

Caractérisation hydrologique du bassin versant de la Marahoué (Bandama, Côte d'Ivoire)

[Hydrological characterization of the Marahoué watershed (Bandama, Ivory Coast)]

Amani Michel Kouassi¹, Adjoa Victoire Sandrine Assoko², and Koffi Eugène Kouakou¹

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

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

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

ABSTRACT: This study carried out on the Marahoué (Bandama) watershed at the Bouaflé hydrometric station (Côte d'Ivoire) aims to characterize climate variability and its impact on the variations and availability of water resources in the watershed of the Marahoué (Bandama) in Ivory Coast. This characterization was based on the use of rainfall, thermometric and hydrometric (flow) data collected over the period 1961-2017. Thus, several methods were used (standard index of normalization, Lang method and Maillet's law). There is a decrease in precipitation and flow, however the temperature is rising. A low storage capacity of soil reservoirs in the Marahoué watershed (Bandama) has been demonstrated. Thus, low groundwater reserves were evaluated characterized by a low average drying off coefficient of $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$, a short drying period of nearly a month and a low volume of water mobilized by the aquifers of $0,92 \text{ Km}^3$.

KEYWORDS: Ivory Coast, Hydroclimatic indices, Marahoué (Bandama), hydrological methods, Hydroclimatic variability.

RESUME: Cette étude menée sur le bassin versant de la Marahoué (Bandama) à la station hydrométrique de Bouaflé (Côte d'Ivoire) a pour objectif de caractériser la variabilité climatique et son impact sur les variations et la disponibilité des ressources en eau du bassin versant de la Marahoué (Bandama) en Côte d'Ivoire. Cette caractérisation s'est basée sur l'exploitation de données pluviométriques, thermométriques et hydrométriques (débits) collectées sur la période 1961-2017. Ainsi, plusieurs méthodes ont été utilisées (indice standard de normalisation, méthode de Lang et loi de Maillet). Il est constaté une baisse des précipitations et des débits cependant la température est en hausse. Il a été mis en évidence une faible capacité de stockage des réservoirs sols du bassin versant de la Marahoué (Bandama). Ainsi, de faibles réserves souterraines ont été évaluées caractérisées par un faible coefficient de tarissement moyen de $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$, une courte durée de tarissement de près d'un mois et un faible volume d'eau mobilisé par les aquifères de $0,92 \text{ Km}^3$.

MOTS-CLEFS: Côte d'Ivoire, Indices hydroclimatiques, Marahoué (Bandama), Méthodes hydrologiques, Variabilité hydroclimatique.

1 INTRODUCTION

L'Afrique de l'Ouest est soumise à un contexte climatologique varié, fragilisé par les conséquences du réchauffement climatique. Les paramètres climatiques tels que la pluie, la température, l'humidité relative, le vent, l'évapotranspiration, etc. sont considérés comme étant les principaux facteurs déterminant et favorisant plus ou moins les fonctionnements hydrologiques et hydrogéologiques des bassins versants. En effet, la variation de la température constitue un atout ou une contrainte pour l'homme et ses activités [1]. En Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier, diverses études ont mis en évidence des évolutions des températures, des précipitations, des débits dans les cours d'eau et des réserves en eaux souterraines sur les périodes passées [2-11]. L'ampleur et la réalité de ces évolutions dépendent des régions et des conditions hydroclimatiques. Pour les débits, il n'est par ailleurs pas toujours facile

d'établir si l'origine des évolutions constatées est liée à des modifications climatiques ou à des évolutions de l'occupation des sols (imperméabilisation), des pratiques agricoles, etc. Aussi, un des défis de notre siècle serait la disponibilité en quantité et en qualité de l'eau pour la satisfaction des besoins de l'homme. Pour ce faire, une gestion rationnelle des ressources en eau passe par la connaissance des termes du bilan hydrologique.

L'étude de l'évolution climatique à l'échelle d'un territoire ou d'une région est une préoccupation croissante tant pour la communauté scientifique que pour les acteurs territoriaux. Elle vise à caractériser les variations climatiques récentes et futures afin de définir les conséquences de celles-ci sur les ressources en eau dans le but de mettre en place des stratégies d'adaptation sur des échelles spatiales opérationnelles comme le bassin versant. Ces stratégies cherchent à réduire la vulnérabilité d'un tel espace (bassin versant) face aux changements climatiques en général et aux phénomènes extrêmes en particulier (étiages, inondations). Ainsi, les décideurs peuvent être intéressés par les évolutions attendues à échéance de 30 ou 50 ans. Mais, avant de quantifier l'ampleur des évolutions futures, une étape préliminaire est déjà l'établissement d'un diagnostic sur les années passées, à partir des séries de données existantes, afin d'identifier si des tendances ou des modifications sont déjà détectables.

En Côte d'Ivoire à l'image de l'Afrique de l'Ouest, le secteur des ressources en eau est parmi les plus vulnérables à la variabilité du climat, ce qui rend l'évolution de la ressource en eau dans le contexte du changement climatique une question préoccupante. En effet, en Côte d'Ivoire, la ressource en eau est une valeur socio-économique certaine (alimentation en eau potable, agriculture, production d'électricité, industrie, etc.). Le bassin versant de la Marahoué est un sous-bassin du Bandama qui est le seul cours d'eau dont la source se trouve en Côte d'Ivoire. De ce fait, le Bandama constitue la principale source hydrique nourricière de la Côte d'Ivoire et comporte le plus grand nombre d'aménagements hydrauliques. D'où la nécessité d'analyser les variations et les tendances des paramètres hydroclimatiques dans le bassin versant de la Marahoué, affluent du Bandama.

Plusieurs travaux ont été réalisés sur le bassin versant du Bandama. Il ressort de ces travaux que des déficits pluviométriques ont été enregistrés en Côte d'Ivoire et ont engendré des déficits d'écoulement au niveau du bassin versant du Bandama qui s'élèvent à 65% [12]. Kouassi *et al* [10] ont également réalisé des travaux sur le bassin versant du Bandama à partir de données couvrant la période 1951-2015. Les principaux résultats de l'analyse climatique montrent que le bassin versant du Bandama connaît une variabilité pluviométrique marquée par une longue période sèche amorcée à partir des années 1970 et une reprise de la tendance pluviométrique humide caractérisée par la rupture des années 1999-2000. Les déficits pluviométriques de la rupture de 1970 varient entre 15% et 30% pour toutes les stations. La rupture de 1999-2000, présente des variations pluviométriques qui ne sont pas homogènes sur le bassin du Bandama. Des variations excédentaires sont enregistrées au Sud et au Centre à l'exception de la station de Bouaké, et fluctuent entre 5% et 14%. Les stations du Nord par contre présentent des déficits pluviométriques de plus en plus faibles qui évoluent entre 17% et 27%. Les résultats de la caractérisation hydrologique réalisés par Kouassi *et al* [13] ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité hydrologique observée dans le bassin versant du Bandama. Les différents paramètres hydrologiques analysés varient au cours des années et décrivent une tendance régressive marquée par une rupture très significative en 1980-1981. Les déficits hydrologiques évalués fluctuent entre 15% (potentiel d'infiltration) et près de 60% (potentiel de ruissellement) en passant par 16% pour la pluie moyenne et 31% pour la pluie efficace. La baisse de la pluviométrie a, bien entendu, des conséquences sur la disponibilité des ressources en eau dans un bassin versant aussi vital.

L'objectif de cette étude est donc de caractériser la variabilité climatique récente et son impact sur les variations et la disponibilité des ressources en eau du bassin versant de la Marahoué, sous-bassin du bassin versant du Bandama.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de la Marahoué (Bandama rouge) est situé en Côte d'Ivoire entre les longitudes 5°5' et 7°1' Ouest et les latitudes 6°7' et 9°5' Nord (Fig. 1). Il a une superficie de 24300 km² (25% de la superficie totale du bassin versant du Bandama). La Marahoué est l'affluent rive droite le plus important du Bandama. Le cours d'eau principal, la Marahoué est encadré par deux affluents: le Béré à l'Est et le Yani ou Bahoroni à l'Ouest, il se jette dans le Bandama blanc à l'endroit où se trouve le village de Bozi, peu après la ville de Bouaflé.

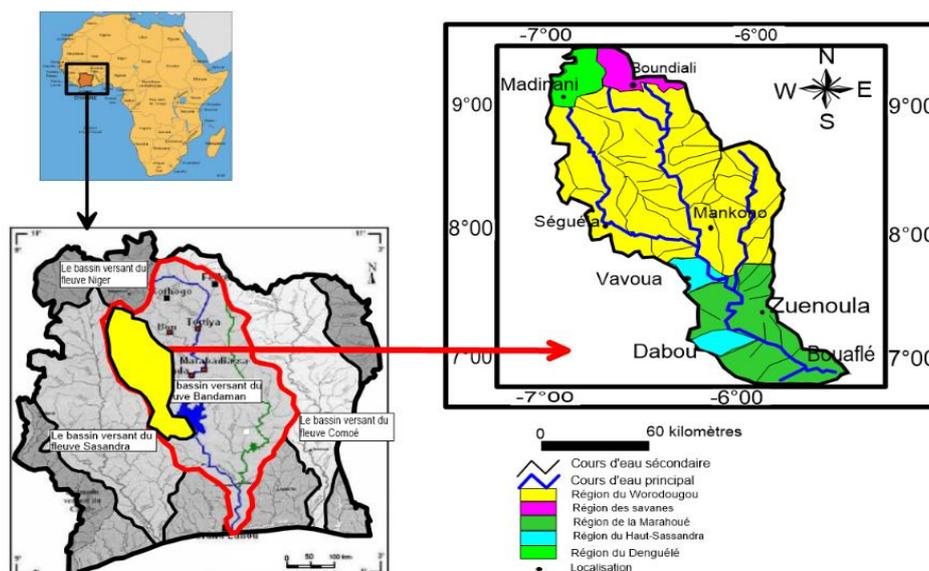


Fig. 1. Localisation géographique du bassin versant de la Marahoué (Bandama)

Les régimes climatiques observés sur le bassin de la Marahoué sont le régime tropical de transition (climat soudanais) dans la partie nord et le régime équatorial de transition atténué (climat baouléen) dans la partie sud. En effet, le climat soudanais (Boundiali) est caractérisé par des pluies annuelles généralement inférieures à 1200 mm. Il s'agit d'un régime unimodal à deux saisons. Une saison pluvieuse de sept (7) mois allant d'avril à octobre avec le pic en août et une saison sèche qui va de novembre à mars, soit cinq (5) mois. Le trimestre le plus pluvieux est le JAS (juillet-août-septembre). Le climat baouléen (Bouaflé) est marqué par des pluies annuelles comprises entre 1200 et 1600 mm. C'est un régime climatique bimodal à deux saisons. Le pic le plus important est celui de septembre suivi de celui de juin. Ce régime est défini par une saison pluvieuse de huit (8) mois allant de mars à octobre et une saison sèche de quatre (4) mois qui va de novembre à février.

Le bassin de la Marahoué se caractérise par une végétation savanicole dans le Centre et une végétation préforestière dans la partie sud. Le relief du bassin est caractérisé des plateaux accidentés dans le Nord-Ouest (400 m). Plus au Sud, on a un ensemble assez homogène de plateaux (3 à 400 m) (Mankono-Séguéla). La région septentrionale est caractérisée par des reliefs isolés. Le bassin de la Marahoué est dominé par des sols ferrallitiques. La géologie de la Marahoué fait partie intégrante du domaine Baoulé-Mossi appelé également domaine protérozoïque de la dorsale de Man. Il est situé à l'Est de la faille de Sassandra. Schématiquement, il se présente comme un ensemble de gneiss formant le socle des formations supracrustales d'origine volcanique, subvolcanique, et sédimentaire mises en place ou déposées au sein de nombreux sillons ou bassins intracratoniques, dans lesquels se sont mis en place les granites du cycle éburnéen. Ces éléments (végétation, relief, types de sol, etc.) définissent les conditions physiques de l'écoulement.

Le régime hydrologique de la Marahoué (Bandama) à Bouaflé met en évidence une période des hautes eaux allant du mois d'août au mois de novembre (ASON) et une période de basses eaux qui va de janvier à avril (JFMA). La période de moyennes eaux se situe entre mai et juillet et prend en compte le mois de décembre.

2.2 DONNÉES

Les données climatiques (pluviométrie et température) ont été mises à notre disposition par la société de météorologie nationale (SODEXAM: Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique). Le réseau pluviométrique sélectionné pour cette étude compte dix (10) postes (Béoumi, Bouaflé, Boundiali, Dianra, Kani, Madinani, Mankono, Séguéla, Vavoua et Zuenoula). Les données de pluviométrie mensuelle utilisées concernent la période 1961-2017. Les lacunes au sein des séries de données de pluie ont été comblées à partir des données de réanalyse. Les pluies moyennes annuelles au niveau des différentes stations retenues varient entre 1053 et 11405 mm avec une moyenne de 1196 mm.

Les données de température mensuelle ont été collectées aux stations synoptiques de Korhogo, Odienné, Daloa et Yamoussoukro sur la période 1961-2017. Les lacunes au sein des séries de données de température ont été également comblées à partir des données de réanalyse. Les valeurs moyennes annuelles calculées vont de 25 à 27 °C avec une moyenne de 26 °C et un écart-type de 0,39 °C.

Les données hydrométriques ont été fournies par la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH), Sous-Direction de l'Hydrologie et s'étendent sur la période 1961-2017. La station étudiée est celle de Bouaflé. Cette station hydrométrique

sélectionnée est représentative pour traduire de manière significative, le caractère climatique et physiographique du bassin versant de la Marahoué (Bandama). La méthode de la proportionnalité analogue a permis de simuler les données manquantes au sein de la série des débits mensuels utilisés à partir des données de la station hydrométrique de Béoumi-Séguéla, située en amont de la station de Bouaflé. Les modules calculés après comblement des lacunes, oscillent entre 2,89 m³/s et 151,57 m³/s avec une moyenne de 65,13 m³/s et un écart-type de 33,42 m³/s.

2.3 MÉTHODES APPLIQUÉES

2.3.1 VARIATIONS ET TENDANCES DES PARAMÈTRES HYDROCLIMATIQUES

Les variations et les tendances temporelles des paramètres hydroclimatiques ont été analysées à partir de graphes simples et d'indices normalisés. L'indice standard de normalisation (SI_i) a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires d'une variable donnée. Il se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation 1:

$$SI_i = \frac{X_i - X_0}{\mu} \quad (1)$$

Avec :

- X_i: valeur de la variable de l'année i;
- X₀: valeur moyenne interannuelle de la variable sur la période étudiée;
- μ: valeur interannuelle de l'écart-type de la variable sur la période étudiée.

2.3.2 CARACTÉRISATION DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS

Lang [14] a mis en place une méthode (méthode de Lang) basée sur les corrélations entre cumuls de précipitations et débits en période d'étiage permettant d'analyser la capacité de stockage des réservoirs souterrains dans un bassin versant donné. En effet, un lien a été établi entre les débits de basses eaux et les cumuls de pluies des périodes de hautes eaux et basses eaux. En effet, 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 et vont permettre de soutenir les débits durant les périodes sèches [14-17]. Les précipitations constituent le facteur climatique déterminant pour les débits extrêmes (crues et étiages). Les précipitations mensuelles enregistrées avant la période de basses eaux jouent donc un rôle déterminant pour évaluer l'état des réservoirs souterrains. Les séquences sans précipitations observées durant la saison sèche peuvent être considérées comme un facteur aggravant. Les précipitations mensuelles intéressantes permettent d'expliquer que les débits d'étiage sont celles qui se produisent durant la période de recharge des nappes. En intervenant dans le fonctionnement des bassins versants, les cumuls de précipitations permettent d'évaluer les volumes d'eau stockés durant une période. En effet, ce fonctionnement ne concerne que les bassins versants qui bénéficient d'aquifères conséquents [14]. Pour ceux développés dans des milieux imperméables ou pour ceux qui connaissent des abats pluviométriques trop abondants, aucune corrélation significative entre les pluies cumulées et les débits de basses eaux n'est établie [14]. Les débits de basses eaux sont influencés par les précipitations de ladite période pour les bassins versants pas très perméables [14]. Les bassins imperméables ou très arrosés sont très réactifs aux apports pluviométriques. Pour ces bassins, la sévérité des débits d'étiage s'explique davantage par les précipitations observées durant la période d'étiage elle-même. Cette analyse rappelle toute la complexité du phénomène de l'étiage et la difficulté à l'appréhender [14]. Elle s'avère intéressante dans un contexte opérationnel de prévision des débits d'étiage car elle montre dans quelle mesure, pour certains bassins, il est impossible de réaliser des prévisions à long terme, c'est-à-dire à échéance de plusieurs mois. Aussi, les débits de basses eaux dépendent des débits de la précédente période des hautes eaux. Ainsi, des corrélations ont été établies entre les débits moyens mensuels de la période des basses eaux et les cumuls des précipitations des périodes de hautes et basses eaux. Les cumuls des précipitations des périodes de hautes eaux et de basses eaux sont calculés de façon progressive du premier au dernier mois de ladite période. Les débits moyens de la période des basses eaux sont calculés de façon progressive du premier au dernier mois de ladite période.

L'évaluation de la réserve en eau souterraine a été réalisée à partir de la loi de Maillet. Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique tropical [5]. Le calcul du coefficient de tarissement est basé sur le modèle de Maillet qui a déjà été utilisé par d'autres auteurs [5, 18]. Dans cette approche, la courbe annuelle de tarissement est l'expression de la vidange du réservoir souterrain. Le modèle de Maillet admet qu'en régime non influencé c'est-à-dire en l'absence de toute précipitation, le tarissement correspond à la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps. En effet, on définit le tarissement comme étant la décroissance du débit d'eau souterraine allant aux eaux de surface pendant les périodes sans alimentation, due à la diminution de la réserve d'eau souterraine et exprimée par la courbe de tarissement. En d'autres termes, c'est la période pendant laquelle la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau d'un bassin. Le coefficient de tarissement permet d'apprécier l'état des « entrées » d'eau

qui contribueraient à la modification apparente des relations pluie/débit observées sur les bassins fluviaux [18]. Il permet ainsi de comparer l'évolution de l'eau de surface et le stockage de l'aquifère afin de mieux cerner le comportement du réservoir de vidange. Le coefficient de tarissement (k) dépend des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère. L'expression du modèle de Maillet est la suivante (équation 7):

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (7)$$

Avec:

- Q_t (m^3/s): débit à l'instant t ;
- Q_0 (m^3/s): débit au début du tarissement;
- k : coefficient de tarissement de Maillet;
- t : temps en jour.

Le coefficient de tarissement de Maillet (k) a été obtenu par résolution de l'équation 8 qui s'exprime comme suit [5]:

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Q_0} - \frac{1}{k} = 0 \quad (8)$$

On peut formuler l'expression de la durée de tarissement (T) exprimée en jours par l'équation 9 [5, 18]:

$$T = \frac{1}{k} \quad (9)$$

Pour la représentation des courbes de tarissement, on part du débit moyen mensuel le plus élevé de l'année (Q_0) et on reporte en abscisse les débits mesurés tous les 30 jours (1 mois), jusqu'à ce qu'ils remontent de façon significative. Les courbes de tarissement vont correspondre aux périodes pendant lesquelles le débit décroît de façon plus ou moins régulière (régime non influencé), c'est-à-dire en absence de toute précipitation.

Le volume d'eau mobilisé par l'ensemble des aquifères du bassin versant est donné par l'équation 10 [5]:

$$V_{mobilisé} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{86400 \times Q_0}{k} \quad (10)$$

Avec Q_0 exprimé en m^3/s et k en $jours^{-1}$.

Le modèle de Maillet a permis de déterminer sur le bassin versant de la Marahoué (Bandama) le coefficient de tarissement, la durée de tarissement et le volume d'eau mobilisé par les aquifères.

Les différents calculs et représentations graphiques, effectués au cours de cette étude, ont été réalisés sous le tableur Excel.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 VARIATIONS ET TENDANCES DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (Bandama) est comprise entre 703,3 (1983) et 1577,3 (1963) mm avec une moyenne de 1192 mm et un écart type de 176,6 mm. Une tendance à la baisse des précipitations a été mise en évidence (Fig. 2). Cependant, on peut définir trois périodes. D'abord une période humide entre 1961 et 1975. Ensuite, une période normale de 1976 à 1998, marquée par des épisodes sèches (1981-1986; 1990-1993). Enfin, une période sèche qui va de 1999 à 2017.

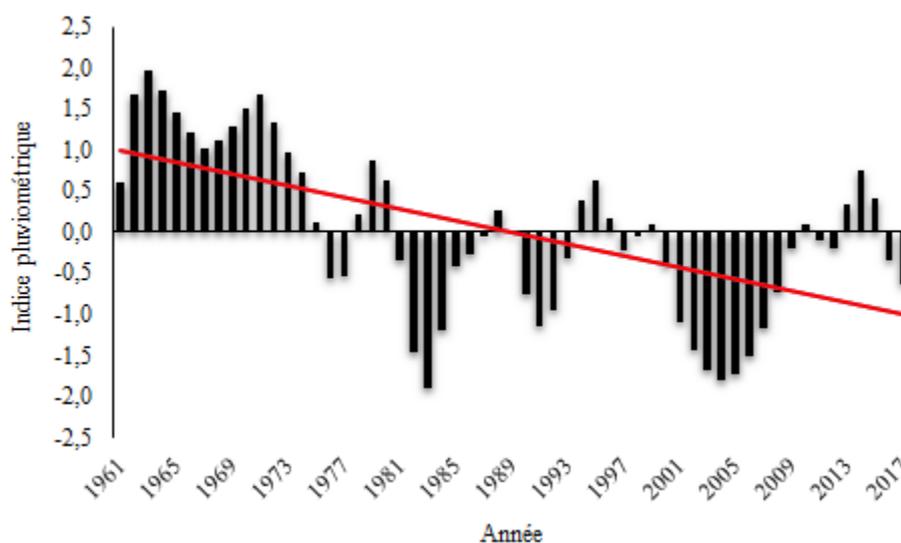


Fig. 2. Indices pluviométriques annuels du bassin versant de la Marahoué (Bandama) (1961-2017)

La température moyenne annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (Bandama) est comprise entre 25,3 et 27,0°C avec une moyenne de 26,1°C et un écart type de 0,39°C. Il est observé une croissance graduelle de la température sur toute la période 1961-2017 (Fig. 3), ce qui indique une nette tendance au réchauffement. Il est constaté deux phases dans l'évolution de la température. Une première phase allant de 1961 à 1996 au cours de laquelle les indices thermiques annuels sont négatifs et une seconde phase (1997-2017) marquée par des indices thermiques positifs.

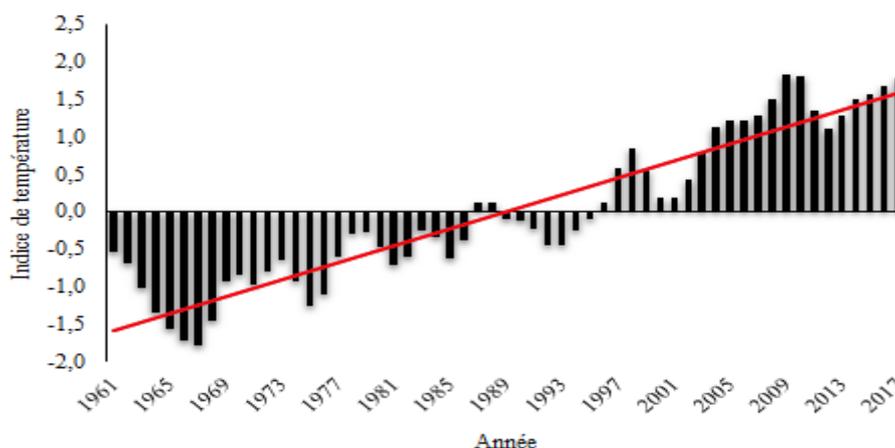


Fig. 3. Indices thermiques annuels du bassin versant de la Marahoué (Bandama) (1961-2017)

3.2 VARIATIONS ET TENDANCES INTERANNUELLES DU DÉBIT

Les indices de débit calculés sont illustrés par la figure 4. Le graphe met en évidence une tendance générale à la baisse des débits d'écoulement de la Marahoué (Bandama). Cependant, on peut identifier une période humide (1961-1971), une période sèche (1972-2007) et une période normale à tendance humide (2008-2017). La période 1961-2017 est caractérisée par une prédominance d'années déficitaires. Toutefois la nouvelle période humide présente dans son ensemble des valeurs inférieures à celle de la période 1961-1970.

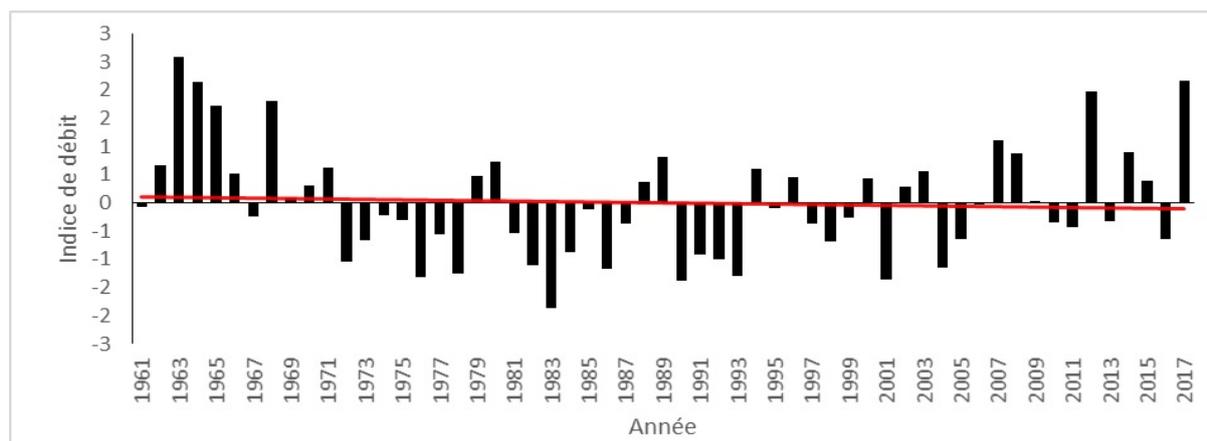


Fig. 4. Variation des indices de débits sur la Marahoué (Bandama) de 1961 à 2017

3.3 ANALYSE DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS

3.3.1 ANALYSE DE LA FONCTION CAPACITIVE DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS

Les coefficients de corrélation enregistrés entre les cumuls pluviométriques mensuels des périodes des hautes eaux et les débits moyens des périodes de basses eaux à la station de Bouaflé ont mis en évidence un taux de 40% de coefficients de corrélation supérieur au seuil de coefficient de corrélation significatif (0,5) (Tableau 1). Les cumuls pluviométriques ne sont donc pas bien corrélés aux débits moyens de la période des basses eaux. Mais, le cumul pluviométrique de toute la période des hautes eaux (P-août-novembre) est relativement plus corrélé (0,50-0,52) aux débits moyens de basses eaux que les autres cumuls pluviométriques (0,32-0,47).

Tableau 1. Corrélation entre cumuls de pluie des périodes des hautes eaux et débits moyens de basses eaux à la station de Bouaflé (1961-2017)

	P-août	P-août-septembre	P-août-octobre	P-août-Novembre
Q-janvier-mars	0,32	0,39	0,46	0,51
Q-février-avril	0,34	0,40	0,44	0,50
Q-janvier-avril	0,33	0,41	0,47	0,52
Q-février-mars	0,35	0,41	0,46	0,51

Les coefficients de corrélation entre les cumuls pluviométriques mensuels de la période des basses eaux et les débits moyens de ladite période à la station de Bouaflé mettent en évidence un taux de 0% de coefficients de corrélation supérieur au seuil de coefficient de corrélation significatif (0,5) (Tableau 2).

Tableau 2. Corrélation entre cumuls de pluie et débits moyens de la période de basses eaux à la station de Bouaflé (1961-2017)

	P-janvier-mars	P-février-avril	P-janvier-avril	P-février-mars
Q-janvier-mars	0,28	0,09	0,23	0,11
Q-février-avril	0,43	0,32	0,40	0,29
Q-janvier-avril	0,34	0,20	0,33	0,19
Q-février-mars	0,41	0,21	0,36	0,24

3.3.2 ANALYSE DE LA RÉSERVE SOUTERRAINE DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ

Le coefficient de tarissement moyen proportionnel à la vitesse de vidange de l'aquifère dans le bassin versant de la Marahoué (Bandama) déterminé sur la période 1961-2017 est de $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ (Fig. 5). La durée moyenne de tarissement en absence de précipitations évaluée est de 29,4 jours soit près d'un mois. Le volume d'eau mobilisé par les aquifères évalué sur la période 1961-2017 est de $0,92 \text{ Km}^3$ correspond à une valeur de $0,74 \text{ km}^3$.

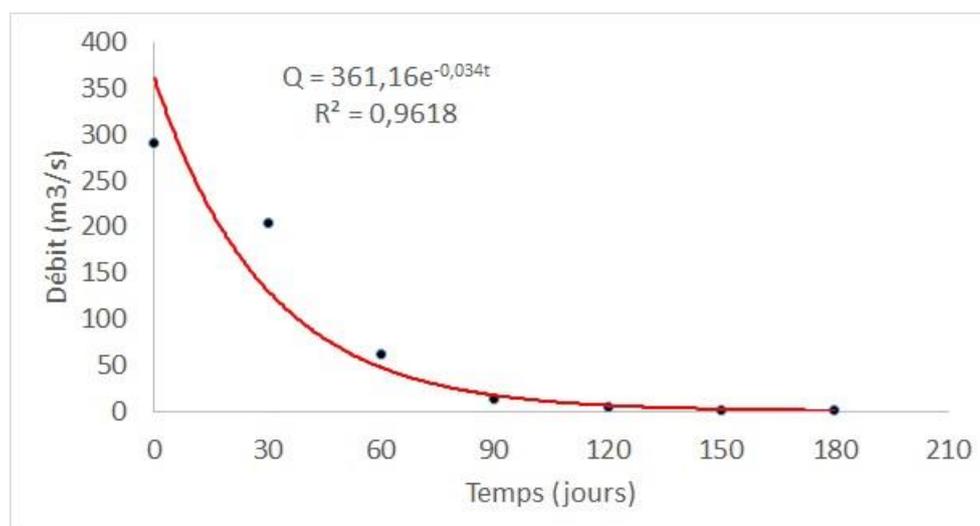


Fig. 5. Courbe de tarissement de la Marahoué (Bandama) de 1961 à 2017

3.4 DISCUSSION

Une analyse des séries de paramètres climatiques moyens du bassin versant de La Marahoué (Bandama) (précipitation et température) au pas de temps annuel sur la période 1961-2017 a été effectuée. Il ressort que la variabilité climatique se manifeste au niveau du bassin versant de la Marahoué (Bandama) par la baisse des hauteurs de précipitation et la hausse de la température. Il est cependant constaté une tendance à la reprise des précipitations traduite par des indices pluviométriques positifs au cours de la décennie 2010. Les résultats obtenus confirment le fait que la décennie 1990 a été déclarée la décennie la plus chaude du 20^{ème} siècle. Depuis cette décennie, la croissance de la température a pris une allure plus accentuée. On peut donc dire que le bassin versant de la Marahoué (Bandama) connaît un problème de réchauffement climatique. Les corrélations fortes mises en évidence entre la température et le temps, suggère une croissance future de ce paramètre climatique. Les résultats obtenus confirment ceux obtenus par plusieurs auteurs [6, 9, 10, 11]. Les travaux de Kouassi *et al* [10], réalisés sur l'ensemble du bassin versant du Bandama, sur la période 1951-2015, ont montré que le bassin versant du Bandama connaît une variabilité pluviométrique marquée par une longue période sèche amorcée à partir des années 1970 et une reprise de la tendance pluviométrique humide caractérisée par la rupture des années 1999-2000. Les déficits pluviométriques de la rupture de 1970 varient entre 15% et 30% pour toutes les stations. La rupture de 1999-2000, présente des variations pluviométriques qui ne sont pas homogènes sur le bassin du Bandama. Des variations excédentaires sont enregistrées au Sud et au Centre à l'exception de la station de Bouaké, et fluctuent entre 5% et 14%. Les stations du Nord par contre présentent des déficits pluviométriques de plus en plus faibles qui évoluent entre 17% et 27%.

La baisse de la pluviométrie et le réchauffement climatique constatés influencent-ils les débits de la Marahoué (Bandama) ?

Une analyse des débits de la Marahoué (Bandama) au pas de temps annuel (modules) sur la période 1961-2017 a permis de mettre en évidence une baisse des débits conformément aux précipitations. Il est également constaté une tendance à la hausse des débits au cours de la décennie 2010 traduite par des indices standardisés de débits positifs. La variabilité climatique constatée influence donc les débits d'écoulement des cours d'eau. Kouassi *et al* [13] ont mené des travaux visant à analyser les modifications induites par la variabilité pluviométrique sur le comportement hydrologique du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire à partir des variables telles que la pluie efficace, le potentiel de ruissellement et le potentiel d'infiltration calculés sur la période 1951-2015. L'application de l'indice standard de normalisation et de deux tests de rupture (test de Pettitt et méthode de segmentation de Hubert) à ces variables a permis de montrer que les différents paramètres hydrologiques analysés varient au cours des années et décrivent une tendance régressive marquée par une rupture très significative en 1980-1981. Les déficits hydrologiques évalués fluctuent entre 15% (potentiel d'infiltration) et près de 60% (potentiel de ruissellement) en passant par 16% pour la pluie moyenne et 31% pour la pluie efficace.

Quelle est la capacité des réservoirs souterrains supposés soutenir les écoulements de surface dans un contexte de baisse de la pluviométrie et des débits ainsi que de la hausse des températures dans le bassin versant de la Marahoué (Bandama) ?

Les faibles corrélations obtenues entre d'une part les cumuls de précipitations mensuelles de la période des hautes eaux et les débits de basses eaux et d'autre part, entre les cumuls de précipitations mensuelles de la période des basses eaux et les débits de basses eaux témoignent de la faible capacité de stockage des réservoirs sols du bassin versant de la Marahoué (Bandama). Ces résultats s'inscrivent dans la même logique que ceux obtenus par Lang (2007). Le pas de temps utilisé dans cette étude est de 30 jours contrairement aux

études antérieures où le pas était de 10 jours [3, 5, 7, 19, 21]. Goula *et al* [3] ont obtenu des valeurs de coefficient de tarissement allant de 3.10^{-2} à $4.10^{-2}j^{-1}$ dans le bassin versant du Sassandra à la station de Kahin, Savané *et al* [19]. ont abouti à des valeurs de $5,7.10^{-2}j^{-1}$ dans le bassin versant du Cavally à la station de Flampeu et $3,6.10^{-2}j^{-1}$ dans le bassin versant du Sassandra à la station de Man. Les résultats des travaux de Kouassi *et al* [13]. sur le bassin versant du N'zi (Bandama) aux stations hydrométriques de M'bahiakro, Bocanda, Dimbokro et N'zianoua, ont donné des valeurs moyennes de coefficient de tarissement variant entre 3.10^{-2} (M'bahiakro) et $4.10^{-2}j^{-1}$ (N'zianoua). Les valeurs du coefficient de tarissement obtenues par Soro *et al*. [7, 8] sur le bassin versant du Bandama à Tortya se situent entre $1,63.10^{-2}j^{-1}$ et $8,16.10^{-2}j^{-1}$ avec une moyenne de $3,84.10^{-2}j^{-1}$. Les valeurs moyennes du coefficient de tarissement de la Marahoué à Zuénoula (1982-2004) et à Bouaflé (1955-2004) sont respectivement de $2,31.10^{-2}j^{-1}$ et $2,28.10^{-2}j^{-1}$ [21]. Le coefficient moyen annuel de tarissement du fleuve Bagoé a été estimé à $0,032j^{-1}$ par Adja *et al* [22]. Les résultats obtenus au cours de cette étude ($3,4.10^{-2}j^{-1}$) s'inscrivent bien dans les intervalles des valeurs obtenues sur les principaux bassins versants de la Côte d'Ivoire. La durée moyenne de tarissement obtenue par Kouassi *et al* [5]. sur le bassin versant du N'zi (Bandama) oscille entre 25 et 33 jours. La valeur obtenue sur le bassin versant de la Marahoué (29 jours) s'intercale bien dans cet intervalle. Les résultats du bassin versant du N'zi viennent conforter ceux obtenus dans le bassin versant de la Marahoué dès lors que les deux bassins constituent des sous-bassins du grand bassin versant du Bandama. Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères du N'zi (Bandama) évalués par Kouassi *et al* [5]. varient entre 0,61 et 0,64 Km^3 . Après 1968, les volumes mobilisés par les aquifères fluctuent entre 0,36 et 0,49 Km^3 . Ces volumes sont fonction de la superficie des bassins. Ainsi, les volumes d'eau mobilisés par Km^2 au niveau du N'zi (Bandama) vont de $1,8.10^{-5}$ à $4.10^{-5} Km^3$. Les valeurs moyennes du volume d'eau mobilisé par les aquifères du bassin versant de la Marahoué à Zuénoula (1982-2004) et à Bouaflé (1955-2004), sont respectivement de $1,33 km^3$ ($2,12.10^{-5} km^3/km^2$) et $1,90 km^3$ ($7,8.10^{-5} km^3/km^2$) [22]. Quant aux volumes mobilisés, les valeurs vont de $0,08 km^3$ à $2,71 km^3$ ($1,9.10^{-4} km^3/km^2$) [7, 8]. Le volume moyen interannuel d'eau mobilisé par les aquifères du bassin versant de la Bagoé a été évalué à environ $0,71 km^3$ ($2,12.10^{-5} km^3/km^2$) à la station hydrométrique de Kouto (exutoire) selon les travaux de Adja *et al* [22]. Quant au bassin versant de la Marahoué (Bandama), le volume d'eau mobilisé par Km^2 au cours de cette étude est de $3,8.10^{-5} Km^3$. Cette valeur s'inscrit normalement dans l'intervalle obtenu par Kouassi *et al* [5]. sur le bassin versant du N'zi (Bandama). Il y a donc de façon générale une concordance des résultats obtenus sur le bassin versant de la Marahoué (Bandama) par rapport aux résultats des travaux antérieurs sur les principaux bassins versants fluviaux de la Côte d'Ivoire en ce qui concerne le coefficient de tarissement, la durée de tarissement et le volume d'eau mobilisé par les aquifères. Ainsi, le fort coefficient de tarissement, la rapidité du tarissement et les faibles volumes d'eau mobilisés, amènent à dire que les nappes qui alimentent le fleuve Marahoué (Bandama) sont dans des aquifères de faible capacité. D'où la faiblesse des quantités d'eau déversées dans les cours d'eau par les nappes souterraines. En effet, le bassin est couvert de formations géologiques très consolidées. De ce fait, la présence d'eau souterraine est conditionnée par l'existence de fractures d'où la présence d'aquifères discontinus qui contiennent de l'eau dans de faibles proportions (Kouassi *et al.*, 2013). On peut donc conclure que le pas de temps utilisé n'a pas influencé de façon significative les résultats de cette étude.

Les résultats issus de la loi de Maillet sont en adéquation avec ceux obtenus par l'application de la méthode de Lang [14] au cours de cette étude. Cette méthode, relativement simple, basée uniquement sur des corrélations de cumuls de pluie (périodes de hautes eaux et de basses eaux) et de débits moyens (période de basses eaux), a permis de confirmer les résultats de l'application de la loi de Maillet, communément utilisée par les hydrologues. Cependant, cette approche est limitée par le fait qu'elle donne qu'une appréciation qualitative contrairement à la loi de Maillet qui permet de quantifier les paramètres de caractérisation des réservoirs souterrains. Elle peut dès lors constituer un outil de premier niveau d'appréciation des capacités des réservoirs souterrains.

La baisse des précipitations et des débits combinée à la hausse de la température, constatées dans le bassin versant de la Marahoué (Bandama), sont de nature à amplifier l'amenuisement des réserves souterraines déjà faibles [5].

4 CONCLUSION

L'objectif de cette étude était la caractérisation climatique et hydrologique du bassin versant de la Marahoué (Bandama) à la station hydrométrique de Bouaflé (Côte d'Ivoire). Les résultats obtenus suite à la combinaison d'approches climatiques, statistiques et hydrologiques, ont permis de mettre en évidence une baisse des précipitations et des débits cependant la température connaît une hausse monotone. Les réserves souterraines évaluées sont faibles avec un coefficient de tarissement moyen de $3,4.10^{-2}j^{-1}$, une durée moyenne de tarissement de près d'un mois et un volume d'eau mobilisé par les aquifères de $0,92 Km^3$ $0,74 km^3$. La variabilité climatique constatée ainsi que les variations hydrologiques évaluées sont de nature à amplifier l'amenuisement des réserves souterraines déjà faibles. Dans un tel contexte, il est nécessaire d'analyser les comportements hydrométriques extrêmes afin de définir des seuils d'extrêmes hydrométriques pouvant servir d'alertes précoces auprès des populations pour une anticipation sur les phénomènes extrêmes tels que les inondations, les étiages, etc.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient d'abord les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient ensuite la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH), Sous-Direction de l'Hydrologie pour leur avoir fourni les données de débits utilisées. Enfin, des remerciements sont portés auprès de la SODEXAM pour leur avoir fourni les données de pluie et de température utilisées dans cette étude.

REFERENCES

- [1] Oussou S.C., Boko N.P.M., Ogouwalé E., « Mise en évidence de la significativité des tendances thermométriques au Bénin. », *Annales de la faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Université d'Abomey-Calavy, Bénin*, vol. 11, n°17, pp.197-207, 2011.
- [2] Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., Djé K.B., Paturel J.E., Sekouba O., « Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. », *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, mis en ligne le 07 décembre 2010. URL: <http://cybergeo.revues.org/index23388.html>2010.
- [3] Goula B.T.B., Soro G.E., Kouassi W., Srohourou B., « Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). », *Hydrological Sciences Journal*, vol.57, n°6, pp.1067-1080, 2012.
- [4] Kouakou K.E., Goula B.T.A., Kouassi A.M., « Analyze of climate variability and change impacts on hydroclimate parameters: case study of Ivory Coast », *International Journal of Scientific & Engineering Research*, n°3, pp.1-8, 2012.
- [5] Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley M.B., Biemi J., « Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). », *Larhyss Journal*, vol. n°16, pp.121-138, 2013.
- [6] Soro T.D., Soro N., Oga Y.M.S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K.E., Biemi J., « La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). », *Physio-Géo*, n°5, pp.55-73, 2013a.
- [7] Soro T.D., Djé K.B., Ahoussi K.E., Soro G., Kouassi A.M., Kouadio K.E., Oga Y.M.S., Soro N., « Climate variability impact on groundwater resources in the Highest Bandama watershed at Tortiya (Northern Côte d'Ivoire). », *American Journal of Environmental Protection*, vol.2, n°4, pp.103-112, 2013b.
- [8] Soro T.D., Djé K.B., Ahoussi K.E., Soro G., Kouassi A.M., Kouadio K.E., Oga Y.M.S., Soro N., « Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). », *Vertigo*, la revue électronique en sciences de l'environnement, vol.13, n°3, pp.1-22, 2013c.
- [9] Fossou R.M.N., Lasm T., Soro N., Soro T., Soro G., De lasme O.Z., Baka D., Onetié O.Z., Orou R., « Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines: cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). », *Larhyss Journal*, n°21, pp.87-110, 2014.
- [10] Kouassi A.M., Assoko A.V.S., Djé K.B., Kouakou K.E., Kouamé K.F., Biemi J., « Analysis of the persistence of drought in West Africa: Characterization of the recent climate variability in Ivory Coast. », *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, vol.1, n°2, pp.47-59, 2017a.
- [11] Soro G., Ahoussi K.E., Traoré A., Soro N., « Impacts de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le «V» Baoulé (centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000 sur les ressources en eau. », *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, vol.2, n°3, pp.7-10, 2017.
- [12] Doumouya I., Kamagaté B., Bamba A., Ouédraogo M., Ouattara I., Savané I., Goula B.T.A. et Biémi J., « Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau et végétation du bassin versant du Bandama en milieu intertropical (Côte d'Ivoire) ». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, n°14, pp.203-215, 2009.
- [13] Kouassi A.M., Assoko A.V.S., Kouakou K.E., Djé K.B., Kouamé K.F., Biemi J., « Analysis of the hydrological impacts of climate variability in West Africa: case study of the Bandama watershed in Ivory Coast. », *Larhyss Journal*, n°31, pp.19-40, 2017b.
- [14] Lang C., « 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 de doctorat de l'Université de Paul Verlaine, Metz, 375p, 2007.
- [15] Lang C., « 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>.
- [16] Bard A., Renard B., Lang M., « Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'arc alpin », *La Houille Blanche, Revue internationale de l'eau*, n°1, pp.38 – 43, 2012.
- [17] Garcia F., « 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, 272 p., 2016.
- [18] Amoussou E., « Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest) », Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie, 310p, 2010.

- [19] Savané I., Coulibaly K.M., Gioan P., « Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. », *Sécheresse*, vol.4, n°12, pp.231-237, 2001.
- [20] Goula B.T.A., Savané I., Konan B., Fadika V., Kouadio G.B., « Etude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire», *Vertigo*, vol.7, n°1, pp.1-12, 2006.
- [21] N'gnessan B.V.H., Saley M.B., Oga Y.M.S., Yapi A.F., Kouadio B.H., Biemi J., Kouadio A., « Caractérisation De La Sécheresse Hydrologique Dans La Région De La Marahoué (Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire)», *International Journal of Engineering Science Invention*, vol.6, n°12, pp.19-27, 2017.
- [22] Adja M.G., Djemin E.J., N'dri O.F.A., Tohouri P., Kouamé K.J., Jourda J.P., « 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, pp.192-212, 2019.