

## **PRÉVISION SAISONNIÈRE DES DÉBITS DE BASSES EAUX AU SEIN DES BASSINS FLUVIAUX DE L'AFRIQUE DE L'OUEST : CAS DU BASSIN VERSANT DU N'ZI-BANDAMA, CÔTE D'IVOIRE**

**Amani Michel KOUASSI<sup>1\*</sup>, Yao Blaise KOFFI<sup>2</sup>, Relwindé Abdoul-Karim NASSA<sup>3</sup>, Koffi Fernand KOUAME<sup>2,4,5</sup> et Jean BIEMI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>3</sup> *Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), École Doctorale Polytechnique (EDP), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

<sup>4</sup> *Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>5</sup> *Université Virtuelle de Côte d'Ivoire (UVCI), 28 BP 536 Abidjan 28, Côte d'Ivoire*

---

\* Correspondance, e-mail : [michel.a\\_kouassi@yahoo.fr](mailto:michel.a_kouassi@yahoo.fr)

### **RÉSUMÉ**

L'objectif de cette étude est de développer des modèles de prévision saisonnière des débits de basses eaux (débits d'étiage) du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). La méthodologie de modélisation appliquée est basée sur les modèles de régressions linéaires multiples et a consisté d'abord à déterminer les prédicteurs pertinents à travers une matrice de corrélation établie entre les débits moyens mensuels de la période des basses eaux et les prédicteurs potentiels (débits moyens mensuels de la période des hautes eaux et température de la période des basses eaux). Ensuite, la détermination des coefficients de régressions linéaires a été réalisée à travers un calage automatique à partir du logiciel Excel. Enfin, une évaluation des différents modèles développés a été effectuée à partir de scores déterministes (coefficient de corrélation et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) et de représentations graphiques. Les principaux résultats obtenus ont mis en

évidence la période janvier-mars comme la période de basses eaux et la période juillet-novembre comme la période des hautes eaux. Les meilleurs prédicteurs identifiés sont constitués de débits moyens mensuels (septembre, octobre et novembre) de la période des hautes eaux précédant la période des basses eaux et la température moyenne mensuelle de la période des basses eaux prévues. Les erreurs-types relatives aux prédicteurs sont en général faibles et comprises entre  $10^{-3}$  et  $4.10^{-3}$ . De forts coefficients de corrélation (R) ont été obtenus en calage (0,817-0,834) comme en validation (0,659-0,782) au niveau des trois modèles développés. De faibles valeurs de RMSE ont été également obtenues en calage (0,542-0,566) comme en validation (0,230-0,363). Les valeurs du critère de robustesse ont montré que seuls les modèles 1 (-3,500) et 2 (-6,457) ont été robustes mais le modèle le plus robuste reste le modèle 1. Ainsi, le modèle le plus performant, le plus robuste et le plus parcimonieux est le modèle 1.

**Mots-clés :** *prévisions saisonnières, basses eaux, modèles statistiques, N'zi-Bandama, Côte d'Ivoire.*

## **ABSTRACT**

### **Seasonal forecast of low flow water in the river basins of west Africa : case of the basin of N'zi-Bandama, Ivory Coast**

The objective of this study is to develop models of seasonal low flows water forecasts of N'Zi-Bandama (Ivory Coast) for better management of water resources in the watershed of N'zi-Bandama. The applied modeling methodology is based on the multiple linear regression models and consisted first of all in determining the relevant predictors through a correlation matrix established between the mean monthly flows of the low flows water period and the potential predictors (mean monthly flows high water period and low flow water period temperature). Then, the determination of the linear regression coefficients was performed through an automatic calibration from the Excel software. Finally, an evaluation of the different models developed was performed on the basis of deterministic scores (correlation coefficient and square root of the mean squared error) and graphical representations. The main results obtained highlighted the period January-March as the period of low flow water and the period July-November as the period of high water. The best identified predictors consist of monthly medium flows (September, October and November) of the period of high waters preceding the period by low waters and the monthly average temperature of the period of low waters envisaged. Strong correlation coefficients (R) were obtained in calibration (0.817-0.834) as in validation (0.659-0.782) in the three developed models.

Low RMSE values were also obtained in calibration (0.542-0.566) and in validation (0.230-0.363). The values of the robustness criterion showed that only models 1 (-3,500) and 2 (-6,457) were robust, but the most robust model remains model 1. Thus, the most powerful model, the most robust and the more parsimonious is the model 1.

**Keywords :** *seasonal forecasts, low flows waters, statistical models, N'zi-Bandama, Ivory Coast.*

## I - INTRODUCTION

A l'heure où les sécheresses et le manque d'eau pourraient devenir plus intenses dans le monde, l'intérêt pour les débits d'étiage ne cesse de croître actuellement au sein de la communauté scientifique [1 - 10]. Les situations d'étiages sévères semblent devenir de plus en plus critiques et plusieurs études portent à croire que les changements climatiques pourraient amplifier cette problématique [11, 12]. Longtemps négligés, les étiages « basses eaux » prennent aujourd'hui une importance croissante aux yeux non seulement des hydrologues mais aussi des autorités et des populations [10, 13 - 16]. Cette prise de conscience résulte de la pression toujours grandissante sur la ressource en eau des rivières. L'estimation des débits des rivières et, en particulier, l'estimation des débits d'apports minimaux (les étiages) auquel il est possible de s'attendre au cours d'une période donnée, est un facteur important pour la planification et la modélisation des ressources [15]. En Afrique de l'Ouest, une baisse des précipitations et des écoulements des cours d'eau est observée depuis la fin des années 1960.

Cependant, les basses eaux sont plus affectées que les hautes eaux par la variabilité des régimes pluviométriques. En Côte d'Ivoire, les industries sont alimentées à un taux important par l'énergie électrique d'origine hydraulique. De plus l'agriculture qui apparaît comme principale activité, est une grande consommatrice d'eau, issue des principaux fleuves tels que le Bandama. Par exemple, le fleuve N'zi-Bandama sert à l'alimentation en eau potable des populations de Dimbokro à travers une exhaure située en amont de la station hydrométrique du N'zi-Bandama à Dimbokro et exploité par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI). Ce fleuve est également utilisé pour la pêche et l'agriculture. Les enjeux du suivi de la ressource en eau et notamment l'anticipation des situations de rareté, voire de pénurie, réclament de nos jours la mise en place d'applications hydrologiques opérationnelles spécifiques, au même titre que celles développées ces dernières années pour la prévision des crues [17]. L'estimation des débits des rivières et, en particulier, l'estimation des débits d'apports minimaux

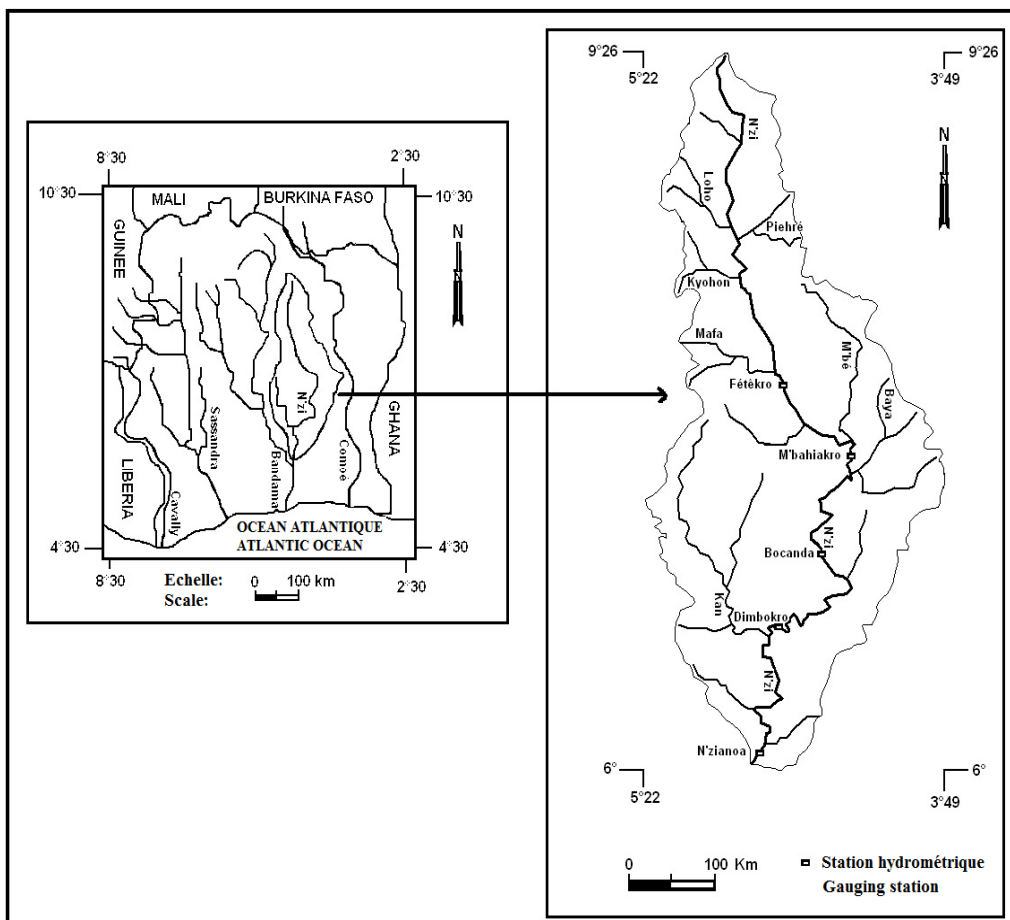
(les étiages) auquel il est possible de s'attendre au cours d'une période donnée, est un facteur important pour la planification et la modélisation des ressources. La prévision des basses eaux (étiages) est donc nécessaire pour améliorer la gestion de l'eau et prendre des mesures adaptées pour atténuer les impacts socio-économiques et écologiques des restrictions d'usage d'eau (production énergétique, irrigation, approvisionnement en eau potable, ou navigation). De plus, la perspective d'étiages plus marqués dans un contexte de changement climatique souligne la nécessité d'outils de gestion appropriés pour prévoir les faibles débits. La prévision saisonnière hydrologique peut se révéler être un outil utile pour prévoir quelques mois à l'avance les caractéristiques hydrologiques, comme les débits d'étiage des rivières. La prévision hydrologique saisonnière constitue la clé d'une gestion efficace des ressources en eau dans un contexte de changements climatiques. Ainsi, l'objectif de cette étude est de développer des modèles de prévision saisonnière des débits de basses eaux (débits d'étiage) du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire) pour une meilleure gestion des ressources en eau dans ledit bassin versant.

## **II - MATÉRIEL ET MÉTHODES**

### **II-1. Présentation de la zone d'étude**

La Côte d'Ivoire fait partie des pays du Golfe de Guinée. Elle s'étend sur une superficie de 322 462 Km<sup>2</sup>, environ 1 % du continent africain. Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (*Figure 1*), sous-bassin du fleuve Bandama (Côte d'Ivoire). Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6°00' et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km<sup>2</sup>. Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessedougou à une altitude de 400 m et coule globalement suivant une direction Nord-Sud. Le N'zi a une pente moyenne de 0,053 %. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord. L'affluent principal du N'zi est le Kan qu'il reçoit à environ 5 km en aval de Dimbokro [18]. De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du N'zi est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Au Nord, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec des pluies annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) est caractéristique de la partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 et 1600 mm/an. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat attién) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm/an [18]. Le bassin du N'zi se caractérise par une végétation savanicole dans le Centre et le Nord. La partie sud est couverte par la forêt. Le relief du bassin est peu accidenté. Il est

généralement constitué de plateaux (100 à 400 m en moyenne). Cette monotonie est rompue par la chaîne Baoulé. Les principaux types de sol sont les sols ferrallitiques moyennement dessaturés (Nord) et les sols ferrallitiques fortement dessaturés (Centre et Sud). Ces éléments (végétation, relief, types de sol, etc.) définissent les conditions physiques de l'écoulement [18].



**Figure 1 :** *Présentation du bassin versant du N'zi-Bandama*

## II-2. Données

Les données hydrométriques ont été fournies par la Direction Générale des Infrastructures de de l'Hydraulique Humaine (DGIHH). La méthode de la proportionnalité analogue a permis de combler les valeurs manquantes et d'homogénéiser la durée d'étude sur la période 1960 à 2000. La station étudiée est celle de Dimbokro. Les débits moyens annuels (1960-2000) enregistrés oscillent entre 0,76 m<sup>3</sup>/s (février) et 135,52 m<sup>3</sup>/s (octobre) avec une moyenne de 41,90 m<sup>3</sup>/s. Le coefficient de variation moyen de ces débits

est de 4,03 %. Cela signifie que la dispersion des données hydrométriques constituées est faible et donc les données hydrométriques utilisées pour l'étude sont homogènes. Les données de température collectées varient entre 26,38 °C et 29,38 °C avec une moyenne de 27,58°C et un écart-type égale à 0,599 sur la période 1961-2000. Le coefficient de variation est de 2,17 %, la série est aussi homogène.

### **II-3. Méthodologie de prévision des basses eaux**

La prévision des étiages qui consiste à déterminer ou évaluer l'évolution du débit d'étiage à partir d'une date donnée (temps initial) est une problématique déterminante dans la gestion des ressources en eau. L'anticipation du moment où le débit est susceptible de passer en dessous d'une valeur critique doit par exemple permettre de mieux satisfaire aux exigences réglementaires et d'optimiser l'utilisation de la ressource. Les méthodes de prévision les plus courantes se basent sur les courbes de tarissement, sur des modèles de simulation hydrologique ou sur des analyses de corrélation visant à établir des relations entre les débits à prévoir et différentes variables explicatives pertinentes.

#### ***II-3-1. Détermination des prédicteurs pertinents des débits de basses eaux***

Les mois de basses eaux (période d'étiage) ont été définis comme les mois où les fréquences des débits sont inférieures ou égales au débit de fréquence 0,2 [19 - 21]. Quant à la période de hautes eaux, elle a été définie comme étant la période de l'année où le débit naturel d'un fleuve est supérieur à son module [19 - 21]. Il n'existe pas de variable qui rende compte seule de toute la complexité des basses eaux [20]. Les processus liés à l'étiage se divisent en deux grandes composantes : une composante liée aux précipitations et plus généralement au climat et une seconde composante liée aux sols et aux aquifères [22]. Le premier facteur influant sur les débits et donc sur l'étiage est le climat à travers les variations des précipitations et de l'évapotranspiration. Ainsi, en période d'étiage, le débit du cours d'eau va diminuer à cause d'un manque de précipitations (diminution de la recharge), d'une augmentation de l'évapotranspiration (pertes sur les couches superficielles des sols) ou des deux phénomènes combinés. Le débit du cours d'eau n'est alors assuré que par la vidange progressive des différents réservoirs, sous réserve qu'ils existent et sont fonction de leurs taux de remplissage. Les processus liés au bassin versant ont une grande influence sur l'étiage. En effet, les propriétés géologiques, pédologiques et le couvert végétal des bassins versants ont un effet sur la recharge et le stockage des réservoirs qui représentent les sols et les aquifères mais aussi sur la vidange de ces réservoirs. Parmi tous ces descripteurs, de nombreuses études ont montré que la géologie tenait un rôle très important et qu'il existait des relations entre elle et le débit d'un cours d'eau, notamment en

période d'étiage [22]. Outre ces facteurs qui favorisent l'entretien du débit des cours d'eau en l'absence de précipitations, la présence de lacs ou de zones humides permet également le soutien des débits en période d'étiage (Garcia, 2016). Le phénomène d'étiage peut aussi être influencé par des activités humaines : les prélèvements d'eau, les rejets d'eau, la création de réservoir et le changement de l'occupation du sol [22]. Dans le cadre de cette étude, la détermination des prédicteurs pertinents s'est appuyée sur trois hypothèses :

- i) les débits d'étiage dépendent des débits de la précédente période des hautes eaux : ce sont les pluies de la saison humide qui engendrent les hautes eaux par accumulation des eaux de ruissellement et rechargent les nappes par infiltration. Ainsi, les débits d'étiages observés sont soutenus par les débits de la période des hautes eaux ayant précédé la période d'étiage [20, 23] ;
- ii) les débits d'étiage sont influencés par la température [20] : les débits d'étiage sont influencés par les évapotranspirations dont l'un des paramètres essentiels est la température ;
- iii) les débits d'étiage ne sont pas influencés par les précipitations [24].

Ainsi, une matrice de corrélation a été établie entre les débits moyens mensuels de la période des basses eaux et les prédicteurs potentiels (débits moyens mensuels de la période des hautes eaux et température de la période des basses eaux).

### ***II-3-2. Description du modèle statistique utilisé***

Le modèle statistique utilisé dans le cadre de cette étude est la régression linéaire multiple. La régression linéaire multiple peut être utilisée pour prévoir les valeurs d'une variable dépendante à partir de variables explicatives ou indépendantes. En effet, les régressions linéaires multiples sont utilisées pour déterminer la relation linéaire la plus satisfaisante pour prévoir la valeur dépendante qui produit l'erreur-type la moins grande. Dans un tel modèle, chaque variable indépendante est pondérée afin que la valeur des coefficients de régression maximise l'influence de chaque variable dans l'équation finale. Il est possible de manipuler plusieurs variables indépendantes à partir des régressions linéaires multiples, mais seulement une variable dépendante. La régression multiple est une variante de la méthode de régression simple qui peut aider à faire face à la colinéarité en choisissant itérativement les variables avec la plus grande valeur explicative. Dans une régression linéaire multiple, l'équation est sous la forme suivante (**Équation 1**) [25] :

$$Y = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n + C_0 \quad (1)$$

avec,  $Y$ , la variable expliquée,  $X_i$  la variable explicative,  $C_0$  la constante et  $C_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) les coefficients de pondération de la variable explicative  $X_i$ .



En effet,  $Y$  est un vecteur de valeurs observées de débit,  $X_i$  est une matrice de variables indépendantes ou explicatives,  $C_i$  est un coefficient de régression à estimer, et  $C_0$  est un vecteur des résidus ou des perturbations aléatoires [24].

### II-3-3. Procédure de calage

L'indice de débit de basses eaux ou SFI (standard flow index) a été calculé selon la formule suivante (*Équation 2*) :

$$SFI_i = \frac{Q_i - Q_0}{\sigma} \quad (2)$$

avec,  $SFI_i$  l'indice de débit du mois  $i$ ,  $Q_i$  le débit moyen du mois  $i$ ,  $Q_0$  la normale hydrologique de la période de référence considérée (1961-1990) et  $\sigma$  l'écart-type des données sur la période de référence considérée (1961-1990).

Le calage des modèles de prévisions des débits des basses eaux a été réalisé sur la période (1961-1990) et la validation sur 10 ans (1991 à 2000). L'estimation des coefficients de pondération ( $C_i$ ) des variables retenues a été réalisée par calage automatique avec le logiciel Excel 2013. Il a consisté à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres des modèles pour reproduire au mieux la réponse observée. Dans la présentation des résultats du calage, il est important d'associer à chacun des coefficients de régression, l'erreur-type associée, qui est un indicateur qui peut être assimilé à l'écart-type. En effet, l'erreur-type est au coefficient de régression ce que l'écart-type est à la moyenne d'une variable. Elle consiste donc en une mesure de la variabilité du coefficient de régression. Le coefficient de variation c'est-à-dire le rapport de l'erreur-type au coefficient de régression, a été calculé pour chaque variable. Un modèle de prévision de la température moyenne de la période des basses eaux  $T(t+1)$  a été développé sur la base de la corrélation à partir des températures moyennes des mois précédents la période des basses eaux.

### II-3-4. Évaluation de la qualité des modèles

La performance des modèles a été évaluée à l'aide du coefficient de corrélation, de la racine carrée de l'erreur quadratique et de représentations graphiques des débits observés et prévus. Le coefficient de corrélation ( $R$ ) est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre la variable réelle ou mesurée et la variable prévue. L'expression du coefficient de corrélation se présente comme suit (*Équation 3*) :



$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) \times (Q'_i - \bar{Q}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q'_i - \bar{Q}')^2}} \quad (3)$$

avec,  $Q_i$  le débit mesuré,  $Q'_i$  le débit prévu,  $\bar{Q}$  la moyenne des débits mesurés et  $\bar{Q}'$  la moyenne des débits prévus.

La corrélation est dite :

- parfaite si  $R = 1$  ;
- très forte si  $0,8 \leq R < 1$  ;
- forte si  $0,5 \leq R < 0,8$  ;
- moyenne si  $0,2 \leq R < 0,5$  ;
- faible si  $0 < R < 0,2$  ;
- nulle si  $R = 0$ .

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée comme la mesure de la performance globale du modèle. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite prévision. Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante (**Équation 4**) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{n}} \quad (4)$$

avec,  $Q_i$ , le débit observé,  $Q'_i$  le débit prévu et  $n$  le nombre des données.

On peut également évaluer la qualité des modèles développés au moyen de la robustesse. Cette technique permet de tester l'adaptabilité du modèle quelle que soit sa complexité. Le critère de robustesse ( $R'$ ) du modèle a été évalué par la différence du coefficient de corrélation en validation ( $R_{\text{validation}}$ ) et en calage ( $R_{\text{calage}}$ ). Le modèle est dit robuste si le critère de robustesse varie entre -10 et +10%. La robustesse se définit par la formule suivante (**Équation 5**) :

$$R = 100 \times (R_{\text{validation}} - R_{\text{calage}}) \quad (5)$$

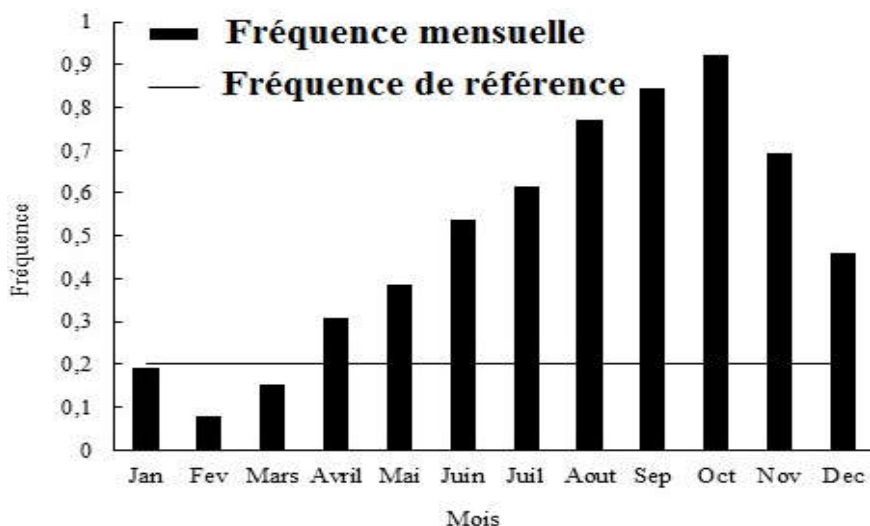
Outre l'évaluation numérique, le diagnostic graphique s'avère important car c'est un outil puissant pour valider une modélisation. Il fournit un nombre important d'informations que les indicateurs statistiques appréhendent mal. Ainsi, des analyses graphiques comparant des débits simulés aux débits observés ont été réalisées. En pratique, si la simulation était parfaite, c'est-à-

dire, si chacune des valeurs simulées par les modèles était égale à la valeur observée, le nuage de points constitué serait aligné et confondu à la droite d'équation  $y=x$ . Cependant, comme la modélisation n'est pas parfaite, l'évaluation qualitative de la performance des différents modèles a consisté à apprécier la dispersion du nuage de points autour de la première diagonale. Les points trop éloignés de la droite de référence seront qualifiés de sur estimés (au-dessus de la droite) ou sous-estimés (en dessous de la droite).

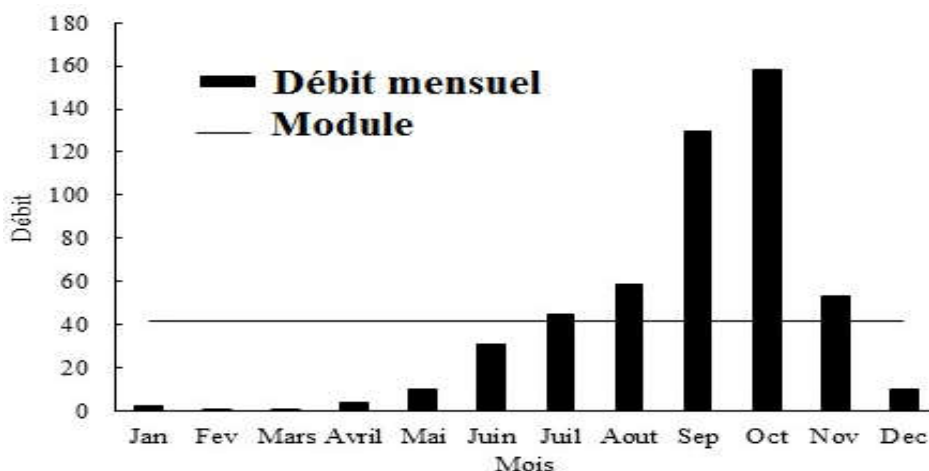
### III - RÉSULTATS

#### III-1. Prédicteurs pertinents des débits d'étiage

Les mois dont la fréquence est inférieure ou égale à 0,2 sont respectivement janvier, février et mars (*Figure 2*). Ainsi la période de basses eaux identifiée est la période janvier-mars. En ce qui concerne la période des hautes eaux, elle va de juillet à novembre (*Figure 3*).



**Figure 2** : Fréquences de débit à la station du N'zi-Bandama à Dimbokro



**Figure 3 :** Hydrogramme à la station du N’zi-Bandama à Dimbokro

Les coefficients de corrélation entre les débits moyens des mois de la période de hautes eaux (juillet à novembre) et le débit moyen de la période de basses eaux (janvier-mars) varient entre 0,468 et 0,768 avec une moyenne de 0,614 (**Tableau 1**). Ces résultats montrent que les débits de la période des basses eaux sont bien corrélés aux débits de la période des hautes eaux qui la précède. Par conséquent, les débits de la période des hautes eaux peuvent être utilisés pour prévoir les débits de la période des basses eaux. Pour une contrainte de parcimonie visant à utiliser le moins de prédicteurs possibles, seuls les débits des mois de septembre, octobre et novembre ayant enregistré les meilleurs coefficients de corrélation ont été utilisés pour la conception des modèles de prévision des débits de basses eaux dans le bassin versant du N’zi-Bandama à Dimbokro.

**Tableau 1 :** Corrélation entre débits de basses eaux et débits de hautes eaux à la station de Dimbokro (1961-2000)

Variables	Coefficients de corrélation
Q-Juillet	0,468
Q-Aout	0,589
Q-Septembre	0,643
Q-Octobre	0,602
Q-Novembre	0,768
Moyenne	0,614

Ainsi, les architectures des modèles établis selon une régression pas à pas se présentent comme suit :

$$\text{-modèle 1 : SFI} = f[T(t+1) ; Q(t)] \quad (6)$$

$$\text{-modèle 2 : SFI} = f[T(t+1) ; Q(t) ; Q(t-1)] \quad (7)$$

$$\text{-modèle 2 : SFI} = f[T(t+1) ; Q(t) ; Q(t-1) ; Q(t-2)] \quad (8)$$

avec,  $T_{t+1}$  la température de la période des basses eaux (janvier-mars) de l'année de prévision,  $Q_t$  le débit moyen du mois de novembre de l'année précédente,  $Q_{t-1}$  le débit moyen du mois d'octobre de l'année précédente et  $Q_{t-2}$  le débit moyen du mois de septembre de l'année précédente.

Un modèle de prévision de la température moyenne de la période des basses eaux  $T(t+1)$  a été développé sur la base des meilleures corrélations obtenues entre la température moyenne de la période des basses eaux et les températures moyennes des mois précédents allant de janvier à novembre sur la période 1961-2000 (**Tableau 2**). Ainsi, les variables explicatives retenues sont les températures des mois de septembre (0,691), octobre (0,583) et novembre (0,589).

**Tableau 2 :** *Corrélations entre températures de la période d'étéage ( $T_{JFM}$ ) et celles des mois précédents*

Température mensuelle (° C)	$T_{JFM}$ (° C)
T-Janvier	0,362
T-Février	0,321
T-Mars	0,359
T-Avril	0,229
T-Mai	0,296
T-Juin	0,255
T-Jullet	0,340
T-Août	0,517
T-Septembre	0,691
T-October	0,583
T-Novembre	0,589

Le modèle de prévision de la température moyenne saisonnière de la période des basses eaux se présente comme suit :

$$T(t+1) = 0,727 \times T_9(t) + 0,002 \times T_{10}(t) + 0,183 \times T_{11}(t) + 4,674 \quad (9)$$

avec,  $T_9$ , la température moyenne du mois de septembre de l'année précédente,  $T_{10}$ , température moyenne du mois d'octobre de l'année précédente,  $T_{11}$ , température moyenne du mois de novembre de l'année précédente. Le coefficient de corrélation entre les températures observées et celles prévues est de 0,7 ; ce qui est satisfaisant.

### III-2. Résultats du calage des modèles

A l'issu du calage à partir des régressions linéaires, les différentes *Équations* de prévisions saisonnières des débits de basses eaux obtenues sont :

$$\text{-modèle 1: } SFI(t+1) = -0,526T(t+1) + 0,01Q(t) + 13,815 \quad (10)$$

$$\text{-modèle 2: } SFI(t+1) = -0,489T(t+1) + 0,001Q(t) + 0,009Q(t-1) + 12,674 \quad (11)$$

$$\text{-modèle 3 : } SFI(t+1) = -0,344T(t+1) + 0,004Q(t) - 0,002Q(t-1) + 0,009Q(t-2) + 8,672 \quad (12)$$

avec,  $T_{t+1}$  la température de la période des basses eaux de l'année de prévision,  $Q_t$  le débit moyen du mois de novembre de l'année précédente,  $Q_{t-1}$  le débit moyen du mois d'octobre de l'année précédente et  $Q_{t-2}$  le débit moyen du mois de septembre de l'année précédente.

### III-3. Résultats d'évaluation de la qualité des modèles

Le *Tableau 3* et les *Figures 4 et 5* montrent les performances en phase de calage et de validation des trois modèles de simulation des débits d'étiages. En calage, de forts coefficients de corrélation (R) variant de 0,817 (modèle 1) à 0,834 (modèle 3) avec une moyenne de 0,826 (modèle 2). Ces résultats montrent que les débits observés et les débits prévus sont fortement corrélés. Quant à la RMSE, elle varie de 0,542 (modèle 3) à 0,566 (modèle 1) avec une moyenne de 0,554 (modèle 2). Il est constaté une différence pas très significative entre les performances des différents modèles en calage. Au regard des deux critères d'évaluation (R et RMSE), tous les modèles sont performants. Cependant, le modèle 3 semble relativement le plus performant. Les représentations graphiques montrent qu'en calage, la majorité des points a tendance à s'aligner suivant l'axe de référence à l'exception de quelques points qui ont présenté des valeurs sous-estimées car trop éloignés par rapport l'axe de référence par degré inférieur. En validation, de forts coefficients de corrélation allant de 0,659 (modèle 3) à 0,782 (modèle 1) avec une moyenne de 0,734 ont été également obtenus. Ces résultats montrent que les débits observés et les débits prévus sont corrélés. La RMSE obtenue varie entre 0,230 (modèle 2) et 0,363 (modèle 3) avec une moyenne de 0,313. Les différentes valeurs obtenues traduisent des résultats satisfaisants dans l'ensemble qui tendent toutes vers 0. L'analyse des résultats relatifs aux différents critères d'évaluation montrent que tous les modèles sont performants dans l'ensemble. Le modèle le plus performant est le modèle 1 et le moins performant est le modèle 3. Quant à l'analyse graphique (*Figure 5*), elle met en évidence une sous-estimation des débits prévus marquée par un regroupement des points en dessous de l'axe  $Y = X$ .

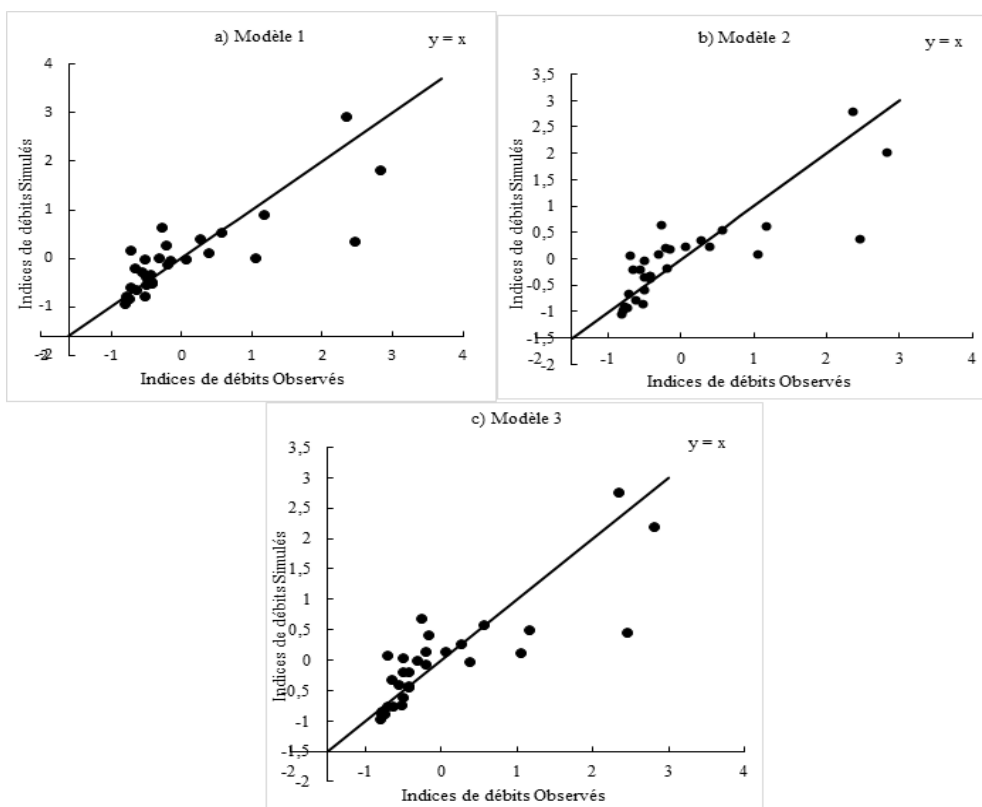
**Tableau 3 : Performances des modèles développés**

Modèles	Calage			Validation		
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Coefficient de corrélation	0,817	0,826	0,834	0,782	0,762	0,659
RMSE	0,566	0,554	0,542	0,346	0,230	0,363

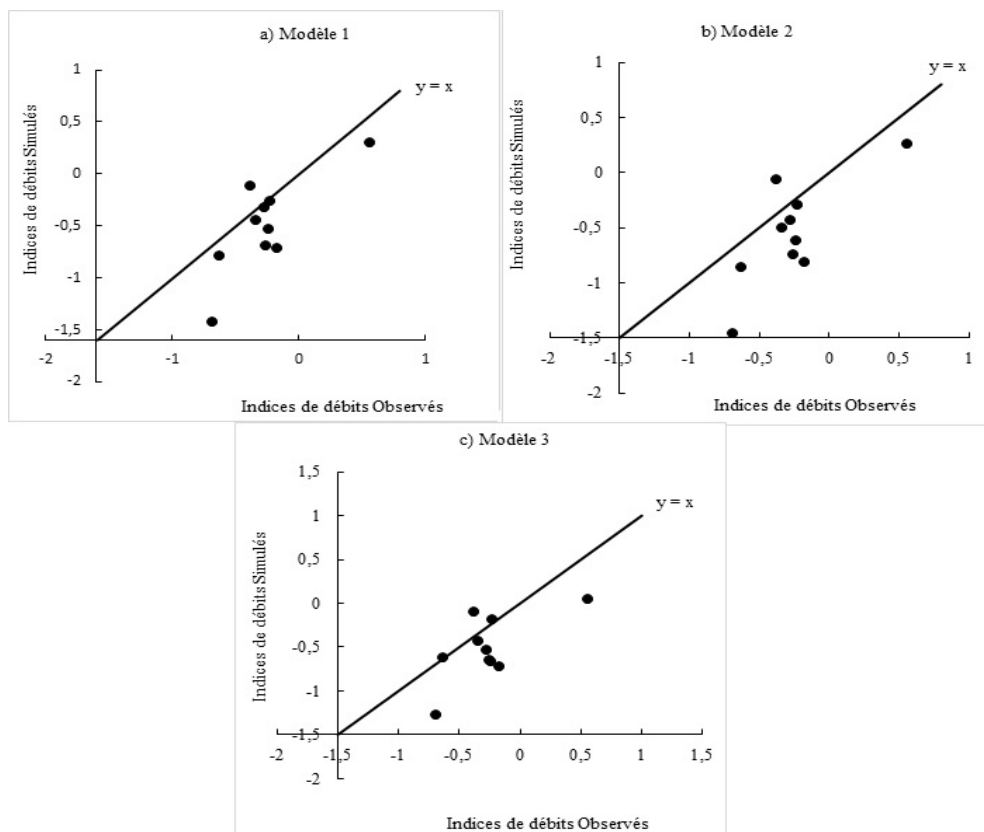
Les valeurs du critère de robustesse des différents modèles varient entre -17,545 % (modèle 3) et -3,5% (modèle 1) (**Tableau 4**). Les modèles 1 et 2 ont des valeurs de robustesse comprises entre -10 % et +10 %. Par conséquent, seuls les modèles 1 et 2 sont robustes mais le modèle le plus robuste reste le modèle 1.

**Tableau 4 : Valeurs du critère de robustesse**

Modèles	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Critère de robustesse (%)	-3,500	-6,457	-17,545



**Figure 4 : Indices de débits prévus en fonction des indices de débits observés en calage : a) Modèle 1 ; b) Modèle 2 ; c) Modèle 3**



**Figure 5 :** *Indices de débits simulés en fonction des indices de débits observés en phase de validation : a) Modèle 1 ; b) Modèle 2 ; c) Modèle 3*

#### IV - DISCUSSION

Les débits de la période des hautes eaux précédents les étiages et la température de la période des basses eaux ont démontré leur capacité à prévoir les débits de la période des basses eaux à travers la qualité des performances des différents modèles développés en calage mais surtout en validation. Ces résultats montrent également que les différentes hypothèses ont été vérifiées. Tous les modèles possèdent la température moyenne de la période des basses eaux comme variable explicative associée au climat. Le modèle 1 comprend une seule variable associée aux débits de hautes eaux (débit moyen du mois de novembre). Le modèle 2 comprend deux variables associées aux débits de hautes eaux (débit moyen du mois de novembre et débit moyen du mois d'octobre qui est le mois le plus humide). Le modèle 3 comprend trois variables associées aux débits de hautes eaux (débit moyen du mois de novembre, débits moyens des mois d'octobre et novembre qui sont les deux



mois les plus humides). Les résultats de l'évaluation des différents modèles ont montré que le modèle le plus performant, le plus robuste et le plus parcimonieux est le modèle 1. Ces résultats montrent que le rapprochement d'un mois de la période des hautes eaux (novembre) par rapport à la période de basses eaux prévues (janvier-mars) apporte plus à la performance du modèle que l'intensité du débit (débits de septembre et octobre). En effet, en s'appuyant sur les résultats de performance en phase de validation et des résultats du critère de robustesse, il ressort que l'ajout du débit moyen d'octobre au modèle 1 (modèle 2) a dégradé la performance du modèle 1. L'ajout du débit moyen de septembre au modèle 2 (modèle 3) a dégradé davantage la performance du modèle de base (modèle 1). Le modèle 1 se présente comme un outil performant à la portée des hydrologues pour la prévision saisonnière des débits d'étiage dans le bassin versant du N'zi-Bandama. Selon [20], l'étude de la relation simple : cumuls de précipitations de la saison pluvieuse-débits d'étiage peut être utilisée. Ce choix se justifie particulièrement car les précipitations constituent le facteur climatique déterminant pour les étiages.

Ce choix peut également se justifier sur le plan opérationnel car les précipitations constituent la première source d'information disponible pour les services gestionnaires. En effet, il est plus difficile dans nos états africains de disposer des données hydrométriques par rapport aux données météorologiques. Le cumul des précipitations antérieures à la période d'étiage est intéressant pour réaliser des prévisions à long terme qui peuvent être fondées sur les apports pluviométriques de la période des hautes eaux. Le lien est établi entre l'importance des pluies de hautes eaux qui rechargent les nappes et vont permettre de soutenir les débits durant les périodes sèches. Les précipitations mensuelles enregistrées avant la période de basses eaux jouent donc un rôle déterminant pour évaluer l'état des réservoirs souterrains. Ces observations ne se vérifient pas de manière systématique pour tous les bassins. En effet, ce fonctionnement ne concerne que les bassins versants qui bénéficient d'aquifères conséquents. Les bassins imperméables ou très arrosés sont très réactifs aux apports pluviométriques. Pour ces stations, la sévérité des débits d'étiage s'explique davantage par les précipitations observées durant la période d'étiage elle-même.

## **V - CONCLUSION**

Les résultats de cette étude ont mis en évidence la période janvier-mars comme la période de basses eaux et la période juillet-novembre comme la période des hautes eaux. Les meilleurs prédicteurs identifiés sont constitués des débits moyens mensuels de septembre, octobre et novembre de l'année

précédente et la température moyenne mensuelle de la période des basses eaux prévues. Mais le meilleur prédicteur associé aux débits de hautes eaux est le débit moyen de novembre. De forts coefficients de corrélation (R) ont été obtenus en calage (0,817-0,834) comme en validation (0,659-0,782) au niveau des trois modèles développés. De faibles valeurs de RMSE ont été également obtenues en calage (0,542-0,566) comme en validation (0,230-0,363). Les valeurs du critère de robustesse ont montré que seuls les modèles 1 (-3,500) et 2 (-6,457) ont été robustes mais le modèle le plus robuste reste le modèle 1. Ainsi, le modèle le plus performant, le plus robuste et le plus parcimonieux est le modèle 1. Les données météorologiques constituant la première information disponible pour les services gestionnaires et pour rendre l'outil développé dans ce travail plus facilement utilisable, une amélioration de celui-ci peut être menée en utilisant des données météorologiques uniquement (précipitations, températures de l'air, températures de la mer, etc.). L'application des réseaux des neurones à la prévision des débits de basses eaux pourrait constituer également une voie d'amélioration.

### REMERCIEMENTS

*Les Auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient respectivement la Direction de la SODEXAM pour leur avoir fourni les données climatiques utilisées et la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH) pour leur avoir fourni les données hydrométriques utilisées.*

### RÉFÉRENCES

- [1] - F. COMMEAUX, G. DROGUE, D. FRANCOIS, « 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 (2010) 178 - 193
- [2] - R. A. RANDRIANASOLO, M. H. RAMOS, G. THIREL, V. ANDREASSIAN, « Comparing the scores of hydrological ensemble forecasts issued by two different hydrological models. ». *Atmospheric science letters*, 11 (2010) 100 - 107. Published online 25 February 2010 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com)
- [3] - D. FRANÇOIS, G. DROGUE, F. COMMEAUX, « Évolution possible des débits d'étiage de la Meuse en France au cours du XXIème siècle ». *Revue Géographique de l'Est*, 51 (3-4) (2011) 1 - 15
- [4] - S. SINGLA, « Prévisibilité des ressources en eau à l'échelle saisonnière en France ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, *Hydrologie*, (2012) 245 p.

- [5] - L. GISCHER, E. HALLOT, G. HOUBRECHTS, V. J. CAMPENHOUT, F. PETIT, «Analyse des débits en période de tarissement : essai d'une typologie régionale appliquée à des rivières du bassin de l'ameuse (Belgique) ». *BSGLg*, 59 (2012) 59 - 80
- [6] - S. GAILLIEZ, « Estimation des débits d'étiage pour des sites non jaugés. Application en région wallonne ». Thèse de Doctorat, Communauté française de Belgique, Académie universitaire Wallonie-Europe, Université de liège – Gembloux Agro-Bio Tech, (2013) 197 p.
- [7] - R. PUSHPALATHA, « Simulation et prévision des étiages sur des bassins versants français : approche fondée sur la modélisation hydrologique ». Thèse de Doctorat de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), (2013) 172 p.
- [8] - D. JOSHI, « Évaluation de diverses techniques de mise à l'échelle statistique des indices qui caractérisent le débit d'étiage de trois rivières de l'est du Canada ». Thèse de Doctorat, Université du Québec, institut national de la recherche scientifique, Centre eau terre environnement, (2014) 223 p.
- [9] - Z. ABDA, M. CHITTIH, B. ZEROUALI, « Modélisation des débits extrêmes par les réseaux neuronaux artificiels et les systèmes à inférence neuro-floue (application aux bassins côtiers Algérois) ». International Conference On African Large River Basins Hydrology, Hammamet, Tunisia, October, 26-30<sup>th</sup>, (2015)
- [10] - P. L. DOUCET-GENEREUX, « Simulation des débits d'étiages dans un concept de changement climatique : incertitudes liées au choix du modèle et au critère de calage ». Mémoire du projet de maîtrise spécialité : Génie civil, *Université de sherbrooke*, Faculté de génie, Département de génie civil, (2015) 103 p.
- [11] - F. BRISSETTE, J. CHEN, P. GATIEN, R. ARSENAULT, LI Z « Système de prévision des étiages comme moyen d'adaptation aux impacts des changements climatiques ». Rapport technique ÉTS, (2012) 76 p.
- [12] - C. CATALOGNE, « Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés ». Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble, (2012) 235 p.
- [13] - H. G. EDGAR, « Développement d'une méthodologie hydrologique/statistique pour estimer les débits d'étiages au Québec habité ». Thèse présentée pour l'obtention de grade de philosophae Doctor (Ph.D) en sciences de l'Eau, Université du Québec INRS-ETE, (2008) 296 p.
- [14] - L. SAUNIER-BATTÉ, « Prévisions d'ensemble à l'échelle saisonnière : Mise en place d'une dynamique stochastique ». Sciences de la Terre. Université Paris-Est, (2013) 223 p.
- [15] - N. MEKHLouFI, « Prédétermination et Prévision des étiages Des Oueds de l'Algérie Septentrionale ». Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de magistère spécialité : Hydraulique option : aménagement hydraulique en zones arides. Université de Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, (2014) 117 p.
- [16] - P. NICOLE, C. PERRIN, V. ANDREASSIAN, D. AUGÉARD, F. BESSON, A. CARROGET, D. FRANCOIS, M. LE LAY, F.

- REGIMBEAU, D. THIERY, «Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ». Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, (2015) 24 p.
- [17] - J. M. SOUBEYROUX, J. P. VIDAL, M. BAILLON, M. BLANCHARD, J. P. CERON, «Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou ». *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*, 5, (2010) 30 - 39
- [18] - A. M. KOUASSI, K.F. KOUAME, B. T. A. GOULA, T. LASM, J. E. PATUREL, J. BIEMI, « Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire ». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 11 (2008) 207 - 229
- [19] - S. P. DKENGNE, « Modélisation et prévision des débits naturels journaliers du B.V.I. de la Sanaga à la station de contrôle de SONGMBENGUE ». *Master de Statistique Appliquée*, (2006) 101 p.
- [20] - C. LANG, « Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français ». Thèse d'hydrologie, Université de Metz France, (2007) 375 p.
- [21] - A. BARD, B. RENARD, M. LANG, « Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'arc Alpin ». *La Houille Blanche, Revue internationale de l'eau*, 1 (2012) 38 - 43
- [22] - F. GARCIA, « Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiages ». Thèse de Doctorat en Hydrologie à l'université Pierre Marie Curie, Paris VI, (2016) 272 p.
- [23] - C. LANG, « Les étiages : Définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires ». *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, mis en ligne le 30 Novembre 2011. URL : <http://journals.openedition.org/cybeo/24827>
- [24] - C. LANG, E. GILLE, J. C. AUER, « Le dispositif PRESAGES : un ensemble d'outils pour la prévision des étiages ». *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*. *IAHS Publication*, 308 (2006) 145 - 150
- [25] - A. M. KOUASSI, R. K. S. A. N'ZAI, Y. B. KOFFI, J. BIEMI, «Application of multiple linear regression models for predicting drilling water flow in the hard rock aquifers : Example of N'zi-Comoé area (Central-East of Ivory Coast) ». *The Journal of Water Sciences and Environment Technologies*, 2 (1) (2017) 130 - 141