	20,9	69,5	118	182	231	290	401	504	769	887
6	17,2	57,3	97,4	151	191	239	324	400	589	672
12	10,6	35,3	60,0	92,6	117	146	193	233	329	370
24	5,20	17,2	29,3	45,2	57,3	71,2	94,6	114	163	185
48	2,02	6,71	11,4	17,6	22,3	28,2	40,0	51,4	82,3	96,5

### III.3 Définition des hydrogrammes de projet

Gilard [16] construit un Hydrogramme Synthétique MonoFréquence HSMF à partir d'une estimation des quantiles de débit seuil (fig. 4). Il suppose la montée de l'hydrogramme en croissance linéaire avec le temps. Le maximum est atteint à l'instant  $D$ , durée de SOCOSE. La pointe de

crue est définie par le débit  $Q_{IXAT}$  instantané maximal de la période de retour  $T$  choisie. Pour différentes durées  $d$ , on construit la courbe de récession de telle sorte que le débit  $Q(T, d)$  en dérive se situe à une distance  $d$  du point d'ordonnée  $Q(T, d)$  de la phase de montée. L'avantage de l'HSMF est de garantir que toutes les caractéristiques de l'hydrogramme sont rattachées à une même fréquence d'occurrence.

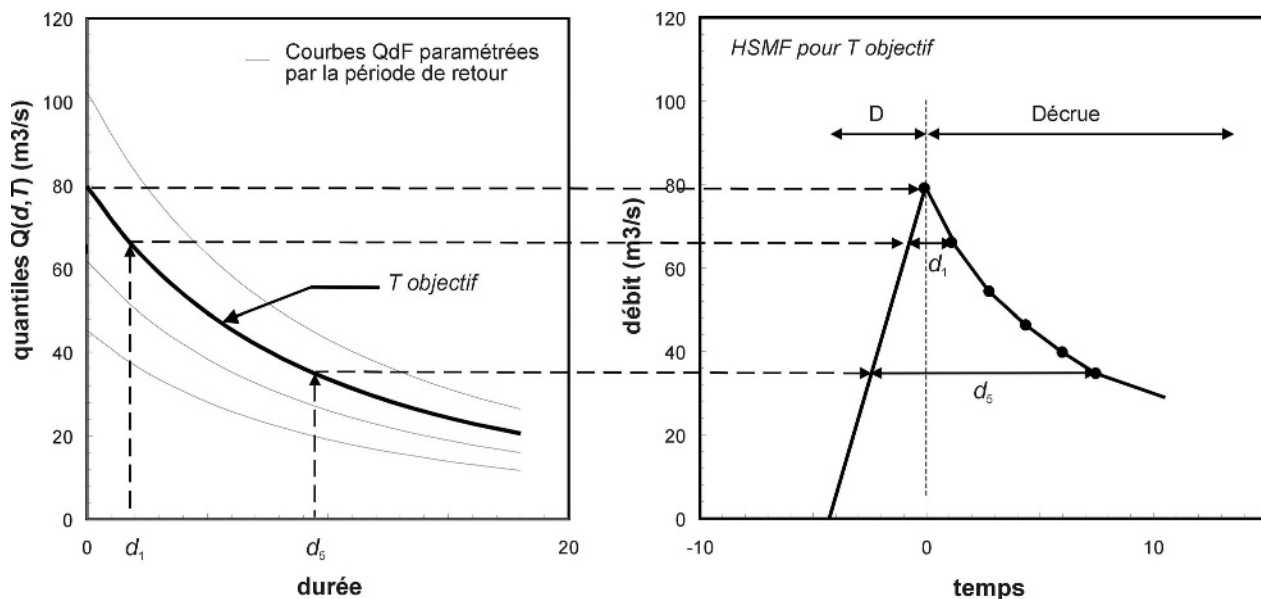


Figure 4 : Principe de construction d'un Hydrogramme Synthétique MonoFréquence associé à la période de retour  $T$  objectif à partir des courbes QdF.

L'hydrogramme de projet pour le Saf-Saf est défini par un temps de montée  $t_m$  de 4 h ( $D = 4$  h) et la courbe de récession s'appuie sur les quantiles  $Q(d, T)$  relatifs aux durées  $d$  du tableau 2. L'hydrogramme tracé en *figure 5* a la propriété d'être homogène en période de retour 10 ans quelle que soit la variable  $Vd$  ou  $Qd$  considérée.

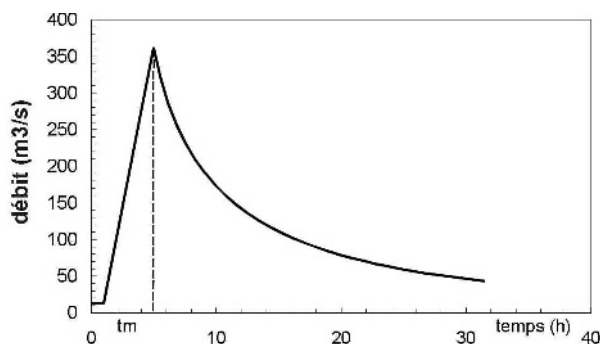


Figure 5 : Hydrogramme Synthétique Mono-Fréquence relatif à la période de retour 10 ans.

## V ■ CONCLUSION

La présente communication s'intéresse à la description des régimes des crues à l'aide des courbes QdF en débit-durée-fréquence. La formulation analytique de ces courbes est présentée. Simple d'application, elle requiert un choix non imposé de distribution théorique et la connaissance d'un paramètre  $\Delta$  lié à la dynamique de crue et restitue les quantiles de débits moyens et débits seuils sur toute durée d'intérêt. Les courbes QdF ont permis de définir des hydrogrammes de projet dont les caractéristiques en débit sont relatives à la même période de retour. Cette approche a été appliquée au bassin versant du Saf-Saf en Algérie et une bonne cohérence avec la méthode du gradex a été observée pour prédire les quantiles de débits moyens de durée de 24 h. Ceci est une première confirmation de l'applicabilité en climat semi-aride de la méthode QdF convergent établie en climat dit tempéré. De cette analyse, ont été extraits des hydrogrammes de projet, les HSMFs, qui synthétisent le régime hydrologique des crues du bassin. Introduits dans une modélisation numérique, ils ont permis de suivre et reproduire l'évolution de la sédimentation dans la retenue de Zardezas.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] SOBEY R.J. et ORLOFF L.S. (1999). — Intensity-duration-frequency summaries for wave climate. *Coastal Engineering*, 36 (1), 37-58.

- [2] NERC (1975). — Estimation of flood volumes over different durations. *Flood Study Report*. Vol. 1, chap. 5, 243-264.
- [3] GALÉA G. et PRUDHOMME C. (1997). — Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF. *Revue des Sciences de l'Eau*, 1, 83-101.
- [4] GALÉA G., MERCIER G. et ADLER M.J. (1999). — Modèles débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionale des régimes de basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France) et du Crisu-Alb (Roumanie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 12 (1), 93-122.
- [5] JAVELLE P., OUARDA T.B.M.J., LANG M., BOBÉE B. GALÉA G. et GRÉSILLON J.-M. (2002). — Development of regional flood-duration-frequency curves based on the index-flood method. *Journal of Hydrology*, 258, 249-259.
- [6] JAVELLE P. (2001). — Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1<sup>er</sup> mars 2001, 268 p.
- [7] GALÉA G., JAVELLE P. et CHAPUT N. (2000). — Un modèle débit-durée-fréquence pour caractériser le régime d'étiage d'un bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau*, 13 (4), 421-440.
- [8] KOUTSOYIANNIS D., KOZONIS D. et MANETAS A. (1998). — A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206 (1-2), 118-135.
- [9] MEUNIER M. (2001). — Regional flow-duration-frequency model for the tropical island of Martinique. *Journal of Hydrology*, 247 (1-2), 31-53.
- [10] JAVELLE P., OUARDA T.B.M.J. et BOBÉE B. (2003). — Spring flood analysis using the Flood-duration-Frequency approach : Application to the Provinces of Quebec and Ontario, Canada. *Hydrological Processes, Special Issue* (accepté).
- [11] MICHEL C. et OBERLIN G. (1987). — Seuil d'application de la méthode du GRADEX. *La Houille Blanche*, n° 3, 199-203.
- [12] BESSENASSE M., KETTAB A., PAQUIER A., GALÉA G. et RAMEZ P. (2003). — Simulation numérique de la sédimentation dans les retenues de barrages : cas de la retenue de Zardezas, Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 16 (1), 103 - 122.
- [13] GUILLOT P. et DUBAND D. (1967). — La méthode du GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *Journées de la SHF* (septembre), question 1, rapport 7, Paris.
- [14] CTGREF (1980). — Synthèse nationale sur les crues des petits bassins, fascicule 2 : la méthode SOCOSE. *Informations Techniques* n° 38, 2 (juin 1980).
- [15] SAUQUET E., JAVELLE P. et LE CLERC S. (2003). — Description des régimes hydrologiques des hautes eaux : nouvelle formulation pour l'analyse en débit-durée-fréquence et applications en ingénierie. *Ingénieries EAT*, 34, 3-16.
- [16] GILARD O. (1998). — Les bases techniques de la méthode Inondabilité. Cemagref Editions, Antony, 207 p.