

Analyse prospective des débits d'étiage 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 analysis of low flows in a climate change context in West Africa: case of the N'zo-Sassandra watershed (West of Côte d'Ivoire)

KOUASSI Amani Michel^{1*}, GNANGOUIN Asaph Yahot Joel², KOUAME Kassi Alexis³, YAO Charles Armel⁴, N'GUESSAN N'Guessan Emilienne⁴

¹ Institut 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, Tél. (+225) 27 30 64 67 15 (Côte d'Ivoire) ;

² Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), École Doctorale Polytechnique (EDP); de l'Unité Mixte de Recherche et d'Innovation (UMRI), en génie civil, géosciences et sciences géographiques, B.P. 1093 Yamoussoukro, Tél. (+225) 27 30 64 04 06 (Côte d'Ivoire) ;

³ Université Félix Houphouët-Boigny, Cocody-Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG), 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

⁴ Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), École Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG); en Exploitation et Traitement des Eaux (ETE), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Tél. (+225) 27 30 64 6715.

*Corresponding author: michel.a_kouassi@yahoo.fr / michel.kouassi@inphb.ci

Abstract - The objective of this study is to analyze the prospective of the low water flows of the N'zo-Sassandra River located in the West of Ivory Coast. The hydroclimatic data used (rainfall, ETP, flow) extend on the one hand over the historical period (1961-2017) and on the other hand over the future period 2071-2100 (CORDEX data). The methodological approach adopted is based on the analysis of past low flows, the climate prospective analysis and the hydrological prospective analysis. The hydrological impact variable used is the annual minimum monthly mean flow (MAMF). Thus, a pessimistic climate forecast scenario was used (RCP 8.5.). This climate scenario was then fed into a rainfall-runoff hydrological model (GR2M model) calibrated to the 1961-1990 reference period and validated over the 1991-2017 period. In response to the climate forcing, future monthly low-flow rates (MAMF) were simulated. An increase in the number of flows in the class]0-4] m³/s was observed, reflecting low flows in the 2071–2100-time frame. The best statistical law retained following the frequency analysis of the low-water flows is the lognormal law. By 2071-2100, a decrease in rainfall (-19.2%) and an increase in temperature (+3.9°C) are predicted in the N'zo-Sassandra watershed. Frequent low-water flows estimated from the lognormal law have shown a bias of -50.38%, which translates into a decrease of half of the frequent low-water flows by the end of the 21st century compared to the current period. This decrease in flows will have consequences on the availability of water resources for irrigation, fishing, breeding, drinking water supply, navigation, etc. This is why we propose as alternative resources for agricultural needs, groundwater which is less impacted by global changes.

Key words: Climate change, Hydrological forecasting, Low flows, N'zo-Sassandra, Ivory Coast.

Résumé - Cette étude a pour objectif d'analyser la prospective des débits d'étiage du fleuve N'zo-Sassandra situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Les données hydroclimatiques utilisées (pluie, ETP, débit) s'étendent d'une part sur la période historique (1961-2017) et d'autre part sur la période future 2071-2100 (données CORDEX). La démarche méthodologique adoptée est basée sur l'analyse des étiages passés, l'analyse prospective climatique et l'analyse prospective hydrologique. La variable hydrologique d'impact utilisée est

le débit moyen minimal mensuel annuel (Q_{MNA}). Ainsi, un scénario pessimiste de prévision climatique a été utilisé (RCP 8.5.). 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 d'étiage (Q_{MNA}) futurs ont été simulés. Une augmentation des effectifs des débits de la classe]0-4] m^3/s a été constatée traduisant une faiblesse des débits à l'horizon 2071-2100. La meilleure loi statistique retenue à la suite de l'analyse fréquentielle des débits d'étiage est la loi lognormale. A l'horizon 2071-2100, il est prévu une baisse de la pluviométrie (-19,2%) et une augmentation de la température (+3,9 °C) dans le bassin versant du N'zo-Sassandra. Les débits fréquents d'étiage estimés à partir de la loi lognormale ont mis en évidence un biais de -50,38% traduisant une baisse de moitié des débits fréquents d'étiages d'ici la fin du 21^{ème} siècle par rapport à la période actuelle. Cette baisse des débits engendrera des conséquences sur la disponibilité des ressources en eau pour l'irrigation, la pêche, l'élevage, l'alimentation en eau potable, la navigation, etc. C'est pourquoi nous proposons comme ressources alternatives aux besoins agricoles, les eaux souterraines qui sont moins impactées par les changements globaux.

Mots clés : Changements climatiques, Prospective hydrologique, Débits d'étiages (Q_{MNA}), N'zo-Sassandra, Côte d'Ivoire.

1. Introduction

Depuis plusieurs décennies, les travaux scientifiques s'intéressant à l'évolution du climat terrestre, dans un contexte d'augmentation soutenue des rejets de gaz à effet de serre d'origine anthropique, se sont multipliés (Villeneuve, 2008). Dès l'origine de l'hypothèse d'un réchauffement global induit par l'activité humaine, Arrhenius en 1896 postulait que le doublement de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère provoquerait un réchauffement de l'ordre de 4 °C de la température moyenne terrestre (Villeneuve, 2008). Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC, 2007], avec des méthodes beaucoup plus sophistiquées, arrive à des conclusions du même ordre de grandeur. Ce réchauffement, on le comprend mieux aujourd'hui, va entraîner de profondes modifications dans le cycle de l'eau, affectant la répartition et l'abondance des précipitations et favorisant des périodes plus sèches en raison de l'évaporation accrue. Pour l'Afrique de l'Ouest, il est constaté que le climat à long terme 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 [Goula et al. 2006], il semble tout aussi important de vérifier si ces changements climatiques constatés auront ou non des impacts sur les débits extrêmes futurs. Ainsi, de plus en plus, les situations de pénurie d'eau (étiages accentués en rivière, baisses soutenues de nappes phréatiques) font l'objet d'une attention croissante notamment en raison de l'observation de l'augmentation de déséquilibres en diverses régions entre ressources et usages de toutes natures. Ces déséquilibres, plus apparents encore à travers les sécheresses récentes, en dépit du retour d'années humides, risquent d'être aggravés par les perspectives de changements globaux.

Les situations d'étiages sévères semblent devenir de plus en plus critiques en Côte d'Ivoire et plusieurs travaux (Goula et al., 2006 ; Kouakou et al., 2012 ; Yao et al., 2019) portent à croire que les changements climatiques pourraient amplifier cette problématique. Au cours de ces dernières années, des étiages sévères sur les fleuves et rivières ont menacé l'approvisionnement en eau douce des villes de l'intérieur du pays en raison de l'exondation des prises d'eau. Ces étiages sévères peuvent aussi causer des problèmes de dilution de certains effluents et occasionner, en combinaison avec des températures de l'eau plus élevées, des effets écotoxicologiques difficiles à prédire avec précision. C'est le cas en 2018 où de nombreuses villes telles que Tiébissou, Bouaké, Niakaramandougou, Odienné, etc., ont connu des épisodes prolongés de sécheresse, mobilisant ainsi des efforts du gouvernement ivoirien afin de trouver des solutions d'urgence.

Quels seront donc les impacts de ces variations climatiques futures sur les débits d'étiages dans le bassin versant du N'zo-Sassandra ?

La constitution d'un système de prévision des étiages pourrait être donc un moyen d'adaptation aux impacts des changements climatiques. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'analyser la prospective des débits d'étiage du fleuve N'zo-Sassandra à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Deux actions complémentaires doivent être engagées pour anticiper les risques d'étiage en diagnostiquant l'état actuel et en dressant une vision du futur.

2. Matériel 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 7°15' et 8°05'Ouest et les latitudes 6°50' et 7°50' Nord (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.

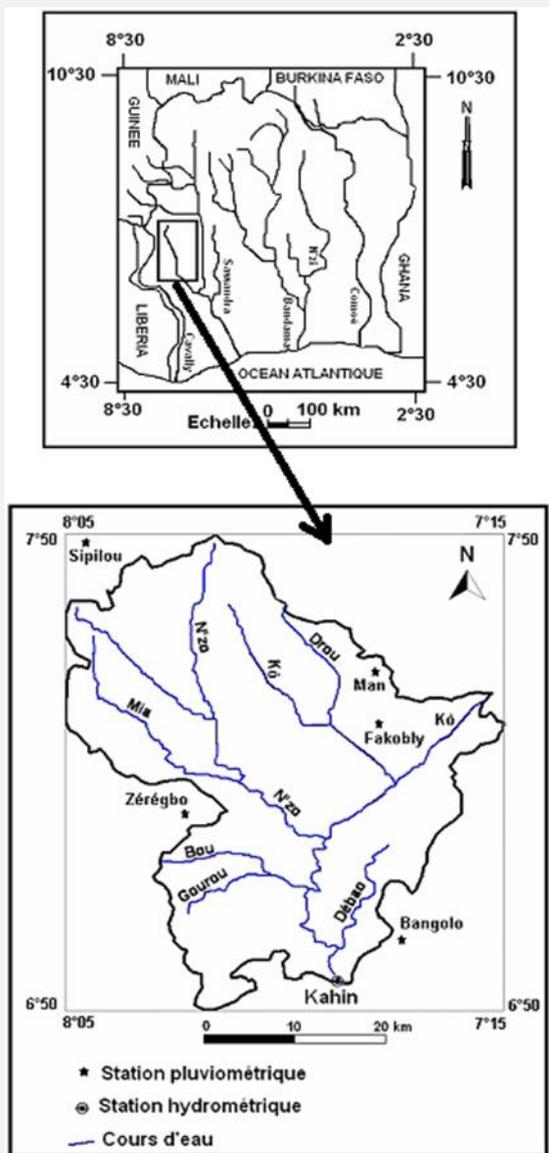


Figure 1 - Présentation du bassin versant du N'zo-Sassandra

Le régime climatique 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).

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 pluvieuse 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. 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.

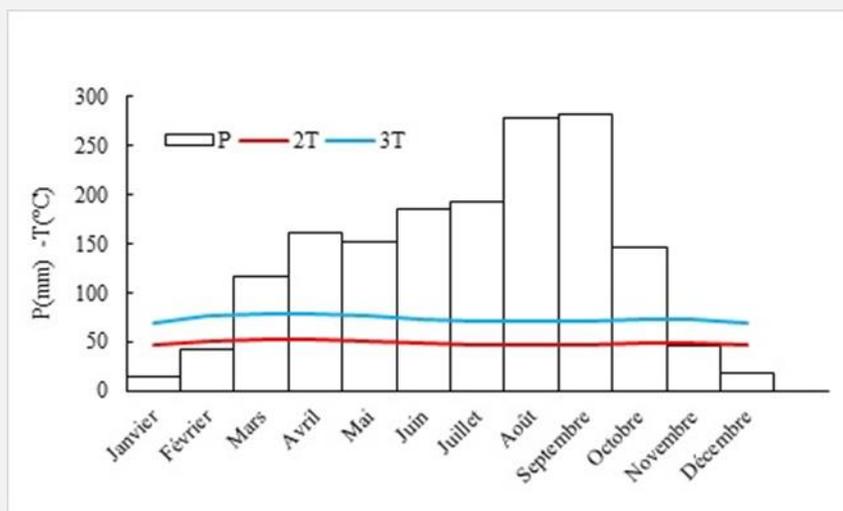


Figure 2 - Régime climatique du bassin versant du N'zo à Kahin (1961-1990)

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 (Kouamé et al., 2013). Une partie de cette végétation est conservée sous forme de forêts classées (Ira, Sangouiné, Gueouelé, Mont Tonkoui, Goin-Debé, Scio) dans lesquelles l'exploitation forestière est autorisée mais, les défrichements agricoles sont interdits.

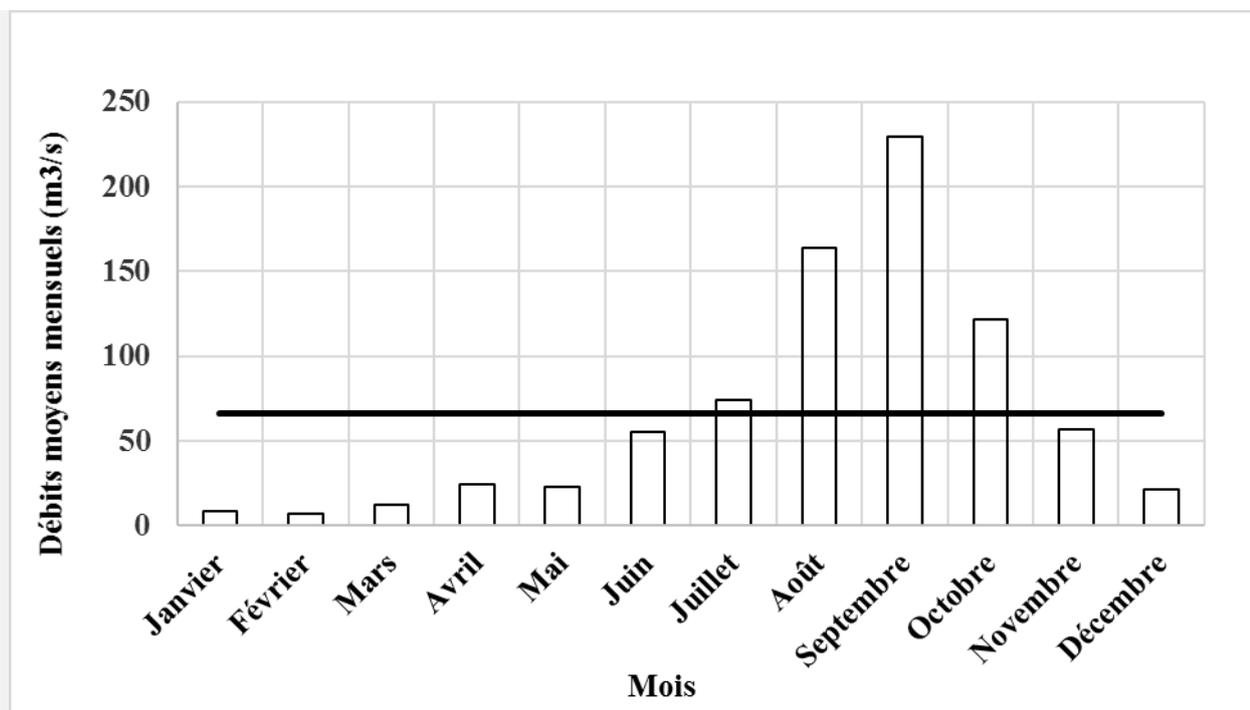


Figure 3 - Régime hydrologique du N'zo à Kahin (1961-1990)

Les sols du bassin versant du N'zo-Sassandra sont constitués essentiellement de sols ferralitiques 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 (Kouamélan, 1996) à savoir un ensemble granulitique 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 1961-1990. Elles proviennent de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Les stations de Man et de Guiglo sont les stations sélectionnées dans le réseau météorologique de la Côte d'Ivoire pour cette étude.

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°C.

La modélisation pluie-débit nécessitant les valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelles, cette variable a été calculée sur la période 1961-1990 à partir des valeurs de températures moyennes mensuelles, à l'aide de la méthode de Thornthwaite. Celles-ci se situent 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). 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 proviennent de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH), Sous-Direction de l'Hydrologie et s'étendent sur la période 1961-1990. 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 (Kouassi et al., 2018 ; Kouassi et al., 2021). La variable hydrologique d'impact utilisée est le débit moyen minimal mensuel annuel (QMNA).

2.3 Méthodes

La démarche méthodologique s'est déroulée en trois (3) étapes (Sauquet et al., 2008 ; Commeaux et al., 2010 ; François et al., 2011 ; Kouassi et al., 2018 ; Assoko et al., 2020 ; Kouassi et al., 2021) :

- analyse des étiages passés ;
- analyse prospective climatique ;
- analyse prospective hydrologique.

2.3.1 Analyse rétrospective des débits d'étiages

D'abord, une analyse des fréquences d'apparition mensuelle des débits mensuels minimaux annuels (QMNA) a été faite. Ensuite une analyse des fréquences de distributions des débits d'étiages a été effectuée. Enfin, une analyse fréquentielle des QMNA a été réalisée et a consisté à déterminer le quantile de QMNA de période de retour égale à 5 ans (QMNA-5) (Commeaux et al., 2010 ; François et al., 2011 ; Kouassi et al., 2018, 2019 ; Assoko et al., 2020). Les valeurs de QMNA fréquentiels permettent d'évaluer une situation d'étiage prolongé d'un cours d'eau puisqu'ils sont calculés sur 30 jours consécutifs (Commeaux et al., 2010). Ils ont été déterminés grâce à un ajustement statistique par la méthode des moments. On estime ainsi que la moyenne et l'écart-type des logarithmes des valeurs représentent respectivement le paramètre de position et le paramètre d'échelle de la loi choisie (Commeaux et al., 2010). Ainsi, des lois ont été présélectionnées sur la base de l'outil SAD (service d'aide à la décision) du Logiciel HYFRAN. A l'issue de cette présélection, trois (03) lois ont été retenues :

- Gumbel ;
- Log-Normale ;
- Gamma.

Plusieurs tests ont été utilisés pour l'analyse de la qualité de l'ajustement (critères BIC et AIC) (Kouassi et al., 2019 ; Assoko et al., 2020). La détermination du quantile a été effectuée à partir de l'approche analytique dont le fondement mathématique se présente suivant (équation 1) :

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

avec :

- x₀ : la moyenne arithmétique ;

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

Les QMNA fréquentiels ont servi à la détermination des seuils d'alerte précoce des étiages (Sauquet et al., 2008 ; Kouassi et al., 2018, 2019 ; Assoko et al., 2020). En effet, le QMNA renseigne sur la sévérité des étiages et constitue une valeur réglementaire prescrite par la loi française sur l'eau du 3 janvier 1992 pour la gestion des eaux (Sauquet et al., 2008 ; Commeaux et al., 2010 ; François et al., 2011). Ainsi, trois (3) seuils ont été définis pour la gestion de crise et ont été déjà appliqués aux cours d'eau ivoiriens (Sauquet et al., 2008 ; Kouassi et al., 2018 ; Assoko et al., 2020). Il s'agit du seuil d'alerte qui est matérialisé par le QMNA-5, du seuil de vigilance (équation 2) et du seuil de crise (équation 3) :

$$\text{seuil de vigilance} = 1,1 \times Q_{(MNA-5)} \quad (2)$$

$$\text{seuil de crise} = 0,9 \times Q_{(MNA-5)} \quad (3)$$

2.3.2 - Analyse prospective climatique

Les tendances climatiques saisonnières (données de pluies et de températures mensuelles) afférentes à la période 2071-2100 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. Pour se faire, plusieurs scénarii dénommés RCP (Représentative Concentration Pathway) sont projetés. Ce sont des scénarii de trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2300. Ces scénarii ont été établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son cinquième rapport, AR5 (IPCC Fifth Assessment Report 5). Un scénario RCP permet de modéliser le climat futur. Dans l'AR5, sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100), chaque scénario RCP donne une variante jugée probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail. Les quatre scénarii sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100 : le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de +2,6 W/m², le scénario RCP4.5 à +4,5 W/m², le scénario RCP6 à environs +6 W/m², et 8,5 W/m² pour le scénario 8,5. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. Le scénario retenu est le RCP 8.5 qui est le scénario le plus pessimiste. Selon ce scénario, on ne change rien et les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter au rythme actuel. Les biais des paramètres climatiques (précipitations et températures) ont été évalués entre la période future (2071-2100) et la période de référence (1961-1990).

2.3.3 - Analyse prospective hydrologique

Selon Sauquet et al. (2008), 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) (Sauquet et al., 2008).

Le choix de la simulation des débits d'étiage futurs s'est porté sur le modèle conceptuel global GR2M pour sa performance, sa robustesse et sa simplicité. Il a été appliqué par plusieurs auteurs sur les bassins versants ivoiriens (Kouassi et al., 2012 ; Kouamé et al., 2013 ; Kouakou et al., 2016 ; Yao et al., 2019 ; Adja et al., 2019). Le modèle GR2M a préalablement été calé sur la même période d'étude (1961-1990) et validé sur la période 1991-2017 (Kouassi et al., 2021) à partir de la même base de données utilisée au cours de cette étude. Les principaux résultats ont mis en évidence une performance estimée en termes de Nash-Sutcliffe égale à 79,7% en calage et 82,7% en validation. Une fois le modèle calé sur la période 1961-1990, vient l'étape de la simulation des débits futurs. Les valeurs des paramètres du modèle (X1 et X2) 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, une des hypothèses 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 de végétation, d'évolution des prélèvements d'eau) (Sauquet et al., 2008). A partir des débits mensuels simulés, sont extraits les QMNA simulés sur la période future (2071-2100).

Une analyse statistique de l'indicateur des débits d'étiage (QMNA) a été réalisée sur la période future (2071-2100). Elle a consisté à :

- déterminer des fréquences d'occurrence mensuelle des QMNA ;
- déterminer le quantile QMNA-5 (conservation de la meilleure loi) ;
- calculer des biais des débits fréquents (QMNA-5).

3 - Résultats et discussion

3.1 – Résultats d'analyse des débits d'étiages passés

Les débits moyens mensuels minimaux annuels (QMNA) varient entre 0,1 et 18,84 m³/s avec une moyenne de 4,19 m³/s et un écart-type de 4,44 m³/s (Tableau 1). Le coefficient d'asymétrie est positif et est de 1,58, ceci permet de conclure que les données de débits de basses étudiées sont étalées à droite de la moyenne des distributions. Le coefficient d'aplatissement est de 2,65, ce qui traduit un pic de distribution des QMNA plus aplati que celui d'une loi normale (les valeurs sont éloignées de la moyenne). Le coefficient de variation est largement supérieur à 25 %, ce qui explique une grande hétérogénéité de la série des QMNA.

Tableau 1 - Caractéristiques statistiques des QMNA passés (1961-1990)

Caractéristique	Valeur
Moyenne	4,19
Ecart-type	4,44
Coefficient de variation (%)	105,82
Maximum	18,84
Minimum	0,10
Etendue	18,84
Coefficient d'asymétrie	1,58
Coefficient d'aplatissement	2,65

Les Q_{MNA} étudiés apparaissent fréquemment au premier trimestre de l'année (janvier, février et mars) avec des fréquences respectives de 45,16% en février, 16,13% en janvier et 13% en mars (Figure 4). Le mois de décembre vient en quatrième position avec un taux de près de 10%. Les mois d'avril et mai enregistrent le même pourcentage (6,45%), et enfin, le mois de juin enregistre le taux le plus faible (3,2%).

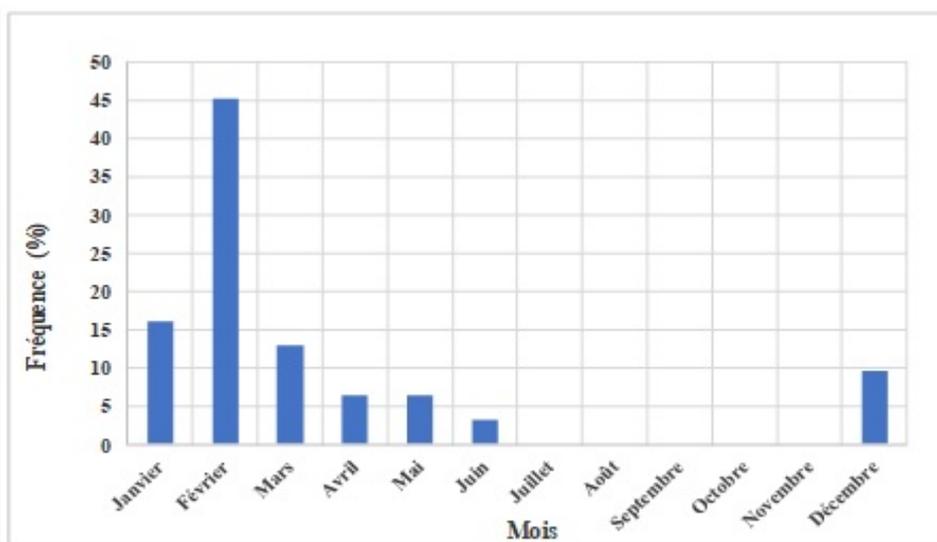


Figure 4 - Fréquences d'occurrence mensuelle des QMNA sur le N'zo à Kahin (1961-1990)

Les valeurs de Q_{MNA} les plus fréquentes (53,3%) sont dans l'intervalle [0-4 [m³/s (Figure 5). Cette classe est suivie par celle de [4-8 [m³/s avec un taux de 30%. La troisième place est occupée par la classe [8-12 [m³/s avec un taux de 10%. Les deux dernières classes ([12-16 [et [16-20 [) enregistrent des taux de 3,3%. La classe modale et la classe médiane des Q_{MNA} sont confondues ([0-4 [m³/s).

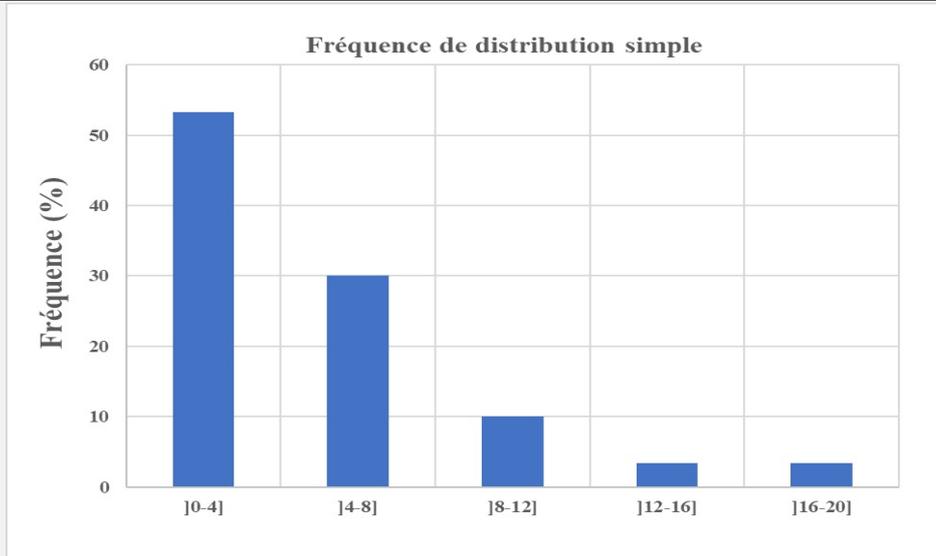


Figure 5 - Fréquences de distribution des Q_{MNA} à la station du N'zo à Kahin (1961-1990)

Les résultats obtenus suite à l'application des critères d'Akaike et Bayésien sont consignés dans le tableau 2. Selon les critères d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC), la meilleure loi est la loi lognormale qui est suivie par la loi Gumbel, ensuite vient la loi Gamma.

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

Lois de probabilité	Nombre de paramètres	BIC	AIC
Lognormale	2	126,58	123,78
Gumbel	2	159,68	156,88
Gamma	2	168,61	164,41

Ainsi, la loi lognormale qui ajuste au mieux la distribution des Q_{MNA} a été donc retenue pour la détermination du quantile de débits d'étiages. Le quantile des débits d'étiage (Q_{MNA-5}) évalué est de $0,133 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un intervalle de confiance compris entre $4,1 \cdot 10^{-1}$ et $0,092 \text{ m}^3/\text{s}$. Les seuils de vigilance et de crise sont respectivement de $0,146 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,120 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2 - Résultats de la prospective climatique

Le biais des précipitations annuelles évalué est de $-15,9\%$ alors que celui des températures est de $+3,9 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tableau 3), ce qui traduit une baisse de la pluviométrie et une augmentation de la température à la fin du siècle en cours (2071-2100) (Figure 6).

Tableau 3 - Biais (%) des paramètres climatiques par rapport à la période 1961-1990

Paramètres	Biais
Précipitations (%)	-19,2
Température ($^\circ\text{C}$)	+3,9

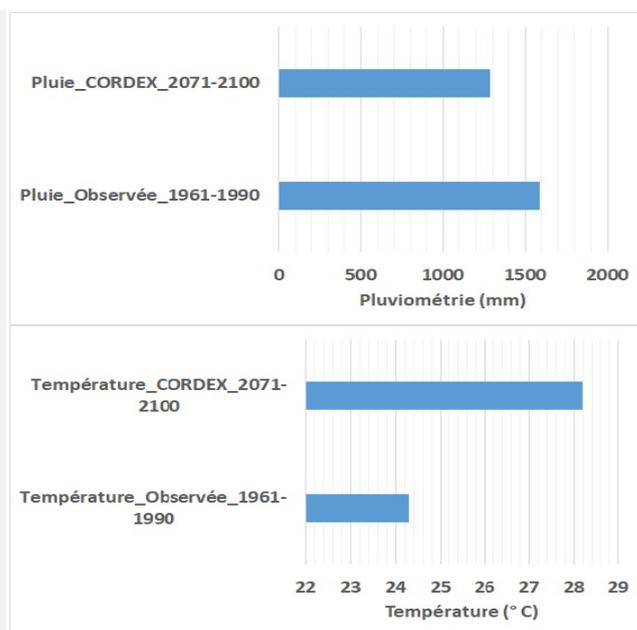


Figure 6 - Variations futures (2036-2065) des paramètres climatiques sur le bassin versant du N'zo (Kahin)

3.3 - Résultats d'analyse des débits d'étiages futurs

Les débits mensuels d'étiage (Q_{MNA}) prévus à la fin du 21^{ème} siècle (2071-2100) sont observés aux mois de décembre à mars, soit quatre mois, avec les fréquences les plus élevées enregistrées aux mois de février (50%) et mars (40%). Ils constituent ainsi les mois d'étiages les plus fréquents (Figure 7) du fleuve N'zo (Sassandra). Quant au mois de janvier, il enregistre la fréquence d'apparition de Q_{MNA} la plus faible. Les débits d'étiage attendus à la fin du siècle présent seront concentrés dans l'intervalle $]0 ; 4]$ m³/s.

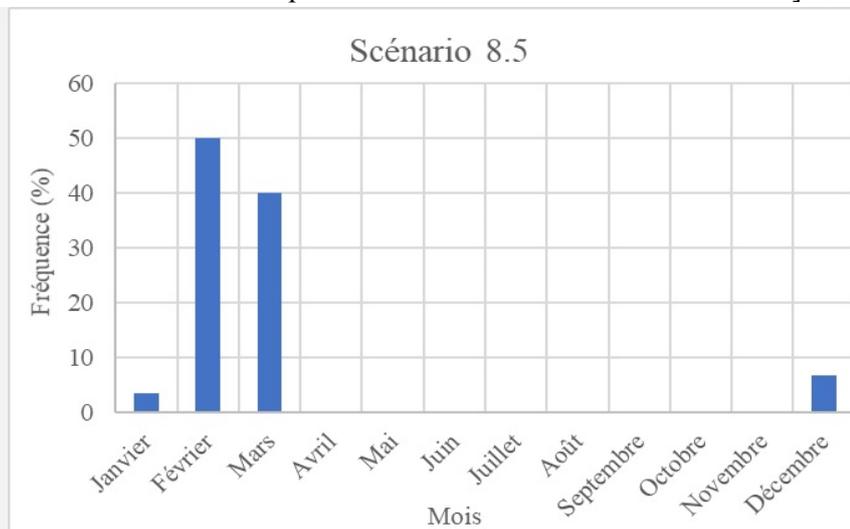


Figure 7 - Fréquences d'occurrence des Q_{MNA} à la station du N'zo à Kahin à la fin du 21^{ème} siècle (2071-2100)

Le débit quinquennal d'étiage (Q_{MNA-5}) attendu à la fin du 21^{ème} siècle est de 0,066 m³/s induisant des seuils de vigilance et de crise respectivement de 0,073 m³/s et 0,059 m³/s. Ainsi, en réponse aux changements climatiques, la prospective hydrologique conduit à une baisse préoccupante des débits fréquentiels d'étiages de l'ordre de -50,38% par rapport à leur valeur actuelle. Une baisse de moitié des débits d'étiages est donc attendue à la fin du 21^{ème} siècle par rapport à leur niveau actuel.

3.4 - Discussion

Les classes de débits d'étiage sont passées de cinq (5) au temps actuel et couvrant l'intervalle $]0-20]$ m³/s à une seule classe qui couvre l'intervalle $]0-4]$ m³/s. Il y a donc disparition des débits d'étiage relativement moyens et forts appartenant à l'intervalle $]4-20]$ m³/s. Les débits attendus à la fin du 21^{ème} siècle seront donc de plus en plus faibles. La meilleure loi retenue à la suite de l'analyse fréquentielle des débits d'étiage est la loi lognormale. Ainsi, les débits fréquentiels ont été estimés à partir de cette loi. Plusieurs auteurs sont parvenus à la conclusion selon laquelle la loi lognormale ajuste au mieux les débits d'étiages (Sauquet et al., 2008 ; Commeaux et al., 2010 ; François et al., 2011 ; Kouassi et al., 2019).

Les résultats de la prospective climatique (2071-2100) mettent en évidence une baisse de la pluviométrie (-19,2%) et une augmentation de la température (+3,9 °C). Les résultats sont en accord avec la plupart des études d'impacts dans le contexte ivoirien (Goula et al., 2006 ; Kouakou et al., 2016 ; Yao et al., 2019) et international (Sauquet et al., 2008 ; Commeaux et al., 2010 ; Fabre, 2012 ; Brulebois, 2016). Ainsi dans le contexte ivoirien, Kouakou et al. (2014) ont mis en évidence une baisse des précipitations (-9,12%) dans le golfe de Guinée à l'horizon 2091-2100. Yao et al. (2019) sont arrivés à la même conclusion et démontrant ainsi une baisse des précipitations (-10,8%) dans le bassin versant de la Lobo à l'horizon 2085-2100. Pour ce qui concerne la température, les résultats des travaux passés sont concordants sur la hausse de la température (3-4,5 °C) dans le golfe de Guinée à l'horizon 2091-2100 (Kouakou et al., 2016) et une croissance de ce paramètre (2,28-4,1 °C) dans le bassin versant du Bandama à l'horizon 2075 selon Goula et al. (2006). Les résultats des travaux du GIEC (2007) constituent la référence dans le contexte international, à savoir une hausse de la température de l'ordre de 4 °C à l'horizon 2100.

En réponse aux changements climatiques, la prospective hydrologique a conduit une baisse de moitié (-50,38%) des débits fréquentiels d'étiages par rapport à leurs valeurs actuelles d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Si les modifications climatiques projetées se confirmaient, il faudrait alors s'attendre à un Q_{MNA} quinquennal sec de l'ordre de 0,066 m³/s, au lieu de 0,133 m³/s actuellement enregistré sur le fleuve N'zo (Sassandra). En effet, l'effet combiné de la baisse des précipitations et de l'augmentation de l'ETP aboutira à un déficit de la recharge des aquifères en saison pluvieuse qui ne pourront soutenir les étiages aussi efficacement qu'à l'heure

actuelle (Commeaux et al., 2010). Ces tendances sont en accord avec la plupart des études d'impacts dans le contexte ivoirien (Goula et al., 2006 ; Kouakou et al., 2012 ; Adja et al., 2019 ; Yao et al., 2019) et international (Sauquet et al., 2008 ; Commeaux et al., 2010 ; Ducharme et al., 2011 ; Habets et al., 2011 ; Fabre, 2012 ; Brulebois, 2016). Ainsi, selon Commeaux et al. (2010), le Q_{MNA} quinquennal sec passerait de 25 m³/s à 12 m³/s au niveau du bassin français de la Meuse à l'horizon 2071-2100, donc diminuerait de moitié. Quant à Fabre (2012), il conclut que les débits d'étiage du Rhône diminueraient de -10 à -50 % à l'horizon 2100. Pour Brulebois (2016), l'analyse des indicateurs d'étiage projetés sur le 21^{ème} siècle montre une aggravation de la sévérité des étiages (durée plus longue, volume de déficit plus grand, minimum annuel plus bas) en Bourgogne (France). Au niveau saisonnier, il est constaté un décalage vers un début d'étiage plus précoce, tandis que les dates de centre et fin d'étiage montrent moins d'évolution. A l'image de François et al. (2011), ce travail n'a pas comme ambition de représenter une prévision des débits d'étiage du N'zo (Sassandra) pour le 21^{ème} siècle. Il s'agit davantage d'un "exercice de style" où la contrainte est de produire des débits d'étiage à partir d'un scénario climatique hypothétique pessimiste (RCP 8.5). Il n'y a aucune possibilité de validation des résultats de la simulation en dehors de la qualité de la simulation climatique de référence et des débits simulés sur une période connue (François et al., 2011). La crédibilité des scénarios climatiques demeure prépondérante, pour que les débits d'étiage "possibles" proposés ici soient considérés comme des valeurs "probables" (François et al., 2011).

4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'analyser la prospective hydrologique du fleuve N'zo-Sassandra au regard des baisses pluviométriques et de la hausse des évapotranspirations prévues pour la fin du siècle. Les classes de débits d'étiage sont passées de cinq (5) au temps actuel et couvrant l'intervalle]0-20] m³/s à une seule classe qui couvre l'intervalle]0-4] m³/s induisant l'augmentation de son effectif durant la période future. Cependant, les débits attendus à la fin du 21^{ème} siècle seront donc de plus en plus faibles. La meilleure loi retenue à la suite de l'analyse fréquentielle des débits d'étiage est la loi lognormale. Pour la fin du 21^{ème} siècle, il est prévu une baisse des précipitations (-19,2%) à laquelle s'ajoute une augmentation de la température (+3,9 °C). En réponse aux changements climatiques, la prospective hydrologique a conduit une baisse de moitié (-50,38%) des débits fréquents d'étiages par rapport à leurs valeurs actuelles d'ici la fin du 21^{ème} siècle. En effet, les étiages du fleuve N'zo risquent d'être sévèrement impactés par les changements climatiques projetés pour cette fin de siècle. Cette baisse des débits engendrera des conséquences sur la disponibilité des ressources en eau pour l'irrigation, la pêche, l'élevage, l'alimentation en eau potable, la navigation, etc. C'est pourquoi nous proposons comme ressources alternatives aux besoins agricoles, les eaux souterraines qui sont moins impactées par les changements globaux.

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.

5. Références

- 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*, vol.154, n°2, 192–212.
- 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*, n°41, 121–147.
- Brulebois E. (2016). Impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne : aspects quantitatifs et qualitatifs. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne Franche-Comté, Discipline : Sciences de la Terre - Hydroclimatologie, 296p.
- Commeaux F., Drogue G., François 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*, n°2, 178-193.

- Ducharne A., Sauquet E., Habets F., Deque M., Gascoïn S. (2011).** Évolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*, n°1, 51-57.
- Fabre J. (2012).** Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse : Bilan des connaissances. Rapport de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 65p.
- François D., Drogue G., Commeaux F. (2011).** Évolution possible des débits d'étiage de la Meuse en France au cours du XXIème siècle. *Revue Géographique de l'Est*, vol.51, n°3-4, 1-14.
- GIEC (2007).** Bilan 2007 des changements climatiques », Contribution des Groupes de travail I, II et III au 4e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- 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*, n°1, 1-12.
- Habets F., Boe J., Deque M., Ducharne A., Gascoïn S., Hachour A., Martin E., Page C., Sauquet E., Terray L. (2011).** Programme PIREN-SEINE Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. Résultats du projet GICC-RExHySS. Agence de l'eau Seine-Normandie, 45p.
- 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*, n°3, 1-8.
- Kouakou K.E., Kouadio Z.A., Kouassi W.F., Goula-Bi T.A., Savané I. (2014).** Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Afrique Science*, vol.10, n°1, 145-160.
- Kouakou K.E., Kouassi A.M., Kouadio Z.A., Goula-Bi 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*, vol.15, n°4, 799-811.
- 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*, vol.2, n°2, 92-103.
- Kouamélan 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.
- Kouassi A.M., Gngangouin A.Y.J., Yao C.A., N'Guessan N.E. (2021).** 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). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, vol.57, n°2, 117-131.
- Kouassi A.M., Nassa R.A.K., N'Guessan B.T.M., Kouamé K.F., Biemi J. (2018).** Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : Cas du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, vol.30, n°3, 215-223.
- Kouassi A.M., N'Guessan B.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 Geoscience*, vol.344, n°5, 288-296.
- Kouassi A.M., N'Guessan B.T.M., Nassa R.A.K., Kouamé K.F., Biemi 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*, n°33, 119-136.
- Sauquet E., Leblois E., Renard B., Haond M., Jouve 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*, n°3, 35-47.
- Villeneuve C. (2008).** La grande inconnue. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol.21, n°2, 129-133, <https://doi.org/10.7202/018461ar>
- 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*, vol.15, n°4, 330-342.