

Etude d'impact prospective des débits de crues dans un contexte de changements climatiques en Afrique de l'Ouest: Cas du bassin versant du N'zo (Sassandra, Ouest de la Côte d'Ivoire)

[Prospective impact study of flood flows in a context of climate change in West Africa: Case of the N'zo watershed (Sassandra, West of Ivory Coast)]

Kouassi Amani Michel¹, Gngouin Asaph Yahot Joe², Yao Charles Arme³, and N'Guessan N'Guessan Emilienne³

¹Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département de Formation et de Recherche (DFR) 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

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

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

Copyright © 2021 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The study area is the N'zo-Sassandra (West of Ivory Coast) watershed which is located between longitudes 7°15' and 8°05' West and latitudes 6°50' and 7°50' North. Its area is estimated at 4,310 km². The objective of this study is to analyze the forecast of the flood flows of the N'zo (Sassandra) river located in the west of the Ivory Coast. The hydroclimatic data used (rainfall, ETP, flow) within the framework of this study extend on the one hand over the historical period (1961-2017) and on the other hand over the future period (2036-2065). The methodological approach adopted is based respectively on the analysis of past floods, the evaluation of the chosen rainfall-discharge model, the prospective climatic analysis and the prospective analysis of the flood flows. The variables used to describe the future evolution of these floods are the decennial and centennial quantiles of the annual maximum monthly mean discharges. Thus, an optimistic climate forecast scenario was used (RCP 2.6). This climatic scenario then fed into a hydrological rainfall-discharge model (GR2M model) calibrated to the reference period 1961-1990 and validated over the period 1991-2017. In response to climate forcing, future monthly flood discharges (QMXA) were simulated. The main results show that the best statistical law retained following the frequency analysis of the flood flows is the Gamma law which was used to estimate the frequency flows. The GR2M model evaluated, presented a good performance in calibration (79.7%) as in validation (82.7%) and demonstrated a great robustness (+3%) therefore a great capacity to reconstitute the flows of N'zo in Kahin. The climate forecast has shown a decrease in precipitation (-19.7%) and an increase in temperature (+1.6 °C) in the middle of the current century (2036-2065). The expected flood flow quantiles in the middle of the 21st century (2035-2065) are respectively 168.85 m³/s for the ten-year flow and 299.58 m³/s for the one-year flow. Thus, in response to climate change, the forecast of flood flows leads to a worrying drop in frequency flood flows, respectively of the order of 64.56% for the ten-year flood and 61.73% for the 100-year flood compared to their current values.

KEYWORDS: Climate change, Hydrological forecasting, Flood flows, GR2M model, N'zo-Sassandra, Ivory Coast.

RESUME: La zone d'étude est le bassin versant du N'zo-Sassandra (Ouest de la Côte d'Ivoire) qui se situe entre les longitudes 7° 15' et 8° 05' Ouest et les latitudes 6° 50' et 7° 50' Nord. Sa superficie est estimée à 4 310 Km². Cette étude a pour objectif d'analyser la prospective des débits de crue du fleuve N'zo (Sassandra) situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Les données hydroclimatiques utilisées (pluie, ETP, débit)

dans le cadre de cette étude s'étendent d'une part sur la période historique (1961-2017) et d'autre part sur la période future (2036-2065). La démarche méthodologique adoptée est basée respectivement sur l'analyse des crues passées, l'évaluation du modèle pluie-débit choisi, l'analyse prospective climatique et l'analyse prospective des débits de crue. Les variables retenues pour décrire l'évolution future de ces crues sont les quantiles décennal et centennal des débits moyens mensuels maximaux annuels (Q_{MMA}). Ainsi, un scénario optimiste de prévision climatique a été utilisé (RCP 2.6). Ce scénario climatique a ensuite alimenté un modèle hydrologique pluie-débit (modèle GR2M) calé sur la période de référence 1961-1990 et validé sur la période 1991-2017. En réponse au forçage climatique, les débits mensuels de crue (Q_{MMA}) futurs ont été simulés. Les principaux résultats montrent que la meilleure loi statistique retenue à la suite de l'analyse fréquentielle des débits de crue est la loi Gamma qui a servi à l'estimation des débits fréquents. Le modèle GR2M évalué, a présenté une bonne performance en calage (79,7%) comme en validation (82,7%) et a démontré une grande robustesse (+3%) donc une grande capacité à reconstituer les débits du N'zo à Kahin. La prospective climatique a mis en évidence une baisse des précipitations (-19,7%) et une augmentation de la température (+1,6 °C) au milieu du siècle en cours (2036-2065). Les quantiles de débit de crue attendus au milieu du 21^{ème} siècle (2035-2065) sont respectivement de 168,85 m³/s pour le débit décennal et 299,58 m³/s pour le débit centennal. Ainsi, en réponse aux changements climatiques, la prospective des débits de crue conduit à une baisse préoccupante des débits fréquents de crue respectivement de l'ordre de 64,56% pour la crue décennale et 61,73% pour la crue centennale par rapport à leurs valeurs actuelles.

MOTS-CLEFS: Changements climatiques, Prospective hydrologique, Débits de crue (Q_{MMA}), Modèle GR2M, N'zo-Sassandra, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Dans un contexte de changements climatiques où la quantité et la qualité des ressources en eau douce de la planète subissent de plus en plus des pressions exercées par la croissance démographique et l'activité économique, l'Afrique de l'Ouest semble faire face ces dernières décennies à des sécheresses prolongées et graves, notamment dans sa région sahélienne semi-aride et sans oublier les inondations graves et dévastatrices enregistrées dans sa zone tropicale humide [1]. De ce fait, la plupart des bassins fluviaux issus de cette partie du globe sont confrontés à ces mêmes événements hydroclimatiques. C'est l'exemple du bassin versant du N'zo, affluent du fleuve Sassandra (Côte d'Ivoire), où la récurrence de ces événements cause d'énormes désastres à leurs passages, dont la destruction des habitations et des champs de cultures comme ce fut le cas des dégâts occasionnés par la crue du fleuve N'zo en Juin 2017 qui ravagea à Guiglo plus de 600 hectares de riz [2].

Il est donc de plus en plus évident que le climat à long terme de l'Afrique de l'Ouest est en train de changer et que ces changements climatiques entraînent et continueront de faire apparaître des extrêmes hydrologiques. Toutefois, si des progrès considérables ont été réalisés pour comprendre pourquoi les précipitations sont si variables dans cette zone géographique et comment elles pourraient évoluer à l'avenir [3], il semble tout aussi important de vérifier si ces changements climatiques constatés auront ou non des impacts sur les débits extrêmes futurs. Dans la mesure où les inondations et sécheresses qui en résultent pourraient affecter directement la vie des personnes, leurs foyers et leurs entreprises.

L'objectif de cette étude est l'analyse prospective des débits de crues du fleuve N'zo (Sassandra) à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. La démarche méthodologique adoptée est basée respectivement sur l'analyse des crues passées, l'évaluation du modèle pluie-débit choisi, l'analyse prospective climatique et l'analyse prospective des débits de crue.

2 DONNÉES ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est le bassin versant du N'zo à Kahin, sous-bassin du fleuve Sassandra. Il est compris entre les longitudes Ouest de coordonnées 7°15' et 8°05' et les latitudes Nord de coordonnées 6°50' et 7°50' (Figure 1). La superficie du bassin est estimée à 4 310 Km². Le N'zo, cours d'eau d'ordre 6 (méthode de Strahler), prend sa source dans les monts Dans, région située entre Biankouma et Man et coule globalement dans une direction Nord-Sud. C'est un affluent de la rive gauche du fleuve Sassandra.

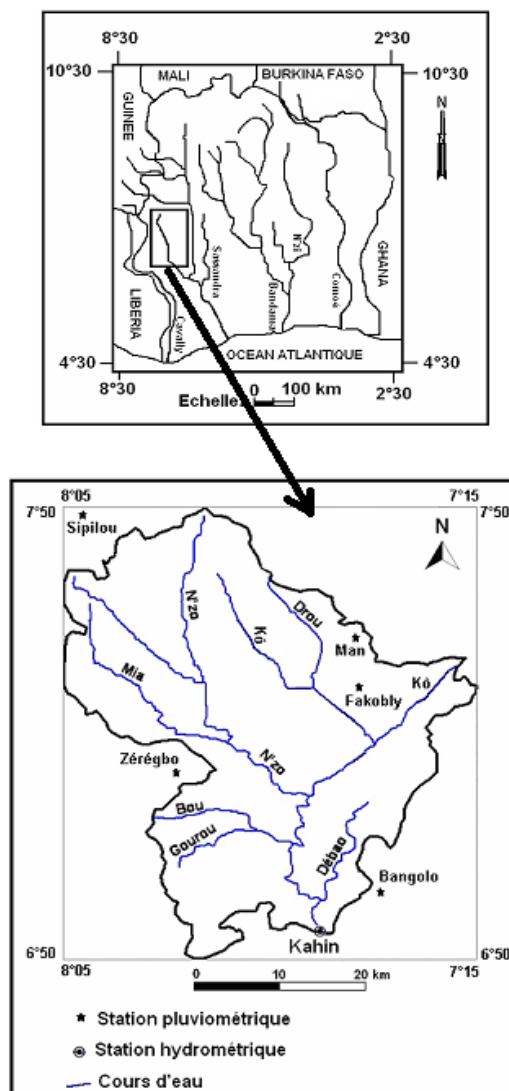


Fig. 1. Présentation du bassin versant du N'zo-Sassandra

Le régime climatique régnant au niveau du bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin est un climat de montagne (régime subéquatorial) avec des hauteurs pluviométriques annuelles dépassant parfois les 2 000 mm (Figure 2). L'orientation des reliefs majeurs par rapport aux vents dominants et la répartition des altitudes par rapport aux zones atmosphériques, sont autant de facteurs qui militent en faveur de ce climat de montagne. Cependant, la distribution spatiale des précipitations est faite selon un gradient essentiellement de direction NE- SW. Le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin est soumis à deux saisons:

- Une saison sèche qui s'étend de novembre à février, avec des précipitations moyennes mensuelles dépassant rarement 50 mm. Les plus faibles valeurs des précipitations sont observées pendant le mois de janvier avec à peine 5 mm de pluie;
- Une saison de pluies qui s'étend de mars à octobre. Les mois d'août et septembre sont les mois les plus pluvieux, avec des moyennes mensuelles dépassant 300 mm. Les paramètres climatiques ci-dessous ont été évalués sur la période 1971-2000. Les températures annuelles varient globalement entre 15 °c et 33 °c avec une moyenne de 25 °c. Une moyenne de 2 272 heures d'ensoleillement par an est enregistrée. L'humidité relative varie entre 61 et 99% avec une valeur moyenne de 98% à man. Les vents de direction n-s (harmattan et alizé boréal) sont dominants en saison sèche tandis qu'en saison des pluies, c'est le vent de la mousson de direction nw- se qui prédomine.

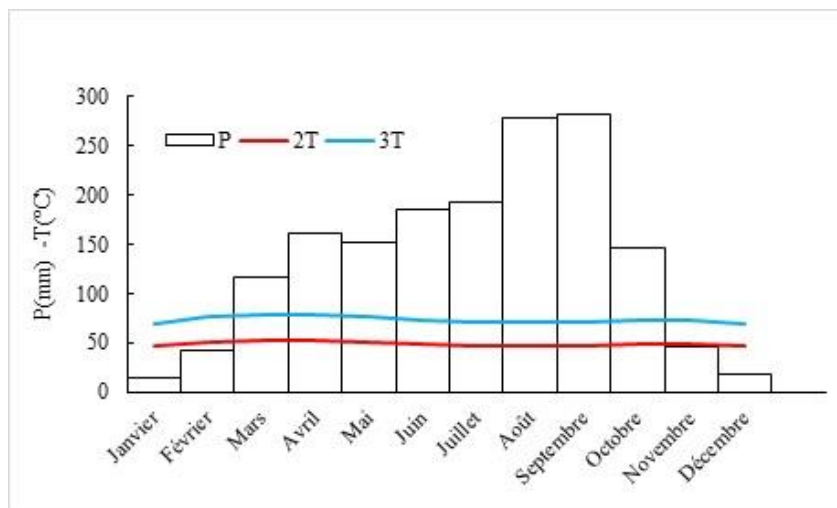


Fig. 2. Diagramme ombrothermique de la station de Man (1961-1990)

Le régime hydrométrique observé à la station du N'zo à Kahin est un régime simple avec un minimum en février et un maximum en septembre (Figure 3). La période des basses eaux s'étend de novembre à juin et la période des hautes eaux va de juillet à octobre.

Le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin fait partie de la zone forestière de l'Ouest caractérisée par une forêt dense. Cependant, on assiste à une dynamique régressive de la forêt au profit des cultures/jachères due à des pratiques agricoles et une exploitation forestière accélérée [4]. Une partie de cette végétation est conservée sous forme de forêts classées (Ira, Sangouiné, Gueouélé, Mont Tonkouï, Goin-Debé, Scio) dans lesquelles l'exploitation forestière est autorisée mais, les défrichements agricoles sont interdits.

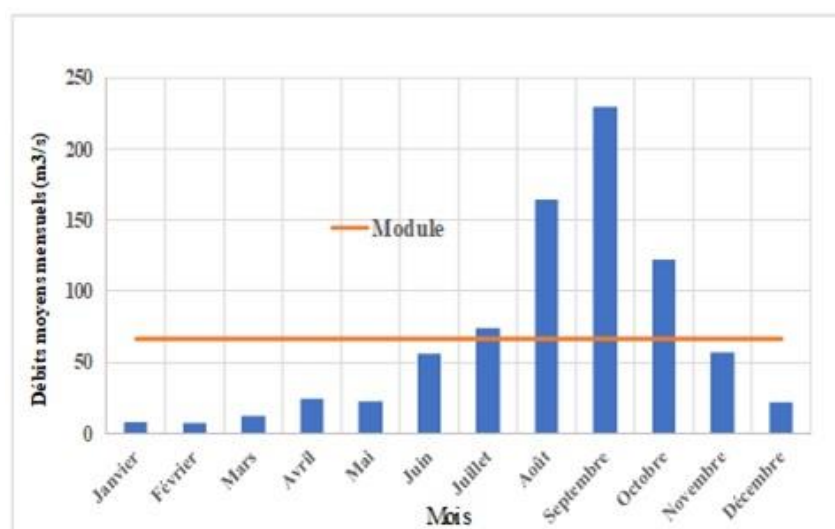


Fig. 3. Régime hydrologique du N'zo à Kahin (1961-1990)

Ces domaines forestiers permanents de l'Etat doivent permettre de garantir l'équilibre écologique. En effet, l'occupation du sol influence la quantité d'eau disponible pour l'écoulement de surface et l'infiltration selon la nature des végétaux. Les sols du bassin versant du N'zo-Sassandra sont constitués essentiellement de sols ferrallitiques et de sols hydromorphes. Le bassin versant du N'zo-Sassandra à Kahin appartient à la région la plus accidentée de la Côte d'Ivoire. Les altitudes des sommets sont généralement supérieures à 800 m et dépassent parfois les 1 000 m. L'altitude moyenne des bas plateaux est égale à 300 m. La côte minimale du N'zo est de 225 m. Le bassin versant du N'zo (Sassandra) se situe dans le domaine archéen de la dorsale de Man. On y rencontre trois principales unités lithologiques [4] à savoir un ensemble granitique constitué de gneiss occupant la quasi-totalité du bassin versant (90 %), un ensemble charnockitique situé au Nord-Est du bassin et un ensemble migmatitique localisé dans la partie sud du bassin. Ces formations ont subi quatre phases de déformation, vieilles de 2817 à 1670 Ma, qui sont responsables de l'intense fracturation à l'origine des aquifères fracturés.

2.2 DONNÉES

Les données climatiques mesurées au sol concernent les pluies et températures mensuelles de la période 1961-2017. Elles proviennent de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Les stations de Guiglo et de Man sont les stations sélectionnées dans le réseau météorologique de la Côte d'Ivoire pour cette étude. Les valeurs de l'ETP ont été calculées à partir de l'aide de la Méthode de Thornthwaite sur la période 1961-2017. Les pluies annuelles à la station de Man varient entre 1150,2 et 2189,5 mm avec une moyenne de 1619 mm et un écart-type de 246,8 mm tandis que celles de Guiglo vont de 1123,7 à 2068,1 mm avec une moyenne de 1333,4 mm et un écart-type de 550,7 mm. Les valeurs moyennes annuelles de température mesurées à la station de Man oscillent entre 23,76°C et 25,45°C avec une moyenne de 24,41°C et un écart-type de 0,37. Quant à l'ETP, elle se situe entre 1215,8 mm et 1461 mm avec une moyenne de 1299,5 mm et un écart-type de 51,1 mm. Des données climatiques futures de pluies et de températures ont été utilisées. Ces données proviennent du programme CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Le scénario retenu est le RCP 2.6 qui est le scénario le plus optimiste. En effet, la réalisation de ce scénario implique l'intégration des effets de politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C. Les différentes données climatiques (pluie et température) couvrent la période de référence (1961-1990) et la période future (2071-2100). Celles-ci ont fait l'objet de prétraitements (logiciel RSTUDIO) et de corrections (méthode Delta).

Les données de débits mensuels ont été mises à notre disposition par la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH), Sous-Direction de l'Hydrologie et s'étendent sur la période 1961-2017. La station hydrométrique choisie pour l'étude est celle du N'zo à Kahin. Le débit moyen annuel ou module du N'zo à Kahin, varie entre 22,5 et 150,2 m³/s avec une moyenne de 71,3 m³/s et un écart-type de 32,6 m³/s. L'analyse des débits extrêmes passe par l'extraction de certains indicateurs utilisés pour caractériser les crues [6-7]. Les variables retenues pour décrire l'évolution future des crues sont les quantiles décennal et centennal des débits moyens mensuels maximaux annuels (Q_{MXA}). Ainsi, les Q_{MXA} du N'zo à Kahin, varient entre 108 et 823,242 m³/s avec une moyenne de 253,12 m³/s et un écart-type de 142,53 m³/s.

2.3 MÉTHODES

La démarche méthodologique suivante a été adoptée:

- Analyse des crues passées;
- Evaluation du modèle pluie-débit choisi;
- Analyse prospective climatique;
- Analyse prospective hydrologique.

2.3.1 ANALYSE RÉTROSPECTIVE DES DÉBITS DE CRUES

2.3.1.1 FRÉQUENCES D'OCCURRENCE MENSUELLE DES Q_{MXA} ET DE DISTRIBUTION DES Q_{MXA}

La fréquence d'occurrence mensuelle consiste à déterminer les fréquences d'apparition mensuelle des Q_{MXA}. Ces occurrences mensuelles sont ramenées à l'échelle de pourcentage et représentées graphiquement.

Cette analyse consiste à déterminer les classes de distribution des Q_{MXA} mais surtout concourt à déterminer les classes modales et médianes. La caractérisation des fréquences de distribution des débits extrêmes a suivi la procédure suivante [8]:

- a) La détermination du nombre de classes : elle tient compte de certaines règles permettant de réaliser une discrétisation correcte:
 - i) Aucune classe ne doit être vide;
 - ii) Les limites de classe doivent couvrir l'ensemble de la distribution;
 - iii) Les limites de classe ne doivent pas se chevaucher;
- b) L'évaluation de l'intervalle de classe, la définition des classes et la définition des effectifs puis des fréquences par classe. De ces fréquences représentées graphiquement, il résulte des histogrammes de fréquences simples et cumulées qui permettent de déterminer respectivement les classes modales et médianes.

2.3.1.2 MODÉLISATION STATISTIQUE DES Q_{MXA}

La modélisation statistique ou analyse fréquentielle des Q_{MXA} réalisée a consisté à déterminer les quantiles décennal et centennal des débits de crues. L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel, qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un

processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. L'un des buts de la modélisation statistique est de valider les séries de variables descriptives de paramètre extrême devant servir à l'estimation des quantiles de diverses périodes de retour [9]. L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests de stationnarité de Kendall, d'indépendance de Wald-Wolfowitz et d'homogénéité de Wilcoxon [10-11]. Ces tests fonctionnent tous sur le même principe qui consiste à énoncer une hypothèse sur la population mère et à vérifier sur les observations constatées si celles-ci sont vraisemblables dans le cadre de cette hypothèse. L'hypothèse à tester est appelée H_0 (hypothèse nulle) et s'accompagne impérativement de son hypothèse alternative appelée H_1 . Le test s'attachera à valider ou à rejeter H_0 (et par conséquent à tirer la conclusion inverse pour H_0). Si le résultat du test amène à accepter l'hypothèse nulle H_0 , alors la probabilité que la répartition soit aléatoire est élevée. En revanche, le rejet de H_0 signifie que cette répartition des réponses recèle des informations qui ne semblent pas être aléatoires et qu'il convient d'approfondir l'analyse. Les résultats de ces tests d'hypothèses sont généralement présentés sous forme de couple (statistiques des tests, p-value). La p-value étant la probabilité au dépassement de la valeur calculée de la statistique du test que l'on compare ensuite avec le niveau de signification.

Selon Kouassi *et al.* [12], la détermination de la meilleure loi d'ajustement a toujours été délicate et le choix du modèle peut être crucial pour l'estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes. La meilleure loi retenue pour les crues par Assoko *et al.* [13] sur le bassin de la Marahoué (Bandama, Côte d'Ivoire) est la loi gamma tandis que Kouassi *et al.* [12] ont retenu la loi log-normale sur le bassin versant du N'zi (Bandama, Côte d'Ivoire). Il n'existe donc pas de loi unique qui permettrait d'ajuster convenablement toutes les données des stations. Pour l'étude, des lois ont été présélectionnées via deux (02) approches. La première approche a consisté à retenir des lois sur la base de certains travaux antérieurs effectués sur des bassins similaires en Afrique de l'Ouest. La deuxième approche s'est appuyée sur l'outil SAD du Logiciel HYFRAN. A l'issue de ces présélections, trois (03) lois ont été retenues. Il s'agit notamment de:

- La loi Gamma;
- La loi Gumbel;
- La loi Log-Normale.

Ces lois ont été soumises au logiciel qui permet ainsi de dégager la meilleure loi ajustant chaque indicateur après comparaison de ces lois à l'aide des critères BIC et AIC [12, 13, 14]. Les séries intégrées dans une procédure d'analyse fréquentielle, comme abordée ci-dessus permettent d'estimer un quantile de période de retour donné à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations. La détermination des quantiles a été effectuée à partir de l'approche analytique dont le fondement mathématique se présente comme suit (équation 1) [12]:

$$x(F) = x_0 + S \times u(F) \quad (1)$$

Avec :

- x_0 : la moyenne arithmétique;
- S: l'écart-type de l'échantillon considéré;
- u: variable réduite de la loi considérée.

x_0 et S étant connus, on calcule $x(F_i)$, qui est le quantile recherché pour une fréquence de non dépassement donnée F_i . Après avoir déterminé le quantile relatif à une fréquence donnée, il faut connaître l'intervalle de confiance de ce quantile, c'est-à-dire la gamme de valeurs qui devrait contenir ce quantile. L'intervalle de confiance autour d'un quantile quelconque n'est estimé en pratique que lorsque l'effectif de l'échantillon est suffisamment important pour que les moyennes et les écarts types empiriques suivent sensiblement des lois normales indépendantes ($n > 30$).

La loi identifiée comme ajustant le mieux les débits de crues a été appliquée aux débits moyens mensuels minimaux annuels (Q_{MNA}) pour caractériser les périodes de retour des événements extrêmes. Selon Hangnon *et al.* [15], la période de retour (ou temps de retour) caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Ce terme est très utilisé pour caractériser les risques naturels. La période de retour d'un événement est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet événement [12] (équation 2):

$$T = 1/F \quad (2)$$

avec :

- T: période de retour (année);
- F: fréquence de non dépassement.

Un événement extrême est qualifié de très exceptionnel si sa période de retour est au-delà de 100 ans; d'exceptionnel si la période de retour est située dans l'intervalle de 30 à 100 ans; de très anormal si la période de retour est comprise entre 10 et 30 ans; d'anormal si la période de retour va de 6 à 10 ans et de normal si la période de retour est à moins de six ans [12, 13, 15].

2.3.2 EVALUATION DU MODÈLE PLUIE-DÉBIT CHOISI

Le choix s'est porté sur le modèle pluie-débit conceptuel global GR2M pour sa performance, sa robustesse et sa simplicité [16-19]. Selon Sauquet *et al.* [20], le modèle pluie-débit est un outil qui permet de simuler les débits en un point donné d'un cours d'eau à partir de la connaissance des précipitations liquides ou solides sur le bassin-versant correspondant et du retour potentiel à l'atmosphère via les phénomènes d'évaporation. C'est une représentation très simplifiée du fonctionnement du bassin-versant et de la complexité intrinsèque des processus hydrologiques. Dans le cadre de cette étude, le bassin a été considéré comme une entité homogène, sans prise en compte de la variabilité spatiale interne de ses caractéristiques (caractère global) et la transformation pluie-débit est décrite par un assemblage simple de réservoirs permettant de simuler la répartition des eaux dans les différents compartiments du cycle de l'eau (caractère conceptuel) [20].

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps mensuel) est constitué d'un réservoir de production qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale et d'un réservoir « eau gravitaire » qui régit la fonction de transfert. Ce modèle mensuel de bilan d'eau est régi par deux paramètres à caler (X_1 et X_2). Le premier paramètre X_1 représente la capacité maximale du réservoir « sol ». Le deuxième paramètre X_2 représente le paramètre d'échange souterrain au niveau du réservoir « eau gravitaire ». Le modèle GR2M est schématisé par [4, 16, 19]:

- Une fraction de la pluie mensuelle qui participe à l'écoulement direct;
- Le niveau d'un réservoir qui représente le stock d'eau et évolue en fonction de la fraction de pluie restante et de l'évapotranspiration potentielle par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle;
- Une vidange progressive de ce stock d'eau qui produit l'écoulement retardé.

Le modèle GR2M a été calé sur la période 1961-1990 et validé sur la période 1991-2017. Le critère d'évaluation utilisé a été le Nash-Sutcliffe qui a été appliqué en calage (1961-1990) et en validation (1991-2017) (équation 3):

$$Nash - Sutcliffe = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum (Q_o^i - Q_m)^2} \right] \quad (3)$$

Où:

Q_o^i : débits mensuels observés;

Q_c^i : débits mensuels calculés;

Q_m : débit moyen observé sur l'ensemble de la période d'observation sans lacune.

La valeur du critère de Nash-Sutcliffe est comprise entre $-\infty$ et 100%. Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash-Sutcliffe est proche de 100%. Ainsi, une performance supérieure ou égale à 60% peut être jugée satisfaisante [21]. Les performances en termes de critère de Nash-Sutcliffe sont l'image de l'adéquation du modèle et du jeu de paramètres calés au bassin étudié. La performance du modèle peut être jugée selon les valeurs prises par le critère de Nash-Sutcliffe:

- Nash-Sutcliffe $\geq 90\%$: le modèle est excellent;
- $80\% \leq$ Nash-Sutcliffe $< 90\%$: le modèle est très satisfaisant;
- $60\% \leq$ Nash-Sutcliffe $< 80\%$: le modèle est satisfaisant;
- Nash-Sutcliffe $< 60\%$: le modèle est mauvais.

La robustesse du modèle a été évaluée à travers la différence entre la performance en validation et celle en calage.

2.3.3 ANALYSE PROSPECTIVE CLIMATIQUE

Les tendances climatiques saisonnières (données de pluies et de températures mensuelles) afférentes à la période future (2036-2065) sont issues des données CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) corrigées par la méthode des anomalies à partir des données de la SODEXAM sur la période 1961-2017. Les biais des paramètres climatiques (précipitations et température) ont été évalués sur la période future 2036-2065 par rapport à la période de référence (1961-1990).

2.3.4 ANALYSE PROSPECTIVE DES DÉBITS DE CRUE

Une fois le modèle calé sur la période 1961-1990, vient l'étape de simulation des débits futurs. Les valeurs des paramètres du modèle (X_1 et X_2) étant fixés, les données climatiques de pluie et d'évapotranspiration issues de la base de données CORDEX ont été intégrées dans le modèle GR2M. En effet, l'hypothèse fondamentale est que la transformation pluie-débit sera peu modifiée à l'horizon futur (absence d'adaptation du bassin versant en termes d'occupation du sol et végétation, d'évolution des prélèvements d'eau) [20]. A partir des débits mensuels simulés, sont extraits les Q_{MXX} simulés sur la période future (2036-2065).

Une analyse statistique de l'indicateur d'étude d'impact à savoir les débits de crue (Q_{MXX}) a été réalisée sur la période future (2036-2065):

- Détermination des fréquences d'occurrence mensuelle des débits de crue;
- Détermination des fréquences de distribution des débits de crue;
- Détermination des quantiles des débits de crue (conservation de la meilleure loi);
- Calcul du biais des débits fréquentiels de crue.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 ANALYSE DES DÉBITS DE CRUES PASSÉS

3.1.1 FRÉQUENCE D'OCCURRENCE MENSUELLE DES Q_{MXX}

Les Q_{MXX} interviennent majoritairement aux mois de septembre (70%) et d'août (20%) (Figure 4). Ils apparaissent moins fréquemment en juin, juillet et octobre (3%).

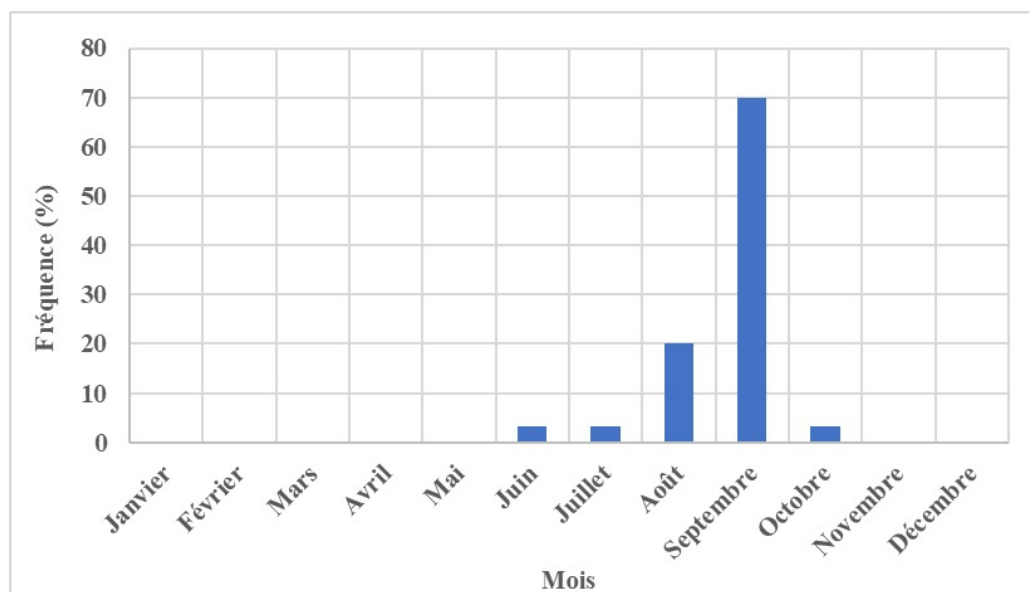


Fig. 4. Fréquence d'occurrence mensuelle des Q_{MXX} du fleuve N'zo à Kahin (1961-1990)

3.1.2 ANALYSE DES CLASSES DE DISTRIBUTION DES Q_{MXX}

Les valeurs de Q_{MXX} les plus fréquentes (90%) appartiennent à l'intervalle [100-400 [m^3/s (Figure 5). Quant aux autres classes de Q_{MXX} , leurs fréquences respectives sont de 3,33%. La classe modale (56,67%) et la classe médiane des Q_{MXX} sont confondues et correspondent à la classe [100-250 [m^3/s (Figure 5).

3.1.3 ANALYSE DES QUANTILES DE Q_{MXA}

Plusieurs tests d'hypothèses ont été appliqués aux données de débits de crues à la station hydrométrique du N'zo à Kahin (Sassandra) (test d'indépendance de Wald-Wolfowitz, test d'homogénéité de Wilcoxon et test de stationnarité de Kendall). Le tableau 1 montre les résultats d'application de ces différents tests d'hypothèses. L'analyse de ce tableau a permis de constater que les tests de d'indépendance, de stationnarité de Kendall et d'homogénéité restent valables pour les Q_{MXA} à un seuil de 5%. Ces résultats montrent que la série des Q_{MXA} considérée est constituée par des valeurs homogènes et stationnaires mais pas indépendantes. Ainsi, la série des Q_{MXA} de la station hydrométrique du N'zo à Kahin (Sassandra).

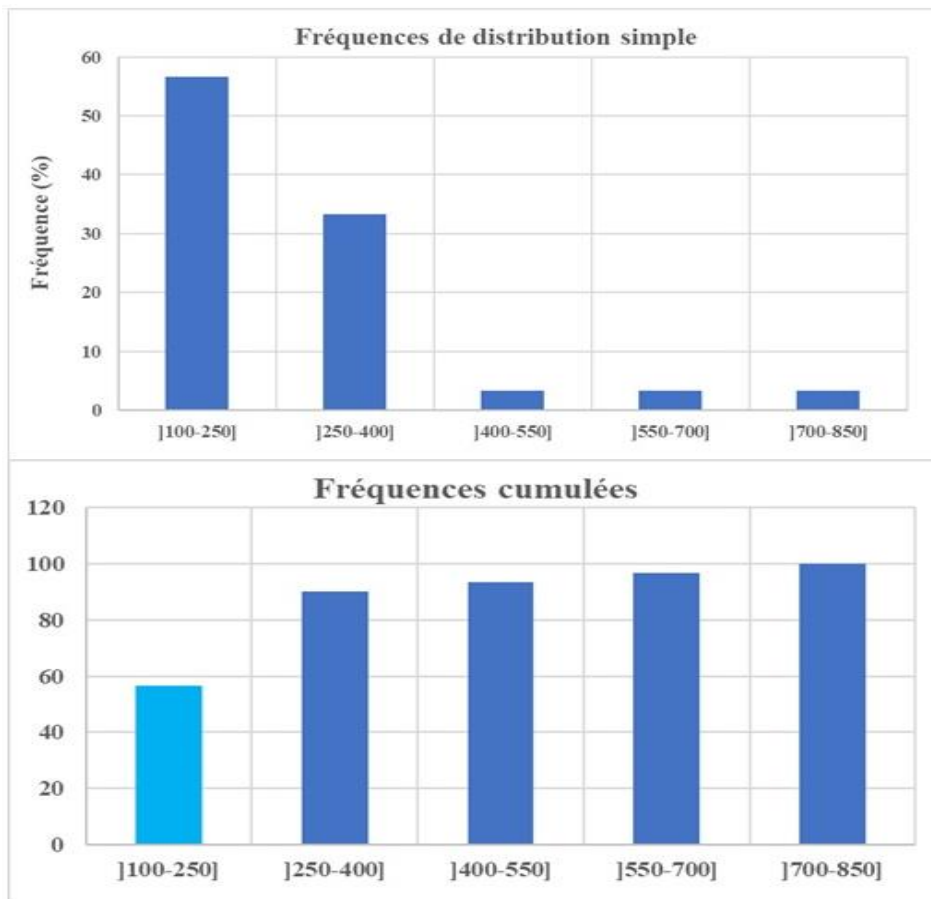


Fig. 5. Fréquences de distribution des Q_{MXA} du fleuve N'zo à Kahin (1961-1990)

Tableau 1. Résultats des tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle

Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
U	P	K	P	W	P
1,95	5,13.10 ⁻²	1,18	2,39.10 ⁻¹	6,64.10 ⁻¹	5,07.10 ⁻¹

Les résultats obtenus suite à l'application des critères d'Akaike (AIC) et bayésien (BIC) dans la procédure de l'analyse fréquentielle sont consignés dans le tableau 2. Selon ces critères, la loi Gamma est suivie par la loi lognormale, ensuite vient la loi Gumbel. La loi Gamma a enregistré les valeurs les plus faibles des deux critères utilisés.

Tableau 2. Critères AIC et BIC appliqués aux lois de probabilité utilisées

Lois de probabilité	Critère BIC	Critère AIC
Gamma	126,577	123,775
Lognormale	159,679	156,876
Gumbel	168,606	164,402

Ainsi, la loi Gamma qui ajuste au mieux la distribution des Q_{MXA} a été donc retenue pour la détermination des quantiles de débits de crues. Le débit décennal de crue évalué à partir de la loi Gamma est de 476,48 m³/s. Quant au débit centennal de crue, il est de 782,74 m³/s.

3.2 RÉSULTATS D'ÉVALUATION DU MODÈLE GR2M

Les principaux résultats d'évaluation du modèle GR2M ont mis en évidence une bonne performance estimée en termes de Nash-Sutcliffe égale à 79,7% en calage et 82,7% en validation (Tableau 3). En effet, le modèle GR2M a été performant en calage et très performant en validation. La valeur du critère de robustesse obtenue (+3%) met en évidence une bonne robustesse du modèle conceptuel global GR2M sur le bassin versant du N'zo (Sassandra) et pourra être utilisé pour la simulation des débits mensuels futurs.

Tableau 3. Performances du modèle GR2M

	Performance (%)
Calage (1961-1990)	+79,7
Validation (1991-2017)	+82,7
Critère de robustesse	+3

3.3 RÉSULTATS DE LA PROSPECTIVE CLIMATIQUE

Le biais des précipitations annuelles évalué est de -19,7% alors que celui des températures est de +1,6 °C (Tableau 4), ce qui traduit une baisse de la pluviométrie et une augmentation de la température au milieu du siècle en cours (2036-2065) (Figure 6).

Tableau 4. Biais (%) des paramètres climatiques par rapport à la période 1961-1990

Paramètres	Biais
Précipitations (%)	-19,7
Température (°C)	+1,6

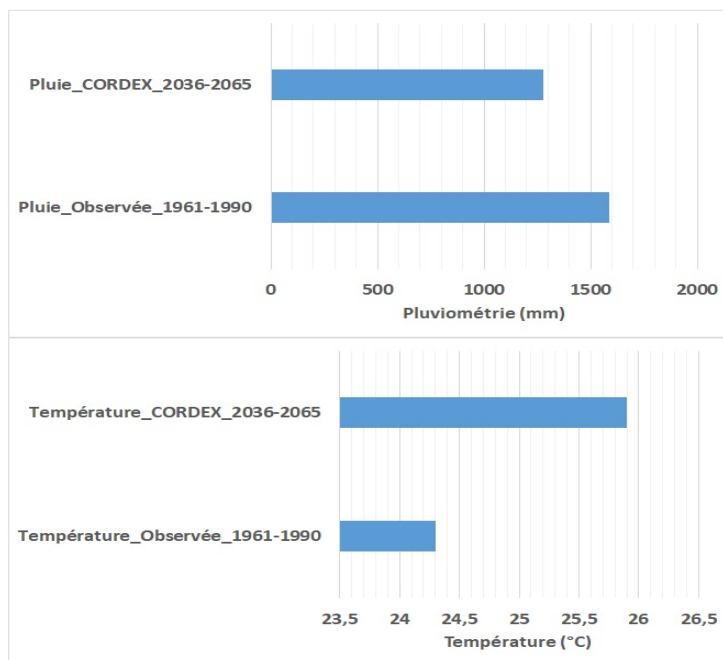


Fig. 6. Variations futures (2036-2065) des paramètres climatiques sur le bassin versant du N’zo (Kahin)

3.4 RÉSULTATS DE LA PROSPECTIVE DES DÉBITS DE CRUES

Les débits mensuels de crue (Q_{MXA}) prévus au cours du milieu du 21^{ème} siècle s’étendent de la période de juin à octobre avec les plus fortes fréquences enregistrées au mois de septembre (70%) suivi du mois d’août (20%) (Figure 7). Tous les débits de crues futures sont concentrés dans l’intervalle [100-250 [m³/s. Ainsi, les classes modale et médiane se confondent à la classe [100-250 [m³/s.

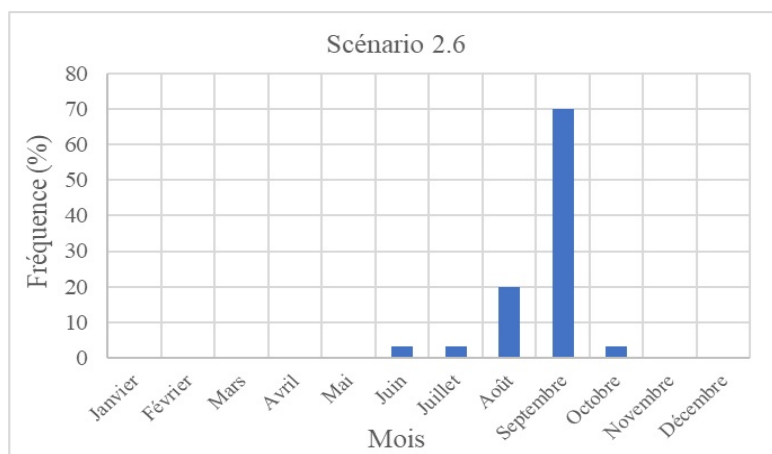


Fig. 7. Fréquences d'occurrence des Q_{MXA} à la station du N’zo à Kahin au cours de la période 2036-2065

Les quantiles de débit de crue attendus au milieu du 21^{ème} siècle (2035-2065) sont respectivement de 168,85 m³/s pour le débit décennal et 299,58 m³/s pour le débit centennal (Figure 8). Ainsi, en réponse aux changements climatiques, la prospective des débits de crue conduit à une baisse préoccupante des débits fréquentiels de crue respectivement de l’ordre de 64,56% pour la crue décennale et 61,73% pour la crue centennale par rapport à leurs valeurs actuelles (Figure 8).

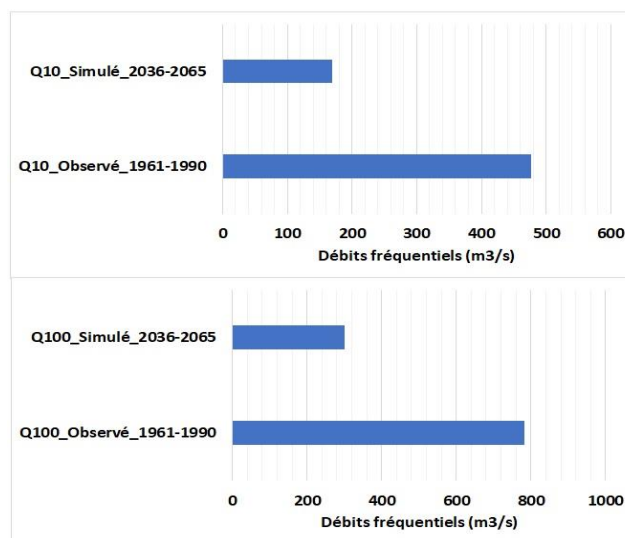


Fig. 8. Variations des débits fréquents de crues à la station du N'zo à Kahin au cours de la période 2036-2065

3.5 DISCUSSION

Le régime hydrologique observé à la station du N'zo à Kahin est un régime simple avec un minimum en février et un maximum en septembre. La période des hautes eaux va de juillet à octobre et la période des basses eaux s'étend de novembre à juin. Les Q_{MXA} interviennent majoritairement aux mois de septembre (70%) et août (20%) mais généralement entre les mois de juin et octobre (5 mois). Les valeurs de Q_{MXA} les plus fréquentes (90%) appartiennent à l'intervalle [100-400 [m³/s. La classe modale des Q_{MXA} (56,67%) et la classe médiane sont confondues et correspondent à la classe [100-250 [m³/s. Les résultats de l'analyse fréquentielle montre que les différents critères utilisés (critères BIC et AIC) mettent en évidence la loi Gamma comme la meilleure loi parmi les trois lois appliquées (loi Gumbel, loi Gamma, et loi lognormale) aux Q_{MXA} . Le débit décennal de crue évalué à partir de la loi Gamma est de 476,48 m³/s. Quant au débit centennal de crue, il est de 782,74 m³/s. Le modèle pluie-débit conceptuel global utilisé (GR2M) calé sur la période de référence 1961-1990 et validé sur la période 1991-2017 a démontré une grande performance et une bonne robustesse. Les biais des paramètres climatiques évalués sur la période future 2036-2065 mettent en évidence une baisse de la pluviométrie (-19,7%) et une augmentation de la température (+1,6 °C). Les quantiles de débit de crue attendus au milieu du 21^{ème} siècle (2035-2065) sont respectivement de 168,85 m³/s pour le débit décennal et 299,58 m³/s pour le débit centennal. Ainsi, en réponse aux changements climatiques, la prospective des débits de crue conduit à une baisse préoccupante des débits fréquents de crue respectivement de l'ordre de 64,56% pour la crue décennale et 61,73% pour la crue centennale par rapport à leurs valeurs actuelles.

Plusieurs auteurs sont parvenus à la conclusion selon laquelle le modèle pluie-débit conceptuel global GR2M est performant et robuste [18, 19, 20, 22, 23], d'où son utilisation intensive dans les travaux de modélisation dans le monde.

Selon Goula *et al.* [3], les modèles de circulation générale GFD3 et UK89 ont été choisis parmi six modèles (GFD3, UK89, CCCM, GISS, GF01 et CLIM) avec le modèle hydrologique (WATBAL) pour étudier les impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Bandama en l'an 2075. Les simulations prédisent en l'an 2075 une hausse de la température plus importante en zone de savane au nord de 2,75 °C et 4,1 °C selon GFD3 et UK89. Les zones pré-forestières et de savane arborée connaîtront une augmentation moindre de la température d'environ 2,28 °C (GFD3) et 3,02 °C (UK89). La pluviométrie connaîtra une variation relative dans les deux zones. Selon le modèle GFD3, la zone pré-forestière et de savane observera une baisse pluviométrique de 1,33 % et celle des savanes (forêt claire), une baisse de 1,36 %. Le modèle UK89 prédit une hausse des précipitations de 8,4 % pour la zone pré-forestière et de savane. Pour la zone de savane, la hausse sera faible (0,56 %). Les résultats des travaux de Yao *et al.* [18] ont mis en évidence à partir de prévisions du modèle climatique RegCM3-A1B, une tendance à la baisse des précipitations annuelles de 0,42 % et de 10,8 % respectivement aux horizons 2035-2050 et 2085-2100 sur le bassin versant de la Lobo (Sassandra) situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire.

Les travaux de Lejeune et Saeed [24] portant sur l'étude de l'impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau au Burkina Faso ont mis en évidence d'une part à partir des modèles MIROC5 et HadGEM2-ES, une augmentation des précipitations sur une grande moitié Est ou Nord-Est du pays allant jusqu'à entre 10 et 30%, qui semble persister voire s'amplifier entre la première (2016-2046) et la troisième (2056-2086) période de projection. D'autre part, les modèles GCMs GFDLES2M et IPSL-CM5A-LR ont indiqué des changements presque nuls (IPSL-CM5A-LR) ou une légère augmentation des précipitations sur la pointe Sud du pays (GFDL-ESM2M)

pendant la première période de projection. En moyenne sur la troisième période de projection, la légère augmentation observée dans GFDL-ESM2M persiste mais s'accompagne d'une diminution des précipitations sur la moitié Nord-Est du pays atteignant entre -10 et -30%, tandis qu'une diminution des précipitations de plus de 5% est simulée par IPSL-CM5A-LR également dans le Sud-Est du Burkina Faso. La deuxième période de projection (2036-2066) montre un état intermédiaire aux deux autres dans le cas de GFDL-ESM2M, mais une augmentation temporaire des précipitations dans celui d'IPSL-CM5A-LR. Cette augmentation temporaire suggère une grande variabilité interannuelle à l'échelle décennale dans ce modèle, puisque le scénario RCP 6.0 est caractérisé par une augmentation continue de la température moyenne globale au cours du 21^{ème} siècle. D'une manière générale, la présence de cette variabilité interannuelle ainsi que la faible magnitude de la moyenne des modèles présentés est cohérente avec les changements de précipitation projetés pour la région ouest-africaine [24]. Pour ce qui concerne l'évapotranspiration, une augmentation de plus de 5% a été mise en évidence par les mêmes auteurs. A partir de deux modèles de circulation générale (MCG) (modèle HADCM3-A2 et modèle CSIRO-A2), Karambiri *et al.* [25], prévoient une tendance à l'augmentation des pluies annuelles de l'ordre de 10% en 2050 (modèle HADCM3-A2) et une baisse de l'ordre de -8% en 2050 (modèle CSIRO-A2) au Burkina Faso.

Selon Goula *et al.* [3], les simulations du modèle WATBAL prédisent une baisse des débits (21 % à 22 %) sur le bassin versant du Bandama à Marabadiassa. L'évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo (Sassandra) à partir du modèle GR2M pour la simulation des débits, met en évidence une diminution des débits de l'ordre de 83 % à la station de Nibéhibé (Sassandra) et de 87 % à Loboville (Sassandra) respectivement aux horizons 2035-2050 et 2085-2100 [18]. Selon El Khalki [26], les débits de l'Oued El Abid (Maroc) vont connaître une diminution importante surtout au cours de deux saisons, à savoir l'hiver et le printemps. En effet, les différents scénarios annoncent une diminution très importante des débits pendant les périodes les plus productives à savoir l'hiver et le printemps avec -16% et -23% sous ECEARTH et -18% et -32% sous MPI. Les résultats obtenus au cours de cette étude confirment les résultats des études antérieures présentées aux plans national et régional. Cette tendance à la baisse des débits futurs de l'Amizmiz et le N'fis (Maroc), est en conformité avec celle obtenue par El Goumi [27] à partir des données climatiques du modèle régional (RegCM4) qui révèlent que les écoulements devraient continuer à diminuer d'ici la fin du 21^{ème} siècle dans le bassin versant de l'Ouémé au Bénin. Cependant des tendances contrariées ont été obtenues par d'autres auteurs. Ainsi, selon les travaux de Karambiri *et al.* [25], les impacts des projections sur les écoulements de surface ont été évalués à l'aide du modèle hydrologique GR2M. Les résultats indiquent une augmentation de 73% (HADCM3-A2) et une baisse de 6% (CSIRO-A2) du débit annuel du Nakambé (Burkina Faso) en 2050 par rapport à la période de référence 1961-1990. Une hausse du débit décennal dans la majorité des bassins versants du Burkina Faso a été observé aux horizons 2050 et 2080, grâce aux sorties du modèle régional RCA4 forcé par le modèle climatique global CM5 [28].

Les résultats des projections des paramètres climatiques et hydrométriques obtenus dans le cadre de cette étude indiquent une forte baisse des précipitations combinée à une forte hausse des évapotranspirations aux horizons futurs, ce qui conduit à une baisse inéluctable des débits futurs en général et des débits de crue en particulier. Ces résultats s'inscrivent dans les tendances obtenues par les travaux antérieurs en Côte d'Ivoire [3, 18] et en Afrique [25, 26, 27, 28]. Cependant, quelques différences existent au niveau des différents résultats par rapport aux travaux antérieurs. Cela pourrait s'expliquer par les choix opérés au niveau des modèles climatiques, des modèles hydrologiques, des scénarii, des périodes de référence, etc.

Au regard de l'échelle de manifestation du phénomène de crue, il serait intéressant de revoir le choix des variables de description de l'évolution de ces crues. En effet, Ducharme *et al.* [29] ont utilisé les quantiles décennal et centennal des débits maximum journaliers ainsi que la durée caractéristique de crue, estimée sur une forme de crue moyenne, au cours de leurs travaux relatifs à l'évolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Selon les auteurs, ces variables ont été sélectionnées pour leur pertinence pour la gestion et la facilité de leur caractérisation automatique sur un grand nombre de chroniques.

4 CONCLUSION

Les principaux résultats obtenus montrent que le régime hydrologique observé à la station du N'Zo à Kahin est un régime simple. La période des hautes eaux va de juillet à octobre et la période des basses eaux s'étend de novembre à juin. Les Q_{MXA} interviennent majoritairement aux mois de septembre (70%) et août (20%) mais généralement entre les mois de juin et octobre (5 mois). Les valeurs de Q_{MXA} les plus fréquentes (90%) appartiennent à l'intervalle [100-400] m^3/s . La classe modale des Q_{MXA} (56,67%) et la classe médiane sont confondues et correspondent à la classe [100-250] m^3/s . Les résultats de l'analyse fréquentielle montrent que les différents critères utilisés (critères BIC et AIC) mettent en évidence la loi Gamma comme la meilleure loi qui ajuste au mieux les débits de crue. Le débit décennal de crue évalué à partir de la loi Gamma est de 476,48 m^3/s . Quant au débit centennal de crue, il est de 782,74 m^3/s . Le modèle pluie-débit conceptuel global utilisé (GR2M) calé sur la période de référence 1961-1990 et validé sur la période 1991-2017 a démontré une grande performance et une bonne robustesse. L'analyse prospective climatique (2036-2065) met en évidence une baisse de la pluviométrie (-19,7%) et une augmentation de la température (+1,6 °C). Les quantiles de débit de crue attendus au milieu du 21^{ème} siècle (2035-2065) sont respectivement de 168,85 m^3/s pour le débit décennal et 299,58 m^3/s pour le débit centennal. Ainsi, en réponse aux changements climatiques, la prospective des débits de crue conduit à une baisse préoccupante des débits fréquents de crue

respectivement de l'ordre de 64,56% pour la crue décennale et 61,73% pour la crue centennale par rapport à leurs valeurs actuelles. Cependant, que ce futur hydrologique se réalise ou non, cette étude milite en faveur de la mise en place d'une stratégie d'adaptation aux impacts des changements climatiques actuellement vécus en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient la société nationale de météorologie (SODEXAM) et la Direction de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) pour la mise à disposition des données nécessaires à la réalisation de ce travail. Ils remercient également les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article.

REFERENCES

- [1] Janicot S., Cathérine A., Martial B., « Changement climatique: quels défis pour le Sud », IRD Editions, 127p, 2015.
- [2] CODERIZ 2017. Programme d'appui au développement des filières agricoles (PADFA) Rapport de conception de projet - Version finale Rapport principal et appendices, 133p.
- [3] Goula B.T.A., Savané I., Konan B., Fadika V., Kouadio G.B. 2006. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, 1: 1-12.
- [4] Kouamé K.F., Kouassi A. M., N'Guessan-Bi T.M., Kouao J.M., Lasm T., Saley M. B. 2013. Analyse de tendances dans la relation pluie-débit dans un contexte de changements climatiques: cas du bassin versant du N'zo-Sassandra (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2 (2): 92-103.
- [5] Kouamelan A. 1996. Géochronologie et Géochimie des Formations Archéennes et Protérozoïques de la Dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la Transition Archéen-Protérozoïque. Université de Rennes, France, 319p.
- [6] Kouassi A., Nassa R., Yao K., Kouamé K., Biémi J. 2018a. Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 31 (2): 147-160. <https://doi.org/10.7202/1051697ar>.
- [7] Kouassi K.M., Yao K.B., Kouassi K.L., Biémi J., Soro N. 2020. Extreme flow variability analysis at the Bianouan hydrometric station on the Bia River watershed in Côte d'Ivoire. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. paper presented at the Hydrological processes and water security in a changing world - Hydrological Processes and Water Security in a Changing World*, Beijing, China, 6-9 November 2018. Copernicus GmbH, 319-325.
- [8] Kouassi A.M., Assoko A.V.S., Djè K.B., Kouakou K.E., Kouamé K.F., Biémi J. 2017. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: Caractérisation de la variabilité climatique récente en Côte d'Ivoire. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 1 (2): 1-11.
- [9] Soro G. 2011. Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Côte D'Ivoire, Université Nangui-Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 193p.
- [10] Habibi B., Meddia M., Boucefiane B. 2013. Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales: Cas du Bassin Chergui. *Revue Nature & Technologie*, 08: 41-48.
- [11] Agué A.I., Afouda A. 2015. Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9 (1): 121-133.
- [12] Kouassi A.M., Nassa R.A.K., N'Guessan B.T.M., Kouamé K.F., Biémi J. 2018b. 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.
- [13] Assoko A.V.S., Kouassi A.M., Nassa R.A.K. 2020. Modélisation statistique des débits d'étiages et détermination de seuils d'étiages dans le bassin versant de la Marahoué (Bandama, Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, (41): 121-147.
- [14] Kouassi A.M., N'Guessan B., Nassa R.A.K., Kouamé K.F., Biémi J. 2019. Modélisation statistique des débits d'étiage au sein du bassin versant du N'zi (Bandama, Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, (33): 119-136.
- [15] Hangnon H., DE Longueville F., Ozer P. 2015. Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou: quand le développement urbain est mal maîtrisé. *XXVIII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 1-4. juillet 2015, Liège, Actes: 497-502.
- [16] Kouassi A.M., N'Guessan B.T.M., Kouamé K.F., Kouamé K.A., Okaingni J.C., Biémi 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 Geoscience*, 344 (5): 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.02.003>.
- [17] Kouakou K.E., Kouassi A.M., Kouadio Z.A., Goula B.T.A., Savané I. 2016. Modification hydrologique du bassin versant de la Comoé dans un contexte de changement climatique. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 15 (4): 799-811.
- [18] Yao A.B., Kouassi K.L., Kouakou K.E., Goula B.T.A., Gayé A.T. 2019. Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 15 (4): 330-342.

- [19] Adja M.G., Djemin E.J., N'Dri O.F.A., Tohouri P., Kouamé K.J., Jourda J.P. 2019. Apport de l'Analyse Hydrologique et de la Modélisation de la Relation Pluie-Débit dans le Suivi Quantitatif des Ressources en Eau dans un Contexte de Variabilité Climatique: Cas du Sous-Bassin Versant du Kouto (Nord de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 154 (2): 192-212.
- [20] Sauquet E., Leblois E., Renard B., Haond M., Jouvé D. 2008. Examen de la vulnérabilité de la ressource en eau vis-à-vis des fluctuations climatiques -Application aux étiages du bassin du Rhône. *Techniques Sciences et Méthodes*, 3: 35-47.
- [21] Perrin C. 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 287 p.
- [22] Commeaux F., Drogue G., Francois D. 2010. Analyse prospective des débits mensuels d'étiage de la Meuse française à l'aide d'un modèle hydrologique: sensibilité aux méthodes de descente d'échelle spatiale et aux scénarios d'émission. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 2: 178-193.
doi: <https://doi.org/10.3406/bagf.2010.8151>
https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_2010_num_87_2_8151.
- [23] Kouakou K.E., Goula B.T.A., Kouassi A.M. 2012. Analyze of climate variability and change impacts on hydro-climate parameters: case study of Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3: 1-8.
- [24] Lejeune Q., Saeed F. 2019. Étude de l'impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau au Burkina Faso. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin, 29p.
- [25] Karambiri H., Yacouba H., Ibrahim B., Fotie J. 2021. Impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant du Nakambé (Burkina Faso). <https://hydrologie.org>.
- [26] EL Khalki E.M. 2015. Apport de la modélisation hydrologique dans la caractérisation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au niveau du bassin versant de l'Oued El Abid (Haut Atlas Central, Maroc). Rapport de Master en Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, Université Cadi Ayad Fyaculté des Sciences et Techniques Marrakech, Maroc, 56p.
- [27] Nnomo N.B. 2016. Contribution à l'Actualisation des Normes Hydrologiques en relation avec les Changements Climatiques et Environnementaux en Afrique de l'Ouest. Thèses, Paris, France, Pierre et Marie Curie - Paris VI, 254p.
- [28] EL Goumi S. 2017. Modélisation hydrologique et hydraulique et impact des changements climatiques sur une zone de montagne en climat semi-aride : cas des sous bassins versants d'Amizmiz et N'fis (Maroc). Mémoire de stage de fin d'études, Master spécialisé Sciences de l'eau, Université Cadi Ayyad, Maroc, 93p.
- [29] Ducharne A., Habets F., Oudin L., Gascoin S., Sauquet E. 2010. Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Colloque SHF « Risques inondation en Ile de France », 24-25 Mars 2010, Paris, France, 8 p. hal-0059376.