

Etude de la variabilité climatique et de ses impacts sur le régime hydrologique de la rivière Lefini, affluent de rive droite du fleuve Congo

**Jean Armand PAKA^{1,2}, Jean Bienvenu DINGA², Destyles Van KOMBYLA¹,
Luc SIGHA NKAMDJOU³ et Marie Joseph SAMBA - KIMBATA¹**

¹ *Université Marien NGOUABI, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Laboratoire de Géographie Physique, BP 69 Brazzaville, Congo*

² *Institut National de Recherches en Sciences Exactes et Naturelles (IRSEN), Laboratoire d'Hydrologie, Avenue de l'Auberge de Gascogne, Cité Scientifique (ex-ORSTOM), Château d'Eau, BP 2400 Brazzaville, Congo*

³ *Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM), BP 4110 Nioungkak, Yaoundé, Cameroun*

* Correspondance, courriel : graceliapaka@gmail.com

Résumé

Cette étude sur la variabilité climatique et hydrologique de la Léfini, affluent de rive droite du fleuve Congo et ses impacts sur le régime hydrologique a été faite en application des méthodes statistiques telles filtre passe-bas d'ordre 2 de Hanning et des tests de détection de rupture. Cette étude statistique permet d'analyser l'évolution spatio-temporelle des précipitations et des débits au niveau de l'unique station hydrométrique située au pont de la RN2 au village Mbouambé dans le département du Pool. La pluviométrie du bassin versant de la Léfini a connu de fortes fluctuations interannuelles avec une succession de périodes sèches et humides au cours de la période 1960 - 1990 et une baisse généralisée des précipitations sur toutes les stations étudiées à partir des années 91. L'analyse des écoulements de la rivière Léfini a servi de détecter une rupture en 1982. Cette rupture est à l'origine d'une légère baisse des écoulements de la rivière Léfini à 24 % à son exutoire situé à 80 km du barrage hydroélectrique d'Imboulou. Les résultats du bilan hydrologique mettent en évidence une faible perte en volume d'eau mobilisé de $15 \times 10^6 \text{ km}^3$ et un faible coefficient de tarissement voisinant $0,0005 \text{ j}^{-1}$.

Mots-clés : *Congo, Léfini, variabilité hydroclimatique, coefficient de tarissement.*

Abstract

Study of climate variability and its impacts on the hydrological regime of the Lefini river (right bank of the Congo river)

This study on the climatic and hydrological variability of the Léfini, a tributary of the right bank of the Congo River and its impacts on the hydrological regime was carried out by applying statistical methods such as Hanning's second-order low-pass filter and detection tests of breakthrough. This statistical study made it possible to analyze the spatio-temporal evolution of precipitation, and flows at the level of the single hydrometric station located at the bridge of the RN2 in the village of Mbouambé in the department of Pool. The rainfall of the Léfini watershed has experienced strong inter-annual fluctuations with a succession of

dry and wet periods during the period 1960 - 1990 and a general decrease of rainfalls in all the stations studied from the years 91. The analysis of the flows of the Léfini river helped to detect a rupture in 1982. This rupture is at the origin of a slight decrease in the flows of the Léfini river to 24 % at its outlet located at 80 km from the hydroelectric dam of 'Imboulou. The results of the hydrological balance show a low loss in volume of water mobilized of $15 \times 10^6 \text{ km}^3$ and a low drying-off coefficient of around 0.0005 j^{-1} .

Keywords : *Congo, Léfini, hydroclimatic variability, drying coefficient.*

1. Introduction

A l'heure actuelle, le changement climatique et son influence sur l'environnement et la société sont au cœur des préoccupations politiques et scientifiques [1]. Les études portant sur la variabilité et les changements climatiques ont intéressé la communauté mondiale suite à plusieurs manifestations climatiques de grande ampleur. Les précipitations représentent la majeure composante du climat et sont les plus concernées par la variabilité de leurs régimes aux échelles saisonnières, annuelles et interannuelles. Les changements climatiques et leurs impacts constituent aujourd'hui l'un des sujets les plus préoccupants de la communauté scientifique internationale [2, 3]. Dans ce contexte global, l'Afrique et, très particulièrement l'Afrique subsaharienne apparaît comme la région du monde la plus exposée aux changements climatiques [4]. La variabilité des précipitations se caractérise par la fréquence des événements extrêmes qui sont marqués par des années très sèches ou des années très humides. Ces événements extrêmes sont prudemment imputés au changement climatique et sont considérés à l'heure actuelle comme de la variabilité interannuelle naturelle du climat [5]. L'accroissement des phénomènes climatiques extrêmes entraînant des inondations et des sécheresses dans le monde est l'une des conséquences des changements climatiques. Cette situation se traduit par l'occurrence des événements pluvieux extrêmes au cours de ces dernières années [6]. Ces variabilités climatiques abordées à l'échelle mondiale, ont fait l'objet d'études plus ciblées en Afrique de l'Ouest et Centrale par [7, 8] et au Congo par [9]. Même si la variabilité climatique a déjà été mise en évidence par plusieurs auteurs, il demeure utile d'actualiser ces études dont les données utilisées s'arrêtent généralement à 1993. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les impacts de la variabilité climatique et des activités anthropiques sur la disponibilité de ressources en eau sur le bassin versant de la Léfini. La démarche adoptée pour atteindre ce but consiste à analyser les impacts de la variabilité interannuelle des pluies et des débits par le calcul des indices centrés réduits, par l'application des tests de détection de rupture de Pettitt, de Buishand, la procédure bayésienne de Lee et Heghinian, segmentation d'Hubert.

2. Méthodologie

2-1. Présentation du secteur d'étude

Le bassin versant de la Léfini est situé entre les latitudes $14^{\circ}80'$ et $15^{\circ}12'$ Est et les longitudes $2^{\circ}32'$ et $3^{\circ}35'$ Sud avec une superficie de 13500 km^2 à son exutoire (au pont de la RN2) et un module interannuel de $420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (**Figure 1**). Le bassin versant de la Léfini est limité au nord par les bassins versants de la Nkeni et de l'Alima, au sud par les bassins versants de la Djiri et du Djoué, à l'ouest par le bassin versant du Ndouo et à l'est par le fleuve Congo. La rivière Léfini prend sa source à 600 m d'altitude sur le plateau de Djambala, coule sur une longueur de 250 km et se jette sur le fleuve Congo à une altitude de 285 m.

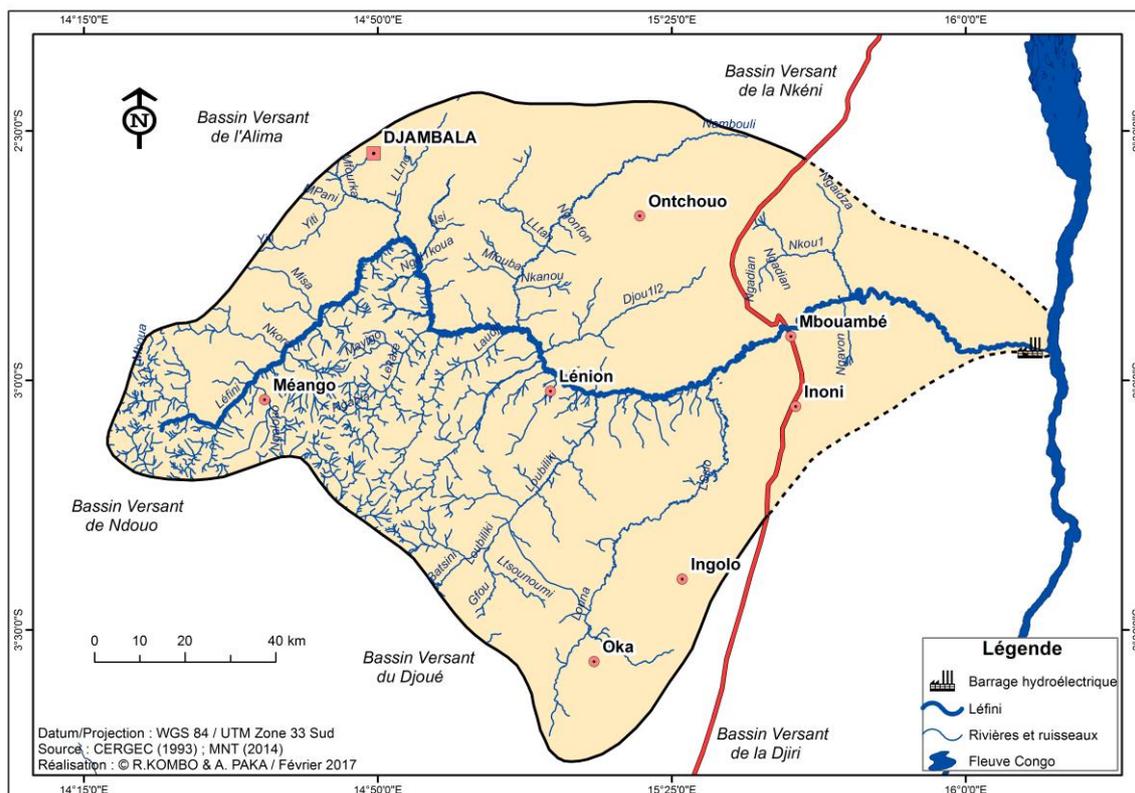


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Léfini

La végétation typique du bassin versant est une savane à *Loudétia demeusii* qui peut se transformer sur de grands espaces en savane *Trachypogon tholonu* et *Hyparrhenia diplandra*. Les vallées des cours d'eau sont occupées par des forêts mésophiles. La plus grande partie du bassin est constituée de sols ferrallitiques appauvris, jaunes, sur matériau sableux ou sablo-argileux. Il existe également dans certaines vallées secondaires des sols ferrallitiques podzoliques sur matériau sableux. La vallée principale est constituée de sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley et gley, sous végétation de forêt galerie parfois très large. Le bassin versant de Léfini est influencé par un climat tropical de transition avec une pluviométrie allant de 1600 à 2000 mm d'eau par an.

2-2. Données

Les données utilisées pour cette étude sont les précipitations collectées au service météorologique de l'ANAC et les données hydrométriques consignées dans les recueils de [11, 12] et complétées par la banque des données du service hydrologique de l'IRSEN, toutes sont au pas de temps mensuels. Afin de faire une bonne étude hydroclimatique, ces données (pluie et débit) ont été organisées selon l'année hydrologique commençant en octobre. La pluviométrie annuelle a été utilisée pour calculer la moyenne interannuelle, l'indice pluviométrique annuel, la moyenne par décennie. Quant aux modules hydrologiques, ils ont été utilisés pour calculer la moyenne interannuelle, l'indice d'écoulement annuel et la moyenne par décennie. Cet ensemble de données a été exploité sur la période 1960 - 2010 (50 ans) selon les normes de l'OMM.

2-3. Méthodes

La méthodologie utilisée pour cette étude est celle déjà utilisée par plusieurs auteurs dans les différentes zones géographiques. C'est le cas de [12] sur le bassin de l'Ouémé à Béterou au Bénin ; [13] sur l'Oubangui en RCA ; [14] au centre-ouest de la Côte d'Ivoire sur le bassin versant de Lobo ; au Maroc sur l'Oum er Rbia par [15] ; [16] sur le SEBOU au Maroc ; [17] sur le bassin versant de l'Alima au Congo. Cette méthode consiste à étudier d'abord la variabilité hydroclimatique et de voir ensuite les impacts des activités anthropiques sur les régimes hydrologiques des cours d'eau.

2-3-1. Analyse de la variabilité des précipitations et des débits

L'indice de Nicholson et le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 permettent de mettre en évidence la variabilité climatique et hydrologique à travers l'exploitation des données pluviométriques et hydrométriques observées sur une longue série de mesures pour mettre en évidence les tendances hydroclimatiques et de différencier les périodes sèches, des périodes humides [18]. Ces indices sont calculés à partir des données de sept stations pluviométriques de la zone d'étude pour une durée de 30 à 50 ans d'observation et de l'unique station hydrométrique installée sur cette rivière pour 50 ans de 1960 à 2010.

2-3-1-1. Indice de Nicholson

L'indice de Nicholson calculé pour chaque année est exprimé par *l'Equation* suivante [19]

$$I_p = \frac{(x_i - \bar{X})}{\sigma} \quad (1)$$

Avec : X_i = hauteur de pluie en mm (ou débit en $m^3 \cdot s^{-1}$) de l'année i , \bar{X} = hauteur de pluie en mm (ou débit en $m^3 \cdot s^{-1}$) moyenne sur la période d'étude, σ = écart-type de la hauteur de pluie (ou débit) sur la période d'étude.

2-3-1-2. Filtre passe bas de Hanning d'ordre 2

Le Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, appelé aussi moyenne mobile pondérée, permet d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique. Pour ce faire, les totaux pluviométriques et les débits sont pondérés suivant *l'Equation (2)* [20] :

$$x_{(t)} = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)} \quad \text{pour} \quad 3 \leq t \leq (n-t) \quad (2)$$

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes [$x_{(1)}$, $x_{(2)}$] et des deux derniers termes [$x_{(n-1)}$, $x_{(n)}$] sont obtenus respectivement avec les *Equations* suivantes :

$$x_{(1)} = 0,54x_{(1)} + 0,46x_{(2)} \quad (3)$$

$$x_{(2)} = 0,25x_{(1)} + 0,50x_{(2)} + 0,25x_{(3)} \quad (4)$$

$$x_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (5)$$

$$x_{(n)} = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)} \quad (6)$$

Les indices centrés et réduits des hauteurs pluviométriques annuelles pondérées obtenues sont calculés pour mieux distinguer les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique. Les séries de débits sont soumises aux mêmes procédures de calculs que les séries pluviométriques.

2-3-1-3. Méthodes de détection de rupture dans les précipitations et les écoulements

Le logiciel Khronostat (1998), développé par l'Institut de Recherche et de Développement (IRD) a permis de faire les analyses statistiques. [21, 22] ont défini la rupture de façon générale comme un changement intervenant dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné le plus souvent inconnu. Une telle rupture marque une modification du régime pluviométrique ou hydrologique. Plusieurs méthodes permettent de détecter des ruptures des séries chronologiques. Dans cette étude, nous avons retenu le test de PETTIT, la méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN et la segmentation d'HUBERT pour leur puissance et leur robustesse.

2-4. Étude du tarissement des cours d'eau et des volumes mobilisés par les aquifères

L'étude du tarissement de la rivière Léfini a été réalisée à l'aide du calcul du coefficient de tarissement.

2-4-1. Calcul du coefficient de tarissement : loi de Maillet et méthode dichotomique

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 [23, 24]. Le calcul du coefficient de tarissement est basé sur le modèle de Maillet amélioré par résolution dichotomique proposée par [25] qui a déjà été utilisé par d'autres auteurs [26 - 30]. Ces auteurs ont montré la pertinence de ce modèle dans l'étude du tarissement. 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 [22]. 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. Elle est basée sur la loi de Maillet, dont l'Expression mathématique est la suivante :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \tag{7}$$

où Q_t est le débit à l'instant t donné, Q_0 le débit initial (débit au début du tarissement) et k le coefficient de tarissement de Maillet.

Dans la méthode dichotomique, on estime que la courbe annuelle de tarissement est l'expression de la vidange du réservoir souterrain. La quantité d'eau récupérée à la station de jaugeage correspond exclusivement aux volumes dynamiques (V) mobilisés par l'ensemble des aquifères du bassin versant. L'Equation du coefficient de tarissement (k) s'écrit :

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

2-4-2. Évaluation du volume mobilisé par les aquifères

Le volume mobilisé par l'ensemble des aquifères est donné par l'équation :

$$V_{\text{mobilisé}} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{86400 \times Q_0}{k} \quad (9)$$

où Q_0 est exprimé en m^3/jour et k en jours.

2-5. Relation Pluie/Débit

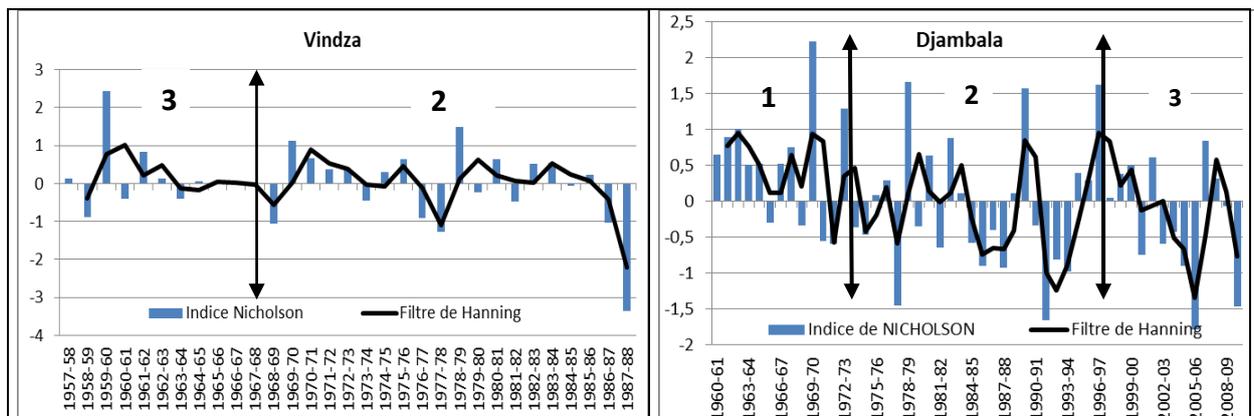
La relation Pluie/Débit utilisée dans cette étude est celle de station témoin qui consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage [31, 32].

3. Résultats et discussion

3-1. Analyse de la variabilité des précipitations et des débits par les différents tests précitées la méthodologie

3-1-1. Variabilité interannuelle des précipitations

La fluctuation interannuelle de la pluviométrie observée aux stations de Djambala et de Mpouya se caractérise par des périodes humides, normales et déficitaires. Primo, la station de Djambala (**Figure 2**) est marquée par une période humide de 1960/61 à 1972/73, de 1973 - 98 une période normale et de 1998/1997 à 2009/2010 c'est la période déficitaire. Secondo, la station de Mpouya de 1960/61 à 1994/95 c'est une période humide et reste de temps d'étude c'est la période déficitaire (**Figure 2**). La variabilité interannuelle diminue mais reste toujours importante après l'utilisation du filtre passe-bas qui met cependant plus en évidence les périodes de déficits et d'excédents pluviométriques (**Figure 2**).



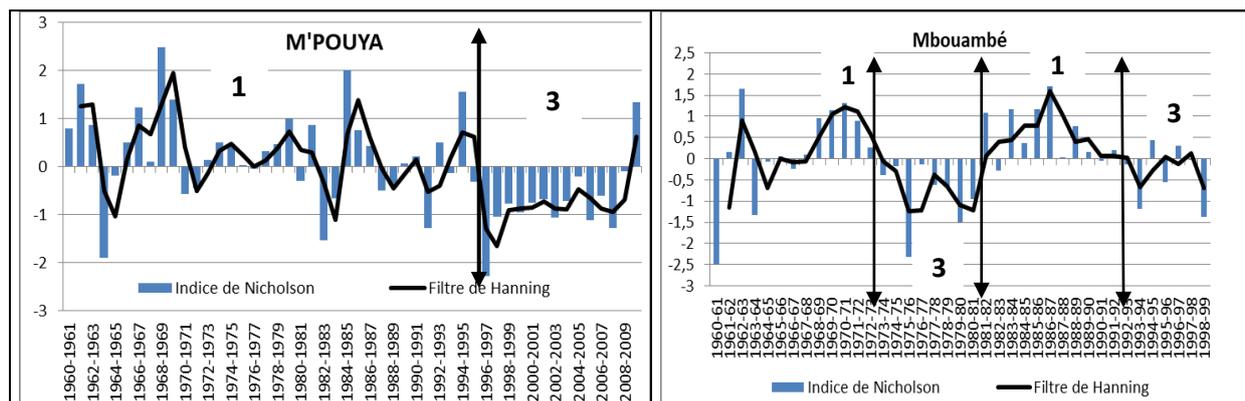


Figure 2 : Evolution interannuelle de la pluviométrie aux stations de Djambala, Mpouya, Mbouambé et Vindza avec les indices centrés réduits des hauteurs de pluie et les totaux pluviométriques annuels pondérés
 1-Période Humide ; 2-période normale ; 3-Période déficitaire

Ces résultats montrent que dans les quatre stations étudiées, celle de Djambala est marquée par une alternance de période humide, normale et sèche, et celle de Mpouya est caractérisée par une grande période humide qui est observée dans toute la région. En effet, la région présente une période de baisse pluviométrique qui se fait ressentir sur les quatre stations (Djambala et Mpouya, Mbouambé et Vindza) vers les dernières décennies de notre étude. Dans les deux stations la grande période excédentaire est suivie d'une longue période déficitaire qui débute à partir des années 1990. Elle est ressentie dans toute la région. Le test de Pettitt appliqué sur les séries chronologiques pluviométriques de notre région d'étude n'a montré aucune rupture sur les quatre stations. Les résultats du test de rupture de LEE et HEGHINIAN appliqué aux séries pluviométriques sont présentés par le **Tableau 1**. Ce test confirme réellement la présence de rupture dans les séries pluviométriques de la région. En effet, il donne la date à laquelle la rupture s'est produite. L'analyse des résultats montre qu'à l'exception de la station de Djambala qui présente une rupture en 2009, les autres stations ont bel et bien connu des ruptures à partir des années 1980. Aucune rupture n'a été détectée à la station de Vindza (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Ruptures des séries pluviométriques selon le test de LEE et HEGHINIAN et la segmentation de Hubert

LEE et HEGHINIAN			Segmentation de Hubert	
Stations	Année de rupture	Probabilité associée	Nombre de ruptures	Date de rupture
Djambala	2009	0.05	0	Pas de rupture
Mpouya	1995	0.21	1	1995
Mbouambé	1996	0.60	1	1996
Vindza	1985	/	1	1985

Les résultats de la segmentation de HUBERT appliquée aux séries chronologiques sont consignés dans le **Tableau 1**. Cette segmentation met également en évidence plusieurs ruptures dans les séries pluviométriques. Dans notre cas, ce test a montré une rupture en 1996 à la station de Mbouambé, une rupture à la station de Mpouya en 1995 et en 1985 à la station de Vindza. La rupture est très peu significative (1 %) dans les stations de Mbouambé, de Mpouya et de Vindza. Aucune rupture n'a été détectée dans la série chronologique de la station de Djambala.

Les résultats du **Tableau 1** témoignent bien une baisse pluviométrique dans l'ensemble du bassin versant de la Léfini. Cette baisse a des répercussions considérables sur les écoulements de la rivière Léfini. Cela a été détecté par [33], qui ont observé que l'année 1978 est marquée par une baisse des écoulements au niveau de toutes les stations hydrométriques dans le bassin versant du Kouilou-Niari. Cette baisse hydrométrique est une conséquence d'une baisse des précipitations dans ce bassin versant. Cela confirme l'hypothèse d'une diminution considérable des écoulements dans l'ensemble des cours d'eau des plateaux Téké.

3-1-2. Variabilité interannuelle des débits

Le Filtre passe bas d'ordre 2 de HANNING appliqué aux séries hydrologiques (**Figure 3**) montre une régularité interannuelle des écoulements dans le bassin versant de la Léfini. Bien qu'une rupture soit observée en 1982, les débits annuels restent réguliers après cette année rupture. De 1960-61 à 1981 - 82, le débit annuel moyen est de $423 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (avec une valeur annuelle maximale de $459 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, en 1963 - 64). Sur la période 1982 - 83 à 2009 - 10, le débit annuel moyen tombe à $384 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (avec une valeur annuelle maximale de $427 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, en 2009 - 10). Ces débits maxi de chaque sous période se reproduisent une seule fois sur la série des données.

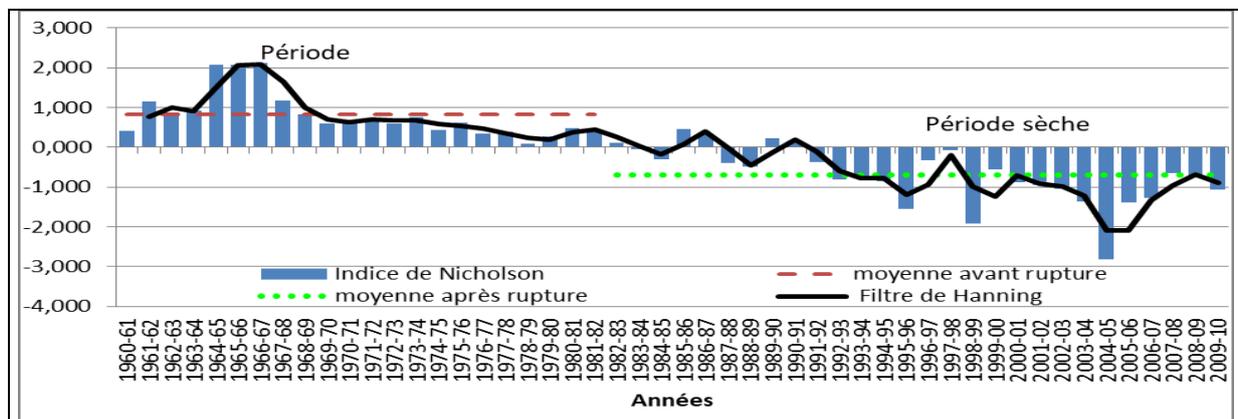


Figure 3 : Evolution interannuelle des débits de la Léfini à Mbouambé avec les indices centrés réduits et les totaux de débit annuels pondérés de 1960 à 2010

3-2. Relation débit/pluie

L'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau superficielle est mis en évidence en analysant les relations pluie/débit, pour déceler la part climatique de la part anthropique. Il est vrai que la variabilité hydrologique découle directement de la variabilité climatique. Mais tout aménagement hydraulique comme la construction des barrages peut perturber cette relation [32]. Dans le bassin versant de la Léfini, la relation pluie/débit (**Figure 4**) permet de suivre l'évolution du comportement hydroclimatique de la rivière Léfini mettant ainsi en évidence d'une part les effets de la rupture climatique, et d'autre part les effets qui sont probablement liés au barrage d'Imboulou. En effet, la relation pluie/débit obtenue pour le bassin versant de Léfini est très différente de celle obtenue sur un bassin versant peu anthropisé comme l'Oubangui [16]. Les débits liquides d'un cours d'eau dépendent des précipitations quelle que soit la zone géographique où l'on se trouve. La comparaison des régimes pluviométriques et hydrologiques de la Léfini à Mbouambé au pas de temps mensuel, montre les variations des pluies et des débits au cours de l'année (**Figure 4**). Les débits suivent les variations mensuelles des pluies. Le régime des débits est de type bimodal avec un premier pic au mois de novembre pendant la première saison pluvieuse et second pic est

observé pendant le mois de mai pendant la deuxième saison des pluies (**Figure 4**). La saison des pluies (OND) qui bénéficie d'un état d'humidité du sol plus élevé dans le BVL que la saison (MAM), donne lieu à un débit fort en novembre ($449 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), très déphasé au régime pluviométrique. De juin à septembre s'installe la grande saison sèche (JJAS) qui a un débit très faible en septembre ($377 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), marquée par une décroissance continue et régulière des débits de basses eaux. La première saison pluvieuse (OND) débute en octobre, culmine généralement en novembre, et voit arriver une nouvelle augmentation des débits qui atteint sa pointe maximale en novembre. La Léfini calque son régime hydrologique sur celui des pluies, malgré un écart constaté au mois de novembre. Cela a été aussi observé sur le bassin versant de la Loufoulakari un cours d'eau coulant sur le plateau des Cataractes, un des affluents de la rive droite du fleuve Congo par [34]. L'analyse de la relation pluie/débit met en évidence la forte influence des précipitations sur la régularisation du régime hydrologique de la rivière Léfini.

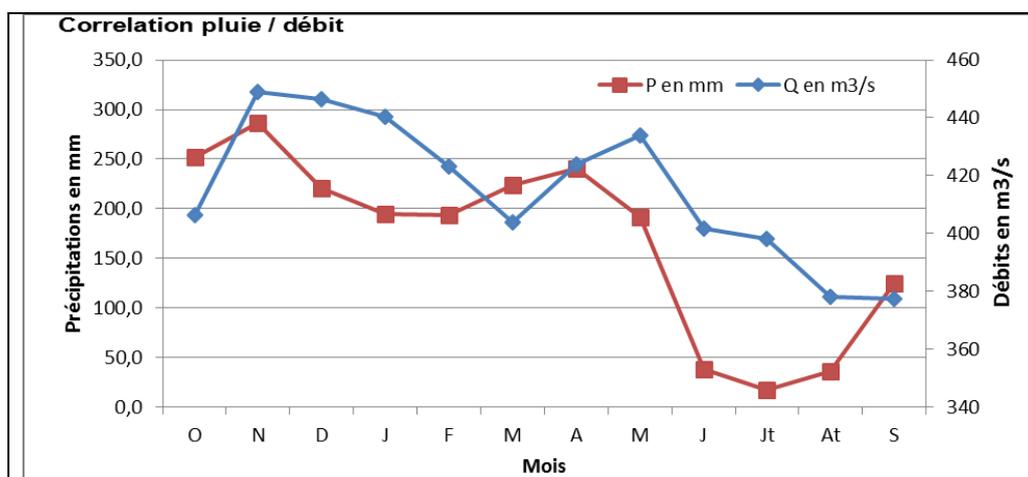


Figure 4 : Relations débits liquides-précipitations mesurés dans le bassin versant de la Léfini

3-3. Variation du régime des écoulements de la rivière Léfini

Les débits moyens annuels de la rivière Léfini montrent des fluctuations peu importantes sur la période 1960 - 1990 (**Figure 5**). Outre la stabilité constatée de 1960 à 1982, les variations d'une année à l'autre, des débits annuels deviennent plus faibles à partir de 1990. Le débit moyen interannuel de la Léfini de 1961 à 2010 est de $420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pendant que le maximal interannuel de la même période est de $480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 2010, avec un débit minimal de $321 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ enregistré en 2004 - 2005 (**Figure 5**).

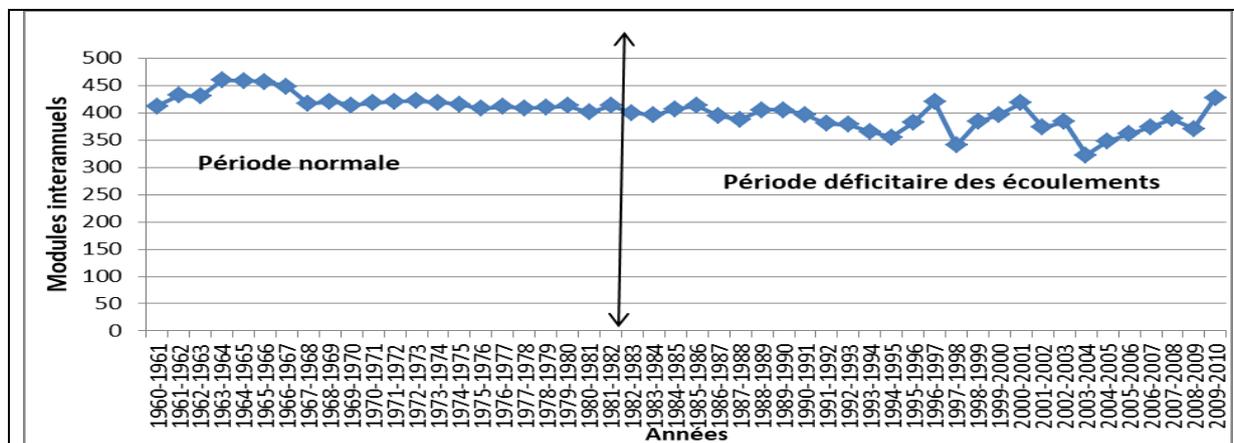


Figure 5 : Evolution des écoulements dans le bassin versant de la Léfini de 1960 à 2010

De 1981 à 2009, la Léfini a connu une période de baisse de ses écoulements. Cela est causé par la récession pluviométrique que subit le continent africain ces dernières décennies. La variation annuelle des modules de la rivière Léfini au niveau de la station de Mbouambé est illustrée par la **Figure 6**. Le module de la Léfini à Mbouambé est de $420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1960 à 2010) sur un bassin versant de 13500 km^2 . Les coefficients de variation des débits de la rivière Léfini sont bien corrélés avec ceux des précipitations (variant entre 10 et 35 %) dudit bassin versant présentant une tendance faible.

3-4. Coefficient de tarissement et volume d'eau mobilisé par les aquifères du bassin versant de la Léfini

Les coefficients de tarissement de MAILLET sur la période 1961 - 2010 montrent de fortes fluctuations interannuelles surtout après 1982 qui est l'année de rupture. Le coefficient de tarissement et le volume d'eau mobilisé évoluent en phase de 1961 à 1982.

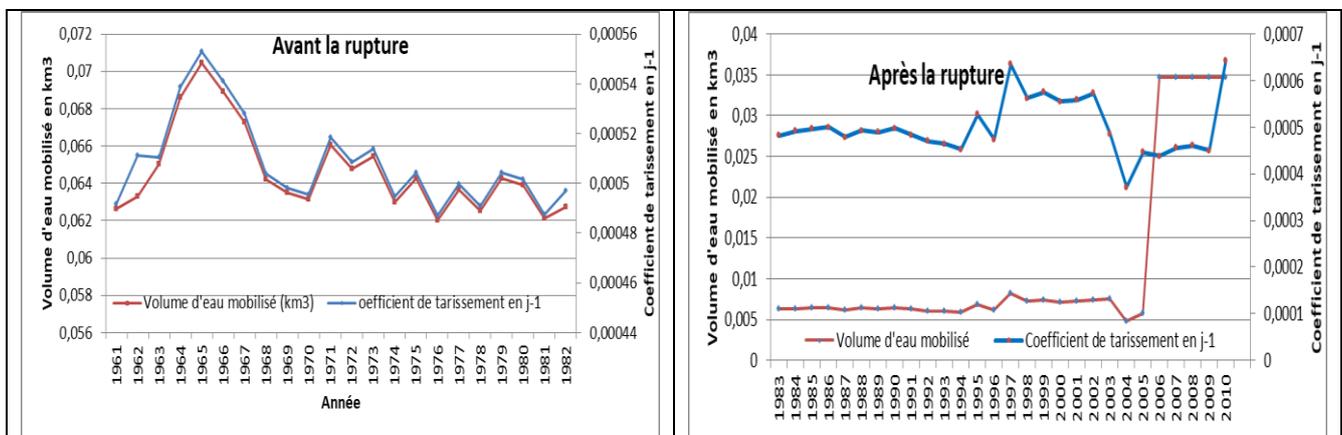


Figure 6 : Variation des coefficients de tarissement et volumes d'eau mobilisée dans le bassin de la Léfini à M'bouambé avant et après rupture (1982)

Après la rupture, nous constatons que le coefficient de tarissement et le volume d'eau mobilisé sont en opposition pendant toute la sous période de 1983 à 2010. Les coefficients de tarissement élevés avant 1982 (année de rupture), montrent que les quantités importantes d'eau sont mobilisées en saison pluvieuse et la baisse observée après la rupture prouve que la baisse pluviométrique est à l'origine de la baisse des écoulements. Les résultats du **Tableau 2** montrent que le coefficient de tarissement de la rivière Léfini est très faible ($0,0005 \text{ j}^{-1}$) pendant toute la période d'étude. Cela prouve à suffisance que les écoulements de la Léfini ne dépendent pas uniquement de la pluviométrie mais aussi du substratum.

Tableau 2 : Coefficients de tarissement dans le bassin versant de la Léfini pour la période 1961 - 2010

Bassin	Périodes	Coefficient de Tarissement J^{-1} moyen	Ecart	
			1960 - 1982	1983 - 2010
Léfini à M'bouambé	1961-1982	0,000507	7×10^{-6}	Débit charnière (m^3/s)
	1983-2010	0,000500		

L'analyse des coefficients de tarissement pour la période 1961 - 2010 (**Tableau 2**), montre que l'écart entre les moyennes avant et après le tarissement est presque nul. Le bassin versant de la Léfini a le

tarissement le plus lent et le plus étalé dans le temps, en raison de la grande capacité de son réservoir souterrain. Le coefficient de tarissement est proportionnel à la vitesse de vidange de l'aquifère et il augmente en période de sécheresse [35]. Ce coefficient permet d'apprécier l'état des « entrées » d'eau qui contribuent à la modification apparente des relations pluie/débit observées sur les bassins fluviaux [36]. 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 [37]. Il ressort des résultats du **Tableau 3** que la valeur moyenne du volume d'eau mobilisé en phase de tarissement, qui atteint $54,5 \times 10^6 \text{ km}^3$ sur l'ensemble de la période d'observation, s'élève à $62 \times 10^6 \text{ km}^3$ sur la sous période 1960 - 1982 et tombe à $47 \times 10^6 \text{ km}^3$ sur la période 1983 - 2010, soit un déficit de 24 %, sur une superficie de 13500 km^2 .

Tableau 3 : Volumes mobilisés par l'aquifère autour de la rupture de 1982

Rivière	Sous périodes	Volumes mobilisés (km^3)	Déficit
Léfini	1960 - 1982	62×10^6	24 %
	1983 - 2010	47×10^6	

La vidange des nappes à partir de l'année hydrologique 1982 - 83 a été observée, mais de façon très lente. L'étude du tarissement et des volumes mobilisés par les aquifères confirme bien que les écoulements de base contribuent en grande partie à l'écoulement des eaux de surface de la rivière Léfini. Bien que la baisse des précipitations soit observée ces dernières décennies, l'impact de la variabilité hydroclimatique dans le bassin versant de la Léfini se manifeste par une baisse du coefficient de tarissement et une hausse des volumes mobilisés par les aquifères. Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin versant, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique tropical [23]. Il peut correspondre à deux processus : le déstockage de l'eau accumulée dans le réservoir hydrographique et/ou à la vidange de la nappe souterraine.

4. Conclusion

Le bassin versant la Léfini comme tout autre bassin au monde subit les effets de la variabilité climatique. Dans cette étude nous nous sommes rendu compte que, bien que ce bassin ait connu des périodes pluviométriques déficitaires, normales et excédentaires celles-ci n'ont pas des répercussions considérables sur les écoulements de surface de la rivière Léfini à son exutoire de Mbouambé. Les tests statistiques de rupture ont révélé des changements dans le régime pluviométrique et hydrologique dans ce bassin versant. Ces ruptures ont permis de mettre en évidence une différence considérable dans l'intensité, la durée et la variabilité des pluies. Sur les séries de débits annuels, la rupture a été détectée dans le bassin en 1982, ce qui n'est pas en rapport avec celle observée sur les séries des précipitations qui ont connu des ruptures dans les années 1990. L'analyse des relations pluie/débit associée aux tests statistiques de détection de rupture a permis de différencier l'impact climatique de l'impact anthropique lié aux effets néfastes de la région. Les résultats de cette étude constituent une importante base de données pour l'évaluation de la vulnérabilité de la variabilité climatique et les effets importants sur les régimes hydrologiques des cours d'eau aménagés dans le dit bassin. Dans ce contexte, l'amélioration et le renforcement des systèmes d'observations des pluies et des débits au niveau des différentes stations s'avèrent nécessaires afin de mieux caractériser l'évolution du climat et contribuer à une meilleure adaptation aux probables effets néfastes des changements climatiques sur les écoulements de surface de la rivière Léfini. Les régimes hydrologiques dans le bassin versant de la Léfini subissent cependant des variations mais courtes dans le temps et sont alimentés en période sèche par les eaux souterraines, ce qui classe cette rivière parmi les fleuves aux régimes hydrologiques les plus réguliers au monde.

Références

- [1] - A. DEZETTER, J. E. PATUREL, D. RUELLAND, S. ARDOIN-BARDIN, L. FERRY, G. MAHE, C. DIEULIN, E. SERVAT, Modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du fleuve Niger à Koulikoro. Prise en compte des variabilités spatio-temporelles. World Water Congress, 1-4 septembre, Montpellier, France, (2008) 111 - 126
- [2] - E. OGOUWALE, Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire, LECREDE/ FLASH/ EDP/ UAC, Thèse de Doctorat unique, (2006) 302 p.
- [3] - E. W. VISSIN, Variabilité climatique et savoirs endogènes en pays Torri dans la commune de Akpro-Misséré. (2016) 19 p.
- [4] - P. K. THORNTON, P. G. JONES, T. M. OWIYO et al., Mapping Climate Vulnerability and Poverty in Africa. Report to the Department for International Development, ILRI, Nairobi, (2008) 200 p.
- [5] - C. NORRANT, Variabilité climatique passée, changement climatique futur : Que peut-on réellement observer. Air Pur N° 72 - Deuxième semestre (2007)
- [6] - D. KOUNGBANANE, P. E. ZAHIRI, H.S. TOTIN VODOUNON, E. AMOUSSOU, L. Y. LARE et H. D. KOUBODANA, Analyse fréquentielle et détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti au Togo. *Afrique SCIENCE* 17(1) (2020) 73 - 88
- [7] - J. E. PATUREL, E. SERVAT, B. KOUAME, H. LUBES-NIEL, M. OUEDRAOGO, J. M. MASSON, "climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: an integrated regional approach", *Journal de l'hydrologie*, vol. 191, (1997) 16 - 36
- [8] - A. M. KOUASSI, F. KOFFI, Y. B. KOFFI, B. D. KOUAKOU, J. E. PATUREL et S. OULARE, Analyse de la variabilité climatique et ses influences sur le régime sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire, *Cybergéo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, Document 513, mis en ligne le (07 Décembre 2010)
- [9] - J. D. MALOBA MAKANGA et G. SAMBA, Organisation pluviométrique sur l'espace Congo-Gabon (1950-1998). *Sécheresse*, Vol. 8, N°1 (2000) 39 - 45 p.
- [10] - A. LARAQUE et B. MAZIEZOULA, Banque de données hydrologiques des affluents congolais du fleuve Congo-Zaïre et informations physiographiques (1995) 157 pages
- [11] - J. C. OLIVRY, Régimes hydrologiques des rivières Batékés (Léfini, Alima, Nkéni). ORSTOM - Brazzaville (1967) 52 p.
- [12] - E. W. VISSIN, C. S. HOUSSOU, C. HOUNDENOU, Impact des déficits pluviométriques sur les ressources en eau et gestion endogène dans le bassin de l'Oueme à Beterou . *Geographia Technica*, Numéro spécial, (2009) 465 - 470
- [13] - C. R. NGUIMALET et D. ORANGE, Caractérisation de la baisse hydrologique de la rivière Oubangui à Bangui, République Centrafricaine. Colloque International sur l'Hydrologie des Grands bassins fluviaux de l'Afrique (26 - 30 Octobre 2015), Hammamet, Tunisie
- [14] - A. B. YAO, B. T. A. GOULA, Z. A. KOUADIO, K. E. KOUAKOU, A. KANE et S. SAMBOU, Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Lobo au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 19 (2012) 136 - 157
- [15] - I. JOUILIL, K. BITAR, H. SALAMA, AMRAOUI, A. MOKSSIT, M. TAHIRI, Sécheresse météorologique au bassin hydraulique Oum er Rbia durant les dernières décennies. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 12, (Janvier 2013) 109 - 127

- [16] - E. B. YOLI BAUDET, S. HAIDA and J. L. PROBST, Analyse de la variabilité hydroclimatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride : Le Sebou Au Maroc. *European Scientific Journal*, ISSN 1857-7881, vol. 13 (5) (2017) 509 - 525
- [17] - J. A. PAKA, D.V. KOMBYLA, B. KOUA BITA, J. B. DINGA, S. YALLO MOUHAMED, E. AMOUSSOU et M. J SAMBA - KIMBATA, Fluctuations des précipitations et des écoulements dans le bassin versant de l'Alima à Tchikapika au Congo-Brazzaville en Afrique centrale de 1960-1993. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 32 (2018) 85 - 97
- [18] - T. D. SORO, N. SORO, M. S. OGA YEI, T. LASM, G. SORO, E. AHOUSI KOUASSI, J. BIEMI, 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*, V.5, (2011) 55 - 73.
- [19] - S. E. NICHOLSON, J. KIM, J. HOOPINGARNER, Atlas of African rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Florida, USA (1988)
- [20] - A. ASSANI, Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Nino/ La Nina), (1999), 10 (4) 245 - 52
- [21] - LUBES HELENE, MASSON JEAN MARIE, SERVAT ERIC, PATUREL JEAN EMMANUEL, B. KOUAME, BOYER JEAN FRANÇOIS, Caractérisation des fluctuations dans les séries chronologiques par application des tests statistiques. Etude bibliographique. Programme ICCARE, Rapport n°3, ORSTOM, Montpellier, France (1994)
- [22] - H. LUBES-NIEL, J. M. MASSON, JEAN EMMANUEL PATUREL et ERIC SERVAT, 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 / Journal of Water Science*, vol. 11, n° 3, (1998) 383 - 408.
- [23] - J. P. BRICQUET, G. MAHE et F. BAMBA, Changements climatiques et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In : L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier (ed. by P. Chevallier et B. Pouyaud). IAHS Publ. N° 238. (1995) 113 - 124
- [24] - A. M. KOUASSI, K. F. KOUAME, M. B. SALEY et J. BIEMI, Application du modèle de maillet à l'étude des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest: cas du bassin versant du n'Zi Bandama (Côte d'Ivoire) ; *Journal of Asian Scientific Research*, 3(2) (2013) 214 - 228
- [25] - I. SAVANE, K. M. COULIBALY et P. GION, Etude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de Tarissement des cours d'eau. *Sécheresse*, vol 14, n°1 (2003) 37 - 42
- [26] - M. EL-OUAFI, 1993 : Tarissement et vidange des réservoirs de la liane (Nord de la France)., *Hydrologie Continentale*, 8(2) (1993) 103 - 112
- [27] - I. SAVANE, K. M. COULIBALY et P. GION, Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man, *Sécheresse*, 12, 4, (2001) 231 - 237
- [28] - M. B. SALEY, Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire. (2003)
- [29] - E. W. VISSIN, Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France, (2007) 310 p.
- [30] - E. AMOUSSOU ERNEST, Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire mono-ahémé-couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 305 p.

- [31] - B. D. RICHTER, J. V. BAUMGARTNER et D. P. BRAUN, How much water does a river need *Freshwater Biology*. 37 (1997) 231 - 249
- [32] - A. A. ASSANI, T. Buffin-Belanger, A. G. Roy, Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Rev. Sci. Eau*. 15, (2002) 557 - 257
- [33] - D. V. KOMBYLA, G. A. MIAME MOUELO, J. A. PAKA, T. CODJO, E. OGOUWALE et M. J. SAMBA-KIMBATA, Variations hydro climatiques dans le bassin versant du Kouilou-Niari en République du Congo. *Afrique SCIENCE* 14(6) (2018) 37 - 47
- [34] - J. A. PAKA, Etude hydrologique comparée des bassins versants de l'Alima et de la Loufoulakari. Mémoire de maîtrise de géographie-physique. UMNG (2013) 97 p.
- [35] - G. MAHE, J. C. OLIVRY, R. DESSOUASSI, D. ORANGE, F. BAMBA and E. SERVAT, Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *CR. Acad. Sci. Paris, série IIA* 330, (2000) 689 - 692
- [36] - J. C. OLIVRY, J. P. BRICQUET, G. MAHE, Les études du PEGI sur le bassin du Congo-Zaïre dans le contexte déficitaire des ressources en eau de l'Afrique humide. Actes du colloque PEGI, INSU - CNRS, Paris. (1993a) 3 - 12
- [37] - R. OGOUWALE, Changements climatiques, Dynamique des états de surface et perspectives sur les ressources en eau dans le bassin de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua. Thèse pour l'obtention du Doctorat Unique de l'UAC en géographie et Gestion de l'Environnement, (2013) 201p.