

Application des modèles Débit-durée-Fréquence QdF pour l'estimation des crues rares en Algérie : Cas du bassin versant de la Tafna

Application of QdF models for estimating the rare floods in Algeria : Case of the Tafna catchment basin

Khadidja KETROUCI^{1*} & Mohamed MEDDI²

1. Université Mustapha Stambouli, Mascara, LSTE* (ketrou_khadi@yahoo.fr).

2. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH)-LGEE, Blida, Algérie, LGEE.

Résumé. Le bassin versant de l'oued Tafna, situé dans le Nord-Ouest algérien, a connu des crues particulièrement importantes ces dernières années. Face à la récurrence de ces événements exceptionnels, l'estimation et la prédétermination des quantiles extrêmes des crues constituent un axe stratégique de prévention contre les inondations dans cette région. L'approche retenue dans cette étude est l'analyse débit-durée-fréquence (QdF), car elle intègre indirectement l'évolution des débits avec le temps, de façon analogue à l'approche intensité-durée-fréquence (IdF) qui est plus largement connue pour les pluies. L'étude des crues du bassin versant de l'oued Tafna est menée selon deux approches : une approche basée sur l'estimation des courbes (QdF), localement, à partir d'une analyse fréquentielle des débits moyens des données disponibles, ensuite à partir des trois modèles adimensionnels de référence, établis sur trois sites observés de France (Vandenesse, Florac et Soyans). Afin de comparer l'incertitude des modélisations sur les quantiles de crue, le débit de crue décennal (Q_{IXA10}) et la durée caractéristique de crue (D) sont déduits à partir des observations. Les résultats issus de la modélisation des crues montrent une bonne validité et adéquation du modèle de Florac pour estimer les quantiles du bassin versant de Tafna.

Mots-clés : Modèles QdF, crues extrêmes, Oued Tafna, Nord-Ouest algérien.

Abstract. The catchment basin of Tafna wadi, located in northwest Algeria, has experienced particularly severe floods over the last years. In view of the recurrence of these exceptional events, the estimation and the predetermination of extreme quantiles of floods are a strategic axis for prevention against floods in this region. The approach chosen in this study is the flow-duration-frequency analysis (QdF), because it indirectly incorporates the evolution of flows over time, in an analogous way to the intensity-duration-frequency approach (IdF) more extensively known for rain. The study of watershed floods of the Tafna wadi is conducted using two approaches: an approach based on the curves estimation (QdF), locally, from a frequential analysis of the average water flows of available data, then from the three non-dimensional reference models established on three sites observed in France (Vandenesse, Florac and Soyans). In order to compare the model's uncertainty of flood quantiles, Q_{IXA10} and D are deduced from observations. The results from flood modeling showed a good validity and adequacy of the Florac model to estimate the quantiles of the Tafna watershed.

Keywords : QdF models, extreme floods, Tafna wadi, northwestern Algeria.

Abridged English version

Introduction

Algeria has been affected by many floods in recent years. These disasters caused considerable loss of life, significant economic and environmental damage (Ketrouci *et al.* 2012). The choice of the Tafna catchment basin as a terrain of study is related to the high recurrence of catastrophic events in the region (Ketrouci *et al.* 2012). The aim of this paper is to contribute to find a solution by proposing techniques or models for flood risk management. In this context, which is the estimation of extreme floods, this article proposes firstly, a local determination of QdF curves from the frequency analysis of the average water flows of available data, and then, from the three reference models (Vandenesse, Florac and Soyans). The QdF approach type of the reference basins was applied in the FRIEND-AMHY research project for many European sites. The results of these studies have shown the adequacy of Florac QdF model for the Alcaucin basin at Vinuela in Spain, and the QdF model of Vandenesse for the basins of Tevere at Ponte Nuovo in Italy, Dornbirnerach at ENZ in Austria and Berkel at Rekken in the Netherlands (Galéa & Prudhomme 1993).

Material and methods

The study is based on instantaneous measures of discharges in Tafna catchment basin. These measures are unfortunately related to only three stations: Sidi Aissa station on the Isser wadi; Sidi Belkheir station on the Mouillah river and Beni Bahdel station on the Sebdou river (Tab. 1). PRETHY software (Lang & Lavabre 2007) was used to determine thresholds that adhere to criteria, including flood selection, in particular, verification of the basic assumptions (independence, stationarity and homogeneity of events) (Lang *et al.* 1997, Lang *et al.* 1999).

Results and discussion

By using the software PRETHY, thresholds were fixed. Tests for sampling carried out by the same software show independence, stationarity and homogeneity of Q_{IX} series (Figs. 2–3). Table 3 summarizes all sampling thresholds found out. QdF curves were established by applying the exponential law: The selected sample is subjected here to a fitting of an exponential law. The Law recommended in the case of a sample of flood values is greater than a threshold (Lang & Lavabre 2007). From the Figure 4, the exponential

law seems to adequately describe the samples, especially when the duration (d) increases. It is important to note, for all samples, that the experimental points are close to the theoretical line of the exponential law until a return period of about 10 years. These results are consistent with those of previous studies (Javel 2001, Lang & Lavabre 2007, Yahiaoui *et al.* 2006, Yahiaoui *et al.* 2011).

Quantiles of the floods of this catchment basin are estimated using equation (1), based on the denormalized dimensionless distribution of the reference model given by equations (2) and (3). Quantiles $V(d, T)$ respectively from calculations are reported for information purposes in tables 5–7. The performance of different applied reference models are compared using the criterion of Nash (Nash & Sutcliffe 1970). The latter is calculated for each model applied.

The results of this test (Figs. 6–8) show that the Florac QdF model is the best for the predetermination of Floods in the Isser Watershed at Sidi Aissa station, which is influenced

by a Mediterranean climate. For the other stations, the Florac QdF model is better for the estimation in the frequency domain ($T(\text{year}) \leq 10$), while in the frequency domain ($T(\text{year}) > 10$ years), the Vandenesse QdF model is the best.

Conclusion

This paper has some interest in the estimation of quantile of extreme floods of the Tafna catchment basin, using QdF curves flow-duration-frequency. The flood regime of the Tafna catchment basin is characterized by decennial flows (QIXA10), and varies between 189 and 592 m³/s. The second parameter, the characteristic duration of floods (Dsocose), varies between 3 and 9 hours. These two parameters make the Tafna catchment basin highly vulnerable to torrential and flash floods. For all the studied regions of the Tafna catchment basin, low quantile, medium rare to rare are estimated from the reference Florac model.

INTRODUCTION

Les inondations et les tempêtes sont toujours des phénomènes catastrophiques. En effet, elles représentent plus de 60% des catastrophes naturelles puisqu'elles engendrent chaque année environ 20 000 morts dans le monde.

Comme d'autres pays du monde, l'Algérie a été affectée par de nombreuses inondations au cours des dernières décennies. Ces catastrophes ont été à l'origine de pertes considérables en vies humaines, d'importants dégâts matériels et de déficits incalculables dans les domaines de l'économie et de l'environnement (Ketrouti *et al.* 2012). L'Ouest algérien, et plus particulièrement le bassin versant de la Tafna, sont sujets à de tels événements exceptionnels. Le choix de ce dernier bassin, comme terrain d'étude, est lié à la forte récurrence des événements catastrophiques dans la région (Ketrouti *et al.* 2012).

En effet, l'étude des phénomènes extrêmes et plus particulièrement les crues dans ces régions est devenue indispensable et primordiale. Le but d'une telle étude consiste à trouver des techniques ou des modèles de gestion des risques d'inondation. Plusieurs études et recherches sur les crues et leurs modélisations ont été réalisées au Cemagref de Lyon (Galéa 1993, Galéa & Jerome 1997). L'analyse QdF s'inscrit dans une démarche de quantification probabiliste de l'aléa hydrologique de façon analogue à l'approche IdF (Grissot *et al.* 1962). L'approche QdF peut être exploitée pour estimer les quantiles extrêmes et construire les hydrogrammes de projet de différentes périodes de retour.

Dans ce contexte qui est l'estimation des crues extrêmes, cet article propose tout d'abord une détermination locale des courbes QdF à partir de l'analyse fréquentielle des débits moyens des données disponibles, et ensuite à partir de trois modèles de référence (Vandenesse, Florac et Soyans). L'approche QdF de type bassins de référence a été appliquée dans le cadre du projet FRIEND-AMHY (MEDFRIEND/UNESCO-PHI) sur plusieurs sites européens. Les résultats de ces études ont montré par exemple

l'adéquation du modèle QdF de Florac pour le bassin d'Alcaucin à Vinuela en Espagne, et du modèle QdF de Vandenesse pour les bassins Tevere à Ponte Nuovo en Italie, Dornbirnerach à l'Enzen en Autriche et de Berkel au Rekken au Pays-Bas (Galéa & Prudhomme 1993). En fin, une comparaison de l'adéquation de tel ou tel modèle de référence est effectuée sur le bassin versant de l'oued Tafna.

MATERIEL ET METHODES

Le cadre de l'étude

Le bassin-versant de la Tafna, situé au nord-ouest de l'Algérie, s'étend sur une superficie de 7254 km² (Fig. 1). Il est constitué de huit sous-bassins, dont deux se trouvent en amont dans le territoire marocain. Cette partie marocaine représente une superficie de 2007 km², soit 27,7 % de la surface totale (Tidjani *et al.* 2006). Étant donnée le manque d'informations sur la région située en territoire marocain, notre travail n'est axé que sur la partie algérienne. Le bassin-versant de la Tafna possède un relief très accidenté, avec une altitude moyenne de 780 m et une altitude maximale dépassant les 1800 m. La disposition du relief, ainsi que l'abondance des roches imperméables, ont combiné leurs effets pour donner naissance à un réseau hydrographique dense, avec des densités de drainage variant de 0,5 à 2,9 selon l'importance des sous-bassins (Ghenim 2001).

Les précipitations sur le bassin de la Tafna connaissent de fortes fluctuations, ainsi que des séquences exceptionnellement sèches ou, au contraire, très humides. Les conséquences d'une telle variabilité se traduisent dans l'abondance annuelle, dans la saisonnalité des régimes fluviaux et dans les formes extrêmes de l'écoulement (crues et étiages) (Ketrouti *et al.* 2012). L'étude de séries hydrométriques assez longues ont permis d'évaluer la sensibilité des rivières aux variations du climat. Meddi & Hubert (2003), puis Ghenim *et al.* (2010) ont montré que l'écoulement dans les oueds de la Tafna est caractérisé par une forte irrégularité intra-annuelle et interannuelle des crues, avec de très forts débits instantanés pouvant engendrer des inondations et des

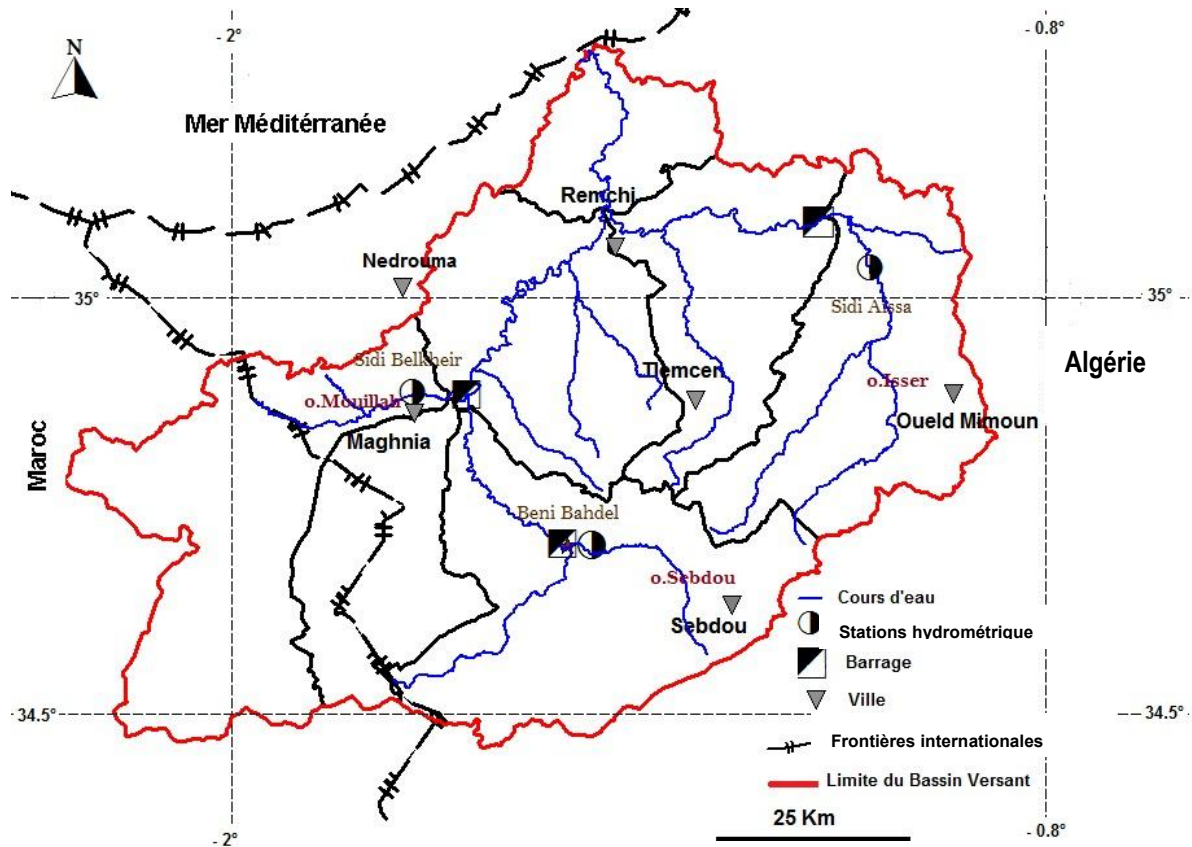


Figure 1. Situation géographique du bassin versant de l’oued Tafna et stations retenues pour l’étude.

Figure 1. Geographical location of the Tafna catchment area and stations selected for the study.

périodes de retour éminemment variables. Il est aussi caractérisé par un débit d’étiage très faible à nul. Le bassin de la Tafna est occupé par un couvert végétal maigre et discontinu. En effet, un relief relativement accidenté et un couvert végétal dégradé et des précipitations irrégulières constituent des facteurs favorables à la genèse de crues violentes dans une grande partie du bassin de la Tafna (Ketrouti *et al.* 2012).

Données utilisées

L’étude est basée sur les mesures instantanées des débits réalisées par les services de l’ANRH. Ces mesures ne sont malheureusement relatives qu’aux trois stations : Sidi Aïssa sur l’oued Isser, Sidi Belkheir sur l’oued Mouillah et Beni Bahdel sur l’oued Sebdo (Tab. 1).

Considérations méthodologiques à propos de la constitution de l’échantillon

Deux méthodes d’échantillonnage sont principalement utilisées par les hydrologues afin d’extraire d’une chronique des crues extrêmes. L’échantillonnage par valeurs maximales annuelles (MAXAN) (Assani 1997) consiste à sélectionner chaque année le débit observé le plus fort. L’échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil (SUP-SEUIL) (Lang *et al.* 1997) consiste, quant à lui, à choisir un seuil, puis à sélectionner les pointes des événements dépassant ce seuil. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. La mise en œuvre de la méthode MAXAN est très simple. En ne sélectionnant qu’un unique événement par an, on s’assure de l’indépendance

entre les valeurs. L’inconvénient est d’ignorer un certain nombre d’événements lors des années où beaucoup de crues se sont produites, et inversement de prendre en compte des événements peu importants lors des années peu actives. L’homogénéité de l’échantillon n’est, donc, pas optimale (Renard 2006). La technique SUP-SEUIL est plus difficile à mettre en œuvre (Lang 1995, Lang *et al.* 1997, Lang *et al.* 1999). En effet, il faut ajouter des contraintes d’indépendance afin de ne pas échantillonner plusieurs fois le même événement hydrologique. L’échantillon fourni par la technique SUP-SEUIL sera également plus homogène que celui fourni par la méthode MAXAN. Autre avantage, il est possible d’étoffer l’échantillon en choisissant, en moyenne, plus d’un événement par an.

Dans ce travail, les différentes limites de l’échantillonnage par la méthode MAXAN ont conduit à s’intéresser à la méthode des valeurs supérieures à un seuil SUP-SEUIL, encore appelée méthode des excès ou méthode peaks over threshold (POT); il s’agit alors de la série partielle des débits (Lang *et al.* 1997). L’intérêt de cette méthode, par rapport à la précédente, est l’estimation plus précise des quantiles de crue (Cunnane 1979). Bezak *et al.* (2014) en Serbie, Fischer & Schumann (2014) en Allemagne et Lang (1995) en France ont montré que cette technique donne de meilleurs résultats, comparée à la technique des maxima annuels. Le logiciel Prethy (Lang & Lavabre 2007) a été utilisé pour déterminer les seuils respectant les critères de sélection des crues avec, en particulier, vérification des hypothèses de base au lieu de (indépendance, stationnarité et homogénéité des événements) (Lang *et al.* 1997, Lang *et al.* 1999).

Présentation des modèles de référence

Diverses études de régionalisation des crues (Jin & Galéa 1990, Galéa & Prudhomme 1993) ont permis de caractériser, au sens des courbes QdF, le régime hydrologique en crue de plus d’une centaine de sites observés en France. Cela a permis de distinguer trois familles de bassins versants. Pour chacune d’elles a été choisi un bassin de référence. Chacun d’eux est soumis à des conditions pluviométriques bien différenciées : le bassin de la Grogne à Vandenesse placé sous l’influence océanique, celui du Roubion à Soyans se situe un peu à l’écart du sillon rhodanien et il prend en compte des influences plus continentales. Quant au bassin de la Mimente à la station de Florac, il est sous influence méditerranéenne (Yahiaoui *et al.* 2011). Généralement, les courbes QdF calées sur les trois stations signalées auparavant sont normalisées en durée et en débit, il s’agit précisément du quantile décennal *QIXA10* et de la durée caractéristique de crue *D* (durée de SOCOSE (CTGREF 1980)). Cette approche est basée sur le calcul des quantiles adimensionnels relatifs au bassin de référence choisi.

$$d^* = d / D \quad ; \quad V^*(d^*, T) = V(d, T) / Q(0,10) \quad (1)$$

Pour $0,5 \leq T(an) \leq T_g$:

$$V^*(d^*, T) = a_q^*(d^*) \ln T + x_0^*(d^*) \quad (2)$$

Pour $T > T_g$:

$$V^*(d^*, T) = V^*(d^*, T_g) + a_p^*(d^*) \ln \left(\frac{a_q^*(d^*)}{a_p^*(d^*)} \cdot \frac{T - T_g}{T_g} \right) \quad (3)$$

Avec :

$$a_q^*(d^*) = \frac{1}{x_1 d^* + x_2} + x_3 \quad ; \quad x_0^*(d^*) = \frac{1}{x_4 d^* + x_5} + x_6 \quad ;$$

$$a_p^*(d^*) = \frac{1}{x_7 d^* + x_8} + x_9$$

$V^*(d^*, T)$: Quantiles consolidés des bassins de référence.

$V(d, T)$: Quantiles consolidés des sites ciblés.

$Q(0,10)$: Débit décennal (*QIXA10*).

T_g : Période de retour correspondante au seuil d’extrapolation (en général $T_g = 10$ ans).

Les paramètres x_i ont été définis pour chaque modèle dans le Tableau 2 (Galéa & Prudhomme 1994, Galéa & Prudhomme 1997).

RESULTATS ET COMMENTAIRES

Choix des seuils

Afin de mettre en évidence et d’estimer les quantiles des crues caractérisant l’oued Tafna, des séries de valeurs supérieures à un seuil ont été élaborées par le logiciel PRETHY en se basant sur les critères de la sélection des seuils. Il s’agit en particulier de la vérification des hypothèses de base (stationnarité et homogénéité) (Lang *et al.* 1999).

En utilisant le logiciel PRETHY, les seuils ont été fixés de telle sorte qu’en moyenne deux événements au plus par an soient retenus. Les tests relatifs à l’échantillonnage réalisés par le même logiciel montrent l’indépendance, la stationnarité et l’homogénéité des séries *QIX* (Figs. 2–3).

La Figure 2 présente le test de stationnarité pour l’échantillon de la station de Sidi Belkheir. Elle montre l’absence de rupture dans le graphique du nombre cumulé d’événements en fonction du temps, avec une courbe expérimentale qui reste dans les limites de l’intervalle de tolérance à 90%. L’hypothèse de stationnarité est acceptée, avec un risque d’erreur de 10%.

Tableau 1. Code, période et coordonnées des stations hydrométriques.

Table 1. Code, period and details of hydrometric stations.

N°	Station	Cordonnées Lambert			Code	Période des débits	Oued
		X(Km)	Y(Km)	Altitude (m)			
01	Beni Bahdel	115	164,60	666	160402	1972-2004	Sebdou
02	Sidi Aïssa	157,35	199,50	380	160614	1986-2001	Isser
03	Sidi Belkheir	101,90	205,20	285	160501	1973-2001	Mouillah

Tableau 2. Paramètres de calage des trois modèles (bassin de référence).

Table 2. Calibration parameters of the three models (reference basin).

Modèles en VCXd	Paramètres								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Vandenesse	2,635	6,19	0,016	1,045	2,385	0,172	1,083	1,75	0,00
Florac	1,12	3,56	0,00	0,95	3,18	0,039	1,56	1,91	0,085
Soyans	0,87	4,60	0,00	1,07	2,50	0,099	0,569	0,69	0,046
Modèles en QCXd	Paramètres								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Vandenesse	3,970	6,48	0,010	1,910	1,910	0,097	3,674	1,774	0,013
Florac	3,05	3,53	0,00	2,13	2,96	0,010	2,78	1,77	0,040
Soyans	2,57	4,86	0,00	2,10	2,10	0,05	1,49	0,66	0,017

La Figure 3 donne les valeurs de l'indice de dispersion ($R = \text{Var}(N)/E(N)$) du nombre N de valeurs supérieures au seuil S pour la station de Beni Bahdel. Pour un processus de Poisson, l'indice de dispersion est égal à 1. Pour l'ensemble des échantillons étudiés, la valeur expérimentale reste comprise dans les limites de l'intervalle de confiance à 90%, on note un seuil compris entre 26 et 150 m^3/s pour Sidi Aissa, entre 65 et 240 m^3/s pour Sidi Belkheir et entre 18 et 107 m^3/s pour Beni Bahdel. Le Tableau 3 résume tous les seuils d'échantillonnage trouvés.

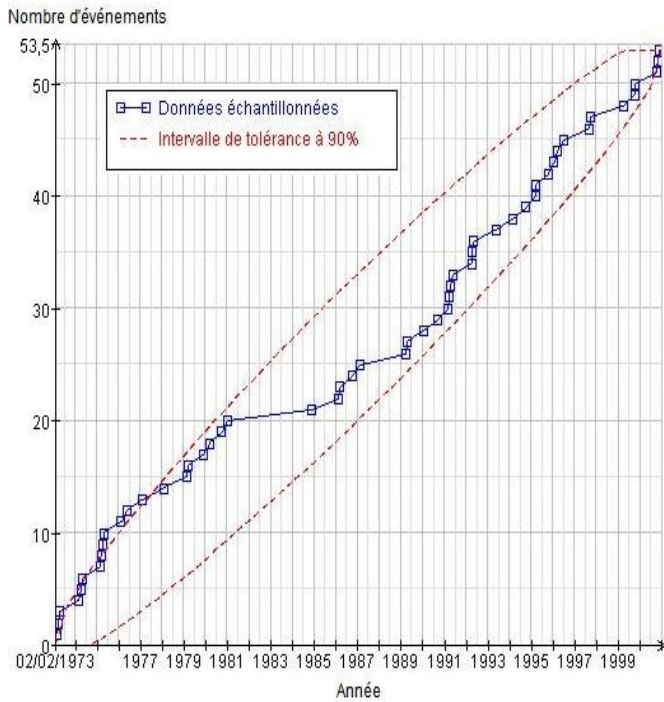


Figure 2. Test de stationnarité (station Sidi Belkheir ($S = 68 \text{ m}^3/\text{s}$)).
 Figure 2. Stationarity test (station Sidi Belkheir ($S = 68 \text{ m}^3/\text{s}$)).

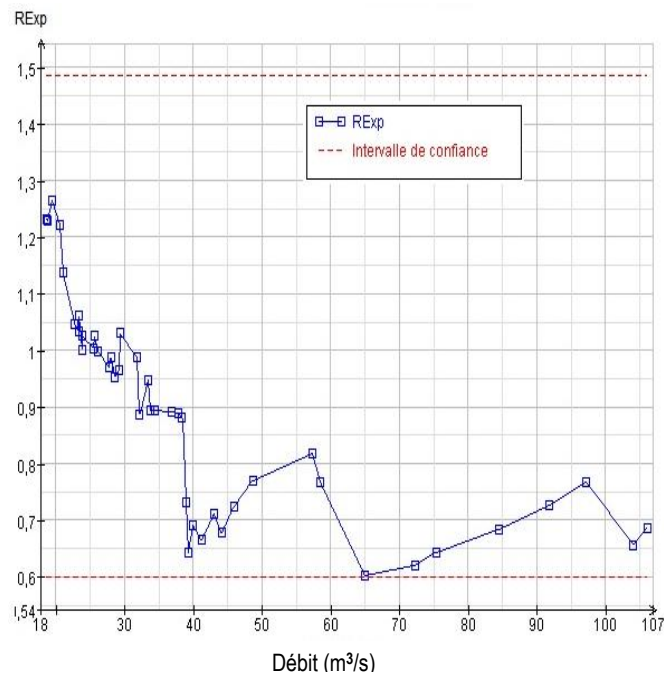


Figure 3. Test de poisson (station de Beni Bahdel, $S = 18 \text{ m}^3/\text{s}$)).
 Figure 3. Poisson test (station Beni Bahdel, $S = 18 \text{ m}^3/\text{s}$)).

Etablissement des courbes QdF par application de la loi exponentielle

Les études qui ont été consacrées à l'hydrologie des crues extrêmes des bassins versants du sud-ouest méditerranéens ne sont pas très nombreuses. La distribution des débits maximums de crues reste donc mal déterminée, hormis quelques études fragmentaire où les auteurs ont utilisé la loi de Gumbel (Hayane 1983), la loi de Frechet (Ghachi 1986), la loi de Pearson III (Bouanani 2004), et celle de Weibull (Yahiaoui 2006). Dans le cadre de cette étude, l'échantillon sélectionné est soumis à un ajustement à une loi exponentielle, loi recommandée dans le cas d'un échantillonnage des crues par valeur supérieure à un seuil (Lang & Lavabre 2007).

La Figure 4 présente le résultat d'ajustement de la loi exponentielle sur l'échantillon de Sidi Aissa. Cette loi semble décrire plus au moins convenablement les échantillons surtout quand la durée (d) augmente. Il est important de noter pour l'ensemble des échantillons que les points expérimentaux sont proches de la droite théorique de la loi exponentielle jusqu'à une période de retour d'environ 10 ans, résultat qui est en accord avec ceux réalisés par les études antérieures (Javelle 2001, Lang & Lavabre 2007, Yahiaoui *et al.* 2006, Yahiaoui *et al.* 2011).

Tableau 3. Seuils et surfaces drainées des échantillons de la Tafna.
 Table 3. Thresholds and surfaces drained of the Tafna samples.

Nom de station	Seuil en (m^3/s)	Surface drainée (Km^2)	Période d'étude
Beni Bahdel	18,6	255	1973-2004
Sidi Aissa	27,1	745	1986-2001
Sidi Belkheir	68	650	1973-2001

Estimation de QIXA10

Les débits décennaux ($QIXA10$) sont issus de l'ajustement statistique des séries étudiées à une loi exponentielle. Pour le bassin versant de l'oued Isser à Sidi Aissa, le $QIXA10$ est de 194 m^3/s . Sur l'oued Sebdoou et en amont, à Beni Bahdel, le débit décennal est estimé à 189 m^3/s . Pour l'oued Mouillah, à Sidi Belkheir, le débit décennal est de 473 m^3/s .

Notant que les valeurs de $QIXA10$ pour le cas du bassin versant de la Tafna sont assez élevées pour une telle période de retour (10 ans), ce qui montre la dangerosité de ces crues qui nécessite une étude sérieuse sur les risques (aléa et vulnérabilité).

Durée caractéristique de la crue D

Par définition, la durée caractéristique d'une crue, est la durée pendant laquelle la moitié du débit de pointe est continument dépassée. Dans un plan (Q^p, d^p), la durée caractéristique de crue du bassin versant au sens de la méthode de SOCOSE (CTGREF 1980) est définie par le temps médian des plus fortes crues au voisinage de $QIXA10$. La Figure 5 présente les couples (Q^p, d^p) des crues sélectionnées de l'échantillon de Beni Bahdel, d^p correspond

au temps où la moitié du débit de pointe est dépassé. Cette figure montre que la durée caractéristique est égale à 4 heures pour Beni Bahdel. Par la même méthode, les durées caractéristiques des deux stations restantes sont respectivement 3 heures pour Sidi Aissa et 9 heures pour Sidi Belkheir. Cette différence reflète la variation des conditions qui régissent l'évacuation des crues (nature des sols, nature des précipitations, réponses des bassins, conditions topographiques....).

Estimation des quantiles de crues selon l'approche des bassins de référence

Les quantiles des séries hydrométriques du bassin versant de la Tafna sont estimés à l'aide de l'équation (1) qui est basée sur la dénormalisation de la distribution adimensionnelle du modèle de référence, donnée par les équations (2) et (3). Les quantiles $V(d, T)$ issus de calculs sont respectivement reportés à titre indicatif dans les Tableaux 5 à 7.

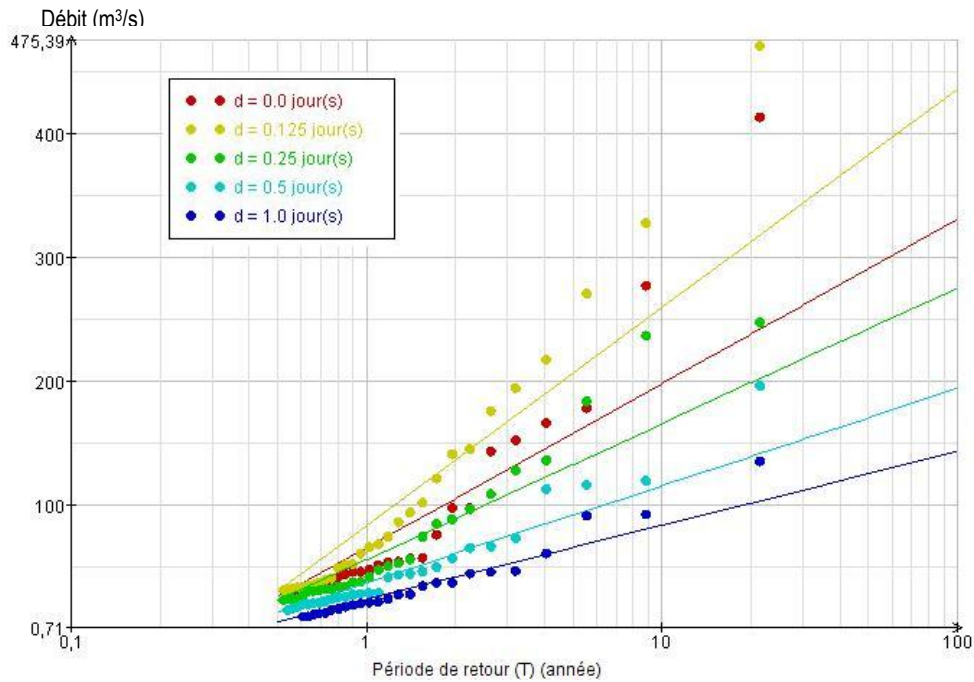


Figure 4. Ajustement d'une loi exponentielle de l'échantillon de la station Sidi Aissa.
 Figure 4. Ajustment of an exponential law on sample of Sidi Aissa.

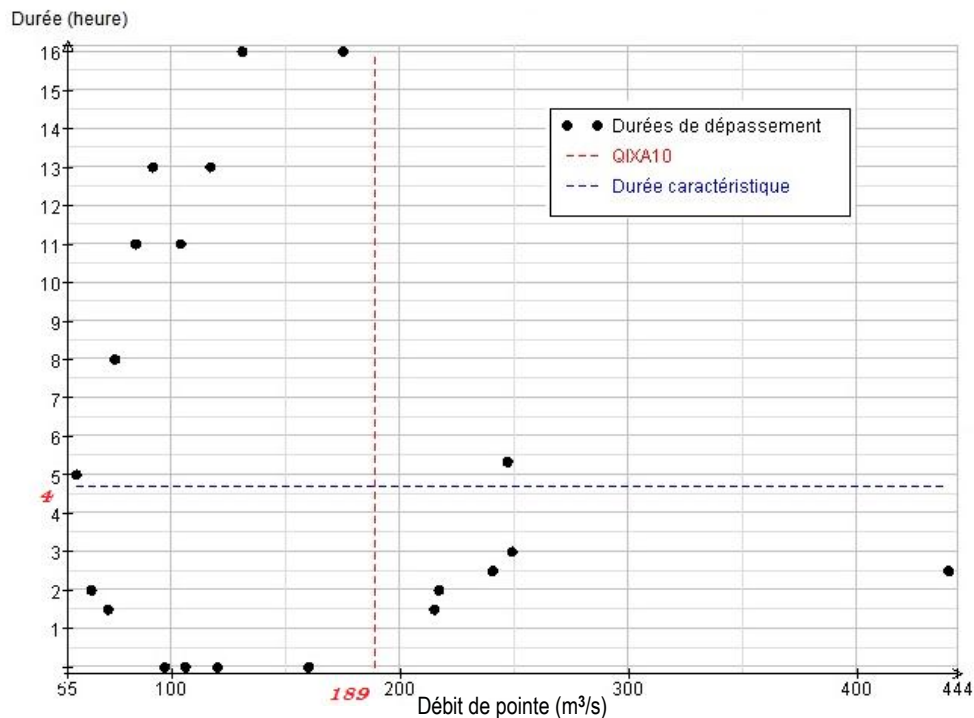


Figure 5. Détermination de la durée D caractéristique des crues du bassin versant de la Tafna au sens de la méthode de SOCOSE (CTGREF1980), cas de la station de Beni Bahdel.

Figure 5. Determination of the characteristic duration D of watershed flood of Tafna within the meaning of the method of SOCOSE (CTGREF1980), case of the Beni Bahdel station.

Tableau 5. Quantiles de crues de débit moyen modélisés par le modèle de Vandenesse (Sidi Aissa).
 Table 5. Average flow of flood quantile modeled by the model of Vandenesse (Sidi Aissa).

Quantiles $V(d, t)$ en m^3/s											
$d(h)$	$T(an)$										
	0,5	1	2	5	10	20	30	50	100	500	1000
0	90,948	114,8	138,7	170,26	194,14	235,8	259,38	295,35	353,69	514,71	589,17
3	72,539	89,93	107,32	130,3	147,69	243,57	259,83	283,98	322,03	423,64	469,96
6	62,835	76,72	90,605	108,96	122,85	147,05	159,59	177,9	206,25	280,62	314,24
12	52,729	62,92	73,108	86,577	96,766	114,67	123,42	135,92	154,85	203,39	225,14
24	44,34	51,42	58,506	67,868	74,951	87,602	93,251	101,09	112,64	141,45	154,21

Tableau 6. Quantiles de crues de débit moyen modélisés par le modèle de Florac (Sidi Aissa).
 Table 6. Average flow of flood quantile modeled by the model of Florac (Sidi Aissa).

Quantiles $V(d, t)$ en m^3/s											
$d(h)$	$T(an)$										
	0,5	1	2	5	10	20	30	50	100	500	1000
0	30,80	68,57	106,34	156,28	194,05	238,86	271,26	317,54	387,65	567,36	647,84
3	25,81	54,54	83,27	121,26	149,99	182,76	205,24	236,21	281,53	393,91	443,56
6	22,57	45,75	68,94	99,59	122,77	141,95	159,60	183,67	218,59	304,47	342,28
12	18,63	35,36	52,08	74,19	90,92	109,82	122,64	140,17	165,65	228,42	256,08
24	14,82	25,56	36,30	50,50	61,24	73,73	82,52	94,84	113,16	159,27	179,77

Tableau 7. Quantiles de crues de débit moyen modélisés par le modèle de Soyans (Sidi Aissa).
 Table 7. Average flow of flood quantile modeled by the model of Soyans (Sidi Aissa).

Quantiles $V(d, t)$ en m^3/s											
$d(h)$	$T(an)$										
	0,5	1	2	5	10	20	30	50	100	500	1000
0	67,573	96,81	126,04	164,68	193,92	223,15	240,25	261,79	291,02	358,9	388,13
3	48,964	73,55	98,131	130,63	155,21	187,3	214,1	257,27	332,01	555,61	663,04
6	39,806	61,02	82,226	110,26	131,47	158,61	180,55	214,84	272,06	435,37	512,06
12	31,177	47,82	64,462	86,462	103,1	123,91	140,15	164,76	204,4	312,94	362,96
24	25,114	36,75	48,379	63,756	75,389	89,693	100,58	116,76	142,26	210,4	241,46

Comparaison des performances des différents modèles de référence

Les performances des différents modèles de référence appliqués sont comparées en utilisant le critère de Nash (Nash & Sutcliffe 1970). Ce dernier est calculé pour chaque modèle appliqué. Le critère de Nash peut varier de ∞ à 1. La valeur optimale est 1 (calage parfait). Une valeur supérieure à 0,7 est habituellement considérée comme satisfaisante. Ce critère est exprimé comme suit :

$$Nash(T) = 1 - \frac{\sum_{i=D/2}^{5D} (VCX_i T - VCX_i T^{modèle})^2}{\sum_{i=D/2}^{5D} (VCX_i T - VCX_i T_{moyen})^2} \quad (4)$$

$$VCX_i T_{moyen} = \frac{\sum_{i=D/2}^{5D} VCX_i T}{1 + 5D - D/2} \quad (5)$$

Avec :

$VCX_i T$: Les quantiles estimés à partir des données réelles.

$VCX_i T^{modèle}$: Les quantiles issus de modèles QdF de type bassin de référence.

Les résultats de ce critère (Figs. 6–8) montrent que le modèle QdF Florac est le plus adapté pour la prédétermination des crues du bassin versant de l'oued Isser à la station de Sidi Aissa, qui se trouve sous l'influence d'un climat méditerranéen. Ce résultat est similaire à celui trouvé

par Yahiaoui *et al.* (2011) lors de l'étude du régime de crues de la Mekerra, qui est un bassin versant voisin de celui de l'oued Isser.

Pour les deux autres stations, le modèle QdF Florac présente une meilleure estimation des crues dans le domaine des fréquences ($T(\text{an}) \leq 10$ ans), alors que dans le domaine des fréquences ($T(\text{an}) > 10$ ans), le modèle QdF de Vandenesse est meilleur que celui de Florac. Selon le critère de Nash, il y a une légère différence dans le domaine des fréquences ($10 \leq T(\text{an}) \leq 50$). Cette différence est due probablement au contexte hydroclimatologique des bassins versants de Sebdu et de Mouilah, ainsi que la situation géographique des stations de Beni Bahdel et Sidi Belkheir. Ces dernières sont situées aussi sous l'influence des perturbations de l'océan Atlantique et de la mer méditerranéenne. En effet, si on considère les deux domaines des fréquences ($T(\text{an}) \leq 10$) et ($T(\text{an}) > 10$), ainsi que la différence minimale selon le critère de Nash entre Vandenesse et Florac, le modèle Florac peut être considéré comme adéquat pour estimer les crues de l'oued Mouilah et de l'oued Sebdu.

L'intérêt de la prévision des crues dans ce bassin est lié aux risques d'inondation qui touche régulièrement cette région. La dangerosité de ces crues, qui ont provoqué de nombreux décès et de pertes matérielles, est due à la conjugaison de la pluviométrie de certains épisodes pluvieux et la nature du relief de la région. La région est caractérisée par un relief très accidenté, donc très favorable à l'écoulement et à la progression rapide de l'onde de crue. Les inondations du mois de novembre 2012 ont fait cinq morts dans la région de Remchi. Les inondations du mois d'octobre 2008 ont fait un mort et d'importants dégâts matériels. Les pluies diluviennes du mois de janvier 2006 ont produit d'importants dégâts matériels dans les communes de Bensekrane, Sabra, Bouhlou, Beni-Snous et Maghnia. En janvier 2015, dans la commune de Remchi, une personne est portée disparue. Elle a été emportée par les eaux de l'oued Tafna en crue. Ces catastrophes montrent l'importance de l'estimation des débits fréquentiels avec des techniques appropriées pour pouvoir dimensionner les ouvrages hydrotechniques nécessaires à la protection des villes et des villages contre les crues et les inondations mortelles.

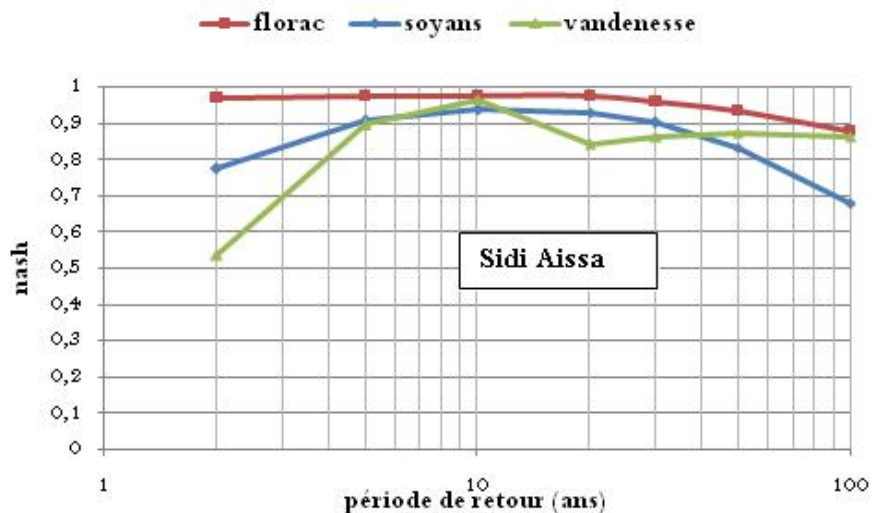


Figure 6. Coefficient de Nash pour les trois modèles de référence (Soyans, Florac et Vandenesse) à Sidi Aissa.

Figure 6. Nash coefficient for the three standard models (Soyans, Florac Vandenesse) in Sidi Aissa.

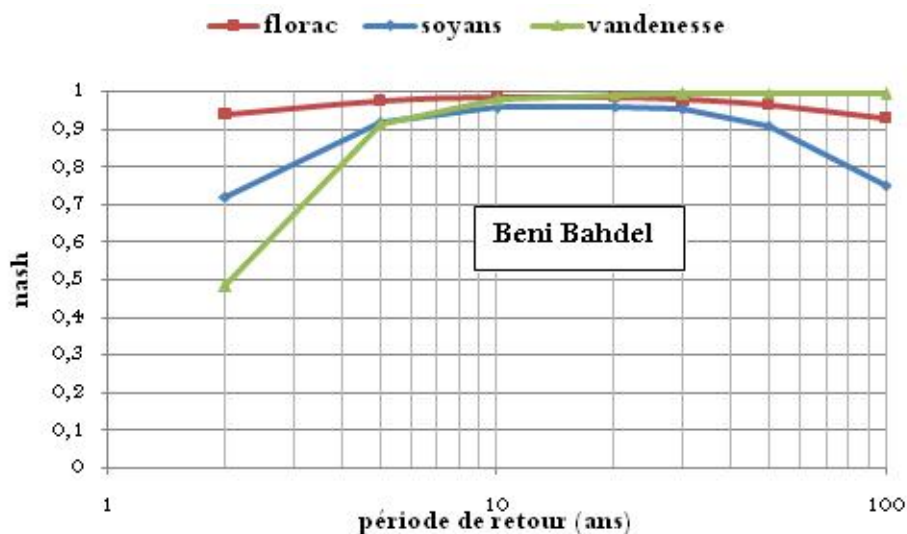


Figure 7. Coefficient de Nash pour les trois modèles de référence (Soyans, Florac et Vandenesse) à Beni Bahdel.

Figure 7. Nash coefficient for the three standard models (Soyans, Florac Vandenesse) in Beni Bahdel.

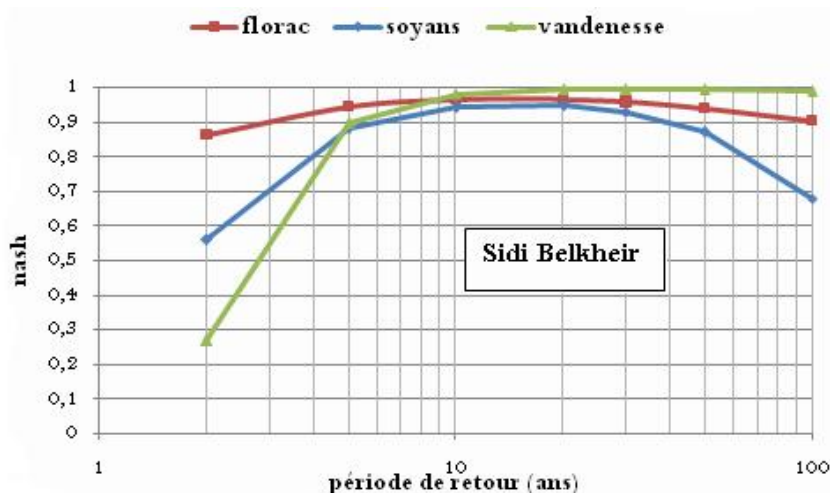


Figure 8. Coefficient de Nash pour les trois modèles de référence (Soyans, Florac et Vandenesse) à Sidi Belkheir.

Figure 8. Nash coefficient for the three standard models (Soyans, Florac Vandenesse) in Sidi Belkheir.

CONCLUSION

Ce travail a permis à l'estimation des quantiles des crues extrêmes de l'oued Tafna à l'aide des courbes QdF en débit-durée-fréquence. En effet, cette démarche est considérée comme étant une opération primordiale pour la conception, la gestion des retenues et la protection contre les inondations.

Le régime des crues de l'oued Tafna est caractérisé par des débits décennaux QIXA10 qui varient entre 189 et 592 m³/s. Ces débits sont assez élevés pour une telle période de retour. Le deuxième paramètre qui est la durée caractéristique de la crue D_{SOCOSE} est compris entre 3 et 9 heures. Ces deux paramètres rendent le bassin de l'oued Tafna très exposé aux crues rapides et torrentielles.

Pour l'ensemble des régions étudiées du bassin versant de la Tafna, les quantiles faibles, moyennement rares à rares sont estimés à partir du modèle de référence Florac qui a prouvé encore sa performance et son adéquation au régime des crues du bassin versant de l'oued Tafna, après une première application sur le bassin versant de la Mekerra (Yahiaoui *et al.* 2011).

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (L'ANRH) pour avoir fourni les données utilisées dans ce travail. Ils remercient vivement les évaluateurs de cet article ainsi que le comité éditorial du journal pour les commentaires et les remarques pertinentes qui ont contribué à l'amélioration de ce travail.

REFERENCES

Assani A.A. 1997. *Recherche d'impacts d'une retenue sur le comportement d'une rivière ardennaise : hydrologie, sédimentologie, morphologie et végétation. Cas du barrage de Büngenbach sur la Warche (Belgique)*. Thèse de Doctorat en Sciences Géographie, Université de Liège, 482 p.

Bezak N., Brilly M. & Šraj M. 2014. Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 5, 959–977.

Bouanani A. 2004. *Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie)*. Thèse de Doctorat en Géologie appliquée, Université Abou Baker Belkaid Telemcen, 250 p.

CTGREF.SRAE.DIAME.SH. 1980. Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 2 : « La méthode SOCOSE » in : *Information Technique*, no 38-2 (juin, 1980). Fascicule 3 : « La méthode CRUPEDIX ».

Cunnane C. 1979. A note on the Poisson assumption in partial duration series models. *Water Resources Research*, Q2 15, 489–94.

Fischer S. & Schumann A. 2014. *Comparison between classical annual maxima and Peak over Threshold approach concerning robustness*. SFB 823, Nr, 26, 20 p.

Galéa G. & Prudhomme C. 1993. Characterization of large scale variations in river flow behaviour with reference to hydrological macro regionalization». In : *FRIEND Conference, Technische Universität Braunschweig*, 11–15.

Galéa G. 1993. Gestion des grandes plans d'eau naturels, efficacité des estimations hydrologiques à validations complémentaires ; cas des bilans journaliers du lac de Grand-Lieu (Loire-Atlantique). *La Houille Blanche*, n°4, 257–267.

Galéa G. & Prudhomme C. 1994. Modèles Débit-Durée-Fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique. Validation sur le BVRE de DRAIX. *Hydrologie Continentale*, 9,2, 139–151.

Galéa G. & Jerome S. 1997. Représentativité des modèles QdF-application à la régionalisation des régimes de crue du bassin versant de la Loire (France). *Hydrological Sciences Journal*, 246, 277–285.

Galéa G. & 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*, 10, 1, 83–101.

Ghachi A. 1986. *Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie*. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle. Ed. O.P.U., 508 p.

Ghenim A. 2001. *Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas d'oued Isser, oued mouilah et de la Haute tafna*. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 192 p.

Ghenim N.A. Megnounif A. & Seddini A. 2010. Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'oued Tafna à Beni Bahdel (Nord-Ouest algérien). *Revue Sécheresse*, 21, 115–20.

- Grissolet H., Guilmet B. & Arlery R. 1962. *Climatologie-Méthodes et Pratiques*. Gauthiers-Villars & Cie Editeur, Paris, 401 p.
- Hayane S.M. 1983. *Contribution à l'étude géologique et hydro-géologique du bassin versant de l'oued Sikkak (région de Tlemcen)*. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle. Université d'Oran. 236 p.
- Javelle P. 2001. *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale*. Thèse de Doctorat, Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Cemagref (Lyon), 277 p.
- Jin L. & Galéa G. 1990. *Modèles descriptifs synthétiques des connaissances régionales en crues, représentativité spatiale et domaine de validité*. DEA Cemagref-Lyon, ULPS/ENITRTS Strasbourg.
- Ketrouci K. Meddi M. & Abesselam B. 2012. Etude des crues extrêmes en Algérie, cas du bassin-versant de la Tafna. *Revue sécheresse*, 23, 4, 297–305.
- Lang M. 1995. *Les chroniques en hydrologie*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, Cemagref Lyon, 296 p.
- Lang M., Rasmussen P., Oberlin G. & Bobee B. 1997. Echantillonnage par valeurs supérieures à un seuil : modélisation des occurrences par la méthode du renouvellement. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3, 279–320.
- Lang M., Ouarda T. & Bobee B. 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modelling. *Journal of Hydrology* 225, 103–117.
- Lang M. & Lavabre J. 2007. *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*. Editions Quae, Cemagref, France, 231 p.
- Meddi M. & Hubert P. 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions. *Hydrological Sciences Journal*, 278, 229–235.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models : part IA : discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.
- Tidjani A.E.B., Yebdri D. Roth J.-C. & Derriche Z. 2006. Exploration des séries chronologiques d'analyse de la qualité des eaux de surface dans le bassin de la Tafna (Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 19, 315–24.
- Yahiaoui A.B. & Touaïbia B. 2006. *Modélisation du régime de crue des bassins versants. Application et Utilité des Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquence HSMF*. 1st International Workshop on Hydrological Extremes AMHY – FRIEND group, 161–172.
- Yahiaoui A., Touaïbia B., Bouvier C. & Dechemi N. 2011. Modélisation du régime de crue en Débit-durée-Fréquence du bassin de l'oued Mekerra dans l'ouest Algérien. *Revue des sciences de l'eau*, 24, 2, 103–115.
- Renard B. 2006. *Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France*. Thèse de Doctorat, L'INP Grenoble, 364 p.

Manuscrit reçu le 12/07/2015

Version révisée acceptée le 27/06/2016

Version finale reçue le 18/07/2016

Mise en ligne le 08/08/2016