

Variabilité Pluvio-Hydrologique et Incidences sur les Eaux de Surface dans la Basse Vallée de l'Ouémé au Sud-Est Bénin

[Rainfall Variability and Impacts on Surface Water in the Lower Ouémé Valley in South-East Benin]

KAWOUN ALAGBE Gildas¹, AHAMIDE Bernard², CHABI Amédée³, AYENA Abraham¹, ADANDEDJI Firmin³, Vissin Expédit¹

¹Laboratoire Pierre Pagney: Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Faculté des Sciences Humaines et Sociales (FASHS), Université d'Abomey-Calavi Bénin

²Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME), Faculté des Sciences Agronomiques (FSA), Université d'Abomey-Calavi Bénin

³Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-Calavi



Résumé- Les préoccupations relevant de la variabilité climatique et de leurs conséquences sur les ressources en eau requièrent une attention particulière dans la gestion et l'utilisation des ressources naturelles aussi bien dans le monde qu'au Bénin. Cet article analyse les incidences de la variabilité hydroclimatique sur les eaux de surface dans la basse vallée de l'Ouémé. Ainsi, l'approche méthodologique est axée sur l'usage des séries chronologiques de pluies et de débits sur la période 1971 à 2017. De même, l'application des méthodes de Nicholson, de même que des tests statistiques de détection de ruptures (test de Buishand, test de Hubert, test de Lee Heghinian et test de Pettitt) ont permis dans un premier temps de mettre en évidence une variabilité climatique caractérisée par une succession de périodes de récession pluviométrique (1971-1977) et une période humide (1978-2017). Dans un second temps, il a été détecté une rupture de stationnarité de l'écoulement en 1987 avec la sous période 1971 à 1987 qui présente une moyenne de 1318,71 et un écart de 829,13 tandis que celle de 1988 à 2017 a une moyenne de 2219 et un écart type de 838,11. Ces ruptures s'accompagnent d'une forte diminution d'apport d'eau en juin (1971-1977), soit 22,4 % par rapport à la sous-période 1978-2017 et d'un déficit d'écoulement en baisse sur tous les mois de la sous-période 1971-1977 par rapport à la sous période 1978 - 2017 à l'exception de mars.

Mots clés- Basse vallée de l'Ouémé, Eaux de surface, Variabilité pluvio- hydrologique, incidences.

Abstract- Concerns about climate variability and its impact on water resources require special attention in the management and use of natural resources both globally and in Benin. This paper analyses the impacts of hydroclimatic variability on surface waters in the lower Ouémé valley. Thus, the methodological approach focuses on the use of rainfall and flow time series over the period 1971 to 2017. Similarly, the application of Nicholson's methods, as well as statistical tests to detect breaks (Buishand test, Hubert test, Lee Heghinian test and Pettitt test) initially made it possible to highlight a climatic variability characterised by a succession of rainfall recession periods (1971-1977) and a wet period (1978-2017). In a second step, a break in the stationarity of the flow was detected in 1987 with the sub-period 1971 to 1987 having a mean of 1318.71 and a deviation of 829.13, while the sub-period 1988 to 2017 has a mean of 2219 and a standard deviation of 838.11. These breaks are accompanied by a strong decrease in water inflow in June (1971-1977), i.e. 22.4% compared to the sub-period 1978-2017, and a decreasing run-off deficit in all the months of the sub-period 1971-1977 compared to the sub-period 1978-2017, with the exception of March.

Keywords- Lower Ouémé valley, Surface water, Rainfall variability, impacts.

I. INTRODUCTION

Les perturbations observées dans la fréquence et les quantités de précipitations et des changements de températures pourraient entraîner des effets considérables sur les apports d'eau dans les bassins versants [1]. C'est ainsi que les variabilités hydrométriques ont un impact direct sur les ressources en eau, puisqu'en partie, le renouvellement de la ressource et la recharge de la nappe en dépendent [2]. Cet impact est particulièrement important dans les pays en développement où les techniques de mobilisation de ressources en eau ne sont pas encore diversifiées ou parfois restent à l'étape embryonnaire [3]. Les précipitations supérieures à la normale ont été enregistrées en Afrique Occidentale, avec des excédents compris entre 50 et 350 mm [4]. Ces événements pluvieux extrêmes augmenteront très probablement au cours des prochaines décennies [5].

En Afrique de l'Ouest et au Bénin en particulier, les grands fleuves comme le fleuve Ouémé, subissent une forte pression démographique liée à leur situation en zones humides [6].

Petit pays côtier de l'Afrique de l'ouest, le Bénin, n'échappe pas à ces changements climatiques et à leurs effets socioenvironnementaux [7]. Autant de recherches ont été menées sur les extrêmes hydroclimatiques et leurs impacts sur les ressources naturelles dans le bassin de l'Ouémé [8, 9 et 10].

Celle-ci vise à analyser la variabilité pluvio-hydrologique et ses incidences sur les eaux de surface dans la basse vallée de l'Ouémé.

Le secteur de recherche (figure 1) La basse vallée de l'Ouémé s'étend sur 50 km environ autour du cours inférieur du fleuve Ouémé et localisée au Sud-Est du Bénin. Elle est comprise entre 6°24'5"et 6°58'1" de latitude Nord et entre 2°22'7"et 2°30'41"de longitude Est. Limitée au Sud par le lac Nokoué et la lagune de Porto-Novo ; ses limites sont imprécises au Nord, à l'Est et à l'Ouest, car elles varient énormément avec l'importance des crues [11]. Ainsi, sa superficie peut donc varier de 1000 à 9000 km² selon le moment où les observations ont été faites [12]. Elle couvre les communes de Bonou, d'Adjohoun, de Dangbo, de Sô-Ava et des Aguégus.

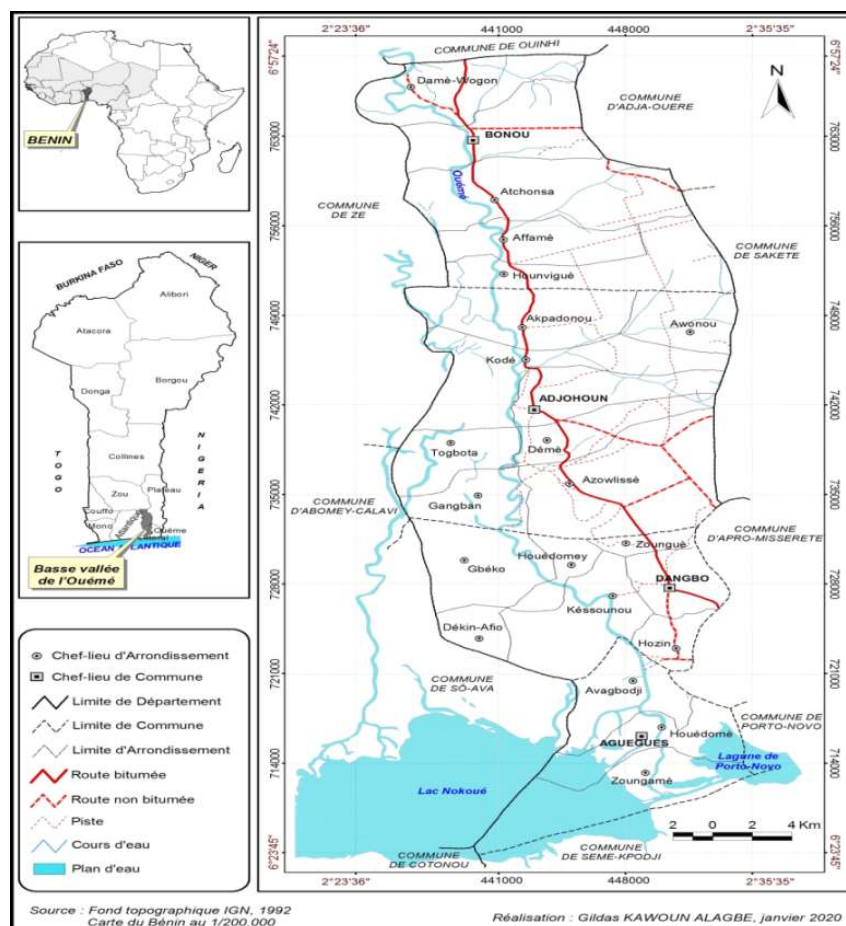


Fig 1. Localisation de la basse vallée de l'Ouémé

II. DONNEES ET METHODE

2.1. Données

Les données utilisées dans cette recherche sont relatives aux statistiques climatologiques, dont celles pluviométriques mensuelles de la station d'Adjohoun issues de la Météo-Bénin sur la période 1971-2017 ainsi que les données de l'ETP provenant de la station synoptique de Cotonou sur la même période. De même, les données hydrométriques constituées des débits mensuels à Bonou, sont obtenus au Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau couvrant la période 1971 à 2017.

Le réseau hydrographique de la basse vallée de l'Ouémé est drainé aussi par la rivière Sô, Wovimè, Djougoudou et Tovè [13]. Le nombre important de plans d'eau dans la vallée constitue un atout pour les activités humaines, notamment la pêche, le transport des produits pétroliers etc. qui induisent aussi la dégradation de la qualité des eaux de surface.

Ces données (pluviométrie, ETP et débits) à l'échelle mensuelle et interannuelle issues des stations et postes localisés à proximité de la basse vallée de l'Ouémé sont présentées dans le tableau I.

Tableau I : Stations hydrométéorologiques retenues

Stations	Coordonnées géographiques		Types de stations
	X	Y	
Adjohoun	2°13'34''	6°25'00''	Pluviométrique
Bonou	2°50'00''	6°55'60''	Pluviométrique
Bonou	2°27'00''	6°54'00''	Hydrométrique
Cotonou	2°06'53''	6°01'25''	Synoptique

2.2. Méthodes

Les méthodes explorées pour l'analyse de la variabilité pluvio-hydrométrique sont basées sur l'utilisation de tests statistiques d'homogénéité (détection de ruptures) et de tendance. Les paramètres de tendance sont relatives au test statistique de tendance centrale, de dispersion, de la méthode d'évolution linéaire, des moyennes mobiles ainsi que de l'indice standardisé des précipitations. En ce qui concerne la détection des ruptures de stationnarité sur la période 1971-2017, elle a été faite grâce au logiciel Khronostat 1.01, à travers le test de Buishand, le test de Hubert, le test de Lee Heghinian et le test de Pettitt.

2.2.1. Critiques et comblement des données: La collecte des données pluviométriques a révélé l'existence de certaines lacunes d'observation. Ainsi, le comblement de celles-ci vise à disposer de séries continues les plus

longues possibles en vue de procéder aux analyses conséquentes.

A cet effet, les lacunes observées dans le champ des stations pluviométriques (02 stations) et celle hydrométrique à Bonou dont le taux n'excède pas 5 % ont été reconstituées d'une part par la méthode des doubles cumuls des stations les plus proches les unes des autres et la méthode de régression linéaire de la fonction puissance d'autre part [2 et 14]. Ce qui a permis d'éliminer les biais, à garantir la fiabilité des données obtenues et à éviter des résultats biaisés [15 et 16]. Ainsi, le comblement des données pluviométriques manquantes est fait par la méthode des doubles cumuls des stations les plus proches les unes des autres (Bonou et Adjohoun). Soit pour une année i , les précipitations mensuelles x_i et y_i à deux stations x et y peuvent s'écrire :

$$X_i = \frac{\bar{X}}{\bar{Y}} y_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

$\bar{X}$ et $\bar{Y}$ sont les moyennes inter-mensuelles aux deux stations sur la période couvrant 46 ans. La variance de ε_i variable aléatoire indépendant tant de la valeur x_i que de y_i , est d'autant plus faible que le coefficient de corrélation linéaire entre les stations est plus grand et l'espérance mathématique de ε_i nulle.

En ce qui concerne les données hydrométriques, les années 2006 et 2009 ne disposent d'aucune donnée et l'année 1983 est dépourvue de données au niveau des trois premiers mois. Pour ce faire, il a été estimé la prévision de la valeur capitalisée mensuelle des débits à partir de celles existantes à la station voisine situées en amont (station de Savè). Les valeurs y manquantes sont calculées par la méthode de régression linéaire ayant pour équation :

$$Y = a + bx \quad (2)$$

où

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \text{ et } b = \frac{[n\sum xy - (\sum x)(\sum y)]}{n[\sum X^2 - (\sum x)^2]} \quad (3)$$

n : le nombre d'observations ;

y : la valeur recherchée ;

x : la série complète.

Au total, les séries chronologiques de pluies et de débits sur la période 1971-2017 ont connu un comblement des données manquantes qui varié entre 2 et 4 %. Ce qui a favorisé d'une part la suppression de certaines données douteuses et d'éliminer les valeurs fausses en vue d'améliorer significativement la justesse des données conservées pour le calcul des paramètres statistiques.

2.2.2. Paramètres de dispersion

Les paramètres de dispersion sont calculés à partir du paramètre fondamental de tendance centrale qu'est la moyenne. Ces paramètres de dispersion sont l'écart-type et le coefficient de variation. Le coefficient de variation est le moyen le plus utilisé pour tester et quantifier la variabilité d'une réalité ou d'un phénomène statistique [3]. Ce qui correspond au rapport de l'écart-type à la moyenne, exprimé en pourcentage [17 et 18]. Ainsi, le coefficient de variation permet d'établir la comparaison des degrés de variabilité de la pluviosité dans l'espace. L'écart type est utilisé pour évaluer la dispersion absolue des valeurs autour de la valeur centrale. Cependant, les paramètres de dispersion ne permettent pas à eux seuls de mesurer la variabilité car ne décrivent pas l'évolution temporelle des séries pluviométriques et hydrométriques [19]. De ce fait, pour mieux caractériser la variabilité, l'exploration de l'indice standardisé des précipitations est nécessaire.

2.2.3. Indice Standardisé des Précipitations (SPI) et Hydrométriques (SDI)

Les indices pluviométriques et hydrométriques permettent de dégager les grandes tendances dans les séries chronologiques et pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent à l'échelle annuelle [5]. Cet indice prend en considération l'importance du temps dans l'analyse de la disponibilité des ressources en eau. Il se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation 3 [15].

$$I_i = \frac{P_i - P_m}{\sigma} \quad (3)$$

P_i : Précipitation de l'année i ; P_m : Précipitation moyenne ;

σ : valeur interannuelle de l'écart-type de la pluviométrie (ou du débit annuel) sur la période étudiée

2.2.4. Indice de pluviosité

Les gammes standard des valeurs des indices SPI permettent d'apprécier l'ampleur de la sécheresse (ou de l'humidité) pour chacune des années de la série chronologique [20]. A l'issue de cette opération, il est possible de déterminer le nombre d'années par gamme SPI et la signification correspondante en termes d'ampleur du phénomène climatique exprimé à partir de l'équation 4:

$$A_i = \frac{n_i}{N} \times 100 \quad (4)$$

Où, A_i est le pourcentage des années concernées par la classe i , n_i est le nombre d'année de la classe i et N , le nombre total d'années sur la période d'étude.

2.2.5. Tests statistiques d'homogénéité

2.2.5.1. Test de Pettitt (1979)

Le test de Pettitt a été souvent utilisé pour l'étude des variables hydrométéorologiques de l'Afrique en général [14 et 21]. Au Bénin, plusieurs recherches ont utilisé cette méthode [22]. Ce test, de par sa robustesse, à détecter une rupture dans les séries chronologiques [8], a été souvent utilisé pour l'étude des fluctuations de variables hydrométéorologiques [23 et 24]. Ce test, dérivé du test de Mann-Whitney [25], permet de tester deux échantillons d'une même série. A partir de deux échantillons $x_1, x_2, \dots, x_t$ et $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$ d'une même série $x_1, x_2, \dots, x_n$, la statistique U compte le nombre de fois où un membre du premier groupe excède un membre du second groupe. Elle s'écrit :

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (5)$$

Avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$, 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$.

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,n}$ pour t variant de n à $n-1$, si $K_{\max}$ désigne la valeur de K_n prise pour la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur $K_{\max}$ est donnée approximativement par l'équation 6 :

$$\text{Prob}(K_n > K_{\max}) = 2 \exp\left(\frac{-6(K_{\max})^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (6)$$

2.2.5.2. Ellipse de contrôle ou Ellipse de Bois

Cette méthode complète le test de la statistique U de Buishand [21]. Il est possible de définir une région de confiance donnée, sous l'hypothèse nulle, la série des Sk^* . Pour un seuil de confiance de $1-\alpha/2$, la région de confiance est définie par l'équation 7:

$$\pm \frac{\bigcup_{-1}^{-\alpha/2} \sqrt{K(N-K)}}{\sqrt{(N-1)}} Dx \quad (7)$$

C'est cette région de confiance qu'on appelle ellipse de contrôle.

2.2.5.3. Test de segmentation de Hubert (1989)

La procédure de segmentation de séries chronologiques a été présentée par [19]. Le principe de cette procédure est de « découper » la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). La segmentation est définie de façon suivante : toute série

$$x_i, i = i_2 \text{ avec } i_1 \geq 1 \text{ et } i_2 \leq N \text{ ou } (i_1 < i_2) \quad (8)$$

constitue un segment de la série initiale des (x_i) , $i=1, \dots, N$; L'Hypothèse nulle H_0 est «la série étudiée est stationnaire». Si la procédure ne produit pas de segmentation d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle n'est pas acceptée.

2.2.5.4. Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian 1977

Le modèle de base de la procédure est la suivante :

$$\begin{aligned} x_i &= \mu + \varepsilon_i, i = 1 \dots \tau \dots \\ \mu + \delta + \varepsilon_i &= \tau + 1 \dots N \end{aligned} \quad (9)$$

où les ε_j sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 . Les variables T , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus. T et $\bar{Q}$ représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement sur la moyenne. Le changement éventuel (la position et l'amplitude) correspond au mode des distributions à posteriori de T et $\bar{Q}$. La méthode fournit donc la probabilité que la rupture se produise au moment τ dans une série où on suppose a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé.

i. Dynamique hydrologique

a) Détermination de l'écoulement dans le bassin de l'Ouémé à Bonou

La formule de Le Barbé et al. (1993) a été utilisée à

$$\text{cet effet : } L = (Q * 3,1536.10^7) / S \quad (10)$$

avec L : lame d'eau écoulée par an, S : superficie du bassin versant ($S = 46\,990 \text{ km}^2$).

1. Coefficient d'écoulement

Il permet de résumer la relation nette existant entre pluie et débit de crue à l'échelle du bassin de l'Ouémé à Bonou. Selon [10], le coefficient d'écoulement permet d'analyser la variation de l'écoulement dans le bassin et il évolue suivant les variations climatiques. La formule de [26], a été utilisée pour le calcul du coefficient d'écoulement

$$C = \frac{L}{P} \times 100 \quad (11)$$

2. Déficit d'écoulement

Le déficit d'écoulement représente la différence entre les précipitations P tombées dans le bassin versant et le volume d'eau $\int Q dt$ écoulé à l'exutoire :

$$DE = P - \int Q dt \quad (12)$$

3. Comparaison des déficits entre deux sous-périodes différentes

Cette méthode vise à évaluer et comparer le déficit entre deux sous-périodes pluvio-hydrologique dans le bassin-versant du fleuve Ouémé à Bonou. Il s'exprime à partir de la formule suivante :

$$De = \left(\frac{x_2 - x_1}{x_1} \right) \times 100 \quad (13)$$

4. Bilan hydrologique

Cette étude est indispensable pour étudier l'impact des fluctuations pluviométriques sur les autres termes du bilan et mettre en évidence la relation existant entre la récession pluviométrique observée depuis 1971 et la sécheresse hydrologique de ces quatre dernières décennies.

L'équation du bilan hydrologique est exprimée suivant la formule [26]:

$$P = E + L + I + (S_1 - S_0) \quad (14)$$

P = pluie en mm ; E = évaporation en mm ; L = écoulement en mm ; I = recharge (infiltration) en mm ; $(S_1 - S_0)$ = variation du stock d'eau présent dans le bassin versant en mm.

Des cinq termes de cette équation, deux (I et $S_1 - S_0$) ne sont pas quantifiables par des mesures directes. Pour diminuer le nombre d'inconnues, la différence $S_1 - S_0$ est supposée négligeable.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Variabilité pluviométrique interannuelle dans la basse vallée de l'Ouémé

L'influence de la variabilité pluvio-hydrologique sur eaux de surface a été caractérisée à travers l'analyse des paramètres pluviométrique et hydrométrique dans la basse vallée de l'Ouémé.

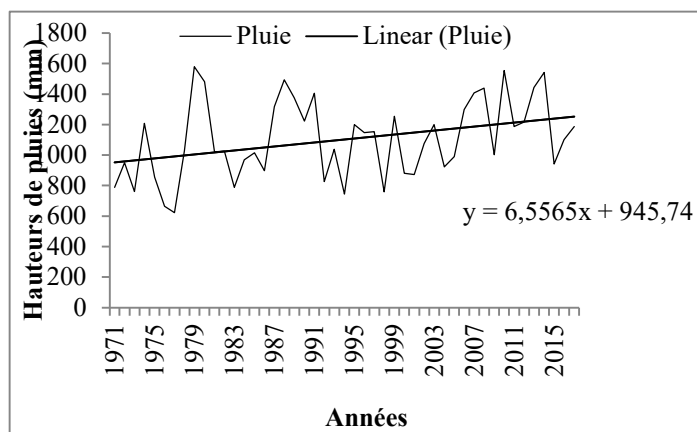


Fig 2. Variabilité pluviométrique à la station d'Adjohoun dans la basse vallée de l'Ouémé sur la série 1971-2017

La figure 2 montre l'évolution des hauteurs de pluie sur la période 1971-2017.

De l'examen de la fig 2, il ressort que la variabilité pluviométrique est caractérisée par une évolution à la hausse. En effet, la tendance pluviométrique est à la hausse avec une forte augmentation du coefficient de régression qui est +6,55.

Ces résultats sont en adéquation à l'étude de [8] qui a montré que la baisse des précipitations ajoutée à la forte évaporation a amplifié de trois fois en moyenne le déficit hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bonou. Cette variabilité pluviométrique est en phase avec les travaux de [18] au cours de la période de 1999 à 2010 qui ont relevé que les années 1988, 1999, 2009, 2010 et même au-delà y compris 2012, 2013 ont été des années humides dans le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.

Par ailleurs, l'indice standardisé de précipitation a permis de mieux comprendre cette dynamique pluviométrique dans la basse vallée de l'Ouémé (figure 3).

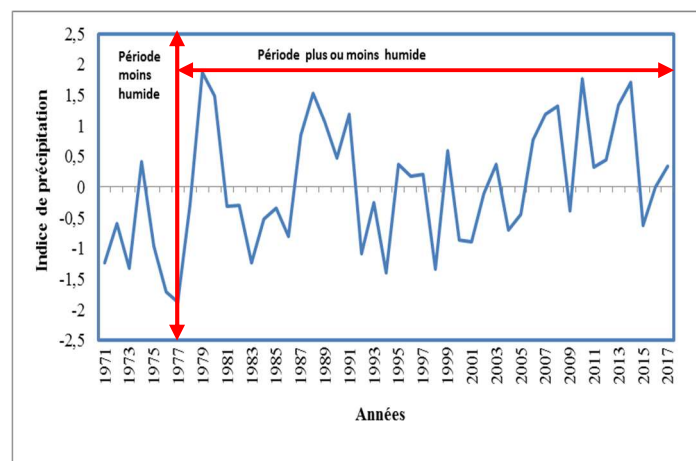


Fig 3. Indice standardisé de précipitation dans la basse vallée de l'Ouémé de 1971 à 2017

L'analyse de la fig 3 révèle que la période 1971-2017 a été marquée par une succession d'années sèches et humides. Ainsi, il se dégage un contexte climatique caractérisé par une irrégularité et une mauvaise répartition des précipitations. Ainsi, au cours de la période 1971 à 1977, la plupart des anomalies sont négatives, notamment des sécheresses fortes (1971, 1973, 1976 et 1977) ainsi que par des sécheresses modérées (1972 et 1975) ce qui correspond à la période sèche sauf les années 1974 et 1980 qui ont connu une humidité forte. A l'opposé, la période 1978 à 2017 montre la dominance des anomalies positives, ce qui témoigne d'une période excédentaire. De ce fait, deux sous périodes se dégagent à savoir la période de la baisse pluviométrique de 1971 à 1977 (période de récession pluviométrique) et une période de hausse pluviométrique de 1978 à 2017 (période humide), même si on observe des années de sécheresses modérées (1978, 1979, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986 et 1987, 1993, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2009, 2015 et 2016) de même que les fortes sécheresses (1992, 1994 et 1998). Cette analyse fondée sur le test de la rupture révèle qu'une rupture de stationnarité a été observée au cours de l'année 1977 avec une significativité de 99 % selon le test de Pettitt. Il se dégage donc l'existence de deux grandes sous périodes à savoir : la période de récession pluviométrique de 1971 à 1977 et la période humide de 1978 à 2017. Les travaux de [17 et 24], ont montré que la variabilité climatique en Afrique tropicale est marquée depuis les années 1970 par une tendance à la sécheresse, ce qui a affecté les hydrosystèmes avec une répercussion sur les écoulements. Ils ont montré après les analyses statistiques appliquées aux données mensuelles de pluie et de débit de la période 1961 à 2000 qu'il y a des déficits pluviométriques au cours des décennies 1970 et 1980.

3.2. Etude comparée des périodes pluviométriques dans la basse vallée de 1971 à 2017

Les mutations intervenues dans les chroniques climatiques aux échelles mensuelles, annuelles et interannuelles sont analysées grâce à l'évolution de la pluviométrie, facteur primordial de la disponibilité des ressources en eau dans la basse vallée de l'Ouémé (fig 4).

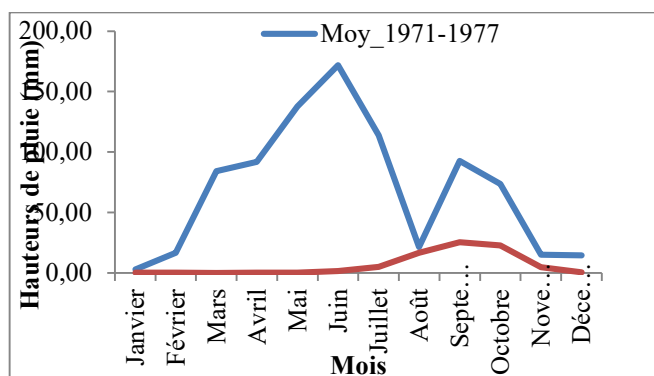


Fig 4. Variation des régimes pluviométriques sur les périodes 1971-1977 et 1978-2017 dans la basse vallée de l'Ouémé

L'analyse de la fig 4 indique que la moyenne pluviométrique de tous les mois de la sous-période 1978-2017 est supérieure à celle de la sous-période 1971 à 1977. De façon générale, il faut retenir que la sous période 1971 à 1977 est déficitaire par rapport à la sous période 1978 à 2017 avec un écart de 37,62 %. Le tableau II présente les sous périodes selon la segmentation de Hubert.

Tableau II: Niveau de signification du test de Scheffé : 1 %

Période			Moyenne	Ecart type
	Début	Fin		
	1971	1977	835,57	197,86
	1978	2017	1149,92	236,72

L'analyse du tableau XVII révèle que la sous période 1971 à 1977 a une moyenne de 835,57 et un écart type de 197,86 tandis que la sous période 1978 à 2017 présente une moyenne de 1149,86 et un écart type de 236,72. Ce qui traduit selon la segmentation de Hubert dans la recherche de la rupture de stationnarité, que la sous période 1971 à 1977 est moins humide que celle de la série 1978-2017.

Le test de Pettitt appliqué aux séries pluviométriques dans la basse vallée de l'Ouémé (période 1971- 2017) détecte des ruptures de stationnarité de la pluviométrie moyenne annuelle en 1977, significatives à 99 % (fig 5).

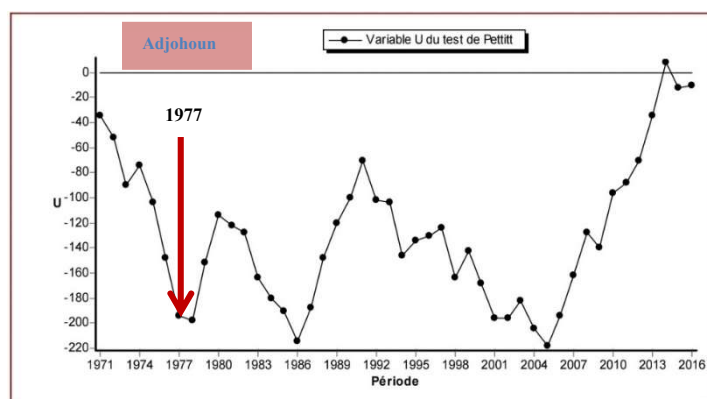


Fig 5. Mise en évidence d'une rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques

L'analyse de la fig 5 permet de constater la rupture dans la série en 1977, qui montre une nette différence entre les pluviométries des deux sous-séries 1971-1977 et 1978- 2017. En effet, à partir de 2005 jusqu'en 2017, une relative régularité est observée en rapport à l'évolution des valeurs la station d'Adjohoun. De même avant 2005, on note une tendance baissière dans l'évolution des données de la série. La présence de rupture de stationnarité dans la série pluviométrique signifie qu'il y a variation du niveau des précipitations dans le temps dans le bassin et que cette variation est très significative au seuil de 95 %. Par ailleurs, la tendance en hausse des hauteurs de pluie dans la station d'Adjohoun après les années 2000 témoigne donc que la dernière sous période dans la basse vallée de l'Ouémé est humide. Avant cette période, on remarque une baisse des précipitations depuis les années 1974 et 1981. Ce constat est fait par [10] qui concorde avec les résultats obtenus. Il a montré que le bassin de l'Ouémé a connu une péjoration climatique avec une rupture de stationnarité autour des années 1970.

Pour apprécier davantage la significativité, le test d'homogénéité d'Ellipse de bois est appliqué sur la même station (fig 6).

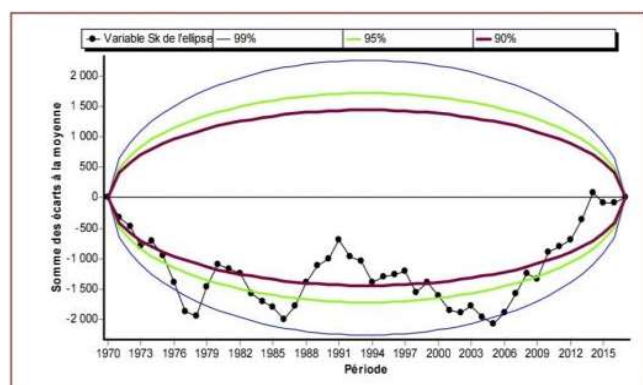


Fig 6. Test de significativité pour la rupture pluviométrique

L'analyse de la fig 6 révèle que la rupture de stationnarité pluviométrique détectée est significative à 95 %. Cependant cette baisse est suivie d'une reprise significative en 1979 et une légère baisse vers 1983. Pour mieux évaluer les effets de la péjoration pluviométrique sur les ressources en eau dans la basse vallée de l'Ouémé durant les sous-périodes, l'étude du bilan climatique est faite (fig 7).

3.3. Evolution du bilan climatique dans la vallée de l'Ouémé à Bonou

Le bilan climatique traduit la différence entre les abats pluviométriques et l'évapotranspiration. La figure 7, présente l'évolution du bilan climatique durant les sous-périodes 1971-1977 et 1978-2017 dans la basse vallée de l'Ouémé.

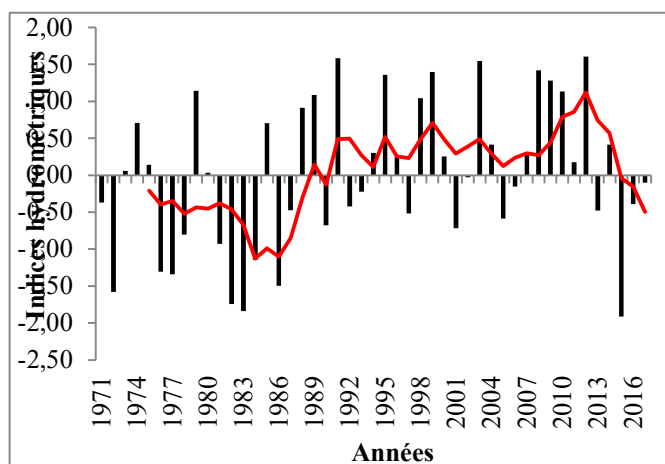


Fig 7. Evolution du bilan climatique sur les sous-périodes 1971-1977 et 1978-2017 dans la basse vallée de l'Ouémé

De l'analyse de la fig 7, il ressort que le bilan climatique est déficitaire sur la sous-période 1971-1977 (sous période sèche) et plus ou moins excédentaire sur la période 1978-2017 (sous-période humide). On note que sur la sous période 1971-1977, seul le mois de juin est humide. Par contre, la

sous-période 1978-2017 est plus humide au cours des mois de mai et juin et moins humide pendant les mois de juillet, septembre et octobre. Toutefois, il est constaté une forte diminution d'apport d'eau en juin de la sous-période 1971-1977 avec un taux de 22,4 % par rapport à la sous-période 1978-2017. La péjoration pluviométrique n'est pas sans conséquences sur le régime hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé.

3.4. Dynamique hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé

L'étude de la dynamique hydrologique permet de mieux apprécier l'incidence de la péjoration climatique sur l'écoulement des eaux de surface et sur les termes du bilan hydrologique. La fig 8 présente l'évolution interannuelle des débits annuels du fleuve Ouémé à Bonou dans la basse vallée de l'Ouémé.

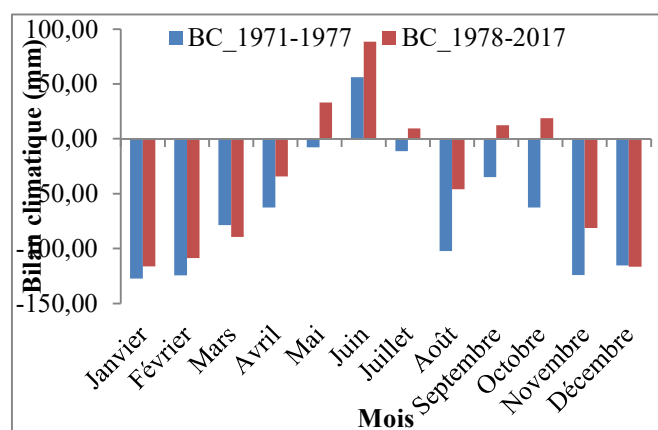


Fig 8. Variation interannuelle des débits dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou

L'analyse de la fig 8 indique que les débits annuels ont connu une augmentation de 1971 à 2017. En effet, de 1540,76 m³/s en 1971, les débits ont connu une hausse pour atteindre 3402,71 m³/s en 1991. Cette tendance devait être le signe d'une amélioration durable des conditions du système hydrologique et d'une disponibilité des ressources en eau dans la basse vallée de l'Ouémé, avec un retour à de meilleures conditions de précipitations depuis 1991. Mais, à partir de 1992, les débits ont commencé par évoluer en dent de scie avant des légères reprises en 1995, 1999 et 2003 pour atteindre approximativement la pointe en 2012 avec 3426,53 m³/s pour chuter complètement en 2015 avec 67,93 m³/s.

Par ailleurs, l'indice hydrométrique favorise une meilleure compréhension de cette dynamique hydrométrique dans la basse vallée de l'Ouémé (fig 9).

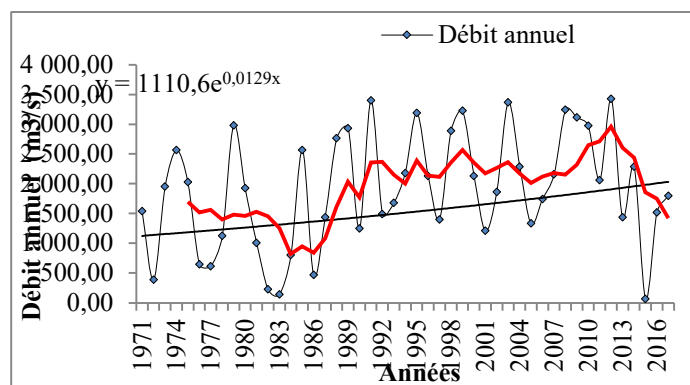


Fig 9. Indices hydrométriques dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou de 1971 à 2017

L'analyse de la fig 9 indique les indices hydrométriques standardisés inférieurs à zéro, soit des anomalies négatives qui témoignent de la forte sécheresse hydrologique (1972, 1976 1977, 1979, 1982, 1983, 1984, 1986, 2015) et une sécheresse modérée (1971, 1978, 1981, 1987, 1990, 1992, 1993, 1997, 2001, 2002, 2005, 2006, 2013, 2015, 2017). Mais, les anomalies positives quant à elles, sont des indicatrices des périodes humides, des années marquées par des épisodes hydrologiquement humides. Ce constat permet de déduire que la variabilité pluviométrique a eu des influences sur les écoulements dans la basse vallée de l'Ouémé.

3.5. Evolution des débits moyens mensuels par sous-périodes dans la basse vallée de l'Ouémé

La fig 10 présente l'évolution des débits moyens mensuels par sous-période dans la basse vallée de l'Ouémé à la station de Bonou.

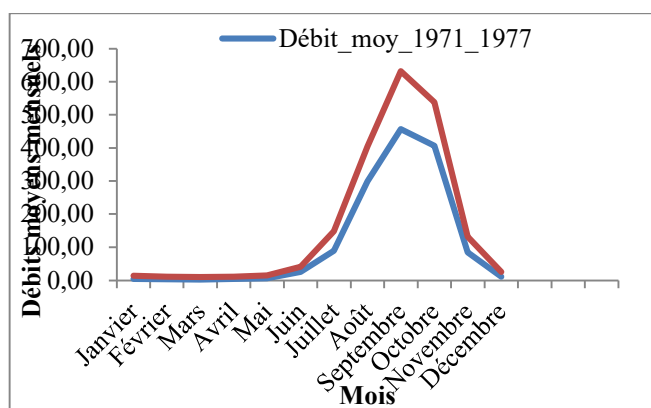


Fig 10. Evolution des débits moyens mensuels par sous-période dans la basse vallée de l'Ouémé à la station de Bonou

L'analyse de la fig 10 révèle que de décembre à mai, le

débit est totalement en baisse correspondant à la période de récession pluviométrique dans le bassin. De mai à novembre, le débit connaît une augmentation avec un pic en septembre, période au cours de laquelle se manifestent les crues suivies des inondations à l'exutoire de Bonou. De même, il a été remarqué que pendant les deux sous-périodes, les débits moyens mensuels de la sous-période 1971-1987, sont inférieurs à ceux de la deuxième sous-période (1988-2017), soit une hausse de 68,27 %. Ce résultat est en phase avec les analyses de la variabilité pluviométrique et confirme que les ruptures de stationnarité de la variabilité pluviométrique influence le régime hydrologique la basse vallée de l'Ouémé à la station de Bonou.

La recherche de rupture de stationnarité dans les séries hydrométriques permet de mieux comprendre le comportement de l'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé sur la période 1971-2017.

3.6. Détection des ruptures de stationnarité dans la série hydrométrique annuelle

Le test de Pettitt appliqué aux séries hydrométriques dans la basse vallée de l'Ouémé sur la période 1971-2017 détecte des ruptures de stationnarité de l'écoulement (valeur du débit annuel) en 1987, significatives à 99 % (fig 11).

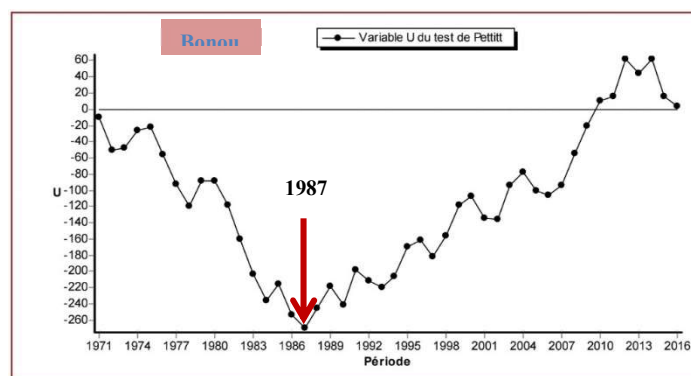


Fig 11. Mise en évidence d'une rupture de stationnarité dans les séries chronologiques

De l'analyse de la fig 11, il faut retenir que la rupture dans la série est observée en 1987 avec une nette différence entre les débits des deux sous-séries 1971-1987 et 1988-2017. Ainsi, de 1971 à 1987, dans le bassin versant de l'Okpara, comme en Afrique tropicale [4, 3 et 18], il est constaté une baisse du régime hydrologique. L'évolution de l'écoulement est en harmonie avec les déficits pluviométriques, marqués par une première phase aiguë dans les années 1972 et 1973 et qui n'ont jamais cessé, même s'ils ont varié en extension et en intensité suivant les années.

Le tableau II présente les sous périodes selon la segmentation de Hubert.

Tableau II : Niveau de signification du test de Scheffé : 1 %

Période			
Début	Fin	Moyenne	Ecart type
1971	1987	1318,71	892,13
1988	2017	2219	838,11

Il ressort de l'examen du tableau II que la sous période 1971 à 1987 a une moyenne de 1318,71 et un écart de 829,13 tandis que la sous période 1988 à 2017 présente une moyenne de 2219 et un écart type de 838,11. Ce qui traduit selon la segmentation de Hubert dans la recherche de la rupture de stationnarité, que la sous période 1971 à 1987 est moins humide que celle de la série 1988-2017. Pour mieux analyser cette variabilité hydrométrique par rapport au test de significativité, le test d'homogénéité d'Ellipse de bois est appliqué sur la même station (fig 12).

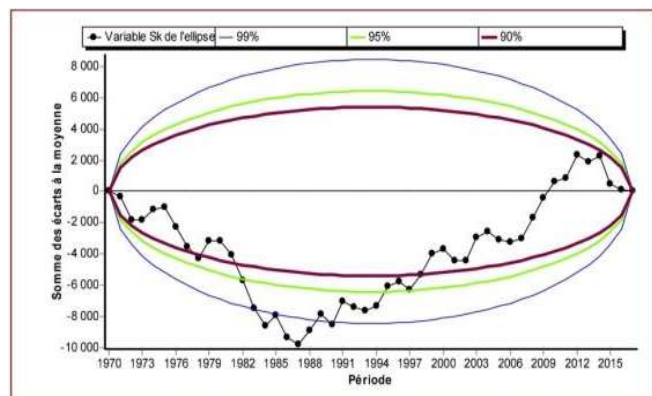


Fig 12. Test de significativité pour la rupture hydrométrique

L'analyse de la fig 12 indique que la rupture de stationnarité hydrométrique détectée sur la station de Bonou en 1987 significative à 95 %. Cependant cette hausse est suivie d'une légère baisse vers 1992 et une reprise en 2003 et 2012. Les déficits hydrométriques enregistrés au cours des sous-périodes ne sont pas sans conséquences sur le régime hydrologique de la basse vallée à Bonou.

3.7. Variation mensuelle, interannuelle et du déficit d'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou

Les figures 13 présente la variation interannuelle de l'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou.

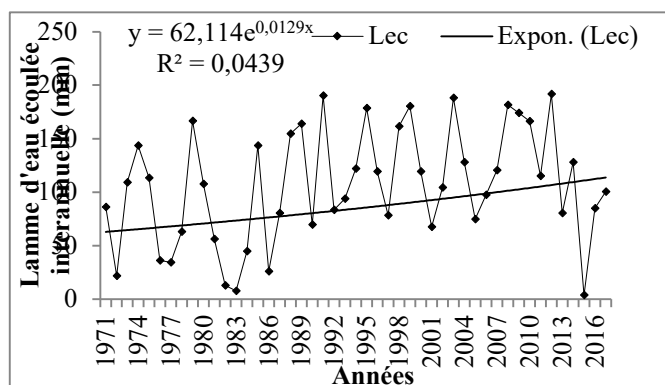


Fig 13. Variation interannuelle de l'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou de 1971 à 2017

L'analyse de la fig 13 indique une variation de l'écoulement d'une partie de l'eau précipitée sur la période 1971-2017. Ainsi, elle se traduit par une perte assez importante des apports pluvieux du fait du déficit observé durant la phase de récession pluviométrique de 1971- 2017. La basse vallée de l'Ouémé à Bonou a également connu d'importantes périodes d'écoulement au cours des années 1974, 1979, 1989, 1991, 1995, 1999, 2003, 2008, 2010 et 2012 avec respectivement 143,6 mm, 166,75 mm, 163,89 mm, 190,3 mm, 178,47 mm, 180,52 mm, 188,29 mm, 181,54 mm, 166,4 mm et 191,63 mm.

Toutes ces années ont été des années marquées par des fortes crues. Par contre, les années 1972, 1976, 1977, 1978, 1982, 1983, 1984, 1986, 1990, 1997, 2001, 2005, 2011, 2013 et 2015 ont été des années de faible écoulement. Ce qui suppose que ces années sont sèches dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou avec un écoulement de l'ordre de 3,94 mm à 78,6315 mm.

Pour mieux apprécier la tendance des écoulements dans la basse vallée de l'Ouémé, l'étude de l'évolution mensuelle de l'écoulement est faite durant les deux périodes de rupture (fig 14).

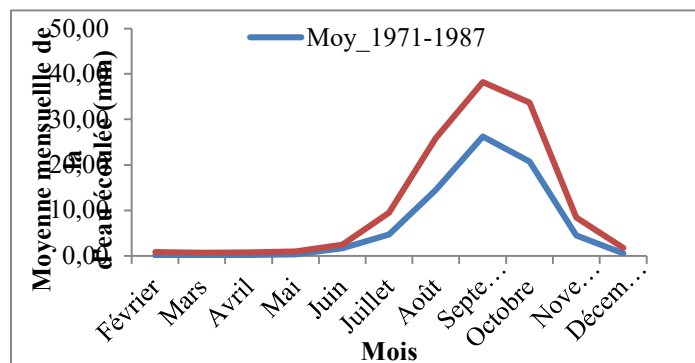


Fig 14. Evolution mensuelle de l'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou des sous-périodes 1971-1987 et 1988-2017

De l'analyse de la fig 14, il ressort que les mois de juin à novembre de la sous-période 1988-2017 enregistre un écoulement excédentaire sur celui de la sous période 1971-1987. Ce constat témoigne de ce que ces mois sont plus humides avec un écoulement élevé en septembre tandis que les mois de décembre à mai présentent la même allure sur les deux sous-périodes qui sont quasi nuls, indiquant de ce fait le comportement hydrologique du bassin pendant les mois secs. Pour mieux analyser le déficit entre les deux sous-périodes pluvio-hydrologiques, l'étude de l'évolution mensuelle du déficit d'écoulement dans la base vallée de l'Ouémé à Bonou de 1971 à 2017 est fait (fig 15).

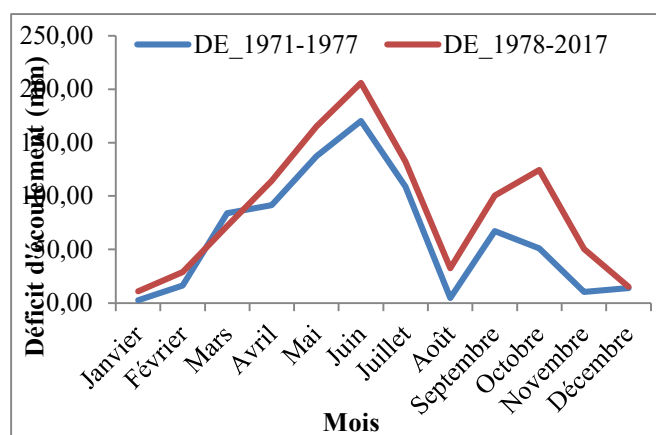


Fig 15. Variation interannuelle du déficit d'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou de 1971 à 2017

L'analyse de la fig 15 révèle que le déficit d'écoulement est en baisse sur tous les mois de la sous-période 1971-1977 par rapport à la sous période 1978 - 2017 à l'exception du

mois de mars. Cette diminution du déficit d'écoulement mensuelle varie de janvier à décembre à l'exception de mars dont les plus fortes baisses sont enregistrées en avril, mai et juin et juillet. Ainsi, des deux sous-périodes, le déficit d'écoulement est de 9,53 %, ce qui montre que la sous-période 1971-1977 a un déficit d'écoulement plus élevé que la sous-période 1978-2017 dont le déficit d'écoulement est faible. Il est à souligner que la pluie demeure un paramètre très important qui favorise un fort écoulement, or en période sèche, l'eau de pluie n'alimente plus l'écoulement. C'est ce qui engendre les déficits d'écoulement observés au cours de ces sous-périodes.

Par ailleurs, l'étude du coefficient d'écoulement a permis de mieux appréhender l'évolution hydrologique du bassin en ce qui concerne l'influence de la lame d'eau précipitée sur l'écoulement. La fig 16 illustre la variation mensuelle du coefficient d'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou. Ce résultat est similaire aux travaux de [27] sur le bassin du Zou à Atchérigbé qui souligne que le déficit d'écoulement est de 12,95 %, témoignant ainsi que la sous-période 1960-1970 a un déficit d'écoulement plus prononcé que la sous-période 1971-2003 dont le déficit d'écoulement est faible.

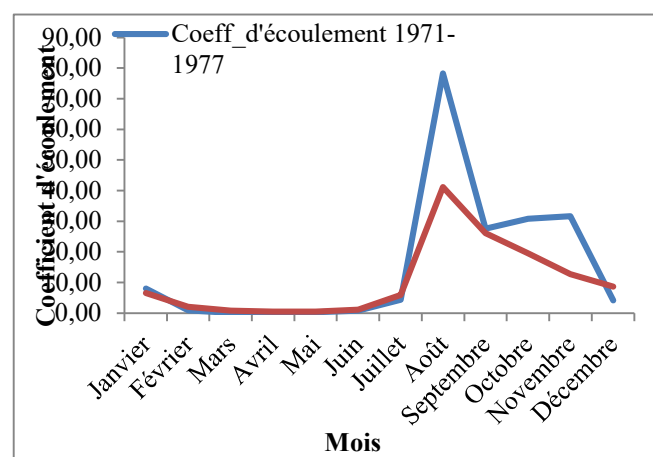


Fig 16. Variation mensuelle du coefficient d'écoulement dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou

L'analyse de la fig 16 révèle que les courbes relatives aux coefficients d'écoulement des deux sous périodes présentent quasiment une allure similaire. Toutefois, celle de la sous période 1971 à 1977 est excédentaire sur celle de la sous-période 1978 à 2017. Au vu de la variation du coefficient d'écoulement sur les deux sous-périodes, les mois de Juillet à décembre présentent un écoulement plus important que les mois de Janvier à juin et permet de dire que ces mois sont

déficitaires. Ce qui est en concordance avec les travaux de [2] sur le bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua qui ont souligné que l'évolution de l'écoulement dépend des déficits pluviométriques, marqués par une première phase aiguë dans les années 1972 et 1973 et qui n'ont jamais cessé, même s'ils ont varié en extension et en intensité suivant les années.

Les déficits pluviométriques observés entre 1971 et 2017 conditionnent en l'occurrence le fonctionnement hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé.

3.8. Analyse du bilan hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé

La fig 17 montre l'évolution des termes du bilan hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou.

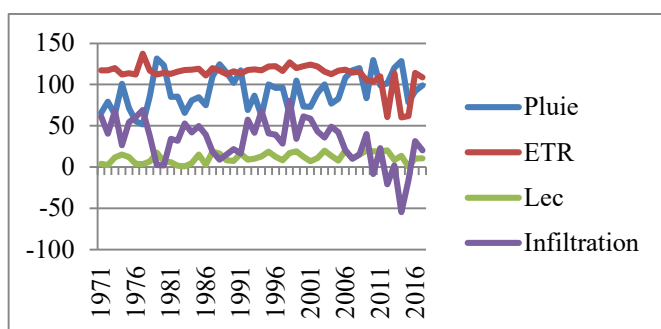


Fig 17. Evolution des termes du Bilan hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou de 1971 à 2017

L'analyse de la fig 17 indique que sur l'ensemble du bassin, la pluie demeure l'élément le plus important qui influence tous les autres paramètres du bilan hydrologique. Ainsi, pour une lame d'eau précipitée de 100 % dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou, en moyenne 82,5 % sont destinées à l'ETR, 10 % en ce qui concerne la lame d'eau écoulee et 25 % pour la recharge. Il est à souligner que l'évaporation possède le taux le plus élevé en dehors de la pluie. Il apparaît donc que la forte variabilité des hauteurs de pluie au cours de la période 1971-2017 a eu des répercussions significatives sur l'écoulement moyen de la vallée de l'Ouémé. De même, la disponibilité de la ressource en eau est sujette à une situation hypothétique suivant la tendance baissière qui pourrait se produire au fil des années. Les travaux de [4] réalisés dans le même secteur confirment ces résultats en mentionnant que l'évolution comparée des termes du bilan hydrologique révèle de façon globale que les écarts pluviométriques observés sur les deux sous-périodes 1965-1970 et 1971-2010, répercutent sur l'ETR, l'écoulement et la recharge. Il en est de même pour les travaux de [28] qui ont fait remarquer l'observation d'une légère reprise pluviométrique de l'ordre

de 2 % des lames d'eau précipitées à la fin des années 1990 ponctuée par la dégradation anthropique des hydrosystèmes des bassins versants au Bénin. Dans le secteur de recherche, les résultats de [11] sont conformes à ceux obtenus dans ce travail et qui montrent une inégale répartition des débits. L'étude a identifié deux phases mettant en exergue deux sous-périodes, 1987-2007 et 2008-2016. La première est déficitaire avec une moyenne du débit égale à 194 m³s⁻¹, tandis que la seconde est excédentaire et caractérisée par une moyenne de 221 m³s⁻¹.

IV. CONCLUSION

Au terme de cette recherche, il faut retenir que la variabilité pluvio-hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé, présente une tendance irrégulière de la pluviométrie bien que le front pluvieux ait pris une ascendance sur les périodes déficitaires au niveau de la série 1971-2017. De même, l'analyse des conditions hydrologiques dans la basse vallée de l'Ouémé a montré la forte variabilité du coefficient d'écoulement sur les deux sous-périodes 1971-1977 et 1978-2017 avec les mois de Juillet à décembre qui présentent un écoulement plus important que les mois de Janvier à juin traduisant des mois déficitaires. Ainsi, sur l'ensemble des deux sous-périodes, le déficit d'écoulement est de 9,53 %, ce qui témoigne que la sous-période 1971-1977 a un déficit d'écoulement en hausse que la sous-période 1978-2017 dont le déficit d'écoulement est en baisse. Dans ce contexte, la variabilité pluvio-hydrologique n'est pas sans conséquences néfastes sur les volumes d'eau mobilisés dans les aquifères qui se révèlent faibles car le déficit du volume mobilisé durant les sous-périodes 1971-1977 et 1978-2017 est estimé à 42,45 %. De ce fait, la dépendance très liée du régime hydrologique à la pluviosité contribue à la vulnérabilité des eaux de surface à travers le déficit d'écoulement mais aussi les risques de pollution qui altèrent leur qualité.

REFERENCES

- [1] [1] A. Dao, B. Kamagaté, A. Mariko, H. B. Maiga, A. Goula Bi tié, L. Seguis et I. Savane, "Variabilité Climatique et Réponse Hydrologique du Bassin Versant Transfrontalier de Kolondieba au Sud du Mali", European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.43 n°4, 2010, pp.435-444.
- [2] R. Ogouwalé, "Changements climatiques, dynamique des eaux de surface et perspectives sur les ressources en eau dans le bassin de l'okpara a l'exutoire de kaboua", Thèse de doctorat unique de l'Université d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 2013.
- [3] F. Cocker, J. B. K. Vodounou, R. Zodékon et J. A. Yabi, "Disponibilité de la ressource en eau et variabilité

- climatique dans la basse vallée de l'Ouémé, au sud Bénin (Afrique de l'Ouest)" International Journal of Innovation and Scientific Research ISSN 2351-8014 Vol. 38, n°2, 2018, pp. 289-300.
- [4] E. W. Vissin, S. Hédiblé, E. Amoussou, H. S. Totin L. Odoulami, C. Eténé, M. Boko et A. Blivi, "Variabilité climatique et hydrologique dans la basse vallée de l'Ouémé à Bonou", J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), 2016, Série B, 18(2) : 69-81.
- [5] F. Hallouz, M. Meddi, G. Mahé, "Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest d'Algérie)", Revue des Sciences de l'Eau, 26, 1, 2013, pp 3338.
- [6] GIEC, "Bilan 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, Rapport de groupe de travail 4, 2007.
- [7] FIDA, "Le FIDA et le changement climatique", Rome, Italie, Consultation sur la huitième reconstitution des ressources du FIDA 8, 2008.
- [8] E. Amoussou, V. S. H. Totin, S. Allagbé, J. Kodja, S. J. A. Akognongbé, B. Sohoun, E. W. Vissin, M. Boko, C. Houndénou et G. Mahé "Péjoration climatique et dynamique hydroécologique dans le bassin-versant du fleuve Ouémé à Bonou au Bénin Hydrol. Sci. J. 57, pp.235-44, 2015.
- [9] D. J. Kodja, M. Aina Vissin E. W., Amoussou E., Sensibilité de l'écoulement au forçage pluviométrique dans le bassin-versant du zou à Atchérigbé au Bénin (Afrique de l'Ouest). ISSN0051- 2515 N° 10, Revue de géographie du Laboratoire Leïdi, 262-279, 2012.
- [10] S. Akognongbé, "Influence de la variabilité climatique et des activités anthropiques sur les eaux de surface dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou au Bénin", Thèse de doctorat unique de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 258p, 2014.
- [11] F. Cocker, J. B. K. Vodounou et J. A. Yabi, "Evolution récente des débits dans la basse vallée de l'Ouémé, Sud-Bénin" *Journal de physique de la SOAPHYS*, ISSN Print : 2630-0958, 2019.
- [12] H. L. Zinsou, A. H. Attingli, P. Gnohossou, D. Adandedjan et P. Lalèyè, "Caractéristiques physico-chimiques et pollution de l'eau du delta de l'Ouémé au Bénin", Journal of applied Biosciences, 97 9163 – 9173, 2016.
- [13] S. Agbomahènan, "Erosion pluviale et dynamique de l'occupation et l'utilisation des terres dans la Basse Vallée de l'Ouémé au Bénin", Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, 256 p, 2016.
- [14] A. Bodian, "Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest)", Physio-Géo, Volume 8, 2014, 18p
- [15] B. T. Donou "Extrêmes hydroclimatiques dans le bassin inférieur du fleuve Ouémé : Diagnostic, impact agricole et scénario de gestion", Thèse de Doctorat, EDP/FLASH/UAC, 264 pages, 2015.
- [16] A. B. P. Chabi, I. Yabi, W. E. Vissin, F. Afouda, "Etude de la typologie des pluies", l'AIC, Liège, pp 445-450, 2015
- [17] C. Peugeot, O. Bock, A. Boone, B. Cappelaere, M. Gosset, R. Meynadier, L. Séguis, T. Lebel, J. L. Redel sperger, "Le cycle de l'eau dans le système de mousson d'Afrique de l'Ouest", La Météorologie Spécial AMMA, pp 55-63, 2012.
- [18] D. J. Kodja, "Indicateurs des événements hydro climatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest", Thèse de doctorat. UMR 5569, Université de Montpellier Centre, 288 p, 2018.
- [19] 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 de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 p, 2007.
- [20] G. Liénou, Desclaux F., P. Noupou, "La plaine du lac Tchad dans l'Extrême-Nord Cameroun : de la sécheresse et des processus d'adaptation des populations à la restauration des inondations", Paris (FRA) ; Bangui : AUF ; Université de Bangui, pp. 45-46, 2012.
- [21] R. M. N. Fossou, N. Soro, V. B. Traoré, T. LASM, S. Sambou, T. Soro, R. K. Orou, M. T. Cissé et A. Kane, "Variabilité climatique et son incidence sur les ressources en eaux de surface : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro, Centre-Est de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest", Afrique Science 10 (4) (2014) 118 – 134.
- [22] D. H. Koumassi, "Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi", Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 2014.
- [23] E. Amoussou, P. Camberlin, et G. Mahé, "Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest)", Hydrological Sciences Journal, 57(4), 805-817, 2012.
- [24] A. Bodian, A. Dezetter, L. Diop, A. Deme, K. Djaman et A. Diop, "Future Climate Change Impacts on

- Streamflows of Two Main West Africa River Basins: Senegal and Gambia. *Hydrology*'' 5(1), 21, 2018.
- [25] A. N. Pettitt, "A non-parametric approach to the change point problem, *Applied Statistics*", 28 (2), pp.16–36, 1979.
- [26] L. Le Barbé, G. Alé, B. Millet, H. Texier, Y. Borel et R. Gualde "Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin", Edition ORSTOM, 540 p, 1993.
- [27] D. J. Kodja, M. Aïna., E. W. Vissin, E. Amoussou, "Sensibilité de l'écoulement au forçage pluviométrique dans le bassin-versant du Zou à Atchérigbé au Bénin (Afrique de l'Ouest)", ISSN0051- 2515 N° 10, *Revue de géographie du Laboratoire Leïdi*, 262-279, 2012.
- [28] D. J. Kodja, E.W. Vissin, E. Amoussou et M. Boko, "Risques hydroclimatiques et problèmes d'aménagement hydroagricole dans la vallée de l'Ouémé à Bonou (Afrique l'Ouest)", in climat, Agriculture ressources en eau d'hier a demain, actes du 30ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Cotonou (Bénin), 2013.