

CARACTERISATION DES DEBITS D'ETIAGE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS DU BASSIN VERSANT DU N'ZI (COTE D'IVOIRE)

A. M. KOUASSI¹, R. A.-KARIM NASSA², T. M. N'GUESSAN BI¹, K. F. KOUAME³⁻⁴⁻⁵, J. BIEMI³

¹Institut 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, Tél. (+225) 30 64 67 15 (Côte d'Ivoire).

²Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), École Doctorale Polytechnique (EDP), BP 1093 Yamoussoukro, Tél. (+225) 30 64 04 06 ; Côte d'Ivoire.

³Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM) ; Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE) ; 22 BP 582 Abidjan 22 ; Tel : (+225) 22 48 38 03 (Côte d'Ivoire).

⁴Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) ; 22 BP 801 Abidjan 22 ; Tel : (+225) 22 44 52 70 ; Côte d'Ivoire.

⁵Université Virtuelle de Côte d'Ivoire (UVCI), 28 BP 536 Abidjan 28 ; Tel : (+225) 42 22 22 00 ; Côte d'Ivoire.

*Auteur Correspondant : KOUASSI Amani Michel ; E-mail : michel.a_kouassi@yahoo.fr

RESUME

Dans un contexte où les pressions exercées sur les milieux aquatiques et les besoins en eaux des populations ne cessent d'augmenter auquel s'ajoutent les impacts des changements globaux, la connaissance des débits d'étiage constitue un enjeu majeur. L'objectif de cette étude est de caractériser les débits d'étiage du bassin versant du N'zi-Bandama dans l'optique d'une meilleure gestion des ressources en eau de ce bassin. Des données de débits mensuels provenant de cinq stations hydrométriques du fleuve N'zi-Bandama (Fétékro, M'bahiakro, Bocanda, Dimbokro, N'zianouan) ont été utilisées et couvrent la période allant de 1960 à 2016. La méthodologie a consisté à calculer et analyser les seuils de sévérité d'étiage (seuil d'alerte ou QMNA-5, seuil de vigilance et seuil de crise). Les quantiles de débits d'étiage ont été déterminés à partir de la loi lognormale correspondant aux périodes de retour 2, 5, 10, 20 et 50 ans. Les principaux résultats obtenus ont montré que les débits de seuils de sévérité déterminés mettent en évidence la vulnérabilité à de sévères étiages du bassin versant du N'zi-Bandama avec une exposition à la vulnérabilité plus forte pour le sous-bassin versant d'exutoire Fétékro.

Mots clés: Débits d'étiage ; QMNA ; Seuils de sévérité ; Bassin versant du N'zi ; Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF LOW FLOW DISCHARGE IN THE RIVER BASINS OF WEST AFRICA: CASE OF THE CATCHMENT OF N'ZI (IVORY COAST)

In a context where the pressures exerted on the aquatic environments and the water needs of the populations do not stop increasing to which are added the impacts of the global changes, the knowledge of the Low flow discharge is a major stake. The objective of this study is to characterize the Low flow discharge of the N'zi watershed in order to better manage the water resources of this basin. Monthly flow data from five hydrometric stations of the N'zi River (Fétékro, M'bahiakro, Bocanda, Dimbokro, N'zianouan) were used and cover the period from 1960 to 2016. The methodology consisted of calculate and analyze low water severity levels (warning level or QMNA-5, vigilance level and crisis level). The quantiles of Low flow discharge were determined from the lognormal law corresponding to the return periods of 2, 5, 10, 20 and 50 years. The main results obtained showed that the determined flows of severity levels highlight the vulnerability to severe water levels in the N'zi watershed with exposure to the greater vulnerability for the Fétékro subwatershed.

Key words: Low flow discharge; QMNA; Severity levels ; N'zi watershed; Ivory Coast.

INTRODUCTION

La gestion de la ressource en eau est l'une des grands problématiques du XXI^{ème} siècle. De nombreux phénomènes, naturels ou anthropiques, viennent influencer sur la ressource et plus particulièrement sur le cycle de l'eau. Parmi eux, l'étiage est probablement l'un des plus importants phénomènes affectant la ressource. En effet, l'étiage est défini comme un phénomène naturel, saisonnier, résultant généralement d'un déficit de pluie plus ou moins long et plus ou moins sévère, susceptible de varier dans le temps et dans l'espace et entraînant une diminution du débit dans les cours d'eau (Garcia, 2016). Selon Garcia (2016), ce phénomène correspond à une diminution du débit des cours d'eau, voire leur assèchement sur une certaine période. L'impact de l'étiage sur le volume d'eau disponible peut entraîner de nombreux problèmes. Cependant, les rivières servent régulièrement à l'approvisionnement en eau, à l'irrigation ou encore à la production d'énergie. Les cours d'eau jouent aussi un rôle important dans le maintien du bon fonctionnement des écosystèmes. Ce besoin en eau, lié aux écosystèmes et aux activités anthropiques, demeure important, même dans les périodes d'étiage. Avec l'accroissement de la population et le développement socio-économique, la demande en eau continue d'augmenter. Cela se traduit souvent par une augmentation des pompages, de l'irrigation, etc. ce qui accroît le déficit en eau, notamment lors de ces périodes d'étiage. Il est observé régulièrement de nombreuses conséquences liées à l'étiage et plus généralement aux sécheresses dans le monde. En Côte d'Ivoire, aux mois de mars-avril 2018, un affluent du Bandama (la Loka) qui alimente la ville de Bouaké au centre du pays a tari, entraînant de nombreuses coupures d'eau et obligeant les autorités ivoiriennes à réaliser des forages d'eau dans un contexte géologique de socle cristallin qui ne donne pas en général de bons débits de forage pour la satisfaction des besoins en eau de cette localité. Le phénomène d'étiage est donc une préoccupation à travers le problème d'une meilleure gestion de la ressource en eau et une meilleure compréhension des processus qui influent sur ce phénomène et de leurs évolutions, notamment dans le contexte de changement climatique actuel et d'augmentation continue des prélèvements en eau. L'homme se trouve donc obligé d'orienter ses activités en

fonction des ressources à disposition. En effet, si l'exploitation progressive de la ressource en eau nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques des débits d'étiage (amplitude, durée et fréquence), ainsi que des spécificités géographiques et climatiques de la région (Edgar, 2008), les nombreux usages de l'eau eux requièrent une gestion cohérente de la part des services de l'Etat afin de limiter la demande en eau par rapport à la ressource disponible. Selon le domaine d'étude, différents indices existent pour décrire l'étiage (Smakhtin, 2001 ; Hisdal et Tallaksen, 2004 ; WMO, 2008 *in* Garcia, 2016) qui servent de seuils pour le développement de différentes règles de gestion de la ressource en eau, entraînant par exemple la limitation des prélèvements. Il est donc important de pouvoir connaître ces différents indices en tout point des cours d'eau et de pouvoir évaluer les différents impacts qui peuvent influencer sur leurs valeurs. Il est donc nécessaire de caractériser les grands fleuves ivoiriens qui servent en général à la production hydro-électrique, à l'alimentation en eau potable des populations urbaines et périurbaines, à l'irrigation des cultures, à la pêche, etc. En effet, il est nécessaire de pouvoir caractériser la sévérité d'un étiage afin de définir les événements exceptionnels (Lang, 2007 ; Lang, 2011) car elle constitue la clé d'une gestion efficace des ressources en eaux et permet de prendre des mesures préventives pour anticiper d'éventuelles catastrophes liées à l'eau et aux événements hydrologiques exceptionnels. Ainsi l'objectif de cette étude est de caractériser les débits d'étiages du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire) dans l'optique d'une meilleure gestion des ressources en eau de ce bassin.

ATERIEL ET METHODES

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (Figure 1), 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 Ferkéssédougou à une altitude de 400 m et coule globalement suivant une direction Nord-Sud. Il 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.*, 2008). 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.*, 2008). 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 est peu accidenté. Il 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 ferralitiques moyennement dessaturés au Nord et les sols ferralitiques fortement dessaturés au Centre et au Sud. La végétation, le relief, les types de sol, etc. définissent les conditions physiques de l'écoulement (Kouassi *et al.*, 2008).

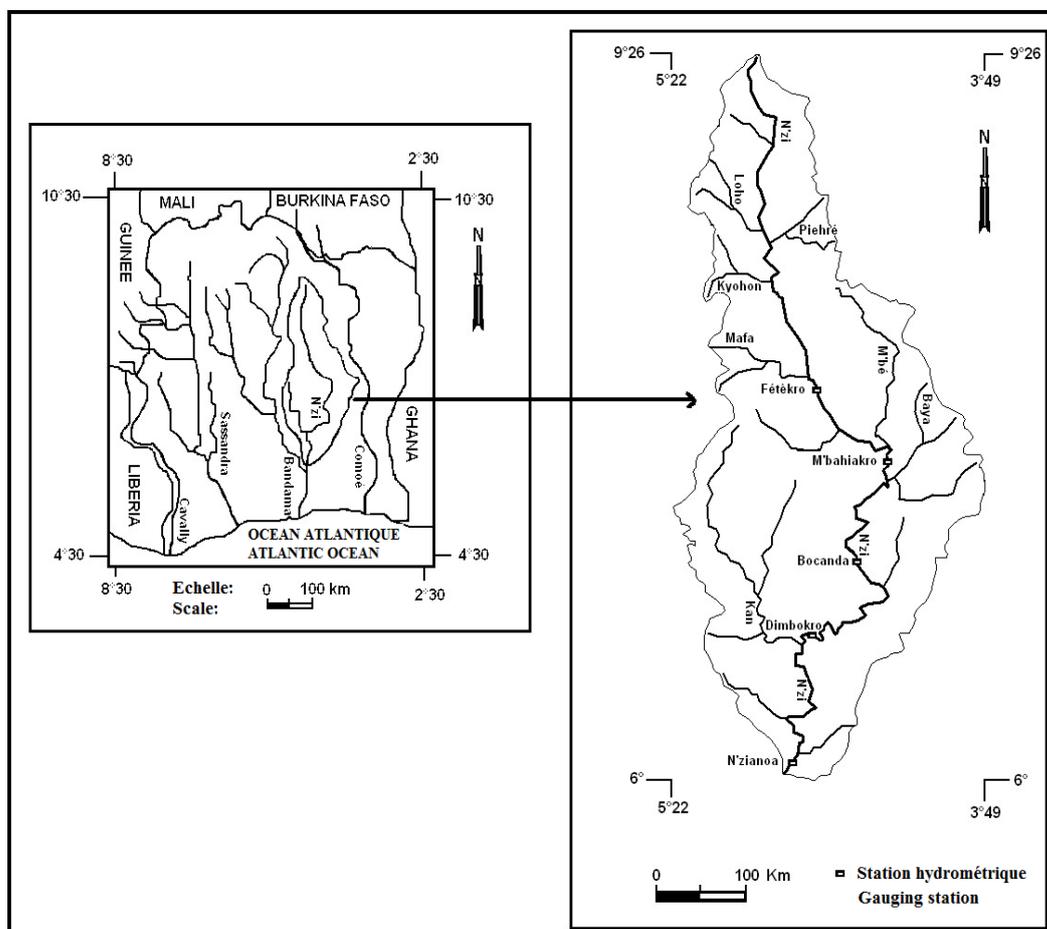


Figure 1 : Présentation du bassin versant du N'zi.

Presentation of the N'zi watershed.

MATERIEL

Les données hydrométriques utilisées dans cette étude ont été mises à notre disposition par la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH). Elles concernent les débits mensuels. Le réseau hydrométrique choisi pour notre étude est constitué de cinq stations hydrométriques (Fétékro, M'Bahiakro, Bocanda, Dimbokro et N'Zianouan) (Tableau 1). Ces différentes données couvrent la période 1960-2016 (57 ans). Les lacunes au sein de ces séries ont été comblées à partir de la méthode des analogues. Ces différentes séries ont été complétées au pas de temps mensuel sur la période 2002-2016 à partir de simulations effectuées au moyen du modèle GR2M. Les entrées de ce modèle sont constituées de pluies moyennes mensuelles et d'ETP moyennes mensuelles. Les performances moyennes obtenues à partir du critère de Nash-Sutcliffe sont respectivement de 75,4 % en calage (1961-1990) et 73,9 % en validation (1991-2001). Ces résultats traduisent une bonne performance du modèle GR2M déjà démontrée par les travaux de Kouassi *et al.* (2012) sur le même bassin.

Les débits mensuels d'étiage retenus après une analyse fréquentielle au seuil de 0,2 concernent les mois de janvier, février et mars, qui constituent les mois hydrologiquement les plus secs. Les différentes caractéristiques statistiques de ces débits d'étiage sont consignées dans le tableau 1. L'analyse de ces données montre que les minimums des valeurs de la série étudiée sont comprises entre 0,04 m³/s (Fétékro) et 0,12 m³/s (N'zianouan) et les maximums des valeurs entre 3,12 m³/s et 14,7 m³/s. Les moyennes et les écarts types les plus faibles sont relevés sur la station de Fétékro (moyenne : 0,45 m³/s et écart type : 0,57 m³/s) et les plus fortes sur la station de N'zianouan (moyenne : 1,7 m³/s et écart type : 2,4 m³/s). Les coefficients d'asymétrie calculés étant positifs pour toutes les stations, ceci permet de dire que les données de débits de basses eaux étudiées sont étalées à droite de la moyenne. Il est constaté que le coefficient de variation est largement supérieur à 25 % sur toutes les stations du bassin versant du N'zi-Bandama, ce qui traduit une variation importante des débits moyens d'une année à l'autre. Et étant donné que les coefficients d'aplatissement sont tous positifs, le pic de la distribution des débits est plus aplati que celui d'une loi normale.

Tableau 1 : Caractéristiques statistiques des débits d'étiage du N'zi-Bandama.

Statistical characteristics of low water flows of N'zi river.

Station Débits (m ³ /s)	Fétékro	M'Bahiakro	Bocanda	Dimbokro	N'Zianouan
Minimum	0,04	0,08	0,05	0,04	0,12
Maximum	3,12	5,63	6,4	6,19	14,7
Moyenne	0,45	0,67	0,9	1,15	1,7
Ecart-type	0,57	1,02	1,18	1,36	2,4
Aplatissement	13,6	13,9	11,9	7,48	3,55
Asymétrie	3,3	3,43	3,06	2,34	16,5

CARACTERISATION DES DEBITS D'ETIAGE

Différents indices ont été définis pour caractériser l'étiage ainsi que les impacts que celui-ci peut avoir sur la ressource en eau (Dkengne, 2006 ; Lang, 2007 ; Benyahya *et al.*, 2009 ; Pushpalatha, 2013 ; Mekhloufi, 2014 ; Doucet-Généreux, 2015 ; Nicole *et al.*, 2015 ;

Garcia, 2016). Ces indices d'étiage sont des statistiques dérivées des chroniques de débit. De façon générale, les indices d'étiage peuvent être regroupés en trois catégories :

ceux qui mesurent la sévérité de l'étiage et la probabilité de retour de ces événements ;

ceux qui représentent la durée et le déficit de l'étiage ;

ceux qui déterminent la phase pendant laquelle le débit décroît en l'absence de précipitations, phase appelée tarissement.

Dans le cadre de cette étude, les indices utilisés sont de la première catégorie (sévérité de l'étiage). Ces indices permettent d'identifier des seuils de débit en rapport avec la sévérité de l'étiage. La variable appliquée pour caractériser les étiages du cours d'eau du bassin versant du N'zi est le QMNA (débit moyen mensuel minimal annuel) qui est généralement utilisé (Catalogne, 2006 ; Lang, 2007 ; Lang, 2011 ; Gailliez, 2013 ; Garcia, 2016).

Ainsi, ont été appliqués les indices relatifs :

aux débits mensuels minimaux annuels (QMNA) ;

aux débits mensuels minimaux annuels associés à une période de retour (QMNA de périodes de retour 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans et 50 ans) ;

aux seuils de vigilance (équation 1) et de crise (équation 2) :

$$\text{seuil de vigilance} = 1,1 \times \text{QMNA} - 5 \quad (1)$$

$$\text{seuil de crise} = 0,9 \times \text{QMNA} - 5 \quad (2)$$

Les quantiles des débits d'étiage ont été évalués à partir de la loi Lognormale (Meigh *et al.*, 2002 ; Garcia, 2016).

RESULTATS ET DISCUSSION

ANALYSE DES QUANTILES DES DEBITS D'ETIAGE

Les quantiles des débits d'étiage évalués à partir de la loi Lognormale et leurs intervalles de confiance sont représentés dans le tableau 2 à travers cinq (5) périodes de retour ($T = 2$ ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans et 50 ans). Les $Q_{MNA}-2$ varient entre 0,276 (Fétékro) et 0,97 (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,571 m³/s. Les $Q_{MNA}-5$ oscillent entre 0,124 (Fétékro) et 0,414 (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,245 m³/s. Les $Q_{MNA}-10$ fluctuent entre 0,082 (Fétékro) et 0,26 (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,156 m³/s. Les $Q_{MNA}-20$ sont échelonnés entre 0,058 (Fétékro) et 0,18 (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,109 m³/s. Les $Q_{MNA}-50$ vont de 0,039 (Fétékro) à 0,12 (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,073 m³/s. Les quantiles diminuent de l'amont vers l'aval c'est-à-dire de Fétékro à N'Zianouan quelle que soit la période de retour. Pour une période de retour donnée, les quantiles les plus élevés sont enregistrés à la station hydrométrique de N'Zianouan. Quant aux quantiles les plus faibles, ils sont enregistrés à la station hydrométrique de Fétékro. Ces quantiles diminuent au fur et à mesure que les périodes de retour augmentent sur toutes les stations hydrométriques.

Tableau 2 : Quantiles et intervalles de confiance des débits d'étiage du N'zi-Bandama.

Quantiles and confidence intervals of low water flows of N'zi river.

Station	Quantiles (m ³ /s)				
	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans
Fétékro	0,039 [0,02 - 0,06]	0,058 [0,03 - 0,007]	0,082 [0,05 - 0,11]	0,124 [0,09 - 0,16]	0,276 [0,21 - 0,34]
M'Bahiakro	0,051 [0,03 - 0,07]	0,076 [0,05 - 0,10]	0,109 [0,07 - 0,14]	0,167 [0,12 - 0,21]	0,378 [0,28 - 0,47]
Bocanda	0,077 [0,04 - 0,11]	0,11 [0,07 - 0,16]	0,16 [0,11 - 0,21]	0,24 [0,17 - 0,31]	0,55 [0,41 - 0,68]
Dimbokro	0,08 [0,04 - 0,11]	0,12 [0,06 - 0,17]	0,17 [0,1 - 0,24]	0,28 [0,2 - 0,37]	0,68 [0,49 - 0,86]
N'Zianouan	0,12 [0,06 - 0,18]	0,18 [0,11 - 0,26]	0,26 [0,17 - 0,36]	0,414 [0,29 - 0,54]	0,97 [0,7 - 1,23]

Une visualisation de l'évolution des quantiles des débits d'étiage du N'zi a été réalisée à travers la figure 2. Il est observé quasiment le même profil

pour toutes les courbes des quantiles. Les cinq courbes suivent une croissance de la station de Fétékro à la station N'zianouan où elles atteignent leurs maximums.

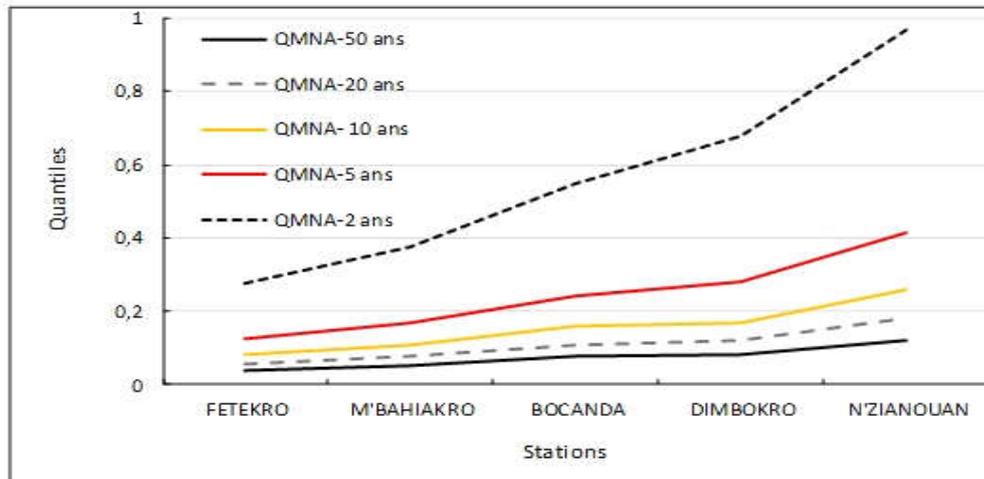


Figure 2 : Quantiles des débits d'étiage (QMNA) du N'zi.

Quantiles of low water flows (QMNA) of N'zi river.

ANALYSE DES SEUILS D'ETIAGES

La figure 3 met en évidence l'évolution des seuils de vigilance et de crise en rapport avec les QMNA-5 en fonction des différentes stations hydrométriques (Fétékro, M'Bahiakro, Bocanda, Dimbokro, N'Zianouan). Les seuils de vigilance et de crise qui correspondent respectivement à un niveau de prévention des problèmes de

pénurie et à un niveau de préparation d'une éventuelle crise, évoluent de façon croissante en partant de l'amont (Fétékro) vers l'aval (N'Zianouan). Les seuils de vigilance varient entre 0,14 m³/s (Fétékro) et 0,45 m³/s (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,27 m³/s et un écart-type de 0,12 m³/s. Quant aux seuils de crise, ils fluctuent entre 0,11 m³/s (Fétékro) et 0,37 m³/s (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,22 m³/s et un écart-type de 0,10 m³/s.

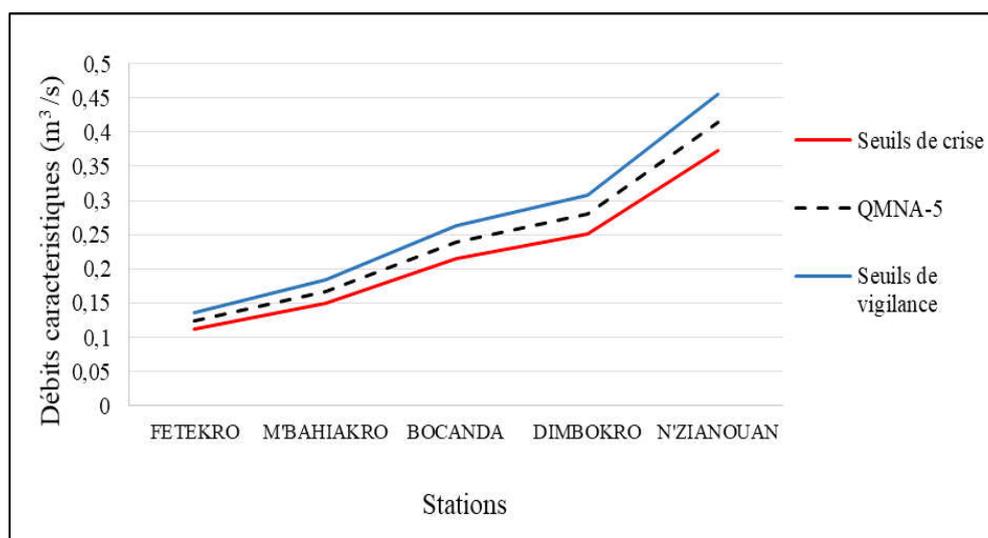


Figure 3 : Evolution des seuils de vigilance et de crise en rapport avec les QMNA-5.

Evolution of vigilance and crisis thresholds related to QMNA-5.

DISCUSSION

Différents indices ont été définis pour caractériser l'étiage ainsi que les impacts que celui-ci peut avoir sur la ressource en eau. Ces indices d'étiage sont des statistiques dérivées des chroniques de débit. Une liste exhaustive de ces indices peut être trouvée dans l'article de Smakhtin (2001), qui a fait un état des lieux des différentes méthodes de caractérisation des étiages en contextes jaugés et non jaugés.

Selon Lang (2007), pour caractériser l'étiage annuel on distingue les variables extraites à partir d'un critère temporel fixe (QMNA, VCNd et QCNd) de celles paramétrées par un débit fixe (volumes et durées déficitaires). On distingue par ailleurs les débits d'étiage issus de l'échelle mensuelle, en particulier le QMNA, débit moyen mensuel le plus bas de l'année, préconisé par la loi française sur l'Eau (1992), des débits d'étiage calculés à partir des valeurs journalières. Les variables d'étiage utilisées varient selon les pays. Aux Etats-Unis et au Canada la variable plus usuelle correspond au VCN7 (Hortness, 2006 ; Pyrcz, 2004 *in* Lang, 2007). Ces variables d'étiage sont en Autriche le Q95, en Suisse le Q97, etc. (Garcia, 2016).

Selon plusieurs auteurs (Lang, 2007 ; Garcia, 2016), la variable usuellement employée par les services gestionnaires pour caractériser les étiages d'un cours d'eau est le QMNA. Le débit de référence pour les étiages est fondé sur le QMNA : il s'agit du débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans (noté « QMNA-5 »). Le QMNA de fréquence 1/5^{ème} constitue une valeur réglementaire prescrite par la loi française sur l'eau du 3 janvier 1992 pour calculer les dispositifs de rejets et prélèvements en rivière.

En étiage, contrairement aux crues, les périodes de retour choisies sont relativement faibles, entre 2 et 10 ans. Le choix de la loi statistique a donc peu d'impacts sur le calcul des quantiles associés. La loi retenue pour le calcul des quantiles correspondant au QMNA a été la loi log-normale et ses paramètres sont estimés à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance comme recommandés par plusieurs auteurs (Meigh *et al.*, 2002 ; Catalogne, 2012 ; Garcia, 2016).

Les quantiles des débits d'étiage évalués à partir de la loi lognormale dans le bassin versant du N'zi-Bandama varient pour une période de retour donnée en fonction des différentes stations. Cela semble être dû à la position géographique des

stations en allant de l'amont vers l'aval. C'est en cela que la station de N'Zianouan qui est l'exutoire donc la station la plus en aval de ce bassin possède des quantiles supérieurs à ceux des autres stations et cela quelle que soit la période de retour choisie. Les débits caractéristiques d'étiage (QMNA-T ans) ont donc été déterminés au moyen des quantiles évalués à partir des différentes stations hydrométriques. Les débits de seuils de crise et de vigilance évalués montrent que la station de Fétékro nécessite un suivi hydrologique beaucoup plus accentué en période d'étiage prononcé par rapport aux autres stations du bassin versant du N'zi-Bandama. Cette différence peut s'expliquer par le contexte climatique dans lequel se situe le sous-bassin d'exutoire la station hydrométrique de Fétékro. En effet, il s'agit d'un climat tropical de transition avec des précipitations plus faibles que dans la partie plus en aval. Ainsi, la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant de N'zi requiert une surveillance accentuée sur les débits de la station de Fétékro dont la marge de manœuvre est la plus faible.

Selon les travaux de Garcia (2016), il est observé une hétérogénéité de la répartition du QMNA (5) en France. Les bassins versants nivaux ont de fortes valeurs de QMNA (5) ($QMNA(5) > 5 \text{ l/s/km}^2$). De même, les bassins uniformes du Nord de la France ont des étiages soutenus et des fortes valeurs de QMNA (5). D'autres bassins ont des valeurs de QMNA (5) extrêmement faibles voir nulles. C'est le cas de rivières intermittentes, notamment en région méditerranéenne. La répartition mensuelle des mois les plus secs par bassin en se basant sur le mois pendant lequel le QMNA (5) est majoritairement calculé selon Garcia (2016) a montré que le mois le plus sec est en février pour les bassins nivaux. Pour les autres, ce mois tombe majoritairement en août, 58 % des bassins, puis en septembre, 36 % des bassins et un peu en juillet, en grande partie pour les bassins méditerranéens.

CONCLUSION

Les résultats de l'étude ont montré que les quantiles des débits d'étiage évalués à partir de la loi Lognormale diminuent de l'amont vers l'aval c'est-à-dire de Fétékro à N'Zianouan quelle que soit la période de retour. Ils varient en général entre 0,039 m³/s pour T = 50 ans (Fétékro) et 0,97 m³/s pour T = 2 ans (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,073 m³/s. Les Q_{MNA-5} ou seuils

d'alerte déterminés varient entre 0,124 (Fétékro) et 0,414 (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,245 m³/s. Les seuils de vigilance estimés varient entre 0,14 m³/s (Fétékro) et 0,45 m³/s (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,27 m³/s. Quant aux seuils de crise déterminés, ils fluctuent entre 0,11 m³/s (Fétékro) et 0,37 m³/s (N'Zianouan) avec une moyenne de 0,22 m³/s. Ces débits de seuils ont mis en évidence la vulnérabilité à de sévères étiages du sous-bassin versant d'exutoire Fétékro qui nécessite de ce fait un suivi hydrologique beaucoup plus accentué en cas d'une sécheresse hydrologique prolongée par rapport aux autres stations hydrométriques du bassin versant du N'zi. Cependant, les seuls résultats d'une analyse fréquentielle ne suffisent pas à déterminer la sévérité d'une situation d'étiage. Celle-ci est en effet dépendante des besoins humains qui semblent plus définir les niveaux de crise que la situation hydro-climatique elle-même. Il est donc important de prévoir des débits de consommations pour mieux adapter les ouvrages hydrauliques et prévenir les risques de pénurie d'eau.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH) pour leur avoir fourni les données hydrométriques utilisées dans cette étude.

REFERENCES

- Catalogne C. (2006). Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 235 p.
- Benyahya L., Daigle A., Caissie D., Beveridge D., St-Hilaire A. (2009). Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada. Rapport de recherche R1057, 67 p.
- Dkengne S.P. (2006). Modélisation et prévision des débits naturels journaliers du bassin versant de la Sanaga à la station de contrôle de Songmbengue. Rapport de Master, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, 101 p.
- Doucet-Généreux P. L. (2015). Simulation des débits d'étiages dans un concept de changement climatique : incertitudes liées au choix du modèle et au critère de calage. Mémoire de projet de maîtrise spécialité en Génie civile, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, 103 p.
- Edgar H. G. (2008). Développement d'une méthodologie hydrologique/ statistique pour estimer les débits d'étiages au Québec habité. Thèse présentée pour l'obtention de grade de philosophiae Doctor (Ph.D) en sciences de l'Eau, Université du Québec INRS-ETE, 296 p.
- Gailliez S. (2013). Estimation des débits d'étiage pour des sites non jaugés. Application en région wallonne. Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique ; Université de Liège -Gembloux Agro-Bio-Technique, 271 p.
- Garcia F. (2016). Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. Hydrologie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 222 p.
- Hisdal, H., Tallaksen, L. M. (2004). Hydrological drought characteristics. In: ELSEVIER, A. ed. Hydrological Drought: Processes and Estimation: Methods for Streamflow and Groundwater, 139 - 198.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Goula B.T.A., Lasm T., Paturel J.E., BIEMI J. (2008). Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 11, 207 - 229.
- Kouassi A.M., N'guessan-Bi T.M., Kouamé K.F., Kouamé K.A., Okaingni J.C., Biemi J. (2012). Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M: cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes Rendus Géosciences*, Tome 344, 288 - 296.
- Lang C. (2007). Étiages et tarissements: vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français, Université de Metz, 210 p.
- Lang C. (2011). Les étiages : Définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, mis en ligne le 30 Novembre 2011. URL : <http://journals.openedition.org/cybeo/24827>.

- Meigh J., Tate E. et McCartney M. (2002). Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. *Friend 2002-Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice*, (274), 181 - 188.
- Mekhloufi N. (2014). Prédétermination et prévision des étiages des oueds de l'Algérie septentrionale, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magistère, spécialité hydraulique, Option aménagement hydraulique en zones arides, 120 p.
- Nicole P., Perrin C., Andreassian V., Augeard D., Besson F., Carroget A., Francois D., LE Lay M., Regimbeau F., Thiery D. (2015). Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques. Rapport de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, 24 p.
- Pushpalatha R. (2013). Simulation et prévision des étiages sur des bassins versants français: approche fondée sur la modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat de L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), 172 p.
- Smakhtin V.U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240 (3 - 4), 147 - 186.