



ANALYSE DES IMPACTS HYDROLOGIQUES DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST: CAS DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA EN COTE D'IVOIRE

ANALYSIS OF THE HYDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATE VARIABILITY IN WEST AFRICA: CASE STUDY OF THE BANDAMA WATERSHED IN IVORY COAST

***KOUASSI A.M.¹, ASSO KO A.V.S.², KOUAKOU K.E.¹, DJE K.B.³,
KOUAME K.F.⁴, BIEMI J.⁴***

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) de Yamoussoukro, Ecole Doctorale Polytechnique (EDP) ; Bp: 1093 Yamoussoukro.

³ Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) Abidjan ; 15 Bp: 990 Abidjan 15

⁴ 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)

michel.a_kouassi@yahoo.fr ou michel.kouassi@inphb.ci

RÉSUMÉ

Cette étude vise à analyser les modifications induites par la variabilité pluviométrique sur le comportement hydrologique du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. Les données climatologiques (pluie, température) utilisées couvrent la période 1951-2015. La méthodologie a consisté d'une part à la détermination des paramètres hydrologiques ciblés pour mener l'étude. Il s'agit de la pluie efficace, du potentiel de ruissellement et du potentiel d'infiltration. D'autre part, l'indice standard de normalisation et deux tests de

rupture (test de Pettitt et méthode de segmentation de Hubert) ont été appliqués aux séries des paramètres hydrologiques déterminés. Les principaux résultats obtenus 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.

Mots clés: Pluie efficace, potentiel de ruissellement, potentiel d'infiltration, indice standard de normalisation, tests de rupture, bassin versant du Bandama, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

This study aims to analyze the changes induced by rainfall variability on the hydrological behavior of the Bandama watershed in Ivory Coast. The climatological data (rainfall, temperature) used cover the period 1951-2015. The methodology consisted, on the one hand, in the determination of the hydrological parameters targeted to carry out the study. These include effective rainfall, runoff potential and infiltration potential. On the other hand, the standard normalization index and two tests of trends (Pettitt test and Hubert segmentation method) were applied to the series of hydrological parameters determined. The main results obtained made it possible to identify the manifestations of the hydrological variability observed in the Bandama watershed. The various hydrological parameters analyzed vary over the years and describe a regressive trend marked by a very significant break in 1980-1981. The estimated hydrological deficits fluctuate between 15% (infiltration potential) and nearly 60% (runoff potential), 16% for average rainfall and 31% for effective rainfall. The decline in rainfall has, of course, consequences for the availability of water resources in a watershed that is also vital.

Key words: Efficient rainfall, runoff potential, infiltration potential, standard normalization index, trends tests, Bandama watershed, Ivory Coast.

INTRODUCTION

Le climat de la terre a connu de grands changements au cours du siècle dernier, représenté essentiellement par le réchauffement dû aux gaz à effet de serre en étroite relation avec les activités humaines, ceci devrait avoir des répercussions négatives sur la nature et l'homme ; ce qui demande une intervention urgente pour réduire et adapter les conséquences de ces changements. Parmi ces conséquences, il y a tantôt la raréfaction des ressources en eau (désertification et sécheresse), tantôt des précipitations importantes à l'origine des crues récurrentes (GIEC, 2007). Donc les changements climatiques ont un impact sur les ressources en eaux (de surface et de souterraine). Face à cette impasse, l'un des défis majeurs de la communauté scientifique depuis quelques décennies est de s'investir sur l'étude du changement climatique et les manifestations extrêmes susceptibles d'impacter le cycle de l'eau, l'environnement et les activités socio-économiques. Une tendance à la baisse de la pluviométrie a été observée en Afrique de l'Ouest à partir de la fin des années 1960 et au début des années 1970 avec un déficit des apports estimé à 16% pour l'Afrique tropicale (Servat et al., 1998; Ouédraogo, 2001; Ardoin et al., 2003; Ardoin, 2004; Mahé et al., 2001 ; Mahé, 2006 ; Paturel et al., 2003; Bigot et al., 2005 ; Bodian, 2014). La Côte d'Ivoire n'est pas en marge de ce phénomène (Savané et al., 2001 ; Brou, 2005 ; Goula et al., 2006 ; Kouakou et al., 2007 ; Kouassi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2012 ; Kouakou et al., 2012 ; Soro et al., 2013 ; Assemian et al., 2013 ; Fossou et al., 2015 ; Kouassi et al., 2017).

La Côte d'Ivoire dispose de quatre (4) grands fleuves dont le Bandama. Le Bandama est un fleuve d'une importance économique, énergétique, environnementale majeure et d'intérêt national. Son apport hydrique est utilisé par une large gamme de secteurs tels que l'agriculture, la production d'électricité (barrages de Kossou et de Taabo), l'industrie, la production d'eau potable (Korhogo, Bouaké, Yamoussoukro, etc.), etc. Le Bandama est un fleuve alimenté essentiellement par les précipitations. En vue de gérer de façon raisonnée les ressources en eau du bassin du Bandama, il convient d'avoir une idée aussi claire que possible de la manière dont répondra le bassin versant aux modifications du climat.

Les principaux résultats issus des travaux de Kouassi et al. (2017), 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. La question que soulève cette étude est donc la suivante :

Quels sont les impacts hydrologiques des variations climatiques constatées dans le bassin versant du Bandama dans un contexte de retour à des conditions plus humides depuis le début de la décennie 2000 ?

Ce travail a donc pour objectif d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau en Côte d'Ivoire à travers le bassin versant du Bandama dans un contexte de reprise des précipitations depuis les années 2000. Cette étude vise donc à contribuer à la bonne gestion des ressources en eau disponible sur le dit bassin.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La Côte d'Ivoire fait partie des pays du Golfe de Guinée. Elle s'étend sur une superficie de 322 462 Km², environ 1% du continent africain. Le bassin versant du Bandama s'étend du Nord au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°14N et 10°21N et les longitudes 4°W et 7°W (Figure 1). Il a une superficie de 97 000 km² et une forme rectangulaire. Il est drainé par le fleuve Bandama et ses deux principaux affluents: la Marahoué et le N'zi. Ce fleuve, d'une longueur de 1 050 km, est le seul parmi tous les grands fleuves de la Côte d'Ivoire dont le bassin versant est entièrement en territoire ivoirien. Il prend sa source à une altitude de 480 m, entre Korhogo et Boundiali. Après une orientation E-W de son cours supérieur jusqu'à Ferkéssédougou, il prend une direction N-S. De Ferkéssédougou à sa confluence avec le Bou, le Bandama décrit une succession de nombreux méandres. Au droit de Kossou, la vallée se resserre notablement. C'est à cet endroit qu'est construit depuis 1971 le barrage de Kossou (le plus important barrage hydroélectrique du pays). Peu après Kossou, il reçoit la Marahoué ou Bandama rouge, long de 550 km. Le Bandama prend ensuite une direction NW-SE jusqu'à sa confluence avec le N'zi, affluent long de 725 km. Il reprend ensuite une direction N-S jusqu'à son embouchure à Grand-Lahou. La zone d'étude est limitée par les bassins versants du Niger au Nord, les bassins versants du Boubo, de l'Agnéby et l'océan atlantique au Sud, le bassin versant de la Comoé à l'Est et le bassin versant du Sassandra à l'Ouest.

De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du Bandama est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. La zone d'étude s'étend sur différentes régions climatiques allant de la région des savanes au Nord à la zone de forêt au Sud du bassin.

*Analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique en Afrique de l'ouest :
Cas du bassin versant du Bandama en Côte d'ivoire*

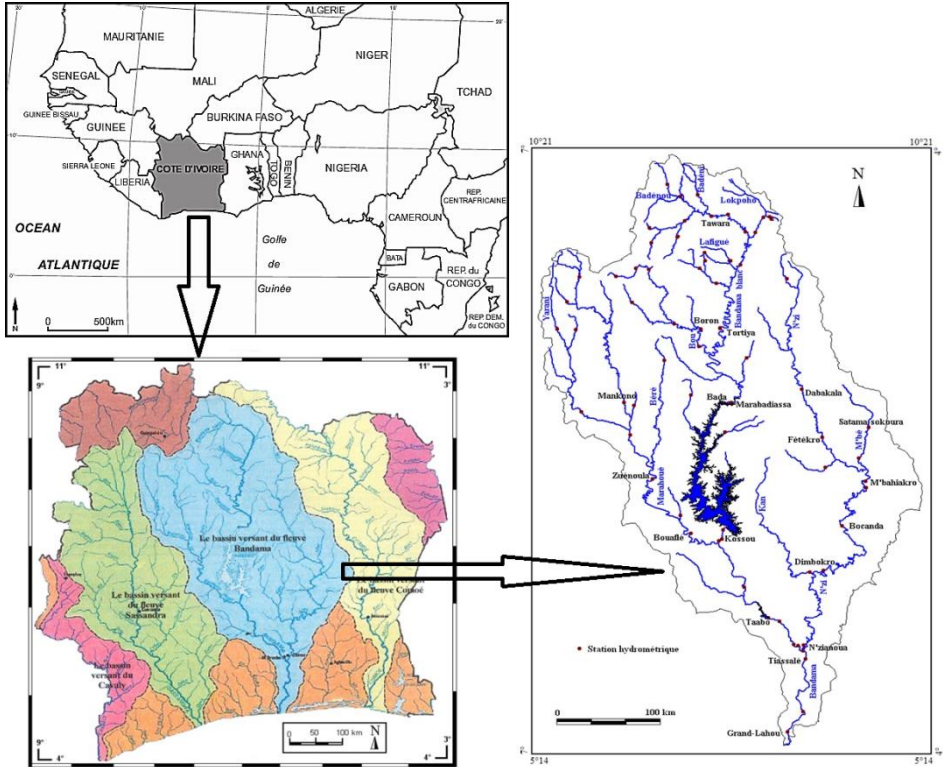


Figure 1 : Présentation du bassin versant du Bandama

Le régime subtropical (climat soudanais) se caractérise par deux saisons, une saison pluvieuse d'avril à octobre (7 mois) et une saison sèche de novembre à mars (5 mois) qui est accentuée par l'Harmattan (Ardoin, 2004). Ce climat correspond au climat tropical de transition. Les mois d'août et septembre sont les mois les plus pluvieux. Ce régime caractérise le Nord du bassin et se situe au Nord du 8^{ème} parallèle Nord. Il est caractérisé par des précipitations moyennes (1951-2000) annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) se situe dans le centre du bassin. On observe un régime climatique à quatre saisons: une grande saison des pluies de mars à juin (4 mois), une petite saison sèche de juillet à août (2 mois), une petite saison des pluies commençant en septembre et s'achevant en octobre (2 mois) et une grande saison sèche du mois de novembre à février (4 mois). Ce type de climat fait la transition entre le climat subtropical et le climat subéquatorial. Ce climat est proche du climat subéquatorial par l'abondance des précipitations. Il est

caractérisé par des précipitations moyennes annuelles (1951-2000) variant entre 1200 mm et 1600 mm. Le régime subéquatorial (climat attién) qui est caractérisé par quatre (4) saisons ; la grande saison des pluies se situe entre mars et juin suivie d'une pause (petite saison sèche) entre juillet et août. La petite saison pluvieuse intervient dans le mois de septembre pour prendre fin au mois de novembre. Les mois de novembre, décembre, janvier et février constituent la grande saison sèche. Ce régime caractérise le Sud du bassin en dessous du 7^{ème} parallèle Nord. Il est caractérisé par des précipitations moyennes annuelles (1951-2000) supérieures à 1600 mm.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Données

Les données climatiques utilisées au cours de notre étude ont été mises à notre disposition par la Société D'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) à travers la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Il s'agit des données de pluviométrie mensuelle et de température mensuelle. Les stations météorologiques retenues ont été sélectionnées afin de constituer, un échantillon le plus représentatif possible de la variabilité des conditions hydro-climatiques à l'échelle du bassin versant du Bandama. Dans le but de garantir une couverture relativement homogène, en fonction des données disponibles, des stations pluviométriques ont été retenues sur les trois zones climatiques que compte le bassin du Bandama. Ainsi, trois (3) stations (Boundiali, Korhogo et Mankono) ont été sélectionnées pour la partie Nord représentant le climat tropical de transition. Dans le centre où règne le climat tropical humide, trois (3) stations (Bouaké, Bouaflé et Dimbokro) ont été retenues. Dans le Sud, marqué par le climat subéquatorial, deux (2) stations (Tiassalé et Grand-Lahou) ont été choisies. Les données de températures au pas de temps mensuel et annuel ont été collectées aux stations de Korhogo, Bouaké et Dimbokro. Les données de température d'Abidjan ont été utilisées pour la ville de Grand-Lahou. Les données météorologiques collectées s'étendent sur la période 1961-2015. Les valeurs moyennes de la pluie et de la température ont été calculées à partir de la méthode de la moyenne arithmétique.

Détermination des paramètres hydrologiques

Les paramètres hydrologiques évalués au cours de cette étude sont la pluie efficace, le potentiel de ruissellement et le potentiel d'infiltration.

Détermination de la pluie efficace

Toute évaluation des ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant nécessite une connaissance la plus précise possible des différents termes du bilan hydrologique et notamment de la pluie efficace. En effet, la pluie efficace des hydrologues et des hydrogéologues correspond, dans son acception la plus large, à la « partie de la pluie qui contribue au ruissellement » (Vittecoq et al., 2010). Dans le sens large, on appelle « pluie efficace (P_e) », la pluie donnant lieu à un écoulement, superficiel ou souterrain, immédiat ou différé. En agriculture, sa définition est sensiblement différente puisqu'elle correspond à la « partie de la pluie qui reste dans le sol et contribue au développement des cultures » (Vittecoq et al., 2010). Ce terme du bilan hydrologique est de tout premier intérêt, car il conditionne au premier chef la disponibilité en eau, que ce soit vis-à-vis de son transfert rapide en surface (ruissellement) ou de son écoulement différé au travers des aquifères. La pluie efficace peut être exprimée de la façon suivante (équation 1):

$$P_e = P - ETR \quad (1)$$

avec :

P_e : pluie efficace (mm) ;

P : pluviométrie (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

L'évapotranspiration réelle (ETR) a été déterminée à partir de la méthode de Coutagne (Kouassi et al., 2012). L'ETR est donnée par l'expression suivante (équation 2):

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (2)$$

$$\lambda = 1 / (0,8 + 0,145t) \quad (3)$$

avec :

ETR : évapotranspiration réelle (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle en m ;

t : température moyenne annuelle en °C.

Cette méthode (équation 2) n'est applicable que si $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$.

Détermination du potentiel de ruissellement

Pour la détermination du potentiel de ruissellement, notre choix s'est porté sur le modèle de Mouelhi (2003). Il s'agit d'un modèle global au pas de temps annuel. Ce type de modèle a l'avantage d'être peu consommateur de données (pluie, évapotranspiration et débit) pour le calage et les simulations. La plupart des données enregistrées par les réseaux climatologiques permettent de disposer de ces jeux de paramètres. Il permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données de pluie et d'ETP. Toutes ces données sont exprimées en lame d'eau (mm). Il s'agit d'un modèle de forme mathématique simple qui se présente comme une fonction (Q) de deux variables: pluie (P) et ETP (E). Il permet de représenter les deux limites physiques dans le plan adimensionnel de ces variables. La première limite suppose qu'au maximum, le débit est égal à la totalité de la pluie tombée ($Q = P$). La deuxième suppose qu'au maximum, on ne pourra retrancher plus que la totalité de l'évapotranspiration potentielle de la pluie pour avoir le débit écoulé ($Q = P - E$). Partant de ces hypothèses, la formulation mathématique du modèle de Mouelhi est présentée comme suit (équation 4):

$$y = \frac{1}{1 + \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2}} \quad (4)$$

En remplaçant de part et d'autre (x) par (P/E) et (y) par (Q/P), le modèle s'écrit (équation 5):

$$Q = \frac{P}{1 + \frac{E}{P} + \left(\frac{E}{P}\right)^2} \quad (5)$$

L'affectation d'un paramètre « a » (coefficient correctif de l'évapotranspiration) a permis d'améliorer la performance du modèle de Mouelhi (2003). En effet, l'évapotranspiration est une variable en général non mesurée, mais plutôt estimée en utilisant des méthodes telles que celles de Penman, Turc, Thornthwaite, etc. Ne disposant pas d'information sur l'efficacité du choix de l'un ou l'autre modèle d'évaluation de cette variable, l'auteur a pensé que le paramètre « a » à affecter jouera un rôle correctif de l'évapotranspiration. En effet, un seul paramètre libre, semble suffisant pour le pas de temps annuel (Mouelhi, 2003 ; Perrin et al., 2003 ; Mouelhi et al., 2003). Le paramètre « a » affecté prend des valeurs inférieures à l'unité, ce qui souligne son caractère

correctif de l'évapotranspiration ou simplement le fait que l'ETR reste strictement inférieure à E même lorsque P tend vers l'infini. Ces limites supposent donc que le système {bassin versant} est fermé : avec la pluie comme entrée et le débit (Q) et l'évapotranspiration comme sorties. La nouvelle formulation généralisée du modèle de Mouelhi est présentée par l'équation (6):

$$R = \frac{P}{\sum_{i=0}^{n=4} \left(\frac{aETP}{P} \right)^i} \quad (6)$$

Avec :

- R : lame d'eau annuelle ruisselée (mm) ;
- P : lame d'eau précipitée annuelle (mm) ;
- ETP : lame d'eau évapotranspirée annuelle (mm) ;
- a : coefficient correctif de l'évapotranspiration potentielle.

La valeur du paramètre «a» utilisée dans ce travail est issue des travaux de Kouassi (2007) après calage du modèle sur le bassin versant du N'zi, sous-bassin du bassin versant du Bandama. La valeur de «a» retenue est 1,14. L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été évaluée à partir de la méthode de Thornthwaite. Bien que ce modèle paraisse simple au point de vue formulation hydrologique du cycle de l'eau, sa performance est assez satisfaisante (Mouelhi, 2003). Ce modèle a été testé avec succès sur plus de 429 bassins dans le monde dont une dizaine en Côte d'Ivoire (Mouelhi, 2003). La performance et la robustesse du modèle de Mouelhi ont été testées dans le bassin versant du N'zi (sous-bassin du bassin versant du Bandama) par les travaux de Kouassi (2007), Kouassi et al. (2007), Kouassi et al. (2008).

Détermination du potentiel d'infiltration

Le besoin de déterminer quantitativement la recharge des nappes est devenu de plus en plus pressante compte tenu de la variabilité climatique observée ces dernières années. Dès lors, de nombreuses méthodes ont été proposées et testées. Ainsi, les approches hydrodynamiques, géochimiques, hydrologiques et les modèles mathématiques ont été utilisés. Il est certainement difficile d'obtenir une formule efficace et rapide pour déterminer à quel taux de précipitations, une eau peut s'infiltrer dans le sol et percoler en profondeur pour recharger les nappes souterraines. Ceci dépend fortement de la distribution des précipitations et des conditions climatiques, hydrauliques et pédologiques. Parmi les méthodes d'estimation de la recharge, c'est la méthode du bilan

hydrologique qui est la plus utilisée (Kouassi et al., 2007 ; Kouassi et al., 2012). Le potentiel d'infiltration (I) s'exprime comme suit (équation 7) :

$$I = P - (ETR + R) \quad (7)$$

avec :

P : pluviométrie (mm) ;

ETR : lame d'eau évapotranspirée (mm) ;

R : lame d'eau ruisselée (mm).

Méthodologie d'analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique

L'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les paramètres hydrologiques a nécessité l'application de l'indice standard de normalisation et deux tests de rupture (test de Pettitt et méthode de segmentation de Hubert).

Test de Pettitt

Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Servat et al., 1998). Le test de Pettitt a été retenu pour sa puissance et sa robustesse (Lubès-Niel et al., 1998). Il consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous séries à chaque instant t compris entre 1 et N-1. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous-séries ont des distributions différentes. La variable de Pettitt ($U_{t,N}$) est définie par l'équation (8):

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (8)$$

$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$;

$\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$;

$\text{sgn}(X) = 0$ si $X = 0$;

$\text{sgn}(X) = -1$ si $X < 0$.

La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k est définie et permet d'apprécier l'importance de la rupture (équation 9):

$$\text{Pr ob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6k^2 / (N^3 + N^2)) \quad (9)$$

L'absence de rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

Méthode de segmentation de Hubert

En vue d'apprécier la variabilité hydrologique, la méthode de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1998) a été utilisée à cause de sa performance et de sa robustesse (Lubès-Niel et al., 1998). Elle a été déjà utilisée par beaucoup d'auteurs (Mahé et al., 2001 ; Savané et al., 2001 ; Ardoin et al., 2003a ; Goula et al., 2006 ; Mahé, 2006 ; Kouassi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2012). La méthode de segmentation de Hubert fournit au moyen d'un algorithme spécifique une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à deux, l'hypothèse de stationnarité de la série est acceptée. Les résultats obtenus sont définis par rapport au nombre de segments. La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique est minimum. Cette condition est nécessaire, mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. On définit: $i_k, k=1, 2, \dots, m$, le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ième}}$ segment \overline{X}_k la moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment, D_m l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée. L'écart quadratique dans ces conditions est exprimé par l'équation 10:

$$D_m = \sum_{k=1}^{k=m} d_k \quad (10)$$

avec $d_k = \sum_{i=i_{k-1}-1}^{i=i_k} (X_i - \overline{X}_k)^2$ (d_k doit être minimum)

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une série hydrologique météorologique contrairement à celle de Pettitt. La méthode est considérée comme un test de stationnarité. En effet, « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test. Cependant, il est difficile d'attribuer un niveau de signification à ce test (Hubert et al., 1998).

Estimation du déficit hydrologique

Le déficit hydrologique par rapport aux ruptures identifiées par le test de Pettitt a été évalué à partir de l'équation 11 (Ardoin, 2004):

$$D = \frac{x_j}{x_i} - 1 \quad (11)$$

avec :

D : déficit hydrologique ;

x_j : moyenne de la série hydrologique après rupture ;

x_i : moyenne de la série hydrologique avant rupture.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

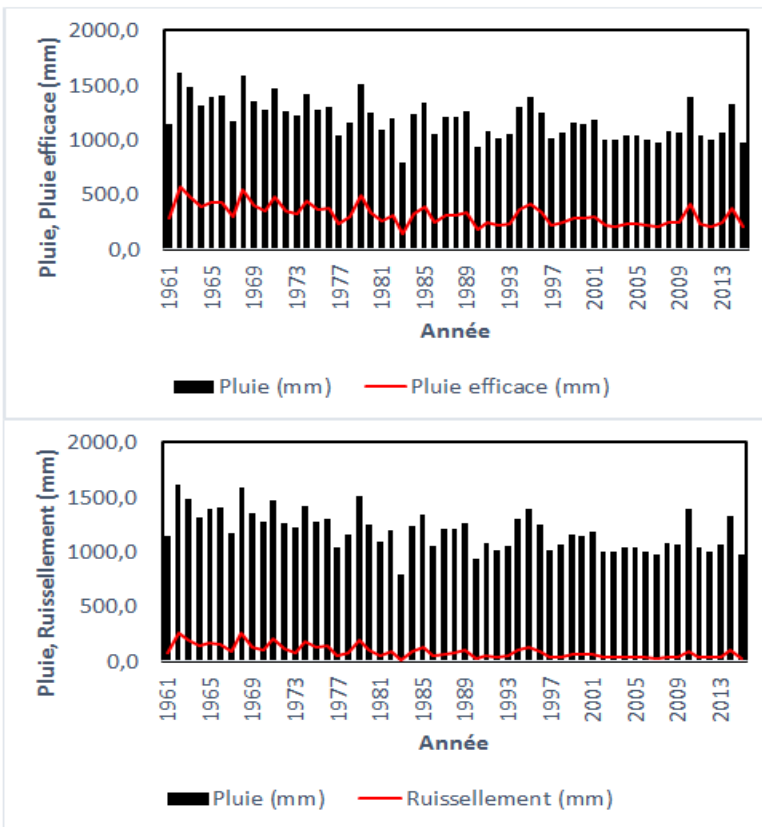
Caractéristiques des paramètres hydrologiques calculés

Les principaux paramètres hydrologiques calculés sur la période 1961-2015 sont la pluie moyenne annuelle (P), la pluie efficace (P_e), le potentiel de ruissellement (R) et le potentiel d'infiltration (I). Les caractéristiques statistiques de ces paramètres sont consignées dans le tableau I. La pluie annuelle va de 796 à 1611 mm avec une moyenne de 1194 mm et un écart-type de 176 mm. La pluie efficace oscille entre 135 mm (1983) et 570 mm (1962) avec une moyenne de 314 mm et représente 26,3% des précipitations (Figure 2). De 2000 à 2015 la valeur la plus élevée est de 409 mm et la moyenne est de 252 mm. Ces résultats montrent que les quantités de pluie tombées sur le bassin permettent effectivement d'avoir des quantités d'eaux qui ruissellent et qui s'infiltrent. Ainsi, le potentiel de ruissellement fluctue entre 13 mm (1983) et 262 mm (1962) avec une moyenne de près de 89 mm et enregistre un taux de 7,4% par rapport aux précipitations (Figure 2). A partir de l'année 1997, les valeurs ne dépassent plus 100 mm. La quantité moyenne de 2000 à 2015 est de 88,7 mm. Le potentiel d'infiltration varie entre 123 mm (1983) et 318 (2010) mm avec une moyenne de 226 mm et représente 18,9% des précipitations (Figure 2). De 2000 à 2015, les valeurs restent comprises entre 170 et 318 mm. Les valeurs du coefficient de variation montrent que les séries de pluie (14,7%) et du potentiel d'infiltration (18,0%) sont homogènes. Cependant, les séries de pluie efficace ($CV=30,5\%$) et du potentiel de ruissellement ($CV=66,7\%$) sont hétérogènes.

*Analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique en Afrique de l'ouest :
Cas du bassin versant du Bandama en Côte d'ivoire*

Tableau 1 : Caractéristiques statistiques des paramètres hydrologiques calculés (1961-2015)

Paramètres	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	Ecart- type (mm)	Cv (%)	Proportions (%)
P	796,4	1611,4	1194,4	175,7	14,7	-
P_e	135,3	569,6	314,3	95,9	30,5	26,3
R	12,8	261,6	88,7	59,1	66,7	7,4
I	122,5	317,6	225,6	40,7	18	18,9



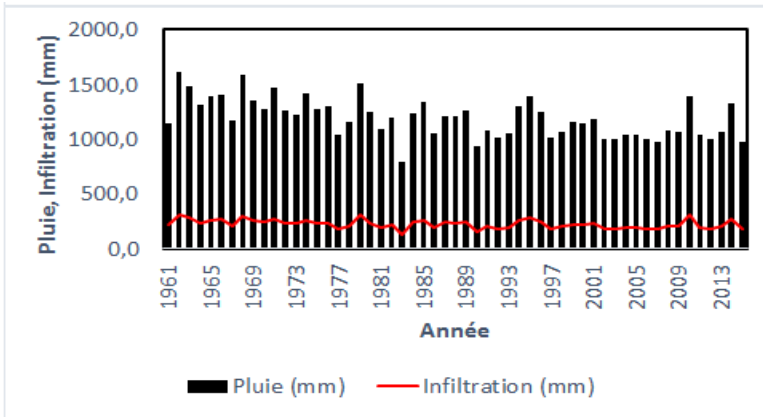


Figure 2 : Précipitations et paramètres hydrologiques étudiés (1961-2015)

Variabilité temporelle des indices hydrologiques

Le bassin versant du Bandama connaît une période pluviométrique excédentaire de 1961 à 1980 avec une moyenne interannuelle de 1332 mm et un écart-type de 153 mm (figure 3). Cette période a connu une année déficitaire (1976). Une période pluviométrique déficitaire a été observée entre 1981 et 2015 avec quelques années excédentaires (1994-1996). Cette période a une moyenne pluviométrique interannuelle estimée à 1115 mm et un écart-type de 138 mm.

Les indices de précipitations efficaces ont permis d'observer deux tendances (figure 3). D'une part, une période excédentaire entre 1961 et 1980 caractérisée par une moyenne interannuelle de 393 mm et un écart-type de 90 mm est mise en évidence avec une année déficitaire (1976). Elle est succédée par une période déficitaire allant de 1981 à 2015, avec une pluviométrie efficace moyenne de 269 mm et un écart-type de 68 mm. Cette période déficitaire comporte cependant quelques années excédentaires (1994-1996).

Au niveau du potentiel de ruissellement (figure 3), il est constaté une période excédentaire allant de 1961 à 1980 sans année déficitaire. Cette période est caractérisée par une moyenne interannuelle de 143 mm et un écart-type de 59 mm. Une période déficitaire allant de 1981 à 2015 est mise en évidence avec une année excédentaire en 1995. Cette période est définie par une moyenne interannuelle de 57 mm et un écart-type de 31 mm.

En ce qui concerne le potentiel d'infiltration (figure 3), une période excédentaire est observée entre 1961 et 1980 avec deux années déficitaires entre

1975 et 1976. La moyenne interannuelle du potentiel d'infiltration est de 249 mm avec un écart-type de 33 mm. Une période déficitaire d'infiltration allant de 1981 à 2015 est observée traduite par une moyenne interannuelle de 211 mm et un écart-type de 39 mm. Cette phase déficitaire d'infiltration comporte cependant quelques années excédentaires bien marquées (1987-1988 ; 1993-1995 ; 2008-2009 ; 2014).

Une analyse générale des différents résultats montre que la période 1961-1980 est dominée par des années excédentaires au niveau de l'ensemble des paramètres hydrologiques étudiés. Cette période est succédée par une phase caractérisée par des années en général déficitaires au niveau des paramètres hydrologiques et se situe entre 1981 et 2015. Les variations des régimes hydrologiques révèlent donc des irrégularités sur l'ensemble du bassin du Bandama. Ces résultats permettent de conclure que pendant la période 1961-2015, une période globalement excédentaire des paramètres hydrologiques est observée avant 1980. La période déficitaire a été amorcée depuis les années 1980 et persiste jusqu'à nos jours. L'étude des variations hydrologiques révèle un certain nombre de particularités selon le paramètre.

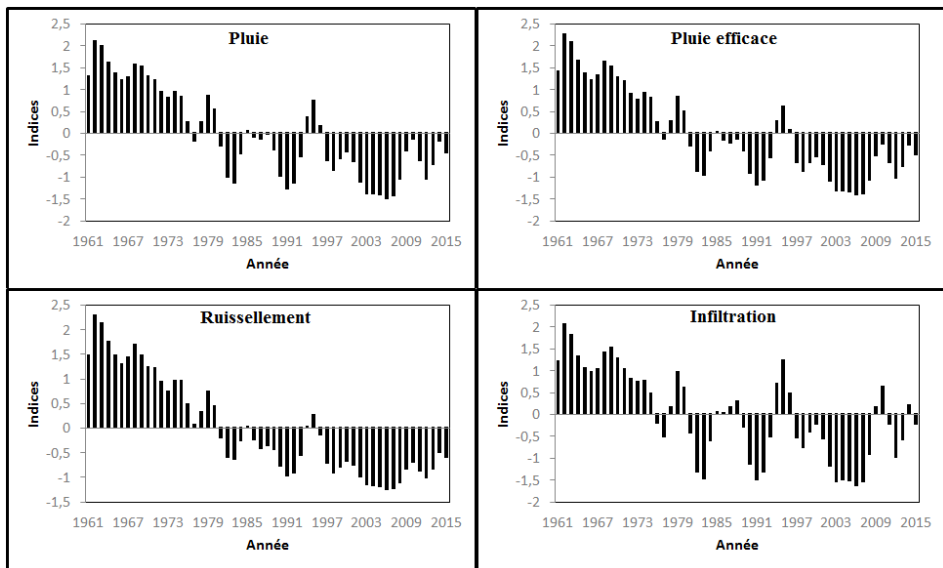


Figure 3 : Indices standard des paramètres hydrologiques étudiés (1961-2015)

Identification des ruptures au sein des paramètres hydrologiques

Les résultats des tests de détection de rupture (test de Pettitt et segmentation de Hubert) appliqués aux séries annuelles de pluie, de pluie efficace, de potentiel de ruissellement et de potentiel d'infiltration au cours de la période 1961-2015 sont consignés dans le tableau II. Le test de Pettitt révèle l'année 1980 comme année de rupture pour les différents paramètres hydrologiques étudiés (Figure 4). La méthode de segmentation de Hubert a identifié des ruptures en 1981 au sein de la pluie efficace et du potentiel d'infiltration. Au niveau du potentiel de ruissellement, deux ruptures ont été détectés. La première en 1972 et la deuxième en 1986. Une analyse croisée des résultats des différents tests montre que les ruptures ont été identifiées majoritairement au cours de la période 1980-1981, et une rupture unique et historique a été observée en 1972. Les ruptures sont observées au sein des séries avec des niveaux de probabilité qui varient d'une série à une autre. Selon le test de Pettitt, des ruptures très significatives (seuil d'erreur <1%) ont été détectées au niveau de tous les paramètres. Les probabilités obtenues attestent d'une bonne qualité des ruptures identifiées.

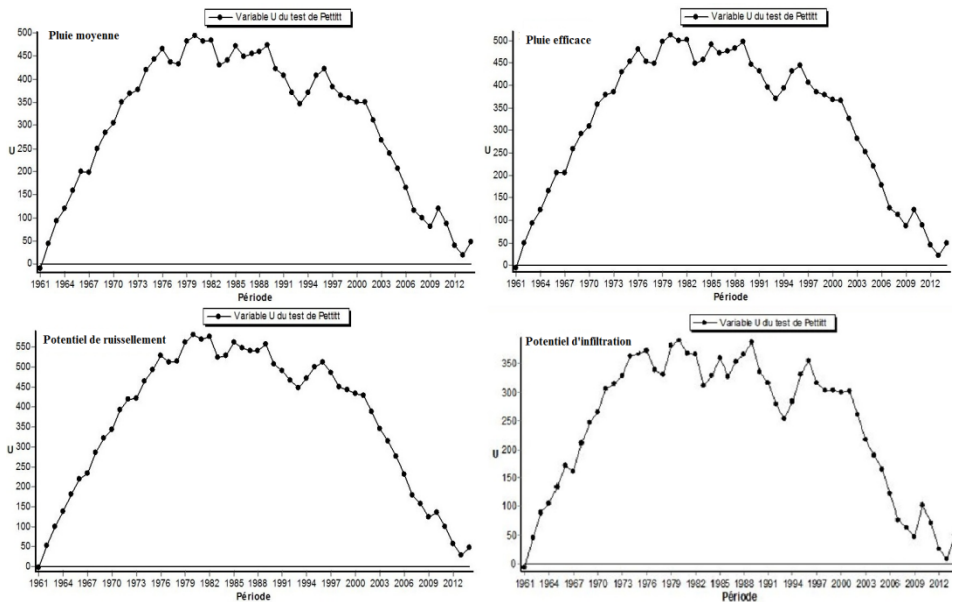


Figure 4 : Test de Pettitt appliqué aux paramètres hydrologiques (1961-2015)

Ainsi, ces différents résultats montrent qu'une tendance à la baisse des précipitations totales, des précipitations efficaces, du potentiel de ruissellement et du potentiel d'infiltration à partir des années 1970 et amplifiée au cours des années 1980 a été observée.

Les déficits hydrologiques évalués par rapport à la rupture synchrone de 1980 (Tableau II), sont respectivement de -16,32% pour la pluie moyenne, -31,49% pour la pluie efficace, -59,94% pour le potentiel de ruissellement et -15,17% pour le potentiel d'infiltration.

Tableau 2 : Identification de ruptures au sein des séries hydrologiques (1961-2015)

Paramètres (mm)	Test de Pettitt		Segmentation de Hubert	Déficit (%)
	Année de rupture	Probabilité	Année de rupture	
Pluie	1980	$3,53.10^{-4}$	1981	-16,32
Pluie efficace	1980	$1,86.10^{-4}$	1981	-31,49
Potentiel de ruissellement	1980	$1,34.10^{-5}$	1972 1986	-59,94
Potentiel d'infiltration	1980	$9,15.10^{-3}$	1981	-15,17

DISCUSSION

Les valeurs moyennes des principaux paramètres hydrologiques étudiés (pluie, pluie efficace, potentiel de ruissellement, potentiel d'infiltration) et calculés sur la période 1961-2015 sont respectivement de 1194 mm pour la pluie moyenne annuelle, 314 mm pour la pluie efficace, 89 mm pour le potentiel de ruissellement et 225 mm pour le potentiel d'infiltration. Les proportions des paramètres hydrologiques par rapport aux précipitations sont respectivement de 26,3% pour la pluie efficace, 7,4% pour le potentiel de ruissellement et 18,9% pour le potentiel d'infiltration. Ces différents résultats montrent qu'en dépit de la période sèche observée sur le bassin versant du Bandama (Kouassi et al., 2017), il subsiste une pluie efficace et partant un potentiel de ruissellement et un potentiel d'infiltration.

Les indices des paramètres hydrologiques (pluie, pluie efficace, potentiel de ruissellement, potentiel d'infiltration) analysés sur la période 1961-2015 varient

au cours des années et décrivent une tendance régressive. Ces résultats ont mis en évidence une période excédentaire de 1961 à 1980 et une période déficitaire allant de 1981 à 2015 marquée par une rupture très significative en 1980-1981 identifiée à partir du test de Pettitt et de la segmentation de Hubert. L'impact de la baisse des précipitations dans le bassin versant du Bandama, a été manifesté par un doublement des déficits au niveau de la pluie efficace. Cette baisse pluviométrique a également induit une baisse du potentiel de ruissellement traduite par un déficit du potentiel de ruissellement équivalent à près de quatre fois le déficit pluviométrique. Le potentiel d'infiltration a baissé dans le même ordre de grandeur par valeur inférieure que les précipitations. Ces résultats montrent un amenuisement des ressources hydriques dans le bassin versant du Bandama entamé dans les années 1970 et amplifié au cours des années 1980. Ils mettent ainsi en évidence une variation des conditions hydrologiques, qui sont les réponses des variations climatiques subies par le bassin versant du Bandama tout au long de la dernière moitié du 20^{ème} siècle.

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. Les déficits pluviométriques calculés par Kouassi et al. (2007) sur le bassin versant du N'zi (sous bassin du bassin versant du Bandama) fluctuent entre 13% et 24% avec une moyenne de 16%. Kouassi et al. (2007) ont également montré que les déficits d'écoulement fluctuent entre 51 et 55% avec une moyenne de 52%. Sur la partie nord du bassin versant du Bandama, les travaux de Soro et al. (2013) ont abouti à des déficits pluviométriques de 12 à 22% et des déficits de ruissellement de l'ordre de 62%. Dans l'Est du bassin versant du Bandama, Assemian et al. (2013), ont obtenu un déficit pluviométrique de 19%, un déficit de ruissellement de 56% et un déficit d'infiltration de 33%. Dans la région ex-N'zi-Comoé (Dimbokro, Bocanda et M'bahiakro), Fossou et al. (2015) au cours de leurs travaux sont aboutis à des déficits pluviométriques allant de 10 à 17% et des déficits d'infiltration variant de 19 à 33%. Les déficits hydrologiques obtenus dans le cadre de notre étude sont dans les mêmes ordres de grandeur que ceux obtenus par les autres auteurs sur le même bassin versant du Bandama. Cette similitude du comportement climatique et ses impacts serait d'échelle planétaire (GIEC, 2007).

CONCLUSION

Cette étude a permis d'identifier les manifestations de la variabilité hydrologique observée dans le bassin versant du Bandama. Les proportions des paramètres hydrologiques par rapport aux précipitations sont respectivement de 26,3% pour la pluie efficace, 7,4% pour le potentiel de ruissellement et 18,9% pour le potentiel d'infiltration. Les différents paramètres hydrologiques analysés varient au cours des années et décrivent une tendance régressive marquée par une rupture très significative en 1980-1981 à partir du test de Pettitt et de la segmentation de Hubert. 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 aussi vital.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la Direction de la SODEXAM pour leur avoir fourni les données climatiques utilisées dans cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSEMIAN A.E., KOUAME K.F., DJAGOUE E.V., AFFIAN K., JOURDA J.P.R., ADJA M., LASM T., BIEMI J. (2013). Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide: Cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences de l'Eau*, N° 263, 247–261.
- ARDOIN S., LUBÈS-NIEL H., SERVAT E., DEZETTER A., BOYER J.F. (2003). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990. IAHS Publication, N°278, 223-228.
- ARDOIN B. S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 330p.
- BIGOT S., BROU Y. T., OSZWAID J., DIEDHIOU A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, Vol.16, N°1, 5-13.

- BODIAN A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, Vol.8, 297-312.
- BROU Y T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212p.
- FOSSOU R.M.N., LASM T., SORO N., SORO T., SORO G., DE LASME O.Z., BAKA D., ONETIE O.Z., OROU R. (2014). 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, 87-110.
- GIEC. (2007). Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, 103 p.
- GOULA B.T.A., SAVANE I., KONAN B., FADIKA V., KOUADIO G.B. (2006). 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, 1-12.
- HUBERT P., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., BENDJOUDI H., CARBONNEL J.P., LUBES-NIEL H. (1998). La procédure de segmentation, dix ans après. IAHS Publication, Vol. 252, 267-273.
- KOUAKOU K.E. (2010). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, 187p.
- KOUAKOU K.E, GOULA B.T.A., KOUASSI A.M. (2012). Analyse of climate variability and change impacts on hydroclimate parameters: case study of Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol.3, N°2, 1-8.
- KOUAKOU K.E., GOULA B.T.A., SAVANE I. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire- Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, Vol.16, N°1, 31-43.
- KOUASSI A. M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 210p.
- KOUASSI A.M., ASSOKO A.V.S., DJE K.B., KOUAKOU K.E., KOUAME K.F., BIEMI J. (2017). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la variabilité climatique récente en Côte d'Ivoire. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, Vol.1, N°2, 1-11.
- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., GOULA B.T.A., LASM T., PATUREL J.E., BIEMI J. (2008). 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*, N°11, pp. 207-229.
- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., SALEY M.B., YAO B.K. (2007). Identification de tendances dans la relation pluie-débit et recharge des aquifères dans un contexte de variabilité hydroclimatique: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 16, N°3, 412–427.
- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., YAO K.B., DJE K.B., PATUREL J.E., OULARE S. (2010). 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. *Revue Européenne de Géographie (Cybergéo)*, décembre 2010, <http://cybergeog.revues.org/index23388.html>.
- KOUASSI A.M., N'GUESSAN B.T.M., KOUAME K.F., KOUAME K.A., OKAINGNI J.C., BIEMI J. (2012). Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes Rendus Géoscience*, N°344, 288-296.
- LUBES-NIEL H., MASSON J.M., PATUREL J.E., SERVAT E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, N° 3, 383-408.
- MAHE G. (2006). Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20ème siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation », Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques, Montpellier II, France, 159p.
- MAHÉ G., L'HÔTE Y., OLIVRY J.C., WOTLING G. (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa–1951–1989. *Hydrological Science Journal*, Vol.46, N°2, 211–226.
- MOUELHI C. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Ecole nationale du génie rural des eaux et forêts de Paris, France, (2003) 274 p.
- OUEDRAOGO M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 257p.
- PATUREL J.E., OUEDRAOGO M., SERVAT E., MAHÉ G., DEZETTER A., BOYER J.F. (2003). The concept of hydropluviometric normal in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Science Journal*, Vol. 48, N°1, 125–137.

- PERRIN C., MICHEL C. et ANDRÉASSIAN V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, N° 279, 275-289.
- SAVANE I., COULIBALY K.M., GIOAN P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, Vol.4, N°12, 231-237.
- SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., BOYER J. F., LUBES-NIEL H., FRITSCH J. M., MASSON J.M., MARIEU B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *IAHS Publication*, N°252, 323-337.
- SORO T.D., SORO N., OGA Y.M.S., LASM T., SORO G., AHOUSSE K.E., BIEMI J. (2013). 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*, Vol. 5, 55-73.
- VITTECOQ B., LACHASSAGNE P., LANINI S. et MARECHAL J.C. (2010). Évaluation des ressources en eau de la Martinique : calcul spatialisé de la pluie efficace et validation à l'échelle du bassin versant. *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 23, N°4, 361-373.