

Modélisation du régime hydrologique du Bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire

Kouassi Amani Michel^{1*}, Gngangouin Asaph Yahot Joël², Mmadi Fakri³

⁽¹⁾Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB). Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi). Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques. BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). E-mail: michel.kouassi@inphb.ci (Côte d'Ivoire)

⁽²⁾Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB). Ecole Doctorale Polytechnique (EDP), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)

⁽³⁾Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB). Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire).

Reçu le 27 juillet 2022, accepté le 26 septembre 2022, publié en ligne le 29 octobre 2022

RESUME

Description du sujet. Le bassin versant du N'zi (Bandama) a connu des crues particulièrement importantes ces dernières années. Face à la recrudescence de ces événements extrêmes, l'estimation et la prédétermination des quantiles des crues constituent un axe stratégique de prévention contre les inondations dans cette région.

Objectif. L'objectif de ce travail est donc de déterminer le modèle QdF de type bassin de référence aux crues du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire.

Méthodes. Les données de débits journaliers utilisées sont disponibles sur la période 1961-2016 et ont été collectées aux stations de N'zianouan, Dimbokro, Bocanda, M'bahiakro et Fétékro. L'approche retenue dans cette étude est la modélisation Débit-durée-Fréquence qui est un moyen de représenter le régime de crue d'un bassin versant et constitue un outil bien adapté à la prédétermination des crues rares et extrêmes. Les courbes QdF locales ont été déterminées à partir de débits fréquents issus de l'analyse fréquentielle des débits moyens sur différentes durées (20 à 60 jours). Plusieurs périodes de retour ont été utilisées allant de 2 à 1000 ans. A partir du critère de performance de Nash et de représentations graphiques, les courbes locales ont ensuite été comparées à celles obtenues en appliquant différents modèles régionaux (Vandenesse, Florac ou Soyans), dans lesquels sont pris en compte deux indices de la crue caractéristique du bassin versant, une durée descriptive de la dynamique des crues et le débit instantané de période de retour dix ans.

Résultats. Les résultats de l'analyse fréquentielle ont montré que le meilleur modèle statistique d'ajustement des débits de crue est le modèle de Weibull. Suivant les critères de Nash et graphique, d'une part, et le contexte hydroclimatologique d'autre part, le modèle QdF de Vandenesse a été identifié comme le meilleur modèle régional plus proche du modèle local.

Conclusion. Les modèles QdF construits constituent des outils très importants pour l'étude et la prédétermination de l'aléa et la vulnérabilité qui sont les facteurs essentiels du risque des inondations. Il est nécessaire d'élargir cette étude à d'autres bassins pour lesquels de longues chroniques de débits sont disponibles, afin de construire un modèle régional plus précis et adapté au contexte ivoirien et confirmer ces premiers résultats.

Mots-clés : Modélisation Débit-Durée-Fréquence, Analyse fréquentielle, Vandenesse, Soyans, Florac, N'zi (Bandama), Côte d'Ivoire

ABSTRACT

Watershed flood regime modelling with the Flow-duration-Frequency approach as applied on the N'zi watershed (Bandama, Côte d'Ivoire)

Description of the subject. The N'zi (Bandama) watershed has experienced particularly high floods in recent years. Faced with the resurgence of these extreme events, the estimation and predetermination of flood quantiles constitute a strategic axis of flood prevention in this region.

Objective. The objective of this article is therefore to determine the QdF model of the reference basin type for the floods of the N'zi (Bandama) watershed in Ivory Coast.

Methods. The daily flow data used are available for the period 1961-2016 and were collected at the N'zianouan, Dimbokro, Bocanda, M'bahiakro and Fétékro stations. The approach adopted in this study is Flow-Duration-

Frequency modeling which is a means of representing the flood regime of a watershed and is a tool well suited to the predetermination of rare and extreme floods. The local QdF curves were determined from frequency flows resulting from the frequency analysis of the average flows over different durations (20 to 60 days). Several return periods have been used ranging from 2 to 1000 years. From the Nash performance criterion and graphical representations, the local curves were then compared with those obtained by applying different regional models (Vandenesse, Florac or Soyans), in which two indices of the flood characteristic of the catchment area are taken into account, a duration descriptive of the flood dynamics and the instantaneous discharge of ten-year return period.

Results. The results of the frequency analysis showed that the best statistical model for adjusting flood flows is the Weibull model. According to the Nash and graphic criteria, on the one hand, and the hydroclimatological context on the other hand, the QdF model of Vandenesse was identified as the best regional model closer to the local model.

Conclusion. These results can be used to construct QdF curves on ungauged ivoirien watersheds within or outside but hydrologically close to the studied basin. It is necessary to extend this study to other basins for which we have long flow chronicles, in order to build a more precise regional model adapted to the ivoirien context and confirm these initial results.

Keywords: Flow-duration-frequency modeling, frequency analysis, Vandenesse, Soyans, Florac, N'zi (Bandama), Ivory Coast.

*

1. INTRODUCTION

Les inondations sont un phénomène de plus en plus fréquent dans le monde. Ces catastrophes ont entre autres un impact sur l'environnement et les activités socio-économiques des communautés touchées. C'est pour cela que leur étude est devenue un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêt dans le domaine des sciences de l'eau. Considérées comme un fléau à la base des inondations, il est utile de bien connaître les crues pour plusieurs raisons à savoir la gestion du système hydraulique concerné (cours d'eau, affluent et exutoires, lacs naturels ou artificiels, mares, dépressions), la gestion des systèmes environnants dépendant (possibilité d'alimentation en eau, recharge des nappes), la gestion des bassins versants à partir desquels se forme la crue et la gestion du risque hydrologique dû aux crues (risque d'inondation).

En effet, 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 (Sauquet *et al.*, 2004). C'est ainsi que l'étude des crues qui engendrent des inondations catastrophiques a fait l'objet de nombreuses recherches. Lorsque les données sont disponibles pour un grand nombre d'années, l'analyse fréquentielle des débits et les méthodes hydrométéorologiques telles que le GRADEX et AGREGEE sont des approches privilégiées pour étudier les régimes de crue et obtenir une prédétermination des crues rares et extrêmes (Yahiaoui *et al.*, 2011). Cependant, l'analyse fréquentielle ne caractérise en général que les débits de pointe ou débit maximal des crues, et doit être complétée par des traitements visant à déterminer les dépassements de seuils de débits pour différents intervalles de temps jugés critiques au regard de la vulnérabilité du milieu. La prise en compte de ces

dépassements de seuils est une information indispensable dans une analyse probabiliste des crues (Gilard, 1998 in Yahiaoui *et al.*, 2011).

Lors de l'étude des régimes de crues des bassins versants, il est nécessaire, pour la compréhension des développements ultérieurs, de prêter une attention particulière à la notion de la « durée » qui intervient dans un bon nombre de concepts hydrologiques, la caractérisation de l'écoulement d'un bassin versant, la demande sociale en matière de besoins, de risques de dégâts, etc., toutes choses étroitement liées aux événements hydrologiques temporels (Galéa et Prudhomme, 1997 in Yahiaoui *et al.*, 2011). La prise en compte de ces paramètres a contribué à la mise au point de modèles dit QdF (Débit-durée-Fréquence) des principaux régimes hydrologiques de crue. La modélisation QdF, de plus, s'intéresse aux débits maximums instantanés et aussi à l'analyse des caractéristiques relatives à différentes durées d pour affecter à un débit moyen (volume) maximal VCXd une fréquence. Cette représentation a connu plusieurs applications et développements (Javelle, 2001 ; Singh *et al.*, 2001 ; Mar *et al.*, 2002 ; Sauquet *et al.*, 2004 ; Jourdain et Ouarda, 2006 ; Bessenasse *et al.*, 2006 ; Yahiaoui *et al.*, 2011 ; Ketrucui et Meddi, 2015).

Le bassin versant du N'zi (Bandama) a connu des crues particulièrement importantes ces dernières années. Face à la recrudescence de ces événements extrêmes, l'estimation et la prédétermination des quantiles des crues constituent un axe stratégique de prévention contre les inondations dans cette région. Ces catastrophes ont été à l'origine de pertes en vies humaines, d'importants dégâts matériels, de déplacements de populations, de déficits incalculables dans les domaines de l'économie (champs et plantations détruits) et de l'environnement. C'est ce qui justifie le choix de ce bassin, comme zone test. En effet, l'étude des phénomènes extrêmes et plus particulièrement les

crues dans cette région 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. Ainsi, l'approche QdF peut être exploitée pour estimer les quantiles extrêmes et construire les hydrogrammes de projet de différentes périodes de retour.

L'objectif de ce travail est de déterminer le modèle QdF de type bassin de référence aux crues du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Il s'agit tout d'abord d'évaluer l'adéquation de ces caractéristiques à différents modèles régionaux afin de fournir un outil exploitable dans l'étude de l'aléa et de la vulnérabilité sur d'autres sites ivoiriens. Ensuite, l'étude déterminera les courbes QdF locales à partir d'ajustements statistiques adéquats réalisés sur les séries de débits moyens (volumes) caractéristiques VCXd de durée d. Enfin, les résultats obtenus sont comparés sous forme fréquentielle aux quantiles issus des différents modèles QdF de type bassin de référence établis suivant les caractéristiques locales des écoulements et des modèles régionaux définis en France. Les dernières analyses sont axées sur l'appartenance du bassin versant du N'zi à un bassin de référence pour telle ou telle période de retour.

Les résultats de cette étude pourront être exploités pour construire des courbes QdF sur des bassins ivoiriens non jaugeés au sein ou hors mais hydrologiquement proches du bassin étudié.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (Figure 1), qui est un sous-bassin du fleuve Bandama (Côte d'Ivoire). Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6°00' et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km². Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessedougou à une altitude de 400 m et coule globalement suivant une direction Nord-Sud. Le N'zi a une pente moyenne de 0,053 %. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord. L'affluent principal du N'zi est le Kan qu'il reçoit à environ 5 km en aval de Dimbokro (Kouassi *et al.*, 2019). De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du N'zi est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Au Nord, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec des pluies annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) est caractéristique de la partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 et 1600 mm/an. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat attiéen) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm/an (Kouassi *et al.*, 2019). Le bassin du N'zi se caractérise par une végétation savanicole

dans le Centre et le Nord. La partie sud est couverte par la forêt. Le relief du bassin, peu accidenté, est généralement constitué de plateaux (100 à 400 m en moyenne). Cette monotonie est rompue par la chaîne Baoulé. Les principaux types de sol sont les sols ferrallitiques moyennement dessaturés (Nord) et les sols ferrallitiques fortement dessaturés (Centre et Sud). Ces éléments (végétation, relief, types de sol, etc.) définissent les conditions physiques de l'écoulement (Kouassi *et al.*, 2019).

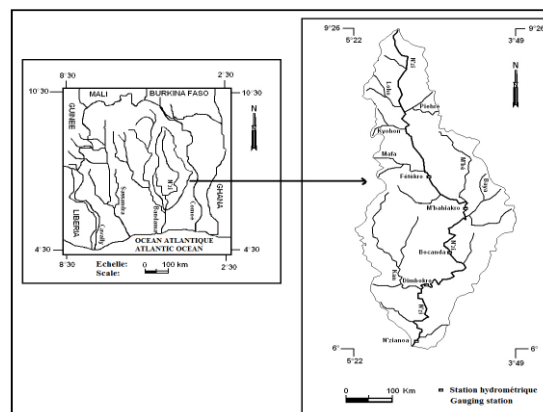


Figure 1. Carte du bassin versant du N'zi (Bandama).

2.2. Données

Les données de débits utilisées couvrent la période 1961-2016 et proviennent de la Direction de l'Hydrologie. Il s'agit de données de débits moyens journaliers collectées au niveau des stations hydrométriques de N'zianouan, Dimbokro, Bocanda, M'bahiakro et Fétékro, situées sur le fleuve N'zi.

2.3. Construction des courbes QdF locales

Echantillonnage des données

Deux caractéristiques hydrologiques (variables) sont généralement choisies à partir des chroniques de débit pour décrire le régime des crues. Il s'agit des débits moyens écoulés sur N durées di (i = 1, ..., N) continues et des débits seuils dépassés en continu sur N durées di. La variable hydrologique choisie dans le cadre de ce travail est le débit moyen maximal annuel, couramment utilisée en aménagement hydraulique (Ketrouci et Meddi, 2015). Il correspond à un volume d'eau transité dans un bief sur une durée d (VCXd). La variable VCXd s'obtient en déterminant le volume d'eau entre deux instants t₁ et t₂ divisé par la durée d qui est la différence entre les deux t. Ce calcul aboutit à l'équation (1) suivante:

$$VCXd = \frac{1}{d} \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \quad (1)$$

Où Q(t) représente le débit moyen maximal en fonction du temps. Plusieurs méthodes ont été développées pour déterminer la gamme de durée « d » mais la plus recommandée est celle de

SOCOSE. En effet, la durée caractéristique « D » est la durée pendant laquelle la moitié du débit de pointe « Qs » est continuellement dépassée. La gamme de durée a été prise dans l'intervalle $[D/2 ; D*6]$ (Yahiaoui *et al.*, 2011 ; Hachemi et Benkhaled, 2016).

Analyse fréquentielle des données

La construction des courbes Qdf se fait de la même manière que la construction des courbes IDF. En effet, elle se base sur l'analyse fréquentielle de la variable hydrologique choisie (Kouassi *et al.*, 2018). En travaillant sur N durées différentes (d_i), N échantillons sont obtenus et pour chacun d'eux, une loi statistique adéquate est ajustée, permettant d'obtenir des quantiles VCXdT. L'ajustement statistique a été réalisé par l'intermédiaire du logiciel HYFRAN (HYdrological FREquency ANALysis) de la chaire industrielle en hydrologie statistique de l'INRS-ETE. Les différentes étapes de l'ajustement de loi à un échantillon effectuées par le logiciel HYFRAN sont brièvement présentées ci-après (Kouassi *et al.*, 2018) :

- vérification des hypothèses de base (test d'homogénéité, test d'indépendance, test de stationnarité) ;
- choix des distributions : trois distributions ont été choisies sur la base des travaux antérieurs (loi Weibull, loi GEV et loi Gumbel) ;
- méthode d'ajustement : le choix s'est porté sur la méthode des moments ;
- choix du meilleur modèle statistique (critères de Khi-deux, critère BIC, critère AIC) ;
- estimation des quantiles en fonction des différentes périodes de retour sur la base du meilleur modèle statistique identifié.

Représentation graphique des courbes Qdf

Une représentation graphique des quantiles est réalisée en fonction des périodes de retour (T) et de la durée (d) sur laquelle ils ont été déterminés. Les résultats se présentent sous la forme d'un faisceau de courbes paramétrées par la durée « d » dans le plan (débit, T) ou transformé (débit, $\ln(T)$) ou dans le plan (débit, d) paramétré cette fois par la période de retour T. Un point $Q_d(T)$ des courbes Qdf correspond alors à un quantile de débit maximal annuel, calculé sur la durée « d » et de période de retour T.

2.4. Présentation des modèles Qdf de type bassin de référence

Le modèle Qdf de type bassin de référence permet de traduire sous une forme synthétique opérationnelle la grande variabilité spatio-temporelle des débits d'un bassin versant, observés ou non. Ceci par le biais des paramètres locaux estimables sur tout bassin versant : la durée caractéristique de crue du bassin versant D et le débit de pointe décennal. En d'autres termes, ce modèle

permet de prédéterminer des quantiles de crue d'un bassin versant de superficie très variable, connaissant les paramètres locaux cités précédemment. Les quantiles locaux de crue sont alors estimés en dénormalisant la distribution adimensionnelle du modèle de référence. Ces deux paramètres sont respectivement des descripteurs de la fonction de transfert et de production des crues. Ils peuvent être estimés à partir des données hydrométriques ou par des calculs théoriques. Le débit de pointe décennal a été déterminé à partir d'ajustements statistiques de la série des débits journaliers maximums annuels. Il s'agit d'une estimation suivant l'ajustement adéquat du quantile de débit pour la période de retour décennale.

Diverses études de régionalisation des crues (Yahiaoui *et al.*, 2011) 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, il 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 l'influence méditerranéenne (Yahiaoui *et al.*, 2011).

Ces trois modèles de référence permettent d'estimer les quantiles VCXdT d'un site quelconque, observé ou non. Les quantiles sont calculés à l'aide des équations suivantes :

- pour $0,5 \leq T(\text{an}) \leq 20$: généralisation d'une loi exponentielle à deux paramètres adaptés aux valeurs extrêmes :

$$VCXdT = Aq\left(\frac{d}{D}\right)\ln T + B\left(\frac{d}{D}\right) \quad (2)$$

- pour $20 < T(\text{an}) \leq 1000$: généralisation de la forme d'extrapolation du gradex esthétique par le gradex des pluies maximales :

$$VCXdT = VCX10d + Ap\left(\frac{d}{D}\right)\ln\left(1 + \frac{Aq\left(\frac{d}{D}\right)}{Ap\left(\frac{d}{D}\right)}\left(\frac{T-10}{10}\right)\right) \quad (3)$$

Avec :

- VCX10d, le quantile décennal du débit volume ;
- Aq, B et Ap sont respectivement le gradex des débits, le paramètre de position de la loi exponentielle et le gradex des pluies :

$$\frac{Aq}{QIXA10} = \frac{1}{x1\frac{d}{D}+x2} + x3 \quad (4)$$

$$\frac{B}{QIXA10} = \frac{1}{x4\frac{d}{D}+x5} + x6 \quad (5)$$

$$\frac{Ap}{QIXA10} = \frac{1}{x7\frac{d}{D}+x8} + x9 \quad (6)$$

Avec x_1 à x_9 , les paramètres des trois modèles (Vandenesse, Florac et Soyans). Les valeurs des paramètres X_i sont synthétisées dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres des trois modèles de « bassins de référence »

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
Vandenesse	2,635	6,190	0,016	1,045	2,385	0,172	1,083	1,750	0,000
Florac	1,120	3,560	0,000	0,950	3,180	0,039	1,560	1,910	0,085
Soyans	0,870	4,600	0,000	1,070	2,500	0,099	0,569	0,690	0,046

Les débits moyens générés par les modèles régionaux ont été représentés en fonction d'une période de retour (T) donnée et d'une durée (d).

2.5. Critères d'analyse du choix des différents modèles de référence

Pour comparer les courbes Qdf locales et celles obtenues en appliquant les différents modèles des bassins de référence, deux types de critères peuvent être utilisés. Il s'agit des critères graphiques et des critères numériques. Les critères graphiques consistent à choisir le modèle sur la base de la position des courbes QdF locales, relatives au bassin versant étudié par rapport à celles des bassins versants de référence. Entre les quantiles estimés localement par la distribution d'une loi probabiliste et les quantiles issus du modèle QdF de type bassin de référence, l'illustration graphique pour comparer ces quantiles permet dans un premier lieu de localiser le bassin versant étudié pour une période de retour donnée par rapport aux bassins versants (Yahiaoui et al., 2011). En d'autres termes, suivant la superposition des courbes QdF locales par rapport aux autres, on choisira respectivement un des trois modèles de référence (Vandenesse, Florac ou Soyans). Chaque modèle QdF de référence se présente sous la forme d'une famille de courbes adimensionnelles.

Le critère numérique utilisé est le critère de Nash qui est couramment employé en hydrologie comme fonction objectif. Il est basé sur la somme des erreurs quadratiques. Ce critère est calculé pour chaque modèle appliqué, adapté au modèle QdF, et est exprimé de la manière suivante :

$$\text{Nash (T)} = 1 - \frac{\sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} (\text{VCX}_{iT} - \text{VCX}_{iT}^{\text{modèle}})^2}{\sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} (\text{VCX}_{iT} - \text{VCXT}_{\text{moy}})^2} \quad (7)$$

Tableau 2. Ajustements statistiques des séries de VCXd des durées d=20 jours

	T	Débit	P(Mi)	P(Mi x)	BIC	AIC	X ²	p-value
Weibull		313,61	33,33	63,17	631,32	627,27	8,64	0,27
GEV	100	328,39	33,33	32,94	632,62	628,57	7,21	0,30
Gumbel		316,77	33,33	3,88	636,90	630,82	10,43	0,16

La figure 2 visualise les modélisations QdF obtenues pour les crues de faible ou de grande période de retour sur les différentes stations étudiées (N'zianouan, Dimbokro, M'bahiakro, Bocanda et Fétékro). Les quantiles VCXdT de débits moyens (volume) maxima, pour des durées d= 20 à 60 jours et de période de retour T traduisent le modèle QdF local issu de l'ajustement statistique à la loi de Weibull. Les valeurs de VCXdT en relation avec la durée d et la fréquence sont indiquées dans les tableaux 3 à 7.

$$\text{Où } \text{VCXT}_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} \text{VCX}_{iT}}{1+d_{\max}-d_{\min}} \quad (8)$$

Le critère de Nash a tendance à donner une grande importance aux écarts entre crue simulée et observée. Il varie de $-\infty$ à 1. La valeur optimale est 1 (calage parfait). Une valeur supérieure à 0,6 est habituellement considérée comme satisfaisante.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Analyse des courbes QdF locales

Afin de mettre en évidence et d'estimer les quantiles des crues du bassin versant du N'zi, des séries de valeurs des débits moyens VCXd des durées d= 20 à 60 jours ont été élaborées sur la base des données hydrométriques provenant des stations hydrométriques de N'zianouan, Dimbokro, M'bahiakro, Bocanda et Fétékro. Les tests relatifs à l'échantillonnage (Walf-Wolfowitz, Wilcoxon et Mann- Kendall) réalisés par le logiciel Hyfran montrent l'indépendance des séries au niveau de signification de 5%. La stationnarité et l'homogénéité des séries de VCXd ont été vérifiées au niveau de signification de 5%. Différents types d'ajustements statistiques (GEV, Gumbel et Weibull) ont été réalisés sur la base de la méthode des moments. Les résultats obtenus montrent que l'ajustement statistique des séries à la loi de Weibull est le meilleur selon les critères de comparaison des lois statistiques (AIC et BIC) et le test de χ^2 . Le tableau 2 présente le cas des résultats des critères de comparaison des différentes lois ajustées sur les séries des débits moyens de durée d=20 jours de la station de Fétékro.

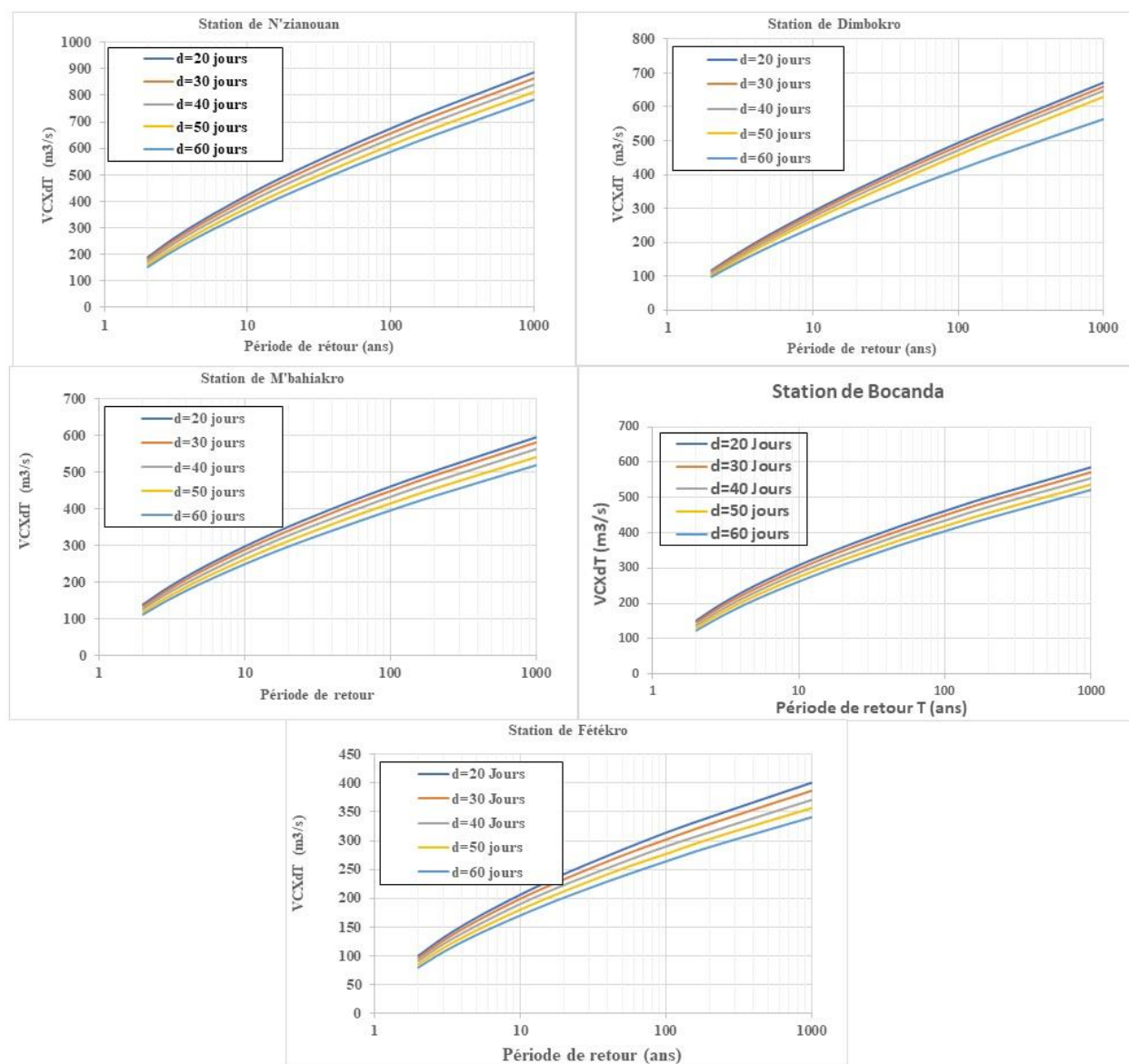


Figure 2. Courbes QdF locales des stations du bassin versant du N'zi

Tableau 3. Quantiles de crues des débits moyens (VCXdT) de la station de N'zianouan

Durée d (jours)	Période de retour (ans)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
d=20 jours	189	258	333	424	506	605	675	742	887
d=30 jours	182	249	322	411	491	588	657	722	864
d=40 jours	173	238	309	395	473	568	636	700	840
d=50 jours	162	224	293	376	452	545	612	675	813
d=60 jours	152	212	278	358	432	523	587	649	784

Tableau 4. Quantiles de crues des débits moyens (VCXdT) de la station de Dimbokro

Durée d (jours)	Période de retour (ans)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
d=20 jours	117	166	222	291	356	436	494	549	672
d=30 jours	113	161	216	284	348	427	484	538	660
d=40 jours	108	154	208	275	338	416	472	527	648

d=50 jours	103	148	200	265	326	402	458	511	630
d=60 jours	98	139	186	244	299	366	414	461	564

Tableau 5. Quantiles de crues des débits moyens (VCXdT) de la station de M'bahiakro

Durée (jours)	d Période de retour (ans)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
d=20 jours	139	186	237	297	351	415	460	502	594
d=30 jours	134	179	229	288	340	404	448	490	580
d=40 jours	127	171	218	276	327	388	432	473	562
d=50 jours	119	161	207	262	312	372	414	454	540
d=60 jours	112	152	196	249	297	354	395	434	518

Tableau 6. Quantiles de crues des débits moyens (VCXdT) de la station de Bocanda

Durée (jours)	Période de retour (T)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
d=20 Jours	152	200	250	308	359	420	462	502	586
d=30 Jours	147	193	241	298	349	408	450	489	572
d=40 Jours	139	184	231	287	336	395	435	474	555
d=50 jours	132	175	221	275	323	380	419	457	537
d=60 jours	124	165	210	262	309	366	405	442	522

Tableau 7. Quantiles de crues des débits moyens (VCXdT) de la station de Fétékro

Durée (jours)	Période de retour (T)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
d=20 jours	100	132	166	206	242	284	314	341	401
d=30 jours	96	127	160	199	233	274	302	329	387
d=40 jours	91	121	152	190	223	262	290	315	371
d=50 jours	85	114	144	180	212	251	277	303	357
d=60 jours	80	107	136	170	201	238	264	289	341

3.2. Comparaison des modèles QdF locaux aux modèles de référence

Résultats du critère graphique

Les courbes QdF locales réalisées au niveau des différentes stations hydrométriques étudiées (N'zianouan, Dimbokro, M'bahiakro, Bocanda et Fétékro) ont été comparées aux modèles de référence. Dans l'ensemble, les courbes QdF locales se superposent relativement bien aux modèles de référence. Il est constaté cependant que les modèles de Florac et de Soyans semblent être ceux qui se superposent au mieux aux courbes QdF locales comparativement au modèle de Vanadesse dans le domaine des fréquences allant de 2 à 50 ans. Pour ce qui est du domaine des grandes fréquences, c'est-à-dire supérieure à 50 ans, les courbes QdF locales semblent se superposer au mieux au modèle de Vanadesse par rapport aux autres modèles de référence (modèles de Florac et de Soyans). La figure 3 ci-dessous est une illustration de quelques cas.

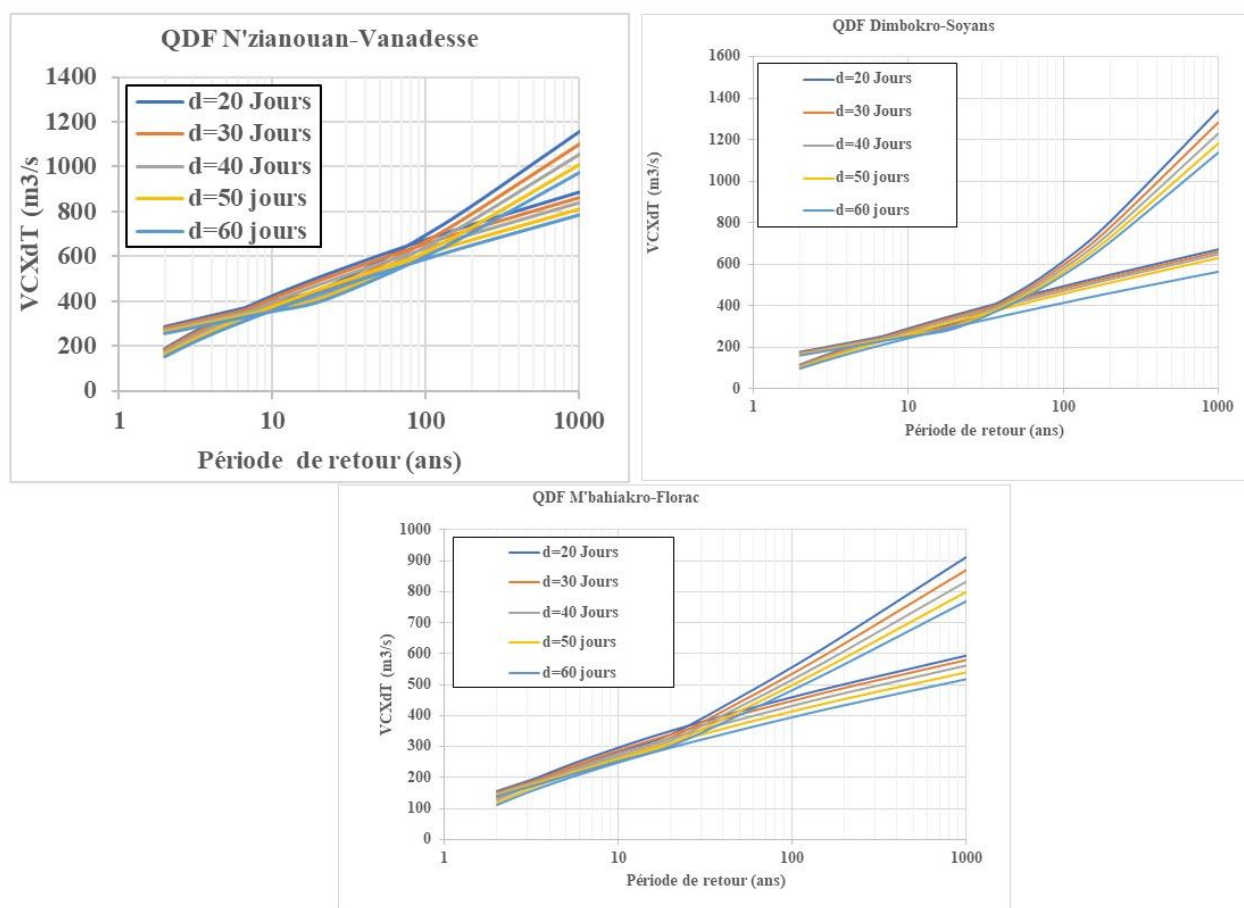


Figure 3. Courbes QdF locales et modèles de référence dans le bassin versant du N'zi

Résultats du critère numérique

Les résultats obtenus selon le critère de Nash (tableaux 8, 9 et 10) ont montré que le modèle QdF de Florac est meilleur que les deux autres modèles (modèle de Florac et modèle de Vanadesse) dans le domaine des périodes de retour allant de 2 à 50 ans, suivi du modèle de Soyans et enfin le modèle de Vanadesse. En effet, tous les modèles ont été performants c'est-à-dire qu'ils ont enregistré des valeurs de Nash supérieures ou égales à 0,6. Quant aux grandes périodes de retour ($50 > T \text{ (an)} > 1000$ ans), elles sont prédominées par le modèle QdF de Vanadesse, ensuite vient le modèle de Florac et enfin le modèle de Soyans qui se trouve le moins adapté. Cette faiblesse de la performance du modèle de Soyans se traduit par des valeurs inférieures à 0,6 du Nash pour une période de retour de deux cents ans (200 ans) (N'zianouan, M'bahiakro, Bocanda et Fétékro) voire négatifs pour une période de retour de mille ans (1000 ans) (N'zianouan, Dimbokro, M'bahiakro, Bocanda et Fétékro). Aux grandes fréquences, le modèle de Soyans a toujours été performant aux périodes de retour de cinquante (50) et cent (100) ans. Quant au modèle de Florac, il n'a pas été toujours performant pour une période de retour de mille (1000) ans (Bocanda et Fétékro).

Tableau 8. Performance des modèles aux stations hydrométriques de N'zianouan et Dimbokro

T (année)	N'zianouan			Dimbokro		
	Vanadesse	Florac	Soyans	Vanadesse	Florac	Soyans
2	0,737	0,979	0,863	0,335	0,858	0,582
3	0,945	0,998	0,972	0,864	0,979	0,915
5	0,994	0,999	0,996	0,987	0,999	0,991
10	0,999	0,999	0,999	0,996	0,997	0,998
20	0,994	1,000	0,999	0,976	0,993	0,989
50	0,999	0,969	0,937	0,988	0,999	0,991
100	0,984	0,911	0,734	0,997	0,990	0,919
200	0,944	0,824	0,305	0,999	0,970	0,730
1000	0,757	0,533	-1,618	0,970	0,894	-0,156

Tableau 9. Performance des modèles aux stations hydrométriques de Bocanda et M'bahiakro

T (année)	Bocanda			M'bahiakro		
	Vanadesse	Florac	Soyans	Vanadesse	Florac	Soyans
2	0,737	0,979	0,863	0,660	0,960	0,811
3	0,945	0,998	0,972	0,928	0,995	0,960
5	0,994	0,999	0,996	0,992	0,999	0,994
10	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999	0,999
20	0,994	1,000	0,999	0,990	0,999	0,998
50	0,999	0,969	0,937	1,000	0,983	0,958
100	0,984	0,911	0,734	0,995	0,945	0,801
200	0,944	0,824	0,305	0,972	0,884	0,457
1000	0,757	0,533	-1,618	0,848	0,677	-1,080

Tableau 10. Performance des modèles à la station hydrométrique de Fétékro

T (année)	Fétékro		
	Vanadesse	Florac	Soyans
2	0,668	0,961	0,816
3	0,922	0,994	0,956
5	0,986	0,998	0,990
10	0,999	0,965	0,997
20	0,997	0,998	0,998
50	0,997	0,998	0,924
100	0,979	0,898	0,708
200	0,935	0,805	0,258
1000	0,741	0,508	-1,707

4. DISCUSSION

Sur la base de l'approche QdF, les quantiles des crues du bassin versant du N'zi aux stations hydrométriques de N'zianouan, Dimbokro, M'bahiakro, Bocanda et Fétékro ont été estimés à partir de la loi de Weibull qui s'est illustrée comme la meilleure loi suite à l'application de l'analyse fréquentielle au moyen des lois GEV, Gumbel et Weibull sur différentes périodes de retour et pour différentes durées. En effet, cette démarche est considérée comme étant une opération primordiale pour la conception, la gestion des retenues et la protection contre les inondations. Comparés aux résultats obtenus par application des modèles de bassin de référence, il ressort que tous les modèles ont été performants dans le domaine des faibles périodes de retour (2-50 ans). Cependant, le modèle QdF de Florac a été le meilleur modèle suivi respectivement des modèles de Soyans et de Vanadesse. L'écart de performance étant très faible entre les différents modèles, cela amène à s'interroger sur l'interchangeabilité des différents modèles aux faibles périodes de retour. En effet, les trois modèles peuvent être utilisés avec une très faible marge d'erreur. La dominance du modèle de

Florac traduirait l'influence océanique (océan Atlantique) dans le bassin versant du N'zi. En effet, le climat attiéen (climat subéquatorial de transition) qui est un climat sous influence océanique s'étend du Sud de la Côte d'Ivoire jusqu'à M'bahiakro selon les travaux de Kouao *et al.* (2020, 2021). Dans le domaine des fréquences rares (période de retour supérieure à 50 ans), le modèle Vanadesse est le mieux adapté, suivi respectivement des modèles de Florac et de Soyans. En effet, si on considère les deux domaines des fréquences, ainsi que la différence minimale entre les performances des différents modèles dans le domaine des faibles fréquences, le modèle Vanadesse peut être considéré comme adéquat pour estimer les crues du N'zi. Sous un autre angle, le modèle de Soyans pourrait aussi être utilisé au même titre que le modèle de Vanadesse pour les faibles périodes de retour (inférieures à 50 ans).

En absence de travaux sur des bassins versants nationaux, une comparaison a été faite à partir de travaux du champ international. Ainsi, selon Yahiaoui *et al.* (2011) dans la modélisation du régime de crue en QdF dans le bassin versant de

l'oued Mekerra dans l'Ouest algérien, les résultats des critères de Nash et de la droite linéaire ont montré que le modèle QdF de Soyans est meilleur dans le domaine des fréquences observables ($0,5 \leq T(\text{an}) \leq 100$), alors que dans le domaine des fréquences rares ($T(\text{an}) > 100$ ans), le modèle QdF de Florac est meilleur que le Soyans. En plus de ces critères, il y a aussi le contexte hydroclimatologique qui se trouve le bassin versant de l'oued Mekerra et la situation géographique de la station de Sidi-Bel-Abbès qui se trouve sous l'influence d'un climat méditerranéen, ce qui nous ramène à dire que le modèle QdF de référence de Florac est le modèle le plus adapté pour la prédétermination des crues de l'oued Mekerra. Les valeurs du critère de Nash obtenues lors des travaux de Ketrouti et Meddi (2015) ont montré 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. Les résultats obtenus au cours de ce travail ne sont pas en adéquation avec les résultats de Ketrouti et Meddi (2015). Cependant, ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Yahiaoui *et al.* (2011) lors de l'étude du régime des crues de la Mekerra, qui est un bassin versant voisin de celui de l'oued Isser. Pour les deux stations de Beni Bahdel et Sidi Belkheir, situés dans le bassin versant de l'oued Isser, le modèle QdF Florac présente une meilleure estimation des crues dans le domaine des faibles fréquences alors que dans le domaine des fortes fréquences, le modèle QdF de Vandenesse est meilleur que celui de Florac (Ketrouti et Meddi, 2015). Les résultats obtenus sur le bassin versant du N'zi sur la base du même critère de performance (Nash) sont similaires à ceux obtenus par Ketrouti et Meddi (2015). Les différences obtenues entre les différents résultats sont dues probablement au contexte hydroclimatologique des bassins versants ainsi que la situation géographique des stations hydrométriques par rapport à l'influence des océans et des mers.

L'intérêt de la prévision des crues dans le bassin versant du N'zi est lié aux risques d'inondation qui touche régulièrement cette région. La dangerosité de ces crues ont provoqué des pertes en vies humaines et matérielles, des déplacements de population, des dégradations des voies de circulation, etc. Les inondations les plus récentes enregistrées au niveau des villes de Dimbokro, M'bahiakro, etc. datent de 2018 et la période la plus dangereuse est le trimestre août-septembre-octobre. Ces catastrophes montrent l'importance de l'estimation des débits fréquents 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 (Hachemi et Benkhaled, 2016 ; Renima *et al.*, 2018). L'approche QdF permet également d'étudier des

sites non jaugés (Ketrouti et Meddi, 2016 ; Renima *et al.*, 2018).

5. CONCLUSION

En vue d'étudier les inondations du bassin versant du N'zi, la modélisation QdF du régime de crue a été établie suivant les quantiles de crues issus d'un ajustement statistique qui sont comparés, en tenant compte des caractéristiques du régime de crue du bassin versant, aux différents quantiles homologues issus des modèles QdF de type bassin de référence (modèles de Vandenesse, de Florac et de Soyans). Les séries de débit obtenues par un échantillonnage qui tient compte des épisodes de crues observées sur l'ensemble des chroniques annuelles (1961-2020) ont permis un ajustement satisfaisant de la loi Weibull. Les paramètres des modèles de référence ont pu être déterminés à partir des données locales. Suivant les critères de Nash et graphique, d'une part, et le contexte hydroclimatologique, d'autre part, le modèle QdF de Vandenesse est le meilleur modèle, ce qui permet de synthétiser et consolider les connaissances issues tant des observations hydrométriques que des simulations par des modèles conceptuels. Ces résultats peuvent être utiles pour déterminer le régime de crue sur le bassin versant et aux sous-bassins du N'zi, dans le cas où il y a une insuffisance de mesures. Cependant, il est nécessaire d'élargir cette étude à d'autres bassins pour lesquels des longues chroniques de débits sont disposées, afin de construire un modèle régional plus précis et adapté au contexte ivoirien. Les modèles QdF construits constituent des outils très importants pour l'étude et la prédétermination de l'aléa et la vulnérabilité qui sont les facteurs essentiels du risque des inondations.

Remerciements

Les auteurs de cet article remercient la Direction de l'Hydrologie pour leur avoir fourni les données hydrométriques utilisées dans cette étude.

Références

- Bessenasse M., Galea G. & Paquier A., 2006. Application du modèle convergent de la méthode hydrologique QdF au bassin versant du Saf (Algérie). *Larhyss journal*, 5, 133-137.
- Hachemi M. & Benkhaled A. 2016. Modélisation débit-durée-fréquence: application à oued Abiodh, Biskra (Algérie). *Larhyss Journal*, 27, 48-67.
- Javelle P., 2001. *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale. Sciences de l'environnement*. Doctorat Mécanique de milieux géophysiques et environnement, Institut national polytechnique de Grenoble, 237 p.
- Jourdain V. & Ouarda T.B.M.J., 2006. *Modélisation régionale de type débit-durée-fréquence (QdF) des événements de crues printanières dans un cadre non stationnaire*. Rapport, Institut National de la Recherche

Scientifique, INRS-ÉTÉ Québec (Québec), Canada GIK9A9, *Rapport de recherche* N° R-858, 46 p.

Ketrouci K. & Mohamed M., 2016. Application des modèles Débit-durée-Fréquence QdF pour l'estimation des crues rares en Algérie : Cas du bassin versant de la Tafna. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 37, 45–54.

Kouao J.M., Kouassi A.M., Dekoula S.C. & Asseufi B.D., 2020. Analyse de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *Larhys Journal*, 41, 233-259

Kouao J.M., Kouassi A.M., Koudou A. & Gbola A.C.F., 2021. Apport des indices climatiques à la redéfinition de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 34 (1), 102-114

Kouassi A.M., Nassa R.A.K., N'Guessan B.T.M., Kouamé K.F. & Biemi J., 2019. Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant du N'Zi (Côte d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, 30 (3), 215-223.

Kouassi A.M., Nassa R.A.K., Koffi Y.B., Kouamé K.F. & Biemi J., 2018. Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau*, 31 (2), 147-160.

Mar L., Gineste P., Harnattan M., Tounkara A., Tapsoba L. & Javelle P., 2002. Flood duration- frequency modeling applied to big catchments in Burkina Faso. *Fourth FRIEND international Conference*, 18-22 March 2002, Cape Town, South Africa.

Renima M., Remaoun M., Boucefiane A. & Sadeuk B. A., 2018. Regional modelling with flood-duration-frequency approach in the middle Cheliff watershed. *Journal of Water and Land Development*, 36, 129–141. DOI: 10.2478/jwld-2018-0013.

Sauquet E., Galea G. & Bessenasse M., 2004. Caractérisation du régime des hautes eaux en débit-urée-fréquence. Application au contexte algérien. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*, 5, 80-85.

Singh R.D, Mishra S.K. & Chowdhary H., 2001. Regional flow-duration models for large number of ungauged Himalayan catchments for planning microhydro projects. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6 (4), 310-316.

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.