

Prévision saisonnière des débits de hautes 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^{1*}, Koffi Eugène KOUAKOU¹, Relwindé Abdoul-Karim NASSA²,
Koffi Fernand KOUAME^{3,4,5} et Jean BIEMI³**

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

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

³ *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*

⁴ *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*

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

* Correspondance, courriel : michel.a_kouassi@yahoo.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est de développer des modèles statistiques de prévision saisonnière des débits de hautes eaux du bassin versant du N'zi-Bandama. La méthodologie adoptée est basée sur les modèles de régressions linéaires multiples. Le calage a été effectué à partir de données météorologiques et hydrométriques. Les meilleures variables météorologiques concernent les cumuls des pluies de la période août-novembre (ASON) collectées aux stations de Dimbokro et Dabakala. Les variables hydrométriques retenues sont les débits moyens mensuels des mois précédents (avril, mai et juin) la période à prévoir. L'évaluation des modèles a été faite à partir de scores déterministes et de scores de contingence. En phase de validation, les modèles développés ont enregistré de bonnes performances ($0,856 < R < 0,861$; $0,31 < RMSE < 0,33$). De très bonnes valeurs de robustesse ont été également obtenues et variant entre +5,6 et + 6,7 %. Les scores de contingence ont mis en évidence une égalité des performances des modèles selon les différents critères. Ainsi, ont été obtenues respectivement des valeurs de 80 % pour le taux de coïncidence, 67 % pour la POD sèche, 100 % pour la POD humide, 0 % pour la FAR sèche, 0 % pour la FAR humide et 70 % pour la HSS. Les trois modèles développés se sont avérés performants et robustes. Cependant, le modèle 1 est le modèle le plus performant, le plus robuste et le plus parcimonieux suivi du modèle 2.

Mots-clés : *prévision, débits, modèles statistiques, N'zi-Bandama, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Seasonal forecast of high water flows in the West African river basins : case of the N'zi-Bandama watershed, Ivory Coast

The objective of this study is to develop statistical models of seasonal forecast of high water flows from N'zi-Bandama watershed. The adopted methodology is based on the models of multiple linear regressions. The wedging was made from meteorological and hydrometric data. The best meteorological variables concern the accumulations of the rains of the August-November (ASON) period collected in the stations of Dimbokro and Dabakala. The reserved hydrometric variables are the monthly average flows of the previous months (in April, May and June) the period to be planned. The evaluation of the models was made from determinist scores and from scores of contingency. In validation phase, the developed models recorded good performances ($0,856 < R < 0,861$; $0,31 < RMSE < 0,33$). Very good values of robustness were also obtained and varying between +5,6 and 6,7 %. The scores of contingency highlighted an equality of the performances of the models according to the various criteria. So, were obtained respectively from 80 % values for the rate of coincidence, 67 % for the dry POD, 100 % for the wet POD, 0 % for the dry FAR, 0 % for the wet FAR and 70 % for the HSS. Three developed models have proved successful and strong. However, the model 1 is the most successful, the most strong and the most economic model followed by the model 2.

Keywords : *forecast, water flow, statistical models, N'zi-Bandama, Ivory Coast.*

1. Introduction

Les événements hydrologiques exceptionnels tels que les crues constituent l'un des plus importants risques naturels [1 - 3]. Au mois de septembre 2018 en Côte d'Ivoire, les eaux sont sorties de leurs lits à Zuenoula et à Bouaflé, créant ainsi des déplacements de personnes et causant des dégâts d'ordre matériel. Les populations et les autorités ont été toutes surprises par manque d'alerte. En effet, les alertes sont basées sur les résultats de prévision [4, 5]. Ainsi, la prévision des hautes eaux joue un rôle important dans la réduction des risques et la prévention contre les catastrophes liées à l'eau [6 - 8]. Elle constitue la clé d'une gestion efficace de la production hydroélectrique, des ressources en eau pour l'alimentation en eau potable, la production agricole et pastorale, la pêche, ainsi que du contrôle actif des risques liés aux événements extrêmes mais aussi pour la préservation de l'environnement (qualité et quantité de l'eau, faune aquatique, écosystèmes, etc.) [9, 10]. De plus, l'évolution de la pression anthropique sur les ressources en eau (accroissement de la population, modification de l'usage des sols et des pratiques agricoles, etc.), conjuguée aux variations récentes du climat, fait que la demande en eau ne cesse de croître [9]. La gestion de l'eau est donc devenue un enjeu grandissant dans de nombreuses régions du monde en général et de la Côte d'Ivoire en particulier. Pour mieux faire le suivi et/ou la prévision des ressources en eau l'on a besoin de prendre des décisions [11]. En effet, il existe des outils pour le suivi, mais les outils de prévision à l'échelle de la saison pour l'hydrologie sont encore très peu développés dans le monde [12 - 17]. Or, prévoir les événements hydrologiques exceptionnels tels que les crues est crucial, d'où une prévision de bonne qualité permettrait alors de prendre des mesures préventives pour anticiper voire éviter les problèmes liés aux crues [13 - 15]. Les prévisions hydrologiques en général et les prévisions PRESAO en particulier sont basées sur des données de mer [18, 19]. Alors la question qui se pose est : Est-il possible de prévoir les débits saisonniers de hautes eaux à partir uniquement de données continentales ? Ainsi, l'objectif de cette étude est de développer des modèles de prévision saisonnière des débits des hautes eaux du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire).

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (*Figure 1*), sous-bassin du fleuve Bandama (Côte d'Ivoire). Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6°00' et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km². Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessedougou à une altitude de 400 m et coule globalement suivant une direction Nord-Sud. Le N'zi a une pente moyenne de 0,053 %. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord. L'affluent principal du N'zi est le Kan qu'il reçoit à environ 5 km en aval de Dimbokro [20]. De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du N'zi est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Au Nord, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec des pluies annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) est caractéristique de la partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 et 1600 mm/an. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat attiéen) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm/an [20]. 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 [20].

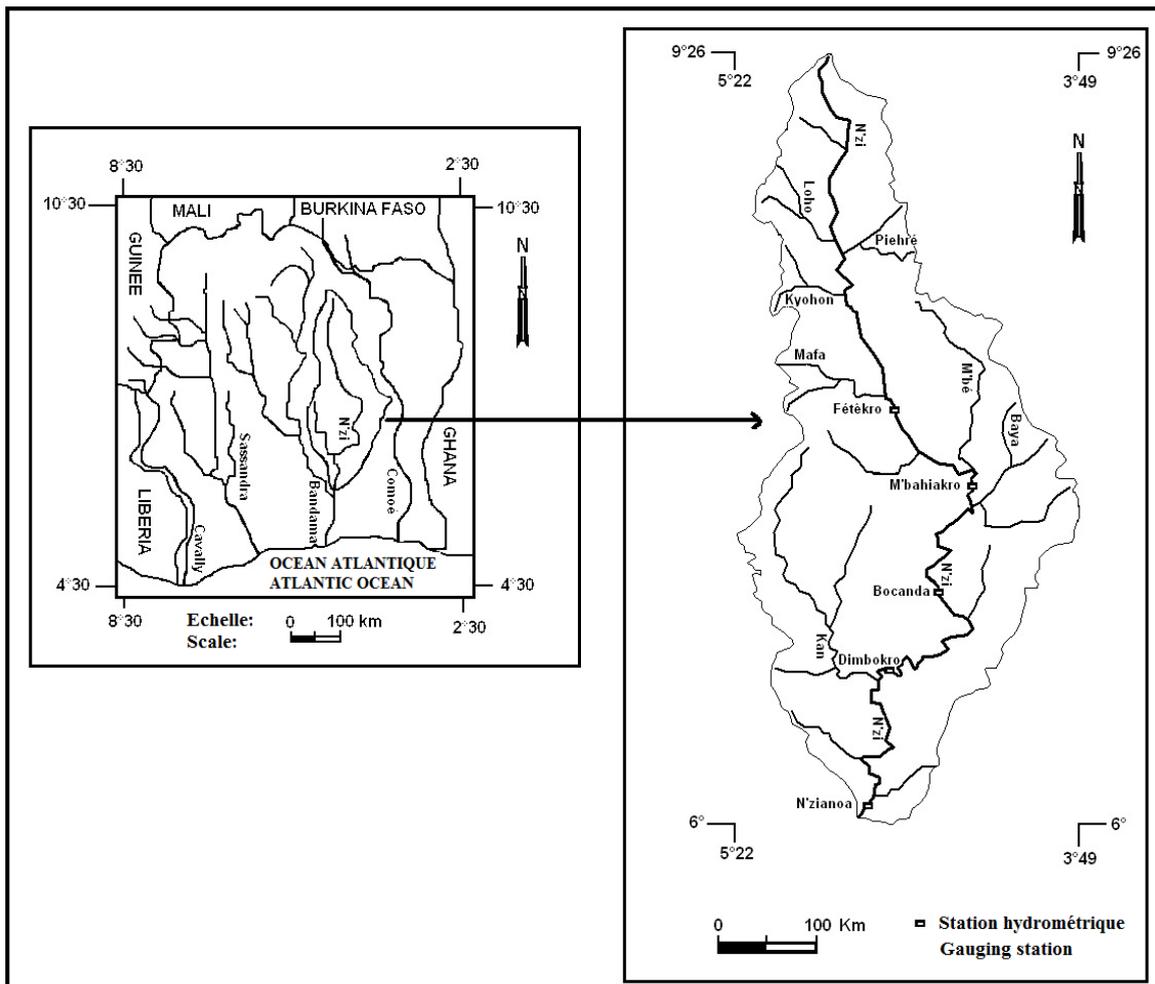


Figure 1 : Présentation du bassin versant du N'zi-Bandama

2-2. Données

Les données pluviométriques proviennent de huit (8) postes pluviométriques (*Figure 2a*). Elles ont été mises à notre disposition par la société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM). La constitution d'un vecteur régional a permis de reconstituer les données manquantes au sein des différentes séries pluviométriques. Les pluies moyennes annuelles (1961-2000) dans le bassin versant du N'zi (Bandama) varient entre 1002,6 (Dabakala) et 1168,4 mm (Bongouanou) avec une moyenne de 1091,4 mm (*Tableau 1*). Les coefficients de variation (CV) (rapport de l'écart-type de la série annuelle par sa moyenne) de ces pluies moyennes annuelles fluctuent entre 0,16 et 0,29. Cela signifie que la dispersion des données des séries pluviométriques considérées est assez faible. Ces valeurs montrent que les données pluviométriques retenues pour l'étude sont assez homogènes et représentatives de la zone d'étude.

Tableau 1 : Caractéristiques statistiques des données pluviométriques du N'zi-Bandama

Stations	Latitude (°C)	Longitude (°C)	Moyenne	Ecart-type	Cv
Tafiré	9°04	5°09	1076,1	207,4	0,19
Niakaramandougou	8°40	5°17	1103,7	204,2	0,18
Katiola	8°08	5°06	1087,1	267	0,24
Dabakala	8°23	4°26	1002,6	269,7	0,27
Bouaké	7°44	5°04	1085,9	172,3	0,16
Tiébissou	7°09	5°13	1078,6	312,6	0,29
Bongouanou	6°39	1168,4	254,5	0,22	
Dimbokro	6°39	4°42	1128,7	200,1	0,18

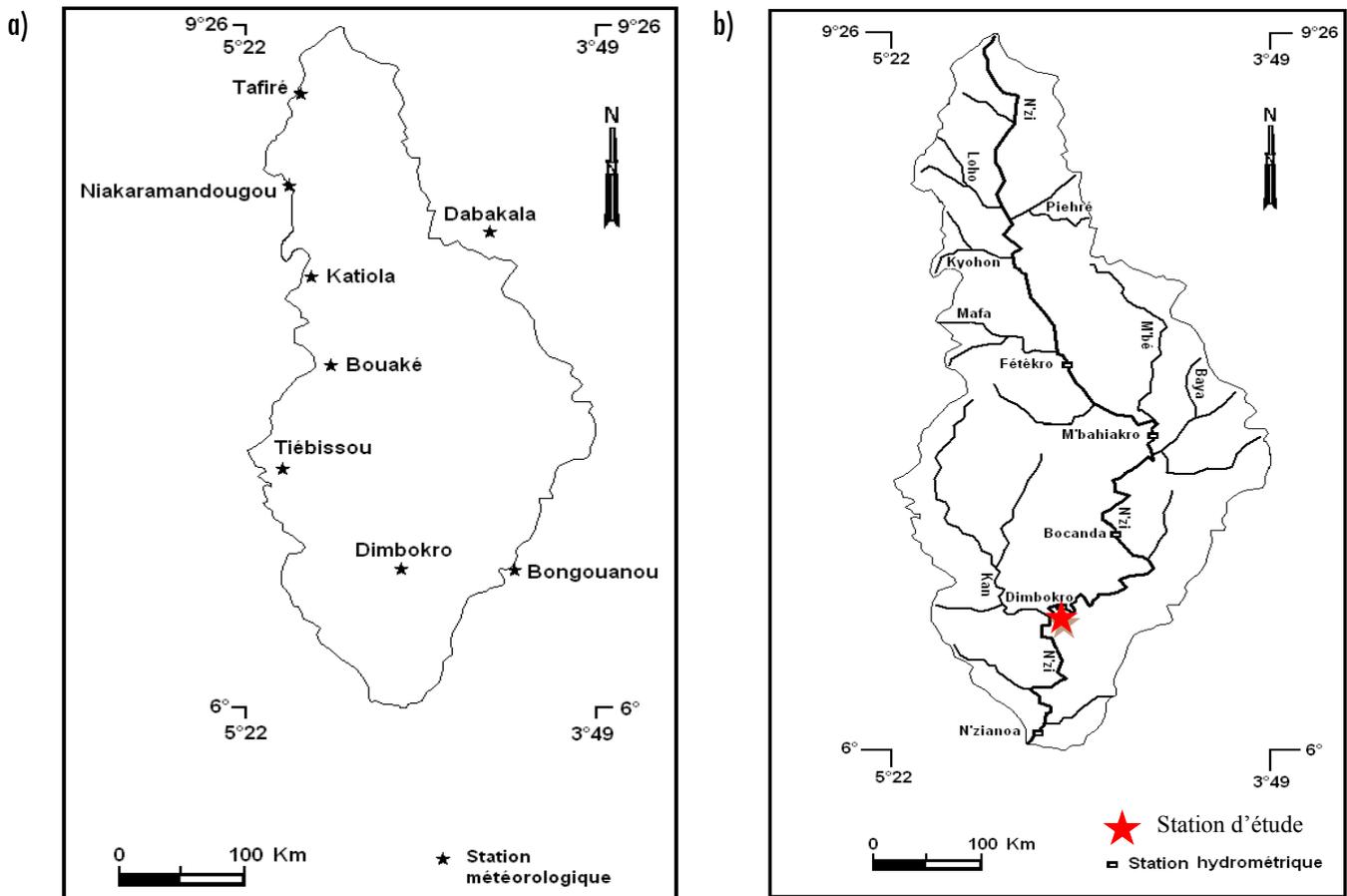


Figure 2 : Stations pluviométriques (a) et hydrométriques (b) retenues

Les données hydrométriques ont été fournies par la Direction Générale des Infrastructures 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 1961 à 2000. La station étudiée est celle de Dimbokro (*Figure 2b*). Cette station hydrométrique sélectionnée est représentative pour traduire de manière significative, le caractère climatique et physiographique du bassin du N'zi-Bandama. Il a une superficie de 24 100 m². Les débits moyens annuels (1961-2000) enregistrés oscillent entre 0,76 m³/s (Janvier) et 155,1 m³/s (octobre) avec une moyenne de 41,6 m³/s et un écart-type de 38,9 (*Figure 3*).

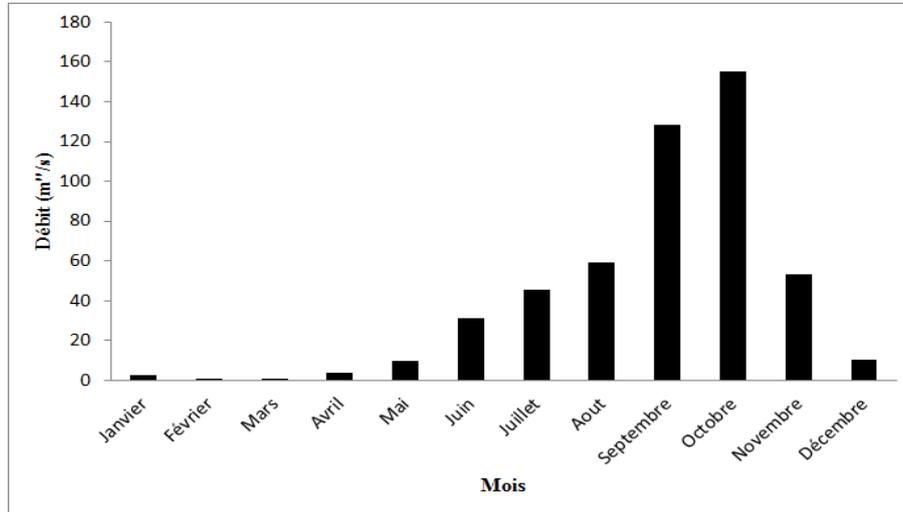


Figure 3 : Débits saisonniers à la station hydrométrique du N'zi-Bandama à Dimbokro (1961-2000)

2-3. Identification des variables explicatives pertinentes

Pour la recherche des meilleurs prédicteurs, la démarche suivante a été adoptée :

- identifier sur le bassin versant les stations pluviométriques existantes et disposant de données de bonne qualité sur la période 1961 - 2000 ;
- identifier la période des hautes eaux (ensemble des mois de l'année ayant leur débit moyen supérieur au module [21 - 23] ;
- calculer les cumuls de pluviométrie mensuelle aux stations retenues sur la période des hautes eaux ;
- établir les corrélations entre les cumuls de pluies mensuelles et le débit moyen de la période des hautes eaux ;
- sélectionner les stations pluviométriques dont les cumuls de pluies mensuelles sont mieux corrélés au débit moyen de la période des hautes eaux ;
- considérer ces cumuls pluviométriques mensuels comme des prédicteurs météorologiques potentiels du débit de la période des hautes eaux ;
- sélectionner les débits moyens mensuels précédents la période des hautes eaux comme des prédicteurs hydrométriques potentiels du débit de la période des hautes eaux.

2-4. Conception des modèles

2-4-1. Description du modèle statistique utilisé

Le modèle statistique utilisé dans le cadre de cette étude est la régression linéaire multiple qui 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 plus faible. Chaque variable indépendante est pondérée afin que la valeur des coefficients de régression maximise l'influence de celle-ci 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 linéaire 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)[24] :

$$Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n + C_0 \quad (1)$$

avec, Y la variable expliquée, X_i : variable explicative et C_0 : constante.

C_i ($1 \leq i \leq N$) : 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].

2-4-2. Procédure de calage

Les structures de modèles utilisées se présentent comme suit (Équations 2 - 4):

$$- SFI(t+1) = f[P_1(t+1), P_2(t+1), Q(t)] \quad (2)$$

$$- SFI(t+1) = f[P_1(t+1), P_2(t+1), Q(t-1), Q(t)] \quad (3)$$

$$- SFI(t+1) = f[P_1(t+1), P_2(t+1), Q(t-2), Q(t-1), Q(t)] \quad (4)$$

avec, $SFI(t+1)$: indice de débit du mois prévu ; $Q(t)$: débit du mois t ; $Q(t-1)$: débit du mois $t-1$; $Q(t-2)$: débit du mois $t-2$; $P_1(t+1)$: cumul des pluies de la période des hautes eaux à prévoir de la première station dont le cumul pluviométrique mensuel est la plus corrélé au débit ; $P_2(t+1)$: cumul des pluies de la période des hautes eaux à prévoir de la deuxième station dont le cumul pluviométrique est corrélé au débit.

L'indice de débit de hautes eaux a été calculé selon la formule suivante (Équation 5)[18, 19] :

$$SFI_i = \frac{Q_i - Q_0}{\sigma} \quad (5)$$

avec, SFI_i : indice de débit du mois i ; Q_i : débit moyen du mois i ; Q_0 : normale hydrologique de la période de référence considérée (1961-1990) ; σ : 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 des variables retenues a été réalisée par calage automatique avec le logiciel Excel 2013. Dans la présentation des résultats du calage, il est important d'associer à chacun des coefficients de régression, l'erreur-type, 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.

2-4-3. Évaluation de la qualité des modèles

Pour évaluer la performance des modèles développés, des scores déterministes et des scores de contingence ont été utilisés.

- *Scores déterministes*

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 6**):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) \times (Q'_i - \bar{Q}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q'_i - \bar{Q}')^2}} \quad (6)$$

avec, Q_i : débit mesuré; Q'_i : débit prévu; \bar{Q} : moyenne des débits mesurés; \bar{Q}' : 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 7**) [6 - 8, 12] :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{n}} \quad (7)$$

avec, Q_i : débit observé; Q'_i : débit prévu; n : est 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_{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 8**):

$$R = 100 \times (R_{\text{validation}} - R_{\text{calage}}) \quad (8)$$

- *Scores de contingence*

Pour déterminer les scores de contingence, on classe les indices par ordre croissant. Le premier tiers correspond aux années sèches (période déficitaire), le second tiers aux années proches de la normale (période normale) et le dernier tiers aux années humides (période humide) [18, 19]. Pour permettre

l'évaluation des prévisions, des critères ont été définis : pourcentage de coïncidence (C), probabilité de détection d'une année sèche ou humide (POD), fausse alerte du premier ordre (FAR) et performance du modèle (HSS). Les éléments de base servant au calcul des différents critères sont récapitulés dans la table de contingence (**Tableau 2**) [18, 19].

Tableau 2 : Table de contingence

		Prévisions			Total
		Sèche	Normale	Humide	
Observations	Sèche	N_{11}	N_{12}	N_{13}	$\sum_{j=1}^3 N_{1j}$
	Normale	N_{21}	N_{22}	N_{23}	$\sum_{j=1}^3 N_{2j}$
	Humide	N_{31}	N_{32}	N_{33}	$\sum_{j=1}^3 N_{3j}$
Total		$\sum_{i=1}^3 N_{i1}$	$\sum_{i=1}^3 N_{i2}$	$\sum_{i=1}^3 N_{i3}$	N

La probabilité de détection exprime le pouvoir de détection d'une catégorie donnée de la saison. Si on s'intéresse à une catégorie sèche, la POD (sèche) est le nombre d'années sèches correctement prévues par le modèle, rapporté au nombre total d'années sèches observées (soit le tiers de la série). Elle varie de 0 (mauvaise) à 1 (meilleure) (**Équation 9**):

$$POD(sèche) = \frac{N_{11}}{\sum_{j=1}^3 N_{1j}} \quad (9)$$

Pour une catégorie humide, la POD (humide) est le nombre d'années humides correctement prévues par le modèle, rapporté au nombre total d'années humides observées (soit le tiers de la série). Elle fluctue entre 0 (mauvaise) et 1 (meilleure) (**Équation 10**):

$$POD(humide) = \frac{N_{33}}{\sum_{j=1}^3 N_{3j}} \quad (10)$$

La fausse alerte est le nombre prévu d'une catégorie donnée alors que c'est le contraire qui a été observé, rapporté au nombre total prévu de cette catégorie [18, 19]. En s'intéressant à une catégorie sèche, la FAR (sèche) est le nombre d'années prévues sèches alors qu'elles ont été observées humides, divisé par le nombre total d'années sèches prévues par le modèle. Elle oscille entre 0 (meilleure) et 1 (mauvaise) (**Équation 11**):

$$FAR(sèche) = \frac{N_{31}}{\sum_{i=1}^3 N_{i1}} \quad (11)$$

En ce qui concerne la catégorie humide, la FAR (humide) est le nombre d'années prévues humides alors qu'elles ont été observées sèches, divisé par le nombre total d'années humides prévues par le modèle. Elle va de 0 (meilleure) à 1 (mauvaise) (**Équation 12**):

$$FAR(humide) = \frac{N_{13}}{\sum_{i=1}^3 N_{i3}} \quad (12)$$

Le taux de coïncidence est le pourcentage des catégories correctement prévues par rapport à la taille de l'échantillon (nombre total d'années) (**Équation 13**):

$$C = \frac{\sum_{i=j=1}^3 N_{ij}}{N} \quad (13)$$

Il exprime la performance prévisionnelle du modèle en comparant les prévisions aux observations [18, 19]. Le hit skill score est la valeur ajoutée par le modèle par rapport au hasard [18, 19]. Il est donné par les **Formules** suivantes (**Équations 14, 15**):

$$HSS(\%) = 100 \times \frac{H - t}{N - t} \quad (14)$$

$$HSS(\%) = \frac{\sum_{i=j=1}^3 N_{ij} - \frac{N}{3}}{N - \frac{N}{3}} = \frac{3}{2} \times C - \frac{1}{2} \quad (15)$$

avec, H : nombre de coïncidences entre catégories prévues et observées (la somme des valeurs de la diagonale de la table de contingence); t : nombre de coïncidences pour une table de contingence purement aléatoire (le tiers de la série); n : Taille de l'échantillon.

Ainsi, si un modèle est performant, alors son skill, sa POD et son taux de coïncidence sont grands, et présente des faibles valeurs de FAR.

3. Résultats et discussion

3-1. Identification des prédicteurs performants associés aux données pluviométriques

La période des hautes eaux identifiée comprend les mois de Juillet, Août, Septembre, Octobre et Novembre. Cependant, la période retenue pour l'étude est celle allant d'août à novembre (période ASON). Les coefficients de corrélation entre les cumuls pluviométriques mensuels aux différentes stations pluviométriques retenues pour l'étude et le débit moyen de la période des hautes eaux sont récapitulés dans le **Tableau 3**. Ces résultats montrent que les cumuls pluviométriques mensuels les plus corrélés au débit moyen de la période des hautes eaux sont ceux des stations de Dimbokro et de Dabakala. Par conséquent, les prédicteurs pertinents associés aux données pluviométriques retenues sont les cumuls de pluies mensuelles de la période des hautes eaux des stations de Dimbokro et Dabakala.

Tableau 3 : *Corrélation entre cumuls de pluies mensuelles et débits moyens de la période des hautes eaux (1961 - 2000)*

Stations pluviométriques	Coefficients de corrélation
Dimbokro	0,748
Dabakala	0,714
Tafiré	0,448
Niakaramandougou	0,657
Katiola	0,639
Bongouanou	0,474
Bouaké	0,647
Tiébissou	-0,059

3-2. Résultats du calage des modèles

A l'issue du calage à partir des régressions linéaires, les différentes équations de prévisions saisonnières des débits de hautes eaux obtenues sont (*Équations 16 - 18*):

$$\text{-modèle 1 : } SFI(t+1) = 3,3 \cdot 10^{-3} P_1(t+1) + 2,2 \cdot 10^{-3} P_2(t+1) + 7,8 \cdot 10^{-3} Q(t) - 2,48 \quad (16)$$

$$\text{-modèle 2 : } SFI(t+1) = 3,3 \cdot 10^{-3} P_1(t+1) + 2,2 \cdot 10^{-3} P_2(t+1) - 3,7 \cdot 10^{-3} Q(t-1) + 8,5 \cdot 10^{-3} Q(t) - 2,45 \quad (17)$$

$$\text{-modèle 3 : } SFI(t+1) = 3,5 \cdot 10^{-3} P_1(t+1) + 2,1 \cdot 10^{-3} P_2(t+1) + 2,9 \cdot 10^{-2} Q(t-2) - 10^{-2} Q(t-1) + 8,9 \cdot 10^{-3} Q(t) - 2,60 \quad (18)$$

avec, $P_1(t+1)$: cumul des pluies mensuelles de la période ASON à la station de Dimbokro ; $P_2(t+1)$: cumul des pluies mensuelles de la période ASON à la station de Dabakala ; Q_{t-2} : débit du mois d'Avril ; Q_{t-1} : débit du mois de Mai ; Q_t : débit du mois de Juin.

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

Le **Tableau 4** présente les performances des différents modèles développés en termes de scores déterministes. En calage, de forts coefficients de corrélation entre les valeurs observées et les valeurs prévues, variant entre 0,794 (modèle 1) et 0,800 (modèle 3) avec une moyenne de 0,80 ont été obtenus. Pour ce qui est de la RMSE, elle fluctue entre 0,590 (modèle 3) et 0,598 (modèles 1 et 2) avec une moyenne de 0,59. En validation, de plus forts coefficients de corrélation ont été également obtenus. Ceux-ci vont de 0,856 (modèle 3) à 0,861 (modèle 1) avec une moyenne de 0,86. Quant à la RMSE, elle oscille entre 0,284 (modèle 3) et 0,327 (modèle 1) avec une moyenne de 0,32. Les valeurs des différents critères traduisent des résultats satisfaisants dans l'ensemble. Les différents modèles développés sont donc performants. Des valeurs positives du critère de robustesse ont été obtenues. Ainsi le modèle 1 a enregistré une valeur de + 6,7 %. Quant au modèle 2, il a obtenu une côte de robustesse de + 6,6 %. Enfin, le modèle 3 a obtenu une valeur de robustesse de + 5,6 %.

Tableau 4 : *Performances en termes de scores déterministes des modèles ASON*

Modèles	Calage			Validation		
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Coefficient de corrélation	0,794	0,794	0,800	0,861	0,860	0,856
RMSE	0,598	0,598	0,590	0,327	0,335	0,284

Les scores de contingence des différents modèles sont présentés dans le **Tableau 5**. En phase de calage, il a été enregistré des valeurs du taux de coïncidence qui vont de 67 % (modèles 1 et 2) à 73 % (modèle 3) avec une moyenne de 69 %. Le H.S.S, quant à lui, va de 50 % (modèles 1 et 2) à 60 % (modèle 3) avec une moyenne de 53,3 %. Les critères de POD (POD sèche, POD humide) ont obtenu les mêmes taux quel que soit le modèle (90 %). Des valeurs nulles ont été obtenues au niveau des critères de FAR (FAR sèche et FAR humide) pour tous les modèles. En validation, tous les modèles présentent les mêmes taux de coïncidence (80 %), de POD sèche (67 %), de POD humide (100 %), de FAR sèche (0 %), de FAR humide (0 %) et de H.S.S (70 %).

Tableau 5 : Scores de contingence des modèles ASON

	Calage			Validation		
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
C(%)	67	67	73	80	80	80
POD sèche (%)	90	90	90	67	67	67
POD humide (%)	60	60	70	100	100	100
FAR sèche (%)	0	0	0	00	00	00
FAR humide (%)	0	0	0	00	00	00
H.S.S (%)	50	50	60	70	70	70

Les résultats graphiques confirment les résultats numériques d'évaluation des différents modèles (**Figures 4 et 5**). Les représentations graphiques des indices de débits simulés en fonction des indices de débits observés par les différents modèles montrent que les points sont sensiblement bien répartis le long de la diagonale ($y = x$).

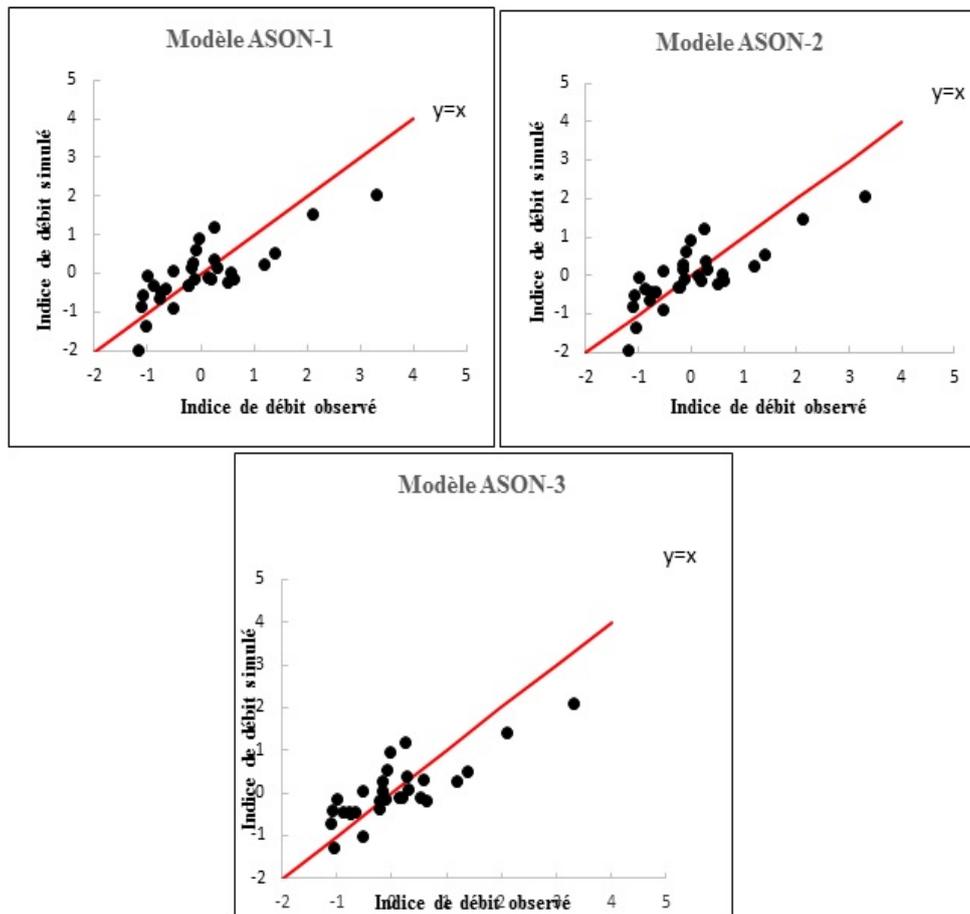


Figure 4 : Indices de débits simulés en fonction des indices de débits observés en calage

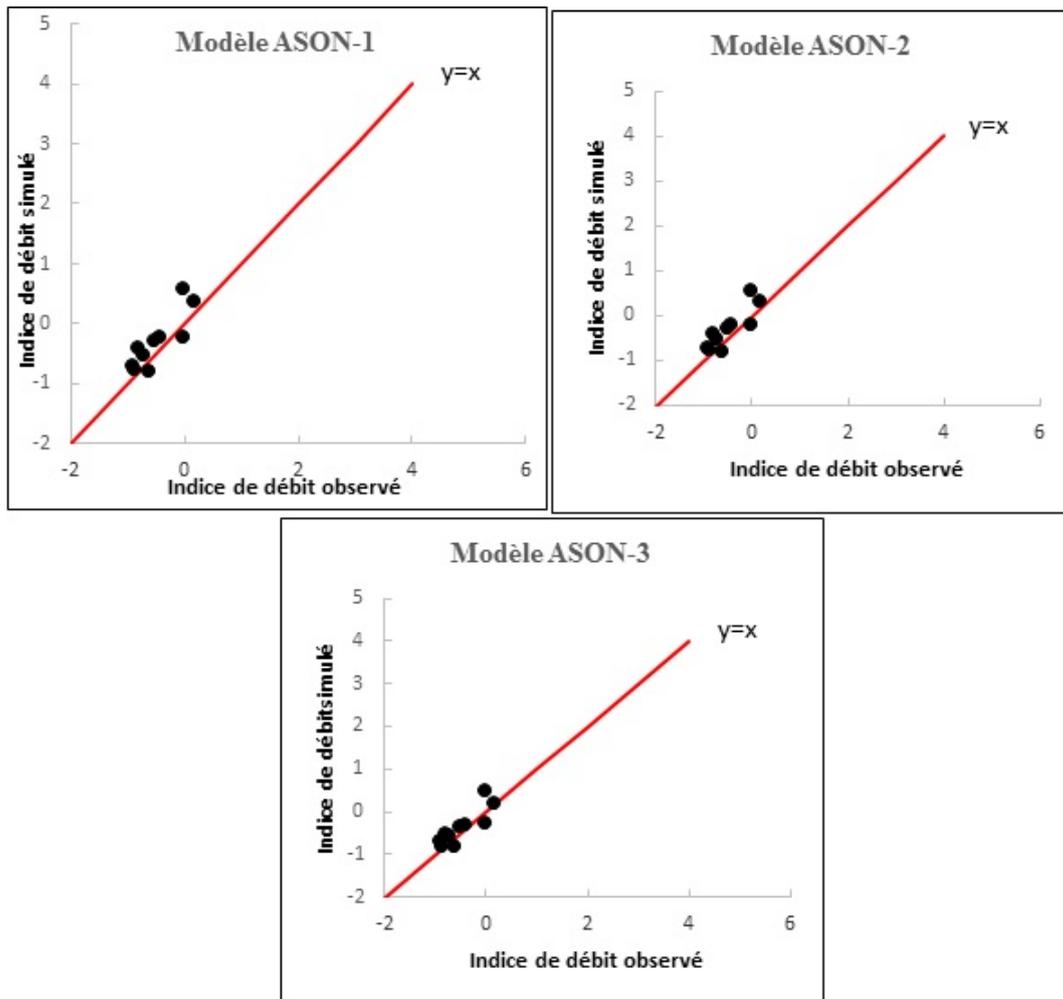


Figure 5 : Indices de débits simulés en fonction des indices de débits observés en validation

3-4. Discussion

Cette étude a permis de développer des modèles statistiques de prévision saisonnière des débits de hautes eaux du N'zi-Bandama basés sur les régressions linéaires multiples. Trois (03) modèles ASON définissant la variable expliquée (le débit à prévoir de la période allant du mois d'août au mois de novembre) ont ainsi été conçus à partir de deux (02) catégories de variables explicatives (la pluviométrie de la période des hautes eaux et les débits moyens des mois précédents la période des hautes eaux). Au regard des résultats des critères d'évaluation de la performance (coefficient de corrélation et RMSE), des scores de contingence, de la robustesse ainsi que des représentations graphiques, il apparaît que les trois (03) modèles sont performants et robustes dans l'ensemble et presque de mêmes performances. Cependant, en considérant la phase de validation, le modèle le plus performant est le modèle 1. Il y a une parfaite harmonie entre les performances en termes de scores déterministes et celles en termes de scores de contingence. Par ailleurs, la performance des modèles développés dans le cadre de cette étude a été comparée à celle des études portant sur la même problématique afin de circonscrire nos travaux dans le contexte ouest africain marqué par les prévisions PRESAO. Ainsi pour le besoin d'une consolidation des prévisions saisonnières des débits, on peut se servir des travaux d'évaluation de prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest réalisés par [18]. Il convient de signifier que ces différents travaux ont suivi la même approche que cette étude, à savoir la régression linéaire pour la conception des modèles statistiques. Cependant, les données utilisées par les modèles de la PRESAO et ceux développés par [19] pour la prévision saisonnière des hautes eaux

sont essentiellement d'origine océanique (anomalies de température de la mer). La période ASON a été prévue par les modèles développés par [19] et par les modèles PRESAO. Une comparaison a été effectuée entre les modèles développés par [19], les modèles PRESAO et ceux conçus au cours de cette étude précisément sur le critère de H.S.S. Le **Tableau 6** présente le maximum, le minimum et la moyenne du critère H.S.S des modèles développés par [19], la PRESAO ainsi que des modèles ASON développés au cours de cette étude en phase de validation. Les performances des modèles varient entre 17 et 50 % pour la PRESAO avec une moyenne de 30 %. Pour [19], le critère HSS varie entre 41 et 53 % avec une moyenne de 49 %. Les modèles ASON conçus au cours de cette étude, avec une valeur de HSS égale à 70 %, sont les plus performants. Ces résultats mettent en évidence la bonne qualité des modèles conçus.

Tableau 6 : Critère H.S.S de modèles de prévisions de hautes eaux en phase de validation

Modèles	Minimum	Maximum	Moyenne
PRESAO	17	50	30
Hamatan et al. [19]	41	53	49
Modèles ASON	70	70	70

4. Conclusion

La période des hautes eaux retenue pour l'étude part du mois d'août au mois de novembre (période ASON). Les prédictors météorologiques pertinents retenus sont les cumuls de pluies mensuelles de la période des hautes eaux des stations de Dimbokro et Dabakala. Les différents modèles développés uniquement à partir de données continentales ont été performants et robustes au regard des scores déterministes et de contingence. Cependant, le meilleur modèle est le modèle 1. Les modèles développés concurrencent les modèles PRESAO basés sur des données de mer. En effet, des modèles développés uniquement à partir de données continentales sont donc capables de prévoir les débits saisonniers dans les mêmes performances voire supérieures que des modèles conçus à partir de données de mer. Il est cependant nécessaire de répéter cette étude sur d'autres bassins afin de confirmer ces premiers résultats.

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 exploitées.

Références

- [1] - OMM, « Manuel sur la prévision et l'annonce des crues ». Rapport OMM-N° 1072, Édition 2011, (2011) 154 p.
- [2] - 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.
- [3] - 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, 26-30th, (2015)

- [4] - A. YAHIAOUI, B. TOUAÏBIA, C. BOUVIER, N. DECHEMI, « Modélisation du régime de crue en Débit - durée - Fréquence du bassin de l'Oued Mekerra dans l'Ouest Algérien ». *Revue des sciences de l'eau*, 24 (2) (2011) 103 - 115
- [5] - J. J. M. BART, V. D. HURK, L. M. BOUWER, « Improving predictions and management of hydrological extremes through climate services ». *Climate Services*, 1 (2016) 6 - 11
- [6] - R. A. RANDRIANASOLO, « Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues ». Mémoire de Master, Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, (2009) 49 p.
- [7] - J. C. BADER, « Prévision saisonnière du débit naturel de crue du fleuve Sénégal à partir des prévisions pluviométriques du modèle de circulation générale de l'atmosphère ARPEGE Evaluation des prévisions effectuées en temps réel de 2005 à 2015 ». Rapport, (2016) 15 p.
- [8] - J. C. BADER, « Prévision saisonnière du débit naturel de crue du fleuve Sénégal à Bakel : Nouvelle adaptation statistique des prévisions saisonnières de pluie produites par Météo France (modèle ARPEGE système 5) sur l'Afrique de l'Ouest ». Rapport, (2017) 21 p.
- [9] - F. JORDAN, « Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue ». Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit, (2007) 284 p.
- [10] - 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.
- [11] - L. BERTHET, E. GAUME, O. PIOTTE, « Evaluer et communiquer les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques pour mieux partager l'information ». *La Houille Blanche*, 4 (2016) 18 - 24
- [12] - 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)
- [13] - R. G. RECEANU, J. A. HERTIG, J. M. FALLOT, « Estimation des crues extrêmes dans les Alpes suisses à l'aide d'un modèle hydrologique distribué ». Actes du 24^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rovereto, Italie, (2011) 501 - 506
- [14] - R. G. RECEANU, J. A. HERTIG, J. M. FALLOT, « Détermination des crues extrêmes dans les bassins alpins Suisses par la méthode PMP-PMF ». Société Hydrotechnique de France (SHF), Paris, France, (2012) 212 - 219
- [15] - R. G. RECEANU, « Simulation fine des précipitations et des crues extrêmes. Application aux petits bassins versants alpins non glaciaires ». Thèse de Doctorat présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne, (2013) 181 p.
- [16] - E. AMOUSSOU, Y. TRAMBLAY, H. S. V. TOTIN, G. MAHÉ, P. CAMBERLIN, « Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin) ». *Hydrological Sciences Journal*, 59 (11) (2014) 2060 - 2071
- [17] - 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.
- [18] - M. HAMATAN, G. MAHE, E. SERVAT, J. E. PATUREL, A. AMANI, « Synthèse et Evaluation des Prévisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest ». *Sécheresse*, 15 (3) (2004) 279 - 286
- [19] - M. HAMATAN, « Synthèse et Evaluation des Prévisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest ». DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental de l'École Doctorale: Sciences de la Terre et de l'Eau de l'Université Montpellier II, (2002) 116 p.

- [20] - 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
- [21] - 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.
- [22] - 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.
- [23] - 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
- [24] - 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