

Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'Ouémé, Bénin

Eric A. ALAMOU, Gandomè Mayeul L. D. QUENUM *, Emmanuel A. LAWIN, D. Félicien BADOU et A. Abel AFOUDA

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), Faculté des Sciences et Techniques (FAST), Université d'Abomey Calavi (UAC), 01 BP 4521 Cotonou, Bénin

* Correspondance, courriel : malgdaq2000@yahoo.fr

Résumé

L'Afrique de l'Ouest connaît depuis plusieurs années de très forte variabilité climatique. Dans le souci de mieux renseigner cette variabilité sur le Bassin de l'Ouémé (le plus grand cours d'eau du Bénin), la présente étude a permis d'évaluer la variabilité par le biais du calcul de l'indice pluviométrique suivant deux approches. Premièrement, le calcul standard par la formule de l'indice de Nicholson montre de forte variabilité des indices ; dans le but d'éliminer ces fortes variabilités, nous avons appliqué la méthode des moyennes mobiles pondérées encore appelée « Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 ». La série chronologique exploitée est la base des données pluviométriques journalières, sur la période 1930–2011. Ensuite, des tests statistiques d'identification de rupture telles que : la méthode bayésienne de Lee et Heghinian, de Pettitt et de la segmentation de Hubert ont permis d'évaluer la variabilité interannuelle. Ces méthodes ne donnant pas forcément de rupture ou de tendance, elles ont été accompagnées d'une nouvelle, celle de Cross-Entropy qui a permis de déterminer de façon optimale des ruptures ou tendances. Ainsi sur l'ensemble du bassin nous avons globalement identifié trois ruptures à savoir 1950, 1969 et 1988. Enfin l'étude de la variabilité spatiale a permis de dégager les zones les plus humides et l'existence d'un gradient pluviométrique Est-Ouest dans le Nord du Bassin avant la rupture de 1988, et sur l'ensemble du bassin à la reprise de condition humide vers les années 1990.

Mots-clés : *cross-entropy, variabilité interannuelle, tests de rupture, indice pluviométrique, variabilité spatiale.*

Abstract

Space-time variability of rainfall in the river basin of oueme, Benin

West Africa faces for many years remarkable climate variability. In the view to better assess this variability over the largest water basin, the Ouémé basin, in Republic of Benin, this study uses two approaches to compute precipitation indices. First, the standard method using Nicholson index formula reveals a strong variability of indices. The weighted moving means method called “filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2” has been used to remove the observed variability. The daily precipitation from 1930 to 2011 is the data set used. Second, statistical tests to identify break such as Lee and Heghinian Bayesian method, Pettitt and Hubert segmentation method helped to evaluate inter-annual variability.

Whilst these methods do not result necessarily in break or do not give any tendency, they have been reinforced with the cross entropy method that gave an optimal result. Therefore, over the entire basin, we identified three global breaks at 1950, 1969, and 1988. Finally, the spatial variability study helped to bring out the most humid zones and an easterly precipitation gradient in the North basin and over the whole basin respectively before the 1988 break and at the onset of humid conditions towards 1990.

Keywords : *cross-entropy, inter-annual variability, break test, precipitation index, spatial variability.*

1. Introduction

Depuis le début des années 70, on observe de grandes modifications du régime des précipitations en Afrique de l'Ouest. Les études montrent une modification du régime pluviométrique dès 1966 ; essentiellement au Sénégal et en Guinée Bissau, puis en Guinée Conakry, au Mali, au Burkina Faso et au nord du Bénin [1, 2]. La façon dont la Côte d'Ivoire, le Togo et le sud du Bénin ont été atteints s'est révélée beaucoup plus variable. Or, depuis le milieu des années 1990 on assiste à un retour à des meilleures conditions pluviométriques au Sahel, avec cependant une variabilité interannuelle accrue caractérisée par une brusque alternance d'années humides et d'années sèches. Ces conditions pluviométriques à tendances favorables semblent être plus marquées sur l'ensemble du bassin. D'un point de vue spatial, les grandes tendances observées sur la pluviométrie sont-elles identiques à celles des caractéristiques de la saison des pluies ? Face au changement climatique, des questions se posent sur l'évolution des conditions climatiques et de leurs incidences sur le régime hydrologique des cours d'eau. Afin d'évaluer si, sur les années passées, des évolutions significatives de la pluviométrie peuvent être identifiées ; des tests statistiques permettent de détecter soit des ruptures dans les séries, soit des tendances linéaires (augmentation ou diminution). Dans cette présente étude nous nous exercerons à évaluer les diverses ruptures sur l'ensemble du bassin de l'Ouémé puis étudier les variabilités interannuelles et spatiales afin d'identifier les zones de fortes pluviométries et celles plus arides.

2. Données et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

La présente étude est faite sur le bassin de l'Ouémé au Bénin (**Figure 1**). Situé entre 7°15' et 9°45' latitude Nord et 1°15' et 2°30' longitude Est, le bassin de l'Ouémé couvre une superficie de 51 630 km² dont 90 % (soit 46 360 km²) environ de cette superficie est situé sur le territoire béninois, plus de 9 % au Nigéria et moins de 1 % au Togo. Il est drainé par le plus grand et plus long cours d'eau qui lui a donné son nom. D'une longueur de 510 km, le fleuve Ouémé prend sa source dans la forêt classée des Tanéka dans la commune de Copargo (Bénin). Il reçoit deux principaux affluents que sont : l'Okpara (200 km) sur la rive gauche et le Zou (150 km) sur la rive droite [3]. Il subit les influences des climats soudanien et subéquatorial, mais son régime est plutôt tropical ; l'influence subéquatorial est faible et n'existe que sur un petit parcours à l'approche de l'embouchure. A Sagon, en période d'étiage (Février-Avril) son débit est de 10 m³/s, alors qu'il atteint 900 m³/s en période de crue (Août-Novembre). Nous dénombrons une soixantaine de stations pluviométriques dont cinq des six stations synoptiques du pays.

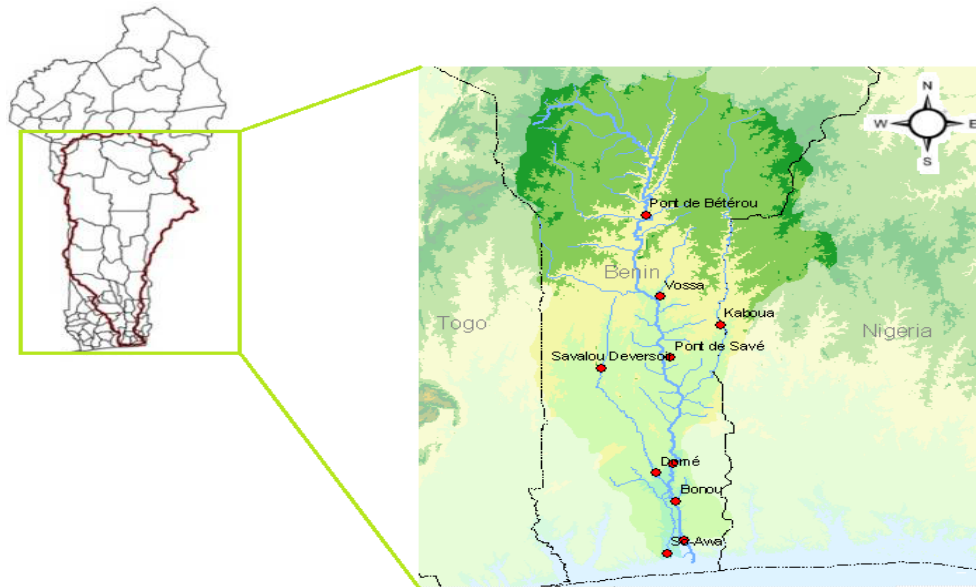


Figure 1 : Localisation du bassin de L'Ouémé et son réseau hydrographique

2-2. Données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont les précipitations à l'échelle ponctuelle relevées sur les différentes stations pluviométriques du réseau national de la Direction Nationale de la Météorologie (DNM) et situant sur le bassin versant de l'Ouémé. Ces données sont disponibles sur la période 1921 - 2011 à l'échelle journalière dans la base de la DNM. De 1921 - 1929 on dénombre jusqu'à 48 % de lacune pour plusieurs stations. De 1930 - 2011 on observe moins de 10,21 % de lacunes pour la plupart des stations ; et un fonctionnement permanent des stations synoptiques. Cette période constituera notre base temporelle pour l'étude et nous permettra de mieux apprécier les variabilités pluviométriques.

2-3. Méthodes

2-3-1. Analyses de la variabilité interannuelle

Calcul de l'indice de variabilité pluviométrique : c'est l'indice de l'écart à la moyenne. Il permet d'estimer le déficit pluviométrique annuel. Cet écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitations (en mm) d'une année x_i et la hauteur moyenne annuelle de précipitations (en mm) \bar{x} de la série moyennée par l'écart-type σ . [4] l'ont défini pour chaque année comme suit :

$$I(i) = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

L'indice de Lamb [5, 6], défini par *l'Equation (1)*, apparaît comme une variable centrée et réduite. Il permet de suivre les fluctuations interannuelles du régime pluviométrique de la région. Une meilleure observation des fluctuations interannuelles s'obtient en éliminant les variations saisonnières.

Dans ce cas, les totaux pluviométriques annuels sont pondérés en utilisant la méthode des moyennes mobiles pondérées ou Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2.

2-3-2. Méthode des moyennes mobiles pondérées ou filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2

Les indices centrés et réduits des hauteurs pluviométriques annuelles pondérées permettent de mieux distinguer les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques. On procède d'abord au filtrage des données pour éliminer les variations saisonnières en utilisant le filtre non récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 (moyennes mobiles pondérées) [7 - 9]. Le calcul de ce filtre est effectué au moyen des *Equations* qui permettent d'estimer chaque terme de la série de la manière suivante [9] :

$$x_{(t)} = 0,06 x_{(t-2)} + 0,25 x_{(t-1)} + 0,25 x_{(t+1)} + 0,06 x_{(t+2)} \quad (2)$$

Avec $3 \leq t \leq n-2$ où $x_{(t)}$ est le total de cumul pluviométrique pondéré du terme t , $x_{(t-2)}$ et $x_{(t-1)}$ sont les totaux observés les deux termes qui précèdent immédiatement le terme t , $x_{(t+1)}$ et $x_{(t+2)}$ sont ceux observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme t .

Les totaux pondérés des deux premiers $[x_{(1)}, x_{(2)}]$ et les deux derniers $[x_{(n-1)}, x_{(n)}]$ termes de la série, sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

$$\begin{cases} x_{(1)} = 0,52 x_{(1)} + 0,46 x_{(2)} \\ x_{(2)} = 0,25 x_{(1)} + 0,50 x_{(2)} + 0,25 x_{(3)} \\ x_{(n-1)} = 0,25 x_{(n-1)} + 0,50 x_{(n-2)} + 0,25 x_{(n)} \\ x_{(n)} = 0,52 x_{(n)} + 0,46 x_{(n-1)} \end{cases} \quad (3)$$

Après la détermination de ces différents cumuls pluviométriques $x_{(t)}$, leur indice de variabilité sera calculé grâce au modèle de *l'Equation(1)*.

3-3-3. Test de détection de ruptures dans la série chronologique

Selon [10], une "rupture" peut être définie de façon générale par un changement 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. Il existe plusieurs méthodes de détection des ruptures des séries chronologiques (test de Pettitt, statistique de Buishand, procédure bayésienne de Lee et Heghinian, segmentation d'Hubert). Les tests de [11] et de Pettitt détectent une rupture au maximum tandis que la segmentation d'Hubert permet d'en détecter plusieurs si elles existent dans une série chronologique de données [9]. L'application de ces différents tests est faite à l'aide du logiciel KhronoStat 1.01 développé par l'Institut français de Recherche pour le Développement (IRD). Toutefois, il arrive qu'aucun de ces tests ne détecte de rupture. Pour ce fait une autre méthode a été explorée dans cette étude : celle de l'Entropie-Croisée.

3-3-4. La méthode de l'entropie-croisée

La méthode d'entropie croisée (en anglais Cross-Entropy noté CE) est l'un des plus importants développements en optimisation stochastique et la simulation au cours des dernières années [12]. Proposée par [13]; elle est une méthode générale d'optimisation de type Monte-Carlo, combinatoire ou continue et d'échantillonnage préférentiel. La méthode a été conçue à l'origine pour la simulation d'événements rares, où des densités de probabilité très faibles doivent être estimées correctement.

Elle est de plus en plus utilisée dans divers domaines. Récemment, la méthode de la CE a été appliquée avec succès à l'estimation des probabilités d'événements rares dans les modèles dynamiques, en particulier les modèles de files d'attente impliquant à la fois lourds distributions d'entrée de la lumière et de queue

[13, 14]. En plus de simulation d'événements rares et optimisation combinatoire ; le procédé de la CE peut être efficacement appliqué pour l'optimisation multi-extrémal continu, [12, 15], également dans la gestion de projet [16]. Nous allons l'exploiter pour analyser la série chronologique des données pluviométriques enfin d'identifier d'éventuelles ruptures. La méthode CE est implémentée sous le logiciel R avec le package « breakpoint » ; c'est utilisable sous R 3.2.2.

3. Résultats et discussion

3-1. Analyse de la variabilité interannuelle

L'Afrique de l'ouest a enregistré des régimes pluviométriques assez variables au cours du temps. Après les années 50 relativement très humides, elle a connu ces dernières décennies une forte diminution des précipitations [2, 17 - 20]. Or, depuis le milieu des années 1990 on assiste à une tentative de retour à des meilleures conditions pluviométriques dans plusieurs zones, avec cependant une variabilité interannuelle accrue caractérisée par une brusque alternance d'années humides et d'années sèches. Toutefois, ces conditions pluviométriques ont une tendance variable sur le long du bassin de l'Ouémé compte de tenue de l'allongement du bassin en latitude. Les indices pluviométriques calculés montrent de forte variabilité avec le calcul classique de Lamb. La correction faite avec la méthode de Filtre Passe-Bas de Hanning d'Ordre 2 (FPBHO2) atténue ces fortes variabilités et facilite les interprétations. De l'analyse des indices par la formule de Nicholson d'une part et d'autre part par les moyennes mobiles pondérées, on observe globalement trois éventuelles ruptures dont deux plus prononcées.

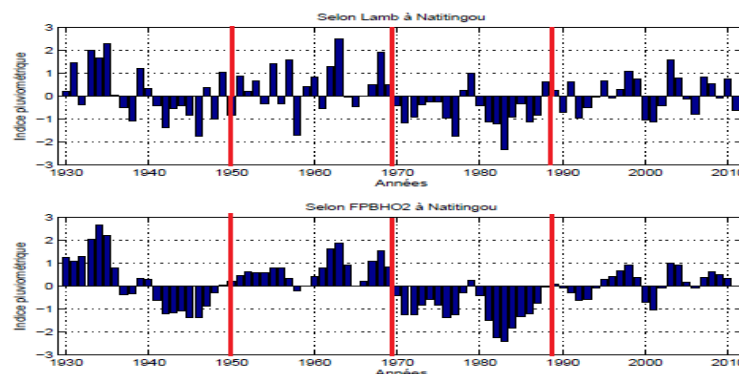


Figure 2 : *Indices pluviométriques (par le calcul de l'indice de Lamb avec les données brutes et celles pondérées par la méthode de filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2) à Natitingou sur la période 1930 - 2011*

Les **Figures 2 et 3** montrent l'existence de trois ruptures (1950, 1969 et 1988). Pour les indices à Natitingou (**Figure2**) les dates de rupture sont beaucoup plus nettes ; par contre à Parakou (**Figure3**) elles sont beaucoup plus relatives. Plus particulièrement en 1950, on constate que la zone de Parakou, a très tôt repris avec une période humide comparativement à la station synoptique en amont. Toute fois les deux zones se caractérisent fondamentalement et clairement par les ruptures 1969 et 1988. Dans ces deux régions, plusieurs années se caractérisent par une abondance pluviométrique.

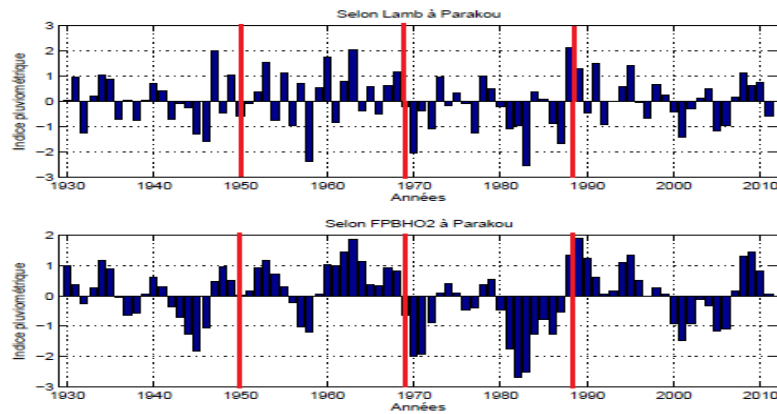


Figure 3 : Indices pluviométriques (par le calcul de l'indice de Lamb avec les données brutes et celles pondérées par la méthode de filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2) à Parakou sur la période 1930-2011

Avant la rupture de 1950, l'on observe globalement avant 1940 une période relativement humide puis après, une période qu'on peut caractériser de sèche. C'est bien évidemment la rupture de cette sécheresse qui nous permet de constater une reprise de forte pluviométrie dès 1950. L'intervalle 1950 - 1969 est très humide dans cette zone du bassin. Contrairement à la période 1950 - 1969, celle de 1970 - 1988 est sévèrement sèche avec des indices qui pointent vers de fortes valeurs négatives. La dernière sous période est moyennement humide ; lorsqu'on cherche une valeur médiane de ces indices, elle tourne autour de $+ 0,65$ caractéristique de l'amorçage d'une période humide.

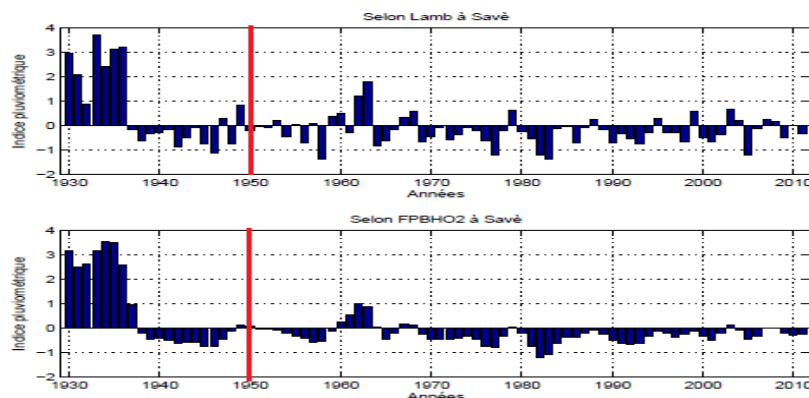


Figure 4 : Indices pluviométriques (par le calcul de l'indice de Lamb avec les données brutes et celles pondérées par la méthode de filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2) à Savè sur la période 1930 - 2011

A première vue les indices calculés à Savè sur la période 1930 - 2011 (**Figure 4**) montrent timidement l'existence d'une rupture, celle de 1950. Mais une attention faite sur la pluviométrie des années avant 1950 particulièrement de 1930 à 1937 montre qu'elle est beaucoup plus excédentaire dans cette zone que les autres. Pour ce fait les faibles variabilités qui s'observent résulteraient de l'influence de ces valeurs extrêmes sur la série chronologique. Compte tenu de ce constat, nous nous sommes donc intéressés à la chronologie de série de 1950 - 2011 dans l'objectif d'éliminer les extrêmes d'avant 1950. A ce niveau la **Figure 5** dégage plus nettement la rupture de 1969 et une troisième éventuelle qui s'observe vers la moitié des années 1990 (en 1994) c'est-à-dire un peu plus tard qu'à Natitingou et Parakou. Nous abordons à ce niveau une période de pluviométrie moyenne. La moyenne des indices est voisine de $+ 0.25$.

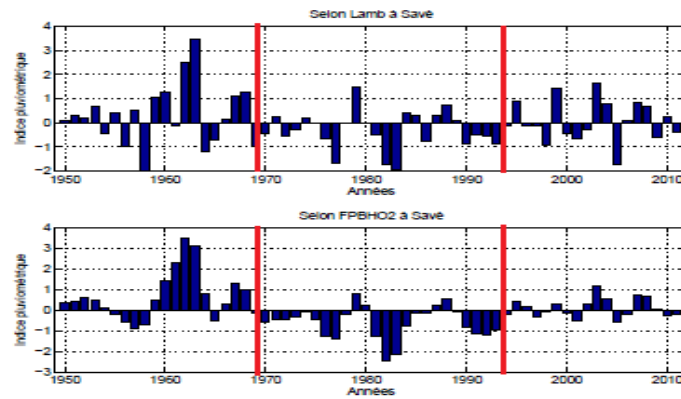


Figure 5 : Indices pluviométriques (par le calcul de l'indice de Lamb avec les données brutes et celles pondérées par la méthode de filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2) à Savè sur la sous-période 1950 - 2011

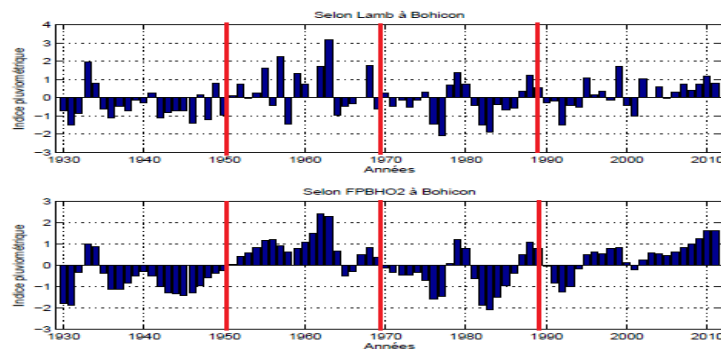


Figure 6 : Indices pluviométriques (par le calcul de l'indice de Lamb avec les données brutes et celles pondérées par la méthode de filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2) à Bohicon sur la période 1930 - 2011

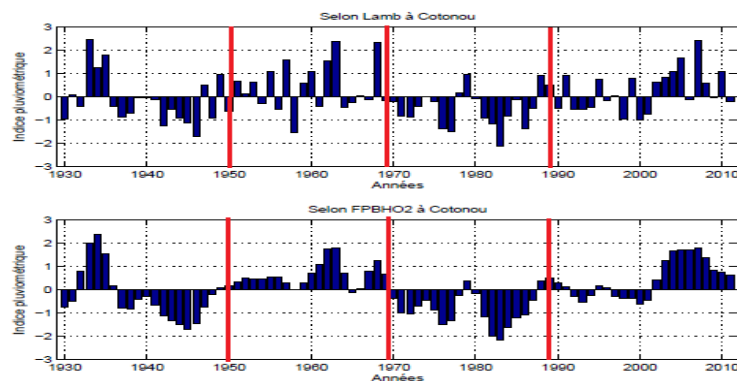


Figure 7 : Indices pluviométriques (par le calcul de l'indice de Lamb avec les données brutes et celles pondérées par la méthode de filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2) à Cotonou sur la période 1930 - 2011

Bohicon et Cotonou sont les deux stations synoptiques qui se retrouvent complétement au sud du bassin de l'Ouémé. La littérature nous renseigne que ces deux zones connaissent un régime pluviométrique bimodal [20]. Les **Figures 6 et 7** montrent que les tendances des indices à Bohicon et à Cotonou respectent plus ou moins fidèlement les conclusions auxquelles nous avons abouties dans le cas de Savè.

Ainsi les ruptures sont nettes en 1950 et 1969 avec une tendance à la reprise de périodes humides vers la moitié des années 1990 à Bohicon (*Figure 6*) et un amorçage timide à Cotonou en 1988 - 1989 (*Figure 7*) qui ne semble pas trop claire avant 2000. Par contre on observe une augmentation très importante du cumul pluviométrique à partir de 2002 à Cotonou comme à Bohicon ; l'accroissement pluviométrique de Bohicon semble être linéaire avec un coefficient directeur positif.

3-2. Identification des périodes de rupture par des tests statistiques

La procédure de segmentation de Hubert des séries hydrométéorologiques n'a présenté globalement aucune rupture (*Tableau 1*). Pour les pluies annuelles, ce test montre qu'il n'y a eu aucune rupture de la stationnarité sur la plupart des stations testées. La seule rupture est observée en 1969 pour la station de Parakou. Par contre le test de Pettitt montre une rupture nette pour l'année 1969 à Natitingou, Parakou et Cotonou. Un peu décalé pour les deux autres stations où la rupture s'observe juste un an plus tard à Savè; pour ce qui est du cas de la station de Bohicon la rupture est encore plus tardive, vers 1980 (*Tableau 1*). La méthode bayésienne de Lee et Heghinian (*Tableau 1*) trouve de ruptures pour trois (03) stations sur cinq (05) à savoir Natitingou et Parakou en 1969 et juste un an plus tard à Savè comme dans le cas du test de Pettitt. La nouvelle méthode de tests d'identification explorée dans cette étude (Cross-Entropy : CE) trouve de rupture sur les stations testées même si les autres méthodes n'en détectent pas. Elle est tellement robuste que nous pouvons déterminer le nombre de ruptures souhaité. Du fait que nous soupçonnions trois ruptures sur les divers indices pluviométriques des *Figures 2 à 7*; nous a poussé à commencer par la recherche de trois, deux et puis une rupture. Plus le nombre de ruptures demandé par la méthode de Cross-Entropy diminue plus la (les) rupture(s) la(les) plus significative (s) est (sont) sélectionnée(s). Par suite les trois ruptures identifiées par la méthode de Cross-Entropy, comme le montre le *Tableau 1*, sont 1950, 1969 et 1988, qui coïncident avec les divers résultats obtenus au niveau des *Figures 2 à 7*.

Tableau1 : Récapitulatifs des divers tests statistiques réalisés

Position	Pettitt	Lee et heghinian	Hubert	Cross-Entrpy (3)	Cross-Entrpy(2)	Cross-Entrpy(1)
Natitingou	1969	1969	-	1950 1969 1988	1969 1988	1969
Parakou	1969	1969	1969	1950 1969 1988	1969 1988	1969
Savè	1970	1970	-	1975 1980 1985	1975 1980	1975
Bohicon	1986	-	-	1950 1971 1986	1950 1971	1950
Cotonou	1969	-	-	1950 1969 2002	1950 1969	1969

On retient que trois ruptures sont identifiées sur le bassin de l'Ouémé à savoir une première rupture dans les années 1950 c'est-à-dire juste avant l'amorçage de la période humide qui prend fin en 1969. A elle, succède une période sèche qui a véritablement marqué l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest comme le signalent [21] en montrant l'importance de ce déficit et sa variation régionale pour la période 1970 - 1989 par comparaison à la période 1950 - 1969. La fin de la période sèche en 1988 (dans le cas présent) conduit à une période un peu plus humide, certains auteurs comme [8, 22] parlent de retour à de conditions humides de la période 1940 - 1970. Une remarque fondamentale attire notre attention à la relecture des **Figures 4 et 5** et du **Tableau 1** : les éventuelles ruptures observées à Savè. Reconnu comme une zone de transition entre le régime unimodal au nord et bimodal au sud, Savè reçoit d'avantage de pluie que les autres régions. Etant soumis à deux dynamiques pluviométriques différentes, en amont d'une part, et d'autre part en aval ; il ne peut répondre que de façon aléatoire à l'une ou l'autre des deux régimes. Et l'abondance de sa pluviométrie dans les années 30 cache l'effectivité des dates de ruptures (qui peuvent être un peu plus courtes ou un peu plus longues). Les indices calculés sur la période 1950 - 2011 au niveau de la même station (**Figure 3**) permettent de régler un temps soit peu cette situation. Comment évaluer donc la répartition spatiale de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin de 1930 à 2011 ?

3-3. Variabilité spatiale de la pluviométrie sur le bassin de l'Ouémé

La réponse à cette question nous amène à rechercher la variabilité spatiale des écarts sous chaque période. Signalons d'ors et déjà qu'à l'intérieur de chaque sous-période coexistent des années à forte abondance pluviométrique et d'autres à faible pluviométrie.

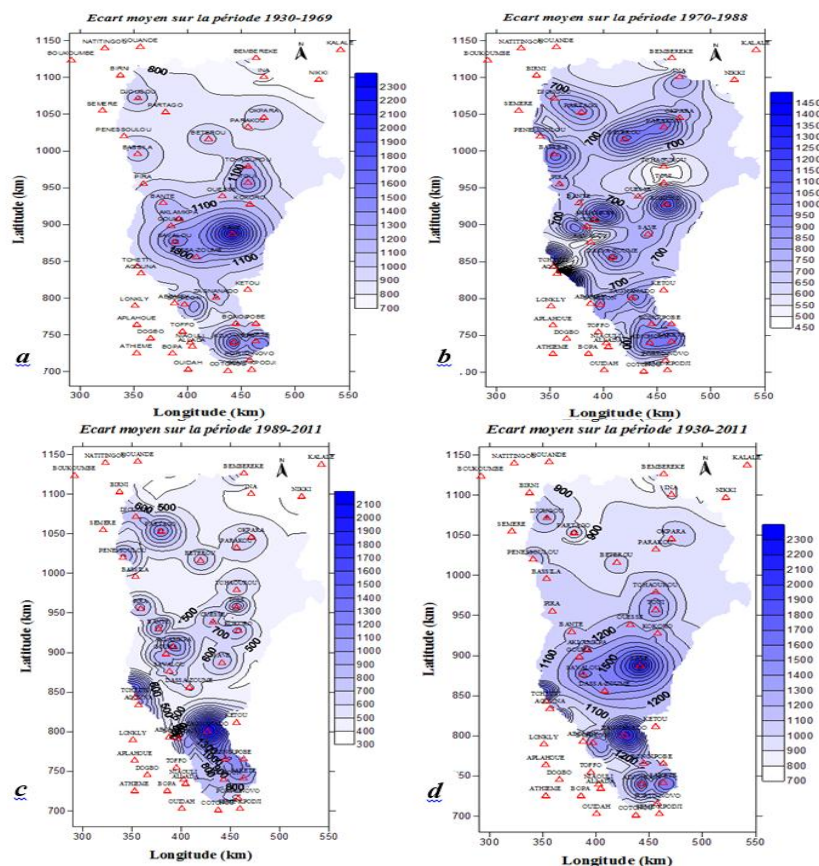


Figure 8 : *Ecart-type de la pluviométrie moyenne suivant chaque sous-période étudiée (a, b, et c) et suivant la période d'étude (d)*

La **Figure 8a** décrit que de fortes variabilités s'observent à Savè. L'écart moyen calculé est la différence entre les valeurs pluviométriques maximales et minimales obtenues dans cette période de 1930 - 1969. Les plus fortes valeurs sont obtenues en 1934 et les plus faibles en 1958 avec un écart maximal à Savè de plus de 2000 mm de pluviométries ; toutefois, ce déficit de 1958 n'a influencé ni l'allure de l'indice pluviométrique, ni la pluviométrie des années suivantes (qui au contraire se sont montrées plus ou moins excédentaires). Pour la période 1970 - 1988 (**Figure 7b**) la variabilité est beaucoup plus diverse avec deux extrêmes, les minima en 1982 et les maxima en 1978. Zagnanado et Bohicon ont connu les plus fortes variabilités durant les années 1989 - 2011 (**Figure 8c**) avec la pluviométrie maximale en 2011 et celle minimale en 2002. On constate avec les **Figures 6 et 7** qu'à partir des années 2000 la pluviométrie s'est accrue jusqu'à 2011 dans le sud du Bassin de l'Ouémé ; ce qui renseigne sur le retour à de conditions humides dans le Sud. La zone de Savè d'après la **Figure 8a** a enregistré plus de pluies durant la période 1930 - 1969 suivie de Dassa-Zoumè, Savalou, Sakété, Toui et Adjohoun. Malgré que la période soit traitée d'humide le nord du bassin a reçu une pluviométrie moyenne marquant l'absence totale de gradient pluviométrique. La période 1970 - 1988 (**Figure 8b**) montre une variabilité spatiale sur le bassin avec une concentration plus ou moins exprimée de la pluviométrie dans le centre et le sud du bassin. Le Sud du bassin à savoir Kétou et Zagnanado est le plus mouillé. Globalement (**Figure 8d**) durant toute la période 1930 - 2011, le centre suivi du sud du bassin sont les plus arrosés. D'un point de vue spatial, les grandes tendances observées sur les écarts pluviométriques sont elles identiques à celles des caractéristiques de la saison des pluies ?

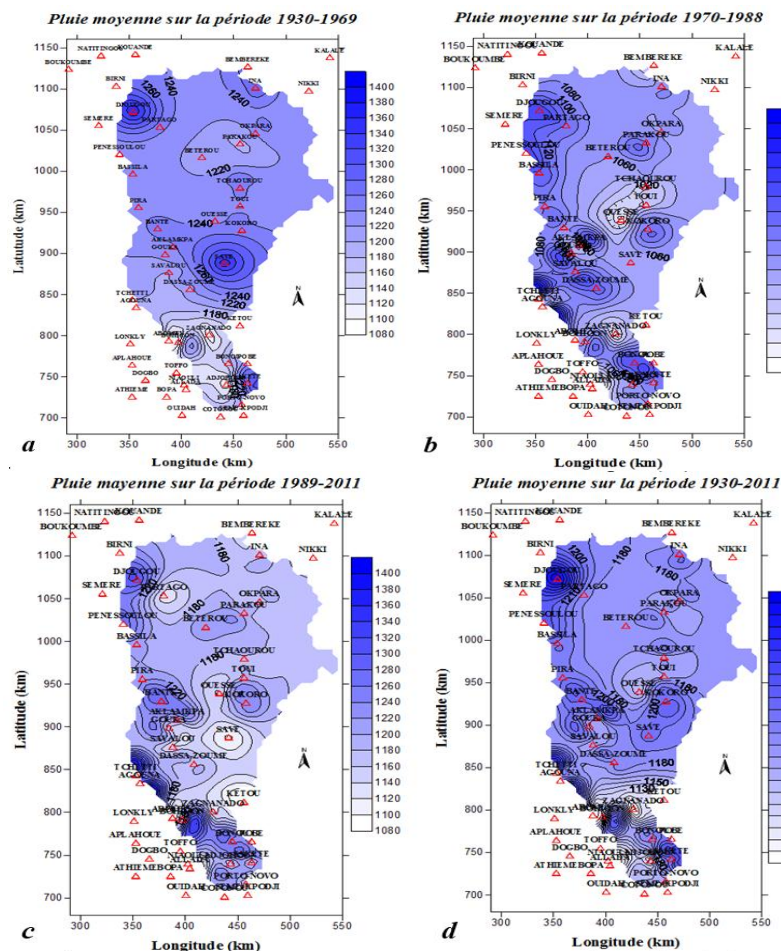
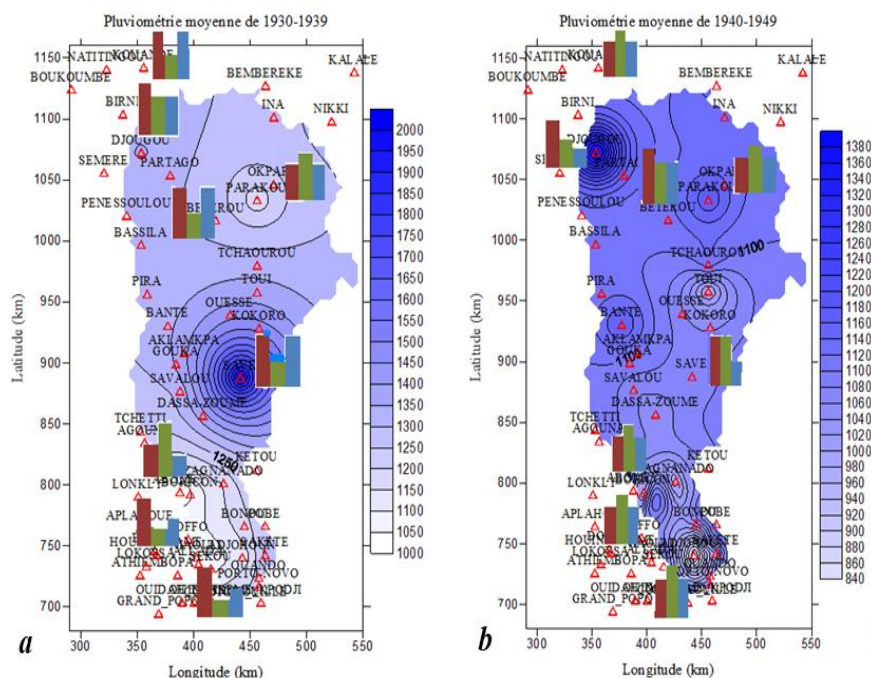


Figure 9 : Pluviométrie moyenne suivant chaque sous-période étudiée (a, b, et c) et suivant la période d'étude (d)

L'étude de la variabilité interannuelle spatiale confirme que la période 1970 - 1988 est globalement sèche avec un maximum de 1260 mm contre 1400 mm sous la période 1930 - 1969. Le retour aux conditions humides exprimées plus haut s'illustre aussi par l'enregistrement d'une pluviométrie moyenne de 1400 mm entre 1989 et 2011. Il existe aussi un gradient pluviométrique Est-Ouest sur l'ensemble du bassin. Le gradient est beaucoup plus prononcé dans le nord Ouest, ce qui confirme la persistance du gradient Est-Ouest des précipitations mis en évidence par [23] sur toute la haute vallée de l'Ouémé avec des données sur la période 1999 - 2005. Dans le souci de mieux comprendre les tendances de variabilités spatiales sur le bassin, nous proposons zoomer sur des périodes décennales et y associer la variabilité temporelle sur quatre zones stratégiques à savoir : Natitingou Parakou, Bététou, Djougou, Savè, Bohicon, Lokossa et Cotonou. La décennie 1930 - 1939 s'avère humide que toutes les autres sur la période 1930 - 2011, avec comme nous l'avons souligné plus haut 1934 comme l'année la plus humide et qui a influencée le cumul décennal 1930 - 1939. Savè demeure la ville la plus mouillée (*Figure 9a*). nous constatons un équilibre entre nombre d'années sèches et humide du centre au nord du bassin avec 40 % d'années sèches et 40 % d'années humides contre 20 % d'années jugées de normale à Natitingou, Bététou et Savè. A Djougou nous enregistrons 30 % d'années normales et sèches et 40 % de sécheresse. Malgré les fortes pluviométries de cette sous-période sur le bassin, le sud est moins arrosé avec 50 % d'années déficitaires (comparaison faite à l'interne de cette période). Les sous périodes 1940 - 1949 et 1950 - 1959 sont globalement identiques en variabilité temporelle avec approximativement les moyennes spatiales. Le gradient pluviométrique Est-Ouest est perceptible au nord du bassin et une concentration singulière dans certaines régions. La moyenne spatiale sur la période 1960 - 1969 est constante (*Figure 10d*). Par contre on y enregistre de fortes variabilités temporelles marqué par diverses périodes sèches (à l'interne de la sous-période), humides et normale. 1970 - 1989 (*Figures 11a et 11b*) sont globalement sèches comparativement aux cumuls des autres années. Cela confirme les résultats comme nous l'avons démontré et illustré plus haut que la période 1970 - 1979 est sèche. Mais à l'intérieur de cette sous période certaines années rendent plus sévère le bilan pluviométrique global de la sous-période ; avec par exemple l'indice de Nicholson proche de -2 en 1970 et 1974 à Parakou ; Bantè et Savè aussi proche de -2 en 1977. Dans cette sous période la sécheresse à beaucoup plus atteint le nord du bassin que le Sud. Le gradient Est-Ouest est bien clair et couvre l'ensemble du bassin.



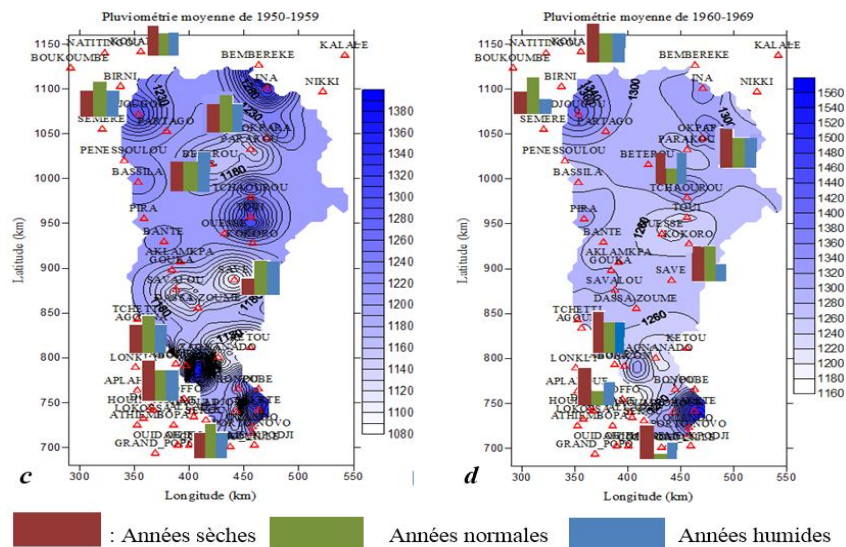


Figure 10 : Pluviométrie décade moyenne sur a (1930 - 1939), b (1940 - 1949), c (1950 - 1959) et d (1960-1969)

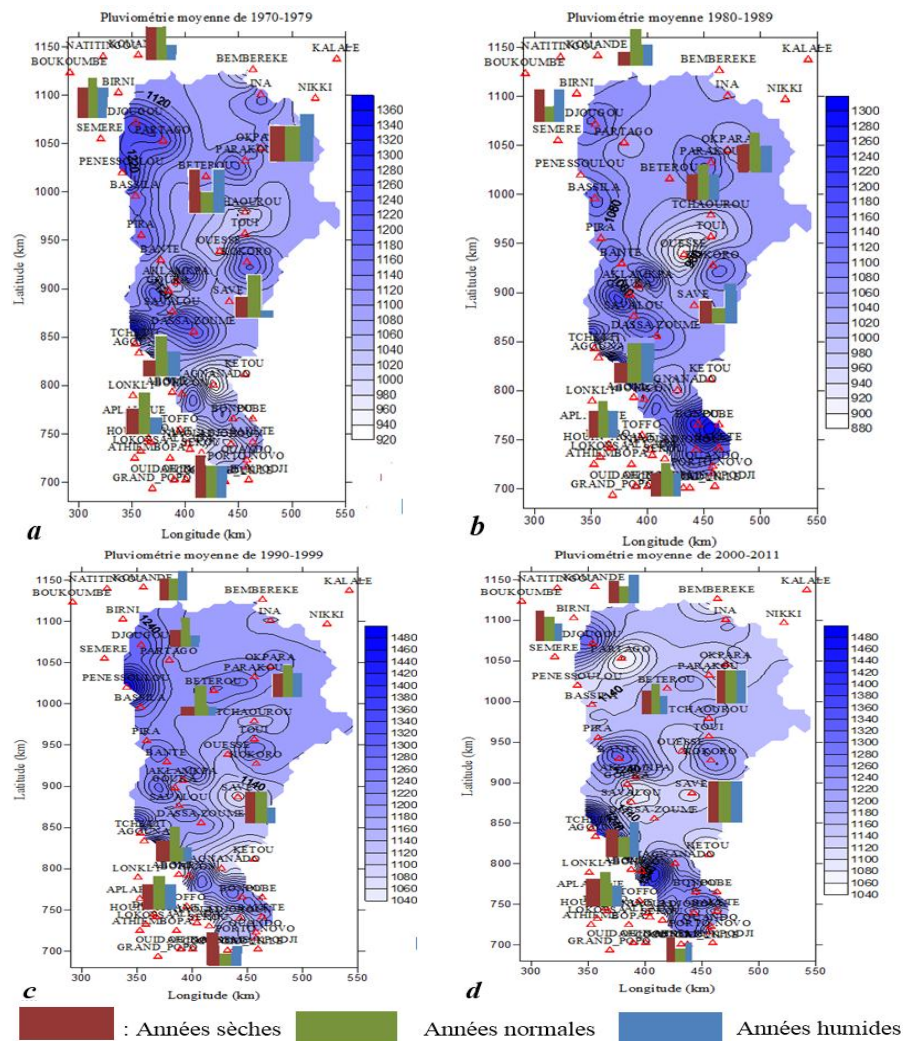


Figure 11 : Pluviométrie décade moyenne sur a (1970 - 1979), b (1980 - 1989), c (1990 - 1999) et d (2000 - 2011)

1990 - 2011 montres la reprise de période humide avec une augmentation du cumul pluviométrique moyen spatial (**Figure 11d**). Le gradient Est-Ouest reste inchangé et les extrémums s'obtiennent aux mêmes endroits. Quand à la variabilité temporelle, on observe globalement la même tendance de variabilités au Sud et du Centre au Nord-Ouest du bassin. L'Est est beaucoup plus couvert moyennement avec un équilibre parfait être les diagrammes.

4. Conclusion

En somme, nous retenons à la fin de cette étude que trois ruptures sont globalement observées sur le bassin de l'Ouémé, le première en 1950 ; la seconde en 1969 et la dernière beaucoup plus variable mais toute fois dans les années 1990 et vers 2000 dans le Sud du bassin. Un retour à une tendance de pluviométrie moyenne normale des années 1950 s'observe de part et d'autre après 1990. Certaines parties du bassin ont très tôt renoué avec des années humides en 1990 et d'autres un peu plus tard vers 2000 surtout les zones se trouvant en dessous de la latitude 6°N. Aussi pouvons-nous signaler l'existence d'un gradient Est-Ouest beaucoup plus affiné dans le Nord-Est malgré la forte variabilité de la pluviométrie sur l'ensemble de la période d'étude. La zone la plus arrosée sur toute la période est Savè, Kokoro et Zagnanado ; lesquelles régions constituent des zones éco-agronomique du Bénin.

Références

- [1] - F. GAUTIER, H. LUBES-NIEL, R. SABATIER, J. M. MASSON, J. E. PATUREL & E. SERVAT, Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1959. Hydrol. Sci. J., 43 (6) (1998) 921 - 936.
- [2] - E. AMOUSSOU, P. CAMBERLIN et G. MAHE, Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Ouest Afrique). Hydrol. Sci. J., 57 (4) (2012) 805 - 817.
- [3] - L. LE BARBE, G. ALE, B. MILLET, H. TEXIER, Y. BOREL, Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris, ORSTOM, (1993) 540 p.
- [4] - S. E. NICHOLSON, J. KIM, J. HOOPINGARNER, Atlas of African rainfall and its interannual variability. Édit. Department of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Floride, USA, (1988) 237 p.
- [5] - P. J. LAMB, Persistence of Subsaharan drought. Nature 299, (1982) 46 - 47.
- [6] - P. J. LAMB, Rainfall in Subsaharan West Africa during 1941—83. Z. Gletscherk. Glazialgeol. 21, (1985) 131 - 139.
- [7] - A. 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 Niño/La Niña). *Sécheresse*, vol. 10, n° 4, (1999) p 245 - 252.
- [8] - R. M. N FOSSOU, T. LASM, N. SORO, T. SORO, G. SORO, O. Z. DE LASME, D. BAKA, O. Z. ONETIE, R. OROU, 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*, ISSN 1112-3680, n° 21, Mars (2015) pp 97 - 120.
- [9] - DAO AMIDOU, KAMAGATE BAMORY, MARIKO ADAMA GOULA BI TIE ALBERT, SEGUIS LUC, MAIGA, HAMADOUN BOKAR AND SAVANE ISSIAKA, 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, No 4 (2010) pp 435 - 444.

- [10] - H. LUBES, J. M. MASSON, E. SERVAT, J. E. PATUREL, B. KOUAME & J. F. BOYER, Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistique-étude bibliographique, ORSTOM, Montpellier, France, Rapport, no 3 (1994).
- [11] - A. F. S. LEE & S. M. A HEGHINIAN, shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables : a Bayesian approach. *Technometrics*, 19 (4) (1977) 503 - 506.
- [12] - JEROME MORIO, RUDY PASTEL et FRANÇOIS LE GLAND, Estimation de probabilités et de quantiles rares pour la caractérisation d'une zone de retombée d'un engin. *Journal de la Société Française de Statistique*, Vol 152 No, 4 (2011) 1 - 29.
- [13] - R. Y. RUBINSTEIN, and D. P. KROESE, *The Cross-Entropy Method : A Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte-Carlo Simulation and Machine Learning*. Springer-Verlag, New York, (2004).
- [14] - R. Y. RUBINSTEIN, Cross-Entropy and Rare-Events for Maximal Cut and Bipartition Problems. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, (2002) 27 - 53.
- [15] - R. Y. RUBINSTEIN, The Simulated Entropy Method for Combinatorial and Continuous Optimization. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 2 (1999) 12 - 190.
- [16] - I. COHEN, B. GOLANY, and A. SHTUB, "Managing stochastic finite capacity Multi-Project systems through the Cross-Entropy method." *Annals of operations research*, 134 (2005) 183 - 199.
- [17] - L. LE BARBÉ and T. LEBEL, Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years, 1950 - 1990. *J. Hydrol*, 188 - 189, (1997) 43 - 73.
- [18] - S. E. NICHOLSON, Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. In: desanker P. (ed.) *Africa and global climate change. CR Special 8. Clim. Res.*, 17 (2001) 123 - 144.
- [19] - A. ALI and T. LEBEL, The Sahelien standardized rainfall index revisited. *Int. J. Climatol.*, 29 1705 - 1714 (2008), doi : 10.1002/ joc. 1832.
- [20] - G. QUENUM, L. D. MAYEUL, Caractérisation et spatialisation des données pluviométriques du bassin de l'Ouémé. *Mémoire Master-2 recherche. UAC/FAST/CIPMA. Cotonou, Bénin*, (2011) 85 p.
- [21] - T. LEBEL, F. DELCLAUX, L. LE BARBÉ and J. POLCHER, From GCM scales to hydrological scales : rainfall variability in West Africa. *Stochastic Environ. Research and Risk Assessment*, (14) (2000) 275 - 295.
- [22] - T. LEBEL and A. ALI, Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990 - 2007), *Journal of Hydrology* 375; (2009) 52 - 64.
- [23] - E. A. LAWIN, Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute vallée de l'Ouémé à partir des données de pluie AMMACATCH Bénin. *Thèse de Doctorat, INP Grenoble, France*, (2007) 231 p.